



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE
ANÁLISIS DE ESFUERZOS PARA ENSAYOS DE
FLEXIÓN EN SISTEMAS ISOSTÁTICOS E
HIPERESTÁTICOS”**

**BONILLA NOVILLO SAYURI MONSERRATH
LÓPEZ ORTIZ SANTIAGO ALEJANDRO**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2012

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

Noviembre, 29 de 2012

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

BONILLA NOVILLO SAYURI MONSERRATH

Titulada:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS
PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN EN SISTEMAS ISOSTÁTICOS E
HIPERESTÁTICOS”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Geovanny Novillo A.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Aníbal Viñán B.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Geovanny Novillo A.
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: SAYURI MONSERRATH BONILLA NOVILLO

TÍTULO DE LA TESIS: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN EN SISTEMAS ISOSTÁTICOS E HIPERESTÁTICOS”

Fecha de Examinación: Noviembre, 29 de 2012.

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Telmo Moreno R. (PRESIDENTE TRIB. DEFENSA)			
Ing. Aníbal Viñán B. (DIRECTOR DE TESIS)			
Ing. Geovanny Novillo A. (ASESOR)			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Presidente del Tribunal

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

Noviembre, 29 de 2012

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

LÓPEZ ORTIZ SANTIAGO ALEJANDRO

Titulada:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS
PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN EN SISTEMAS ISOSTÁTICOS E
HIPERESTÁTICOS”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Geovanny Novillo A.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Aníbal Viñán B.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Geovanny Novillo A.
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: SANTIAGO ALEJANDRO LÓPEZ ORTIZ

TÍTULO DE LA TESIS: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN EN SISTEMAS ISOSTÁTICOS E HIPERESTÁTICOS”

Fecha de Examinación: Noviembre, 29 de 2012.

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Telmo Moreno R. (PRESIDENTE TRIB. DEFENSA)			
Ing. Aníbal Viñán B. (DIRECTOR DE TESIS)			
Ing. Geovanny Novillo A. (ASESOR)			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Presidente del Tribunal

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Sayuri Monserrath Bonilla Novillo

Santiago Alejandro López Ortiz

DEDICATORIA

A Dios, por todo el amor con el que me rodea; por darme las fuerzas para seguir adelante y no desmayar ante los problemas, obstáculos y tropiezos que se me han presentado, por darme al ser más maravilloso en mi vida mi MAMI.

A mi adorada madre, quien ha dedicado su vida entera a cuidarme y protegerme; con su amor, cariño, apoyo, consejos y comprensión ha sabido cultivar mis principios, mis valores, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia y mi coraje para conseguir mis objetivos. Eres mi ejemplo de lucha y perseverancia. Tu labor de padre y madre conmigo es la mejor, por ti hoy soy lo que soy. A mi querida abuelita, quien ha sido parte fundamental en mi vida, con su ternura a calmado mis momentos de angustia y dolor; con su amor de madre a cultivado en mí valores que me han ayudado en mi formación.

A mi familia, en especial a mis tíos y primos, por el amor, cariño y confianza que día a día depositan en mí. A mi pequeña Camilita, que con sus travesuras, palabras y sonrisas ha convertido mis momentos de tristeza en grandes alegrías. A mis queridos amigos, por todos los momentos que hemos compartido, por el apoyo que me han brindado, por ser mis confidentes y consejeros, no cabe duda que son los ángeles que me han tomado de la mano cuando se me ha olvidado de como volar, siempre los llevo en mi corazón.

Sayuri Monserrath Bonilla Novillo

Esta tesis la dedico a mi madre por haber sido un ejemplo de superación y lucha, brindándome siempre su apoyo, cariño y aliento para desarrollarme como profesional y como persona.

Santiago Alejandro López Ortiz

AGRADECIMIENTO

Mi mayor agradecimiento le doy a Dios por todas las bendiciones que me ha dado, por la sabiduría con la que me ayuda a enfrentar la vida de la mejor manera y por guiarme hacia un buen camino. A mi familia, en especial a mi mami por el apoyo que incondicionalmente siempre me brinda y por la fortaleza que me ha dado para cumplir con esta meta.

De manera especial le agradezco al Ing. Aníbal Viñán, Director de tesis y al Ing. Geovanny Novillo, Asesor de tesis, quienes con sus conocimientos y apoyo ayudaron al desarrollo y culminación de esta investigación.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, especialmente a la Escuela de Ingeniería Mecánica, a mis maestros quienes con sus conocimientos me ayudaron a formarme como profesional, a doña Laurita Peñafiel por el apoyo brindado durante el desarrollo de la carrera.

Sayuri Monserrath Bonilla Novillo

Agradezco a Dios por darme la fortaleza para salir adelante. A mis padres, hermanos y familiares por todo el cariño y apoyo brindado, que permitieron no derrotarme en los momentos difíciles de ésta carrera.

Mi sincero agradecimiento al Ing. Aníbal Viñán por guiarme, apoyarme y depositar en mí mucha confianza, sus consejos, empeño y dedicación han permitido desarrollar de la mejor manera esta tesis, al Ing. Geovanny Novillo por aportar con ideas valiosas y ayudarnos en la solución de problemas que se presentaron durante la ejecución de la misma.

Y en especial a todos los amigos, compañeros y personas que me apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito éste trabajo.

Santiago Alejandro López Ortiz

CONTENIDO

	Pág.
1. GENERALIDADES Y OBJETIVOS	
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Definiciones de estructura.....	4
2.2 Clasificación de las estructuras.....	4
2.2.1 <i>Estructuras verticales y horizontales</i>	4
2.2.2 <i>Estructuras rígidas y articuladas</i>	5
2.2.3 <i>Estructuras simples y reticulares</i>	6
2.2.4 <i>Estructuras isostáticas e hiperestáticas</i>	8
2.3 Esfuerzo.....	12
2.3.1 <i>Concepto de esfuerzo</i>	12
2.3.2 <i>Unidades del esfuerzo</i>	12
2.3.3 <i>Tipos de esfuerzos</i>	13
2.4 Deformación.....	18
2.4.1 <i>Deformación total</i>	18
2.4.2 <i>Deformación unitaria</i>	19
2.4.3 <i>Relación esfuerzo – deformación unitaria</i>	19
2.4.4 <i>Coefficiente de Poisson</i>	20
2.4.5 <i>Módulo de Young</i>	20
2.5 Flexión.....	21

2.5.1	<i>Flexión pura</i>	21
2.5.2	<i>Flexión compuesta</i>	21
2.5.3	<i>Flexión simple</i>	22

3. FUNDAMENTOS DE EXTENSOMETRÍA

3.1	Medición de deformación.....	23
3.1.1	Tipos de medidores de deformación.....	23
3.1.2	Selección del medidor de deformación adecuado.....	26
3.2	Características de los equipos y accesorios.....	27
3.2.1.1	<i>Principio de funcionamiento</i>	27
3.2.1.2	<i>Campos de aplicación</i>	28
3.2.1.3	<i>Relación entre cambio de deformación y conductividad eléctrica</i>	29
3.2.1.4	<i>Características dimensionales</i>	30
3.2.1.5	Parámetros dimensionales.....	31
3.2.1.6	<i>Factores externos que afectan la medición en las galgas extensométricas</i>	33
3.2.1.7	<i>Materiales usados para el montaje de la galga extensométrica</i>	34
3.2.1	Galgas extensométricas.....	37
3.3	Puente de Wheatstone.....	39

4. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

4.1	Características del banco de pruebas.....	42
4.1.1	Vigas.....	42
4.1.2	Apoyos.....	43
4.1.3	Distancia entre apoyos.....	43
4.1.4	Carga.....	45

4.1.5	Puntos de medición.....	45
4.1.6	Galgas extensométricas.....	46
4.1.7	Portapesas.....	46
4.2	Diseño de los elementos del banco de prueba.....	47
4.2.1	Cálculo de las dimensiones de las pesas.....	47
4.2.1.1	<i>Cálculo de las dimensiones de las pesas.....</i>	48
4.2.1.2	<i>Pesas ranuradas.....</i>	49
4.2.2	Diseño de los apoyos.....	49
4.2.2.1	<i>Apoyos para viga simplemente apoyada.....</i>	49
4.2.2.2	<i>Modelo de viga en voladizo.....</i>	67
4.2.2.3	<i>Resistencia del portapesas.....</i>	68
4.2.2.4	<i>Selección de rodamientos.....</i>	72
5.	ADQUISICIÓN DE DATOS Y VALIDACIÓN	
5.1	Adquisición de datos.....	75
5.1.1	Sistema de adquisición de datos.....	75
5.1.2	Descripción de los componentes de un sistema DAQ.....	75
5.1.2.1	<i>Sensor.....</i>	75
5.1.2.2	<i>Dispositivo DAQ.....</i>	76
5.1.2.3	<i>Ordenador.....</i>	77
5.1.3	Descripción de los componentes utilizados en el sistema de adquisición de <i>datos.....</i>	77
5.1.3.1	<i>Descripción de los sensores.....</i>	78
5.1.3.2	<i>Descripción del dispositivo DAQ.....</i>	79
5.1.3.3	<i>Descripción de los componentes del dispositivo Compact DAQ.....</i>	80

5.1.3.4	<i>Descripción de los elementos de conexión.....</i>	81
5.1.4	Conexión de los módulos a sus respectivos sensores.....	84
5.1.5	Programación.....	84
5.2	Calibración del sistema y obtención de datos teóricos.....	105
5.2.1	Comprobación del funcionamiento del puente de Wheatstone.....	106
5.2.1.1	<i>Calibración de los sensores y programa LabView.....</i>	106
5.2.1.2	<i>Calibración de los sensores y programa LabView utilizando la máquina universal y una barra de acero como probeta.....</i>	107
5.2.1.3	<i>Calibración de los sensores y programa LabView utilizando pesas y una barra de acero como probeta.....</i>	107
5.2.1.4	Ecuaciones utilizadas en el programa LabView para encontrar el valor de la flecha.....	108
5.2.1.5	<i>Determinación de la flecha real leída por el deformímetro para el caso de viga en voladizo.....</i>	109
5.2.1.6	<i>Determinación del error porcentual existentes en los deformímetro.....</i>	111
5.2.2	Obtención de datos teóricos.....	111
5.2.2.1	Cálculo del módulo de elasticidad real de la viga.....	111
5.2.2.2	Cálculo de reacciones, momentos, deformación y esfuerzos para el caso de 2 apoyos.....	111
5.2.2.3	Cálculo de reacciones, momentos, deformación y esfuerzos para el caso de 3 apoyo.....	118
5.2.2.4	Cálculo de reacciones, momentos, deformación y esfuerzos para el caso de 4 apoyos.....	131
5.2.2.5	Cálculo de reacciones, momentos, deformación para el caso de la viga en	

	voladizo.....	141
5.2.3	Datos obtenidos con software LabView.....	146
5.2.3.1	Viga con dos apoyos.....	147
5.2.3.2	Viga con tres apoyos.....	149
5.2.3.3	Viga con cuatro apoyos.....	150
5.2.3.4	Medición puntual.....	151
5.2.3.5	Viga en voladizo.....	151
5.2.4	Comprobación de datos con software de aplicación SAP 2000.....	152
5.2.5	Comprobación de datos con software CAE.....	160
5.3	Análisis y comparación de resultados.....	174
6.	CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y COSTOS DEL SISTEMA	
6.1	Construcción del banco de pruebas.....	184
6.1.1	Descripción del proceso de construcción.....	184
6.1.2	Diagrama de procesos.....	184
6.2	Montaje del sistema de medición.....	185
6.2.1	Descripción del proceso de montaje.....	185
6.2.2	Diagrama de procesos.....	185
6.2.3	Proceso de montaje de las galgas extensométricas.....	186
6.2.4	Proceso de montaje de los elementos de conexión.....	187
6.3	Tiempo empleado en la construcción y montaje.....	188
6.4	Flujogramas de construcción y montaje de cada uno de los elementos del banco de pruebas.....	190
6.5	Costos del proyecto.....	195

6.5.1	Costos directos.....	195
6.5.2	Costos indirectos.....	198
6.5.3	Costos totales.....	198
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
7.1	Conclusiones.....	199
7.2	Recomendaciones.....	200

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

LINKOGRAFÍA

ANEXOS

PLANOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Tipos de medidores de deformación.....	26
2 Materiales de unión.....	37
3 Materiales de protección.....	38
4 Valores de carga máxima y distancias aplicadas según el tipo de flexión...	45
5 Valores del factor de esfuerzos estáticos según las exigencias de carga.....	73
6 Entradas y salidas existentes en la pantalla del menú principal.....	85
7 Entradas y salidas existentes en la pantalla de la activación de puertos.....	86
8 Entradas y salidas existentes en la pantalla de la medición en los cuatro puntos.....	87
9 Entradas y salidas existentes en la pantalla de la medición puntual.....	88
10 Entradas y salidas existentes en la pantalla de la medición para viga en voladizo.....	88
11 Entradas y salidas existentes en la pantalla de calibración.....	88
12 Resultados obtenidos para la calibración de los sensores y del programa LabView mediante la utilización de la máquina universal y la barra de acero.....	106
13 Resultados obtenidos para la calibración de los sensores y del programa LabView mediante la utilización de las pesas y la barra de acero.....	107
14 Datos de la flecha medidos para el caso de viga en voladizo.....	108
15 Datos utilizados para encontrar el valor real de la columna de la viga en voladizo.....	109
16 Datos para encontrar el valor de la flecha de viga en voladizo.....	110
17 Valores tomados para calcular el error porcentual en los deformímetros....	111
18 Valores de E experimentales.....	112
19 Valores de flecha (mm) para cada valor de distancia de la viga con dos apoyos articulados.....	117
20 Valores de esfuerzo (kg/cm^2) para cada valor de distancia de la viga con dos apoyos articulados.....	118

21	Valores de flecha (mm) para distintos valores de carga y distancias de la viga con tres apoyos articulados.....	130
22	Valores de esfuerzo (kg/cm^2) para distintos valores de carga y distancias de la viga con tres apoyos articulados.....	130
23	Valores de flecha (mm) para distintos valores de carga y distancias de la viga con cuatro apoyos articulados.....	140
24	Valores de esfuerzo (kg/cm^2) para distintos valores de carga y distancias de la viga con cuatro apoyos articulados.....	141
25	Valores de flecha (mm) para distintos valores de carga y distancias de la viga en voladizo.....	145
26	Valores de esfuerzo (kg/cm^2) para distintos valores de carga y distancias de la viga en voladizo.....	145
27	Valores de esfuerzo (kg/cm^2) para diferentes cargas en el caso de la viga con dos apoyos articulados obtenido del software LabView.....	148
28	Valores de esfuerzo (kg/cm^2) para diferentes cargas en el caso de la viga con tres apoyos articulados obtenido del software LabView.....	149
29	Valores de esfuerzo (kg/cm^2) para diferentes cargas en el caso de la viga con cuatro apoyos articulados obtenido del software LabView.....	150
30	Valores de deformación unitaria para diferentes cargas en el caso de la viga con dos apoyos articulados obtenido del software LabView.....	151
31	Valores de flechas (mm) con diferentes cargas para el caso de dos apoyos articulados obtenidos del software SAP2000.....	157
32	Valores de flechas (mm) con diferentes cargas para el caso de tres apoyos articulados obtenidos del software SAP2000.....	158
33	Valores de flechas (mm) con diferentes cargas para el caso de cuatro apoyos articulados obtenidos del software SAP2000.....	159
34	Valores de flechas (mm) con diferentes cargas para el caso de viga en voladizo obtenidos del software SAP2000.....	160
35	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con dos apoyos y $P=200$ kg.....	165

36	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con dos apoyos y $P=190$ kg.....	165
37	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con dos apoyos y $P=180$ kg.....	166
38	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con dos apoyos y $P=170$ kg.....	166
39	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con tres apoyos y $P_1=100$ kg, $P_2=100$ kg.....	168
40	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con tres apoyos y $P_1=90$ kg, $P_2=90$ kg..	168
41	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con tres apoyos y $P_1=80$ kg, $P_2=80$ kg..	168
42	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con tres apoyos y $P_1=70$ kg, $P_2=70$ kg..	168
43	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con cuatro apoyos, $P_1=80$ kg, $P_2=80$ kg, $P_3=40$ kg.....	170
44	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con cuatro apoyos, $P_1=70$ kg, $P_2=70$ kg, $P_3=40$ kg.....	170
45	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con cuatro apoyos, $P_1=60$ kg, $P_2=60$ kg, $P_3=40$ kg.....	171
46	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con cuatro apoyos, $P_1=50$ kg, $P_2=50$ kg, $P_3=40$ kg.....	171
47	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga en voladizo y $P=90$ kg.....	173
48	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria	

	en cada punto para el caso de viga en voladizo y P=80 kg.....	173
49	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga en voladizo y P=70 kg.....	173
50	Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga en voladizo y P=60 kg.....	173
51	Comparación de resultados obtenidos de flechas (mm) para la viga con dos apoyos.....	174
52	Comparación de resultados obtenidos de flechas (mm) para la viga apoyada con tres apoyos.....	175
53	Comparación de resultados obtenidos de flechas (mm) para la viga apoyada con cuatro apoyos.....	176
54	Comparación de resultados obtenidos de flechas (mm) para la viga apoyada con dos apoyos (medición puntual).....	177
55	Comparación de resultados obtenidos de flechas (mm) para la viga en voladizo.....	178
56	Comparación de resultados obtenidos de esfuerzos (kg/cm ²) para la viga con dos apoyos.....	179
57	Comparación de resultados obtenidos de esfuerzos (kg/cm ²) para la viga con tres apoyos.....	180
58	Comparación de resultados obtenidos de esfuerzos (kg/cm ²) para la viga con cuatro apoyos.....	181
59	Comparación de resultados obtenidos de esfuerzos (kg/cm ²) para la viga en voladizo.....	182
60	Lista de materiales para el montaje de las galgas extensométricas.....	186
61	Lista de materiales para el montaje de los elementos de conexión.....	187
62	Tiempo empleado en cada uno de los procesos de construcción y montaje de los elementos del banco de pruebas.....	188
63	Tiempo de construcción del banco de pruebas.....	195
64	Costos de materiales.....	195
65	Costos de mano de obra.....	197
66	Costos de maquinaria y equipos.....	197

67	Costo total directo.....	198
68	Costos indirectos.....	198
69	Costo total.....	198

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1	Ejemplo de estructura vertical..... 5
2	Ejemplo de estructura horizontal..... 5
3	Ejemplo de estructura rígida..... 5
4	Ejemplo de estructura articulada..... 6
5	Ejemplo de estructura simple..... 6
6	Ejemplo de estructuras reticulares..... 6
7	Ejemplo de estructuras reticulares planas..... 7
8	Ejemplo de estructuras reticulares planas estáticamente determinadas..... 7
9	Ejemplo de estructura reticular tridimensional..... 7
10	Ejemplo de estructuras reticulares de nudos rígidos..... 8
11	Viga con un extremo articulado fijo (2 incógnitas) y el otro articulado móvil (1 incógnita)..... 8
12	Viga empotrada en un extremo (3 incógnitas) y libre en el otro..... 9
13	Viga con apoyos articulados fijos en ambos extremos (4 incógnitas)..... 10
14	Viga empotrada en un extremo (3 incógnitas) y sustentada en el otro mediante apoyo articulado móvil (1 incógnita)..... 10
15	Viga empotrada en un extremo (3 incógnitas) y con apoyo articulado fijo en el otro (2 incógnitas)..... 10
16	Viga biempotrada (seis incógnitas). Sistema hiperestático de tercer grado.. 10
17	Pórtico..... 11
18	Pórtico simple..... 11
19	Pórtico a dos aguas..... 11
20	Pórtico con cercha..... 12
21	Esfuerzo axial presente en un prisma rectangular..... 13
22	Esfuerzo tangencial presente en un prisma rectangular..... 13
23	Esfuerzo equivalente de un estado de tensiones..... 14
24	Representación del esfuerzo normal en una viga sometida a flexión..... 16
25	Representación del esfuerzo cortante en una viga sometida a flexión..... 17

26	Gráfica de la curva que relaciona el esfuerzo y la deformación.....	20
27	Elemento sometido a flexión pura.....	21
28	Elemento sometido a flexión compuesta.....	21
29	Elemento sometido a flexión simple.....	22
30	Reloj micrométrico.....	24
31	Extensómetro óptico.....	24
32	Extensómetro por rayo láser.....	25
33	Extensómetro eléctrico.....	25
34	Galga extensométrica metálica.....	28
35	Curva de relación de cambio de resistividad y cambio de deformación unitaria.....	29
36	Características dimensionales de una galga extensométrica.....	30
37	Puentes de conexión.....	39
38	La galga de medición se conecta al puente de Wheatstone.....	40
39	Configuración de medio puente.....	40
40	Configuración de puente completo.....	41
41	Configuración de doble cuarto de puente.....	42
42	Perfil IPE 160.....	42
43	Perfil IPN 80.....	43
44	Esquema del apoyo.....	43
45	Esquema de la viga en voladizo.....	44
46	Distancia entre apoyos para el caso de dos apoyos.....	44
47	Distancia entre apoyos para el caso de tres apoyos.....	44
48	Distancia entre apoyos para el caso de cuatro apoyos.....	44
49	Longitud de fijación de la viga en el pedestal.....	45
50	Esquema de la pesa no ranurada.....	45
51	Esquema de la pesa ranurada.....	46
52	Distancia entre los puntos de medición en los casos de simplemente apoyado.....	46
53	Distancia entre los puntos de medición en el caso de viga en voladizo.....	46

54	Galga extensométrica.....	47
55	Portapesas.....	47
56	Dimensiones de la pesa no ranurada.....	48
57	Dimensiones de la pesa ranurada.....	50
58	Dimensiones del apoyo simple.....	50
59	Esquema de los apoyos A y B.....	50
60	Fuerzas actuantes en el apoyo.....	53
61	Modelo de análisis para el apoyo, realizado en software SAP2000.....	53
62	Esquema de verificación con la relación de esfuerzos en el apoyo.....	54
63	Dimensiones del empotramiento.....	54
64	Esquema de fuerzas y momentos presentes en la viga en voladizo.....	54
65	Diagrama de fuerzas cortantes de la viga en voladizo.....	55
66	Diagrama de momentos flectores de la viga en voladizo.....	59
67	Modelo de análisis para la columna realizado en software SAP 2000.....	59
68	Verificación con la relación de esfuerzos presentes en la columna.....	60
69	Modelo de análisis de la viga en voladizo obtenido mediante el software CAE.....	60
70	Esquema de esfuerzos presentes en la placa base, obtenido con software CAE.....	61
71	Esquema del factor de seguridad para la placa base, obtenido mediante software CAE.....	61
72	Esquema de esfuerzos presentes en el cordón de soldadura, obtenido mediante el software CAE.....	62
73	Esquema del factor de seguridad en el cordón de soldadura, obtenido mediante el software CAE.....	67
74	Esquema del factor de seguridad en el perno, obtenido mediante el software CAE.....	68
75	Esquema de esfuerzos presentes en el portapesas obtenido con el software CAE.....	69
76	Esquema del factor de seguridad en el portapesas, obtenido mediante software CAE.....	69

77	Diagrama de fuerzas en el aplicador de carga.....	70
78	Diagrama de momentos flectores en el aplicador de carga.....	71
79	Esquema de esfuerzos presentes en el aplicador de carga, obtenido con software CAE.....	72
80	Esquema del factor de seguridad en el aplicador de carga, obtenido mediante software CAE.....	72
81	Diagrama de la fuerza actuante en el rodamiento.....	74
82	Rodamiento FAG 6001.....	75
83	Componentes de un sistema DAQ.....	78
84	Galga extensométrica.....	80
85	Componentes del chasis compact DAQ-9172.....	80
86	Módulo NI 9237.....	82
87	Accesorio NI 9949.....	82
88	Accesorio NI 9944.....	83
89	Conexión de puente completo de Wheatstone con accesorio NI 9949.....	84
90	Conexión cuarto de puente de Wheatstone con accesorio NI 9944.....	85
91	Pantalla de proyecto de LabView.....	89
92	Panel frontal para la pantalla del menú principal.....	90
93	Panel frontal para la pantalla de activación de puertos.....	91
94	Panel frontal para la pantalla de medición en los cuatro puntos.....	92
95	Panel frontal para la pantalla de medición puntual.....	93
96	Panel frontal para la pantalla de medición de viga en voladizo.....	94
97	Panel frontal para la pantalla de calibración.....	95
98	Ventana de diagrama de bloques para el menú principal.....	96
99	Ventana de diagrama de bloques para la activación de puertos.....	97
100	Ventana de diagrama de bloques para la medición en los cuatro puntos...	98
101	Ventana de diagrama de bloques para la medición puntual.....	99
102	Ventana de diagrama de bloques para la medición de viga en voladizo.....	100
103	Ventana de diagrama de bloques para la calibración.....	105
104	Probeta utilizada para la comprobación del puente de Wheatstone.....	109
105	Diagrama de carga vs. flecha de la columna de la viga en voladizo.....	111

106	Comparación de las curvas de datos del deformímetro y LabView para la viga en voladizo.....	113
107	Diagrama de fuerzas actuantes para la viga con dos apoyos articulados....	114
108	Diagrama de fuerzas cortantes para la viga con dos apoyos articulados....	115
109	Diagrama de momentos flectores para la viga con dos apoyos articulados..	115
110	Diagrama de deformación de la viga con dos apoyos articulados.....	118
111	Diagrama de fuerzas actuantes para la viga con tres apoyos articulados.....	119
112	Diagrama de la viga cortada para la viga con tres apoyos articulados.....	121
113	Diagrama de reacciones parciales para la viga con tres apoyos articulados.	122
114	Diagrama auxiliar de cortante para la viga con tres apoyos articulados.....	123
115	Diagrama auxiliar de momentos para la viga con tres apoyos articulados...	123
116	Diagrama de la viga con carga unitaria para la viga con tres apoyos articulados.....	123
117	Diagrama de cortante de la carga unitaria.....	124
118	Diagrama de momentos de la carga unitaria para la viga con tres apoyos articulados.....	126
119	Diagrama de fuerzas cortantes para la viga con tres apoyos articulados.....	126
120	Diagrama de momentos flectores para la viga con tres apoyos articulados..	126
121	Diagrama de deformación de la viga con tres apoyos articulados.....	130
122	Diagrama de fuerzas actuantes para la viga con cuatro apoyos articulados.	131
123	Diagrama de reacciones y ligaduras para la viga con cuatro apoyos articulados.....	132
124	Diagrama de momentos para la carga puntual P_1	132
125	Diagrama de momentos para la carga puntual P_2	132
126	Diagrama de momentos para la carga puntual P_3	133
127	Diagrama de momentos para la carga distribuida q	133
128	Diagrama de momentos para la ligadura X_1	133
129	Diagrama de momentos para la ligadura X_2	135
130	Diagrama de fuerzas cortantes para la viga con cuatro apoyos articulados..	136
131	Diagrama de momentos flectores para la viga con cuatro apoyos articulados.....	136

132	Diagrama de deformación de la viga con cuatro apoyos articulados.....	140
133	Diagrama de fuerzas actuantes para la viga en voladizo.....	141
134	Diagrama de fuerzas cortantes para la viga en voladizo.....	141
135	Diagrama de momentos flectores para la viga en voladizo.....	142
136	Diagrama de deformación de la viga en voladizo.....	145
137	Resultados obtenidos para el caso de medición en los cuatro puntos.....	149
138	Resultados para el caso de viga en voladizo obtenidos en el software LabView.....	150
139	Cuadro de nuevo modelo obtenido en software SAP 2000.....	150
140	Cuadro de características de la viga en software SAP 2000.....	151
141	Ventana para la división en partes de la viga.....	151
142	Imagen con la numeración de los puntos de división de la viga.....	151
143	Imagen de la viga con la ubicación y el tipo de apoyos.....	152
144	Cuadro de propiedades del material en software SAP 2000.....	152
145	Croquis de propiedades de la sección del elemento en software SAP 2000.	153
146	Cuadro de dimensiones generales de la sección en software SAP 2000.....	153
147	Imagen del perfil asignado a la viga.....	153
148	Cuadro para definir cargas.....	153
149	Modelo de la viga con dos apoyos.....	154
150	Viga con la carga P de 203,58 kg.....	154
151	Ventana para crear la combinación de cargas.....	155
152	Cuadro de selección de cargas a analizar.....	155
153	Imagen de la viga con 2 apoyos deformada.....	155
154	Valores de desplazamiento para la viga con 2 apoyos y peso de 200 kg obtenido en software SAP 2000.....	156
155	Imagen de la viga con 3 apoyos deformada.....	156
156	Valores de desplazamiento para la viga con 3 apoyos con software SAP 2000.....	156
157	Imagen de la viga con 4 apoyos deformada.....	157
158	Valores de desplazamiento para la viga con 4 apoyos con software SAP 2000.....	158

159	Imagen de la viga en voladizo deformada.....	158
160	Croquis para ubicar las cargas y sujeciones en el software CAE.....	158
161	Cuadro del nombre y tipo de estudio a realizar en software CAE.....	159
162	Cuadro de selección y asignación del nuevo material.....	159
163	Cuadro de selección y ubicación de las sujeciones.....	160
164	Cuadro de selección y ubicación de la fuerza.....	160
165	Cuadro de selección y ubicación de la masa distribuida (peso de la viga)...	160
166	Cuadro de selección y ubicación de la gravedad.....	161
167	Croquis para la ubicación de los cuatro puntos donde se encuentran los sensores.....	161
168	Cuadro para realizar la malla en la viga.....	161
169	Identificación de nodos sobre la viga con dos apoyos.....	162
170	Cuadro de la viga mallada y lista para ejecutar la simulación.....	162
171	Resultados obtenidos de esfuerzo (Von Misses) para la viga con dos apoyos.....	162
172	Resultados obtenidos de desplazamiento (flecha) para la viga con dos apoyos.....	163
173	Resultados de deformación unitaria para la viga con dos apoyos.....	164
174	Identificación de nodos sobre la viga con tres apoyos.....	165
175	Resultados obtenidos de esfuerzo (Von Misses) para la viga con tres apoyos.....	165
176	Resultados obtenidos de desplazamiento (flecha) para la viga con tres apoyos.....	165
177	Resultados de deformación unitaria para la viga con tres apoyos.....	167
178	Identificación de nodos sobre la viga con cuatro apoyos.....	167
179	Resultados obtenidos de esfuerzo (Von Misses) para la viga con cuatro apoyos.....	167
180	Resultados obtenidos de desplazamiento (flecha) para la viga con cuatro apoyos.....	168
181	Resultados de deformación unitaria para la viga con cuatro apoyos.....	169
182	Identificación de nodos sobre la viga en voladizo.....	170

183	Resultados obtenidos de esfuerzo (Von Misses) para la viga en voladizo...	170
184	Resultados obtenidos de desplazamiento (flecha) para la viga en voladizo.	170
185	Resultados de deformación unitaria para la viga en voladizo.....	181
186	Variación de resultados de flechas (mm) para la viga con 2 apoyos.....	181
187	Variación de resultados de flechas (mm) para la viga con 3 apoyos.....	181
188	Variación de resultados de flechas (mm) para la viga con 4 apoyos.....	182
189	Diagrama del proceso de construcción.....	183
190	Diagrama del proceso de montaje.....	190
191	Flujograma de construcción de los apoyos.....	190
192	Flujograma de construcción de las pesas.....	191
193	Flujograma de construcción del portapesas.....	191
194	Flujograma de construcción del empotramiento.....	191
195	Flujograma de montaje de las galgas extensométricas.....	192
196	Flujograma de montaje de los elementos de conexión.....	192
197	Flujograma de adquisición y construcción de datos.....	192
198	Flujograma de pruebas de funcionamiento y validación de datos.....	192

LISTA DE ABREVIACIONES

A	Amperio
ADC	Convertidor analógico digital
API	Interfaz de programación de aplicaciones
ADC	Convertidor analógico digital
BDA-32	Designación de discos abrasivos de corte NORTON. Para corte de acero y materiales ferrosos
BDA-640	Designación de discos abrasivos de corte NORTON. Para remoción de soldaduras y rebabas
cg	Centro de gravedad
CMB 6001	Designación de rodamientos de bolas de contacto angular de una hilera.
DAQ	Data Acquisition (Dispositivo de Adquisición de Datos)
GF	Factor de galga
LabView	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
NI	National Instruments
RTD	Detectores de temperatura de resistencia
SAE	Society American Engineering (Sociedad Americana de Ingeniería)
SI	Sistema Internacional
U	Unidad
USB	Universal Serial Bus (Conductor Universal en Serie)
VI	Instrumento Virtual

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
A_c	Área de corte, paralela a la fuerza aplicada
A_t	Área transversal
b	Base
b_f	Longitud del patín
c	Coefficiente elástico de la junta
D	Diámetro
dR/R_0	Cambio en la resistencia eléctrica
$d\rho/\rho$	Cambio en la resistividad
ϵ	Deformación total
E	Módulo de elasticidad o Young
e	Espesor
et	Número de ecuaciones de la estática
F	Fuerza aplicada sobre el sólido
F_e	Esfuerzo crítico de pandeo
F_{cr}	Esfuerzo de pandeo por flexión
F_i	Fuerza inicial
F_y	Fuerza aplicada al eje y
F_y	Límite de fluencia
GF	Factor de galga
h	Altura
h	Peralte

H	Grado de hiperestaticidad
I	Momento de inercia
I_{cg}	Momento de inercia respecto al centro de gravedad
I_x	Momento de inercia respecto al eje x
I_z	Momento de inercia respecto al eje z
I_{EN}	Momento de inercia total
J	Módulo polar de inercia
k	Factor de relación de esbeltez para miembros a compresión
k_f	Factor de concentración de esfuerzos por fatiga
k_c	Factor de confiabilidad
L	Longitud
M	Momento
M_F	Momento flector
M_x	Momento flector respecto al eje x
M_{rx}	Esfuerzo de flexión requerido en el eje x
M_{cx}	Esfuerzo admisible de flexión en la dirección x
M_{cy}	Esfuerzo admisible de flexión en la dirección y
M_{ry}	Esfuerzo de flexión requerido en el eje y
M_n	Momento flector nominal
M_c	Momento flector admisible
M_r	Momento flector requerido

n	Coficiente de seguridad
N	Número de pernos
n	Número de reacciones internas o externas que se necesita conocer en cualquier sección de la estructura
P	Carga aplicada
P_A	Esfuerzo admisible de compresión en el punto A
P_C	Esfuerzo admisible de compresión en el punto C
P_r	Esfuerzo de compresión requerido
P'	Carga puntual
P'	Fuerza de tracción primaria
P''	Fuerza de tracción secundaria
p	Número de partes en que se divide la estructura al hacer los cortes para determinar los esfuerzos
P_n	Fuerza de compresión nominal
P_c	Fuerza de compresión admisible
Q	Factor para elementos uniformemente comprimidos
q	Carga uniformemente distribuida
r	Radio de giro
r_i	Distancia desde el extremo del elemento al perno
R_A	Reacción en el punto A
S_e	Límite de fatiga
S_y	Límite de fluencia del material
S_{sy}	Límite de fluencia para esfuerzos tangenciales
S_u	Resistencia a la tensión

S_p	Resistencia de prueba
S_x	Módulo de inercia respecto al eje x
T	Torque
t_f	Espesor del patín
t_w	Espesor del alma
W	Peso
x	Distancia desde la fuerza aplicada hasta el punto de análisis
Z_x	Módulo plástico respecto al eje x
y	Distancia del centro a la fibra del elemento
\bar{y}	Distancia desde el centro de gravedad hasta la fibra más lejana
y	Flecha
θ	Angulo de giro
ν	Coefficiente de Poisson
$\epsilon_{\text{Longitudinal}}$	Deformación longitudinal
$\epsilon_{\text{Transversal}}$	Deformación transversal
ϵ	Deformación unitaria
δ_{acero}	Densidad del acero
ϕ	Diámetro
σ	Esfuerzo normal
σ_{adm}	Esfuerzo admisible
σ_a	Esfuerzo amplitud
σ_{axial}	Esfuerzo axial
σ_x	Esfuerzo normal al eje x

σ_c	Esfuerzo de compresión
τ	Esfuerzo de corte
$\tau_{\text{Torsión}}$	Esfuerzo de corte debido a la torsión
σ_{equi}	Esfuerzo equivalente
σ_F	Esfuerzo flector
σ_m	Esfuerzo medio
σ	Esfuerzo normal
σ_x	Esfuerzo normal al eje x
τ	Esfuerzo tangencial o cortante
$^\circ$	Grado
$\mu\text{in/in}$	Micro strain
Ω	Ohmio
π	Pi, valor numérico igual a 3,141567
ρ	Resistividad
Σ	Sumatoria
λ	Límite de esbeltez
λ_p	Límite de esbeltez de sección compacta
λ_r	Límite de esbeltez de sección no compacta
Δ	Variación
$\Delta L/L$	Variación de longitud
$\Delta R/R$	Variación de resistencia eléctrica

LISTA DE ANEXOS

A	Perfiles laminados IPE
B	Perfiles laminados IPN
C	Tipos de apoyos
D	Densidad del acero
E	Valor del límite de fluencia de un material (S_y)
F	Perfiles importados ángulos
G	Tabla B4.1 de la norma AISC 360-05
H	Especificaciones y marcas de identificación para pernos, tornillos y espárragos
I	Características de roscas unificadas UNC y UNF
J	Propiedades de las secciones
K	Selección de rodamientos
L	Ecuaciones utilizadas en el software LabView para determinar el valor de la flecha en cada caso analizado
M	Método de las áreas para el cálculo de reacciones
N	Costos de mano de obra

RESUMEN

El presente trabajo de Diseño y Construcción de un Sistema de Análisis de Esfuerzos para Ensayos de Flexión en Sistemas Isostáticos e Hiperestáticos es sustentado en conocimientos adquiridos en las aulas de la Escuela de Ingeniería Mecánica, tiene por objetivo reforzar el conocimiento de los estudiantes en flexión en sistemas isostáticos e hiperestáticos.

El banco de pruebas contiene los elementos que conforman un sistema isostático, hiperestático y viga en voladizo, además de un software que permite observar las medidas de deformación unitaria, flecha y esfuerzo presente en el sistema de acuerdo al valor de carga aplicada.

La interfaz realiza la comunicación entre la PC y el banco de pruebas mediante el programa LabView y el equipo de adquisición de datos (CompactDAQ), además de las galgas extensométricas que son los sensores que captan la variación de voltaje transformando la señal a valores de deformación unitaria, obteniendo además los valores de esfuerzos y flechas.

Para representar el sistema isostático se utiliza dos apoyos y una carga puntual, para el sistema hiperestático se utiliza tres o cuatro apoyos y dos o tres cargas puntuales respectivamente y para la viga en voladizo se utiliza una carga puntual.

ABSTRACT

This present work of Design and Construction of an Analysis System of Stress for Bending Tests in Isostatic and Hyperstatic Systems is supported by knowledge acquired in the classrooms of Mechanical Engineering School, is aimed at strengthening the students' knowledge in bending in isostatic and hiperstatic systems.

The test bank contains the elements that make up a isostatic and hyperstatic system and cantilever beam, plus a software that allows to observe strain measures, arrow and stress in the system according to the value of applied load.

The interface makes communication between the PC and the test bank by LabView software and data acquisition equipment (Compact DAQ), plus strain gauges are sensors that capture the variation of transforming the signal voltage values strain, obtaining also stress values and arrows.

It is used two supports and a point load, to represent the isostactic system, to the hyperstatic system is used three or four supports and two or three point loads respectively and cantilever beam it is used a point charge.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes

La medición de deformaciones se hacía desde antes de 1930, utilizando medidores mecánicos muy rústicos y con rangos de error muy altos.

Generalmente se han venido utilizando varios métodos experimentales que entregan una información de campo completo, entre ellos se tiene la fotoelasticidad, cuadrículas, recubrimientos frágiles. Además existen métodos que proporcionan información punto a punto entre éstos se tienen: eléctricos, mecánicos, ópticos, acústicos e informáticos.

En la actualidad se aplica ampliamente la extensometría, ésta es una técnica experimental que se basa en el cambio de la resistencia eléctrica de un material al ser sometido a tensiones.

Con el desarrollo de la electrónica y mejoramiento de materiales, se están aplicando técnicas más precisas y más versátiles, a esto se ha incorporado el análisis mediante programas computacionales basados en el método de elementos finitos.

En el laboratorio de resistencia de materiales no se cuenta con un banco de pruebas de flexión de sistemas isostáticos e hiperestáticos. Con el presente trabajo se pretende dotar al laboratorio de mecánica de sólidos de dicho banco, utilizando la técnica experimental de medición de deformaciones mediante el uso de galgas extensométricas (strain gauges).

1.2 Justificación

Hay ensayos que son imposibles de realizar en un laboratorio, igualmente existen fenómenos físicos que son difíciles de reproducir bien sea por las variables involucradas

como grandes masas, fuerzas, velocidades o distancias; o por que se requiere realizar *mediciones in situ*. Por esta razón muchas veces se opta por no realizar las pruebas de resistencia de los elementos involucrados.

En casos que son indispensables realizar este tipo de mediciones se utilizan grandes recursos humanos, económicos y tecnológicos, constituyéndose en una actividad crítica dentro de un proyecto.

Al desarrollar un sistema de análisis de deformación funcional y versátil, podríamos adaptarlo a diversos tipos de ensayos de resistencia en un amplio rango de elementos de máquina o estructuras.

Al equipar el laboratorio de mecánica de sólidos con este sistema se complementarían los métodos de medición tradicionalmente usados, logrando así obtener datos más precisos y en distintos puntos, además aplicando a elementos reales.

El banco de pruebas de flexión servirá a la Escuela de Ingeniería Mecánica como un apoyo para el desarrollo de temas de investigación.

Adicionalmente se podría prestar servicios de análisis de esfuerzos a personas o entidades que así lo requieran, obteniendo un beneficio económico para la Escuela de Ingeniería Mecánica.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Diseñar, construir y calibrar un sistema de análisis de deformación y esfuerzos para ensayos de flexión en sistemas isostáticos e hiperestáticos utilizando sensores de deformación que generan datos posteriormente procesados por el controlador Compact-DAQ.

1.3.2 *Objetivos específicos*

Implementar un banco de pruebas para realizar los ensayos de flexión en sistemas isostáticos e hiperestáticos.

Diseñar una interfaz entre el usuario y la computadora, que facilite la obtención y procesamiento de datos en un ensayo de resistencia.

Comparar los datos obtenidos experimentalmente de este sistema con los generados por softwares de diseño asistido por computadora (SAP y CAE) y con los resultados obtenidos aplicando ecuaciones teóricas de la mecánica de sólidos.

Realizar pruebas de funcionalidad y repetitividad para estandarizar el funcionamiento del sistema.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Definiciones de estructura[1]

- Es un conjunto de elementos unidos entre sí, con la finalidad de soportar diferentes tipos de esfuerzos.
- Es una combinación ordenada de partes unidas proyectadas para proporcionar rigidez.
- Es un conjunto de partes o componentes que se combinan en forma ordenada para cumplir una función dada.
- Se compone de una o más piezas entre sí formando un conjunto estable. Esto es, un conjunto capaz de recibir cargas externas, resistirlas internamente y transmitir las a sus apoyos; en donde esas fuerzas externas encontrarán su sistema estático equilibrante.

2.2 Clasificación de las estructuras

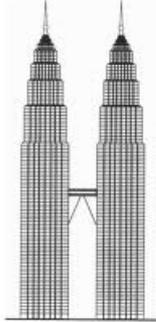
Las estructuras se clasifican según:

- 1) La posición de sus elementos: estructuras horizontales y estructuras verticales.
- 2) La movilidad de sus elementos: estructuras rígidas y estructuras articuladas.
- 3) Su constitución: simples y reticulares.
- 4) Su grado de hiperestaticidad: isostáticas e hiperestáticas.

2.2.1 *Estructuras verticales y horizontales*[2]

Estructuras verticales. Son aquellas en las que los elementos que soportan los mayores esfuerzos están colocados en posición vertical.

Figura 1. Ejemplo de estructura vertical



Fuente:<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/Capitulo%207/FORMAS%20VERTICALES.HTM>

Estructuras horizontales. Son aquellas en las que los elementos que soportan los mayores esfuerzos se hallan colocados horizontalmente. En este tipo de estructuras los elementos sometidos a mayor esfuerzo trabajan a flexión. En las estructuras horizontales se emplean figuras geométricas curvas como el arco.

Figura 2. Ejemplo de estructura horizontal

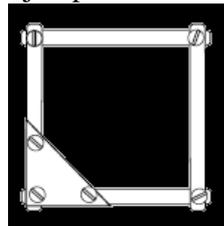


Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=estructuras+horizontales>

2.2.2 Estructuras rígidas y articuladas

Estructuras rígidas. Son aquellas que se deforman en un valor mínimo cuando se les aplica diferentes fuerzas, excepto si sus elementos se rompen.

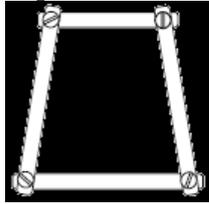
Figura 3. Ejemplo de estructura rígida



Fuente:<http://www.iesbahia.es/departamento/Tecnologia/estructuras/estructurasRigidas.png>

Estructuras articuladas. Son aquellas en las que cuando se les aplica una fuerza, la estructura se deforma controladamente, al desplazarse los elementos que la integran.

Figura 4. Ejemplo de estructura articulada



Fuente: <http://www.iesbahia.es/departamento/Tecnologia/estructuras/estructurasRigidas.png>

2.2.3 Estructuras simples y reticulares

Estructuras simples. Son aquellas formadas por pocos elementos, sobre los cuales se distribuyen las cargas aplicadas. Debido a su constitución con pocos elementos cumplen una función simple.

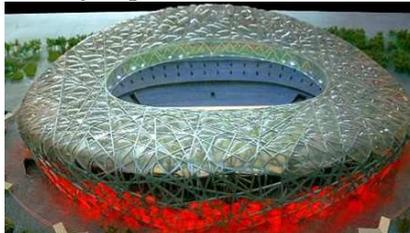
Figura 5. Ejemplo de estructura simple



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=polipasto+abus>

Estructuras reticulares. Llamadas también celosías, cerchas o compuestas. Son aquellas en las cuales las cargas aplicadas se distribuyen sobre muchos elementos.

Figura 6. Ejemplo de estructuras reticulares



Fuente: <http://www.nuestrorumbo.com/2008/07/14/estadio-el-nido-de-pajaro-%C2%BFuna-nueva-maravilla-del-mundo>

Estas estructuras se clasifican en:

- **Planas.** Son aquellas cuya constitución está formada por elementos planos, como por ejemplo una compuerta de retención de líquidos o de sólidos.

Figura 7. Ejemplo de estructuras reticulares planas



Fuente: http://www.ingeniero-de-caminos.com/2011_07_06_archive.html

- **Estáticamente determinadas.** Aquellas en las cuales se aplican las ecuaciones de equilibrio mecánico al conjunto de la estructura (para determinar sus reacciones) y a las partes internas (para determinar los esfuerzos aplicados sobre cada elemento).

Figura 8. Ejemplo de estructuras reticulares planas estáticamente determinadas



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=estructuras+reticulares+planas>

- **Tridimensionales.** Aquellas que se forman a partir de tetraedros con una forma piramidal.

Figura 9. Ejemplo de estructura reticular tridimensional



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=estructuras+reticulares>

- **De nudos rígidos.** Es una estructura hiperestática geoméricamente parecida a una estructura estáticamente determinada, pero con elementos trabajando a flexión. Se llama de nudos rígidos porque si se deforma la estructura el ángulo formado inicialmente por las barras se mantiene.

Figura 10. Ejemplo de estructuras reticulares de nudos rígidos



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=estructuras+reticulares>

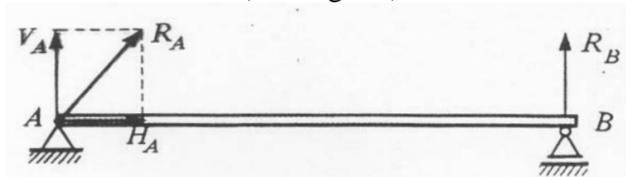
2.2.4 Estructuras isostáticas e hiperestáticas

- **Sistemas isostáticos.** Una estructura isostática es aquella en la cual para calcular sus reacciones son suficientes utilizar las ecuaciones de la estática o ecuaciones de equilibrio (sumatoria de fuerzas = 0, y sumatoria de momentos = 0). De una manera más sencilla se dice que es una estructura isostática cuando el número de las incógnitas del sistema es igual al número de las ecuaciones de equilibrio estático.

Un ejemplo de estructura isostática es un poste de luz cuya base está empotrada en el suelo. Las reacciones que tiene en la base son las mínimas para que no se deslice o gire.

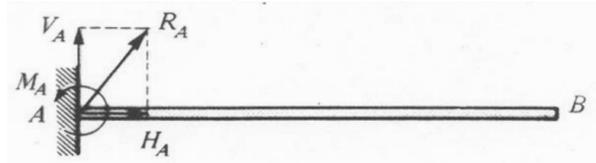
En las siguientes figuras se observan estructuras isostáticas:

Figura 11. Viga con un extremo articulado fijo (2 incógnitas) y el otro articulado móvil (1 incógnita)



Fuente: www.uhu.es/TeoriaEstructuras/TeoriaEstructuras_TEMAI-3

Figura 12. Viga empotrada en un extremo (3 incógnitas) y libre en el otro. Se le denomina viga en voladizo



Fuente: www.uhu.es/TeoriaEstructuras/TeoriaEstructuras_TEMAI-3

- **Sistemas hiperestáticos.** Una estructura hiperestática es aquella en la cual para calcular sus reacciones no son suficientes utilizar las ecuaciones de la estática o ecuaciones de equilibrio, pues además se necesita de otras ecuaciones relativas al comportamiento propio de la estructura, como son las condiciones de deformación. De otra forma se dice que una estructura es hiperestática cuando el número de las incógnitas del sistema es mayor al número de las ecuaciones de equilibrio estático.

2.2.4.1 Grado de hiperestaticidad [3]. Se conoce como grado de hiperestaticidad al exceso de incógnitas respecto al número de ecuaciones de equilibrio, el cual se lo define mediante la siguiente expresión:

$$H = n - p \cdot et \quad (1)$$

Donde:

n : Número de reacciones internas o externas que necesitamos conocer en cualquier sección de la estructura (cada sección debe ser isostática).

et : Número de ecuaciones de la estática.

p : Número de partes en que queda dividida la estructura al hacer los cortes necesarios para determinar los esfuerzos.

Una vez calculado H , obtenemos:

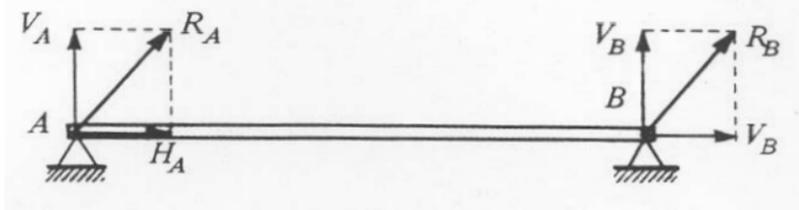
$H=0$ la estructura es isostática.

$H>0$ la estructura es hiperestática de grado H .

$H<0$ la estructura es un mecanismo de grado H .

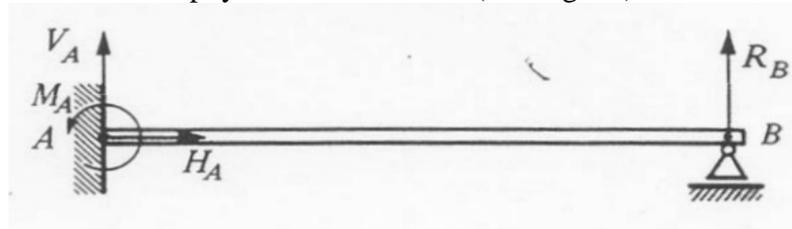
En las siguientes figuras se observan estructuras hiperestáticas:

Figura 13. Viga con apoyos articulados fijos en ambos extremos (4 incógnitas)



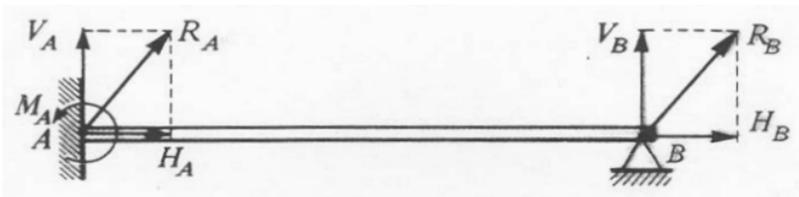
Fuente: www.uhu.es/TeoriaEstructuras/TeoriaEstructuras_TEMAI-3

Figura 14. Viga empotrada en un extremo (3 incógnitas) y sustentada en el otro mediante apoyo articulado móvil (1 incógnita)



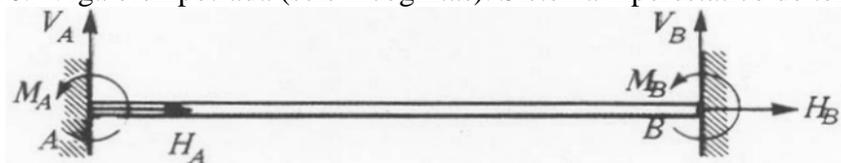
Fuente: www.uhu.es/TeoriaEstructuras/TeoriaEstructuras_TEMAI-3

Figura 15. Viga empotrada en un extremo (3 incógnitas) y con apoyo articulado fijo en el otro (2 incógnitas)



Fuente: www.uhu.es/TeoriaEstructuras/TeoriaEstructuras_TEMAI-3

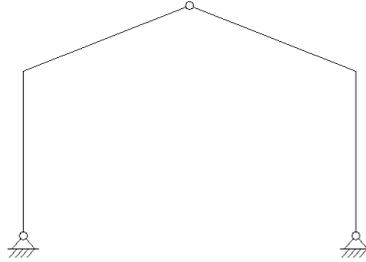
Figura 16. Viga biempotrada (seis incógnitas). Sistema hiperestático de tercer grado



Fuente: www.uhu.es/TeoriaEstructuras/TeoriaEstructuras_TEMAI-3

2.2.1.2 Pórtico [4]. Es un tipo de estructura, que consta principalmente de dos pilares o columnas y un elemento transversal consiguiendo crear espacios interiores.

Figura 17. Pórtico

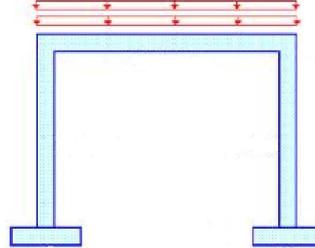


Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=portico>

De acuerdo a la manera como está unido en su parte superior, tenemos los siguientes tipos de pórticos:

- *Pórtico Simple* [5]. Aquel en el cual sobre las dos columnas se coloca una viga simple. Se los utiliza en estructuras pequeñas, para así evitar que la viga soporte esfuerzos de flexión muy grandes.

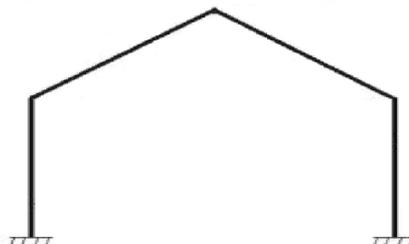
Figura 18. Pórtico simple



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=portico+simple>

- *Pórtico a dos aguas* [6]. Aquel en el cual la unión en su parte superior se lo hace mediante dos perfiles en forma de tejado. Se los emplea en naves industriales pequeñas.

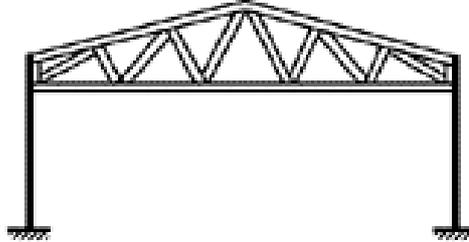
Figura 19. Pórtico a dos aguas



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=portico+dos+aguas>

- *Pórtico con cercha* [7]. Aquel en el cual la unión en su parte superior se lo hace utilizando una cercha. Se los utiliza en estructuras grandes.

Figura 20. Pórtico con cercha



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=portico+cercha>

2.3 Esfuerzo

Entender claramente el concepto de esfuerzo es fundamental para el posterior análisis de este fenómeno presente en los elementos de una estructura.

2.3.1 Concepto de esfuerzo [8]. Esfuerzo es una magnitud física que se presenta en un elemento como en este caso estructural, por la acción de una fuerza o un sistema de fuerzas. El esfuerzo puede ser normal o tangencial y se presenta debido a acciones axiales de tracción o compresión, así como de momentos flectores y/o torsores.

El esfuerzo axial puede ser expresado matemáticamente mediante la relación:

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}} \quad (2)$$

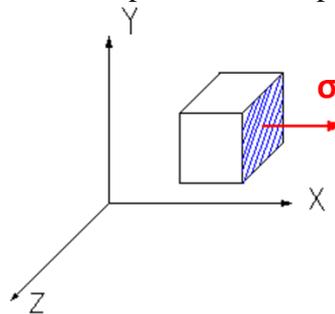
2.3.2 Unidades del esfuerzo. El esfuerzo se expresa en unidades de fuerza sobre unidades de área, en el sistema internacional (SI), la fuerza se expresa en Newton y el área en metros cuadrados (N/m^2), que equivale a un pascal (Pa).

En el sistema inglés las unidades de fuerza son expresadas en libras fuerza (lbf) y el área se designa en pulgadas cuadradas (plg^2), así tenemos que el esfuerzo puede ser representado en (lb/plg^2) que equivale a un psi por sus siglas en inglés.

2.3.3 Tipos de esfuerzos. Generalmente se distingue entre los esfuerzos perpendiculares a la sección transversal del elemento (esfuerzos axiales) y los esfuerzos tangentes a la sección transversal del elemento (esfuerzos tangenciales).

2.3.3.1 Esfuerzos axiales [9]. También llamados esfuerzos normales se designan con la letra griega (σ), viene dado por la resultante de los esfuerzos normales o perpendiculares al área del elemento sometido a cargas.

Figura 21. Esfuerzo axial presente en un prisma rectangular

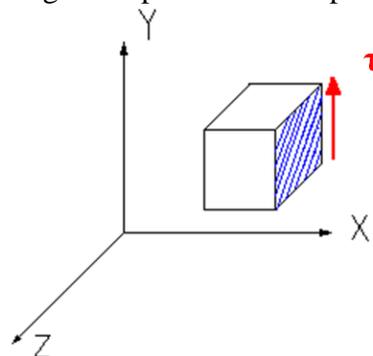


Fuente: Autores

Los esfuerzos axiales pueden ser de compresión o de tracción. Un esfuerzo de compresión es aquel que pretende aplastar el elemento, mientras que la tracción es opuesta a la compresión tratando de estirar al elemento.

2.3.3.2 Esfuerzos tangenciales [10]. También llamados esfuerzos cortantes se los designa con la letra griega (τ), este esfuerzo es el resultado de la sumatoria de todos los esfuerzos paralelos al área o sección analizada.

Figura 22. Esfuerzo tangencial presente en un prisma rectangular

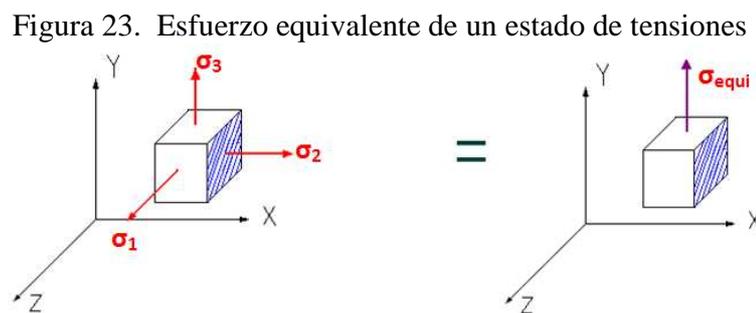


Fuente: Autores

Los esfuerzos tangenciales se producen al existir fuerzas que provoquen torsión o corte en el material, produciendo una falla por cizalladura o corte.

2.3.3.3 Esfuerzo equivalente [11]. Considerando que un elemento puede estar sometido a un estado tensional con varios esfuerzos en diferentes direcciones, es importante establecer un criterio que permita encontrar un esfuerzo equivalente, el cual se pueda utilizar posteriormente para análisis de resistencia. Existen diversos criterios de cómo calcular el esfuerzo equivalente, a continuación se exponen los más importantes.

Si tenemos un elemento sometido a un estado tensional en las tres dimensiones como se presenta:



Fuente: Autores

$$\text{Si: } \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

El esfuerzo equivalente según los diversos criterios es:

- *Criterio de Rankine.* El esfuerzo equivalente es igual al esfuerzo normal máximo, esto quiere decir que:

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sigma_1 \quad (3)$$

- *Criterio de Tresca.* El esfuerzo equivalente es igual al esfuerzo tangencial máximo, por lo tanto:

$$\sigma_{\text{equivalente}} = 2\tau_{\text{max}} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4)$$

Donde:

σ_1 : Esfuerzo mayor de este estado tensional.

σ_3 : Esfuerzo menor de este estado tensional.

- *Criterio de Von Mises*. Según este criterio la energía de deformación producida por el cambio de forma, determina la aparición de deformaciones plásticas.

$$\sigma_{\text{equivalente}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (5)$$

Los criterios de Tresca y Von Mises son los más utilizados para materiales dúctiles y los que se aplican para cálculos en esta tesis.

2.3.3.4 *Coefficiente de seguridad (n)*. Es un valor adimensional que representa el grado de confiabilidad de la resistencia de un elemento sometido a un esfuerzo. Se lo calcula mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{\sigma_{\text{admisible}}}{\sigma_{\text{equivalente}}} \quad (6)$$

Donde:

n: Coeficiente de seguridad.

$\sigma_{\text{admisible}}$: Esfuerzo admisible.

$\sigma_{\text{equivalente}}$: Esfuerzo equivalente.

2.3.3.5 *Condición de seguridad*. Según la norma AISC-360 un elemento debe cumplir la condición de seguridad para diseño ASD (Allowable Strength Design: resistencia admisible de diseño).

$$Ra \leq \frac{R_n}{n} \quad (7)$$

Donde:

R_a : Fuerza requerida.

R_n : Fuerza nominal.

Ω : Factor de seguridad.

2.3.3.6 Esfuerzos principales en la tracción y compresión. El esfuerzo presente en la compresión y tracción es el esfuerzo normal o axial. Se lo calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{\text{axial}} = \frac{P}{A} \quad (8)$$

Donde:

σ_{axial} : Esfuerzo normal.

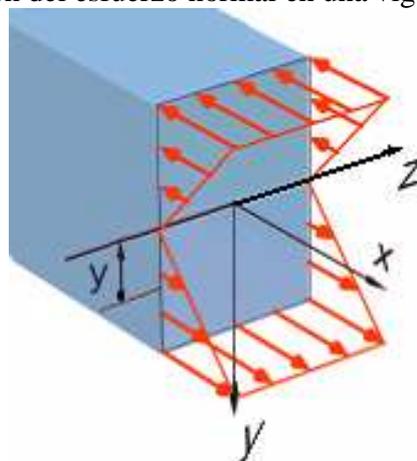
P: Fuerza aplicada.

A: Área perpendicular a la fuerza aplicada.

2.3.3.7 Esfuerzos principales en la flexión. Los esfuerzos principales presentes en la flexión son: esfuerzo normal y esfuerzo cortante.

- *Esfuerzo normal.* Se encuentra perpendicular a la fuerza aplicada. Se presentan dos tipos de esfuerzos, uno con valor positivo (esfuerzo de tracción) y otro con valor negativo (esfuerzo de compresión). El esfuerzo normal aumenta proporcionalmente a la distancia desde el eje neutro hacia las fibras externas.

Figura 24. Representación del esfuerzo normal en una viga sometida a flexión



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?esfuerzo+normal>

Se calcula mediante la siguiente expresión (ecuación de Navier):

$$\sigma_x = \frac{M_x \cdot y}{I_z} \quad (9)$$

Donde:

σ_x : Esfuerzo normal al eje x.

M_x : Momento flector respecto al eje x.

y: Distancia desde el centro de gravedad hasta una fibra del elemento.

I_z : Momento de inercia respecto al eje z.

Este esfuerzo debe ser muy tomado en cuenta cuando la distancia entre apoyos es grande.

Momento de inercia (I). Es la resistencia que presenta un cuerpo a ser girado respecto a un eje. Se lo calcula mediante la siguiente expresión:

$$I_x = \sum I_{cg} + \sum A\bar{y}^2 \quad (10)$$

Donde:

I_x : Momento de inercia respecto al eje x.

I_{cg} : Inercia respecto al centro de gravedad.

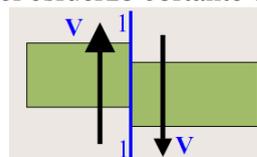
A: Área.

\bar{y} : Distancia desde el centro de gravedad hacia la fibra más lejana.

La ecuación (10) se utiliza para el cálculo en perfiles abiertos, para el caso de perfiles macizos el momento de inercia está representado por J y su cálculo depende de la forma del elemento.

- *Esfuerzo cortante*. Son todas las fuerzas perpendiculares al eje de la viga. Tienen a producir un corte en sentido transversal de la viga, debe ser tomado en cuenta cuando las distancias entre apoyos es pequeña.

Figura 25. Representación del esfuerzo cortante en una viga sometida a flexión



Fuente: Autores

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{F}{A_c} \quad (11)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante.

F: Fuerza aplicada.

A_c : Área de corte, paralela a la fuerza aplicada.

2.3.4 Esfuerzo principal en la torsión. El único esfuerzo que se presenta en la torsión es el esfuerzo de corte.

- **Esfuerzo de corte [12].** Actúa tangencial al área del elemento sometido a torsión. Se lo calcula mediante la siguiente expresión:

$$\tau_{\text{Torsión}} = \frac{T \cdot r}{J} \quad (12)$$

Donde:

$\tau_{\text{Torsión}}$: Esfuerzo de corte debido a la torsión.

T: Torque.

r: Radio de giro.

J: Módulo polar de inercia, para el caso de perfiles macizos.

En el caso de perfiles abiertos para calcular el módulo polar de inercia se utiliza la ecuación (10).

2.4 Deformación

2.4.1 Deformación total [13]. La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o la ocurrencia de dilatación térmica.

La deformación total para la tracción se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$e = \frac{FL}{AE} \quad (13)$$

Donde:

e : Deformación total.

F: Fuerza aplicada sobre el sólido.

L: Longitud original de la barra.

A: Área transversal del sólido.

E: Módulo de Young.

2.4.2 *Deformación unitaria* [14]. La deformación unitaria se obtiene dividiendo la deformación total entre la longitud original de la barra. La deformación se representa con la letra griega minúscula épsilon (ϵ):

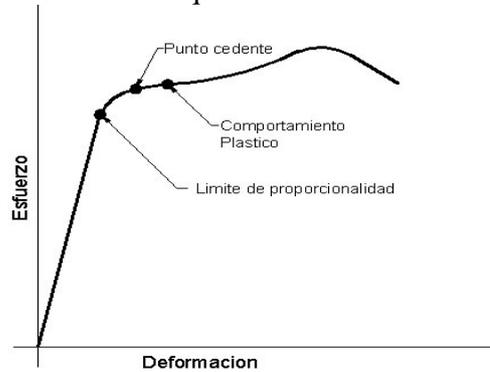
$$\epsilon = \frac{\text{incremento de deformación}}{\text{longitud de calibración}} \quad (14)$$

2.4.3 *Relación esfuerzo – deformación unitaria* [15]. La relación entre esfuerzo y deformación unitaria se encuentra ilustrada en una curva típica de esfuerzo - deformación unitaria (Ver Figura 26).

En esta curva, al inicio, la relación entre el esfuerzo y la deformación aparece como una relación lineal, a la cual se la denomina región elástica y en ella prevalece la Ley de Hooke, la cual termina en el límite proporcional donde termina la linealidad. Eventualmente hay incrementos de elongación sin incremento apreciable en la carga aplicada, (referido como el punto de fluencia, sí el esfuerzo se incrementa otra vez con una deformación unitaria adicional). El pico de la curva se lo conoce como resistencia última y éste indica el máximo esfuerzo. Debajo de este punto la curva desciende hasta el punto de fractura. Mientras que el esfuerzo real o verdadero continúa incrementándose por arriba de la

"resistencia última", la curva indica los esfuerzos basados en el área de la sección transversal original.

Figura 26. Gráfica de la curva que relaciona el esfuerzo y la deformación



Fuente: http://html.rincondelvago.com/medidas-para-fisica_1.html

2.4.4 *Coefficiente de Poisson (ν)* [16]. Es una constante elástica que nos da la medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se acorta en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. Se lo determina mediante la siguiente expresión:

$$\nu = -\frac{\epsilon_{\text{Transversal}}}{\epsilon_{\text{Longitudinal}}} \quad (15)$$

Donde:

ν : Coeficiente de Poisson.

$\epsilon_{\text{Transversal}}$: Deformación transversal.

$\epsilon_{\text{Longitudinal}}$: Deformación longitudinal.

2.4.5 *Módulo de Young* [17]. Es un parámetro que indica el comportamiento de un material elástico, según la dirección de la fuerza aplicada. Se lo conoce también como módulo elástico longitudinal.

2.4.6 *Ley de Hooke* [18]. Indica que el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación unitaria. La Ley de Hooke, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (16)$$

Donde:

σ : Esfuerzo normal.

E: Módulo de Young.

ε : Deformación por unidad de longitud (deformación unitaria).

2.5 Flexión[19]

El fenómeno de la flexión se produce por la aplicación de cargas normales al eje longitudinal del elemento. La flexión combina un esfuerzo de tracción en un lado del elemento y un esfuerzo de compresión en el lado opuesto, además de un valor de cero en el eje neutro.

2.5.1 Flexión pura. Se produce cuando el momento flector es la única fuerza al interior de la sección del elemento.

Figura 27. Elemento sometido a flexión pura



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=tipos+de+flexion+en+vigas>

2.5.2 Flexión compuesta. Se origina cuando además del momento flector se presenta un esfuerzo normal que produce una fuerza al interior de la sección del elemento.

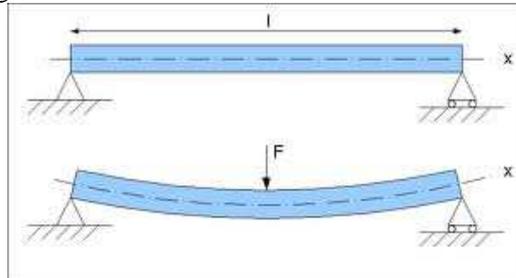
Figura 28. Elemento sometido a flexión compuesta



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=tipos+de+flexion+en+vigas>

2.5.3 Flexión simple. Se produce cuando la deformación del eje del elemento es una curva contenida en el plano en el cual se aplica la fuerza.

Figura 29. Elemento sometido a flexión simple



Fuente: <http://estatica31.blogspot.com/2010/11/momento-flector.html>

- *Momento flector.* Se lo calcula mediante la siguiente expresión:

$$M_x = \int F_y \cdot dx \quad (17)$$

Donde:

M_x : Momento flector respecto al eje x.

x: Distancia desde la fuerza aplicada hasta el punto de análisis.

F_y : Fuerza aplicada paralela al eje y.

- *Radio de curvatura.* Se lo calcula mediante la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{I \cdot E} \quad (18)$$

Donde:

ρ : Radio de curvatura

M: Momento flector.

I: Momento de inercia.

E: Módulo de elasticidad.

CAPÍTULO III

3. FUNDAMENTOS DE EXTENSOMETRÍA

La extensometría es una técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones basándose en el cambio de la resistencia eléctrica de un material al ser sometido a tensiones.

3.1 Medición de deformación

La medición de la deformación es muy importante en el diseño, y rediseño de máquinas o componentes de éstas, pues, permite analizar el real esfuerzo al que está sometido los elementos que conforman una máquina, con lo cual se puede realizar las modificaciones necesarias que realmente se necesitan.

3.1.1 Tipos de medidores de deformación [20]. Existen diferentes tipos de medidores de deformación tales como: mecánicos, ópticos, eléctricos, electrónicos, de rayo láser, entre otros.

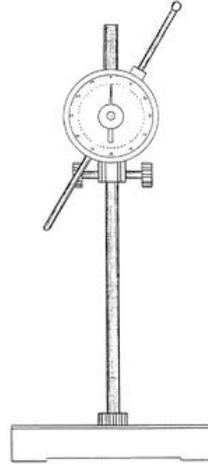
El escogimiento del tipo de medidor dependerá de varios factores como:

- Precisión del instrumento.
- Rango de medida.
- Tamaño y forma de la probeta.
- Sitio de la medición.
- Condiciones de funcionamiento, etc.

3.1.1.1 Medidores de deformación mecánicos [21]. Entre los más conocidos tenemos: extensómetro a reloj micrométrico o comparador y los accionados por palanca.

- *El extensómetro a reloj micrométrico y el accionado por palancas.* Son de lectura directa, generalmente presentan una apreciación de 0,01 mm.

Figura 30. Reloj micrométrico



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=reloj+micrometrico>

3.1.1.2 Medidores de deformación ópticos [22]. Este tipo de medidores emplean haces luminosos para determinar las deformaciones, las cuales están libres de rozamiento y efectos de inercia. Son usados en elementos que requieren de gran exactitud, por ello se los utiliza en laboratorios. Tanto su montaje y empleo no son sencillos.

Figura 31. Extensómetro óptico



Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/gom/extensometros-opticos-3d-6214-23871.html>

3.1.1.3 Medidores de deformación por rayo láser [23]. Conocido como extensómetro a simple espejo de Martens, registra los alargamientos de la probeta entre puntos fijos, por la

reflexión de un rayo láser. Cuando el material se deforma, un espejo gira en un cierto ángulo, la luz del rayo se refleja sobre una regla graduada, en la cual se mide la deformación.

Figura 32. Extensómetro por rayo láser

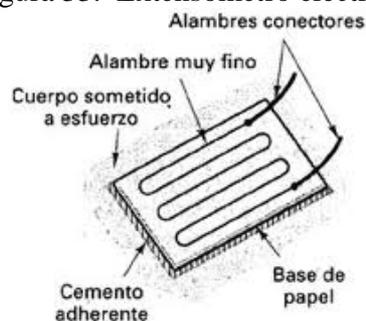


Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/ibertest/extensometros-laser-29629-605634.html>

3.1.1.4 Medidores de deformación eléctricos. Se sustentan en una técnica para medir esfuerzos y deformaciones basándose en el cambio de la resistencia eléctrica de un material al ser sometido a tensiones. Así tenemos un valor proporcional de cambio de resistencia eléctrica del medidor que representa el cambio de longitud o deformación de un elemento sometido a un estado tensional.

Con sus múltiples variantes permite determinar estados tensionales unidireccionales o completos, además medir deformaciones a alta temperatura (hasta unos 800 °C con bandas soldables). Por estas razones se ha llegado a ser uno de los tipos de medidores más usados y más comerciales.

Figura 33. Extensómetro eléctrico



Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=Extensómetro+electrico>

Tabla 1. Tipos de medidores de deformación

MEDIDOR	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Mecánico	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de utilizar en mismo equipo para diversas probetas. • Permiten medición de grandes deformaciones hasta de 1000 mm. • Fácil empleo y montaje. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño grande, lo que dificulta tomar mediciones en lugares de difícil acceso. • Sensibles a factores externos como temperatura y radiación. • Mediciones con errores relativamente grandes. • No permite medir elementos sometidos a esfuerzos variables o dinámicos.
Ópticos	<ul style="list-style-type: none"> • No son afectados por factores externos • Permiten mediciones muy exactas 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil montaje • Difícil empleo
De rayo láser	<ul style="list-style-type: none"> • Registran valores de medición exactos 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados costos de adquisición y funcionamiento. • Difícil empleo y montaje.
Eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeños y livianos • Medidas exactas • Permite tomar medidas en lugares de difícil acceso. • No son sensibles a factores externos como temperatura, radiación, humedad, corrosión, etc. • Permite hacer mediciones para esfuerzos dinámicos. • Registra esfuerzos en cualquier dirección 	<ul style="list-style-type: none"> • Están constituidos de elementos delicados. • Requieren de circuitos auxiliares para amplificar su señal y para disminuir errores. • Requiere extremo cuidado en su montaje.

Fuente: Autores

3.1.2 Selección del medidor de deformación adecuado. Luego de analizar los diferentes tipos de medidores de deformación se opta por la utilización de medidores eléctricos (galgas extensométricas), puesto que éstas presentan las mejores características para satisfacer los requerimientos en este trabajo de tesis.

Las características que se destacan son las siguientes:

1. Miden con precisión los esfuerzos bajo condiciones estáticas y dinámicas.
2. Son de tamaño reducido, ligeros en peso y de espesor despreciable, con lo cual se los usa en lugares de difícil acceso.
3. De fácil instalación y funcionamiento.
4. No los afecta cambios de temperatura, vibración, humedad, etc.
5. Adaptables a la observación y registro remotos.
6. Gran estabilidad e histéresis despreciable.

3.2 Características de los equipos y accesorios

3.2.1 Galgas extensométricas [24]. Una galga extensométrica es un dispositivo de medida universal, utilizado para la medición electrónica de diversas magnitudes mecánicas, tales como, la deformación, presión, carga, torque, posición, etc. A la galga extensométrica se la conoce también como extensómetro o strain gauge.

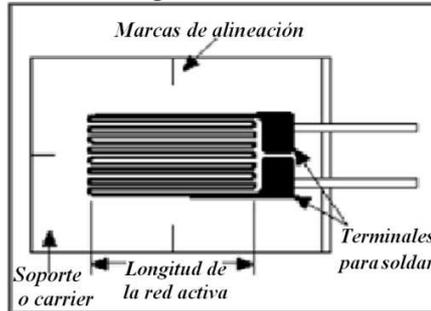
El uso de la galga extensométrica es el método más utilizado para medir esfuerzo, este dispositivo tiene una resistencia eléctrica que varía de forma proporcional al esfuerzo a que éste es sometido.

Dependiendo de sus características permiten registrar un amplio rango de medidas que van desde un valor de deformación mínimo de 0,20 mm hasta un valor de deformación máximo de 100 mm.

3.2.1.1 Principio de funcionamiento [25]. La galga más utilizada es la confinada en *papel metálico* o *bonded metallic strain gauge*, la cual consiste en un cable muy fino o papel aluminio dispuesto en forma de grilla, la misma que maximiza la cantidad de metal sujeto al esfuerzo en la dirección paralela (Ver Figura 35). La grilla está pegada a un fino respaldo llamado *carrier*, el mismo que está sujeto directamente a la pieza a ser medida.

Por lo tanto, el esfuerzo experimentado por la pieza es transferido directamente a la galga extensométrica, el cual responde con cambios lineales de resistencia eléctrica.

Figura 34. Galga extensométrica metálica



Fuente: http://nees.buffalo.edu/Facilities/Major_Equipment/instumentation.asp

La galga extensométrica debe ser colocada correctamente sobre la pieza, para que así el esfuerzo sea transferido adecuadamente desde la pieza a través del adhesivo y el material de respaldo hasta la misma grilla metálica.

3.2.1.2 Campos de aplicación [26]. La aplicación de las galgas extensométricas es muy amplia, tal es el caso que se las utiliza en: la industria metal mecánica, la industria aeroespacial, en los sistemas de control, en el análisis de estructuras, y en todos los procesos que se requiera controlar o medir la tracción, compresión, el peso, la elongación, deformación, etc.

A continuación citaremos algunos ejemplos más específicos:

- *En los puentes colgantes.* Se determina con exactitud la elongación de los cables al estar estos sometidos a tensión, por la carga vehicular y peso propio del puente, además los esfuerzos positivos y negativos originados por dicha carga, las elongaciones y contracciones por efectos de temperatura.
- *En los ferrocarriles.* Para detectar el alargamiento excesivo de los rieles, ya que esta falla es causada por altas temperaturas.
- *En los aeropuertos.* En las pistas de aterrizaje para determinar la elongación o contracción de dichas pistas, principalmente en climas muy fríos donde las temperaturas pueden descender hasta -50°C al cubrirse de hielo.

- *En los aviones.* Determinan los daños que puede sufrir la estructura por los efectos del vuelo, como el empuje de la fuerza de aceleración, las presiones que soporta la estructura por las diferentes alturas de vuelo etc.
- *Mediciones a distancia.* Generalmente son instalaciones de monitoreo que no necesitan la presencia de personal, se encargan de revisar y controlar las deformaciones de ciertos elementos críticos, se utiliza redes de comunicación para enviar los datos obtenidos.

3.2.1.3 Relación entre cambio de deformación y conductividad eléctrica. Charles Wheatstone y William Thomson descubren que un esfuerzo mecánico aplicado a un conductor metálico produce un cambio de resistencia eléctrica en el mismo, este cambio producido se debe a la deformación microestructural del material conductor; y puede ser descrito mediante la siguiente expresión:

$$\frac{dR}{R_0} = \epsilon (1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho} \quad (19)$$

Donde:

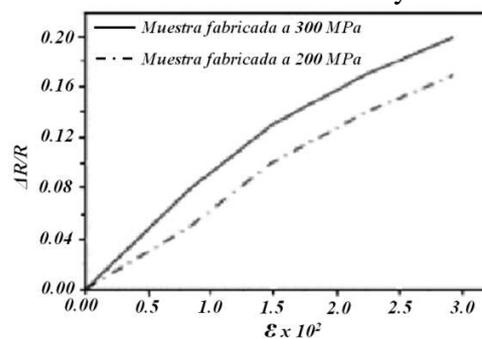
$\frac{dR}{R_0}$: Cambio en la resistencia eléctrica.

ϵ : Deformación unitaria.

ν : Coeficiente de Poisson.

$\frac{d\rho}{\rho}$: Variación de la resistividad.

Figura 35. Curva de relación de cambio de resistividad y cambio de deformación unitaria

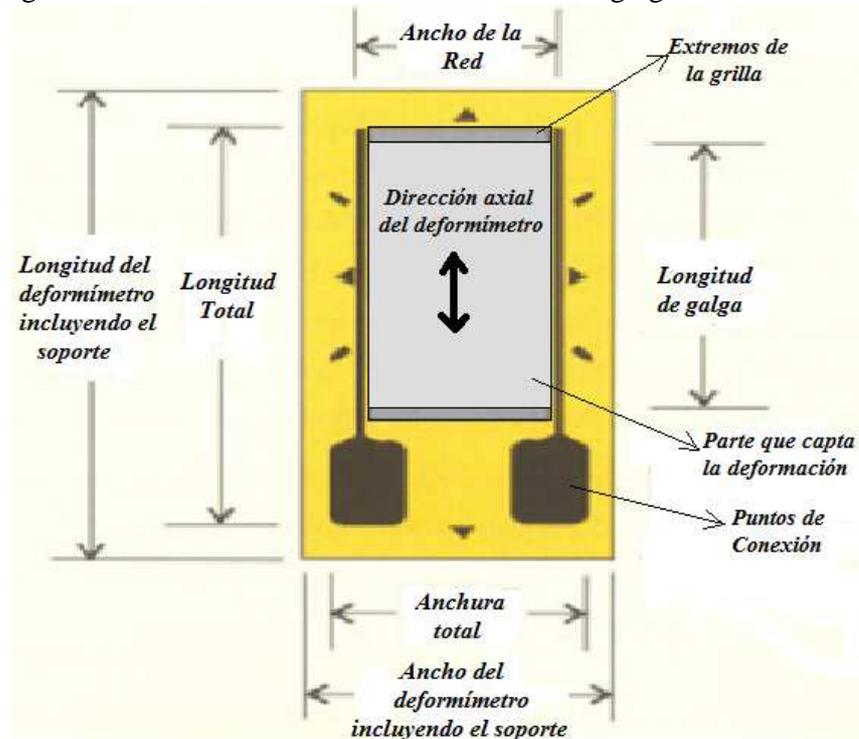


Fuente: <http://www.google.com.ec/imgres?q=curva+relacion+cambio+de+resistividad+y+cambio+de+deformacion+unitaria>

3.2.1.4 Características dimensionales. Las características dimensionales presentes son:

- Ancho de la grilla (grid width)
- Ancho total del deformímetro (overall width)
- Longitud de deformímetro o de galga (gage length)
- Longitud total del deformímetro (overall length)
- Longitud del deformímetro incluyendo el soporte (matrix length)
- Ancho del deformímetro incluyendo el soporte (matrix width)
- Parte que capta la deformación (gridlines)
- Extremos de la grilla (endloops)
- Puntos de conexión (conductors)
- Dirección axial del deformímetro (gridline direction)

Figura 36. Características dimensionales de una galga extensométrica



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Galga_extensiom%C3%A9trica

3.2.1.5 *Parámetros característicos de las galgas extensométricas [27].* Los parámetros característicos son:

- El material del alambre
- El factor de galga
- El material de soporte
- El pegante de fijación
- La serie
- La longitud
- El modelo

Material del alambre. El material de la rejilla es una aleación sensible a la deformación, la cual determina las principales características del sensor, por lo que debe cumplir con ciertas características:

- Elevada resistividad
- Baja sensibilidad a la temperatura
- Alta estabilidad eléctrica
- Elevado punto de fluencia
- Elevado límite de fatiga
- Buena soldabilidad
- Baja histéresis
- Buena resistencia a la corrosión

Tenemos los siguientes tipos de aleaciones:

- *Constantán.* Una aleación de cobre y níquel, auto compensado por temperatura. Se constituye en la aleación más antigua y usada, ya que tiene la mejor combinación global de propiedades necesarias para la mayoría de las aplicaciones de las galgas extensométricas. Entre sus características tenemos: alta sensibilidad al esfuerzo, o factor de galga, es relativamente insensible a la temperatura. Su resistividad es lo suficientemente alta como

para lograr valores adecuados de resistencia aún para pequeñas grillas, su coeficiente de temperatura para resistencias no es excesivo, muy buena vida útil y buena capacidad de elongación. Sin embargo, tiende a exhibir un desvío o “drift” continuo a temperaturas superiores de 65 °C, esta característica se debe tener en cuenta cuando la estabilidad en cero de la galga extensométrica es crítica sobre períodos prolongados.

- *Aleación isoelástica*, de hierro y níquel. Utilizadas para esfuerzos puramente dinámicos, es decir, cuando no es necesario mantener una referencia estable en cero. Este tipo de aleación presenta las siguientes características: larga vida útil a fatiga, alto factor de galga (aproximadamente 3.2) que mejora la relación señal a ruido en pruebas dinámicas y el material de la grilla es magnetoresistivo.

- *Aleación Karma*, de cromo y níquel. Presenta las siguientes características: una buena vida útil y excelente estabilidad. Es utilizada para mediciones estáticas de esfuerzo de alta precisión durante largos períodos de tiempo (meses o años) a temperatura ambiente. Muy usada si se requiere de una galga auto compensada por temperatura que se adapte a las condiciones ambientales.

Factor de galga. Un parámetro fundamental de las galgas extensométricas es la sensibilidad al esfuerzo, expresado cuantitativamente como el factor de galga (GF). El factor de galga es definido como la relación de variación fraccional de resistencia eléctrica y la variación fraccional de longitud:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (20)$$

Los valores de factor de galga para los siguientes materiales son: constantán (2,00 – 2,05), karma (2,1) e isoelástico (3,2).

Material del soporte. El soporte es el que brinda el medio para manipular la galga cuando se la está instalando, proporciona una superficie adherible para fijarla en el elemento de prueba y es el aislante eléctrico entre la grilla de metal y el elemento de prueba.

Este material debe tener las siguientes características: mínimo espesor consistente, alta resistencia mecánica y dieléctrica, buena adherencia al pegante, no higroscópico. Los materiales más usados son: papel, poliamida y resina epoxi – fenólica.

Pegante para fijar el deformímetro. Para que exista una buena transmisión de las deformaciones, el deformímetro debe cumplir con las siguientes características: alta resistencia mecánica, al deslizamiento y dieléctrica; buena adherencia, baja absorción de humedad y fácil aplicación.

Serie del deformímetro. El material del alambre y del soporte del deformímetro, junto a otras características de la grilla determinan la serie del deformímetro.

Longitud del deformímetro. La longitud del deformímetro es la longitud activa, la cual es sensible a la deformación. Las partes extremas de la grilla y los terminales de cobre son insensibles a la deformación, ya que su área transversal es grande y tiene una baja resistencia eléctrica.

Modelo del deformímetro. El modelo del deformímetro hace referencia a la orientación de las grillas, al tipo de construcción y a su configuración. De acuerdo a la configuración tenemos: uniaxiales, biaxiales o triaxiales; en cuanto al tipo de configuración: planas y superpuestas.

3.2.1.6 Factores externos que afectan la medición en las galgas extensométricas[28]. Para el montaje de las galgas extensométricas se debe tomar en cuenta factores externos que afectan la medición, tales como: humedad, radiación nuclear, temperaturas altas y presión hidrostática. A continuación se analiza cada uno de los factores anteriormente mencionados:

Humedad. El medidor de deformación se encuentra afectado directamente por el contacto con el agua o con el vapor de agua existente en el aire, ya que el agua es absorbida por el

adhesivo y el conductor, ésta altera el funcionamiento del medidor de las siguientes maneras:

- La humedad disminuye la resistencia a tierra del medidor, reduce el esfuerzo y rigidez de la unión, además minimiza la efectividad del adhesivo al transmitir la deformación de la probeta al medidor, con lo cual se presentan errores en la medición.
- La presencia de humedad en el adhesivo produce deformación en el mismo, ya que los plásticos se expanden cuando absorben agua y se contraen cuando la liberan. Dicha deformación se presentará también en el medidor por lo que el valor de deformación de la probeta no será el correcto.
- La presencia de agua en el adhesivo producirá electrólisis cuando la corriente pase a través del medidor, con lo cual el filamento medidor es desgastado y se produce un aumento considerable en la resistencia, afectando así en el valor correcto de medición.

Presión hidrostática. En el caso de mediciones en tuberías, los medidores se ubican en el interior de las tuberías encontrándose afectados por la presión de gases o fluidos los cuales actúan directamente sobre el medidor.

A partir de varios experimentos y estudios de Milligan y Brace, llegaron a la conclusión de que existe un factor de corrección para la deformación aproximadamente de $4 \mu \text{ in/in}$ para una presión de 1000 lb/plg^2 (7MPa), y para presiones menores a 1000 lb/in^2 (7MPa) el factor de corrección se considera despreciable.

Además las burbujas en el adhesivo no se pueden tolerar ya que la presión normal a la superficie del medidor forzaría al elemento sensible a tomar la forma de cualquier imperfección, dando como resultado errores en la medición.

Radiación nuclear. Si los medidores de deformación se encuentran expuestos en campos de radiación nuclear, los problemas que se presentan son los siguientes:

- Se presenta un cambio de la resistividad eléctrica de deformación en los alambres conductores, debido a la presencia de neutrones. Alcanzando cambios en $\Delta R/R$ de 2 a 3%.
- Los neutrones producen efectos mecánicos que deterioran los componentes del medidor de deformación.
- El medidor de deformación presenta un incremento en su esfuerzo de cedencia y módulo de elasticidad, y disminución en su capacidad de elongación.
- La radiación afecta a los polímeros, ya que destruye su estructura orgánica, por lo que el adhesivo se ve afectado, siendo preferible utilizar materiales cerámicos.

Alta temperatura. A elevadas temperaturas y dependiendo del tiempo de observación los elementos del medidor de deformación se ven afectados de la siguiente manera:

- La sensibilidad de los elementos metálicos se reduce considerablemente, por ello se debe elegir una aleación adecuada que minimice este efecto.
- Se altera la estabilidad del medidor debido a la relajación de esfuerzos en el papel adhesivo y en el material del conductor.
- Se producen cambios metalúrgicos en los elementos sensibles de medición.

3.2.1.7 *Materiales usados para el montaje de la galga extensométrica [29].* Para garantizar una buena sujeción de la galga extensométrica al objeto medible, debemos utilizar ciertas consideraciones explicadas a continuación:

Materiales de unión. La función de estos materiales es mantener fija la galga extensométrica al objeto medible y transferir la deformación sin pérdidas a la galga.

La técnica del uso de adhesivos es la más utilizada, sin embargo existen otros tales como: el punto de suelda y la unión con materiales cerámicos.

Las ventajas que presentan los adhesivos son:

- Unión de diferentes materiales.
- Pueden ser curados químicamente, por ejemplo en casos donde se requiere baja absorción de humedad.
- Control de la velocidad de curación para diferentes condiciones ambientales.
- La alta resistividad favorece a que exista alta resistencia de aislamiento entre la galga extensométrica y el objeto.

Los principales materiales de unión son:

- *Adhesivos curados en frío.* Son de fácil uso, constan de dos partes: una que reacciona por la eliminación de aire y la otra que debe ser mezclada antes de la aplicación. Estas tienen un tiempo de reacción muy corto, por lo que son muy utilizadas en análisis experimentales.
- *Adhesivos curados en caliente.* Se usan únicamente cuando el objeto medido tiene requerimientos de altas temperaturas. Ofrecen mayor rango de aplicación y más alta precisión.
- *Masilla cerámica.* Se usa con galgas especiales cuando se requiere su uso a altas temperaturas o temperaturas bajo cero.
- *Puntos de suelda.* Es uno de los métodos más simples de unión consiste en un pequeño punto de soldadura. No puede ser usada en superficies curvas, lo cual disminuye el campo de aplicación.

Tabla 2. Materiales de unión

MATERIAL	VENTAJAS	CAMPOS DE APLICACIÓN
Adhesivos curados en frío	<ul style="list-style-type: none"> • Fáciles de usar. • Reaccionan en tiempo corto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis experimentales y en campos similares
Adhesivos curados en caliente	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuados para altas temperaturas. • Tienen mayor rango de aplicación. • Presentan mayor precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Partes de máquinas sometidas a elevadas temperaturas.
Masilla cerámica	<ul style="list-style-type: none"> • Adecuada para altas temperaturas y temperaturas bajo cero. 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis experimentales con galgas especiales.
Puntos de suelda	<ul style="list-style-type: none"> • Método simple de unión 	<ul style="list-style-type: none"> • En elementos fáciles de soldar, excepto en superficies curvas y pequeñas.

Fuente: Autores

Agentes limpiadores. Es necesaria la preparación del punto de montaje para lo cual se utiliza agentes adecuados para limpiar, entre estos se tiene algunos solventes químicos que deben ser utilizados con extremo cuidado. Los más utilizados son: el alcohol y la acetona.

Protección del punto de medición. Los puntos de medición en las galgas extensométricas deben ser protegidos tanto de daños físicos como químicos, incluso bajo condiciones ideales como en un laboratorio las características de la medición pueden ser afectadas por diversos factores como: humedad del aire, contacto con agua, aceite y efectos mecánicos.

Para casos simples es suficiente una pequeña capa de barniz pero para otros casos se requiere un cierto número de capas para proteger.

El periodo de protección que se provee depende del tipo de cubierta utilizada y de su espesor, también del tipo de medio para el cual es requerido. La duración del periodo de protección requerido no solo depende del tiempo de servicio necesitado sino también de la duración de las medidas individuales.

El factor principal que afecta a las galgas es la corrosión, la cual afecta directamente en las señales de medida, causando grandes errores.

Agentes protectores más utilizados. Los protectores más utilizados son:

- *Barniz de poliuretano.* El aire seca el barniz brindando una protección contra el contacto de polvo y niveles de humedad normales. Resistencia a la temperatura desde -30 °C hasta 100°C.
- *Barniz de nitrilo.* Su rango de aplicaciones y características muy parecidas al anterior, también es resistente a gasolina y aceite. Es preferido en aplicaciones que incluyen contacto con gases licuofactados, pero no con oxígeno. Rango de temperatura: -269°C hasta 150°C.
- *Barniz de silicón.* Utilizado para la protección de masilla cerámica, también para casos de humedad y contaminación y temperaturas altas. Rango de temperatura: -50°C a 450°C.
- *Vaselina de petróleo.* Tiene varias ventajas, es barata, fácil de aplicar y muy buena protección bajo el agua.
- *Resinas epóxicas.* Muy adecuadas para protección contra aceites, combustibles del motor, ácidos diluidos, alcalies diluidos; ofrece además una buena protección mecánica.

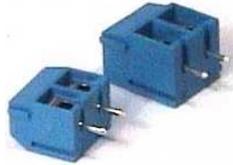
Tabla 3. Materiales de protección

TIPO DE RECUBRIMIENTO	TEMPERATURA (mín. / máx.) °C	PROTECCIÓN OFRECIDA
Barniz de Poliuretano	-30 /100	<ul style="list-style-type: none"> • Polvo • Resistencia al aceite • Buena resistencia a la abrasión
Barniz de Nitrilo	-269 / +150	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia la aceite y a la gasolina • Resistencia con gases licuofactados.
Barniz de Silicón	-50 / +450	<ul style="list-style-type: none"> • Protege uniones cerámicas • En ambientes húmedos y altamente contaminados.
Vaselina de petróleo	Alrededor de 50°C	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al agua y ambientes húmedos.
Resinas Epóxicas	Depende de las condiciones de curado	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia al aceite, combustibles, ácidos diluidos, alcalies diluidos. • Protección mecánica

Fuente: Autores

Protección de los terminales para soldar. Para proteger los terminales para soldar se utilizan los llamados “puentes de conexión”, cuya función es evitar el daño de los terminales que se produce al manipularlos durante la conexión y funcionamiento.

Figura 37. Puentes de conexión



Fuente: <http://www.jbcelectronics.com.ar/productos1.detalle.php?id=7>

3.3 Puente de Wheatstone [30]

Charles Wheatstone, científico inglés, en 1843 expone un circuito el cual hace precisa la medida de la resistencia eléctrica. A este circuito se lo conoce como el “puente de Wheatstone”.

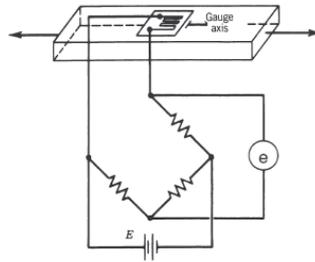
El puente de Wheatstone puede ser utilizado de varias maneras para medir la resistencia eléctrica:

- Para determinar el valor absoluto de una resistencia en comparación con otra resistencia conocida.
- Para determinar cambios relativos en una resistencia.

Este último es el que se utiliza en la técnica de las galgas extensométricas para medir la variación de resistencia relativa $\Delta R/R$.

La manera de colocar la galga de medida es en medio de cualquier rama del puente como se indica a continuación.

Figura 38. La galga de medición se conecta al puente de Wheatstone

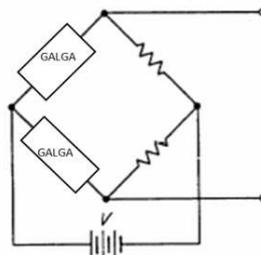


Fuente: http://medicionesindustriales2008-2.blogspot.com/2009_01_01_archive.html

El resto de ramas se completan con resistencias pasivas de idéntico valor a la de la galga de medida aún no deformada.

Existen varias formas de colocar las galgas extensométricas, en el caso anterior solo ocupamos uno de cuatro ramales por lo que se denomina operación de **cuarto de puente**, podemos utilizar dos ramales del puente obteniendo una configuración de **medio puente** como se indica en la siguiente figura.

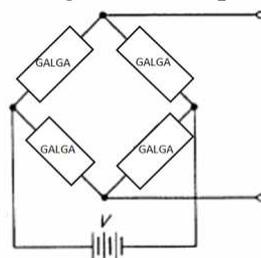
Figura 39. Configuración de medio puente



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Wheatstone

Si colocamos cuatro galgas extensométricas en los cuatro ramales tenemos una configuración de **puente completo** como se indica a continuación:

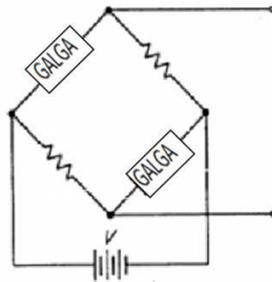
Figura 40. Configuración de puente completo



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Wheatstone

Existe una conexión llamada **doblo cuarto de puente**, la cual se diferencia de la conexión de medio puente porque las galgas extensométricas se encuentran en paralelo en vez de estar en serie.

Figura 41. Configuración de doble cuarto de puente



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Wheatstone

CAPÍTULO IV

4. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

4.1 Características del banco de pruebas

El banco de pruebas para ensayos de flexión consta de los siguientes elementos:

- Vigas
- Apoyos
- Distancia entre apoyos
- Carga
- Puntos de medición
- Galgas extensométricas
- Portapesas

4.1.1 Vigas. El tipo de viga que se utiliza para los casos de simplemente apoyada es un perfil IPE 160 (**ANEXO A**) de una longitud igual a 4,02 metros.

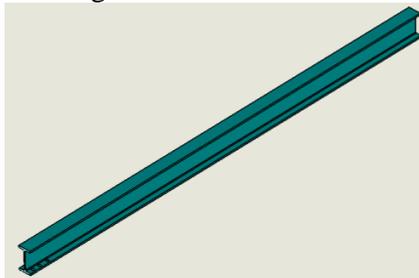
Figura 42. Perfil IPE 160



Fuente: Autores

Para el caso de viga en voladizo se utiliza un perfil IPN 80 (**ANEXO B**) de una longitud igual a 1,5 metros.

Figura 43. Perfil IPN 80



Fuente: Autores

4.1.2 Apoyos. En el caso isostático el número de incógnitas presentes son máximo tres, por tal razón se utiliza dos apoyos de tipo “simplemente apoyado” (ANEXO C), obteniendo un sistema con 2 incógnitas: R_A y R_B .

En el caso hiperestático el número de incógnitas son más de tres, por lo que se utiliza tres y cuatro apoyos de tipo “simplemente apoyado”.

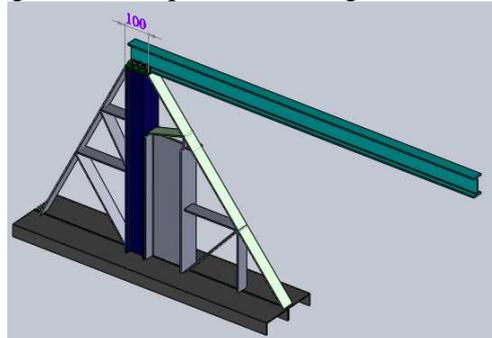
Figura 44. Esquema del Apoyo



Fuente: Autores

Para el caso de viga en voladizo se construye un pedestal de 85 cm de altura, al cual se fija la viga consiguiendo así el empotramiento de la misma.

Figura 45. Esquema de la viga de voladizo



Fuente: Autores

4.1.3 Distancia entre apoyos. Para todos los casos excepto el de viga en voladizo, se debe considerar una separación de 5 cm desde cada extremo de la viga por motivos de seguridad.

Figura 46. Distancia entre apoyos para el caso de dos apoyos



Fuente: Autores

Para el sistema hiperestático se debe colocar en el caso de tres apoyos, un apoyo más a una distancia de 260 cm desde el extremo izquierdo de la viga.

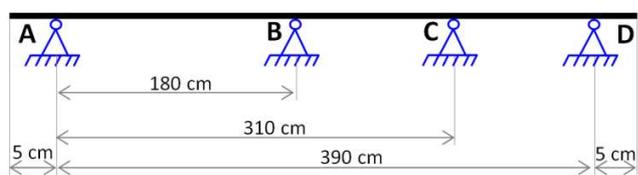
Figura 47. Distancia entre apoyos para el caso de tres apoyos



Fuente: Autores

Para el caso de cuatro apoyos se debe colocar dos apoyos más, a una distancia de 185 cm y 315 cm respectivamente, desde el extremo izquierdo de la viga.

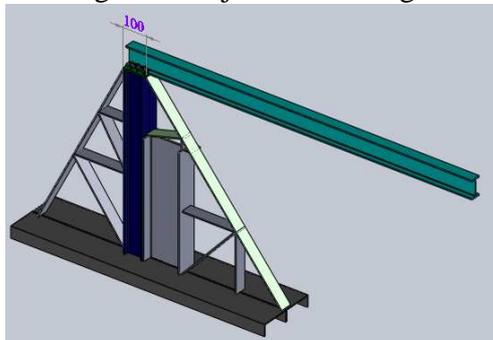
Figura 48. Distancia entre apoyos para el caso de cuatro apoyos



Fuente: Autores

En el caso de viga en voladizo para fijar la viga al pedestal, se emperna la viga en una placa de 10 cm de longitud, la cual está soldada al pedestal y la longitud efectiva de la viga es de 139 cm.

Figura 49. Longitud de fijación de la viga en el pedestal



Fuente: Autores

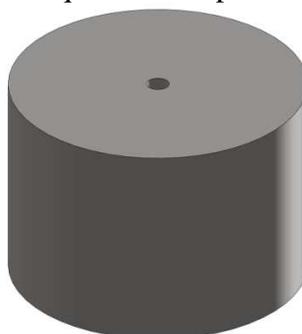
4.1.4 Carga. Dependiendo del caso de flexión, en la siguiente tabla se muestra los valores de carga máxima aplicada y la distancia desde el extremo de la viga hacia el punto de aplicación:

Tabla 4. Valores de carga máxima y distancias aplicadas según el tipo de flexión

CASO DE FLEXIÓN	CARGA MÁXIMA (kg)	DISTANCIA DESDE EL EXTREMO DE LA VIGA (cm)
Dos apoyos	200	200
Tres apoyos	100 - 100	133 - 328
Cuatro apoyos	80 - 80 - 40	90 - 255 - 358
Viga en voladizo	90	139

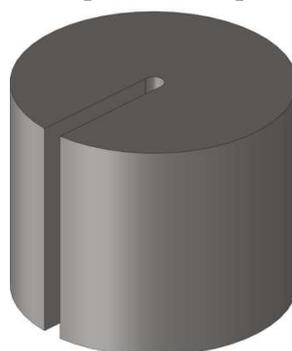
Fuente: Autores

Figura 50. Esquema de la pesa no ranurada



Fuente: Autores

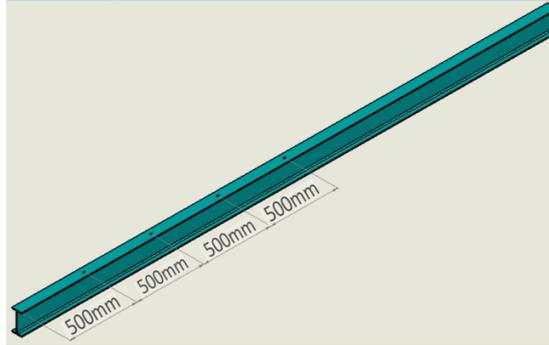
Figura 51. Esquema de la pesa ranurada



Fuente: Autores

4.1.5 Puntos de medición. Para el caso de la viga simplemente apoyada se considera cuatro puntos de medida a una distancia de 500 mm cada uno, los cuales se muestran en la siguiente figura:

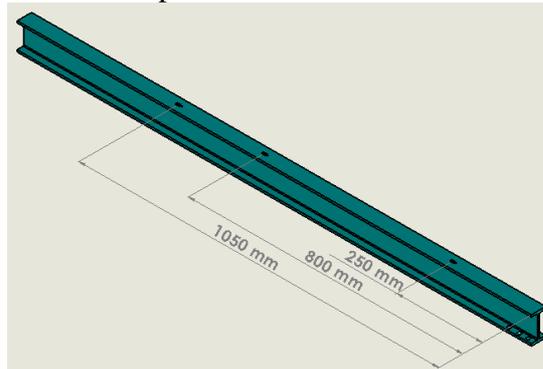
Figura 52. Distancia entre los puntos de medición en los casos de simplemente apoyado



Fuente: Autores

Para el caso de viga en voladizo se considera tres puntos de medida, a 15 cm, a 70 cm y a 95 cm del empotramiento, los cuales se muestran en la siguiente figura:

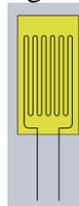
Figura 53. Distancia entre los puntos de medición en el caso de viga en voladizo



Fuente: Autores

4.1.6 Galgas extensométricas. Las galgas a utilizar son de tipo lineal, el material del alambre es constantán ya que éste tiene alta sensibilidad al esfuerzo, el factor de galga es 2,11, el material del soporte es poliamida, la longitud activa es 8 mm.

Figura 54. Galga extensométrica



Fuente: Autores

4.1.7 Portapesas. Se diseñan tres portapesas, los cuales tienen la facilidad de deslizarse sobre la viga y de soportar hasta un peso máximo de 200 kg.

Figura 55. Portapesas



Fuente: Autores

4.2 Diseño de los elementos del banco de pruebas

4.2.1 Cálculo de las dimensiones de las pesas. Para la construcción de las pesas utilizaremos un acero de transmisión de 13 cm de diámetro exterior, con un peso de 10 kg cada una.

Se construye veinte pesas de las cuales ocho son ranuradas para facilitar la colocación de las mismas en el portapesas, las doce restantes son sin ranura.

4.2.1.1 Pesas no ranuradas. El cálculo realizado para determinar las dimensiones de la pesa no ranurada es el siguiente:

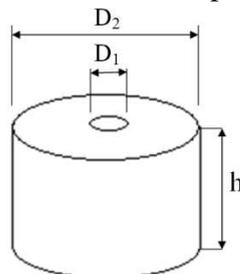
DATOS:

$$D_2=130 \text{ mm}$$

$$D_1=10 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{acero}}=7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 7,8 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \text{ (ANEXO D)}$$

Figura 56. Dimensiones de la pesa no ranurada



Fuente: Autores

$$\text{Volumen}_{\text{pesa}} = \text{Volumen}_{\text{cilindro}} - \text{Volumen}_{\text{taladrado}}$$

$$\text{Volumen}_{\text{pesa}} = \frac{\pi D_2^2}{4} \times h - \frac{\pi D_1^2}{4} \times h \quad (21)$$

$$\text{Volumen}_{\text{pesa}} = \frac{\pi(130\text{mm})^2}{4} \times h - \frac{\pi(10\text{mm})^2}{4} \times h$$

$$\text{Volumen}_{\text{pesa}} = 13\,273\,h - 78,54\,h$$

$$\text{Volumen}_{\text{pesa}} = 13\,194,46\,h$$

Sabemos que:

$$\delta_{\text{acero}} = \frac{\text{masa}_{\text{pesa}}}{\text{Volumen}_{\text{pesa}}} \quad (22)$$

Para obtener pesas de masa= 10 kg, se reemplaza los valores en la ecuación anterior:

$$7,8 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} = \frac{10\text{kg}}{13\,194,46\,h}$$

De donde se despeja h:

$$h = \frac{10\text{kg}}{7,8 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \times 13\,194,46\,h}$$

$$h = 97,17\, \text{mm} = 9,717\, \text{cm}$$

4.2.1.2 Pesas ranuradas. Considerando que debemos retirar una porción del cilindro, para poder ubicarlo sobre el portapesas, el cálculo de las dimensiones es el siguiente:

DATOS

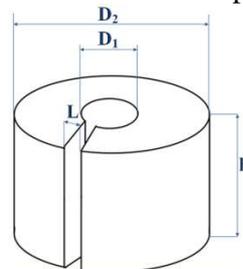
$$D_2 = 130\, \text{mm}$$

$$D_1 = 10\, \text{mm}$$

$$L = 10\, \text{mm}$$

$$\delta_{\text{acero}} = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 7,8 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \quad (\text{ANEXO D})$$

Figura 57. Dimensiones de la pesa ranurada



Fuente: Autores

$$\text{Volumen}_{\text{pessa}} = \text{Volumen}_{\text{cilindro}} - \text{Volumen}_{\text{mecantizado}}$$

$$\text{Volumen}_{\text{pessa}} = \frac{\pi D_2^2}{4} \times h - \frac{\pi D_1^2}{4} \times h - (D_2 - D_1) \times L \times h \quad (23)$$

$$\text{Volumen}_{\text{pessa}} = \frac{\pi(130\text{mm})^2}{4} \times h - \frac{\pi(10\text{mm})^2}{4} \times h - (130\text{ mm} - 10\text{mm}) \times 10\text{mm} \times h$$

$$\text{Volumen}_{\text{pessa}} = 13\,273\text{ h} - 78,54\text{ h} - 1\,200\text{ h}$$

$$\text{Volumen}_{\text{pessa}} = 11\,994,46\text{ h}$$

Para obtener pesas de masa= 10 kg, se utiliza la ec. (22):

$$\delta_{\text{acero}} = \frac{\text{masa}}{\text{Volumen}_{\text{pessa}}}$$

$$7,8 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} = \frac{10\text{ kg}}{11\,994,46\text{ h}}$$

De donde se despeja h:

$$h = \frac{10\text{kg}}{7,8 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \times 11\,994,46\text{mm}^2}$$

$$h = 106,89\text{ mm} = 10,69\text{ cm}$$

4.2.2 Diseño de los apoyos

4.2.2.1 Apoyos para viga simplemente apoyada

Requerimientos. Para el diseño de cada apoyo se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

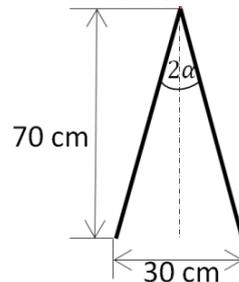
- Debe cumplir la función de apoyo simple.
- La altura de los cuatro apoyos debe ser la misma.
- Debe existir buena estabilidad.

Al analizar estas consideraciones, se diseña los apoyos con las siguientes características:

- Para apoyo simple se utiliza un eje con la finalidad de conseguir una reacción o apoyo lineal.
- La altura de cada apoyo es 74,5 cm.
- Se suelda elementos de refuerzo que garantizan la estabilidad del apoyo.

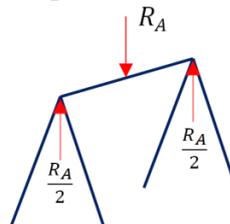
Dimensionamiento de los apoyos simples

Figura 58. Dimensiones del apoyo simple



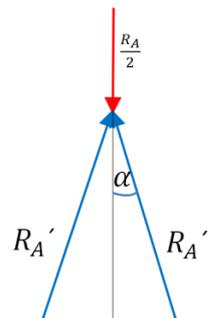
Fuente: Autores

Figura 59. Esquema de los apoyos A y B



Fuente: Autores

Figura 60. Fuerzas actuantes en el apoyo



Fuente: Autores

Cálculo de las fuerzas presentes:

$R_A = 191,5287 \text{ kg}$ (Reacción mayor obtenida en el caso de tres apoyos)

$$\frac{R_A}{2} = \frac{191,5287 \text{ kg}}{2} = 95,7644 \text{ kg}$$

$$\text{Sen } \alpha = \frac{15 \text{ cm}}{70 \text{ cm}} \rightarrow \alpha = 12,37^\circ \quad (24)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (25)$$

$$\frac{R_A}{2} - 2 R_{A'} \times \text{Cos } \alpha = 0$$

$$95,7644 \text{ kg} - 2 R_{A'} \times \text{Cos } 12,37^\circ = 0$$

$$R_{A'} = 49,0202 \text{ kg}$$

Cálculo del área del ángulo:

$n = 4$ (*coeficiente de seguridad*)

$S_y = 2\,530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ (ANEXO E)

Se utiliza la ec. (6):

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{R_{A'}}{A_{\text{ángulo}}} = \frac{S_y}{n}$$

$$A_{\text{ángulo}} = \frac{R_{A'} \times n}{S_y}$$

$$A_{\text{ángulo}} = \frac{49,0202 \text{ kg} \times 4}{2\,530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}$$

$$A_{\text{ángulo}} = 0,077 \text{ cm}^2$$

Comparando con los valores del catálogo de DIPAC, el área corresponde a un perfil L 20 x 20 x 2, pero se utiliza un perfil L 40 x 40 x 6 ya que es el material disponible. (ANEXO F)

Comprobación del diseño del apoyo según la norma AISC 360-05. El perfil L 40x40x6 es una sección compacta según la tabla B4.1. (ANEXO G).

Para calcular la relación de esbeltez se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Relación de esbeltez} = \frac{kL}{r} \quad (26)$$

Utilizando la ec. (26) tenemos:

$$\frac{kL}{r} = 55,29 \leq 200 \text{ (Cumple)}$$

Donde:

$k=1$: para miembros a compresión.

$L=700\text{mm}$: longitud efectiva del elemento

$r=12,659\text{mm}$: radio de giro del elemento

Para elementos esbeltos se aplica la sección E7, donde:

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \quad (27)$$

$$\text{Se verifica si: } \frac{kL}{r} < 4,71 \sqrt{\frac{E}{Q \cdot F_y}} \quad (28)$$

Donde:

$E=29000$ kpsi

$F_y=36$ kpsi

$$55,29 < 133,68 \text{ (Cumple)}$$

Se aplica la siguiente ecuación.

$$F_{cr} = Q \left[0,658 \frac{Q F_y}{F_e} \right] \cdot F_y \quad (29)$$

Donde:

$Q=1$ por ser la sección no compacta (ANEXO G).

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kL}{r}\right)^2} = 6452,8 \quad (30)$$

$$F_{cr} = 35910 \text{ psi}$$

Si $A_g = 0.688 \text{ in}^2$

$$P_n = 24706 \text{ lbf}$$

$$P_a \leq \frac{P_n}{\Omega_c}$$

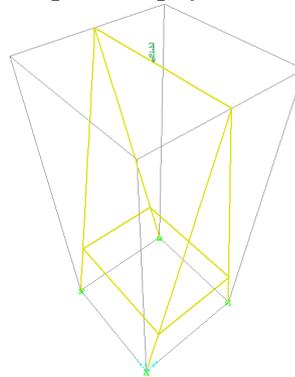
$\Omega_c = 1,67$ (ASD)

$$104,97 \leq \frac{24706}{1,67}$$

$$104,97 \leq 14794 \text{ (Resiste)}$$

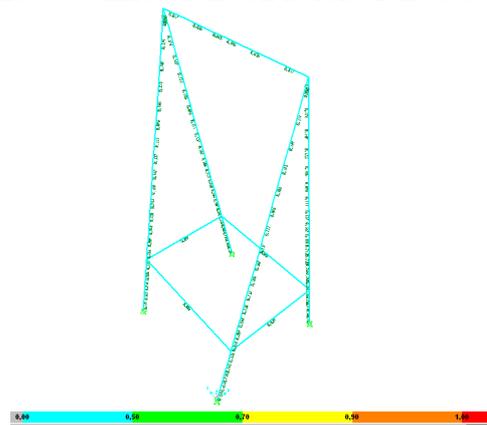
Se comprueba la resistencia del apoyo mediante el programa SAP2000, que aplica la norma AISC 360-2006 para elementos estructurales.

Figura 61. Modelo de análisis para el apoyo, realizado en software SAP 2000



Fuente: Autores

Figura 62. Esquema de verificación con la relación de esfuerzos en el apoyo



Fuente: Autores

El valor promedio de la suma de las razones de esfuerzos es de 0,25, presentando un valor máximo de 0,315 en los elementos: 26, 51, 71, 102.

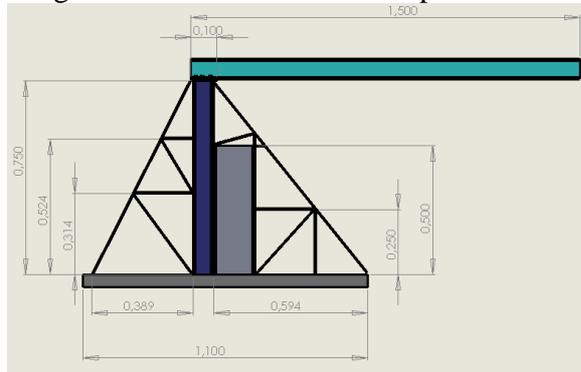
Al ser los valores menores a la unidad, se comprueba la resistencia del apoyo.

4.2.2.2 Modelo de viga en voladizo

Requerimientos

- Debe tener la estabilidad y rigidez suficiente para evitar que se voltee.
- La altura que debe tener es de 90 cm.

Figura 63. Dimensiones del empotramiento



Fuente: Autores

Verificación de la resistencia de la viga.

Datos:

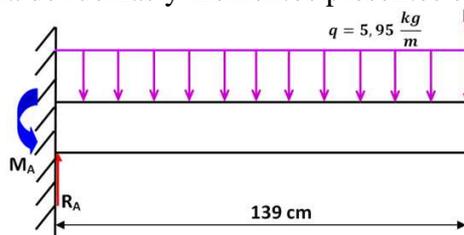
Perfil IPN 80 (ANEXO B)

$$I_x = 77 \text{ cm}^4$$

$$A = 7,58 \text{ cm}^2$$

$$W = 5,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \text{ (peso propio de la viga)}$$

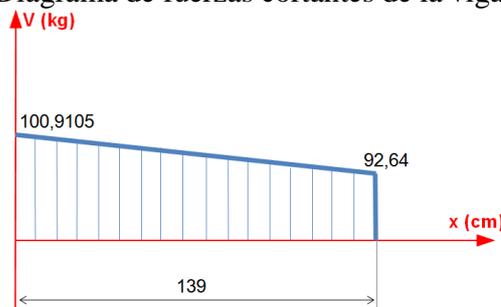
Figura 64. Esquema de fuerzas y momentos presentes en la viga en voladizo



Fuente: Autores

$$P = 90 \text{ kg (carga máxima)} + 2,64 \text{ kg (peso del portapesas)} = 92,64 \text{ kg}$$

Figura 65. Diagrama de fuerzas cortantes de la viga en voladizo



Fuente: Autores

Figura 66. Diagrama de momentos flectores de la viga en voladizo



Fuente: Autores

Cálculo de la carga puntual:

$$P' = q \cdot l \quad (31)$$

$$P' = 5,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 1,39 \text{ m}$$

$$P' = 8,2705 \text{ kg}$$

Cálculo del momento en A:

$$\sum M_A = 0 \quad (32)$$

$$8,2705 \text{ kg} \times 69,5 \text{ cm} + 92,64 \text{ kg} \times 139 \text{ cm} - M_A = 0$$

$$M_A = 13 451,7598 \text{ kg.cm}$$

Cálculo de la reacción R_A :

Se utiliza la ec. (25):

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A - P' - P = 0$$

$$R_A - 8,2705 \text{ kg} - 92,64 \text{ kg} = 0$$

$$R_A = 100,9105 \text{ kg}$$

Comprobación de la resistencia de la viga. Para determinar el esfuerzo admisible de la viga sometida a flexión se utiliza la norma AISC 360-05 sección F.

Se determina el tipo de sección tanto del alma como del patín.

Para el patín la relación es:

$$\frac{b_f}{t_f} = 12,67 \quad (33)$$

Donde:

b_f : Longitud del patín

t_f : Espesor del patín

Según la tabla B4.1 (Anexo G) el tipo de sección es no compacta.

Para el alma la relación es:

$$\frac{h}{t_w} = 20,51 \quad (34)$$

Donde:

h : Peralte

t_w : Espesor del alma

Según la tabla B4.1 (ANEXO G) el tipo de sección es compacta.

Para un perfil I con una sección de patín no compacta y una sección del alma compacta se utiliza la sección F3 de la norma AISC 360-05, se aplica la siguiente ecuación para calcular el esfuerzo nominal de flexión (M_n).

$$M_n = \left[M_p - (M_p - 0,7 F_y \cdot S_x) \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \right] \quad (35)$$

Donde:

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f}$$

$\lambda_{pf} = \lambda_p$ de la sección compacta

$\lambda_{rf} = \lambda_r$ de la sección no compacta

S_x (Módulo de inercia respecto al eje x) = 19500 mm³ (Anexo B)

Para encontrar M_p se utiliza la ecuación siguiente:

$$M_p = F_y \cdot Z_x \quad (36)$$

Donde:

$$F_y = 36 \text{ ksi} = 248,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ (Anexo E)}$$

$$Z_x = 2\,2890 \text{ mm}^3$$

$$M_p = 248,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 22890 \text{ mm}^3$$

$$M_p = 5\,681\,298 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

Ahora utilizando la ec. (35):

$$M_n = \left[5\,681\,298 - \left(5\,681\,298 - 0,7 \cdot 248,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 19500 \text{ mm}^3 \right) \cdot \left(\frac{1,78 - 10,74}{161,76 - 10,74} \right) \right]$$

$$M_n = (5\,681\,298 + 135\,996,72)$$

$$M_n = 5\,817\,294,72$$

Ahora se calcula el esfuerzo admisible de flexión:

$$M_c = \frac{M_n}{\Omega_b} \quad (37)$$

Donde:

$$\Omega_b = 1,67 \text{ para diseño ASD}$$

$$M_c = \frac{5\,817\,294,72}{1,67}$$

$$M_c = 3\,483\,410,01 \text{ N}\cdot\text{mm} = 35\,521 \text{ Kg}\cdot\text{cm}$$

Se compara con el momento requerido:

$$M_r \leq M_c$$

Donde:

$$M_r = 13\,451,78 \text{ Kg}\cdot\text{cm}$$

$$13\,451,78 \text{ kg}\cdot\text{cm} \leq 35\,521 \text{ kg}\cdot\text{cm}$$

Se comprueba que si resiste.

Diseño de la columna. Para la columna se utiliza dos perfiles soldados IPN 80, ya que son los que están disponibles en el mercado.

Se sabe que la columna está sometida a esfuerzos combinados, uno de flexión y otro de compresión, por esta razón utilizamos la sección H de la norma AISC 360-05.

Utilizando la ec. (26) se tiene:

$$\frac{kl}{r} \leq 200 \quad (38)$$

Donde:

$$k=1$$

$$l=\text{longitud libre}=750 \text{ mm}$$

$$r=\text{radio de giro}= 23,17 \text{ mm (ANEXO B)}$$

$$\frac{kl}{r} = 32,36$$

Se determina el tipo de sección en la tabla B4.1 (ANEXO G), que corresponde a la sección 10.

Para elementos de doble o simple simetría sujetos a flexión y fuerza axial se aplica la ecuación de la sección H1:

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1 \quad (39)$$

Donde:

$$P_r=100,91 \text{ kg (Figura 66.)}$$

$$P_c=23\ 049 \text{ kg (Calculado con la norma AISC 360-05)}$$

$$M_{rx}=13\ 451,72 \text{ kg.cm (Figura 67.)}$$

$$M_{cx}=59\ 475,43 \text{ kg.cm (Calculado con la norma AISC 360-05)}$$

$$M_{ry}=0$$

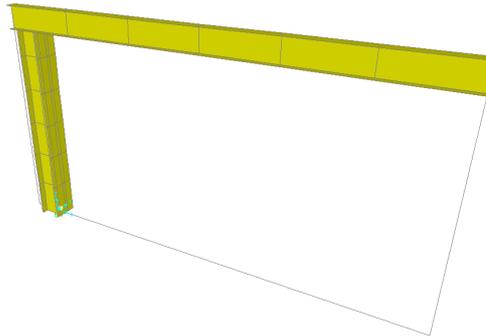
$$M_{cy}=0$$

$$\frac{100,91}{2 * 23\ 049} + \frac{13\ 451,72}{59\ 475,43} = 0,2283$$

$$0,2283 \leq 1 \text{ (Resiste)}$$

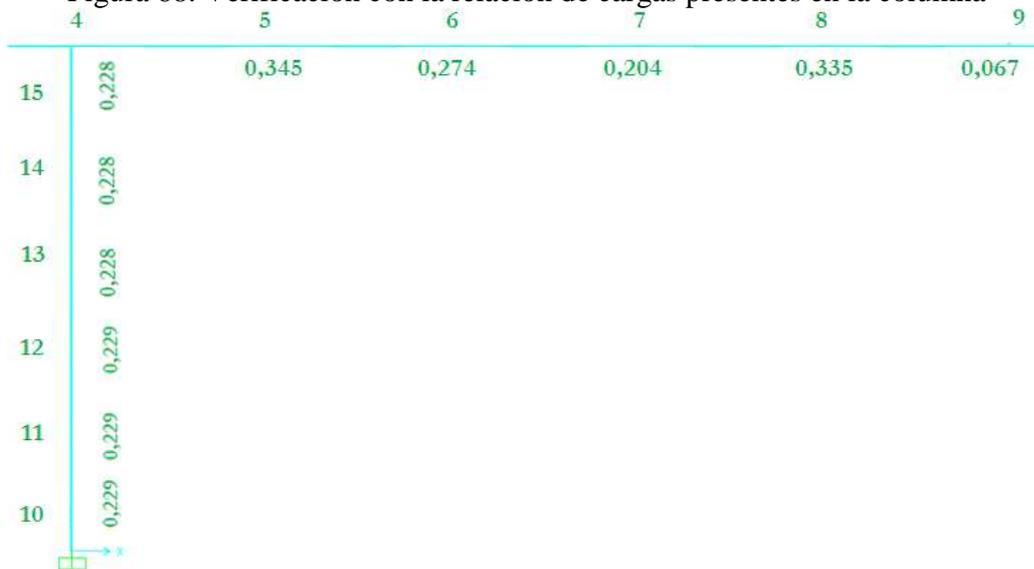
Se verifica con el software SAP 2000

Figura 67. Modelo de análisis para SAP2000 de la columna



Fuente: Autores

Figura 68. Verificación con la relación de cargas presentes en la columna



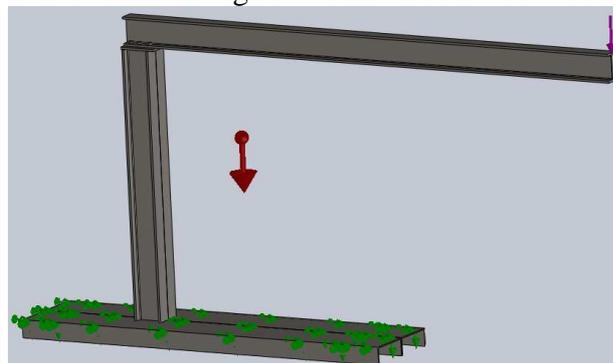
Fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 68, ningún valor excede 1, presentando un valor máximo de 0,315 en el elemento 4.

Diseño de la placa base. La placa debe diseñarse para soportar las cargas actuantes sobre la viga y que se transmiten a la columna, además debe cumplir la función de sujetar a la viga de tal manera que se consiga un empotramiento que limite los desplazamientos en todas las direcciones.

Se utiliza el software CAE para encontrar los esfuerzos máximos presentes en la placa y el factor de seguridad.

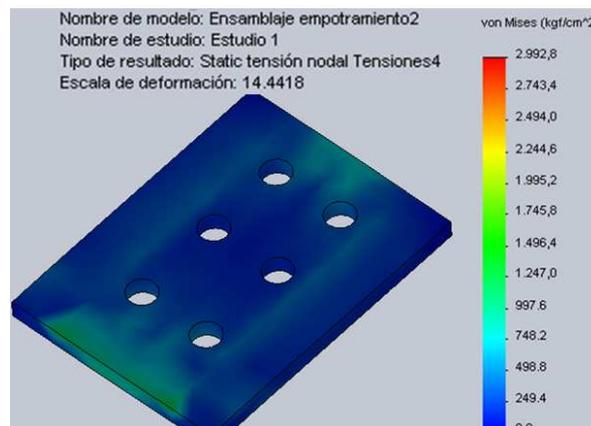
Figura 69. Modelo de análisis de la viga en voladizo obtenido mediante el software CAE



Fuente: Autores

Una vez hecho el modelo se analiza los elementos por separado, es así que tenemos los siguientes resultados para la placa base.

Figura 70. Esquema de esfuerzos presentes en la placa base, obtenido mediante software CAE

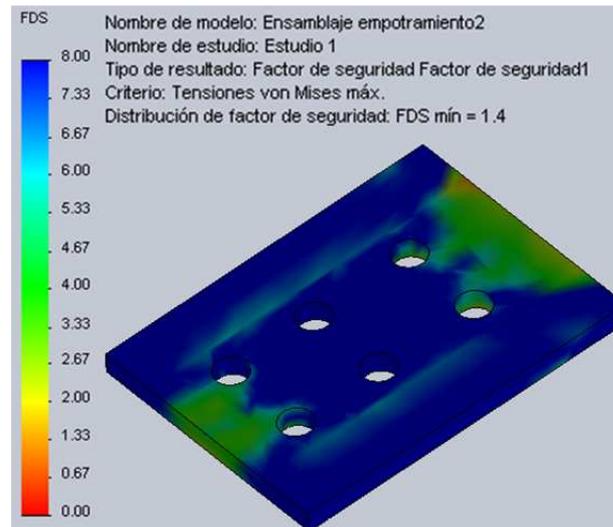


Fuente: Autores

El máximo esfuerzo que se presenta en la placa es de 1500 kg/cm^2 .

Ahora se analiza el factor de seguridad:

Figura 71. Esquema del factor de seguridad para la placa base, obtenido mediante software CAE

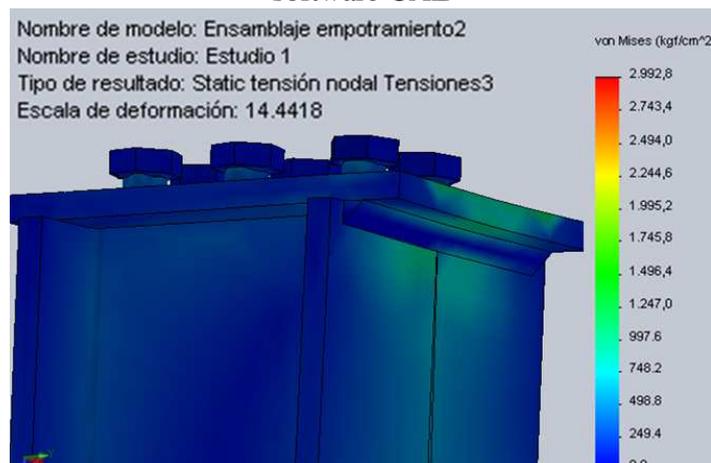


Fuente: Autores

Se obtiene un factor de seguridad mínimo de 1,4. Debido a que el factor es mayor a la unidad cumple con el requerimiento de resistencia.

Análisis del cordón de soldadura entre la placa base y la columna. Con la ayuda del software CAE se verifica la tensión que soporta el cordón de soldadura y su factor de seguridad, obteniendo los siguientes resultados:

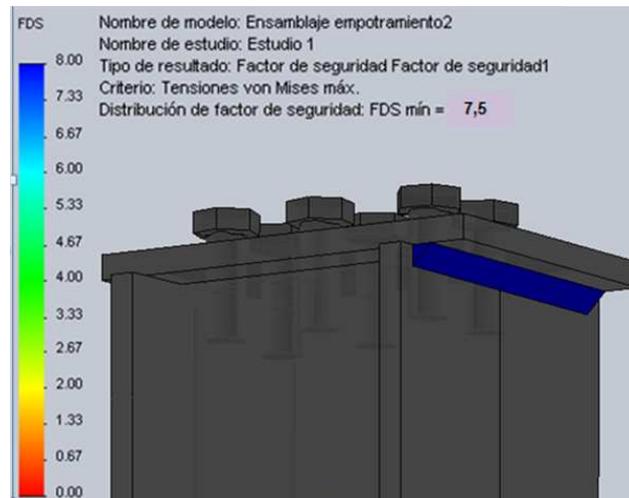
Figura 72. Esquema de esfuerzos presentes en el cordón de soldadura, obtenido mediante el software CAE



Fuente: Autores

El máximo esfuerzo que soporta la soldadura es de 1 400 kg/cm².

Figura 73. Esquema del factor de seguridad en el cordón de soldadura, obtenido mediante el software CAE



Fuente: Autores

Se obtiene un factor de seguridad mínimo de 7,5. Debido a que el factor es mayor a la unidad cumple con el requerimiento de resistencia.

Selección de los pernos. Se calcula los esfuerzos presentes en los pernos.

Tracción Primaria. Se aplica la siguiente ecuación:

$$P' = \frac{F}{N} \quad (40)$$

Donde:

P': Fuerza de tracción primaria.

F: Fuerzas actuantes en los pernos.

N: Número de pernos.

$$P' = \frac{F}{N}$$

$$P' = \frac{(92,64 + 8,2705) \text{ kg}}{6}$$

$$P' = 16,8184 \text{ kg}$$

Tracción Secundaria. Se aplica la siguiente ecuación:

$$P_1'' = \frac{M \cdot r_1}{\sum_j^n (r_j)^2} \quad (41)$$

Donde:

P_1'' : Fuerza de tracción secundaria.

M: Momento flector debido a la fuerza de tracción secundaria

r_i : Distancia desde el extremo del elemento al perno.

$\sum_j^n (r_j)^2$: Sumatoria de las distancias existentes desde el extremo de la placa a cada una de las filas de pernos.

Fila 1:

$$P_1'' = \frac{M \cdot r_1}{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2}$$

$$P_1'' = \frac{13\,451,7598 \text{ kg} \cdot \text{cm} \times 8,2 \text{ cm}}{(8,2 \text{ cm})^2 + (5,6 \text{ cm})^2 + (2,6 \text{ cm})^2}$$

$$P_1'' = 1\,046,9289 \text{ kg}$$

Fila 2:

$$P_2'' = \frac{M \cdot r_2}{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2}$$

$$P_2'' = \frac{13\,451,7598 \times 5,6 \text{ cm}}{(8,2 \text{ cm})^2 + (5,6 \text{ cm})^2 + (2,6 \text{ cm})^2}$$

$$P_2'' = 714,9758 \text{ kg}$$

Fila 3:

$$P_3'' = \frac{M \cdot r_3}{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2}$$

$$P_3'' = \frac{13\,451,7598 \times 2,6 \text{ cm}}{(8,2 \text{ cm})^2 + (5,6 \text{ cm})^2 + (2,6 \text{ cm})^2}$$

$$P_3'' = 331,9531 \text{ kg}$$

Tracción resultante en el perno más crítico (perno 1). Se aplica la siguiente ecuación:

$$P = P' + \frac{1}{2}P'' \quad (42)$$

Donde:

P: Fuerza de tracción resultante.

P' : Fuerzas de tracción primaria.

P'' : Fuerza de tracción secundaria.

$$P = P' + \frac{1}{2}P''$$

$$P = 16,8184 \text{ kg} + \frac{1}{2}(1\ 046,9289 \text{ kg})$$

$$P = 540,2829 \text{ kg}$$

Diseño a carga estática. Se aplica la siguiente ecuación:

$$\sigma_a = \frac{c \cdot n \cdot P}{2 \cdot A_t \cdot N} \quad (43)$$

Donde:

σ_a : Esfuerzo amplitud.

c: Coeficiente elástico de la junta.

n: Coeficiente de seguridad.

P: Fuerza de tracción resultante.

N: Número de pernos.

$$\sigma_a = \frac{c \cdot n \cdot P}{A_t \cdot N}$$

$$\sigma_a = \frac{0,2 \times 3 \times 540,2829 \text{ kg}}{A_t \times 2}$$

$$\sigma_a = \frac{162,0849 \text{ kg}}{A_t}$$

Fuerza inicial. Se aplica la siguiente ecuación:

$$F_i = 0,9 S_p \times A_t \quad (44)$$

Donde:

F_i : Fuerza inicial.

S_p : Resistencia de prueba.

A_t : Area transversal del perno.

$$F_i = 0,9 \times F_p$$

$$F_i = 0,9 S_p \times A_t$$

$$F_i = 0,9 \left(3\,866,22 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \times A_t$$

$$F_i = 3\,479,598 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times A_t$$

$$S_y = 57\,000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} = 4\,006,81 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (\text{ANEXO H})$$

Para calcular el esfuerzo sobre el elemento roscado se aplica la siguiente ecuación:

$$S_y = \frac{F_i}{A_t} + \frac{c.n.P}{A_t \times N} \quad (45)$$

$$S_y = \frac{3\,479,598 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times A_t}{A_t} + \frac{0,2 \times 3 \times 540,2829 \text{ kg}}{A_t \times 2}$$

$$4\,006,81 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 3\,479,598 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} + \frac{162,0849 \text{ kg}}{A_t}$$

$$A_t = 0,3074 \text{ cm}^2 = 0,04765 \text{ in}^2$$

Con este valor de área vemos a que perno corresponde en el **ANEXO I**. Corresponde a un perno $\Phi 3/8$ “ Grado SAE 2.

Verificación de resistencia a corte. Se aplica la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{F}{A_c} \quad (46)$$

Donde:

F: Fuerza .

τ : Esfuerzo de corte.

A_c : Área de corte del perno.

Además:

$$\tau = \frac{S_{sy}}{n} \quad (47)$$

Donde:

S_{sy} : Límite de fluencia para esfuerzos tangenciales

n: Coeficiente de seguridad.

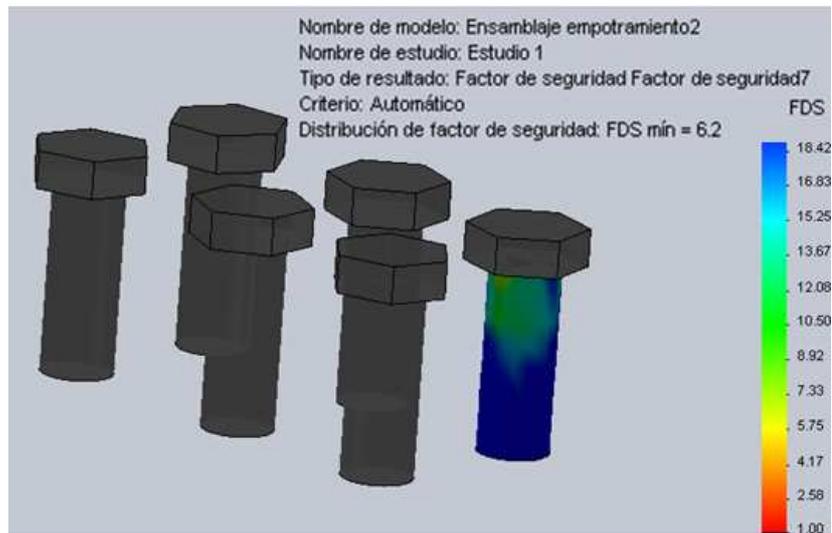
Se iguala la ec. (46) y la ec. (47) y se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{F}{A_c} &= \frac{S_{sy}}{n} \\ \frac{F}{2A_c} &= \frac{0,45 S_y}{n} \\ \frac{540,2829 \text{ kg}}{2(0,3074 \text{ cm}^2)} &= \frac{0,45 \times 4\ 006,81 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{n} \\ \mathbf{n} &= \mathbf{2,051} \end{aligned}$$

Al obtener un coeficiente de seguridad $n=2,051$ se comprueba que los pernos si resisten a corte.

También se comprueba el factor de seguridad con el software CAE, obteniendo los siguientes resultados:

Figura 74. Esquema del factor de seguridad en el perno, obtenido mediante el software CAE



Fuente: Autores

El valor mínimo del factor de seguridad es de 6,2. Debido a que el factor es mayor a la unidad cumple con el requerimiento de resistencia.

4.2.3 *Diseño del portapesas*

4.2.3.1 *Requerimientos.* Para el diseño de cada portapesas se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- El peso es considerado una carga puntual, por ende la distribución del mismo sobre el portapesas debe ser uniforme.
- Debe tener la facilidad de deslizarse sobre la viga.
- Su manipulación al momento de colocar y retirar la carga debe ser fácil.
- Su altura no debe sobrepasar los 70 cm.
- El peso a soportar es de hasta 200 kg.

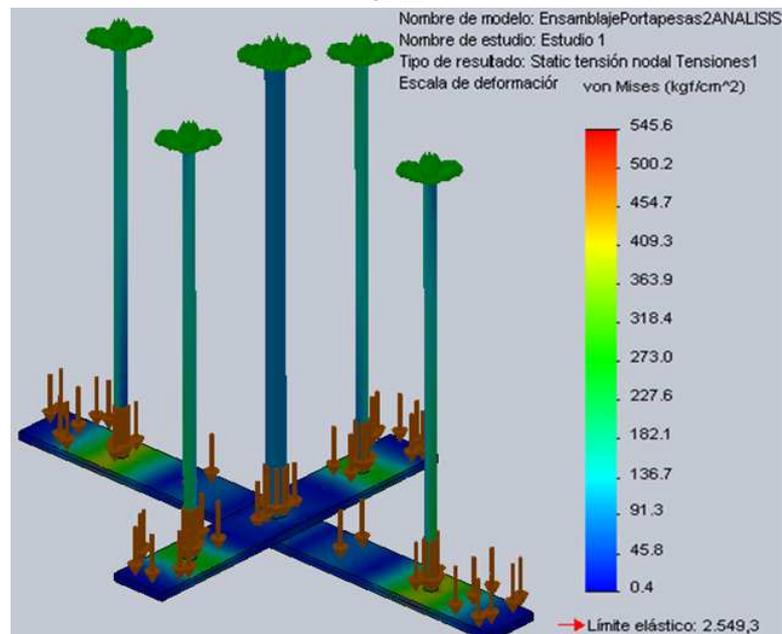
Al analizar éstas consideraciones, se diseña cada portapesas con las siguientes características:

- Para distribuir uniformemente el peso, su diseño tiene una base en forma de cruz, de tal manera que en cada una de sus cuatro puntas se colocan columnas donde se ubica un peso equitativo.
- Para que exista facilidad de deslizamiento sobre la viga, se colocan rodamientos.
- Para su fácil manipulación se lo construye en dos partes, las cuales están unidas mediante una abrazadera.
- Su altura total es de 67 cm, evitando así que éste tope con el piso.
- Su diseño permite soportar un peso de hasta 200 kg, su resistencia se muestra a continuación.

4.2.3.2 Dimensionamiento del portapesas. Se construyen tres portapesas, uno de ellos es de mayor longitud para alojar mayor número de pesas en el caso de aplicar la carga de los 200 kg, mientras que los otros dos tienen una longitud menor debido a que solo requieren 100 kg como carga máxima.

4.2.3.3 Resistencia del portapesas. Verificamos el diseño mediante el programa CAE.

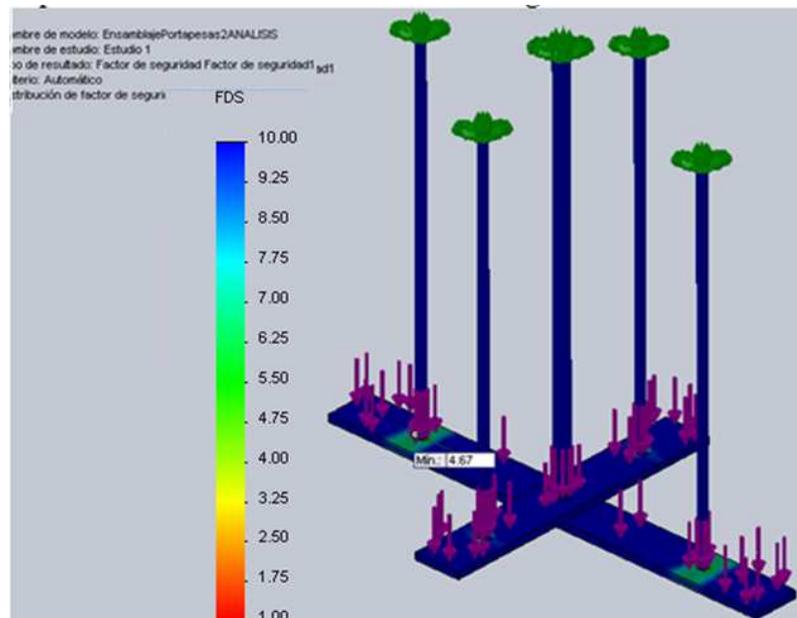
Figura 75. Esquema de esfuerzos presentes en el portapesas obtenido mediante software CAE



Fuente: Autores

Se obtiene un valor aproximado de 360 kg/cm^2 , en la zona de mayor requerimiento.

Figura 76. Esquema del factor de seguridad en el portapesas, obtenido mediante software CAE

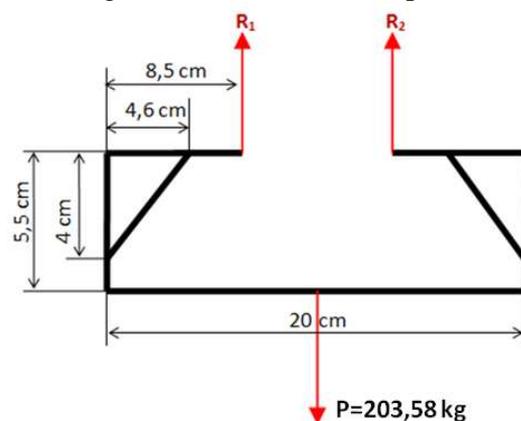


Fuente: Autores

El valor mínimo del factor de seguridad es de 4,7. Debido a que el factor es mayor a la unidad cumple con el requerimiento de resistencia.

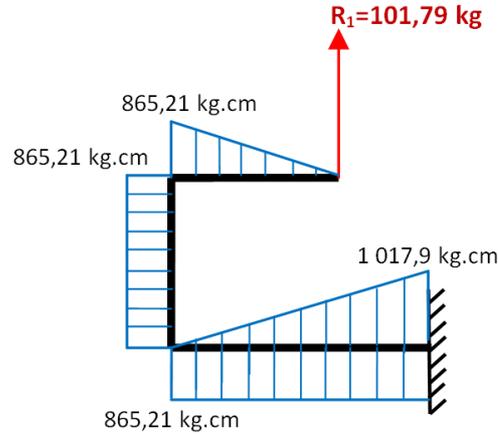
Diseño del aplicador de carga .Este elemento debe cumplir la función de aplicar la carga sobre la viga, además debe ser posible trasladarlo a cualquier distancia sobre la viga.

Figura 77. Diagrama de fuerzas en el aplicador de carga



Fuente: Autores

Figura 78. Diagrama de momentos flectores en el aplicador de carga



$$M_1 = 101,79 \text{ kg} \times 8,5 \text{ cm} = 865,21 \text{ kg.cm}$$

$$M_2 = 101,79 \text{ kg} \times 10 \text{ cm} = 1 017,9 \text{ kg.cm}$$

$$M_1 - M_2 = -152,69 \text{ kg.cm}$$

$$M_{Fm\acute{a}x} = 865,21 \text{ kg.cm}$$

Cálculo del valor de inercia del portapesas reforzado

Para calcular la inercia de elementos reforzados se aplica la siguiente ecuación:

$$I = 2 (I_x + A(r - cg)^2) \tag{48}$$

Donde:

I: Inercia del elemento reforzado

I_x : inercia del elemento respecto al eje x. (ANEXO J)

A: area del elemento

r: separación total de los elementos dividido para dos

cg: centro de gravedad del elemento

Aplicando esta ecuación para el portapesas tenemos:

$$I = 2 (I_x + A(r - c_g)^2)$$

$$I = 2 (0,188 \text{ cm}^4 + 1,5393 \text{ cm}^2 (2 \text{ cm} - 0,7 \text{ cm})^2)$$

$$I = 5,5788 \text{ cm}^4$$

Ahora se calcula el esfuerzo máximo, utilizando la ec. (10):

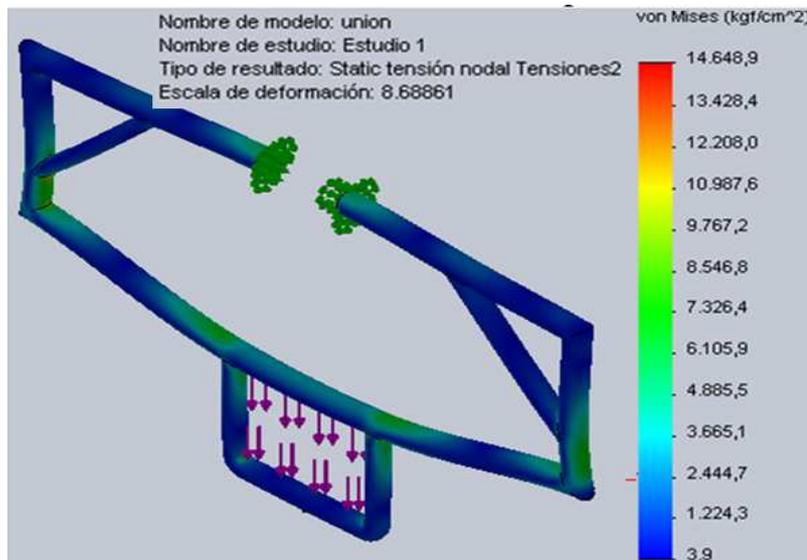
$$\begin{aligned}\sigma_{\text{máx}} &= \frac{M_{F\text{máx}} \times c}{I} \\ \sigma_{\text{máx}} &= \frac{865,21 \text{ kg.cm} \times 2 \text{ cm}}{5,5788 \text{ cm}^4} \\ \sigma_{\text{máx}} &= 310,1778 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\end{aligned}$$

Se utiliza la ec. (6):

$$\begin{aligned}n &= \frac{S_y}{\sigma_{\text{máx}}} \\ n &= \frac{2\,530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{310,1778 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \\ n &= 8,16\end{aligned}$$

Verificamos el diseño mediante el programa CAE.

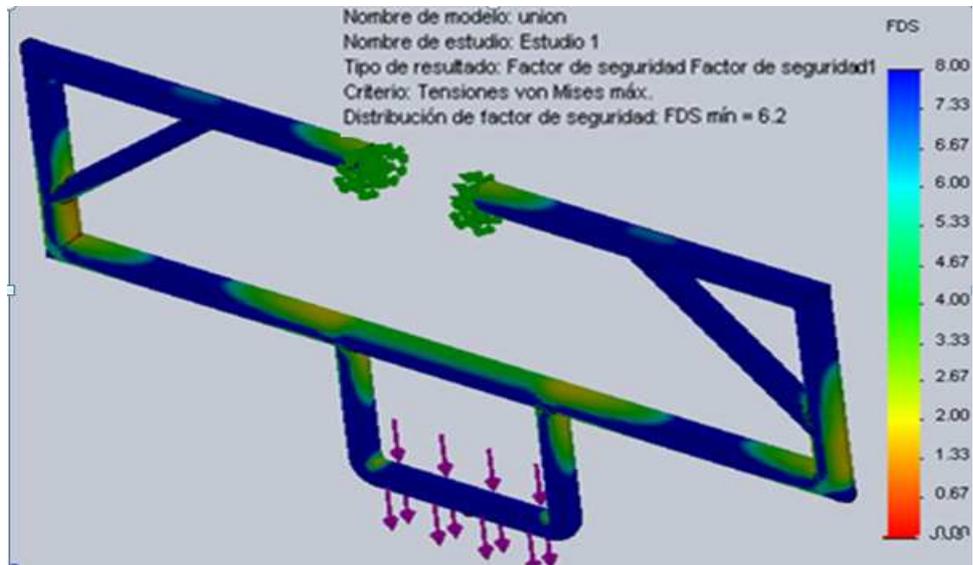
Figura 79. Esquema de esfuerzos presentes en el aplicador de carga, obtenido mediante software CAE



Fuente: Autores

Se obtiene un valor aproximado de 300 kg/cm².

Figura 80. Esquema del factor de seguridad en el aplicador de carga, obtenido mediante software CAE

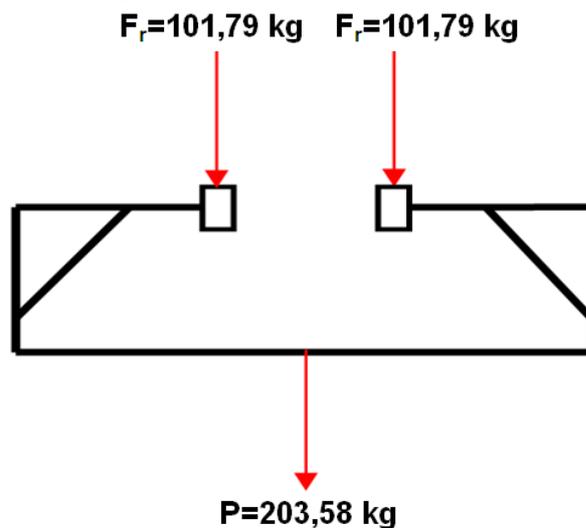


Fuente: Autores

El valor mínimo del factor de seguridad promedio es de 7. Debido a que el factor es mayor a la unidad cumple con el requerimiento de resistencia.

4.2.3.4 Selección de rodamientos. El análisis de la selección de rodamientos se lo hace a carga estática.

Figura 81. Diagrama de la fuerza actuante en el rodamiento



Fuente: Autores

Ya que no existe fuerza axial que actúe sobre el rodamiento se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_o = F_r \quad (49)$$

Donde:

P_o : carga estática equivalente

F_r : carga radial

$$P_o = 101,79 \text{ kg}$$

Para determinar la capacidad de carga estática se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_o = P_o \cdot f_s \quad (50)$$

Donde:

C_o : capacidad de carga estática

P_o : carga estática equivalente

f_s : factor de esfuerzos estáticos

Tabla 5. Valores del factor de esfuerzos estáticos según las exigencias de carga

FACTOR DE ESFUERZOS ESTÁTICOS	
EXIGENCIAS DE CARGA	VALORES
Elevadas	1,2 – 2,5
Normales	0,8 – 1,2
Reducidas	0,5 – 0,8

Fuente: Catálogo de rodamientos FAG

Aplicando la fórmula se tiene:

$$C_o = P_o \cdot f_s$$

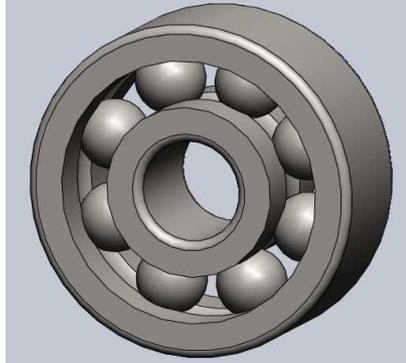
$$C_o = 101,79 \text{ kg}(0,7)$$

$$C_o = 71,253 \text{ kg} = 698,99 \text{ N} = 0,699 \text{ kN}$$

Con el valor del diámetro interno $\varnothing=12,5 \text{ mm}$ y el valor de $C_o = 0,499 \text{ kN}$ se selecciona en el catálogo (ANEXO K) el rodamiento adecuado.

Del catálogo se escoge un rodamiento rígido de bolas FAG6001, ya que este cumple con los requerimientos y se encuentra disponible en el mercado.

Figura 82. Rodamiento FAG6001



Fuente: Autores

CAPÍTULO V

5. ADQUISICIÓN DE DATOS Y VALIDACIÓN

5.1 Adquisición de datos

5.1.1 *Sistema de adquisición de datos [31].* El sistema de adquisición de datos (DAQ) sirve para medir fenómenos físicos tales como: voltaje, corriente, temperatura, presión, etc.

La ventaja que tienen los sistemas DAQ ante los sistemas de medidas tradicionales, es que utilizan la potencia del procesamiento y las facilidades de conectividad de las PCs, proporcionando una solución de medida más potente, eficaz y rentable.

5.1.2 *Descripción de los componentes de un sistema DAQ [32].* Este sistema consta de tres elementos básicos: sensores, hardware de medición DAQ y una PC con un software adecuado para el manejo del sistema.



Fuente: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa>

5.1.2.1 *Sensor.* Este dispositivo transforma un fenómeno físico (en nuestro caso la deformación) en una señal eléctrica medible.

En algunos casos los sensores necesitan de elementos adicionales, para así producir una señal adecuada que sea leída con precisión por el dispositivo DAQ.

5.1.2.2 Dispositivo DAQ. Es un hardware que sirve de interfaz entre las señales captadas por los sensores y la PC. Su función es procesar las señales analógicas para que sean procesadas por la PC.

Este hardware se lo puede encontrar como tarjetas o dispositivos, los cuales están formados por tres componentes: un circuito de acondicionamiento de señales, el convertidor analógico-digital y un bus de datos para PC.

Descripción de los componentes de un dispositivo DAQ

Acondicionamiento de señales. Las señales adquiridas por el sensor pueden ser digitales o analógicas, dependiendo del tipo de sensor utilizado.

Si la señal de salida del sensor no es la correcta para el DAQ, se requiere de un acondicionamiento de señales, con el cual la señal puede ser amplificada, des-amplificada, puede requerir de filtrado, atenuación y aislamiento, dependiendo de las características de la señal.

Convertidor analógico digital (ADC). Las señales analógicas de los sensores deben ser convertidas en digitales antes de ser manipuladas por el equipo digital como una PC.

El convertidor analógico provee una representación digital de una señal analógica en un determinado tiempo.

Debido a que las señales analógicas varían continuamente con el tiempo, el ADC realiza muestras periódicas de la señal. Estas muestras son transferidas a una PC a través de un bus de datos, donde la señal original es reconstruida desde las muestras en software.

Bus de conexión a la PC. El dispositivo DAQ se conecta a una PC a través de una ranura o puerto. El bus de conexión sirve como interface de comunicación entre el dispositivo DAQ y la PC, para así transmitir instrucciones y datos medidos. La conexión de los dispositivos DAQ se puede realizar en los buses más comunes de PC en los cuales se incluyen USB, PCI, PCI express y Ethermt.

5.1.2.3 Ordenador (PC). El ordenador (PC) tiene un software programable, el cual controla el funcionamiento del dispositivo DAQ; además procesa, visualiza y almacena los datos de medida.

Los componentes de software de un sistema DAQ en la PC son:

Software controlador. Este software ofrece al software de aplicación la posibilidad de interactuar con un dispositivo DAQ, pues obtiene comandos de hardware de bajo nivel y programación a nivel de registro. El software controlador presenta una interfaz de programación de aplicaciones (API) que es usada en un entorno de programación para construir software de aplicación.

Software de aplicación. Este software facilita la interacción entre la PC y el usuario para adquirir, analizar y presentar datos de medidas. Puede ser una aplicación pre-construida con funcionalidad predefinida o un entorno de programación para construir aplicaciones con funcionalidad personalizada. Las aplicaciones personalizadas generalmente son usadas para automatizar múltiples funciones de un dispositivo DAQ, realizar algoritmos de procesamiento de señales y mostrar interfaces de usuario personalizadas.

5.1.3 Descripción de los componentes utilizados en el sistema de adquisición de datos.

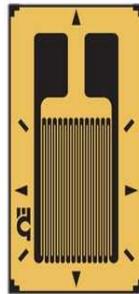
En el sistema de adquisición de datos se utilizan los siguientes componentes:

- *Sensor.* Utilizamos galgas extensométricas, las cuales miden la deformación unitaria en cualquier punto de la viga.

- *Dispositivo (DAQ)*. Debido a las características de funcionamiento adecuadas para este trabajo utilizamos el dispositivo NI Compact DAQ.
- *Software de aplicación*. Con esto se consigue visualizar, procesar y almacenar los datos adquiridos. Los lenguajes de programación más utilizados son LabView y Matlab, ya que proporcionan un lenguaje de programación, además de bibliotecas y herramientas para la adquisición de datos y su procesamiento. En este trabajo se utiliza el software LabView debido a que la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, posee la licencia de este software.
- *Dispositivos de conexión*. Debido al tipo de conexión eléctrica se usa diversos cables y adaptadores.

5.1.3.1 Descripción de los sensores

Figura 84. Galga extensométrica



Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/omega/galgas-extensio-metricas-19150-406914.html>

Los sensores utilizados son galgas extensométricas con las siguientes características de funcionamiento:

- Marca: OMEGA
- Serie: SGD-6/120-LY11
- Resistencia: 120 Ohms
- Factor de galga: 2,12
- Tolerancia: +/- 0,35%
- Tipo de galga: Lineal
- Dimensiones: 6 x 12 mm

5.1.3.2 Descripción de dispositivo DAQ. Es un sistema de control y adquisición de datos con un amplio rango de aplicaciones. NI Compact DAQ utiliza un software abierto que puede correr programas sencillos de lectura de datos para aplicaciones simples o desarrollar programas a la medida para adquisición, análisis, control con rapidez y confiabilidad. El hardware y software de NI Compact DAQ son sencillos de usar en cualquier campo de aplicación.

Un sistema NI Compact DAQ consiste en un chasis, módulos de E/S de la serie C y una PC Windows conectada por USB o Ethernet, sus componentes de hardware y software son intercambiables, con los mismos módulos y la aplicación de software, un sistema para pruebas rápidas de laboratorio usando conexión USB.

5.1.3.3 Descripción de componentes del NI Compact DAQ. El controlador está compuesto de 2 elementos que son:

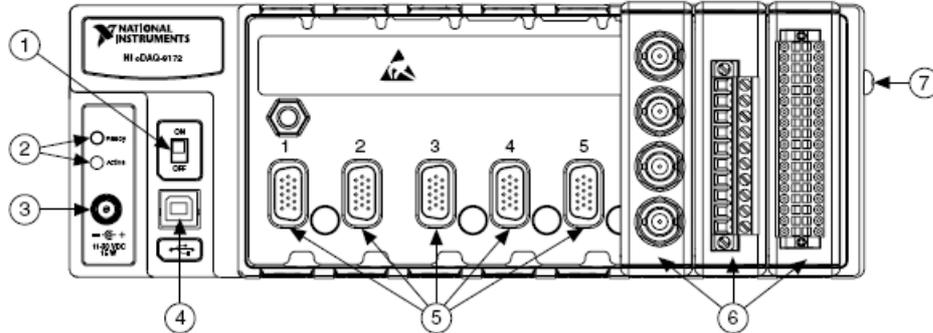
- Chasis
- Módulos

Chasis. El chasis se encarga de controlar la temporización, sincronización, y transferencia de datos, además de disponer del espacio para acoger a los módulos. El diseño del chasis permite trabajar en ambientes industriales brindando una gran confiabilidad y alto rendimiento.

El chasis que utilizaremos en este trabajo es el NI Compact DAQ-9172 el cual tiene la capacidad de mediar un gran rango de señales análogas y digitales, cuenta con una interfaz USB 2.0 que nos ayuda a conectarnos a una PC y facilitar la transferencia de datos.

Al ser un equipo útil para diversas aplicaciones se compone de varios elementos que los enumeramos a continuación:

Figura 85. Componentes del chasis compact DAQ-9172



Fuente: <http://www.ni.com/gettingstarted/setuphardware/dataacquisition/compactdaq.htm>

1. Switch de poder
2. Focos indicadores de lectura y activo
3. Conexión de fuente de poder
4. Conexión USB
5. Espacio disponible para los módulos
6. Módulos instalados para entradas y salidas tipo C
7. Tornillo para conexión a tierra.

Módulos

Figura 86. Módulo NI 9237



Fuente: http://www.ni.com/ni-9237_1.jpg

Cada módulo está diseñado para un valor medio de voltaje y de sensor. Posee el convertidor de señales, conectividad y circuitos de acondicionamiento en un solo paquete robusto.

Para adquirir medidas precisas de sensores se requiere un acondicionamiento de señales, como amplificación, filtros, excitación y aislamiento.

Se pueden recibir señales con facilidad desde termopares, detectores de temperatura de resistencia (RTDs), galgas extensométricas, celdas de carga, acelerómetros, micrófonos y muchos más usando el módulo adecuado.

En este trabajo se utiliza el módulo NI 9237, ya que satisface los requerimientos de funcionamiento y presenta las siguientes características:

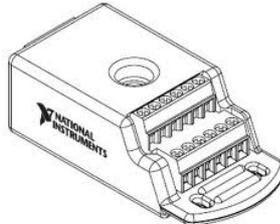
- Resolución de 24-bit.
- Entradas analógicas de ± 25 mV/V con conectores RJ50.
- 4 muestreos simultáneos de entradas analógicas, con una velocidad de muestreo máxima de 50 kS/s.
- Programable con medio puente y puente completo de Wheatstone.
- Excitación interna sobre los 10 V.
- Compatible con sensores inteligentes (TEDS).
- Rango de operación de -40 a 70 °C.

5.1.3.4 *Descripción de los elementos de conexión.* Los elementos de conexión utilizados son:

- Accesorios de conexión NI 9944 y NI 9949
- Cable RJ 50
- Cable coaxial

Accesorio de conexión NI 9949. Es el elemento de completación para conexión en medio puente y puente completo de Wheatstone, sirve de conexión entre el módulo y la galga extensométrica. Posee diez terminales de entrada y una de salida.

Figura 87. Accesorio NI 9949



Fuente: <http://www.ni.com/ni-9949>

Accesorio de conexión NI 9944. Es el elemento de completación para conexión en cuarto de puente de Wheatstone, adecuado para un sensor de 120 Ω .

Figura 88. Accesorio NI 9944



Fuente: <http://www.ni.com/ni-9944>

Cable RJ50. El RJ50 es un conector estándar y un tipo de cable que tiene en un extremo señales divididas (conocidas como espirales).

Cable coaxial. El material anticorrosivo retardador del fuego de la cubierta permite que este cable sea utilizado para las instalaciones fijas en edificios públicos y en las instalaciones gubernamentales. Estabilidad exacta de la impedancia.

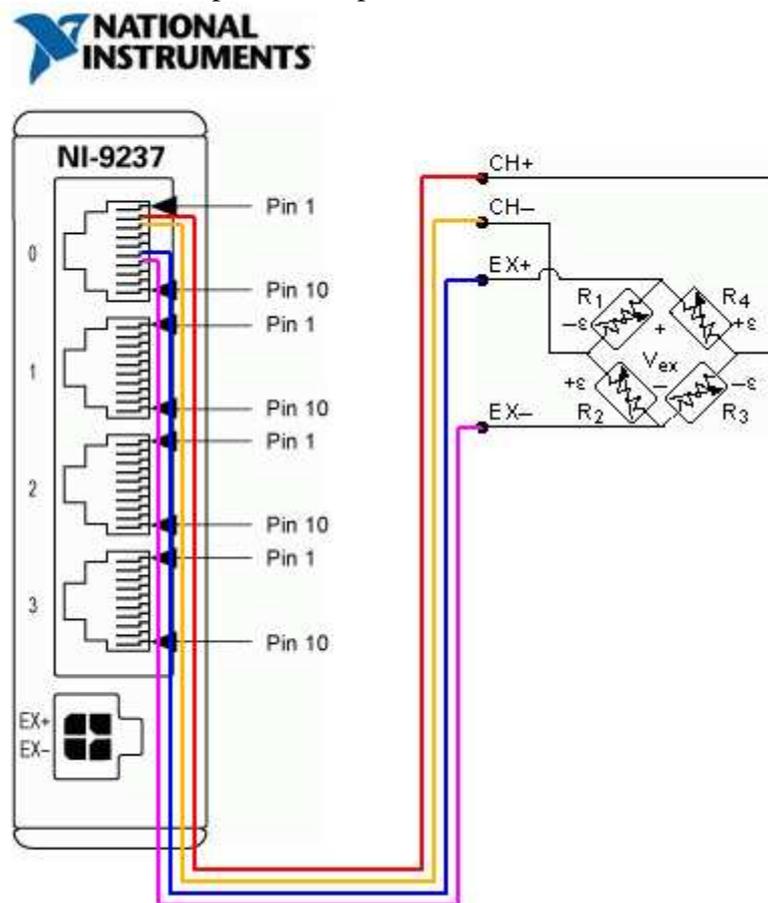
Este cable presenta las siguientes características:

- Resistencia del conductor: < 85 Ohm/km.
- Resistencia del aislamiento: < 10 GOhm/km.

- Atenuación: at 1 MHz: < 3.5 dB/km.
- Impedancia: 110 Ohm +/- 2 %.
- Rango de temperatura: -5° a +50° C.
- Diámetro exterior: 5 mm.
- Capacidad de corriente: 25 A.

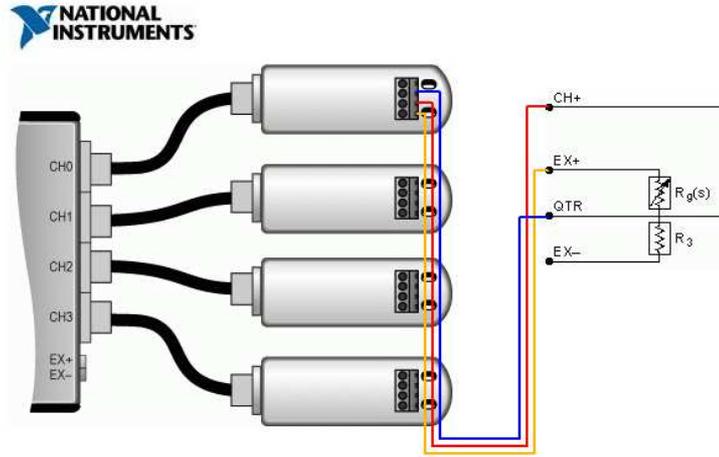
5.1.4 *Conexión de los módulos a sus respectivos sensores.* Conocido el número total de sensores se procede a conectar en el accesorio NI9949 (en el caso de conexión en puente completo de Wheatstone) o en el accesorio NI9944 (en el caso de conexión en cuarto de puente de Wheatstone), como se indica en las Figuras 90 y 91 respectivamente.

Figura 89. Conexión de puente completo de Wheatstone con accesorio NI 9949



Fuente: www.ni.com

Figura 90. Conexión cuarto de puente de Wheatstone con accesorio NI 9944



Fuente: www.ni.com

El otro extremo de los accesorios se conecta directamente al canal del módulo NI9237, como se indica en la figura anterior.

5.1.5 Programación. La programación de este trabajo se la efectúa con el software LabView, con el propósito de adquirir los valores medidos de deformación, procesarlos y representarlos de una forma gráfica y tabulada, generando los respectivos reportes.

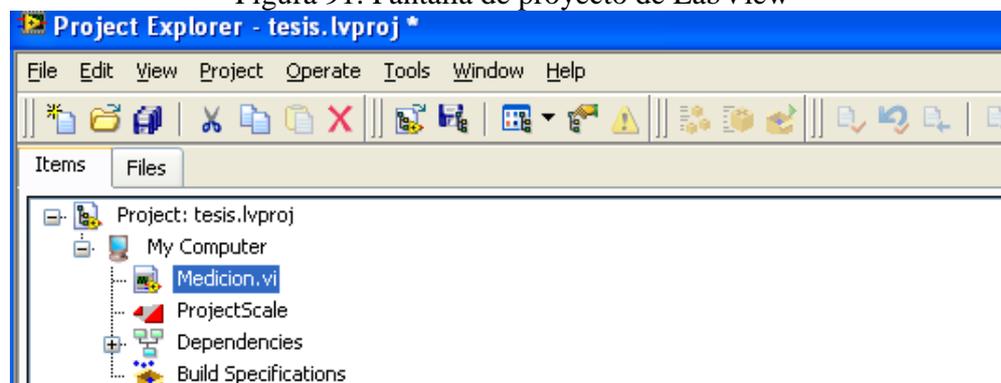
LabView [33]. Es un sistema de programación gráfico diseñado para el desarrollo de distintas aplicaciones como el análisis de datos, la adquisición de datos y el control de instrumentos, además de la automatización industrial.

LabView se diferencia de los lenguajes tradicionales de programación por presentar un ambiente de programación gráfico, llamado lenguaje G, que ayuda a crear programas basados en diagramas de bloques.

Los programas en LabView son denominados instrumentos virtuales o VI ya que su apariencia y operación imitan a los instrumentos físicos, como osciloscopios y multímetros.

5.1.5.1 Programación en LabView. Para programar se crea un proyecto, el cual almacena en una sola carpeta todos los subVIs y las variables que se utilizan en el desarrollo del programa, en este caso el proyecto tiene el nombre “tesis”.

Figura 91. Pantalla de proyecto de LabView



Fuente: Autores

Para la programación se utiliza la función “Tab-Control”, la cual tiene varios contenedores o subcarpetas, de acuerdo a los requerimientos del banco de pruebas, se usan ocho subcarpetas, cada una de las cuales contiene lo siguiente:

- Menú principal
- Activación de puertos
- Medición en los cuatro puntos
- Medición puntual
- Viga en voladizo
- Calibración

En las siguientes tablas se indican las entradas (controles) y salidas (indicadores) que se utilizan en cada una de las subcarpetas para introducir los datos y presentar en la pantalla los resultados.

Tabla 6. Entradas y salidas existentes en la pantalla del menú principal

MENÚ PRINCIPAL		
TIPO DE OBJETO	TIPO DE DATOS	FUNCIÓN
Controlador	Numérico	Ingresa el valor de inercia
Controlador	Numérico	Ingresa el valor del módulo elástico
Controlador	Numérico	Ingresa el valor del radio de giro
Función	Texto	Busca el catálogo de Aceros DIPAC
Controlador	Booleano	Detiene el programa

Fuente: Autores

Tabla 7. Entradas y salidas existentes en la pantalla de la activación de puertos

MENÚ PRINCIPAL		
TIPO DE OBJETO	TIPO DE DATOS	FUNCIÓN
Controlador	Booleano	Activa el puerto 1
Controlador	Booleano	Activa el puerto 2
Controlador	Booleano	Activa el puerto 3
Controlador	Booleano	Activa el puerto 4
Controlador	Booleano	Activa el puerto 5
Controlador	Booleano	Activa el puerto 6
Controlador	Booleano	Activa el puerto 7
Controlador	Booleano	Activa el puerto 8
Controlador	Booleano	Activa el puerto 9
Controlador	Booleano	Activa el puerto 10
Controlador	Booleano	Activa el puerto 11
Controlador	Booleano	Activa el puerto 12
Controlador	Booleano	Activa el puerto 13
Controlador	Booleano	Activa el puerto 14
Controlador	Booleano	Activa el puerto 15
Controlador	Booleano	Activa el puerto 16
Controlador	Booleano	Activa el puerto 17
Controlador	Booleano	Activa el puerto 18
Controlador	Booleano	Activa el puerto 19
Controlador	Booleano	Activa el puerto 20
Controlador	Booleano	Activa el puerto 21
Controlador	Booleano	Activa el puerto 22
Controlador	Booleano	Activa el puerto 23
Controlador	Booleano	Activa el puerto 24
Controlador	Booleano	Activa el puerto 25
Controlador	Booleano	Activa el puerto 26
Controlador	Booleano	Activa el puerto 27
Controlador	Booleano	Activa el puerto 28
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 1
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 2
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 3
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 4
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 5
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 6
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 7
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 8
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 9
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 10
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 11
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 12
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 13

Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 14
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 15
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 16
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 17
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 18
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 19
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 20
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 21
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 22
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 23
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 24
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 25
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 26
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 27
Indicador	Numérico	Muestra la deformación del puerto 28
Controlador	Booleano	Inicia la medición
Controlador	Booleano	Detiene la medición

Fuente: Autores

Tabla 8. Entradas y salidas existentes en la pantalla de la medición en los cuatro puntos

MEDICIÓN EN LOS CUATRO PUNTOS		
TIPO DE OBJETO	TIPO DE DATOS	FUNCIÓN
Controlador	Numérico	Reseteo del Strain 1
Controlador	Numérico	Reseteo del Strain 2
Controlador	Numérico	Reseteo del Strain 3
Controlador	Numérico	Reseteo del Strain 4
Controlador	Booleano	Iniciar la medición
Controlador	Booleano	Detener la medición
Indicador	Numérico	Valor de deformación unitaria 1
Indicador	Numérico	Valor de deformación unitaria 2
Indicador	Numérico	Valor de deformación unitaria 3
Indicador	Numérico	Valor de deformación unitaria 4
Indicador	Numérico	Valor de esfuerzo experimental 1
Indicador	Numérico	Valor de esfuerzo experimental 2
Indicador	Numérico	Valor de esfuerzo experimental 3
Indicador	Numérico	Valor de esfuerzo experimental 4
Indicador	Numérico	Valor del momento flector 1
Indicador	Numérico	Valor del momento flector 2
Indicador	Numérico	Valor del momento flector 3
Indicador	Numérico	Valor del momento flector 4
Indicador	Numérico	Valor del radio de curvatura 1
Indicador	Numérico	Valor del radio de curvatura 2
Indicador	Numérico	Valor del radio de curvatura 3
Indicador	Numérico	Valor del radio de curvatura 4
Indicador	Gráfico	Muestra en una escala de colores los

		valores de deformación
--	--	------------------------

Fuente: Autores

Tabla 9. Entradas y salidas existentes en la pantalla de la medición puntual

MEDICIÓN PUNTUAL		
TIPO DE OBJETO	TIPO DE DATOS	FUNCIÓN
Controlador	Numérico	Ingreso de distancia
Controlador	Numérico	Reseteo del Strain
Controlador	Booleano	Iniciar medición
Controlador	Booleano	Detener medición
Indicador	Numérico	Valor de la deformación unitaria
Indicador	Numérico	Valor de la deformación total

Fuente: Autores

Tabla 10. Entradas y salidas existentes en la pantalla de la medición para viga en voladizo

VIGA EN VOLADIZO		
TIPO DE OBJETO	TIPO DE DATOS	FUNCIÓN
Controlador	Booleano	Reseteo del Strain 1
Controlador	Numérico	Reseteo del Strain 2
Controlador	Numérico	Reseteo del Strain 3
Indicador	Numérico	Valor de deformación unitaria 1
Indicador	Numérico	Valor de deformación unitaria 2
Indicador	Numérico	Valor de deformación unitaria 3
Indicador	Numérico	Valor de deformación total 1
Indicador	Numérico	Valor de deformación total 2
Indicador	Numérico	Valor de deformación total 3
Indicador	Numérico	Valor de la flecha 1
indicador	Numérico	Valor de la flecha 2
Indicador	Numérico	Valor de la flecha 3
Indicador	Numérico	Valor del esfuerzo experimental 1
Indicador	Numérico	Valor del esfuerzo experimental 2
Indicador	Numérico	Valor del esfuerzo experimental 3
Indicador	Gráfico	Muestra en una escala de colores los valores de deformación

Fuente: Autores

Tabla 11. Entradas y salidas existentes en la pantalla de calibración

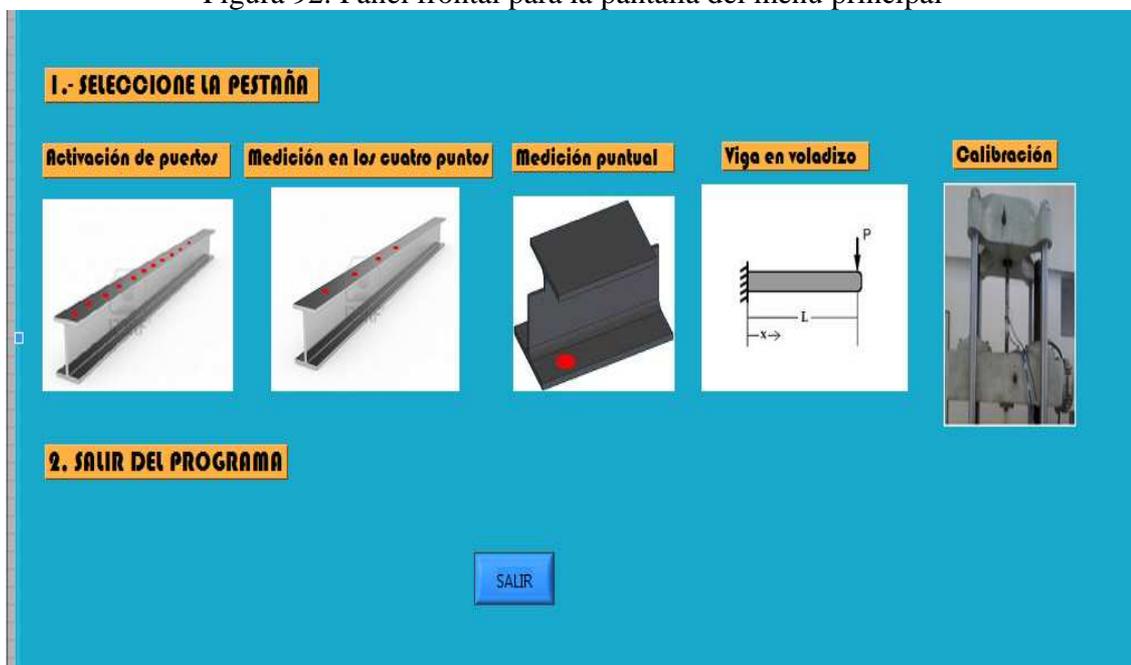
CALIBRACIÓN		
TIPO DE OBJETO	TIPO DE DATOS	FUNCIÓN
Controlador	Booleano	Inicio de la medición
Controlador	Booleano	Detener la medición
Controlador	Numérico	Reseteo de la deformación unitaria

Controlador	Numérico	Ingreso del módulo elástico E
Controlador	Numérico	Ingreso del factor de corrección
Indicador	Numérico	Valor de deformación unitaria
Indicador	Numérico	Valor de la carga aplicada

Fuente: Autores

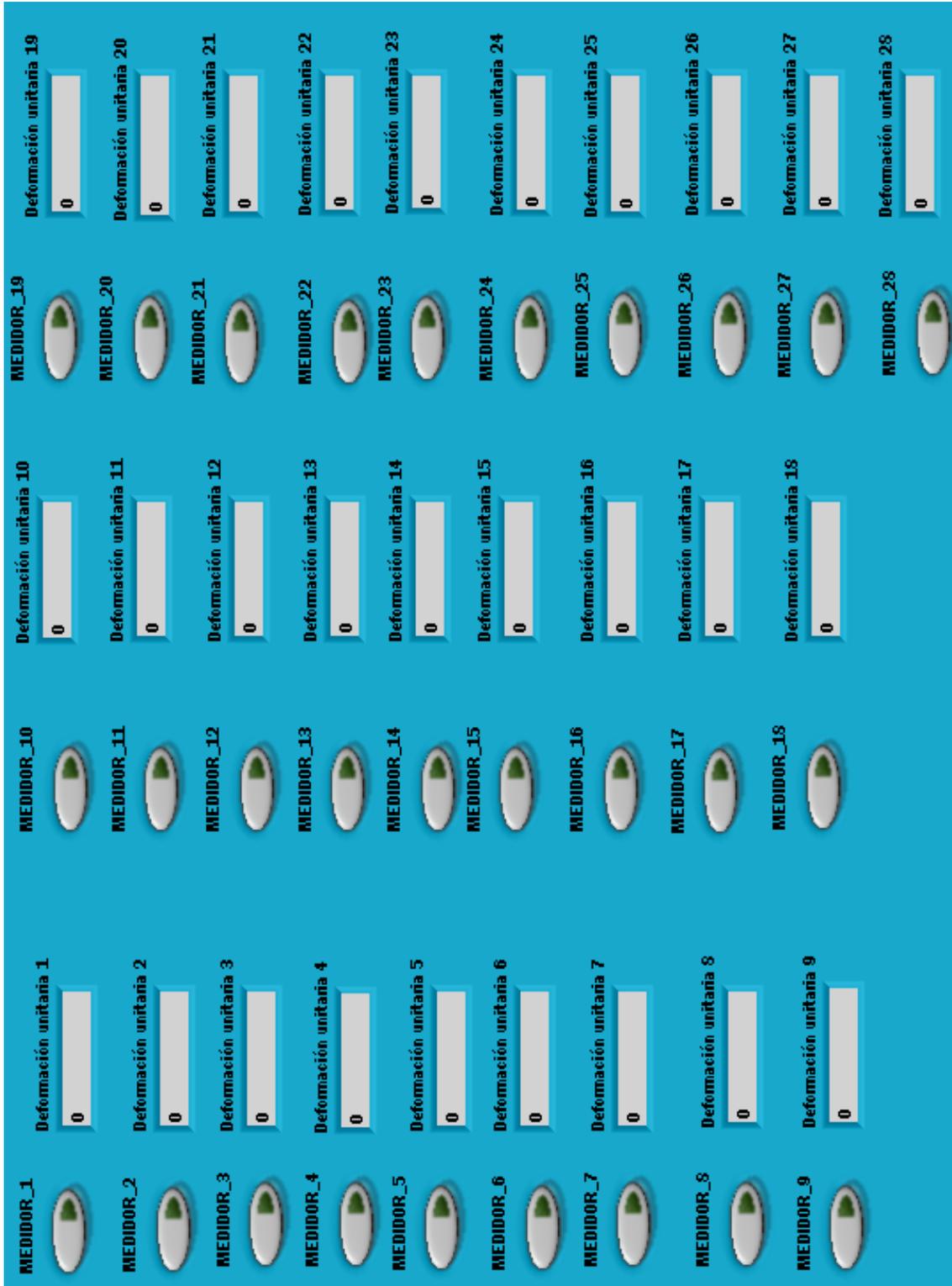
Los controles e indicadores mostrados en las tablas se grafican en el panel frontal del VI y se obtiene las pantallas que se muestran en las siguientes figuras:

Figura 92. Panel frontal para la pantalla del menú principal



Fuente: Autores

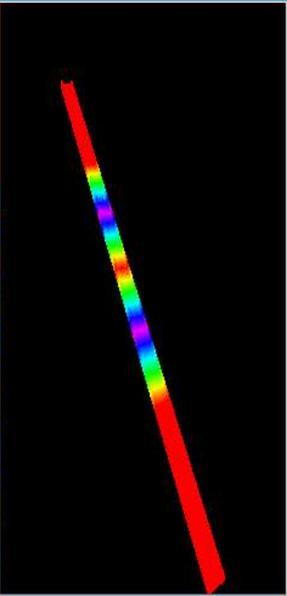
Figura 93. Panel frontal para la pantalla de activación de puertos



Fuente: Autores

Figura 94. Panel frontal para la pantalla de medición en los cuatro puntos

5.- VISUALIZAR EL MODELO EN 3D



6.- OBTENER TABLA DE RESULTADOS Y GENERAR REPORTE

Tabla de registro

ESFUERZO (G)	DEF. UNITARIA (strain)

7.- DETENER O REGRESAR

1.- INGRESAR LOS DATOS DE LA VIGA

$I_x(\text{cm}^4)=869$ Módulo Elástico(kg/cm^2)= $1,972000$

869 1,972E+6

Radio de giro (cm)=8

8

2.- SELECCIONAR EL CASO A ENSAYAR

3 Y 4 APOYOS

3.- RESETEAR LOS VALORES INICIALES DE STRAIN

STRAIN 1 STRAIN 2 STRAIN 3 STRAIN 4

0,0004682 -0,0006782 0,00043661 0,000321

4.- VISUALIZAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS

DISTANCIAS AL PUNTO DE MEDICION DESDE EL APOYO IZQUIERDO

Punto 1=194,8cm Punto 2=144,7cm Punto 3=94,7cm Punto 4=44,7cm

195 145 95 45

DEFORMACION UNITARIA(strain) (kg/cm²)

Strain 1 Strain 2 Strain 3 Strain 4

0,0004682 -0,0006782 0,00043661 0,0000321

ESFUERZO (kg/cm²)

G 1 G 2 G 3 G 4

923,29 -1337,4 860,99 63,301

MOMENTO FLECTOR (kg.cm)

Mf 1 Mf 2 Mf 3 Mf 4

100292,42 -145276,21 93525,573 6876,093

RADIO DE CURVATURA (cm)

d1 d2 d3 d4

1,709E+4 -1,180E+4 1,832E+4 2,492E+5

FLECHA (mm)

100292,42 -145276,21 93525,573 6876,093

GUARDAR DATOS

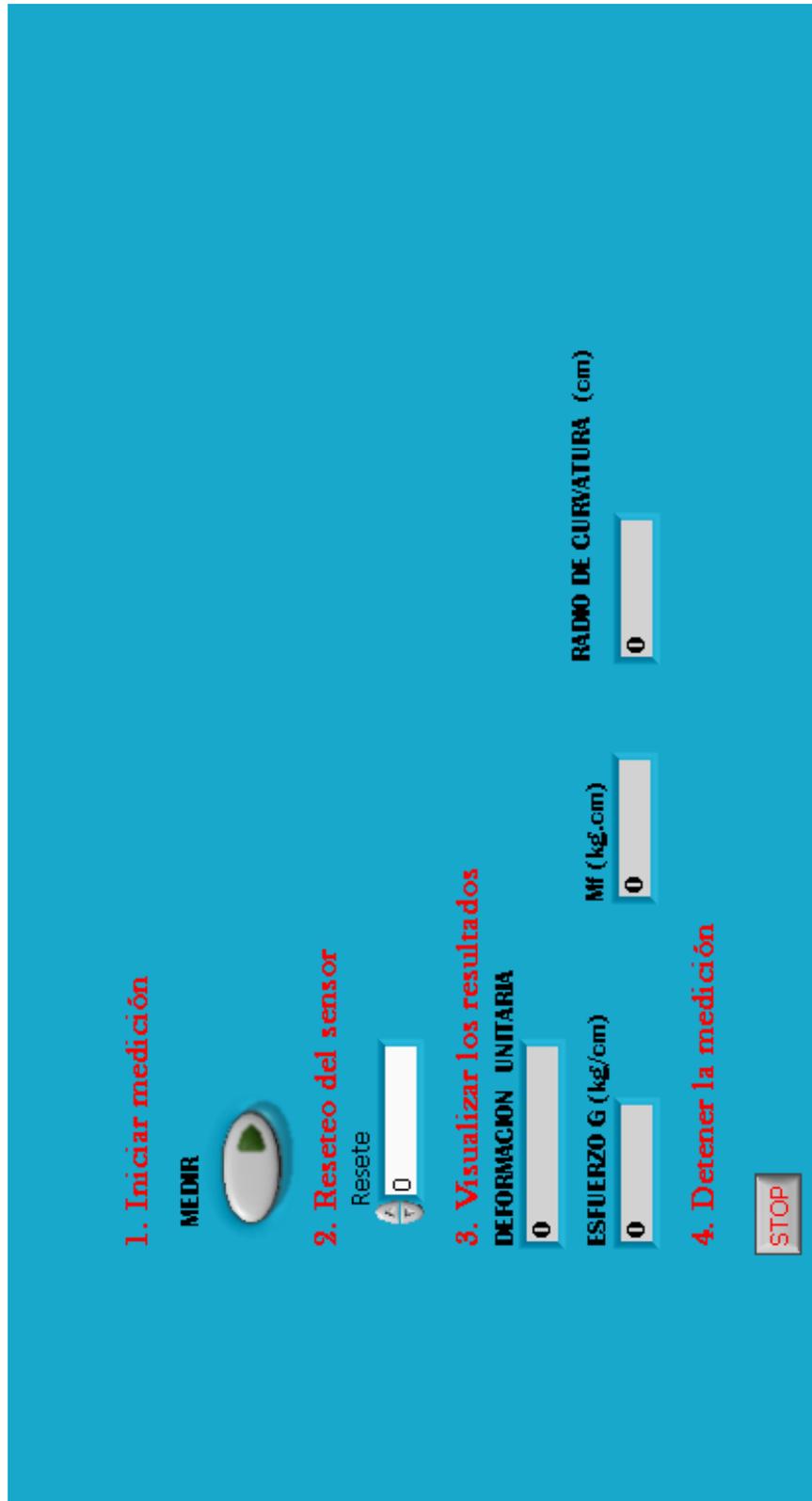
REPORTE Y GRÁFICA

LIMPIAR TABLA

STOP REGRESAR AL MENU PRINCIPAL

Fuente: Autores

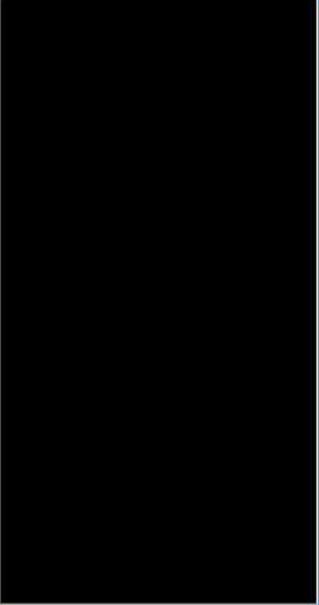
Figura 95. Panel frontal para la pantalla de medición puntual



Fuente: Autores

Figura 96. Panel frontal para la pantalla de medición de viga en voladizo

4.- VISUALIZAR EL MODELO EN 3D



1.- INGRESAR LOS DATOS DE LA VIGA

$I_x(\text{cm}^4)=77$ Módulo Elástico(kg/cm²)= $2.25E+6$ P(kg)

Radio de giro (cm)=4 Distancia aplicación de carga

2.- RESETEAR LOS VALORES INICIALES DE STRAIN

STRAIN 1 STRAIN 2 STRAIN 3

3.- VISUALIZAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS

DISTANCIAS AL PUNTO DE MEDICION DESDE EL EMPOTRAMIENTO

Distancia al punto 1	<input type="text" value="195"/>
Distancia al punto 2	<input type="text" value="145"/>
Distancia al punto 3	<input type="text" value="95"/>

MOMENTO FLECTOR (kg.cm)

Mf 1	<input type="text" value="0,23"/>
Mf 2	<input type="text" value="0,24"/>
Mf 3	<input type="text" value="-0,48"/>

ESFUERZO FLECTOR (kg/cm²)

G 1	<input type="text" value="0,12"/>
G 2	<input type="text" value="0,13"/>
G 3	<input type="text" value="-0,26"/>

RADIO DE CURVATURA (cm)

d1	<input type="text" value="1E+0"/>
d2	<input type="text" value="1E+0"/>
d3	<input type="text" value="2E+0"/>

FLECHA TEÓRICA (mm)

Y1	<input type="text" value="0,000"/>
Y2	<input type="text" value="0,000"/>
Y3	<input type="text" value="0,000"/>

FLECHA CORREGIDA (mm)

Yc 1	<input type="text" value="0"/>
Yc 2	<input type="text" value="0"/>
Yc 3	<input type="text" value="0"/>

Y_{corregida} = Y_{teórica} + 0,0005894 * P(kg) * d(cm)

5.- OBTENER TABLA DE RESULTADOS Y GENERAR REPORTE

Tabla de registro

ESFUERZO (G)	DEF. UNITARIA (strain)

6.- DETENER O REGRESAR

Fuente: Autores

Figura 97. Panel frontal para la pantalla de calibración

1.- INGRESAR LOS DATOS DEL MATERIAL
MODULO ELASTICO E(kg/cm2)
2.- RESETEAR EL VALOR DE STRAIN
RESET **STRAIN**
3.- ACTIVAR EL CASO A ENSAYAR
ANILLO **BARRA** **DESACTIVADO**
4.- INGRESAR LAS ESPECIFICACIONES DE LA PROBETA
Espesor e(cm)
Ancho a(cm)
Radio Medio R(cm)
Diametro(cm)

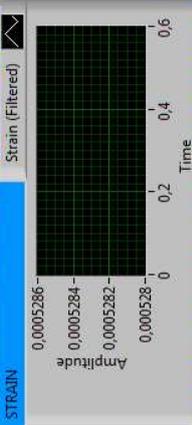
5.- VISUALIZAR LA GRÁFICA Y RESULTADOS
CARGA(kg)
Esfuerzo G (kg/cm2)

6.- OBTENER TABLA DE RESULTADOS Y GENERAR REPORTE
GUARDAR **LIMPIAR TABLA** **REPORTE**
VALOR MÁXIMO DE ESFUERZO(kg/cm2)
7.- DETENER O REGRESAR
STOP **REGRESAR AL MENU PRINCIPAL**

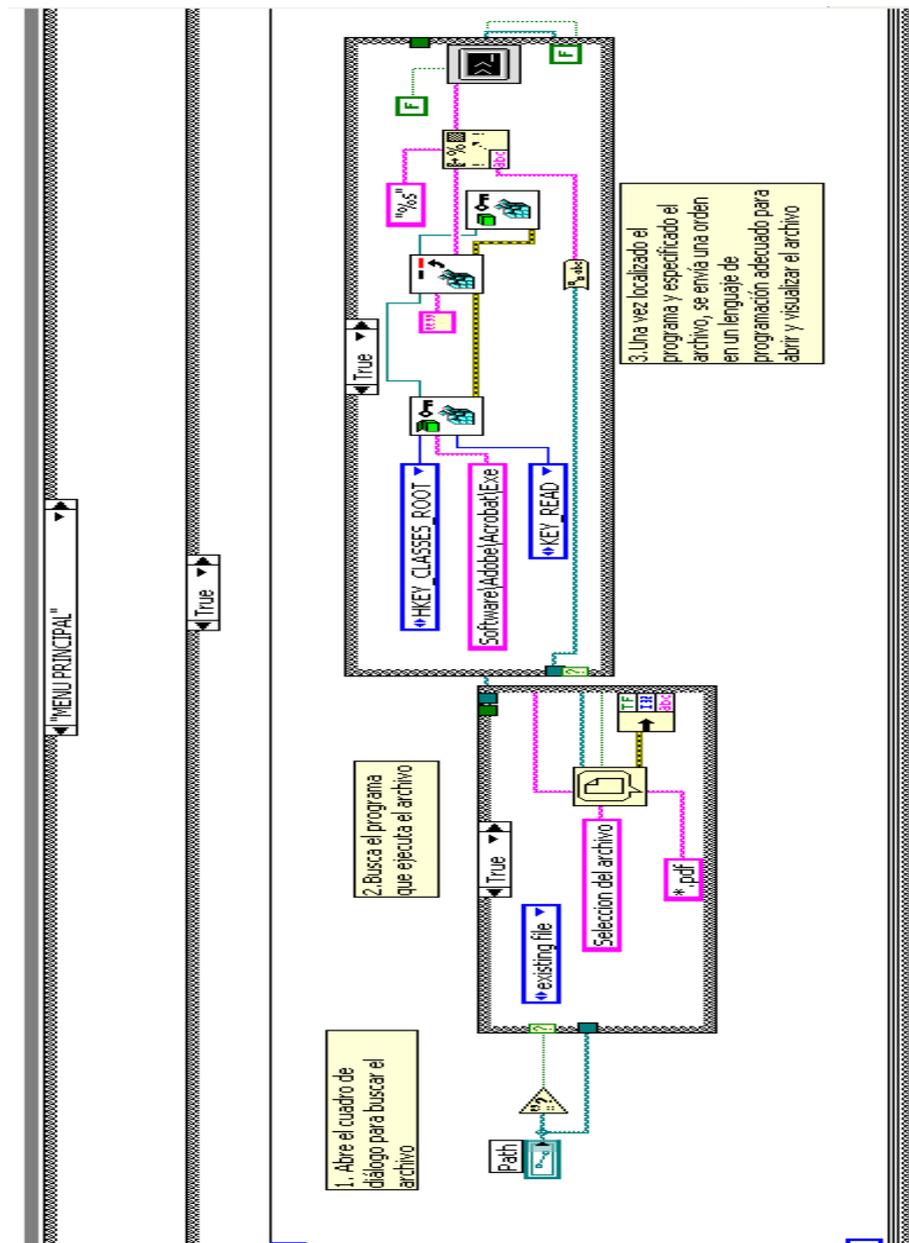
Tabla De Esfuerzos

Time	Amplitude
0.0	0.0005286
0.1	0.0005284
0.2	0.0005282
0.3	0.0005280
0.4	0.0005278
0.5	0.0005276
0.6	0.0005274
0.7	0.0005272
0.8	0.0005270
0.9	0.0005268
1.0	0.0005266
1.1	0.0005264
1.2	0.0005262
1.3	0.0005260
1.4	0.0005258
1.5	0.0005256
1.6	0.0005254
1.7	0.0005252
1.8	0.0005250
1.9	0.0005248
2.0	0.0005246
2.1	0.0005244
2.2	0.0005242
2.3	0.0005240
2.4	0.0005238
2.5	0.0005236
2.6	0.0005234
2.7	0.0005232
2.8	0.0005230
2.9	0.0005228
3.0	0.0005226
3.1	0.0005224
3.2	0.0005222
3.3	0.0005220
3.4	0.0005218
3.5	0.0005216
3.6	0.0005214
3.7	0.0005212
3.8	0.0005210
3.9	0.0005208
4.0	0.0005206
4.1	0.0005204
4.2	0.0005202
4.3	0.0005200
4.4	0.0005198
4.5	0.0005196
4.6	0.0005194
4.7	0.0005192
4.8	0.0005190
4.9	0.0005188
5.0	0.0005186
5.1	0.0005184
5.2	0.0005182
5.3	0.0005180
5.4	0.0005178
5.5	0.0005176
5.6	0.0005174
5.7	0.0005172
5.8	0.0005170
5.9	0.0005168
6.0	0.0005166
6.1	0.0005164
6.2	0.0005162
6.3	0.0005160
6.4	0.0005158
6.5	0.0005156
6.6	0.0005154
6.7	0.0005152
6.8	0.0005150
6.9	0.0005148
7.0	0.0005146
7.1	0.0005144
7.2	0.0005142
7.3	0.0005140
7.4	0.0005138
7.5	0.0005136
7.6	0.0005134
7.7	0.0005132
7.8	0.0005130
7.9	0.0005128
8.0	0.0005126
8.1	0.0005124
8.2	0.0005122
8.3	0.0005120
8.4	0.0005118
8.5	0.0005116
8.6	0.0005114
8.7	0.0005112
8.8	0.0005110
8.9	0.0005108
9.0	0.0005106
9.1	0.0005104
9.2	0.0005102
9.3	0.0005100
9.4	0.0005098
9.5	0.0005096
9.6	0.0005094
9.7	0.0005092
9.8	0.0005090
9.9	0.0005088
10.0	0.0005086

Fuente: Autores

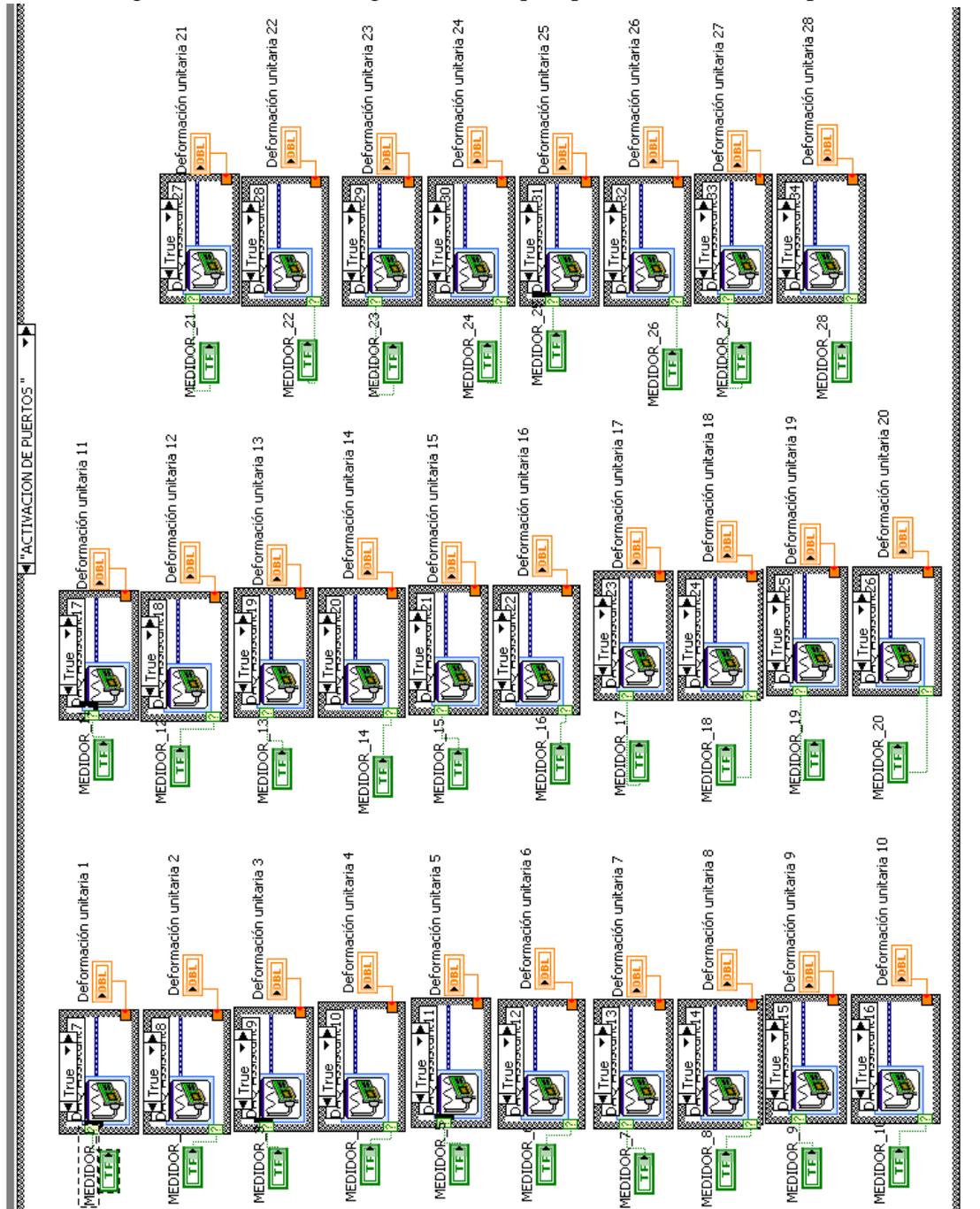
Una vez que se han ubicado los indicadores y controladores en el panel frontal, se realiza la programación propiamente dicha en la ventana diagrama de bloques. En dicha ventana se encuentran los terminales pertenecientes a los elementos ubicados en el panel frontal, los cuales se unen mediante conectores (líneas de unión). En el panel diagrama de bloques se ubican funciones, estructuras, conectores y varios elementos virtuales, obteniéndose lo siguiente:

Figura 98. Ventana diagrama de bloques para el menú principal



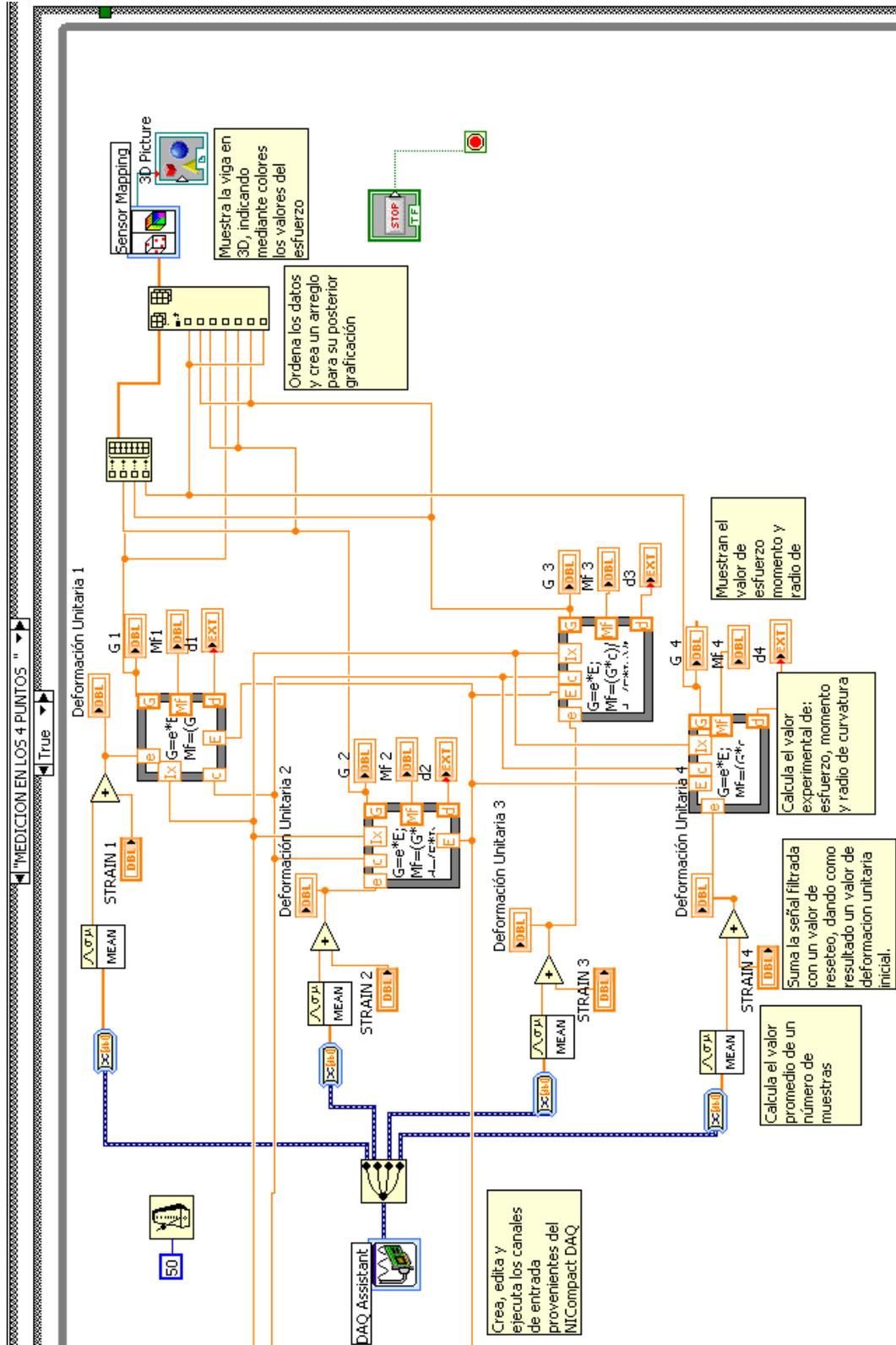
Fuente: Autores

Figura 99. Ventana diagrama de bloques para la activación de puertos



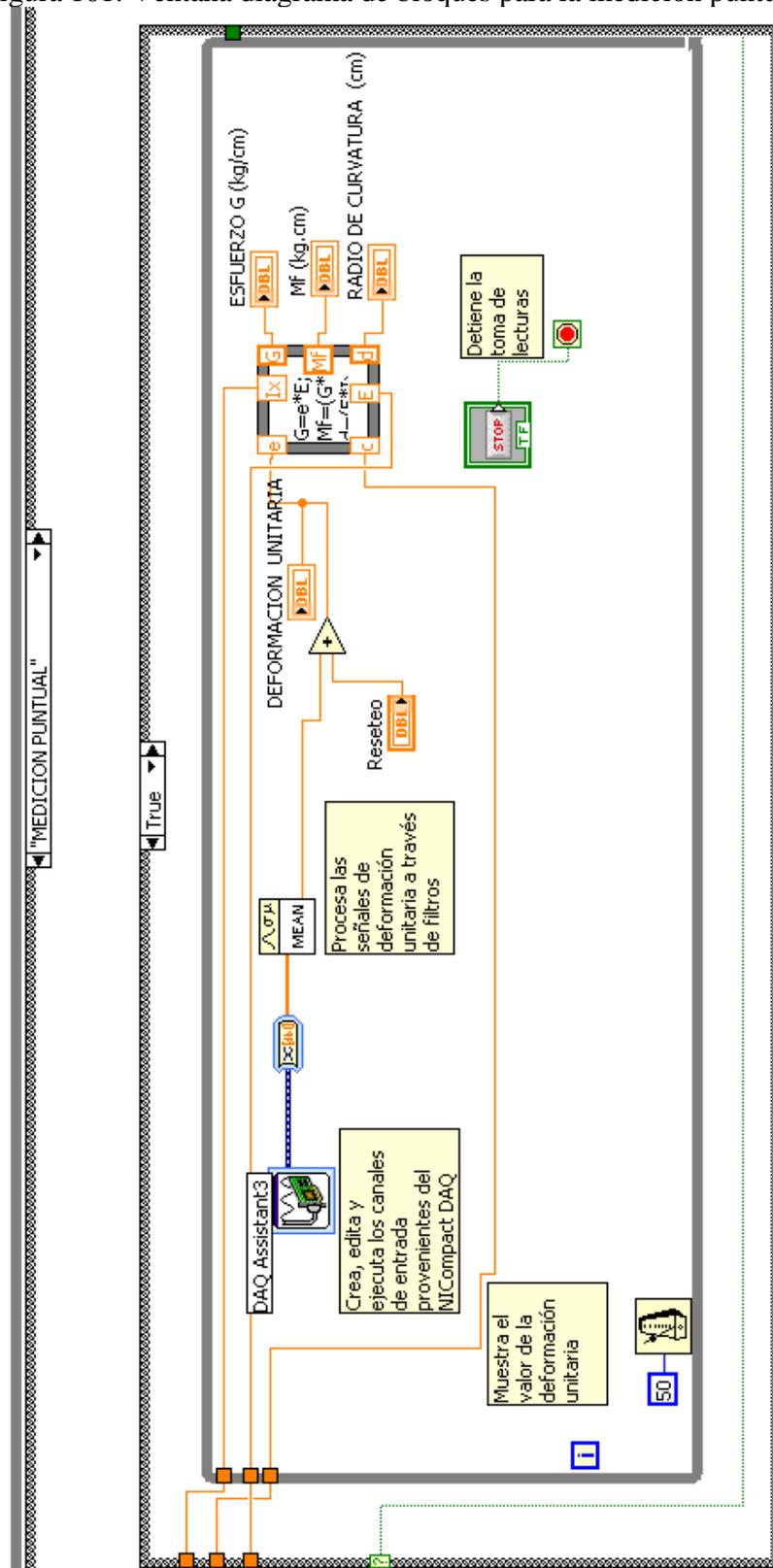
Fuente: Autores

Figura 100. Ventana diagrama de bloques para la medición en cuatro puntos



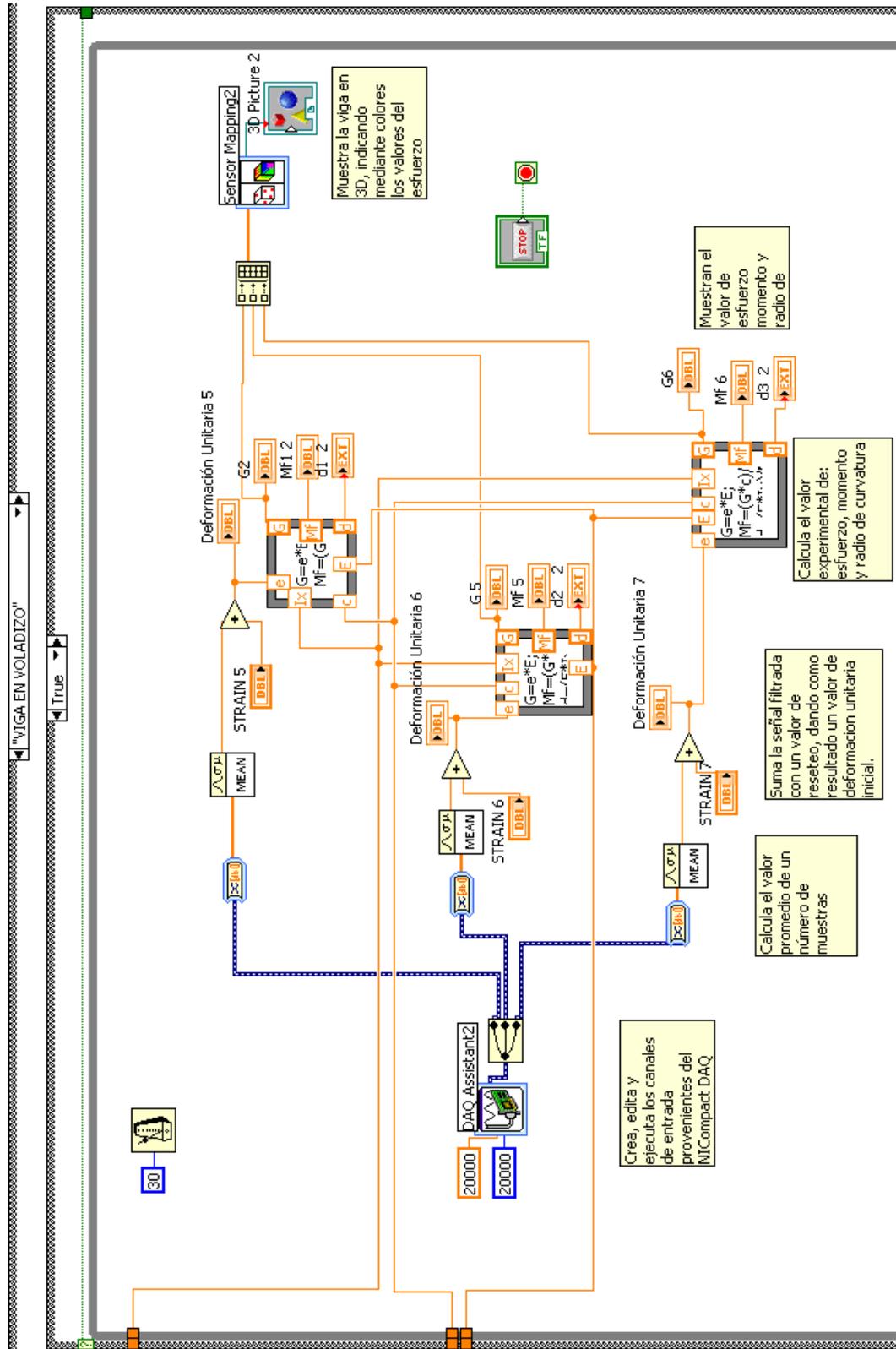
Fuente: Autores

Figura 101. Ventana diagrama de bloques para la medición puntual



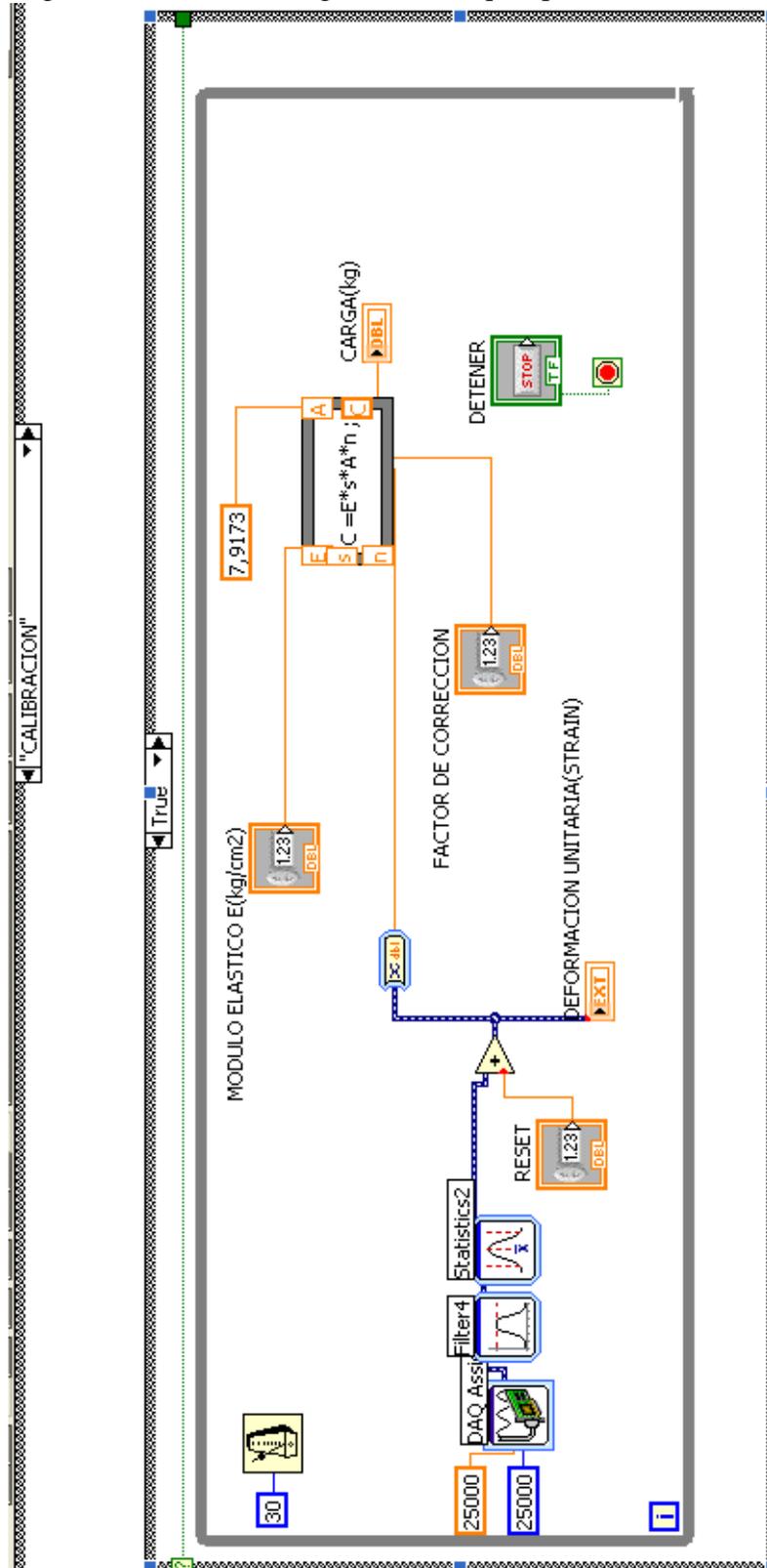
Fuente: Autores

Figura 102. Ventana diagrama de bloques para la medición de viga en voladizo



Fuente: Autores

Figura 103. Ventana diagrama de bloques para la calibración



Fuente: Autores

A continuación se detalla la programación realizada en cada subcarpeta:

MENÚ PRINCIPAL. Se indica los pasos que se realizan para cada tipo de medición. Los pasos son los siguientes:

1. Definir el tipo de perfil. Se ingresan los valores de inercia, módulo de elasticidad y radio de giro del perfil, como ayuda para el usuario se dispone de un buscador de archivos pdf, en los cuales se encuentran los siguientes:

- Catálogos de aceros DIPAC
- Catálogos de aceros IPAC
- Tabla para cálculo de áreas e inercias en diferentes formas geométricas

2. Seleccionar la pestaña. Se indica con un gráfico los diferentes tipos de mediciones que se pueden realizar, tales como:

- Activación de puertos
- Medición en los cuatro puntos
- Medición puntual
- Viga en voladizo
- Calibración

3. Salir del programa. Mediante el botón de STOP se detiene el funcionamiento del programa y se sale del mismo.

ACTIVACIÓN DE PUERTOS. En esta ventana se activan los sensores que se van a utilizar de un total de 28 medidores, además se visualiza los valores de deformación unitaria de los sensores activados.

MEDICIÓN EN LOS CUATRO PUNTOS. El detalle de la programación se muestra mediante las leyendas que se indican en la Figura 101.

1. Configurar el asistente de Compact DAQ. Se añaden los canales de entrada existentes, y se configura cada uno de ellos ingresando los valores de factor de galga, resistencia de la galga y valor de voltaje, para después proceder a la calibración de la respectiva galga extensométrica.

2. Iniciar la medición. Al dar clic en el botón medir se inicia la toma de lecturas.

3. Resetear cada uno de los sensores. Una vez que la información ingresa al Compact DAQ, ésta es procesada, para lo cual pasa a través de unos filtros virtuales, con lo cual se puede escoger los valores de reseteo.

4. Visualizar los valores de deformación unitaria, esfuerzo experimental, momento flector, radio de curvatura y flecha. El valor de la señal filtrada se suma con el valor de reseteo dando como resultado un valor de deformación unitaria. El valor de deformación unitaria se multiplica por el valor del módulo de elasticidad y se obtiene como resultado el valor del esfuerzo experimental. Para obtener el valor del momento se multiplica el valor del esfuerzo por la inercia y se divide para el radio de giro. El valor del radio de curvatura se obtiene multiplicando el módulo de elasticidad por el valor de inercia y dividiendo para el valor de momento. El valor de la flecha se obtiene introduciendo en el programa una ecuación que rige el comportamiento de la curva carga vs. deformación real.

5. Visualizar la imagen de la viga en 3D y observar por colores los valores de esfuerzo existentes. Los resultados de esfuerzo se visualizan en la imagen en 3D de la viga, en la cual mediante diferentes colores presentes en ella se indica el valor de esfuerzo existente.

6. Detener la medición. Al dar clic en el botón STOP, se detiene la toma de lecturas.

MEDICIÓN PUNTUAL. El detalle de la programación en esta ventana se muestra mediante las leyendas que se muestran en la Figura 102.

- 1. Configurar el asistente de Compact DAQ.** Se añade el canal de entrada existente, y se lo configura ingresando los valores de factor de galga, resistencia de la galga y valor de voltaje, para después proceder a la calibración del strain gage.
- 2. Iniciar la medición.** Al dar clic en el botón medir se inicia la toma de lecturas.
- 3. Resetear el sensor.** Una vez que la información ingresa al Compact DAQ esta es procesada, para lo cual pasa a través de un filtro virtual obteniendo así el valor de reseteo.
- 4. Visualizar los resultados.** El valor de la señal filtrada se suma con el valor de reseteo dando como resultado un valor de deformación unitaria. El valor de deformación unitaria se multiplica por el valor del módulo de elasticidad y se obtiene como resultado el valor del esfuerzo. Para obtener el valor del momento se multiplica el valor del esfuerzo por la inercia y se divide para el radio de giro. El valor del radio de curvatura se obtiene multiplicando el módulo de elasticidad por el valor de inercia y dividiendo para el valor de momento. El valor de la flecha se obtiene introduciendo en el programa una ecuación que rige el comportamiento de la curva carga vs. deformación real.
- 5. Detener la medición.** Al dar clic en el botón Parar, se detiene la toma de lecturas.

VIGA EN VOLADIZO. El detalle de la programación en esta ventana se muestra mediante las leyendas que se muestran en la Figura 103.

- 1. Configurar el asistente de Compact DAQ.** Se añaden los canales de entrada existentes, y se configura cada uno de ellos ingresando los valores de factor de galga, resistencia de la galga y valor de voltaje, para después proceder a la calibración del respectivo strain gage.
- 2. Iniciar la medición.** Al dar clic en el botón medir se inicia la toma de lecturas.

3. Resetear cada uno de los sensores. Una vez que la información ingresa al Compact DAQ ésta es procesada, para lo cual pasa a través de unos filtros virtuales, con lo cual se puede escoger los valores de reseteo.

4. Visualizar los valores de deformación unitaria, esfuerzo experimental, momento flector, radio de curvatura y flecha. El valor de la señal filtrada se suma con el valor de reseteo dando como resultado un valor de deformación unitaria. El valor de deformación unitaria se multiplica por el valor del módulo de elasticidad y se obtiene como resultado el valor del esfuerzo experimental. Para obtener el valor del momento se multiplica el valor del esfuerzo por la inercia y se divide para el radio de giro. El valor del radio de curvatura se obtiene multiplicando el módulo de elasticidad por el valor de inercia y dividiendo para el valor de momento. El valor de la flecha se obtiene introduciendo en el programa una ecuación que rige el comportamiento de la curva carga vs. deformación real.

5. Visualizar la imagen de la viga en 3D y observar por colores los valores de esfuerzo existentes. Los resultados de esfuerzo se visualizan en la imagen en 3D de la viga, en la cual mediante diferentes colores presentes en ella se indica el valor de esfuerzo existente.

6. Detener la medición. Al dar clic en el botón STOP, se detiene la toma de lecturas.

CALIBRACIÓN. El detalle de la programación en esta ventana se muestra mediante las leyendas que se muestran en la Figura 104.

1. Configurar el asistente de Compact DAQ. Se añade el canal de entrada existente, y se lo configura ingresando los valores de factor de galga, resistencia de la galga y valor de voltaje, para después proceder a la calibración de la galga extensométrica.

2. Iniciar la calibración. Al dar clic en el botón medir se inicia la toma de medida.

3. **Ingresar los valores del módulo de elasticidad y el factor de corrección.** Se ingresa los valores del módulo de elasticidad y del factor de corrección para obtener los valores de carga corregidos.
4. **Reseteo el sensor.** Una vez que la información ingresa al Compact DAQ ésta es procesada, para lo cual pasa a través de un filtro virtual obteniendo así un valor al cual se lo resetea.
5. **Visualizar el valor de la carga.** Reseteado el valor del sensor se observa el valor de la carga aplicada, con lo cual se comprueba el funcionamiento de los sensores.
6. **Detener la medición.** Al dar clic en el botón Parar, se detiene la toma de lectura.

5.2 Calibración del sistema y obtención de datos teóricos

5.2.1 Calibración del sistema. Se procede a calibrar los sensores para así validar los datos obtenidos en el software LabView, además se obtienen los errores que se presentan en los elementos mecánicos de medición.

5.2.1.1 Calibración de los sensores y del programa LabView. Para comprobar el correcto funcionamiento de los sensores y del programa LabView se utiliza las pesas del banco de pruebas, la máquina universal y como probetas una barra de acero y un anillo de fuerzas.

Figura 104. Probeta utilizada para la comprobación del puente de Wheatstone



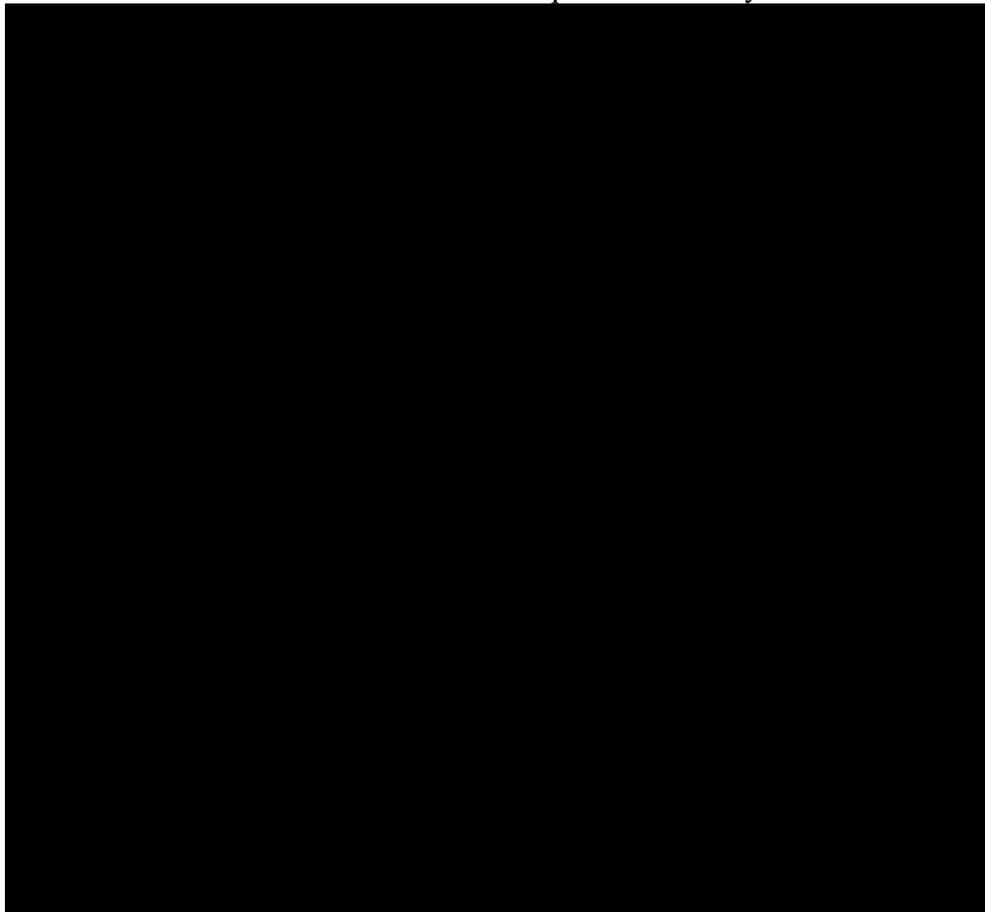
Fuente: Autores

5.2.1.2 *Calibración de los sensores y del programa LabView utilizando la máquina universal y una barra de acero como probeta.* Mediante la utilización de la máquina universal se aplica carga axial a una barra de acero como se ilustra en la Figura 104. Después de varias pruebas realizadas y tomando como variables la velocidad de aplicación de la carga, el módulo de elasticidad y el diámetro de la probeta, se concluye:

- La velocidad de la máquina universal para la aplicación de la carga debe ser constante y con un valor mayor o igual que 6.
- A pesar de aplicar un valor de velocidad constante al llegar la máquina universal a aplicar un valor de carga a partir de 130 kg la velocidad aumenta, lo que afecta en los resultados obtenidos con el programa LabView.

Los resultados obtenidos con un valor de velocidad en la máquina universal igual a 6 son los siguientes:

Tabla 12. Resultados obtenidos para la calibración de los sensores y del programa LabView mediante la utilización de la máquina universal y la barra de acero



Fuente: Autores

Se observa que el porcentaje de error entre el valor de carga aplicada por la máquina universal y el valor medido por el programa LabView está dentro de los márgenes aceptables, además se comprueba que a partir de la carga de 130 kg el porcentaje de error aumenta. El porcentaje de error promedio obtenido para aplicarlo en el programa LabView es 1,86% es decir que los valores de carga obtenidos tienen un margen de error del 1,86%.

5.2.1.3 *Calibración de los sensores y del programa LabView utilizando pesas y una barra de acero como probeta.* Se coloca la barra de acero en la máquina universal pero la carga axial aplicada se lo hace con las pesas del banco de pruebas, para de esta manera hacer una calibración más real que la anterior.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 13. Resultados obtenidos para la calibración de los sensores y del programa LabView mediante la utilización de las pesas y la barra de acero

DATOS CON LA MÁQUINA UNIVERSAL	VALORES DE CARGA (kg)			ERROR PORCENTUAL (%) EXISTENTE ENTRE LOS VALORES DE CARGA MEDIDOS CON LA MÁQUINA		
	DATOS CON EL SOFTWARE LABVIEW			MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 3
	MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 3			
10	9,04	8,68	8,79	9,60	13,20	12,10
20	20,91	19,3	19,1	4,55	3,50	4,50
30	30,91	28,76	28,85	3,03	4,13	3,83
40	40,25	39,03	38,98	0,63	2,43	2,55
50	49,01	48,96	48,86	1,98	2,08	2,28
60	59,38	58,87	58,67	1,03	1,88	2,22
70	69,03	68,7	68,54	1,39	1,86	2,09
80	80,63	78,5	78,45	0,79	1,88	1,94
90	89,02	88,77	88,65	1,09	1,37	1,50
100	99,62	98,87	98,78	0,38	1,13	1,22
110	109,93	108,01	108,05	0,06	1,81	1,77
120	119,03	118,23	118,15	0,81	1,48	1,54
ERROR PORCENTUAL PROMEDIO				2,11	3,06	3,13
ERROR PORCENTUAL PROMEDIO FINAL				2,77		

Fuente: Autores

Se observa que el porcentaje de error entre el valor de carga aplicada con las pesas y el valor medido por el programa LabView está dentro de los márgenes aceptables, el porcentaje de error promedio obtenido para aplicarlo en el programa LabView es 2,59% es decir que los valores de carga obtenidos tiene un margen de error del 2,59%.

5.2.1.4 Ecuaciones utilizadas en el programa LabView para encontrar el valor de la flecha en cada uno de los casos analizados. El valor de la flecha para cada uno de los casos se determina con las ecuaciones que se encuentran en el **ANEXO L**.

5.2.1.5 Determinación del valor de la flecha real leída por el deformímetro para el caso de viga en voladizo. Para el caso de viga en voladizo se observa que los resultados de la flecha leídos por el deformímetro se encuentran afectados por la deformación que se produce en la columna, por tal razón se procede a determinar el valor de la columna que es igual al valor leído por el deformímetro menos el valor leído por el software LabView.

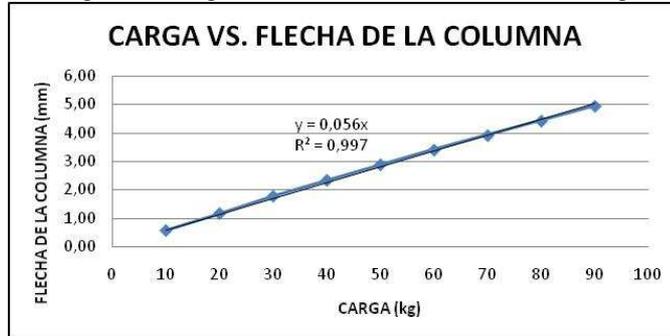
Tabla 14. Datos de la flecha medidos para el caso de viga en voladizo

DATOS DE FLECHA (mm) PARA EL CASO DE VIGA EN VOLADIZO							
VALORES DE CARGA (kg)	DISTANCIA DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN (cm)	DATOS DEL DEFORMÍMETRO (mm)			DATOS DEL SOFTWARE LABVIEW (mm)		
		PRIMERA MEDICIÓN	SEGUNDA MEDICIÓN	MEDICIÓN PROMEDIO	PRIMERA MEDICIÓN	SEGUNDA MEDICIÓN	MEDICIÓN PROMEDIO
10	95	0,84	0,86	0,850	0,290	0,284	0,287
	70	0,58	0,61	0,595	0,160	0,161	0,161
	15	0,08	0,11	0,095	0,010	0,009	0,010
20	95	1,72	1,74	1,730	0,570	0,571	0,571
	70	1,2	1,22	1,210	0,320	0,324	0,322
	15	0,2	0,21	0,205	0,020	0,018	0,019
30	95	2,61	2,65	2,630	0,860	0,856	0,858
	70	1,8	1,85	1,825	0,490	0,486	0,488
	15	0,31	0,33	0,320	0,030	0,025	0,028
40	95	3,47	3,48	3,475	1,140	1,141	1,141
	70	2,4	2,44	2,420	0,650	0,649	0,650
	15	0,42	0,43	0,425	0,040	0,036	0,038
50	95	4,3	4,32	4,310	1,430	1,426	1,428
	70	2,99	3,02	3,005	0,810	0,811	0,811
	15	0,55	0,55	0,550	0,040	0,045	0,043
60	95	5,11	5,11	5,110	1,710	1,711	1,711
	70	3,56	3,59	3,575	0,970	0,974	0,972
	15	0,63	0,64	0,635	0,050	0,054	0,052
70	95	5,91	5,91	5,910	2,000	1,994	1,997
	70	4,12	4,13	4,125	1,130	1,137	1,134
	15	0,72	0,73	0,725	0,060	0,063	0,062
80	95	6,71	6,7	6,705	2,280	2,279	2,280
	70	4,69	4,7	4,695	1,300	1,300	1,300
	15	0,83	0,84	0,835	0,070	0,072	0,071
90	95	7,53	7,5	7,515	2,570	2,564	2,567
	70	5,25	5,25	5,250	1,460	1,465	1,463
	15	0,92	0,93	0,925	0,080	0,081	0,081

Fuente: Autores

Se procede a determinar la ecuación que rige el comportamiento de la flecha en la columna de la viga en voladizo, para lo cual se grafica carga vs. flecha de la columna.

Figura 105. Diagrama carga vs. flecha de la columna de viga en voladizo



Fuente: Autores

De la gráfica se obtiene la ecuación $y_{\text{columna}} = 0,056 P$, como el valor es distinto de acuerdo a la distancia del punto de medición se divide esa ecuación para el valor de la distancia, obteniendo finalmente la siguiente ecuación: $y_{\text{columna}} = 0,000589474 \times \text{Carga} \times \text{distancia del punto de medición}$.

Aplicando la ecuación se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 15. Datos utilizados para encontrar el valor real de la columna en la viga voladizo

DATOS UTILIZADOS PARA ENCONTRAR EL VALOR REAL DE LA FLECHA EXISTENTE EN LA COLUMNA DE LA VIGA EN VOLADIZO				
VALORES DE CARGA (kg)	DISTANCIA DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN (cm)	DATO PROMEDIO DEL DEFORMÍMETRO (mm)	DATO PROMEDIO DEL SOFTWARE LABVIEW (mm)	VALOR CALCULADO DE LA COLUMNA (mm)
10	95	0,850	0,287	0,563
	70	0,595	0,1605	0,435
	15	0,095	0,0095	0,086
20	95	1,730	0,5705	1,160
	70	1,210	0,322	0,888
	15	0,205	0,019	0,186
30	95	2,630	0,858	1,772
	70	1,825	0,488	1,337
	15	0,320	0,0275	0,293
40	95	3,475	1,1405	2,335
	70	2,420	0,6495	1,771
	15	0,425	0,038	0,387
50	95	4,310	1,428	2,882
	70	3,005	0,8105	2,195
	15	0,550	0,0425	0,508
60	95	5,110	1,7105	3,400
	70	3,575	0,972	2,603
	15	0,635	0,052	0,583
70	95	5,910	1,997	3,913
	70	4,125	1,1335	2,992
	15	0,725	0,0615	0,664
80	95	6,705	2,2795	4,426
	70	4,695	1,3	3,395
	15	0,835	0,071	0,764
90	95	7,515	2,567	4,948
	70	5,250	1,4625	3,788
	15	0,925	0,0805	0,845

Fuente: Autores

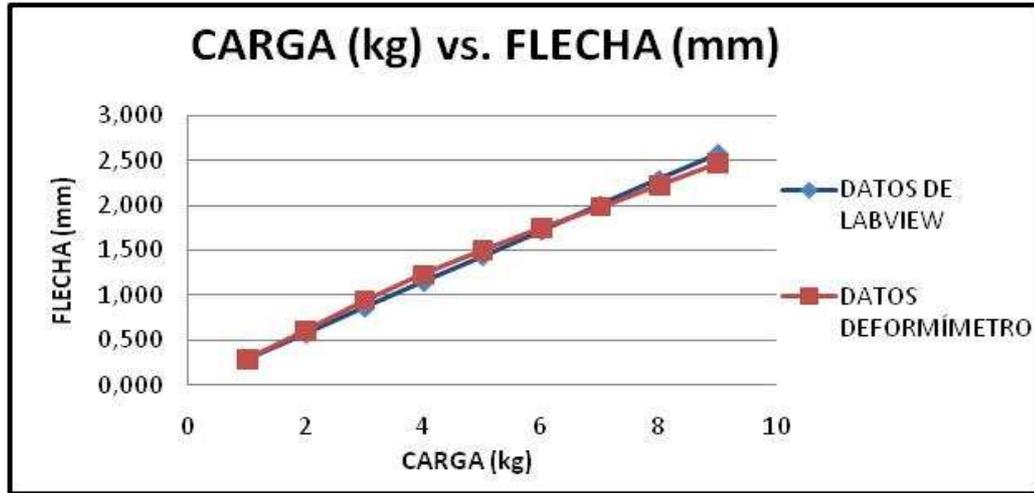
Ahora se procede a calcular el valor real de la flecha existente en la viga en voladizo que es igual al valor de la flecha leído en el deformímetro menos el valor obtenido con la ecuación para la flecha en la columna, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 16. Datos para encontrar el valor real de la flecha de viga en voladizo

DATOS UTILIZADOS PARA ENCONTRAR EL VALOR REAL DE LA FLECHA DE LA VIGA EN VOLADIZO				
VALORES DE CARGA (kg)	DISTANCIA DE CADA PUNTO DE MEDICIÓN (cm)	DATO PROMEDIO DEL DEFORMÍMETRO (mm)	DATO CALCULADO CON LA ECUACIÓN DE LA FLECHA DE LA COLUMNA (mm)	DATO DE LA FLECHA CORREGIDA PARA LA VIGA EN VOLADIZO
10	95	0,850	0,560	0,290
	70	0,595	0,413	0,170
	15	0,095	0,088	0,009
20	95	1,730	1,120	0,610
	70	1,210	0,825	0,335
	15	0,205	0,177	0,020
30	95	2,630	1,680	0,950
	70	1,825	1,238	0,487
	15	0,320	0,265	0,030
40	95	3,475	2,240	1,235
	70	2,420	1,651	0,630
	15	0,425	0,354	0,039
50	95	4,310	2,800	1,510
	70	3,005	2,063	0,841
	15	0,550	0,442	0,044
60	95	5,110	3,360	1,750
	70	3,575	2,476	1,000
	15	0,635	0,531	0,054
70	95	5,910	3,920	1,990
	70	4,125	2,888	1,156
	15	0,725	0,619	0,060
80	95	6,705	4,480	2,225
	70	4,695	3,301	1,360
	15	0,835	0,707	0,076
90	95	7,515	5,040	2,475
	70	5,250	3,714	1,536
	15	0,925	0,796	0,083

Fuente: Autores

Figura 106. Comparación de las curvas de datos del deformímetro y LabView para viga en voladizo



Fuente: Autores

5.2.1.6 Determinación del error porcentual existente en los deformímetros mecánicos. Se considera al deformímetro digital de 3 dígitos de precisión como el más exacto, partiendo de esto se toman lecturas de deformación aplicando las mismas condiciones de carga y se obtiene los siguientes resultados.

Tabla 17. Valores tomados para calcular el error porcentual en los deformímetros

TIPO DE DEFORMÍMETRO	VALOR DE DEFORMACIÓN (mm)	VALOR RESIDUAL (mm)	VALOR REAL(mm)	ERROR PORCENTUAL (%)
Deformímetro digital 3 dígitos	0,111	0,016	0,095	0
Deformímetro de vástago largo	0,1	0	0,1	5,263157895
Deformímetro digital 2 dígitos	0,1	0	0,1	5,263157895
Deformímetro analógico caratula	0,091	0,18	0,073	23,15789474

Fuente: Autores

Como se puede apreciar en los resultados que el deformímetro que presenta mayor error porcentual en sus mediciones es el analógico de carátula, por lo cual esto se debe tener en cuenta en el momento de tomar las mediciones de las flechas al realizar cada uno de los ensayos.

5.2.2 Obtención de datos teóricos

5.2.2.1 Cálculo del módulo de elasticidad real de la viga. Para determinar el módulo elástico real de la viga despejamos de la ecuación de la segunda integral del momento flector:

$$E = \frac{EI_x y_0 + EI_x \theta_0 x + \sum \frac{M(x-a)^2}{2} + \sum \frac{P(x-b)^3}{6} + \sum \frac{q(x-a)^4}{24}}{I_{xy}} \quad (51)$$

Donde:

$$y_0 = 0$$

$$\theta_0 = 0$$

Los valores de y se obtienen de una manera experimental, con la ayuda de un deformímetro para cada valor de P , los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 18. Valores de E experimentales

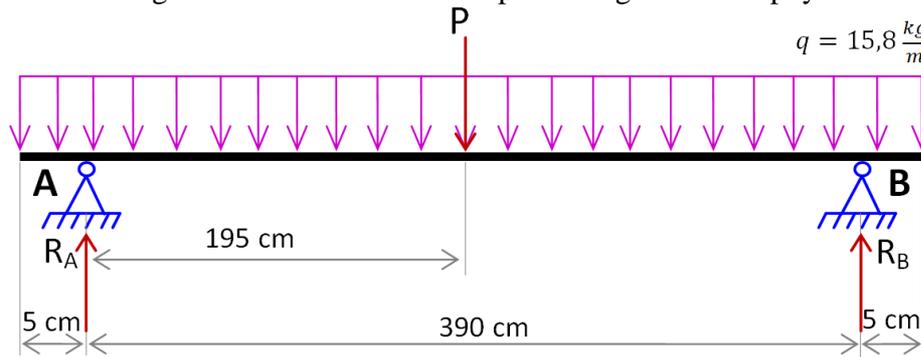
P(kg)	y(mm)	E (kg/mm²)	E (kg/cm²)
10	0,165	40871,4989	4087149,89
20	0,233	27879,4222	2787942,22
30	0,3	24160,0448	2416004,48
40	0,378	24873,219	2487321,9
50	0,443	23553,692	2355369,2
60	0,518	22020,047	2202004,7
70	0,583	21335,298	2133529,8
80	0,655	19501,6383	1950163,83
90	0,723	18976,0269	1897602,69
100	0,792	1808,53762	180853,762
110	0,865	17999,8337	1799983,37
120	0,933	17701,9834	1770198,34
130	1,005	17347,4228	1734742,28
140	1,072	17152,2895	1715228,95
150	1,138	17001,1851	1700118,51
160	1,207	16807,3265	1680732,65
170	1,278	16597,4471	1659744,71
180	1,35	16392,3198	1639231,98
190	1,42	16240,6522	1624065,22
200	1,485	16181,0239	1618102,39
E (kg/cm²) PROMEDIO			1972004,543

Fuente: Autores

Con estos datos se obtiene un valor promedio de $E = 1\,972\,004,543 \text{ kg/cm}^2$.

5.2.2.2 Cálculo de reacciones, momentos, deformación y esfuerzo en una viga con dos apoyos articulados

Figura 107. Diagrama de fuerzas actuantes para la viga con dos apoyos articulados



Fuente: Autores

Datos de las cargas actuantes:

$$P = 200 \text{ kg (Carga máxima)} + 3,58 \text{ kg (Peso portapesas)} = 203,58 \text{ kg}$$

$$q = 15,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$P' = \text{Peso del } \frac{\text{perfil}}{\text{metro}} * \text{longitud total de la viga (ANEXO A)}$$

$$P' = 15,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 4\text{m} = 63,2\text{kg}$$

Cálculo de reacciones.

Se utiliza la ec. (31):

$$\sum M_B = 0$$

$$P \times 195 \text{ cm} - R_A \times 390 \text{ cm} + P' \times 195 \text{ cm} = 0$$

$$203,58 \text{ kg} \times 195 \text{ cm} - R_A \times 390 \text{ cm} + 63,2 \text{ kg} \times 195 \text{ cm} = 0$$

$$R_A = \frac{203,58 \text{ kg} \times 195 \text{ cm} + 63,2 \text{ kg} \times 195 \text{ cm}}{390 \text{ cm}}$$

$$R_A = 133,39 \text{ kg}$$

Se utiliza la ec. (25):

$$\sum F_y = 0$$

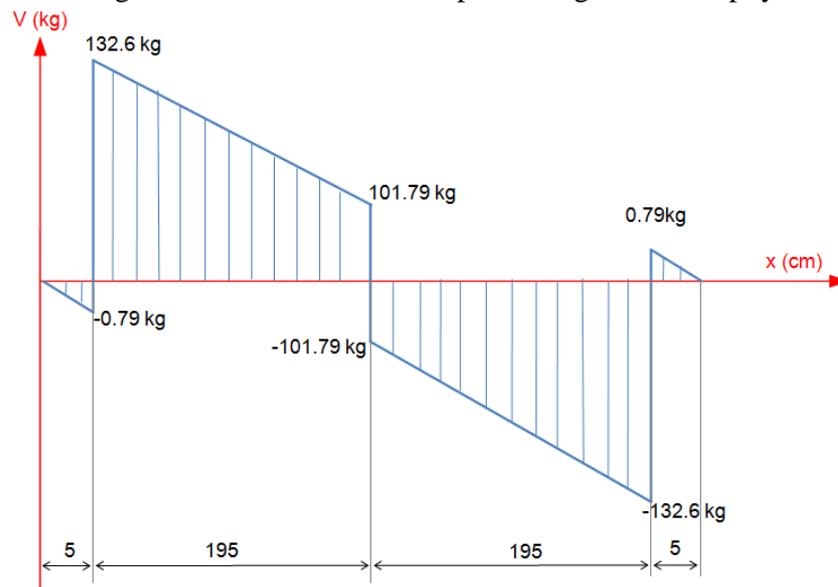
$$R_A + R_B - P - P' = 0$$

$$R_A + R_B - 203,58 \text{ kg} - 63,2 \text{ kg} = 0$$

$$R_B = 203,58 \text{ kg} + 63,2 \text{ kg} - 133,39 \text{ kg}$$

$$R_B = 133,39 \text{ kg}$$

Figura 108. Diagrama de fuerzas cortantes para la viga con dos apoyos articulados



Fuente: Autores

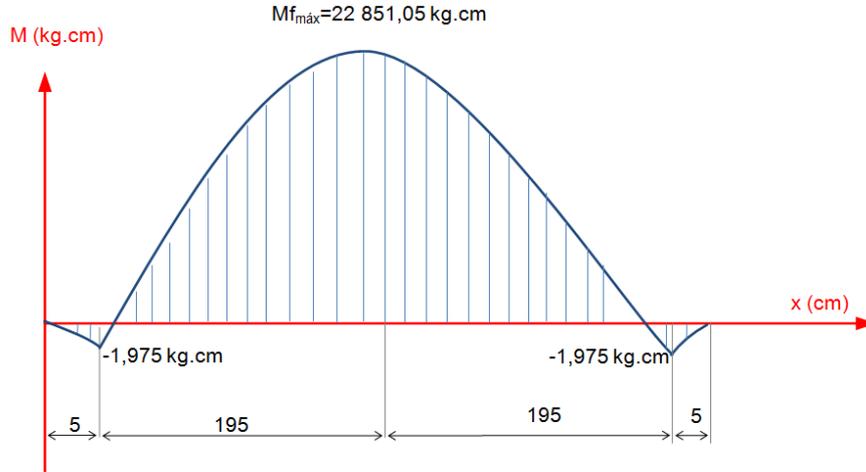
Cálculo del momento flector máximo:

$$M_{Fm\acute{a}x} = \sum \text{Areas} \tag{52}$$

$$M_{Fm\acute{a}x} = \frac{30,81 \text{ kg} \times 195 \text{ cm}}{2} + (101,79 \text{ kg} \times 195 \text{ cm}) - \frac{0,79 \text{ kg} \times 5 \text{ cm}}{2}$$

$$M_{Fm\acute{a}x} = 22\ 851,05 \text{ kg.cm}$$

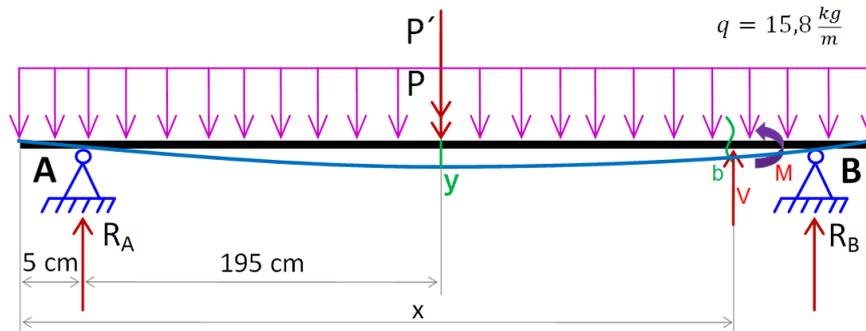
Figura 109. Diagrama de momentos flectores para la viga con dos apoyos articulados



Fuente: Autores

Cálculo de la deformación:

Figura 110. Diagrama de deformación de la viga con dos apoyos articulados



Fuente: Autores

Se utiliza la ec. (31):

$$\begin{aligned} \sum M_b &= 0 \\ -M + R_A(x - 5) - P(x - 200) - qx \cdot \frac{x}{2} &= 0 \\ -M + R_A(x - 5) - 203,58 \text{ kg}(x - 200) - 0,158 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \cdot \frac{x^2}{2} &= 0 \\ M &= R_A(x - 5) - 203,58 \text{ kg}(x - 200) - 0,158 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \cdot \frac{x^2}{2} \\ M &= 133,39 \text{ kg}(x - 5) - 203,58 \text{ kg}(x - 200) - 0,158 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \cdot \frac{x^2}{2} \end{aligned} \quad (53)$$

Se aplica el método de la segunda integral:

$$EI_x y'' = M = 133,39 (x - 5) - 203,58 (x - 200) - \frac{0,158}{2} x^2$$

$$EI_x y' = \frac{133,39}{2} (x - 5)^2 - \frac{203,58}{2} (x - 200)^2 - \frac{0,158}{6} x^3 + C \quad (54)$$

$$EI_x y = \frac{133,39}{6} (x - 5)^3 - \frac{203,58}{6} (x - 200)^3 - \frac{0,158}{24} x^4 + Cx + D \quad (55)$$

Condiciones de Frontera:

Para $x = 5 \rightarrow y = 0$; se reemplaza en ec. (55):

$$EI_x(0) = \frac{133,39}{6} (5 - 5)^3 - \frac{203,58}{6} (5 - 200)^3 - \frac{0,158}{24} (5)^4 + C(5) + D$$

$$D = 0 - 0 + 4,115 - 5C$$

$$D = 4,115 - 5C \quad (56)$$

Para $x = 395 \rightarrow y = 0$; se reemplaza en ec. (55):

$$EI_x y = \frac{133,39}{6} (x - 5)^3 - \frac{203,58}{6} (x - 200)^3 - \frac{0,158}{24} x^4 + Cx + D$$

$$EI_x(0) = \frac{133,39}{6} (395 - 5)^3 - \frac{203,58}{6} (395 - 200)^3 - \frac{0,158}{24} (395)^4 + C(395) + D$$

$$D = -1\,318\,760\,235 + 251\,586\,708,8 + 160\,263\,354,1 - 395C$$

$$D = -906\,910\,172,1 - 395C \quad (57)$$

Con ec. (56) y ec. (57) se despeja C y D:

$$D + 5C = 4,115$$

$$D + 395C = -906\,910\,172,1$$

$$\therefore C = -2\,325\,410,708 \text{ y } D = 11\,627\,057,66$$

Las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$EI_x y' = \frac{133,39}{2} (x - 5)^2 - \frac{203,58}{2} (x - 200)^2 - \frac{0,158}{6} x^3 - 2\,325\,410,708 \quad (58)$$

$$EI_x y = \frac{133,39}{6} (x - 5)^3 - \frac{203,58}{6} (x - 200)^3 - \frac{0,158}{24} x^4 - 2\,325\,410,708 x + 11\,627\,057,66 \quad (59)$$

Para encontrar la deformación en el punto medio en el cual $x = 200$, se reemplaza los valores en la ec. (59):

$$EI_{x,y} = \frac{133,39}{6}(200 - 5)^3 - \frac{203,58}{6}(200 - 200)^3 - \frac{0,158}{24}(200)^4 - 2\,325\,410,708(200) + 11\,627\,057,66$$

$$EI_{x,y} = 164\,845\,029,4 - 10\,533\,333,33 - 465\,082\,141,6 + 11\,627\,057,66$$

$$EI_{x,y} = -299\,143\,387,9 \quad (60)$$

Datos:

$$E_{\text{acero}} = 1,972004543 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad E_{\text{acero}} = 2,750504793 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Valor calculado en el numeral 5.2.2.1})$$

$$I_x = 869 \text{ cm}^4 \quad (\text{Valor tomado del ANEXO A})$$

Estos valores se reemplazan en la ec. (60) y se obtiene lo siguiente:

$$y = \frac{-299\,143\,387,9 \text{ kg} \cdot \text{cm}^3}{1,972004543 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 869 \text{ cm}^4}$$

$$y = -0,1464528 \text{ cm}$$

$$y = -1,464528 \text{ mm}$$

Realizando el procedimiento anterior, se determina los valores de las flechas para las siguientes distancias:

Tabla 19. Valores de flecha (mm) para cada valor de distancia de la viga con dos apoyos articulados

DISTANCIA (mm)	CARGA P(kg)			
	200	190	180	170
1998	-1,464528	-1,391302	-1,318075	-1,207970
1497	-1,165645	-1,107363	-1,049081	-0,990798
997	-0,861368	-0,818300	-0,775232	-0,732163
497	-0,435004	-0,413254	-0,391504	-0,369754

Fuente: Autores

Cálculo del esfuerzo. Se aplica la ec. (10).

Datos:

$$c = 8 \text{ cm}$$

$$I_x = 869 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{M_{Fm\acute{a}x} \times C}{I_x}$$

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{22\,851,05 \text{ kg}\cdot\text{cm} \times 8 \text{ cm}}{869 \text{ cm}^4}$$

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = 180,432589 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Realizando el procedimiento anterior, se determina los valores de los esfuerzos para las siguientes distancias:

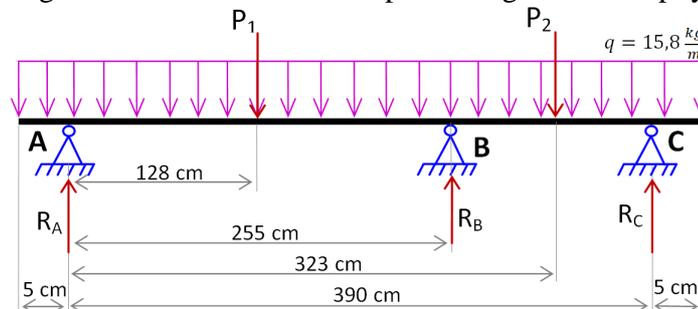
Tabla 20. Valores de esfuerzo (kg/cm^2) para cada valor de distancia de la viga con dos apoyos articulados

DISTANCIA (mm)	CARGA P(kg)			
	200	190	180	170
1998	180,432589	171,411001	162,389321	153,367733
1497	134,167825	127,459425	120,751024	114,042624
997	87,903052	83,507903	79,112755	74,717597
497	41,638288	39,556373	37,474458	35,392543

Fuente: Autores

5.2.2.3 Cálculo de reacciones, momentos y deformación en una viga con tres apoyos articulados

Figura 111. Diagrama de fuerzas actuantes para la viga con tres apoyos articulados



Fuente: Autores

Datos de las cargas actuantes:

$$P_1 = 100 \text{ kg} + 3,58 \text{ kg(Peso portapesas)} = 103,58 \text{ kg}$$

$$P_2 = 100 \text{ kg} + 2,64 \text{ kg(Peso portapesas)} = 102,64 \text{ kg}$$

$$q = 15,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$P' = \text{Peso del } \frac{\text{perfil}}{\text{metro}} * \text{longitud total de la viga} \quad (\text{ANEXO A})$$

$$P' = 15,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 4\text{m} = 63,2 \text{ kg}$$

Cálculo de las reacciones. Para encontrar las reacciones se elimina la reacción de la mitad y se utiliza la ec. (31):

$$\sum M_A = 0$$

$$P' \times 195 \text{ cm} + P_1 \times 128 \text{ cm} + P_2 \times 323 \text{ cm} - R_c' \times 390 \text{ cm} = 0$$

$$63,2 \text{ kg} \times 195 \text{ cm} + 103,58 \text{ kg} \times 128 \text{ cm} + 102,64 \text{ kg} \times 323 \text{ cm} - R_c' \times 390 \text{ cm} = 0$$

$$R_c' = 150,6025 \text{ kg}$$

Se utiliza la ec. (25):

$$\sum F_y = 0$$

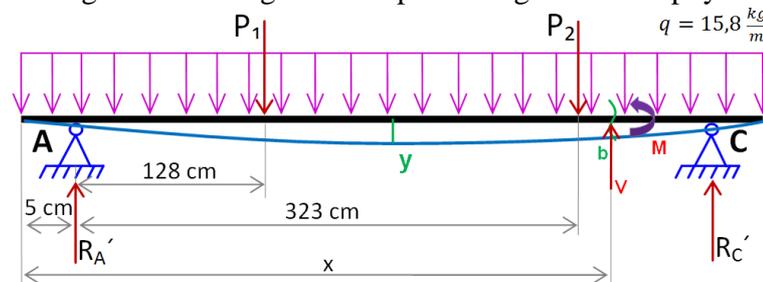
$$R_A' + R_c' - P' - P_1 - P_2 = 0$$

$$R_A' + 150,6025 \text{ kg} - 63,2 \text{ kg} - 103,58 \text{ kg} - 102,64 \text{ kg} = 0$$

$$R_A' = 118,8175 \text{ kg}$$

Se aplica el método de la segunda integral:

Figura 112. Diagrama de la viga cortada para la viga con tres apoyos articulados



Fuente: Autores

Se utiliza la ec. (25):

$$\sum M_b = 0$$

$$-M + R_A \cdot (x - 5\text{cm}) - P_1(x - (128 + 5)\text{cm}) - P_2(x - (323 + 5)\text{cm}) - qx \cdot \frac{x}{2} = 0$$

$$M = 118,8175 \text{ kg}(x - 5\text{cm}) - 103,58 \text{ kg}(x - 133\text{cm}) - 102,64 \text{ kg}(x - 328\text{cm}) - \frac{0,158 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} x^2}{2}$$

$$E I_x y'' = M = 118,8175 (x - 5) - 103,58(x - 133) - 102,64(x - 328) - \frac{0,158}{2} x^2$$

$$E I_x y' = 118,8175 \frac{(x-5)^2}{2} - 103,58 \frac{(x-133)^2}{2} - 102,64 \frac{(x-328)^2}{2} - \frac{0,158}{6} x^3 + C \quad (61)$$

$$E I_x y = 118,8175 \frac{(x-5)^3}{6} - 103,58 \frac{(x-133)^3}{6} - 102,64 \frac{(x-328)^3}{6} - \frac{0,158}{24} x^4 + Cx + D \quad (62)$$

Condiciones de Frontera:

$$\text{Para } x = 5 \rightarrow y = 0$$

Se reemplaza en la ec. (62):

$$E I_x y = 118,8175 \frac{(x-5)^3}{6} - 103,58 \frac{(x-133)^3}{6} - 102,64 \frac{(x-328)^3}{6} - \frac{0,158}{24} x^4 + Cx + D$$

$$E I_x (0) = 118,8175 \frac{(5-5)^3}{6} - 103,58 \frac{(5-133)^3}{6} - 102,64 \frac{(5-328)^3}{6} - \frac{0,158}{24} (5)^4 + C(5) + D$$

$$0 = -4,1145833 + 5C + D$$

$$D + 5C = 4,1145833 \quad (63)$$

$$\text{Para } x = 395 \text{ cm} \rightarrow y = 0$$

Se reemplaza en la ec. (62):

$$E I_x y = 118,8175 \frac{(x-5)^3}{6} - 103,58 \frac{(x-133)^3}{6} - 102,64 \frac{(x-328)^3}{6} - \frac{0,158}{24} x^4 + Cx + D$$

$$EI_x(0) = 118,8175 \frac{(395 - 5)^3}{6} - 103,58 \frac{(395 - 133)^3}{6} - 102,64 \frac{(395 - 328)^3}{6} - \frac{0,158 (395)^4}{24} + C(395) + D$$

$$0 = 1\,174\,689\,594 - 310\,476\,354,4 - 5\,145\,052,387 - 160\,263\,354,1 + 395C + D$$

$$D + 395C = -698\,804\,833,1 \quad (64)$$

Con ec. (63) y ec. (64) se despeja C y D:

$$\therefore C = -1\,791\,807,275 \quad \text{y} \quad D = 8\,959\,040,49$$

En la ecuación (53) se reemplaza los valores de $C = -1\,791\,807,275$, $D = 8\,959\,040,49$ y $x = 200$:

$$EI_{x,y} = 118,8175 \frac{(x - 5)^3}{6} - 103,58 \frac{(x - 133)^3}{6} - 102,64 \frac{(x - 328)^3}{6} - \frac{0,158 x^4}{24} - 1\,791\,807,275 x + 8\,959\,040,49$$

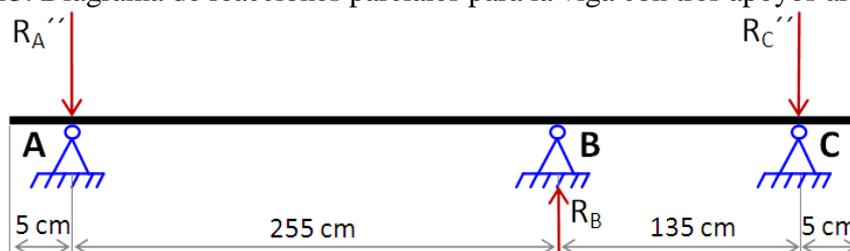
$$EI_{x,y} = 118,8175 \frac{(200 - 5)^3}{6} - 103,58 \frac{(200 - 133)^3}{6} - 102,64 \frac{(200 - 328)^3}{6} - \frac{0,158 (200)^4}{24} - 1\,791\,807,275 (200) + 8\,959\,040,49$$

$$EI_{x,y} = 146\,836\,151,7 - 5\,192\,171,923 - 10\,533\,333,33 - 358\,361\,455 + 8\,959\,040,49$$

$$EI_{x,y} = -218\,291\,768,1 \quad (65)$$

Ahora se realiza los cálculos con R_B presente:

Figura 113. Diagrama de reacciones parciales para la viga con tres apoyos articulados



Fuente: Autores

Se utiliza la ec. (25):

$$\sum M_A = 0$$

$$-255 \times R_B + 390 \times R_C'' = 0$$

$$R_B = \frac{390}{255} R_C''$$

$$R_B = 1,529411765 R_C''$$

$$R_C'' = \frac{R_B}{1,529411765}$$

$$R_C'' = 0,653846153 R_B \quad (66)$$

Se utiliza la ec. (23):

$$\sum F_y = 0$$

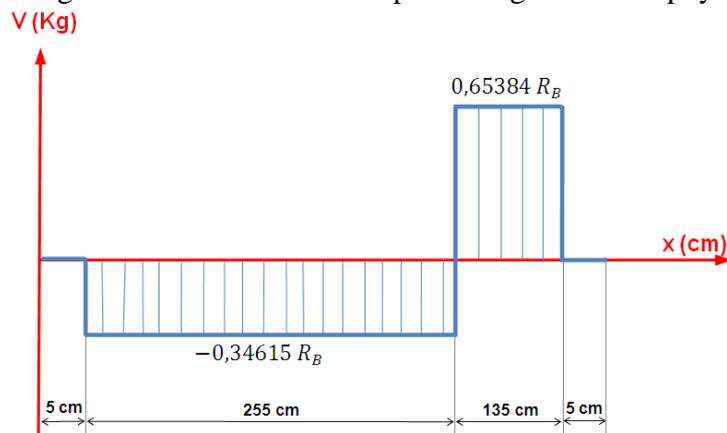
$$-R_A'' - R_C'' + R_B = 0 \quad (67)$$

Se reemplaza la ec. (66) en la ec. (67):

$$-R_A'' - 0,653846153 R_B + R_B = 0$$

$$R_A'' = 0,346153846 R_B$$

Figura 114. Diagrama auxiliar de cortante para la viga con tres apoyos articulados

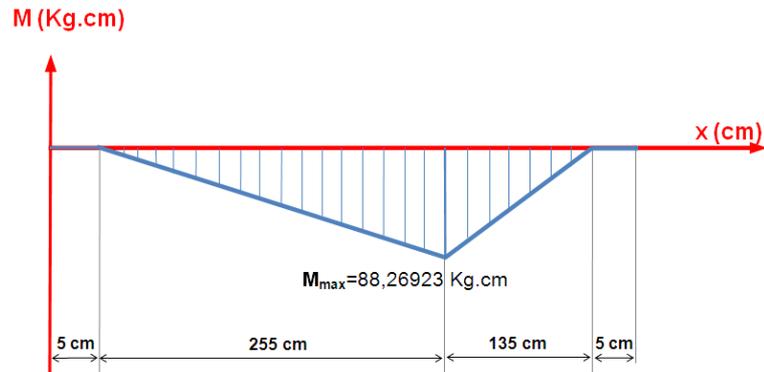


Fuente: Autores

$$M_{m\acute{a}x} = 0,346153846 \times 255 \text{ cm}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 88,26923073 \text{ kg.cm}$$

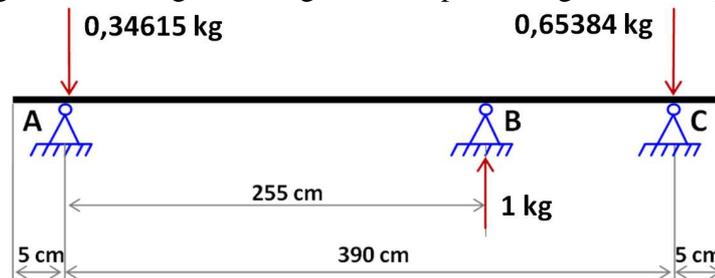
Figura 115. Diagrama auxiliar de momentos para la viga con tres apoyos articulados



Fuente: Autores

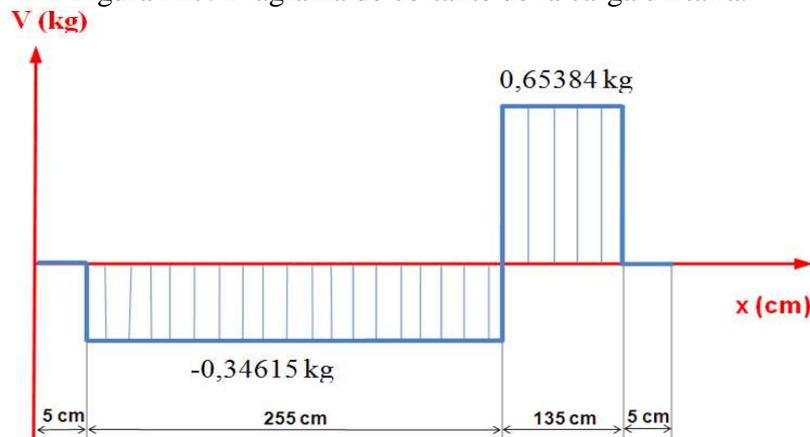
Se aplica la carga unitaria en el apoyo B, y se obtienen los diagramas de fuerza cortante y momento flector:

Figura 116. Diagrama de la viga con carga unitaria para la viga con tres apoyos articulados



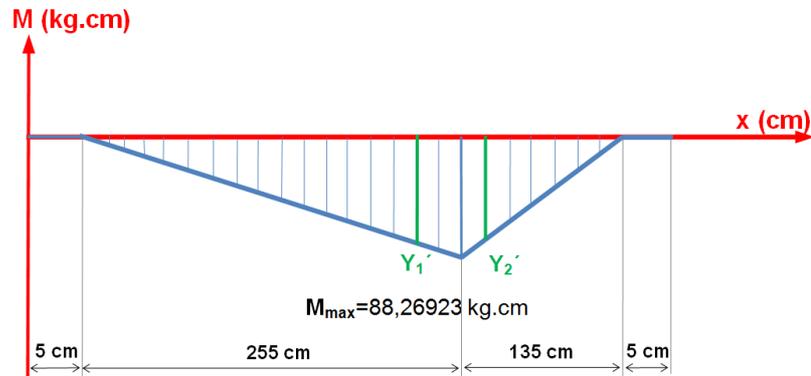
Fuente: Autores

Figura 117. Diagrama de cortante de la carga unitaria.



Fuente: Autores

Figura 118. Diagrama de momento de la carga unitaria para la viga con tres apoyos articulados



Fuente: Autores

Ahora se obtiene una relación de triángulos entre el diagrama de momentos de la Figura 115 y el diagrama de momentos de la Figura 118, obteniendo:

$$\frac{Y_1'}{255 \times \frac{2}{3}} = \frac{88,26923077}{255} \quad (68)$$

$$Y_1' = \frac{176,5384615}{3}$$

$$\frac{Y_2'}{135 \times \frac{2}{3}} = \frac{88,26923077}{135} \quad (69)$$

$$Y_2' = \frac{176,5384615}{3}$$

Se aplica el teorema de **BETTHY**:

$$E I_x y = A_1 \cdot Y_1' + A_2 \cdot Y_2' \quad (70)$$

$$E I_x y = \frac{88,26923077 \times R_B \times 255}{2} \times \frac{176,5384615}{3} + \frac{88,26923077 \times R_B \times 135}{2} \times \frac{176,5384615}{3}$$

$$E I_x y = 662\,273,8534 R_B + 350\,615,5695 R_B$$

$$E I_x y_2 = 1\,012\,889,423 R_B \quad (71)$$

Ahora: ec. (65) = ec. (71)

$$E I_x y_2 = E I_x y_1$$

$$y_2 - y_1 = 0$$

$$1\,012\,889,423 R_B - 218\,291\,768,1 = 0$$

$$R_B = 191,528671 \text{ kg}$$

Una vez encontrada la reacción en el apoyo B, se calcula los valores reales de las reacciones en los apoyos restantes:

Se utiliza la ec. (31):

$$\sum M_A = 0$$

$$P_1 \times 128 \text{ cm} + P_2 \times 328 \text{ cm} + P' \times 195 \text{ cm} - R_B \times 255 \text{ cm} - R_C \times 390 \text{ cm} = 0$$

$$103,58 \text{ kg} \times 128 \text{ cm} + 102,64 \text{ kg} \times 323 \text{ cm} + 63,2 \text{ kg} \times 195 \text{ cm} \\ - 191,528671 \text{ kg} \times 255 \text{ cm} - R_C \times 390 \text{ cm} = 0$$

$$R_C = \frac{10\,408,3489 \text{ kg.cm}}{390 \text{ cm}}$$

$$R_C = 25,372177 \text{ kg}$$

Se utiliza la ec. (25):

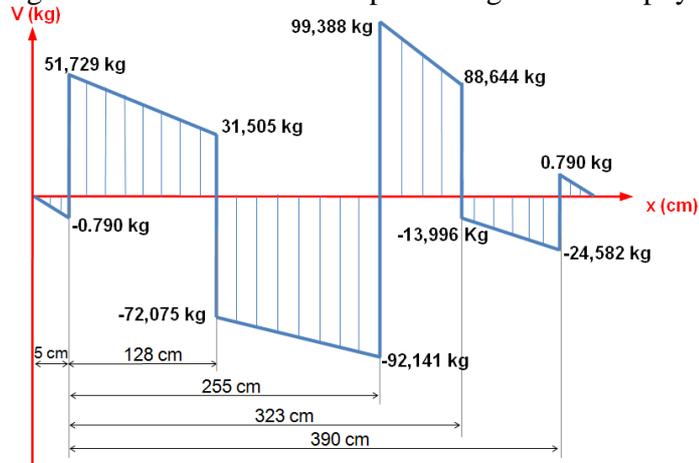
$$\sum F_y = 0$$

$$R_A + R_B + R_C - P_1 - P_2 - P' = 0$$

$$R_A + 191,528671 \text{ kg} + 25,372177 \text{ kg} - 103,58 \text{ kg} - 102,64 \text{ kg} - 63,2 \text{ kg} = 0$$

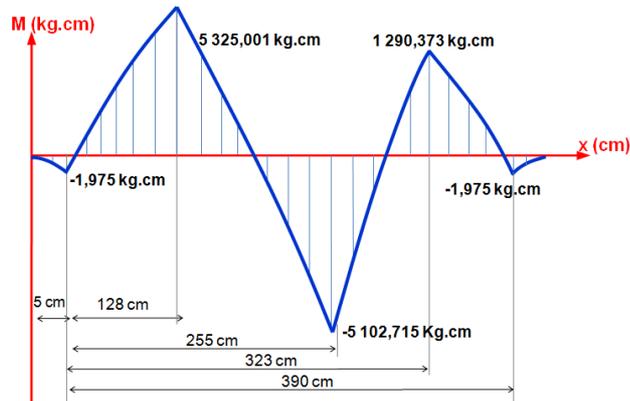
$$R_A = 52,519146 \text{ kg}$$

Figura 119. Diagrama de fuerzas cortantes para la viga con tres apoyos articulados



Fuente: Autores

Figura 120. Diagrama de momentos flectores para la viga con tres apoyos articulados



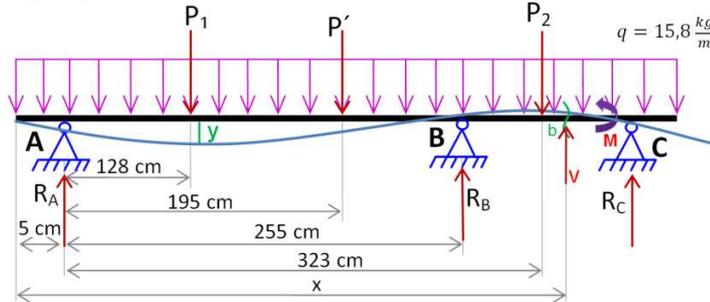
Fuente: Autores

Observando del gráfico el momento flector máximo es:

$$M_{Fm\acute{a}x} = 5\,325,001 \text{ kg.cm}$$

Cálculo de la deformación:

Figura 121. Diagrama de deformación de la viga con tres apoyos articulados



Fuente: Autores

Se utiliza la ec. (25):

$$\sum M_b = 0$$

$$-M + R_A(x-5) - P_1(x-(128+5)) + R_B(x-(255+5)) - P_2(x-(323+5)) - qx \cdot \frac{x}{2} = 0$$

$$-M + R_A(x-5) - P_1(x-133) + R_B(x-260) - P_2(x-328) - qx \cdot \frac{x}{2} = 0$$

$$-M + 52,519146 \text{ kg}(x-5\text{cm}) - 103,58 \text{ kg}(x-133 \text{ cm}) + 191,528671\text{kg}(x-260 \text{ cm}) - 102,64 \text{ kg}(x-328 \text{ cm}) - 0,158 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \cdot \frac{x^2}{2} = 0$$

$$M = 52,519146 \text{ kg}(x-5 \text{ cm}) - 103,58 \text{ kg}(x-133 \text{ cm}) + 191,528671 \text{ kg}(x-260 \text{ cm}) - 102,64 \text{ kg}(x-328 \text{ cm}) - 0,158 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \cdot \frac{x^2}{2} \quad (72)$$

Se aplica el método de la segunda integral:

$$EI_x y'' = M = 52,519146 \text{ kg}(x-5 \text{ cm}) - 103,58 \text{ kg}(x-133 \text{ cm}) + 191,528671 \text{ kg}(x-260 \text{ cm}) - 102,64 \text{ kg}(x-328 \text{ cm}) - 0,158 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \cdot \frac{x^2}{2}$$

$$EI_x y' = \frac{52,519146}{2}(x-5)^2 - \frac{103,58}{2}(x-133)^2 + \frac{191,528671}{2}(x-260)^2 - \frac{102,64}{2}(x-328)^2 - \frac{0,158}{6}x^3 + C \quad (73)$$

$$EI_x y = \frac{52,519146}{6}(x-5)^3 - \frac{103,58}{6}(x-133)^3 + \frac{191,528671}{6}(x-260)^3 - \frac{102,64}{6}(x-328)^3 - \frac{0,158}{24}x^4 + Cx + D \quad (74)$$

Condiciones de Frontera:

$$\text{Para } x = 5 \rightarrow y = 0 \quad ; \text{ se reemplaza en ec. (74)}$$

$$EI_{x,y} = \frac{52,519146}{6}(x-5)^3 - \frac{103,58}{6}(x-133)^3 + \frac{191,528671}{6}(x-260)^3 - \frac{102,64}{6}(x-328)^3 - \frac{0,158}{24}x^4 + Cx + D$$

$$EI_x(0) = \frac{52,519146}{6}(5-5)^3 - \frac{103,58}{6}(5-133)^3 + \frac{191,528671}{6}(5-260)^3 - \frac{102,64}{6}(5-328)^3 - \frac{0,158}{24}(5)^4 + C(5) + D$$

$$D = 0 - 0 + 0 - 0 + 4,114583333 - 5C$$

$$D = 4,114583333 - 5C \quad (75)$$

Para $x = 395 \rightarrow y = 0$; se reemplaza en ec. (74):

$$EI_{x,y} = \frac{52,519146}{6}(x-5)^3 - \frac{103,58}{6}(x-133)^3 + \frac{191,528671}{6}(x-260)^3 - \frac{102,64}{6}(x-328)^3 - \frac{0,158}{24}x^4 + Cx + D$$

$$EI_{x,y} = \frac{52,519146}{6}(395-5)^3 - \frac{103,58}{6}(395-133)^3 + \frac{191,528671}{6}(395-260)^3 - \frac{102,64}{6}(395-328)^3 - \frac{0,158}{24}(395)^4 + C(395) + D$$

$$D = -519\,230\,536,9 + 310\,476\,354,4 - 78\,538\,725,65 + 5\,145\,052,387 + 160\,263\,354,1 - 395C$$

$$D = -121\,884\,501,7 - 395C \quad (76)$$

Con ec. (75) y ec. (76) se despeja C y D:

$$D + 5C = 4,114583333$$

$$D + 395C = -121\,884\,501,7$$

$$\therefore C = -312\,524,3738 \quad \text{y} \quad D = 1\,562\,625,984$$

Ahora las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$EI_{x,y}' = \frac{52,519146}{2}(x-5)^2 - \frac{103,58}{2}(x-133)^2 + \frac{191,528671}{2}(x-260)^2 - \frac{102,64}{2}(x-328)^2 - \frac{0,158}{6}x^3 - 312\,524,3738$$

(77)

$$EI_x y = \frac{52,519146}{6} (x - 5)^3 - \frac{103,58}{6} (x - 133)^3 + \frac{191,528671}{6} (x - 260)^3 - \frac{102,64}{6} (x - 328)^3 - \frac{0,158}{24} x^4 - 312\,524,3738 x + 1\,562\,625,984$$

(78)

Para encontrar la deformación en el punto medio, en el cual $x = 200$, se utiliza la ec. (78):

$$EI_x y = \frac{52,519146}{6} (200 - 5)^3 - \frac{103,58}{6} (200 - 133)^3 + \frac{191,528671}{6} (200 - 260)^3 - \frac{102,64}{6} (200 - 328)^3 - \frac{0,158}{24} (200)^4 - 312\,524,3738(200) + 1\,562\,625,984$$

$$EI_x y = 64\,903\,817,12 - 5\,192\,171,923 - 10\,533\,333,33 - 62\,504\,874,76 + 1\,562\,625,984$$

$$EI_x y = -11\,763\,936,91 \quad (79)$$

Datos:

$$E_{\text{acero}} = 1,972004543 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Valor calculado en el numeral 5.2.2.1})$$

$$I_x = 869 \text{ cm}^4 \quad (\text{Valor tomado del ANEXO A})$$

Estos valores se los reemplaza en la ec. (79) y se obtiene lo siguiente:

$$y = \frac{-11\,763\,936,91 \text{ kg.cm}^3}{1,972004543 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 869 \text{ cm}^4}$$

$$y = -0,0049217808 \text{ cm}$$

$$y = -0,049217808 \text{ mm}$$

Realizando el procedimiento anterior, se determina los valores de las flechas para las siguientes distancias:

Tabla 21. Valores de flecha (mm) para distintos valores de carga y distancias de la viga con tres apoyos articulados

DISTANCIA	CARGA P ₁ -P ₂ (kg)			
	100-100	90-90	80-80	70-70
1998	-0,04921781	-0,04552376	-0,04182971	-0,03713552
1497	-0,09224586	-0,08516284	-0,0767973	-0,0709663
997	-0,09457155	-0,08824262	-0,07891368	-0,072013848
497	-0,05067392	-0,05145329	-0,04723267	-0,0383005

Fuente: Autores

Cálculo del esfuerzo máximo. Se aplica la ec. (10).

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{M_{Fm\acute{a}x} \times c}{I_x}$$

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{5\,325,001 \text{ kg.cm} \times 8 \text{ cm}}{869 \text{ cm}^4}$$

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = 16,261109 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Realizando el procedimiento anterior, se determina los valores de los esfuerzos para las siguientes distancias:

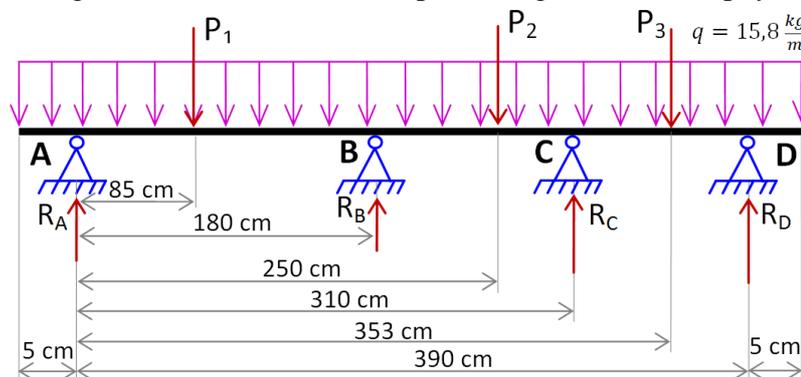
Tabla 22. Valores de esfuerzo (kg/cm²) para distintos valores de carga y distancias de la viga con tres apoyos articulados

DISTANCIA	CARGA P ₁ -P ₂ (kg)			
	100-100	90-90	80-80	70-70
1998	16,261109	14,79392	13,32688	13,85976
1497	32,54899	29,567171	26,585344	23,603507
997	32,501579	29,522615	26,54365	23,564685
497	15,39549	13,984396	12,573312	11,162219

Fuente: Autores

5.2.2.4 Cálculo de reacciones, momentos y deformación en una viga con cuatro apoyos articulados

Figura 122. Diagrama de fuerzas actuantes para la viga con cuatro apoyos articulados



Fuente: Autores

Datos de las cargas actuantes:

$$P_1 = 80 \text{ kg} + 2,64 \text{ kg(Peso portapesas)} = 82,64 \text{ kg}$$

$$P_2 = 80 \text{ kg} + 3,58 \text{ kg(Peso portapesas)} = 83,58 \text{ kg}$$

$$P_3 = 40 \text{ kg} + 2,64 \text{ kg(Peso portapesas)} = 82,64 \text{ kg}$$

$$q = 15,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

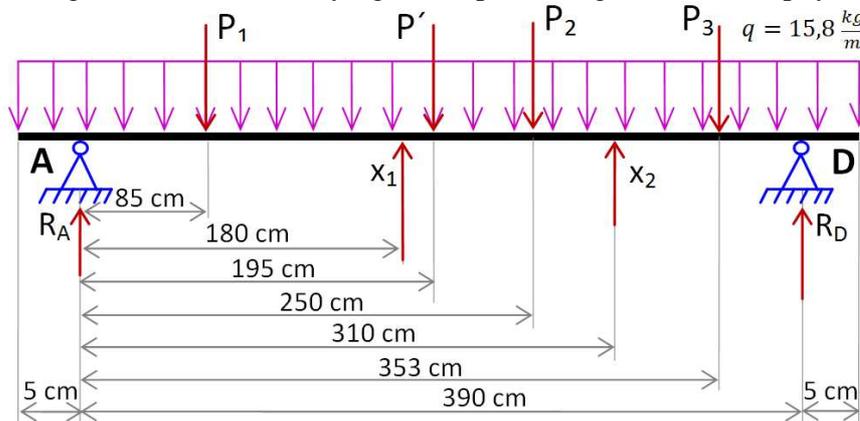
$$P' = \text{Peso del } \frac{\text{perfil}}{\text{metro}} * \text{ longitud total de la viga} \quad (\text{ANEXO A})$$

$$P' = 15,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 4 \text{ m} = 63,2 \text{ kg}$$

Para encontrar el valor de las reacciones en los apoyos, se aplica el método grafo-analítico denominado “Método de multiplicación de los gráficos” o “método Vereshchaguin”.

Para lo cual a las reacciones de B y C se las denomina ligaduras X_1 y X_2 respectivamente.

Figura 123. Diagrama de reacciones y ligaduras para la viga con cuatro apoyos articulados



Fuente: Autores

Se determina el grado de hiperstaticidad, para este caso es de grado dos.

Con esto se establece las ecuaciones canónicas correspondientes:

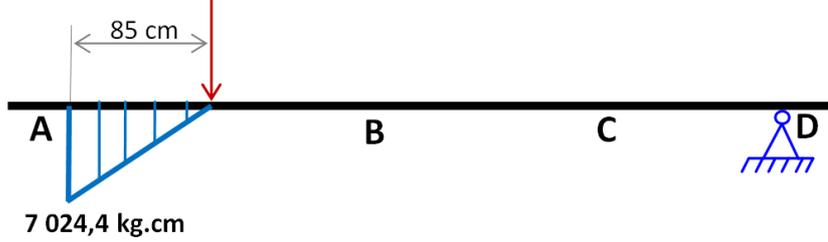
$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1,P1} + \Delta_{1,P2} + \Delta_{1,P3} + \Delta_{1,q} = 0 \quad (80)$$

$$\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2,P1} + \Delta_{2,P2} + \Delta_{2,P3} + \Delta_{2,q} = 0 \quad (81)$$

Se construye los diagramas de momentos para cada una de las cargas:

Figura 124. Diagrama de momentos para la carga puntual P_1

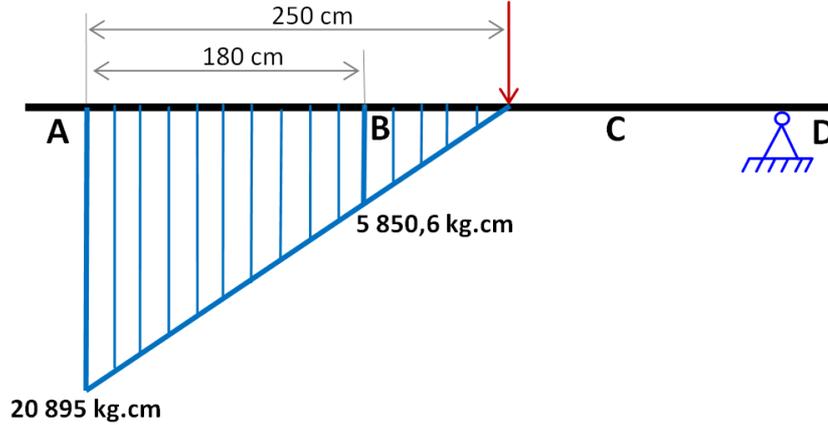
$$P_1 = 82,64 \text{ kg}$$



Fuente: Autores

Figura 125. Diagrama de momentos para la carga puntual P_2

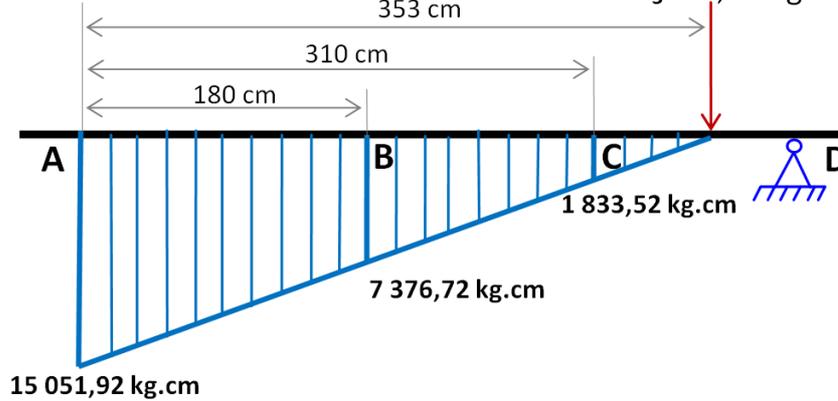
$$P_2 = 83,58 \text{ kg}$$



Fuente: Autores

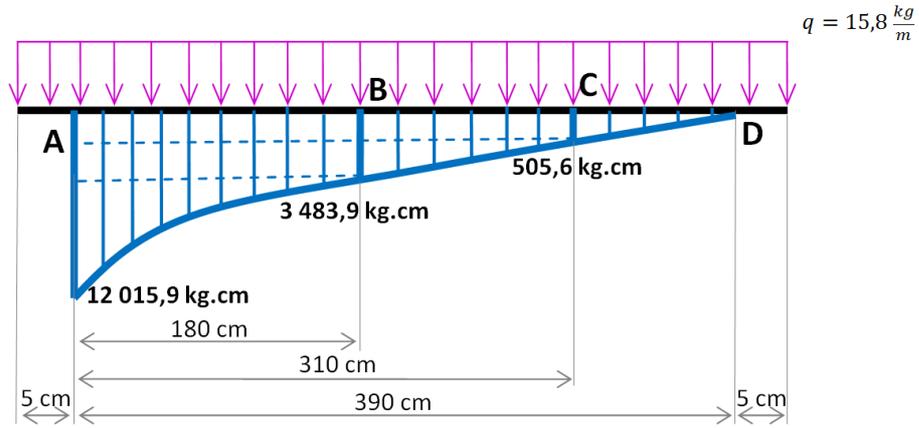
Figura 126. Diagrama de momentos para la carga puntual P_3

$$P_3 = 42,64 \text{ kg}$$



Fuente: Autores

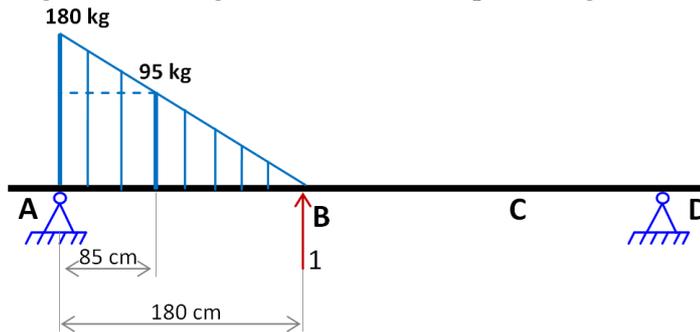
Figura 127. Diagrama de momentos para la carga distribuida q



Fuente: Autores

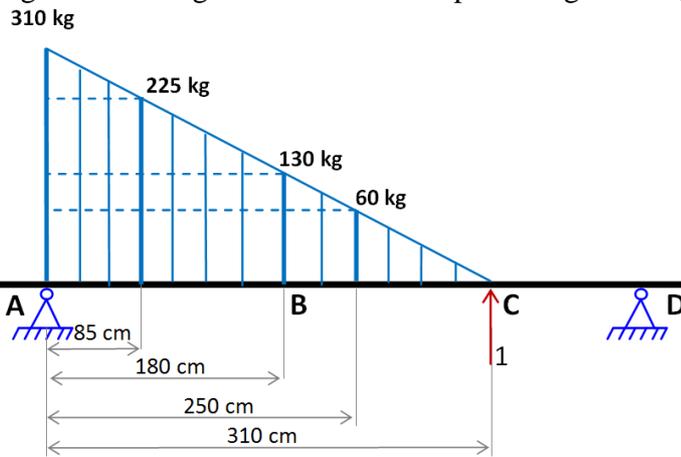
Se construye los diagramas de momentos para cada una de las ligaduras:

Figura 128. Diagrama de momentos para la ligadura X_1



Fuente: Autores

Figura 129. Diagrama de momentos para la ligadura X_2



Fuente: Autores

Con la ayuda de las ecuaciones que se encuentran en el ANEXO M se calcula los valores de $\delta_{11}, \delta_{22}, \delta_{12}, \delta_{21}, \Delta_{1P}, \Delta_{1P2}, \Delta_{1P3}, \Delta_{1Q}, \Delta_{2P}, \Delta_{2P2}, \Delta_{2P3}, \Delta_{2Q}$.

$$\delta_{11} = \frac{180 \times 180 \times 180}{3} = 1\,944\,000 \quad (82)$$

$$\delta_{22} = \frac{310 \times 310 \times 310}{3} = 9\,930\,333,333 \quad (83)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{180 \times 180 \times 180}{3} + \frac{180 \times 130 \times 180}{2} = 4\,050\,000 \quad (84)$$

$$\Delta_{1P1} = -\left(\frac{7\,024,4 \times 85 \times 85}{3} + \frac{95 \times 7\,024,4 \times 85}{2}\right) = -45\,278\,111,67 \quad (85)$$

$$\Delta_{1P2} = -\left(\frac{15\,044,4 \times 180 \times 180}{3} + \frac{5\,850,6 \times 180 \times 180}{2}\right) = -257\,259\,240 \quad (86)$$

$$\Delta_{1P3} = -\left(\frac{7\,675,2 \times 180 \times 180}{3} + \frac{7\,376,72 \times 180 \times 180}{2}\right) = -202\,395\,024 \quad (87)$$

$$\Delta_{1Q} = -\left(\frac{180 \times 8\,532 \times 180}{4} + \frac{3\,483,9 \times 180 \times 180}{2}\right) = -125\,548\,380 \quad (88)$$

$$\Delta_{2P1} = -\left(\frac{85 \times 7\,024,4 \times 85}{3} + \frac{225 \times 7\,024,4 \times 85}{2}\right) = -84\,087\,921,67 \quad (89)$$

$$\Delta_{2P2} = -\left(\frac{250 \times 120\,895 \times 250}{3} + \frac{60 \times 20\,895 \times 250}{2}\right) = -592\,025\,000 \quad (90)$$

$$\Delta_{2P3} = -\left(\frac{310 \times 13\,218,4 \times 310}{3} + \frac{310 \times 310 \times 1\,833,52}{2}\right) = -511\,530\,049,3 \quad (91)$$

$$\Delta_{2Q} = -\left(\frac{11\,510,3 \times 310 \times 310}{4} + \frac{595,6 \times 310 \times 310}{2}\right) = -300\,829\,037,5 \quad (92)$$

Los valores encontrados se reemplazan en las ecuaciones canónicas.

En la ec. (80):

$$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1P1} + \Delta_{1P2} + \Delta_{1P3} + \Delta_{1Q} = 0$$

$$1\,944\,000X_1 + 4\,050\,000X_2 - 45\,278\,111,67 - 257\,259\,240 - 202\,395\,024 - 125\,548\,380 = 0$$

$$1\,944\,000X_1 + 4\,050\,000X_2 = 630\,480\,755,7 \quad (93)$$

En la ec. (72):

$$\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2P1} + \Delta_{2P2} + \Delta_{2P3} + \Delta_{2,q} = 0$$

$$4\,050\,000X_1 + 9\,930\,333,333X_2 - 84\,087\,921,67 - 592\,025\,000 - 511\,530\,049,3 - 300\,829\,037,5 = 0$$

$$4\,050\,000X_1 + 9\,930\,333,333X_2 = 1\,488\,472\,008 \quad (94)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones con la ec. (84) y ec. (85), se obtienen los valores de X_1 y X_2 :

$$X_2 = 79,132919$$

$$X_1 = 131,042633$$

Entonces:

$$R_B = 131,042633 \text{ kg}$$

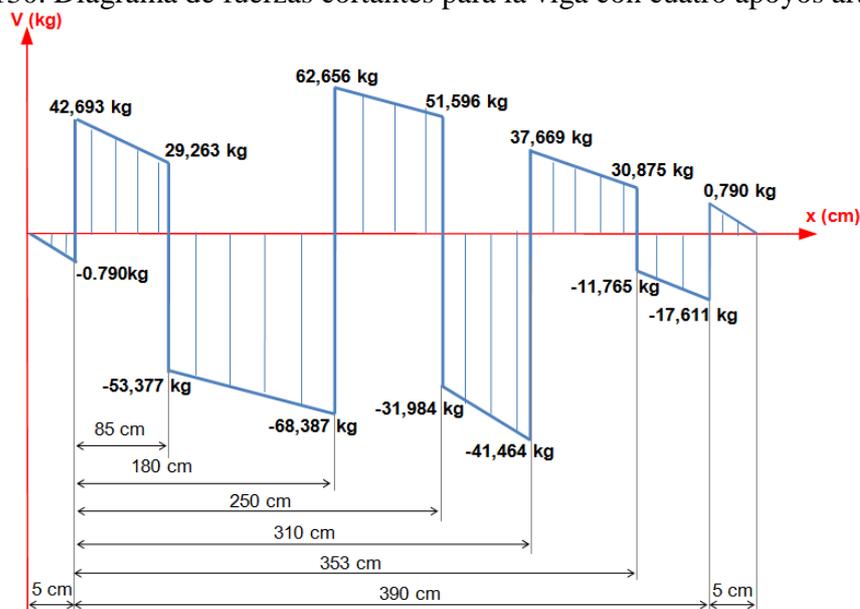
$$R_C = 79,132919 \text{ kg}$$

Aplicando las ecuaciones de la estática se encuentran los valores de R_A y R_D :

$$R_A = 43,483322 \text{ kg}$$

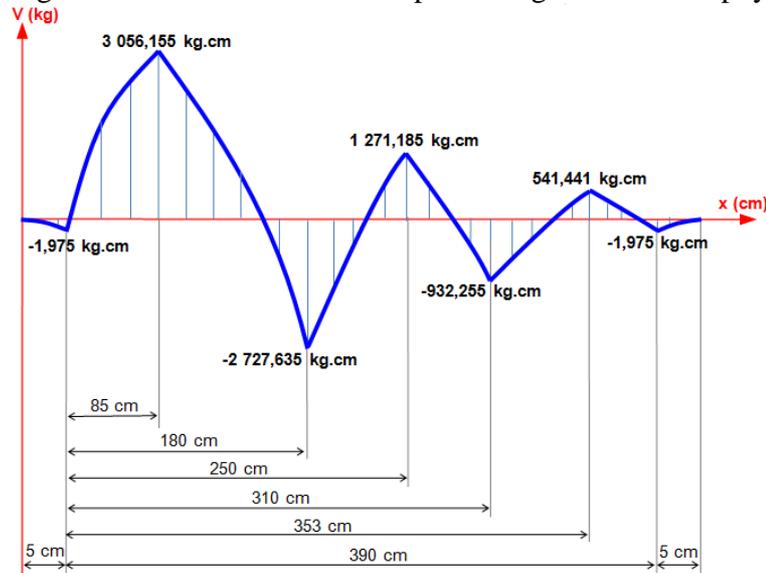
$$R_D = 18,401125 \text{ kg}$$

Figura 130. Diagrama de fuerzas cortantes para la viga con cuatro apoyos articulados



Fuente: Autores

Figura 131. Diagrama de momentos flectores para la viga con cuatro apoyos articulados



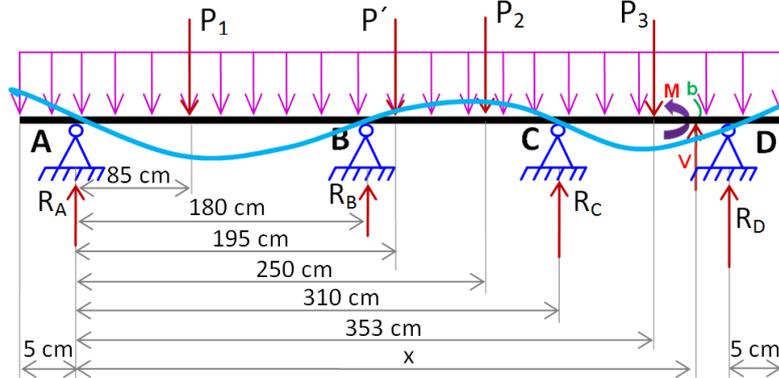
Fuente: Autores

Observando el gráfico el momento flector máximo es:

$$M_{F_{\text{máx}}} = 3\,056,155 \text{ kg.cm}$$

Cálculo de la deformación:

Figura 132. Diagrama de deformación de la viga con cuatro apoyos articulados



Fuente: Autores

Se utiliza la ec. (25):

$$\sum M_b = 0$$

$$- M + R_A(x - 5) - P_1(x - 90) + R_B(x - 185) - P_2(x - 255) + R_C(x - 315) - P_3(x - 358) - qx \cdot \frac{x}{2} = 0$$

$$\begin{aligned}
& - M + 43,483322 (x - 5) - 82,64 (x - 90) + 131,042633 (x - 185) \\
& \quad - 83,58 (x - 255) + 79,132919 (x - 315) - 42,64(x - 358) - 0,158 \frac{x^2}{2} \\
& = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M = & 43,483322 (x - 5) - 82,64 (x - 90) + 131,042633 (x - 185) - 83,58 (x - \\
& 255) + 79,132919 (x - 315) - 42,64(x - 358) - 0,158 \frac{x^2}{2}
\end{aligned} \tag{95}$$

Con la ec. (84) se aplica el método de la segunda integral:

$$\begin{aligned}
EI_x y'' = M = & 43,483322 (x - 5) - 82,64 (x - 90) + 131,042633 (x - 185) \\
& - 83,58 (x - 255) + 79,132919 (x - 315) - 42,64(x - 358) - 0,158 \frac{x^2}{2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
EI_x y' = & \\
& 43,483322 \frac{(x-5)^2}{2} - 82,64 \frac{(x-90)^2}{2} + 131,042633 \frac{(x-185)^2}{2} - 83,58 \frac{(x-255)^2}{2} + \\
& 79,132919 \frac{(x-315)^2}{2} - 42,64 \frac{(x-358)^2}{2} - 0,158 \frac{x^3}{6} + C
\end{aligned} \tag{96}$$

$$\begin{aligned}
EI_x y = & \\
& 43,483322 \frac{(x-5)^3}{6} - 82,64 \frac{(x-90)^3}{6} + 131,042633 \frac{(x-185)^3}{6} - 83,58 \frac{(x-255)^3}{6} + \\
& 79,132919 \frac{(x-315)^3}{6} - 42,64 \frac{(x-358)^3}{6} - 0,158 \frac{x^4}{24} + Cx + D
\end{aligned} \tag{97}$$

Condiciones de Frontera:

Para $x = 5 \rightarrow y = 0$; se reemplaza en la ec. (97):

$$\begin{aligned}
EI_x(0) = & 43,483322 \frac{(5-5)^3}{6} - 82,64 \frac{(5-90)^3}{6} + 131,042633 \frac{(5-185)^3}{6} \\
& - 83,58 \frac{(5-255)^3}{6} + 79,132919 \frac{(5-315)^3}{6} - 42,64 \frac{(5-358)^3}{6} \\
& - 0,158 \frac{(5)^4}{24} + C(5) + D
\end{aligned}$$

$$D = 0 - 0 + 0 - 0 + 0 - 0 + 4,114583333 - 5C$$

$$D = 4,114583333 - 5C \quad (98)$$

Para $x = 395 \rightarrow y = 0$; se reemplaza en la ec. (97):

$$\begin{aligned} EI_x(0) = & 43,483322 \frac{(395-5)^3}{6} - 82,64 \frac{(395-90)^3}{6} \\ & + 131,042633 \frac{(395-185)^3}{6} - 83,58 \frac{(395-255)^3}{6} \\ & + 79,132919 \frac{(395-315)^3}{6} - 42,64 \frac{(395-358)^3}{6} - 0,158 \frac{(395)^4}{24} \\ & + C(395) + D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI_x(0) = & 429\,897\,863 - 390\,785\,621,7 + 202\,264\,304 - 38\,223\,920 \\ & + 6\,752\,675,755 - 359\,973,9867 - 160\,263\,354,1 + 395C + D \end{aligned}$$

$$D = -49\,281\,972,97 - 395C \quad (99)$$

Con ec. (98) y ec. (99) se despeja C y D:

$$D + 5C = 4,114583333$$

$$D + 395C = -49\,281\,972,97$$

$$\therefore C = -126\,364,0438 \text{ y } D = 631\,824,3336$$

Ahora las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} EI_x y' = & 43,483322 \frac{(x-5)^2}{2} - 82,64 \frac{(x-90)^2}{2} + 131,042633 \frac{(x-185)^2}{2} - 83,58 \frac{(x-255)^2}{2} + \\ & 79,132919 \frac{(x-315)^2}{2} - 42,64 \frac{(x-358)^2}{2} - 0,158 \frac{x^3}{6} - 126\,364,0438 \end{aligned} \quad (100)$$

$$\begin{aligned} EI_x y = & 43,483322 \frac{(x-5)^3}{6} - 82,64 \frac{(x-90)^3}{6} + 131,042633 \frac{(x-185)^3}{6} - 83,58 \frac{(x-255)^3}{6} + \\ & 79,132919 \frac{(x-315)^3}{6} - 42,64 \frac{(x-358)^3}{6} - 0,158 \frac{x^4}{24} - 126\,364,0438 x + 631\,824,3336 \end{aligned} \quad (101)$$

Para encontrar la deformación en el punto medio ($x = 200$), se utiliza la ec. (101):

$$EI_x y = 43,483322 \frac{(200-5)^3}{6} - 82,64 \frac{(200-90)^3}{6} + 131,042633 \frac{(200-185)^3}{6} - 83,58 \frac{(200-255)^3}{6} + 79,132919 \frac{(200-315)^3}{6} - 42,64 \frac{(200-358)^3}{6} - 0,158 \frac{(200)^4}{24} - 126\,364,0438 (200) + 631\,824,3336$$

$$EI_x y = 53\,737\,232,87 - 18\,332\,306,67 + 73\,711,48106 - 10\,533\,333,33 - 25\,272\,808,76 + 631\,824,3336$$

$$EI_x y = 304\,319,9247 \text{ kg.cm}^3 \quad (102)$$

Datos:

$$E_{\text{acero}} = 1,972004543 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (\text{Valor calculado en el numeral 5.2.2.1})$$

$$I_x = 869 \text{ cm}^4 \quad (\text{Valor tomado del ANEXO A})$$

Estos valores se reemplazan en la ec. (102), obteniendo lo siguiente:

$$y = \frac{-304\,319,9247 \text{ kg.cm}^3}{1,972004543 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 869 \text{ cm}^4}$$

$$y = 0,0012732046 \text{ cm}$$

$$y = 0,012732046 \text{ mm}$$

Realizando el procedimiento anterior, se determina los valores de las flechas para las siguientes distancias:

Tabla 23. Valores de flecha (cm) para distintos valores de carga y distancias de la viga con cuatro apoyos articulados

DISTANCIA	CARGA P1-P2-P3 (kg)			
	80-80-40	70-70-40	60-60-40	50-50-40
1998	0,012732	0,011863	0,010992	0,010122
1497	-0,106123	-0,096184	-0,086245	-0,083931
997	-0,290400	-0,243941	-0,217482	-0,191022
497	-0,211996	-0,191277	-0,170557	-0,135372

Fuente: Autores

Cálculo del esfuerzo máximo. Se aplica la ec. (10).

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{M_{Fm\acute{a}x} \times c}{I_x}$$

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{3\,056,155 \text{ kg.cm} \times 8 \text{ cm}}{869 \text{ cm}^4}$$

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = 15,634716 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Realizando el procedimiento anterior, determinamos los valores de las flechas para las siguientes distancias:

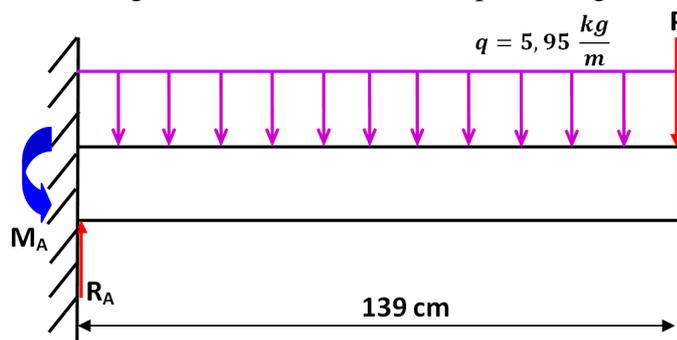
Tabla 24. Valores de esfuerzo (kg/cm²) para distintos valores de carga y distancias de la viga con cuatro apoyos articulados

DISTANCIA	CARGA P1-P2-P3 (kg/cm ²)			
	80-80-40	70-70-40	60-60-40	50-50-40
1998	15,634716	13,94783	12,26098	10,574104
1497	4,410651	3,881098	3,35154	2,82198
997	22,474338	20,122974	17,771627	15,420272
497	14,744819	13,194955	11,645082	10,095208

Fuente: Autores

5.2.2.5 Cálculo de reacciones, momentos y deformación en una viga en voladizo

Figura 133. Diagrama de fuerzas actuantes para la viga en voladizo



Fuente: Autores

Datos de las cargas actuantes:

$$P = 90 \text{ kg} + 2,64 \text{ kg(Peso portapesas)} = 92,64 \text{ kg}$$

$$P' = \text{Peso del } \frac{\text{perfil}}{\text{metro}} * \text{longitud total de la viga} \quad (\text{ANEXO B})$$

$$P' = 5,95 \frac{\text{kg}}{\text{m}} * 1,39\text{m} = 8,2705 \text{ kg}$$

Cálculo del momento M_A y la reacción R_A :

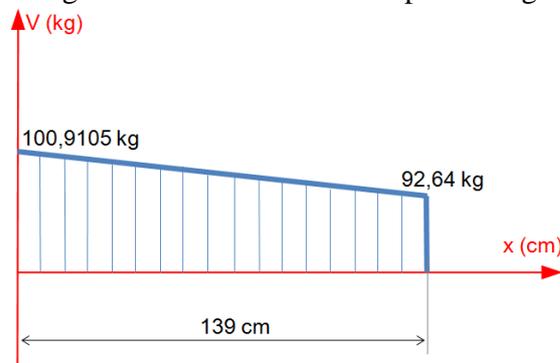
Se utiliza la ec. (25):

$$\begin{aligned} \sum M_A &= 0 \\ M_A - P' \times 69,5 \text{ cm} - P \times 139 \text{ cm} &= 0 \\ M_A - 8,2705 \text{ kg} \times 69,5 \text{ cm} - 92,64 \text{ kg} \times 139 \text{ cm} &= 0 \\ M_A &= 13\,451,7598 \text{ kg.cm} \end{aligned}$$

Se utiliza la ec. (23):

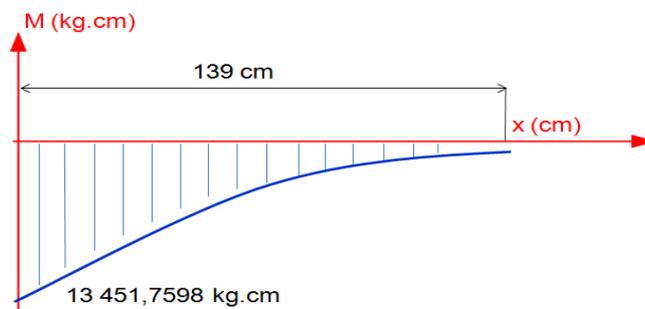
$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \\ R_A - P' - P &= 0 \\ R_A - 8,2705 \text{ kg} - 92,64 \text{ kg} &= 0 \\ R_A &= 100,9105 \text{ kg} \end{aligned}$$

Figura 134. Diagrama de fuerzas cortantes para la viga en voladizo



Fuente: Autores

Figura 135. Diagrama de momentos flectores para la viga en voladizo



Fuente: Autores

Comprobación de la resistencia del perfil IPE 80. Los datos del perfil son tomados del ANEXO B.

Se utiliza la ec. (8):

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{M_{Fm\acute{a}x} \times C}{I_x}$$

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{13\,451,7598 \text{ kg.cm} \times 4 \text{ cm}}{77 \text{ cm}^4}$$

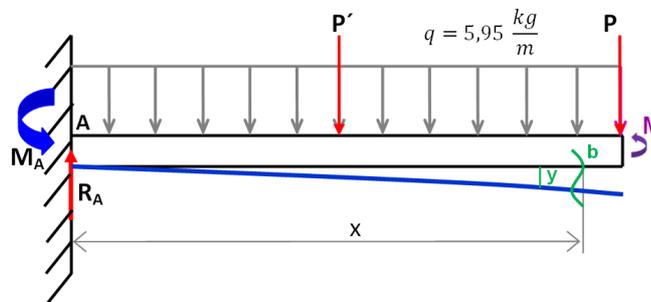
$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = 698,7927 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{adm} > \sigma_{Fm\acute{a}x}$$

$$2400 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} > 698,7927 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad \therefore \text{Es aceptable}$$

Cálculo de la deformación:

Figura 136. Diagrama de deformación de la viga en voladizo



Fuente: Autores

Se utiliza la ec. (25):

$$\sum M_b = 0$$

$$-M - M_A + R_A \cdot x - qx \cdot \frac{x}{2} = 0$$

$$-M - M_A + 100,9105 x - 0,0595 \frac{x^2}{2} = 0$$

$$M = 100,9105 x - M_A - 0,0595 \frac{x^2}{2}$$

$$M = 100,9105 x - 13\,451,7598 - 0,0595 \frac{x^2}{2} \quad (103)$$

Con la ec. (103) se aplica el método de la segunda integral:

$$E I_x y'' = M = 100,9105 x - 13\,451,7598 - 0,0595 \frac{x^2}{2}$$

$$E I_x y' = \frac{100,9105}{2} x^2 - 13\,451,7598 x - \frac{0,0595}{6} x^3 + C \quad (104)$$

$$E I_x y = \frac{100,9105}{6} x^3 - \frac{13\,451,7598}{2} x^2 - \frac{0,0595}{24} x^4 + Cx + D \quad (105)$$

Condiciones de Frontera:

$$\text{Para } x = 0 \rightarrow y = 0 \quad ; \quad \theta = 0$$

Reemplazando en ec. (104): C=0

Reemplazando en ec. (105): D=0

Los valores encontrados se los reemplaza en las ecuaciones: ec. (104) y ec. (105)

$$E I_x y' = \frac{100,9105}{2} x^2 - 13\,451,7598 x - \frac{0,0595}{6} x^3 \quad (106)$$

$$E I_x y = \frac{100,9105}{6} x^3 - \frac{13\,451,7598}{2} x^2 - \frac{0,0595}{24} x^4 \quad (107)$$

Para saber la deformación en el punto medio se reemplaza el valor de $x=70$ cm en la ec. (107):

$$E I_x y = \frac{100,9105}{6} (70)^3 - \frac{13\,451,7598}{2} (70)^2 - \frac{0,0595}{24} (70)^4$$

$$E I_x y = 5\,768\,716,917 - 32\,956\,811,51 - 59\,524,792$$

$$E I_x y = -27\,247\,619,39 \text{ kg.cm}^3 \quad (108)$$

Datos:

$$E_{\text{acero}} = 2,1 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (\text{ANEXO D})$$

$$I_x = 77 \text{ cm}^4 \quad (\text{ANEXO B})$$

Estos valores se reemplazan en la ec. (108), obteniendo lo siguiente:

$$y = \frac{-27\,247\,619,39 \text{ kg.cm}^3}{2,1 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 77 \text{ cm}^4}$$

$$y = -0,2480898 \text{ cm} = -2,480898 \text{ mm}$$

Tabla 25. Valores de flecha (cm) para distintos valores de carga y distancias de la viga en voladizo

DISTANCIA (mm)	CARGA P (kg)			
	90	80	70	60
950	-2,480898	-2,205243	-1,929587	-1,653932
700	-1,45303	-1,291582	-1,130135	-0,968687
150	-0,077435	-0,068831	-0,060227	-0,051623

Fuente: Autores

Cálculo del esfuerzo. Se aplica la ec. (10).

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{M_{Fm\acute{a}x} \times c}{I_x}$$

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \frac{13\,451,7598 \text{ kg.cm} \times 4 \text{ cm}}{77 \text{ cm}^4}$$

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = 198,701299 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Realizando el procedimiento anterior, determinamos los valores de los esfuerzos para las siguientes distancias:

Tabla 26. Valores de esfuerzo (kg/cm²) para distintos valores de carga y distancias de la viga en voladizo

DISTANCIA	CARGA P (kg)			
	90	80	70	60
950	198,701299	177,623377	154,545455	132,467533
700	322,597403	280,519481	245,454546	210,389610
150	647,532468	509,090909	445,454546	381,818181

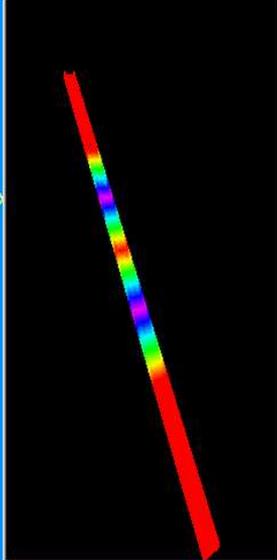
Fuente: Autores

5.2.3 *Datos obtenidos con software LabView.* Ensamblado al banco de pruebas, se procede a analizar los cuatro casos de flexión, obteniendo los datos que luego serán comparados con otros softwares.

5.2.3.1 Viga con dos apoyos

Figura 137. Resultados obtenidos para el caso de medición en los cuatro puntos

5.- VISUALIZAR EL MODELO EN 3D



1.- INGRESAR LOS DATOS DE LA VIGA

$I_x(\text{cm}^4) = 869$ Módulo Elástico(kg/cm^2) = 1,972000
 Radio de giro (cm) = 8

2.- SELECCIONAR EL CASO A ENSAYAR
 3 Y 4 APOYOS

3.- RESETEAR LOS VALORES INICIALES DE STRAIN
 STRAIN 1: 0,0004682 STRAIN 2: -0,0006782 STRAIN 3: 0,00043661 STRAIN 4: 0,0000321

4.- VISUALIZAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS

DISTANCIAS AL PUNTO DE MEDICION DESDE EL APOYO IZQUIERDO	DEFORMACION UNITARIA(strain)	ESFUERZO (kg/cm^2)	MOMENTO FLECTOR ($\text{kg}\cdot\text{cm}$)	RADIO DE CURVATURA (cm)	FLECHA (mm)
Punto 1 = 194,8cm	0,0004682	923,29	100292,42	1,709E+4	
Punto 2 = 144,7cm	-0,0006782	-1337,4	-145276,21	-1,180E+4	
Punto 3 = 94,7cm	0,00043661	860,99	93525,573	1,832E+4	
Punto 4 = 44,7cm	0,0000321	63,301	6876,093	2,492E+5	

6.- OBTENER TABLA DE RESULTADOS Y GENERAR REPORTE

Tabla de registro

ESFUERZO (G)	DEF. UNITARIA (strain)

7.- DETENER O REGRESAR
 STOP REGRESAR AL MENU PRINCIPAL

GUARDAR DATOS REPORTE Y GRÁFICA LIMPIAR TABLA

Fuente: Autores

Tabla 27. Valores de esfuerzo (kg/cm^2) para diferentes cargas en el caso de la viga con dos apoyos articulados obtenido del software LabView

	VALORES DE ESFUERZO (kg/cm^2) CASO DE DOS APOYOS				
	DISTANCIA (mm)	CARGA P (kg)			
		200	190	180	170
PRIMERA MEDICIÓN	1998	183,610	174,530	165,340	156,230
	1497	114,950	109,210	103,400	97,780
	998	78,535	74,656	70,750	66,830
	497	36,669	34,705	33,020	31,100
SEGUNDA MEDICIÓN	1998	183,620	174,520	165,350	156,240
	1497	114,960	109,215	103,410	97,770
	998	78,546	74,657	70,760	66,820
	497	36,660	34,706	33,030	31,090
TERCERA MEDICIÓN	1998	183,615	174,531	165,350	156,220
	1497	114,951	109,212	103,410	97,794
	998	78,536	74,655	70,740	66,820
	497	36,667	34,705	33,030	31,110
CUARTA MEDICIÓN	1998	183,610	174,534	165,350	156,240
	1497	114,950	109,212	103,420	97,794
	998	78,528	74,656	70,730	66,840
	497	36,674	34,705	33,032	31,110
QUINTA MEDICIÓN	1998	183,609	174,534	165,330	156,240
	1497	114,951	109,212	103,369	97,797
	998	78,530	74,656	70,750	66,838
	497	36,674	34,705	33,010	31,100
MEDICIÓN PROMEDIO	1998	183,613	174,530	165,344	156,234
	1497	114,952	109,212	103,402	97,787
	998	78,535	74,656	70,746	66,830
	497	36,669	34,705	33,024	31,102

Fuente: Autores

5.2.3.2 Viga con tres apoyos

Tabla 28. Valores de esfuerzo (kg/cm^2) para diferentes cargas en el caso de la viga con tres apoyos articulados obtenido del software LabView

		VALORES DE ESFUERZO (kg/cm^2) CASO DE TRES APOYOS				
		DISTANCIA (mm)	CARGA P (kg)			
			100/100	90/90	80/80	70/70
PRIMERA MEDICIÓN	1998	17,114	15,379	13,828	12,236	
	1497	39,466	35,556	31,654	27,866	
	998	33,556	30,151	26,835	23,512	
	497	15,681	14,043	12,455	10,942	
SEGUNDA MEDICIÓN	1998	17,113	15,369	13,837	12,236	
	1497	39,464	35,546	31,654	27,856	
	998	33,554	30,161	26,843	23,562	
	497	15,679	14,053	12,435	10,932	
TERCERA MEDICIÓN	1998	17,105	15,349	13,817	12,246	
	1497	39,457	35,566	31,634	27,840	
	998	33,566	30,151	26,823	23,502	
	497	15,693	14,043	12,425	10,912	
CUARTA MEDICIÓN	1998	17,118	15,388	13,824	12,206	
	1497	39,468	35,556	31,638	27,838	
	998	33,544	30,141	26,833	23,502	
	497	15,670	14,033	12,455	10,902	
QUINTA MEDICIÓN	1998	17,118	15,395	13,829	12,206	
	1497	39,475	35,556	31,640	27,836	
	998	33,558	30,150	26,832	23,501	
	497	15,681	14,042	12,454	10,922	
MEDICIÓN PROMEDIO	1998	17,114	15,376	13,827	12,226	
	1497	39,466	35,556	31,644	27,847	
	998	33,556	30,151	26,833	23,516	
	497	15,681	14,043	12,445	10,922	

Fuente: Autores

5.2.3.3 Viga con cuatro apoyos

Tabla 29. Valores de esfuerzo (kg/cm^2) para diferentes cargas en el caso de la viga con cuatro apoyos articulados obtenido del software LabView

VALORES DE ESFUERZOS (kg/cm^2) CASO DE CUATRO APOYOS					
	DISTANCIA (mm)	CARGA P (kg)			
		80/80/40	70/70/40	60/60/40	50/50/40
PRIMERA MEDICIÓN	1998	5,708	5,134	4,620	4,301
	1497	6,660	4,162	3,876	2,670
	997	26,590	23,264	19,980	16,950
	497	16,630	14,631	12,752	10,923
SEGUNDA MEDICIÓN	1998	5,735	5,106	4,613	4,299
	1497	6,650	4,181	3,912	2,676
	997	26,100	23,291	19,982	16,923
	497	16,750	14,589	12,730	10,910
TERCERA MEDICIÓN	1998	5,721	5,123	4,611	4,301
	1497	6,430	4,181	3,873	2,672
	997	26,540	23,280	19,990	16,994
	497	16,800	14,675	12,850	10,960
CUARTA MEDICIÓN	1998	5,720	5,130	4,619	4,296
	1497	6,520	4,149	3,889	2,763
	997	26,650	23,220	19,988	16,982
	497	16,400	14,720	12,716	10,850
QUINTA MEDICIÓN	1998	5,728	5,090	4,630	4,294
	1497	6,800	4,158	3,820	2,590
	997	26,670	23,240	19,976	16,900
	497	16,600	14,682	12,761	10,934
MEDICIÓN PROMEDIO	1998	5,722	5,117	4,619	4,298
	1497	6,612	4,166	3,874	2,674
	997	26,510	23,259	19,983	16,950
	497	16,636	14,659	12,762	10,915

Fuente: Autores

5.2.3.4 Medición puntual

Tabla 30. Valores de deformación unitaria para diferentes cargas en el caso de la viga con dos apoyos articulados obtenidos del software LabView

MEDICIÓN	CARGA P (kg)			
	200	190	180	170
PRIMERA	-0,0000756	-0,0000723	-0,0000682	-0,0000647
SEGUNDA	-0,0000763	-0,0000726	-0,0000679	-0,0000644
TERCERA	-0,0000761	-0,0000728	-0,0000683	-0,0000638
CUARTA	-0,0000757	-0,0000725	-0,0000683	-0,0000641
QUINTA	-0,0000759	-0,0000724	-0,0000683	-0,0000642
SEXTA	-0,0000778	-0,0000737	-0,0000712	-0,0000645
SÉPTIMA	-0,0000779	-0,0000727	-0,000071	-0,0000641
OCTAVA	-0,0000768	-0,0000734	-0,0000709	-0,0000687
NOVENA	-0,0000769	-0,0000721	-0,0000691	-0,0000691
DÉCIMA	-0,0000764	-0,0000722	-0,0000687	-0,0000691
	-0,000076540	-0,000072670	-0,000069190	-0,000065670

Fuente: Autores

5.2.3.5 Viga en voladizo

Figura 138. Resultados para el caso de viga en voladizo obtenidos en el software LabView

1.- INGRESAR LOS DATOS DE LA VIGA

lx(cm4)=77
77

Módulo Elástico(kg/cm2)=2,25E+6
2,25E+6

Radio de giro (cm)=4
4

Distancia aplicacion de carga P(kg)
137,5

2.- RESETEAR LOS VALORES INICIALES DE STRAIN

STRAIN 1: 0,00005689
STRAIN 2: -0,0002378
STRAIN 3: 0,0097655

3.- VISUALIZAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS

DISTANCIAS AL PUNTO DE MEDICION DESDE EL EMPOTRAMIENTO	DEFORMACION UNITARIA(strain)	ESFUERZO (kg/cm)	MOMENTO FLECTOR (kg,cm)	RADIO DE CURVATURA (cm)	FLECHA TEÓRICA (mm)	FLECHA CORREGIDA (mm)
Distancia al punto 1 195	Deformación Unitaria 1 0,0000001	G 1 0,12	Mf1 0,23	d1 1E+0	Y1 0,000	Yc 1 0
Distancia al punto 2 145	Deformación Unitaria 2 0,0000001	G 2 0,13	Mf 2 0,24	d2 1E+0	Y2 0,000	Yc 2 0
Distancia al punto 3 95	Deformación Unitaria 3 -0,0000002	G 3 -0,26	Mf 3 -0,48	d3 2E+0	Y3 0,000	Yc 3 0

$Y_{correctada} = Y_{teorica} + 0,0005894 * P(Kg) * d(cm)$

4.- VISUALIZAR EL MODELO EN 3D

5.- OBTENER TABLA DE RESULTADOS Y GENERAR REPORTE

Tabla de registro

ESFUERZO (G)	DEF. UNITARIA (strain)

6.- DETENER O REGRESAR

STOP | REGRESAR AL MENU PRINCIPAL

Fuente: Autores

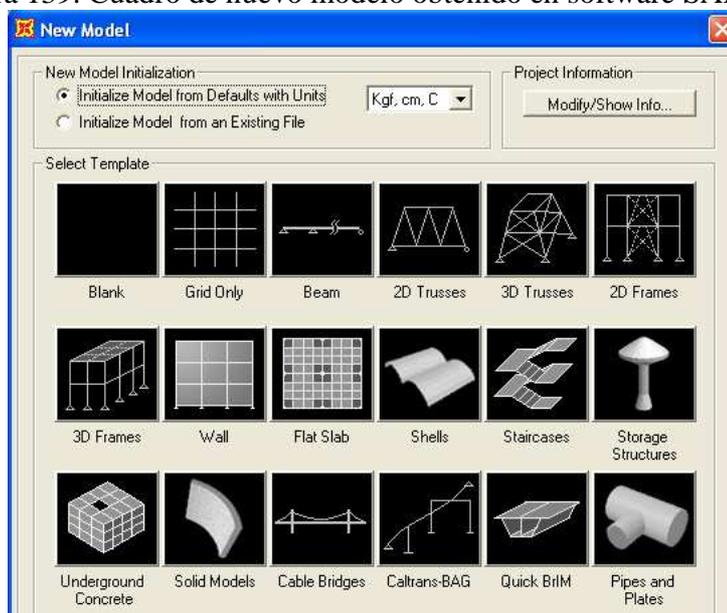
5.2.4 Comprobación de datos con software de aplicación SAP 2000. Para comparar los datos se utiliza el software SAP 2000 que es utilizado para realizar cálculos estructurales y también permite hacer cálculos de deformaciones en vigas.

Se analiza los cuatro casos de flexión para comparar los resultados de deformación.

5.2.4.1 Viga con 2 apoyos. Para simular la viga con dos apoyos se debe seguir los siguientes pasos:

1. Crear un nuevo modelo, elegir las unidades y la plantilla de trabajo, en este caso las unidades son Kg, cm, C y la plantilla es Beam (Viga).

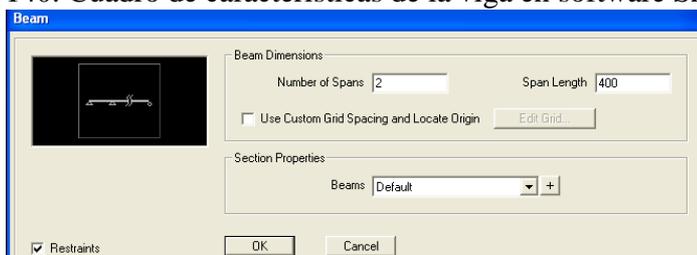
Figura 139. Cuadro de nuevo modelo obtenido en software SAP 2000



Fuente: Autores

2. En el cuadro de Beam (Viga), seleccionar el número de apoyos y la longitud de la viga.

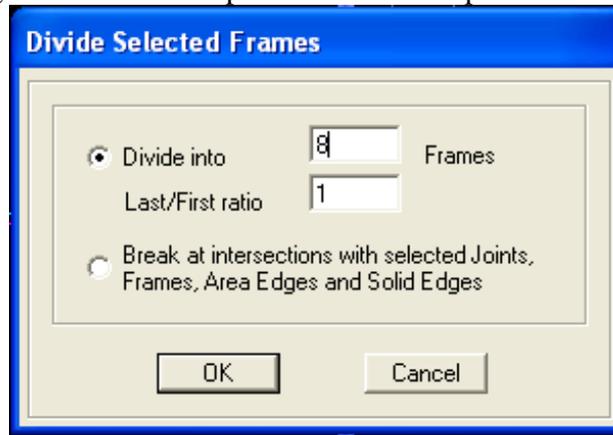
Figura 140. Cuadro de características de la viga en software SAP 2000



Fuente: Autores

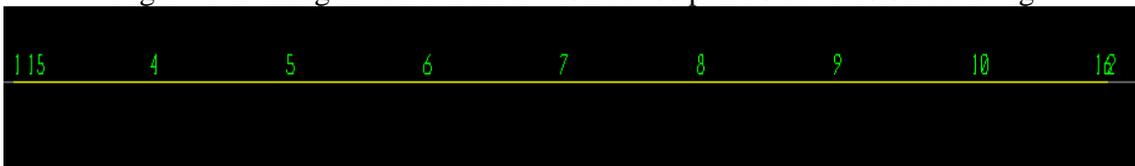
3. Dividir la viga en 8 partes para obtener los valores de deformación en los puntos de división.

Figura 141. Ventana para la división en partes de la viga



Fuente: Autores

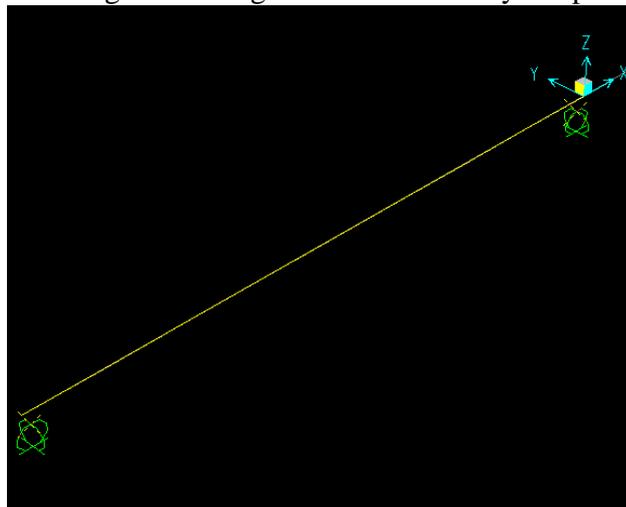
Figura 142. Imagen con la numeración de los puntos de división de la viga



Fuente: Autores

4. Definir las distancias de los apoyos y el tipo de restricción.

Figura 143. Imagen de la viga con la ubicación y el tipo de apoyos



Fuente: Autores

- Definir las propiedades del material, tales como: peso por unidad de volumen, límite de fluencia, módulo de elasticidad, etc.

Figura 144. Cuadro de propiedades del material en software SAP 2000

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: ASTM A36

Material Type: Steel

Material Notes: Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 8,861E-04

Mass per Unit Volume: 9,036E-07

Units: Kgf. cm. C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 2100000

Poisson's Ratio, U: 0,3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G: 1057886,5

Other Properties for Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 2530

Minimum Tensile Stress, Fu: 4080

Effective Yield Stress, Fye: 3025,55

Effective Tensile Stress, Fue: 4485,5842

Fuente: Autores

Figura 145. Croquis de propiedades de la sección del elemento en software SAP 2000

Property Data

Section Name: IPN160

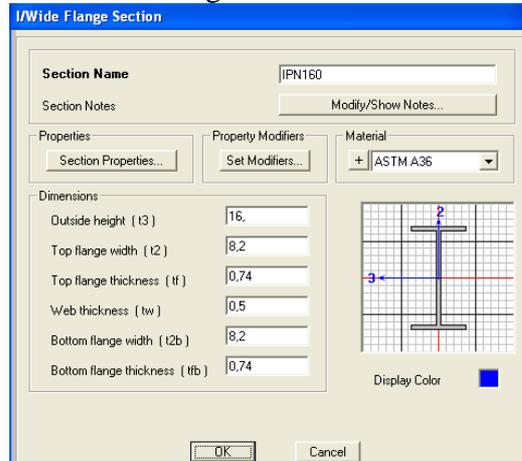
Properties			
Cross-section (axial) area	19,396	Section modulus about 3 axis	104,3283
Torsional constant	2,6812	Section modulus about 2 axis	16,6228
Moment of Inertia about 3 axis	834,6265	Plastic modulus about 3 axis	118,9515
Moment of Inertia about 2 axis	68,1533	Plastic modulus about 2 axis	25,7863
Shear area in 2 direction	8,	Radius of Gyration about 3 axis	6,5598
Shear area in 3 direction	10,1133	Radius of Gyration about 2 axis	1,8745

OK

Fuente: Autores

- Definir las propiedades de sección del perfil con sus dimensiones correspondientes.

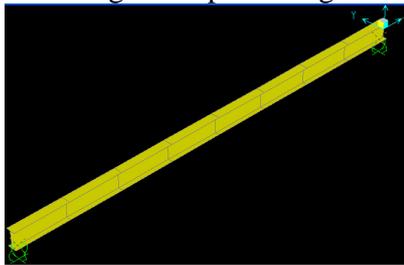
Figura 146. Cuadro de dimensiones generales de la sección en software SAP 2000



Fuente: Autores

7. Asignar el perfil de la viga en este caso el perfil IPE 160.

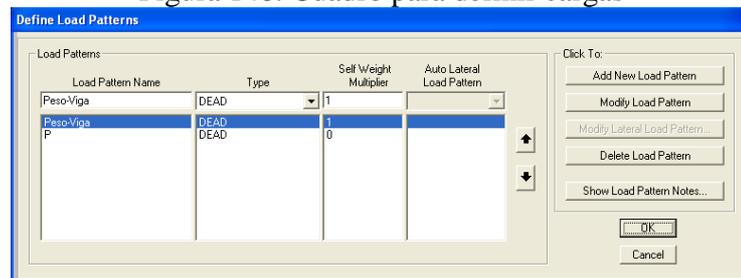
Figura 147. Imagen del perfil asignado a la viga



Fuente: Autores

8. Definimos las cargas de la viga y su ubicación.

Figura 148. Cuadro para definir cargas



Fuente: Autores

Figura 149. Modelo de la viga con 2 apoyos



Fuente: Autores

Figura 150. Viga con la carga P de 203,58 kg



Fuente: Autores

- Definir la combinación de las cargas.

Figura 151. Ventana para crear la combinación de cargas

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated): COMB1

Notes: Modify/Show Notes...

Load Combination Type: Linear Add

Options: Convert to User Load Combo, Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
P	Linear Static	1,
P	Linear Static	1,
Peso-Viga	Linear Static	1,

Add, Modify, Delete, OK, Cancel

Fuente: Autores

- Seleccionar los casos de carga para el análisis.

Figura 152. Cuadro de selección de cargas a analizar

Set Load Cases to Run

Case Name	Type	Status	Action
MODAL	Modal	Not Run	Do not Run
Peso-Viga	Linear Static	Not Run	Run
P	Linear Static	Not Run	Run

Click to: Run/Do Not Run Case, Show Case..., Delete Results for Case, Run/Do Not Run All, Delete All Results, Show Load Case Tree...

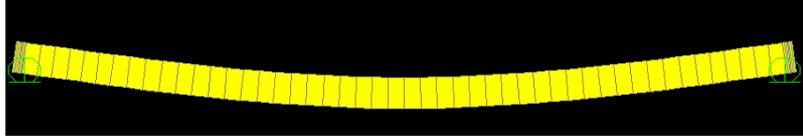
Analysis Monitor Options: Always Show, Never Show, Show After 4 seconds

Model-Alive, Run Now, OK, Cancel

Fuente: Autores

- Ejecutar el análisis y obtener un registro de las deformaciones.

Figura 153. Imagen de la viga con 2 apoyos deformada



Fuente: Autores

Figura 154. Valores de desplazamiento para la viga con 2 apoyos y peso de 200 kg obtenido en software SAP 2000

Joint Text	OutputCase Text	Case Type Text	U1 cm	U2 cm	U3 cm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	COB1	Combination	0	0	0,061902	0	0,01238	0
2	COB1	Combination	0	0	0,061902	0	-0,01238	0
4	COB1	Combination	0	0	-0,546999	0	0,011679	0
5	COB1	Combination	0	0	-1,079068	0	0,009316	0
6	COB1	Combination	0	0	-1,453393	0	0,005388	0
7	COB1	Combination	0	0	-1,594353	0	-2,03E-17	0
8	COB1	Combination	0	0	-1,453393	0	-0,005388	0
9	COB1	Combination	0	0	-1,079068	0	-0,009316	0
10	COB1	Combination	0	0	-0,546999	0	-0,011679	0
11	COB1	Combination	0	0	0	0	0	0
12	COB1	Combination	0	0	0	0	0	0
13	COB1	Combination	0	0	0	0	0	0
14	COB1	Combination	0	0	0	0	0	0
15	COB1	Combination	0	0	0	0	0,01238	0
16	COB1	Combination	0	0	0	0	-0,01238	0

Fuente: Autores

De esta manera se obtiene los valores de desplazamiento para diferentes valores de carga y a diferentes distancias como se indica a continuación.

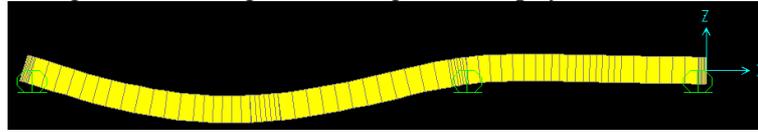
Tabla 31. Valores de flechas (mm) con diferentes cargas para el caso de dos apoyos articulados obtenidos del software SAP 2000

DISTANCIA (mm)	CARGA P (kg)			
	200	190	180	170
1998	-1,397400	-1,324400	-1,25630248	-1,18820418
1497	-1,267910	-1,204775	-1,14283132	-1,06088814
997	-0,936800	-0,891135	-0,84532226	-0,79951042
497	-0,473200	-0,450265	-0,42712002	-0,4039744

Fuente: Autores

5.2.4.2 *Viga con tres apoyos.* Siguiendo el procedimiento anterior se simula el caso de la viga con tres apoyos.

Figura 155. Imagen de la viga con 3 apoyos deformada



Fuente: Autores

Figura 156. Valores de desplazamiento para la viga con 3 apoyos obtenido en software SAP 2000

Joint Text	Output Case Text	Case Type Text	U1 cm	U2 cm	U3 cm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	COMB1	Combination	0	0	0,000703	0	0,000141	0
2	COMB1	Combination	0	0	0,000068	0	-0,000014	0
3	COMB1	Combination	0	0	0	0	-0,000044	0
4	COMB1	Combination	0	0	-0,006254	0	0,000119	0
5	COMB1	Combination	0	0	-0,01085	0	0,000048	0
6	COMB1	Combination	0	0	-0,010643	0	-0,000057	0
7	COMB1	Combination	0	0	-0,005779	0	-0,000105	0
8	COMB1	Combination	0	0	-0,000652	0	-0,000064	0
9	COMB1	Combination	0	0	0,000032	0	0,000003021	0
10	COMB1	Combination	0	0	-0,000571	0	-0,000003429	0
15	COMB1	Combination	0	0	0	0	0,000141	0
16	COMB1	Combination	0	0	0	0	-0,000014	0
17	COMB1	Combination	0	0	-0,011467	0	-0,000021	0
18	COMB1	Combination	0	0	-0,000573	0	0,000007808	0

Fuente: Autores

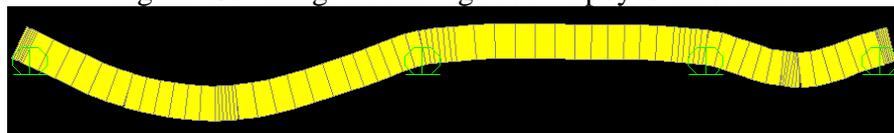
Tabla 32. Valores de flechas (mm) con diferentes cargas para el caso de tres apoyos articulados obtenidos del software SAP 2000

DISTANCIA (mm)	CARGA P1/P2 (kg)			
	100/100	90/90	80/80	70/70
1998	-0,04868	-0,04395	-0,03992	-0,03448
1497	-0,08550	-0,07717	-0,06988	-0,06351
997	-0,08409	-0,07589	-0,06769	-0,06150
497	-0,04467	-0,04033	-0,03599	-0,03160

Fuente: Autores

5.2.4.3 Viga con cuatro apoyos

Figura 157. Imagen de la viga con 4 apoyos deformada



Fuente: Autores

Figura 158. Valores de desplazamiento para la viga con 4 apoyos obtenidos del software SAP 2000

Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	U1 cm	U2 cm	U3 cm	R1 Radians	R2 Radians	R3 Radians
1	COMB1	Combination	0	0	0,00029	0	0,000058	0
2	COMB1	Combination	0	0	0,000019	0	-0,00000389	0
4	COMB1	Combination	0	0	-0,00255	0	0,00004	0
5	COMB1	Combination	0	0	-0,00337	0	-0,000015	0
6	COMB1	Combination	0	0	-0,001379	0	-0,00004	0
7	COMB1	Combination	0	0	0,000043	0	-0,000003334	0
8	COMB1	Combination	0	0	0	0	-0,000005854	0
9	COMB1	Combination	0	0	-0,000128	0	-0,000007453	0
10	COMB1	Combination	0	0	-0,000114	0	0,0000008228	0
11	COMB1	Combination	0	0	0	0	0	0
12	COMB1	Combination	0	0	0	0	0	0
13	COMB1	Combination	0	0	0	0	0	0
14	COMB1	Combination	0	0	0	0	0	0
15	COMB1	Combination	0	0	0	0	0,000058	0
16	COMB1	Combination	0	0	0	0	-0,000003892	0
17	COMB1	Combination	0	0	0	0	-0,000018	0
18	COMB1	Combination	0	0	-0,003526	0	-0,000002872	0
19	COMB1	Combination	0	0	-0,000147	0	-0,0000002075	0
20	COMB1	Combination	0	0	-0,000585	0	0,000001375	0

Fuente: Autores

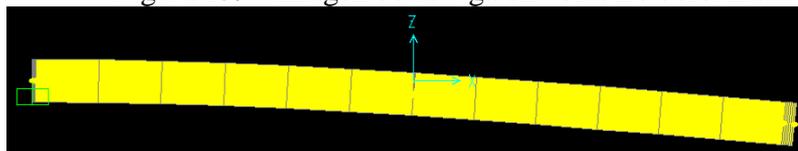
Tabla 33. Valores de flechas (mm) con diferentes cargas para el caso de cuatro apoyos articulados obtenidos del software SAP 2000

DISTANCIA(mm)	CARGA (kg) P1/P2/P3			
	80/80/40	70/70/40	60/60/40	50/50/40
1998	0,00295	0,0029	0,00290	0,002790
1497	-0,10993	-0,0969	-0,09690	-0,078085
997	-0,27598	-0,2427	-0,24271	-0,17617
497	-0,20692	-0,18194	-0,18194	-0,13198

Fuente: Autores

5.2.4.4 Viga en voladizo

Figura 159. Imagen de la viga en voladizo deformada



Fuente: Autores

Tabla 34. Valores de flechas (mm) con diferentes cargas para el caso de viga en voladizo obtenidos del software SAP 2000

DISTANCIA(mm)	CARGA P (kg)			
	90	80	70	60
950	-2,465	-2,191	-1,917	-1,643
700	-1,448	-1,287	-1,126	-0,9659
150	-0,0809	-0,0719	-0,0629	-0,0539

Fuente: Autores

5.2.5 Comprobación de datos con software CAE. Para comparar los datos se utiliza el software CAE que es utilizado para realizar diseño de elementos mecánicos y también permite hacer cálculos de deformaciones en vigas.

5.2.5.1 Viga con dos apoyos. Los pasos a seguir para realizar la simulación son los siguientes:

1. Dibujar un croquis en la viga que indique los puntos o áreas en las que se ubicarán los apoyos (sujeciones) y cargas respectivamente.

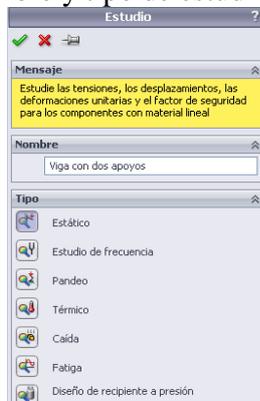
Figura 160. Croquis para ubicar las cargas y sujeciones en el software CAE



Fuente: Autores

2. Seleccionar Simulación, y en el cuadro Estudio se escribe el nombre del estudio a simular, se escoge el tipo de estudio a realizar, en este caso Estático.

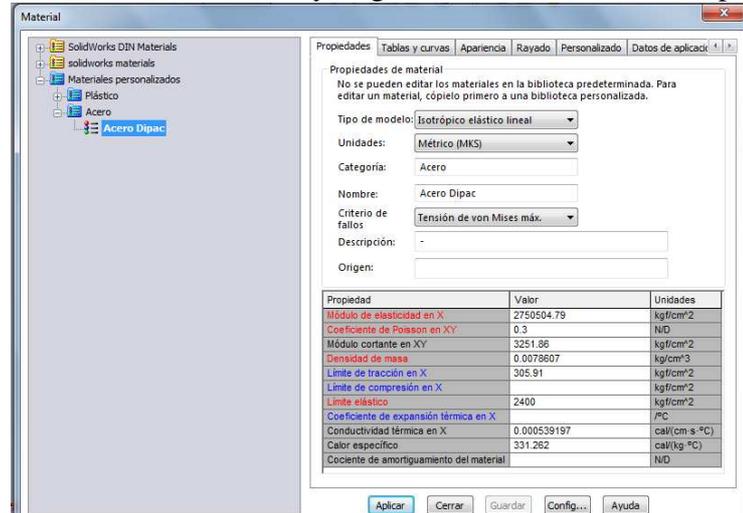
Figura 161. Cuadro del nombre y tipo de estudio a realizar en software CAE



Fuente: Autores

3. Seleccionar el material del elemento que se va a analizar, en este caso se agrega un material nuevo con el nombre de Acero Dipac, en el cual se ingresa los valores reales del módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, densidad de masa y límite elástico.

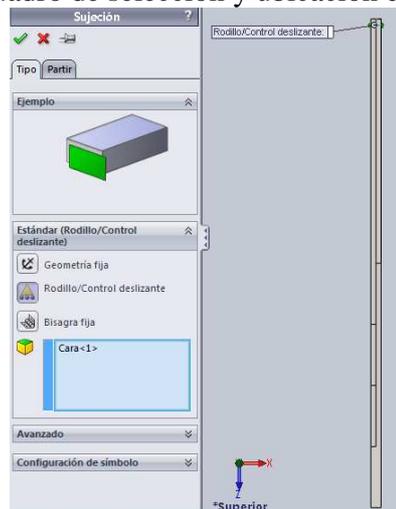
Figura 162. Cuadro de selección y asignación del nuevo material para la viga



Fuente: Autores

4. Seleccionar el tipo de sujeción a aplicar, en este caso rodillo/control deslizante, que representa a los apoyos ubicados en la viga.

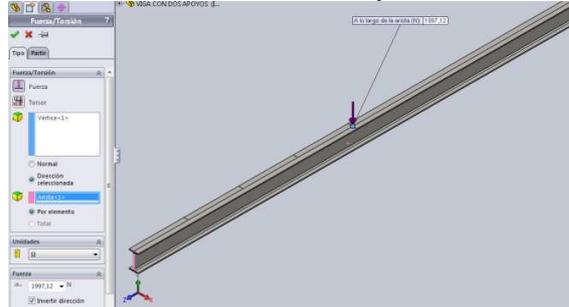
Figura 163. Cuadro de selección y ubicación de las sujeciones



Fuente: Autores

5. Seleccionar la fuerza (carga puntual) o torsión a aplicar, así como su valor y su ubicación en la viga.

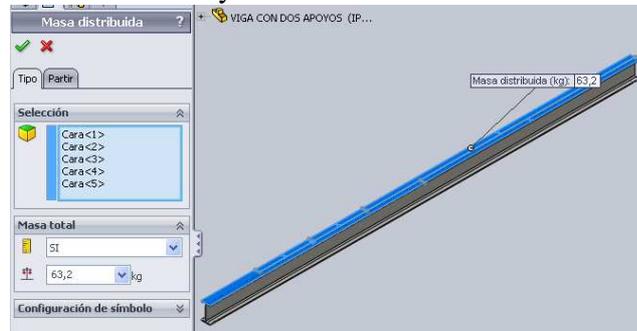
Figura 164. Cuadro de selección y ubicación de la fuerza



Fuente: Autores

6. Seleccionar la masa distribuida, ingresar el valor del peso de la viga.

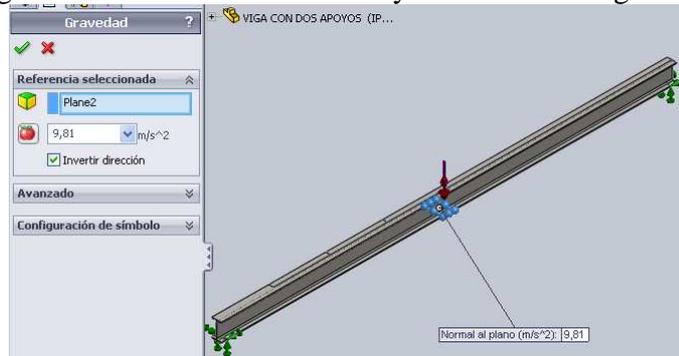
Figura 165. Cuadro de selección y ubicación de la masa distribuida (peso de la viga)



Fuente: Autores

7. Seleccionar la gravedad, ingresar su valor.

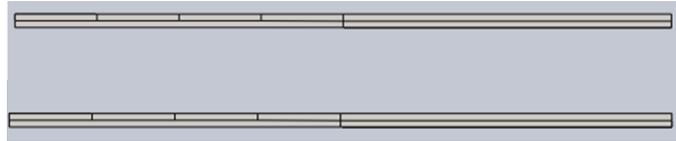
Figura 166. Cuadro de selección y ubicación de la gravedad



Fuente: Autores

8. Realizar un croquis indicando los puntos en los que se desea obtener los resultados. En nuestro caso los puntos se encuentran separados a una distancia de 50 cm.

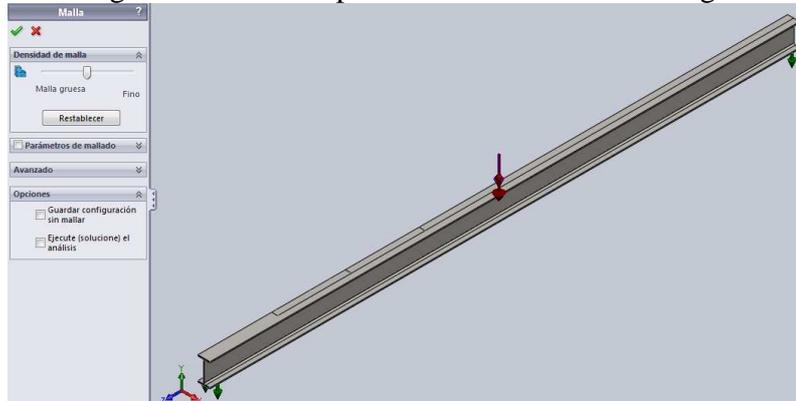
Figura 167. Croquis para la ubicación de los cuatro puntos donde se encuentran los sensores



Fuente: Autores

9. Crear la malla para realizar la simulación en la viga.

Figura 168. Cuadro para realizar la malla en la viga



Fuente: Autores

10. Identificar los puntos (nodos) sobre la viga, en los cuales se obtienen los resultados (con ayuda del croquis realizado en el paso 8).

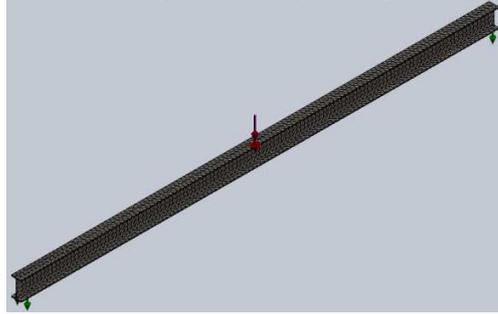
Figura 169. Identificación de nodos sobre la viga con dos apoyos



Fuente: Autores

11. Seleccionar el icono Ejecutar para que el programa realice la simulación.

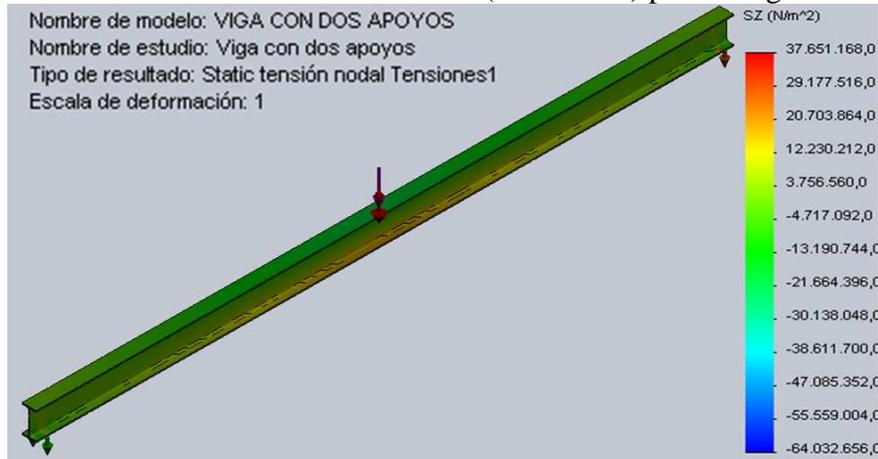
Figura 170. Cuadro con la viga mallada y lista para ejecutar la simulación



Fuente: Autores

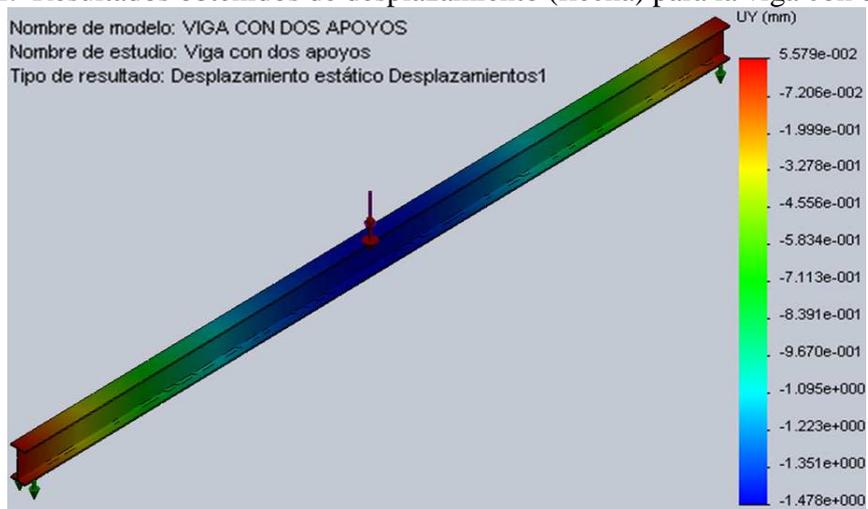
12. Visualizar los resultados obtenidos.

Figura 171. Resultados obtenidos de esfuerzo (Von Mises) para la viga con dos apoyos



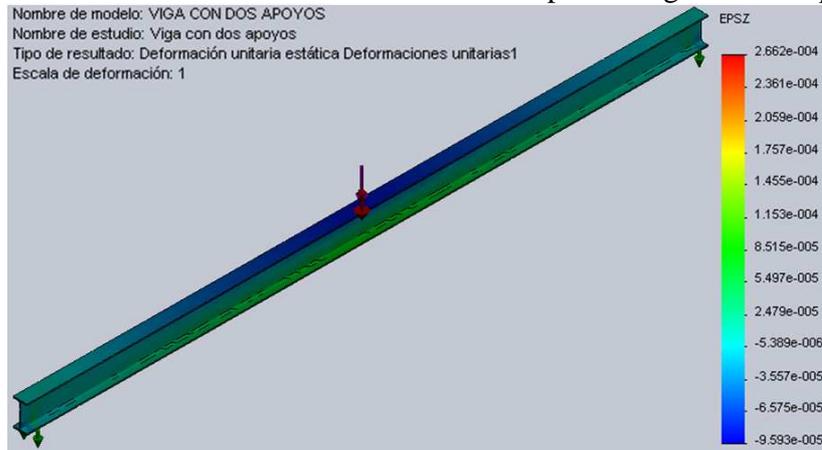
Fuente: Autores

Figura 172. Resultados obtenidos de desplazamiento (flecha) para la viga con dos apoyos



Fuente: Autores

Figura 173. Resultados de deformación unitaria para la viga con dos apoyos



Fuente: Autores

- Visualizar los resultados en tablas, en cada punto seleccionado.

Tabla 35. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con dos apoyos y $P=200$ kg

VIGA CON DOS APOYOS (P=200 kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
1998	154	222,931	-1,4418800	-0,000101849
1497	52	132,225	-1,2608500	-0,0000696378
997	19	80,5695	-0,8890820	-0,0000451220
497	3	35,2162	-0,4227690	-0,0000177128

Fuente: Autores

Para visualizar los resultados con diferentes valores de peso, se cambia únicamente el valor de la fuerza y se ejecuta el programa.

Valores obtenidos para un peso $P=190$ kg

Tabla 36. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con dos apoyos y $P=190$ kg

VIGA CON DOS APOYOS (P=190 kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
1998	154	212,456	-1,3809200	-0,0000978609
1497	52	126,712	-1,2090260	-0,0000671567
997	19	77,3285	-0,8519630	-0,0000436173
497	3	34,2799	-0,3939110	-0,0000171774

Fuente: Autores

Valores obtenidos para un peso P=180 kg:

Tabla 37. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con dos apoyos y P=180 kg

VIGA CON DOS APOYOS (P=180 kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm ²)	UY(mm)	EPZN
1998	154	201,981	-1,3199700	-0,0000938723
1497	52	121,165	-1,1506800	-0,0000646757
997	19	74,103	-0,8148490	-0,0000421127
497	3	33,3552	-0,3750580	-0,0000166419

Fuente: Autores

Valores obtenidos para un peso P=170 kg:

Tabla 38. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con dos apoyos y P=170 kg

VIGA CON DOS APOYOS (P=170 kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm ²)	UY(mm)	EPZN
1998	154	191,493	-1,2590100	-0,0000898837
1497	52	115,599	-1,1001000	-0,0000621946
997	19	70,8669	-0,7777370	-0,0000406081
497	3	32,4195	-0,3562060	-0,0000161065

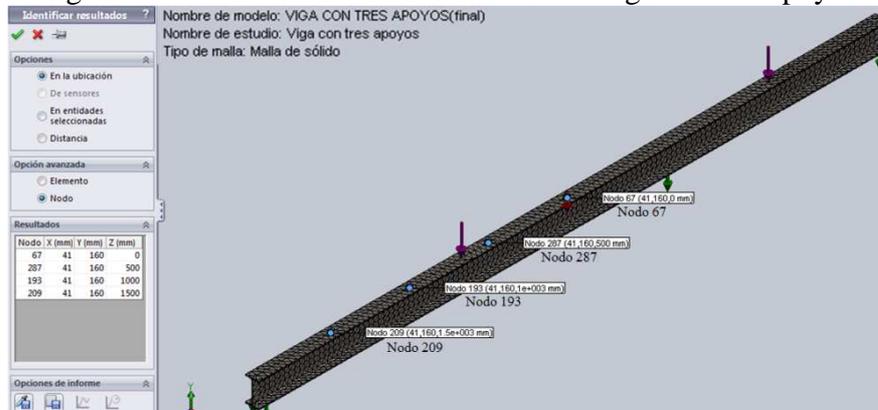
Fuente: Autores

En todos los casos de flexión se sigue el mismo procedimiento, lo que cambia son las fuerzas y los apoyos (sujeciones).

5.2.5.2 Viga con tres apoyos

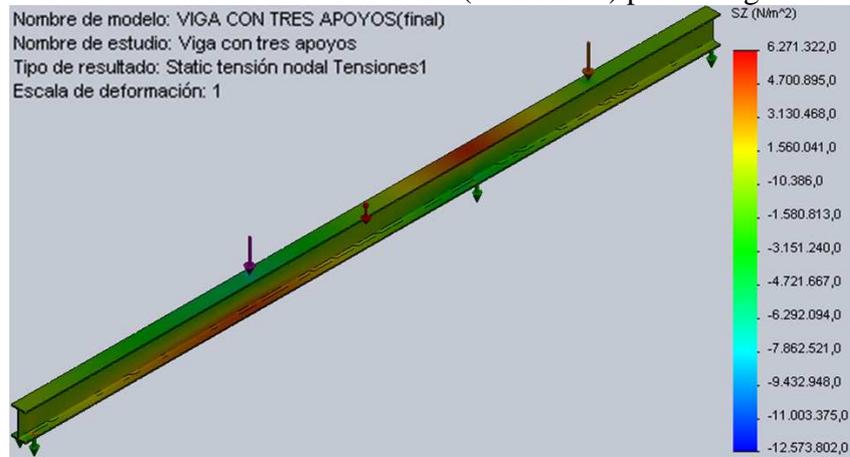
Realizado todo el procedimiento se visualiza los resultados para P₁=100 kg y P₂=100 kg:

Figura 174. Identificación de nodos sobre la viga con tres apoyos



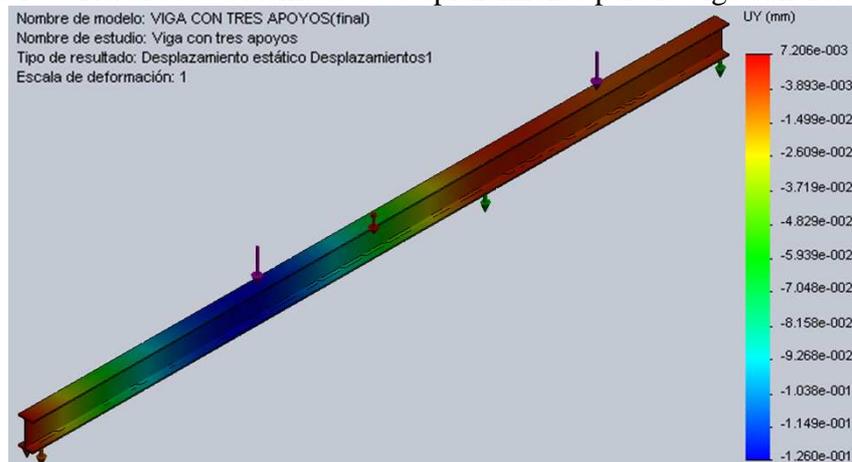
Fuente: Autores

Figura 175. Resultados obtenidos de esfuerzo (Von Mises) para la viga con tres apoyos



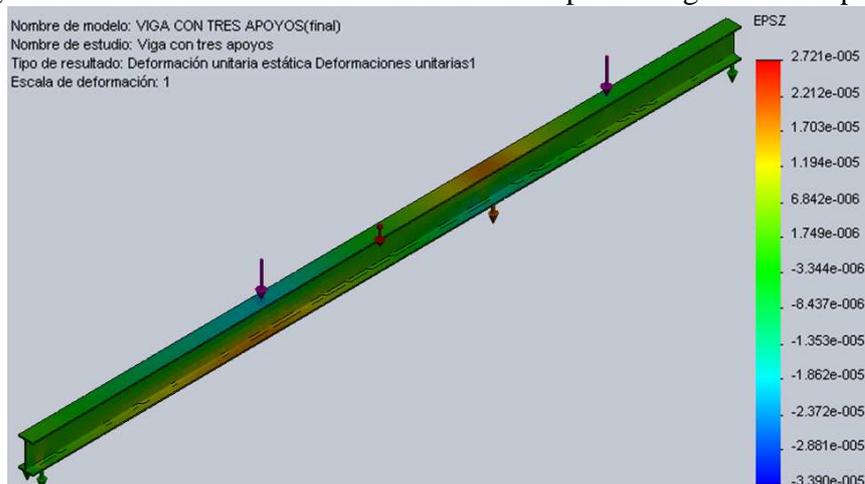
Fuente: Autores

Figura 176. Resultados obtenidos de desplazamiento para la viga con tres apoyos



Fuente: Autores

Figura 177. Resultados de deformación unitaria para la viga con tres apoyos



Fuente: Autores

Tabla 39. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con tres apoyos y $P_1=100$ kg, $P_2=100$ kg

VIGA CON TRES APOYOS ($P_1=100$ kg, $P_2=100$ kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
1998	67	16,1258	-0,0542491	-0,0000374284
1497	287	40,3908	-0,103335	-0,0000171880
997	193	38,4799	-0,102673	-0,0000167168
497	209	16,6604	-0,0503716	-0,00000768689

Fuente: Autores

Valores obtenidos para el caso de tres apoyos y un peso $P_1=90$ kg y $P_2=90$ kg:

Tabla 40. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con tres apoyos y $P_1=90$ kg, $P_2=90$ kg

VIGA CON TRES APOYOS ($P_1=90$ kg, $P_2=90$ kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
1998	67	14,09671	-0,0463882	-0,00000357763
1497	287	37,1633	-0,0869157	-0,0000160203
997	193	35,5002	-0,0868849	-0,0000156355
497	209	15,4982	-0,0471816	-0,00000726294

Fuente: Autores

Valores obtenidos para el caso de tres apoyos y un peso $P_1=80$ kg y $P_2=80$ kg:

Tabla 41. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con tres apoyos y $P_1=80$ kg, $P_2=80$ kg

VIGA CON TRES APOYOS ($P_1=80$ kg, $P_2=80$ kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
1998	67	12,8926	-0,0402581	-0,00000341242
1497	287	33,9526	-0,07270128	-0,0000148527
997	193	32,523	-0,07272909	-0,0000145543
497	209	13,3196	-0,04099253	-0,00000683898

Fuente: Autores

Valores obtenidos para el caso de tres apoyos y un peso $P_1=70$ kg y $P_2=70$ kg:

Tabla 42. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con tres apoyos y $P_1=70$ kg, $P_2=70$ kg

VIGA CON TRES APOYOS ($P_1=70$ kg, $P_2=70$ kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
1998	67	11,76522	-0,03610314	-0,00000324696
1497	287	29,2526	-0,0671787	-0,0000136863
997	193	28,546	-0,06726168	-0,0000134680
497	209	11,2296	-0,03672207	-0,00000641538

Fuente: Autores

5.2.5.3 Viga con cuatro apoyos

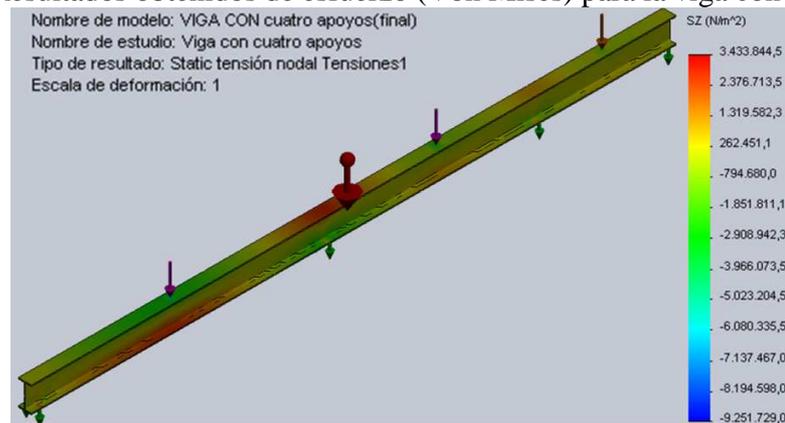
Realizado todo el procedimiento se visualiza los resultados en tablas para $P_1=60$ kg, $P_2=60$ kg y $P_3=60$ kg:

Figura 178. Identificación de nodos sobre la viga con cuatro apoyos



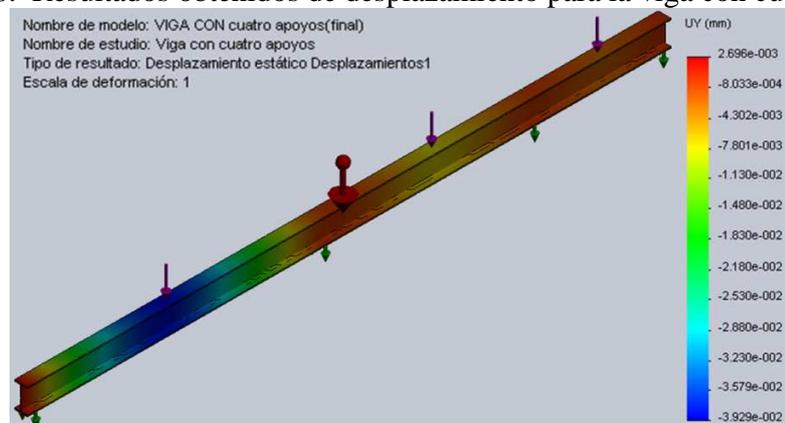
Fuente: Autores

Figura 179. Resultados obtenidos de esfuerzo (Von Mises) para la viga con cuatro apoyos



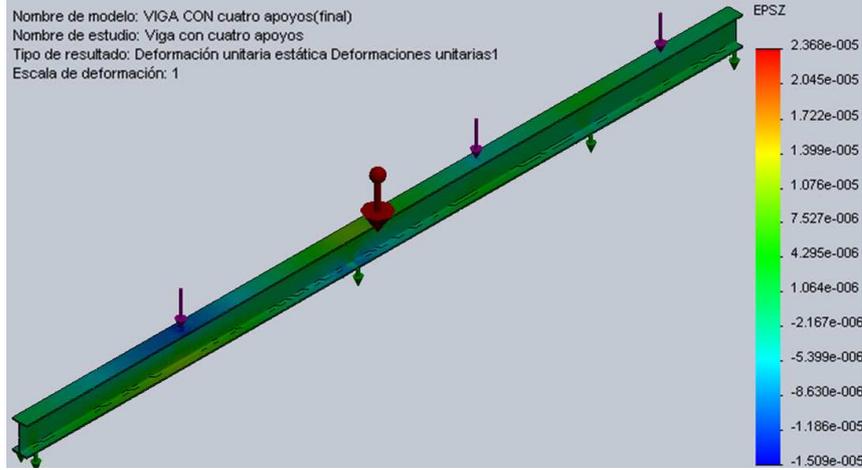
Fuente: Autores

Figura 180. Resultados obtenidos de desplazamiento para la viga con cuatro apoyos



Fuente: Autores

Figura 181. Resultados de deformación unitaria para la viga con cuatro apoyos



Fuente: Autores

Resultados mediante tablas en cada punto seleccionado:

Tabla 43. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con cuatro apoyos y $P_1=80$ kg, $P_2=80$ kg, $P_3=40$ kg

VIGA CON CUATRO APOYOS ($P_1=80$ kg, $P_2=80$ kg, $P_3=40$ kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
1998	67	14,6715	0,0171509	0,00000450862
1497	179	4,1341	-0,108162	-0,0000000836221
997	308	24,8995	-0,299881	-0,00000981546
497	244	16,8481	-0,214263	-0,00000655794

Fuente: Autores

Valores obtenidos para el caso de cuatro apoyos y un peso $P_1=70$ kg, $P_2=70$ kg y $P_3=40$ kg:

Tabla 44. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con cuatro apoyos y $P_1=70$ kg, $P_2=70$ kg, $P_3=40$ kg

VIGA CON CUATRO APOYOS ($P_1=70$ kg, $P_2=70$ kg, $P_3=40$ kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
1998	67	11,5948	0,0156209	0,00000411774
1497	179	3,90203	-0,098681	-0,000000130925
997	308	24,5041	-0,259384	-0,00000894961
497	244	16,3985	-0,19209	-0,00000603228

Fuente: Autores

Valores obtenidos para el caso de cuatro apoyos y un peso $P_1=60$ kg, $P_2=60$ kg y $P_3=40$ kg:

Tabla 45. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con cuatro apoyos y $P_1=60$ kg, $P_2=60$ kg, $P_3=40$ kg

VIGA CON CUATRO APOYOS ($P_1=60$ kg, $P_2=60$ kg, $P_3=40$ kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm ²)	UY(mm)	EPZN
1998	67	10,5221	0,00140916	0,00000373026
1497	179	3,50157	-0,0992067	-0,000000176688
997	308	22,1095	-0,24489	-0,00000808617
497	244	13,949	-0,178159	-0,00000550706

Fuente: Autores

Valores obtenidos para el caso de cuatro apoyos y un peso $P_1=50$ kg, $P_2=50$ kg y $P_3=40$ kg:

Tabla 46. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga con cuatro apoyos y $P_1=50$ kg, $P_2=50$ kg, $P_3=40$ kg

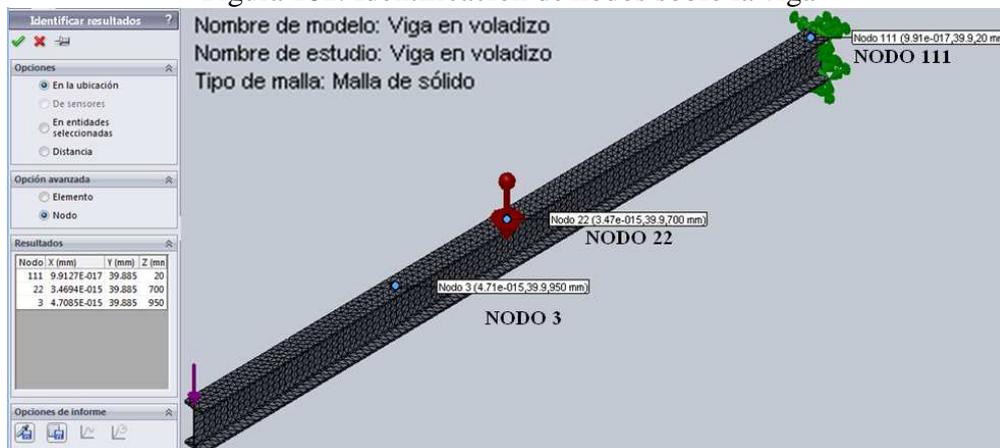
VIGA CON CUATRO APOYOS ($P_1=50$ kg, $P_2=50$ kg, $P_3=40$ kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm ²)	UY(mm)	EPZN
1998	67	9,43609	0,0125607	0,00000333729
1497	179	3,0347	-0,0897224	-0,000000224751
997	308	19,7169	-0,2109391	-0,00000721899
497	244	11,5017	-0,145103	-0,00000498105

Fuente: Autores

5.2.5.4 Viga en voladizo

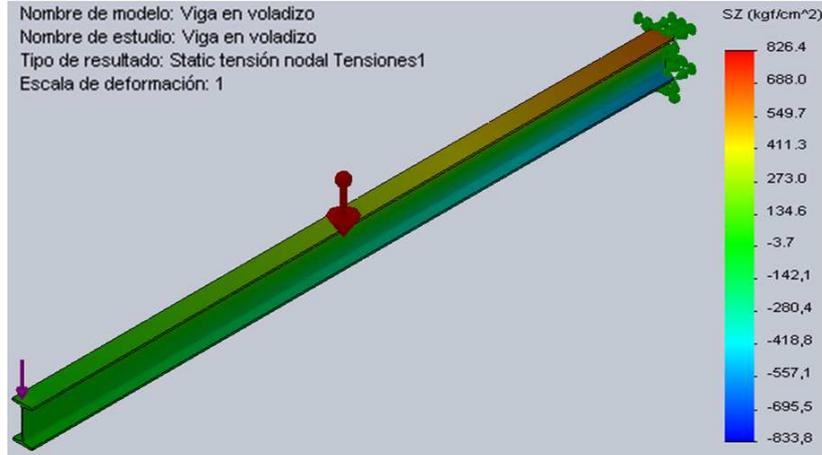
Realizado todo el procedimiento se visualiza los resultados para $P=90$ kg:

Figura 182. Identificación de nodos sobre la viga



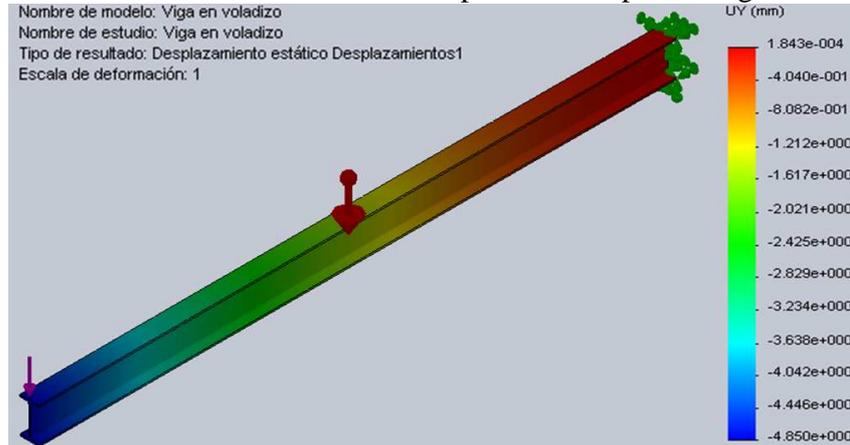
Fuente: Autores

Figura 183. Resultados obtenidos de esfuerzo (Von Mises) para la viga en voladizo



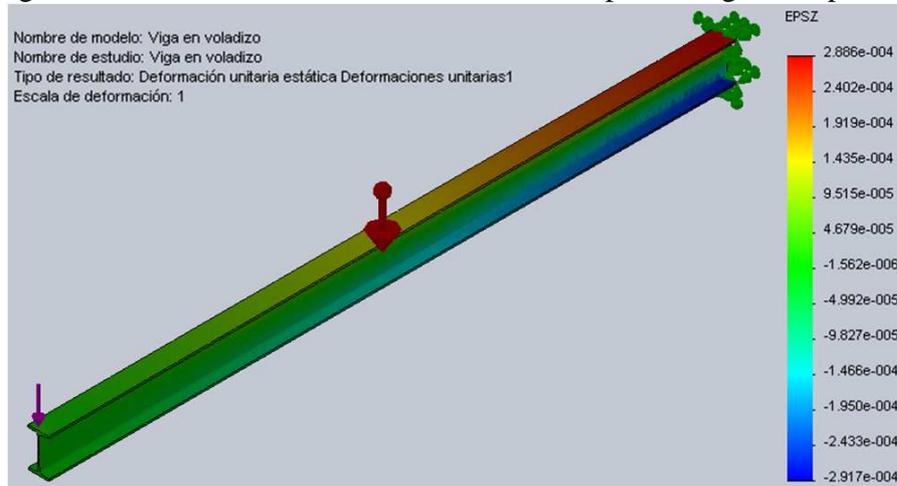
Fuente: Autores

Figura 184. Resultados obtenidos de desplazamiento para la viga en voladizo



Fuente: Autores

Figura 185. Resultados de deformación unitaria para la viga en voladizo



Fuente: Autores

Resultados mediante tablas en cada punto seleccionado:

Tabla 47. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga en voladizo y P=90 kg

VIGA EN VOLADIZO (P=90 kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
950	3	192,043	-2,605774	0,0000911364
700	22	301,425	-1,538170	0,000143348
150	111	616,731	-0,094977	0,000295031

Fuente: Autores

Valores obtenidos para el caso de viga en voladizo y un peso P=80 kg:

Tabla 48. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga en voladizo y P=80 kg

VIGA EN VOLADIZO (P=80 kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
950	3	166,524	-2,331774	0,0000790187
700	22	262,105	-1,344680	0,000124642
150	111	540,129	-0,085977	0,000258392

Fuente: Autores

Valores obtenidos para el caso de viga en voladizo y un peso P=70 kg:

Tabla 49. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga en voladizo y P=70 kg

VIGA EN VOLADIZO (P=70 kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
950	3	141,004	-2,057774	0,0000669032
700	22	222,786	-1,151190	0,000105938
150	111	463,535	-0,076977	0,000221764

Fuente: Autores

Valores obtenidos para el caso de viga en voladizo y un peso P=60 kg:

Tabla 50. Resultados obtenidos de esfuerzo, desplazamiento y deformación unitaria en cada punto para el caso de viga en voladizo y P=60 kg

VIGA EN VOLADIZO (P=60 kg)				
DISTANCIA (mm)	NODO	SZ (kgf/cm²)	UY(mm)	EPZN
950	3	115,486	-1,783774	0,0000547851
700	22	183,467	-0,957705	0,0000872313
150	111	386,930	-0,067977	0,000185123

Fuente: Autores

5.3 Análisis y comparación de resultados

Tabla 51. Comparación de resultados obtenidos de flechas (mm) para la viga con dos apoyos

VALORES DE FLECHA (mm)									
VIGA CON DOS APOYOS									
DISTANCIA (mm)	DATOS CON LABVIEW	DATOS TEÓRICOS	DATOS CON SAP 2000	DATOS CON SOFTWARE CAE	DATOS CON DEFORMÍMETRO	% ERROR CON DATOS TEÓRICOS	% ERROR CON SAP 2000	% ERROR CON SOFTWARE CAE	% ERROR CON DEFORMÍMETRO
P=200 kg									
1998	-1,490	-1,464528	-1,397400	-1,4418800	-1,400	1,71	6,21	3,23	6,04
1497	-1,140	-1,165645	-1,267910	-1,2608500	-1,245	2,25	11,22	10,60	9,21
997	-0,880	-0,861368	-0,936800	-0,8890820	-0,851	2,12	6,45	1,03	3,30
497	-0,440	-0,435004	-0,473200	-0,4227690	-0,450	1,14	7,55	3,92	2,27
P=190 kg									
1998	-1,420	-1,391302	-1,324400	-1,3809200	-1,350	2,02	6,73	2,75	4,93
1497	-1,080	-1,107363	-1,204775	-1,2090260	-1,190	2,53	11,55	11,95	10,19
997	-0,830	-0,818300	-0,891135	-0,8519630	-0,812	1,41	7,37	2,65	2,17
497	-0,410	-0,413254	-0,450265	-0,3939110	-0,420	0,79	9,82	3,92	2,44
P=180 kg									
1998	-1,340	-1,318075	-1,25630248	-1,3199700	-1,280	1,64	6,25	1,49	4,48
1497	-1,030	-1,049081	-1,14283132	-1,1506800	-1,130	1,85	10,95	11,72	9,71
997	-0,790	-0,775232	-0,84532226	-0,8148490	-0,775	1,87	7,00	3,15	1,90
497	-0,390	-0,391504	-0,42712002	-0,3750580	-0,380	0,39	9,52	3,83	2,56
P=170 kg									
1998	-1,270	-1,207970	-1,18820418	-1,2590100	-1,210	4,88	6,44	0,87	4,72
1497	-0,970	-0,990798	-1,06088814	-1,10010000	-1,070	2,14	9,37	13,41	10,31
997	-0,750	-0,732163	-0,79951042	-0,7777370	-0,729	2,38	6,60	3,70	2,80
497	-0,370	-0,369754	-0,4039744	-0,3562060	-0,370	0,07	9,18	3,73	0,00
PROMEDIO DE ERRORES						1,82	8,26	5,12	4,81

Fuente: Autores

Tabla 52. Comparación de resultados obtenidos de flechas (mm) para la viga apoyada con tres apoyos

VALORES DE FLECHA (mm)							
VIGA CON TRES APOYOS							
DISTANCIA (mm)	DATOS CON DEFORMIMETRO	DATOS TEÓRICOS	DATOS CON SAP 2000	DATOS CON SOFTWARE CAE	% ERROR CON SAP 2000	% ERROR CON SOFTWARE CAE	% ERROR CON DATOS TEÓRICOS
P1=100 kg y P2=100 kg							
1998	-0,054	-0,056125	-0,04868	-0,0542491	9,85	0,46	3,94
1497	-0,094	-0,107640	-0,08550	-0,103335	9,04	9,93	14,51
997	-0,085	-0,101386	-0,08409	-0,102673	1,07	20,79	19,28
497	-0,049	-0,054147	-0,04467	-0,0503716	8,84	2,80	10,50
P1=90 kg y P2=90 kg							
1998	-0,045	-0,050992	-0,04395	-0,0463882	2,33	3,08	13,32
1497	-0,09	-0,097785	-0,07717	-0,0869157	14,26	3,43	8,65
997	-0,079	-0,088243	-0,07589	-0,0868849	3,94	9,98	11,70
497	-0,047	-0,050992	-0,04033	-0,0471816	14,19	0,39	8,49
P1=80 kg y P2=80 kg							
1998	-0,044	-0,045860	-0,039921	-0,0402581	9,27	8,50	4,23
1497	-0,08	-0,087930	-0,069884	-0,0727013	12,65	9,12	9,91
997	-0,07	-0,080981	-0,067690	-0,0727291	3,30	3,90	15,69
497	-0,044	-0,048395	-0,035990	-0,0409925	18,20	6,84	9,99
P1=70 kg y P2=70 kg							
1998	-0,035	-0,040727	-0,034480	-0,03610314	1,49	3,15	16,36
1497	-0,069	-0,078075	-0,063510	-0,06717870	7,96	2,64	13,15
997	-0,064	-0,070779	-0,061500	-0,06726168	3,91	5,10	10,59
497	-0,036	-0,040519	-0,031600	-0,03672207	12,22	2,01	12,55
PROMEDIO DE ERRORES					8,28	5,76	11,43

Fuente: Autores

Tabla 53. Comparación de resultados obtenidos de flechas (mm) para la viga apoyada con cuatro apoyos

VALORES DE FLECHA (mm)							
VIGA CON CUATRO APOYOS							
DISTANCIA (mm)	DATOS CON DEFORMIMETRO	DATOS TEÓRICOS	DATOS CON SAP 2000	DATOS CON SOFTWARE CAE	% ERROR CON SAP 2000	% ERROR CON SOFTWARE CAE	% ERROR CON DATOS TEÓRICOS
P1=80 kg, P2=80 kg y P3=40 kg							
1998	-0,014	0,01574168	0,00295	0,0171509	121,07	222,51	212,44
1497	-0,092	-0,1070048	-0,10993	-0,108162	19,49	17,57	16,31
997	-0,32	-0,3559225	-0,27598	-0,299881	13,76	6,29	11,23
497	-0,211	-0,2472027	-0,20692	-0,214263	1,93	1,55	17,16
P1=70 kg, P2=70 kg y P3=40 kg							
1998	-0,013	0,01453427	0,00290	0,0156209	122,31	220,16	211,80
1497	-0,091	-0,103155	-0,09690	-0,098681	6,48	8,44	13,36
997	-0,285	-0,3190346	-0,24270	-0,259384	14,84	8,99	11,94
497	-0,19	-0,218314	-0,18194	-0,19209	4,24	1,10	14,90
P1=60 kg, P2=60 kg y P3=40 kg							
1998	-0,012	0,01332731	0,00290	0,00140916	124,17	111,74	211,06
1497	-0,105	-0,109305	-0,09690	-0,0992067	7,71	5,52	4,10
997	-0,223	-0,2421468	-0,24271	-0,24489	8,84	9,82	8,59
497	-0,167	-0,1894252	-0,18194	-0,178159	8,95	6,68	13,43
P1=50 kg, P2=50 kg y P3=40 kg							
1998	-0,012	0,01212258	0,00279	0,0125607	123,25	204,67	201,02
1497	-0,097	-0,09545464	-0,07809	-0,0897224	19,50	7,50	1,59
997	-0,186	-0,2052586	-0,17617	-0,2109391	5,28	13,41	10,35
497	-0,129	-0,1405364	-0,13198	-0,145103	2,31	12,48	8,94
PROMEDIO DE ERRORES					9,45	8,28	10,99

Fuente: Autores

Tabla 54. Comparación de resultados obtenidos de flechas (mm) para la viga apoyada con dos apoyos (medición puntual)

VALORES DE DEFORMACIÓN UNITARIA						
VIGA CON DOS APOYOS MEDICION PUNTUAL						
DISTANCIA (mm)	DATOS CON LABVIEW (MEDICION PUNTUAL)	DATOS CON LABVIEW (MEDICION 4 PUNTOS)	DATOS CON SOFTWARE CAE	% ERROR CON LABVIEW (MEDICION 4 PUNTOS)	% ERROR CON SOFTWARE CAE	
2000			P=200 kg			
		-0,000076540	-0,000078097	-0,0000823255	2,03	7,56
				P=190 kg		
		-0,000072670	-0,000074348	-0,0000858394	2,31	13,29
				P=180 kg		
		-0,000069190	-0,000070519	-0,0000823255	1,92	18,98
				P=170 kg		
		-0,000065670	-0,000066578	-0,0000788133	1,38	20,01

Fuente: Autores

Tabla 55. Comparación de resultados obtenidos de flechas (mm) para la viga en voladizo

VALORES DE FLECHA (mm)									
VIGA EN VOLADIZO									
DISTANCIA (mm)	DATOS CON LABVIEW	DATOS TEÓRICOS	DATOS CON SAP 2000	DATOS CON SOFTWARE CAE	DATOS CON DEFORMÍMETRO	% ERROR CON DATOS TEÓRICOS	% ERROR CON SAP 2000	% ERROR CON SOFTWARE CAE	% ERROR CON DEFORMÍMETRO
P=90 kg									
950	-2,568	-2,480898	-2,465	-2,605774	-2,475	3,39	4,01	1,47	3,62
700	-1,462	-1,45303	-1,448	-1,538170	-1,536	0,61	0,96	5,21	5,06
150	-0,08	-0,077435	-0,0809	-0,094977	-0,083	3,21	1,13	18,72	3,75
P=80 kg									
950	-2,28	-2,205243	-2,191	-2,331774	-2,225	3,28	3,90	2,27	2,41
700	-1,3	-1,291582	-1,287	-1,344680	-1,36	0,65	1,00	3,44	4,62
150	-0,071	-0,068831	-0,0719	-0,085977	-0,076	3,05	1,27	21,09	7,04
P=70 kg									
950	-1,995	-1,929587	-1,917	-2,057774	-1,99	3,28	3,91	3,15	0,25
700	-1,132	-1,130135	-1,126	-1,151190	-1,16	0,16	0,53	1,70	2,12
150	-0,061	-0,060227	-0,0629	-0,076977	-0,06	1,27	3,11	26,19	1,64
P=60 kg									
950	-1,707	-1,653932	-1,643	-1,783774	-1,75	3,11	3,75	4,50	2,52
700	-0,971	-0,968687	-0,9659	-0,957705	-1	0,24	0,53	1,37	2,99
150	-0,051	-0,051623	-0,0539	-0,067977	-0,054	1,22	5,69	33,29	5,88

Fuente: Autores

Tabla 56. Comparación de resultados obtenidos de esfuerzos (kg/cm^2) para la viga con dos apoyos

VALORES DE ESFUERZO (kg/cm^2)									
VIGA CON DOS APOYOS									
DISTANCIA (mm)	DATOS CON GALGAS EXTENSOMÉTRICAS (LABVIEW)	DATOS TEÓRICOS	DATOS CON SAP 2000	DATOS CON SOFTWARE CAE	% ERROR CON DATOS TEÓRICOS	% ERROR CON SAP 2000	% ERROR CON SOFTWARE CAE		
P=200 kg									
1998	183,613	180,432589	183,46964	222,931	1,73	0,08	21,41		
1497	114,952	134,167825	136,9992	132,225	16,72	19,18	15,03		
997	78,535	87,903052	90,13321	80,5695	11,93	14,77	2,59		
497	36,669	41,638288	43,239861	35,2162	13,55	17,92	3,96		
P=190 kg									
1998	174,530	171,411001	174,444189	212,456	1,79	0,05	21,73		
1497	109,212	127,459425	130,283	126,712	16,71	19,29	16,02		
997	74,656	83,507903	85,735328	77,3285	11,86	14,84	3,58		
497	34,705	39,556373	40,7825086	34,2799	13,98	17,51	1,22		
P=180 kg									
1998	165,344	162,389321	165,4223	201,981	1,79	0,05	22,16		
1497	103,402	120,751024	123,5811	121,165	16,78	19,52	17,18		
997	70,746	79,112755	81,3348	74,103	11,83	14,97	4,75		
497	33,024	37,474458	38,7019	33,3552	13,48	17,19	1,00		
P=170 kg									
1998	156,234	153,367733	156,4	191,493	1,83	0,11	22,57		
1497	97,787	114,042624	116,8699	115,599	16,62	19,51	18,22		
997	66,830	74,717597	76,9436	70,8669	11,80	15,13	6,04		
497	31,102	35,392543	36,6214	32,4195	13,80	17,75	4,24		
					PROMEDIO DE ERRORES				
					11,01148077	12,99150115	11,35597741		

Fuente: Autores

Tabla 57. Comparación de resultados obtenidos de esfuerzos (kg/cm^2) para la viga con tres apoyos

VALORES DE ESFUERZO (kg/cm^2)							
VIGA CON TRES APOYOS							
DISTANCIA (mm)	DATOS CON GALGAS EXTENSOMÉTRICAS (LABVIEW)	DATOS TEÓRICOS	DATOS CON SAP 2000	DATOS CON SOFTWARE CAE	% ERROR CON DATOS TEÓRICOS	% ERROR CON SAP 2000	% ERROR CON SOFTWARE CAE
P1=100 kg y P2=100 kg							
1998	17,114	16,261109	16,367687	16,1258	4,98	4,36	5,77
1497	39,466	32,54899	40,996662	40,3908	17,53	3,88	2,34
997	33,556	32,501579	39,057099	38,4799	3,14	16,39	14,67
497	15,681	15,39549	16,910306	16,6604	1,82	7,84	6,25
P1=90 kg y P2=90 kg							
1998	15,376	14,79392	14,308161	14,09671	3,79	6,94	8,32
1497	35,556	29,567171	37,720750	37,1633	16,84	6,09	4,52
997	30,151	29,522615	36,032703	35,5002	2,08	19,51	17,74
497	14,043	13,984396	15,730673	15,4982	0,42	12,02	10,36
P1=80 kg y P2=80 kg							
1998	13,827	13,32688	13,085989	12,8926	3,62	5,36	6,76
1497	31,644	26,585344	34,461889	33,9526	15,99	8,90	7,30
997	26,833	26,54365	33,010845	32,523	1,08	23,02	21,21
497	12,445	12,573312	13,519394	13,3196	1,03	8,63	7,03
P1=70 kg y P2=70 kg							
1998	12,226	13,85976	11,941698	11,76522	13,36	2,33	3,77
1497	27,847	23,603507	29,691389	29,2526	15,24	6,62	5,05
997	23,516	23,564685	28,974190	28,546	0,21	23,21	21,39
497	10,922	11,162219	11,398044	11,2296	2,20	4,36	2,82
PROMEDIO DE ERRORES					6,46	9,97	9,08

Fuente: Autores

Tabla 58. Comparación de resultados obtenidos de esfuerzos (kg/cm^2) para la viga con cuatro apoyos

VALORES DE ESFUERZO (kg/cm^2)							
VIGA CON CUATRO APOYOS							
DISTANCIA (mm)	DATOS CON GALGAS EXTENSOMÉTRICAS (LABVIEW)	DATOS TEÓRICOS	DATOS CON SAP 2000	DATOS CON SOFTWARE CAE	% ERROR CON DATOS TEÓRICOS	% ERROR CON SAP 2000	% ERROR CON SOFTWARE CAE
P1=80 kg, P2=80 kg y P3=40 kg							
1998	5,722	15,634716	15,9240	14,6715	173,24	178,29	156,41
1497	6,612	4,410651	3,4220	4,1341	33,29	48,25	37,48
997	26,510	22,474338	23,0569	24,8995	15,22	13,03	6,08
497	16,636	14,744819	15,7658	16,8481	11,37	5,23	1,27
P1=70 kg, P2=70 kg y P3=40 kg							
1998	5,117	13,94783	11,740307	11,5948	172,58	129,44	126,59
1497	4,166	3,881098	3,162614	3,90203	6,84	24,09	6,34
997	23,259	20,122974	23,132807	24,5041	13,48	0,54	5,35
497	14,659	13,194955	15,013780	16,3985	9,99	2,42	11,87
P1=60 kg, P2=60 kg y P3=40 kg							
1998	4,619	12,26098	10,966638	10,5221	165,47	137,44	127,82
1497	3,874	3,35154	2,984811	3,50157	13,49	22,95	9,61
997	19,983	17,771627	19,894214	22,1095	11,07	0,44	10,64
497	12,762	11,645082	12,911851	13,949	8,75	1,17	9,30
P1=50 kg, P2=50 kg y P3=40 kg							
1998	4,298	10,574104	9,760308	9,43609	146,02	127,09	119,55
1497	2,674	2,82198	2,656482	3,0347	5,53	0,66	13,49
997	16,95	15,420272	17,705850	19,7169	9,02	4,46	16,32
497	10,915	10,095208	11,491547	11,5017	7,51	5,28	5,38
PROMEDIO DE ERRORES					12,13	10,71	11,09

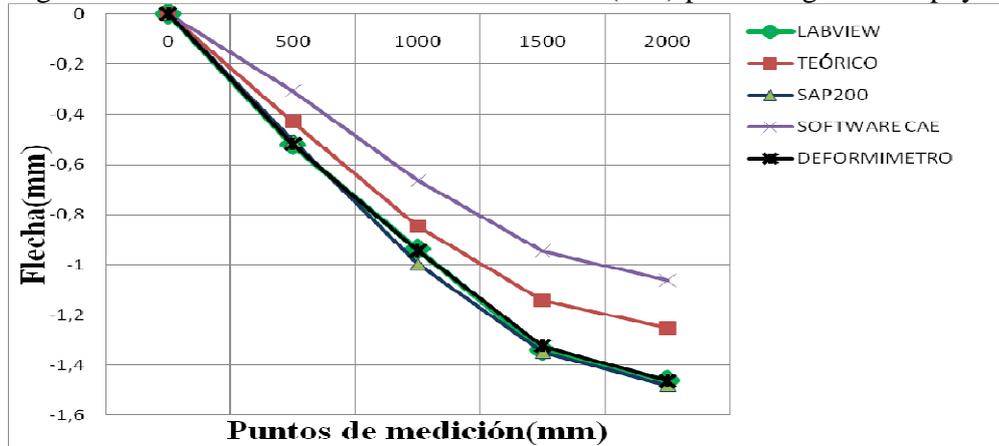
Fuente: Autores

Tabla 59. Comparación de resultados obtenidos de esfuerzos (kg/cm^2) para la viga en voladizo

VALORES DE ESFUERZO (kg/cm^2)								
VIGA EN VOLADIZO								
DISTANCIA (mm)	DATOS CON GALGAS EXTENSOMÉTRICAS (LABVIEW)	DATOS TEÓRICOS	DATOS CON SAP 2000	DATOS CON SOFTWARE CAE	% ERROR CON DATOS TEÓRICOS	% ERROR CON SAP 2000	% ERROR CON SOFTWARE CAE	
P=90 kg								
950	205,69	198,701299	198,701299	192,043	3,40	3,40	6,63	
700	317,58	322,597403	315,584416	301,425	1,58	0,63	5,09	
150	597,2	647,532468	572,727273	616,731	8,43	4,10	3,27	
P=80 kg								
950	182,78	177,623377	177,623377	166,524	2,82	2,82	8,89	
700	282,07	280,519481	280,519481	262,105	0,55	0,55	7,08	
150	530,61	509,090909	509,090909	540,129	4,06	4,06	1,79	
P=70 kg								
950	159,71	154,545455	154,545455	141,004	3,23	3,23	11,71	
700	246,46	245,454546	245,454546	222,786	0,41	0,41	9,61	
150	463,87	445,454546	445,454546	463,535	3,97	3,97	0,07	
P=60 kg								
950	136,94	132,467533	132,467533	115,486	3,27	3,27	15,67	
700	211,18	210,389610	210,389610	183,467	0,37	0,37	13,12	
150	397,44	381,818181	381,818182	386,930	3,93	3,93	2,64	

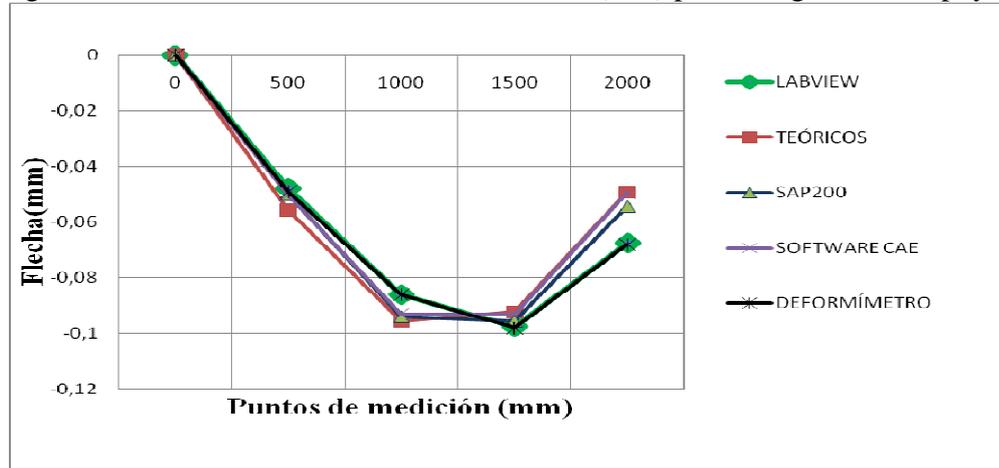
Fuente: Autores

Figura 186. Variación de resultados de flechas (mm) para la viga con 2 apoyos



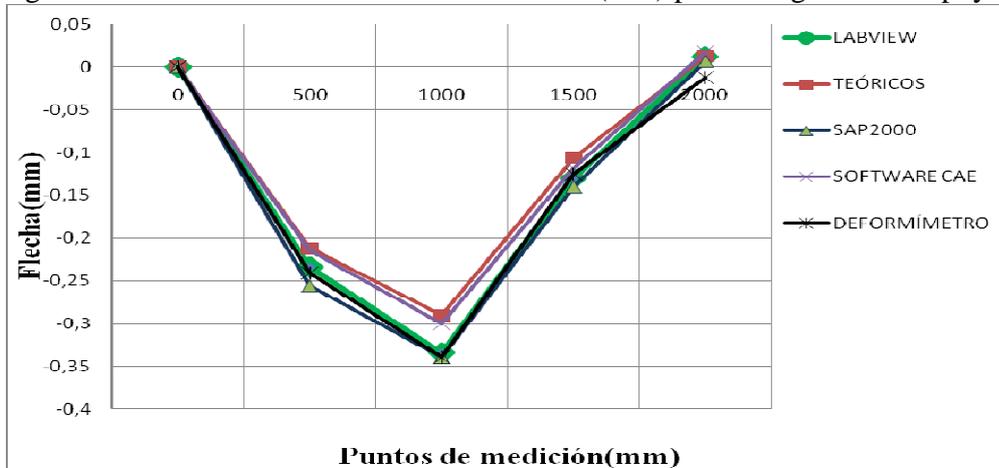
Fuente: Autores

Figura 187. Variación de resultados de flechas (mm) para la viga sobre 3 apoyos



Fuente: Autores

Figura 188. Variación de resultados de flechas (mm) para la viga sobre 4 apoyos



Fuente: Autores

CAPÍTULO VI

6. CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y COSTOS DEL SISTEMA

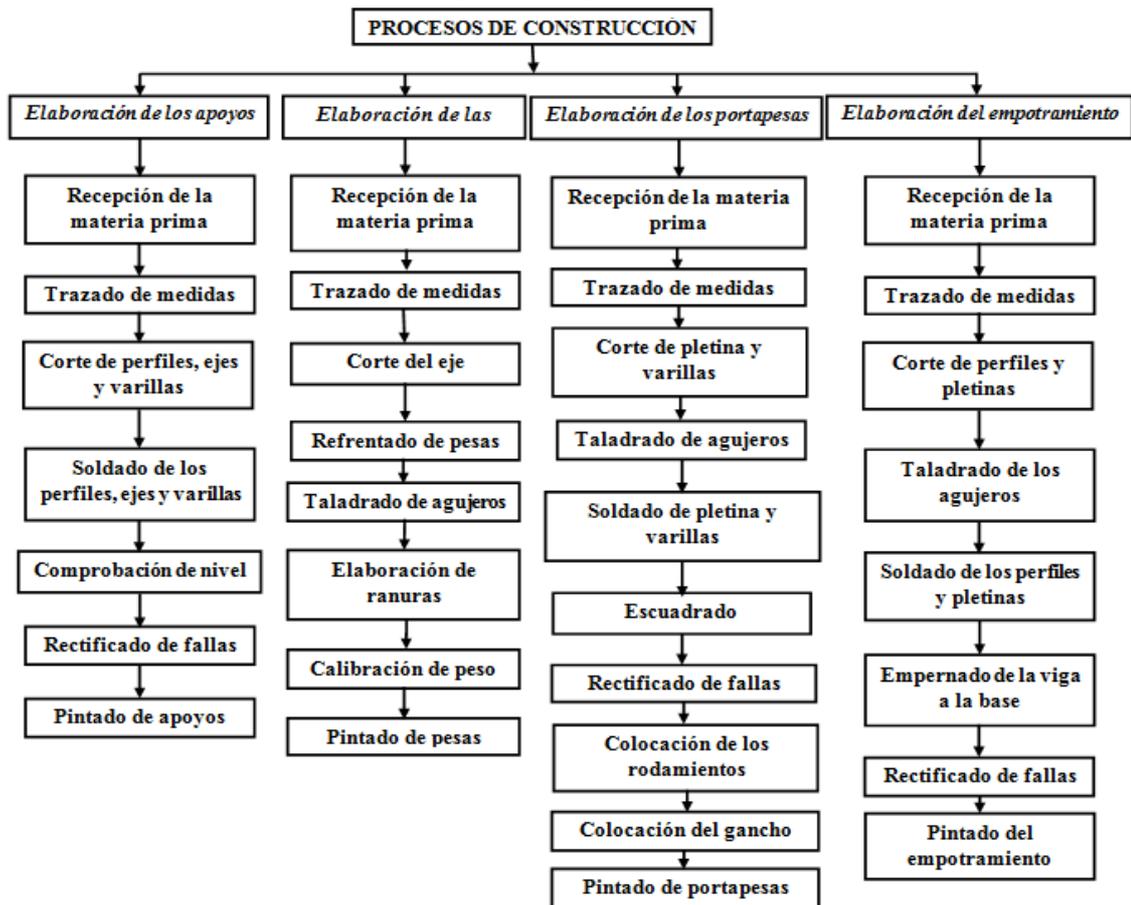
6.1 Construcción del banco de pruebas

6.1.1 *Descripción del proceso de construcción.* La construcción de la tesis se divide en cuatro procesos, que son los siguientes:

- Elaboración de los apoyos
- Elaboración de las pesas
- Elaboración de los portapesas
- Elaboración del empotramiento

6.1.2 *Diagrama de procesos*

Figura 189. Diagrama del proceso de construcción



Fuente: Autores

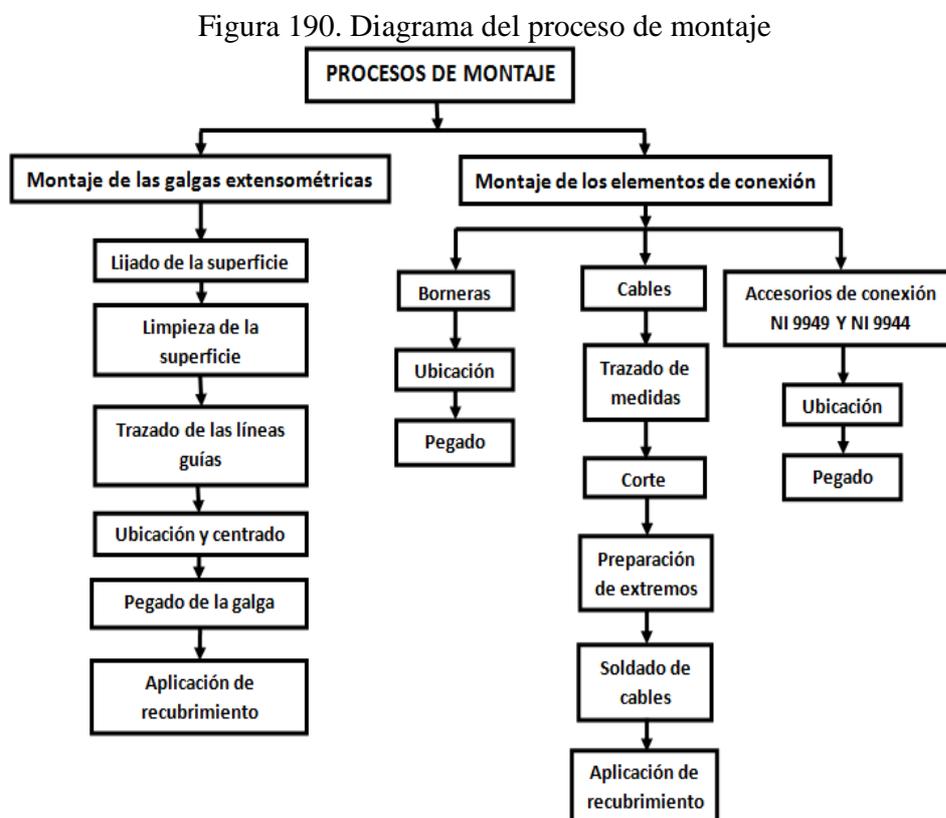
Mediante la utilización de diagramas de bloques se facilita la comprensión de los procesos que intervienen en la construcción del banco de pruebas.

6.2 Montaje del sistema de medición

6.2.1 Descripción del proceso de montaje. El montaje del sistema de medición para la viga simplemente apoyada así como para el empotramiento, se divide en dos procesos, que son los siguientes:

- Montaje de las galgas extensométricas
- Montaje de los elementos de conexión

6.2.2 Diagrama de procesos. Mediante la utilización de diagramas de bloques se facilita la comprensión de los procesos que intervienen en el montaje del sistema de medición:



Fuente: Autores

6.2.3 *Proceso de montaje de las galgas extensométricas.* Los pasos realizados en este proceso son muy minuciosos pues de estos elementos depende el correcto funcionamiento y el grado de precisión de los resultados.

Tabla 60. Lista de materiales para el montaje de las galgas extensométricas

MATERIALES	UNIDADES
Galgas extensométricas OMEGA SGD-6/120-LY11	19
Frasco de pegamento para galgas Super Bonder SG496	1
Pliero de lija para metal FANDELI #80	1
Pliero de lija para metal FANDELI #100	1
Pliero de lija para metal FANDELI #400	1
Pliero de lija para metal FANDELI #600	1
Pliero de lija para metal FANDELI #1000	1
Frasco de acetona (30 cc.)	2
Resina epóxica transparente DEVCON	1
Algodón SANA (25 gr.)	1

Fuente: Autores

6.2.3.1 *Lijado de la superficie.* Con este proceso se pretende conseguir una superficie lisa, para cual se utiliza varios tipos de lija desde una de grano grueso (#80) hasta una de grano fino (#1000).

6.2.3.2 *Limpieza de la superficie.* Para limpiar la superficie de sustancias que puedan alterar la sensibilidad de la galga (grasa, pintura, etc.) se utiliza alcohol y acetona.

6.2.3.3 *Trazado de las líneas guías.* Con el propósito de ubicar correctamente las galgas se procede a trazar líneas guías en la probeta, con una escuadra y un rayador.

6.2.3.4 *Ubicación y centrado.* Con la ayuda de cinta adhesiva se manipula la galga hasta hacer coincidir las marcas de referencia de la galga con las líneas guías de la probeta.

6.2.3.5 *Pegado de la galga.* Una vez centrada la galga, con la ayuda de un pegamento industrial líquido se procede a pegar la galga.

6.2.3.6 *Aplicación de recubrimiento.* Para evitar que la galga sufra algún daño por manipulación se procede a colocar recubrimiento, en este caso resina epóxica.

6.2.4 *Proceso de montaje de los elementos de conexión*

Tabla 61. Lista de materiales para el montaje de los elementos de conexión

MATERIALES	UNIDADES
Bornera	19
Cable UTP (m)	6
Silicona ABRO	1
Accesorios de conexión NI9949	4
Accesorios de conexión NI9944	4
Pegamento instantáneo Super Glue	2

Fuente: Autores

6.2.4.1 *Montaje de borneras*

Ubicación. Se coloca las borneras con la finalidad de que al realizar las conexiones con las galgas se evite la manipulación directa de los alambres conectores para así evitar daño alguno. Su ubicación se realiza a una distancia adecuada.

Pegado. Una vez que se ha determinado su ubicación se procede a pegar las borneras con la ayuda de un pegamento líquido.

6.2.4.2 *Montaje de cables*

Trazado de medidas. Considerando la distancia adecuada entre los elementos de medición, se procede a trazar las medidas correctas en los cables.

Corte. Señaladas las medidas correctas se procede a cortar los cables.

Preparación de los extremos. Para realizar las conexiones entre los elementos, se procede a pelar los extremos de los cables.

Soldado. Con la finalidad de unir los cables se procede a soldarlos.

Aplicación de recubrimiento. Para evitar un daño en las juntas se procede a colocar un recubrimiento, que en este caso es silicona.

6.2.4.3 Montaje de accesorios de conexión NI 9949 y NI 9944

Ubicación. Los accesorios de conexión NI 9949 se los ubica en la viga simplemente apoyada y los accesorios NI 9944 se los ubica en la viga empotrada, su ubicación se realiza a una adecuada distancia.

Pegado. Determinada la ubicación de los accesorios se procede a pegarlos con la ayuda de un pegamento líquido.

6.3 Tiempo empleado en la construcción y montaje

En la Tabla 69 se muestra los tiempos empleados en la construcción y montaje de cada uno de los elementos que conforman el banco de pruebas.

Tabla 62. Tiempo empleado en cada uno de los procesos de construcción y montaje de los elementos del banco de pruebas

PROCESOS	ELEMENTO	N°	OPERACIONES	T(horas)
ELABORACIÓN DE LOS APOYOS	Perfil L 40 x 6 mm (6m)	1	Trazado de medidas	1,5
		2	Corte	2,0
		3	Pre soldado	1,0
		4	Escuadrado	1,0
		5	Soldado	3,0
		6	Comprobación de nivel	1,0
		7	Rectificado de fallas	2,0
		8	Pintado	2,0
	Varilla lisa Ø 10 mm (6m)	9	Trazado de medidas	1,0
		10	Corte	0,5
		11	Pre soldado	0,5
		12	Escuadrado	0,5
		13	Soldado	1,0
		14	Comprobación de nivel	0,5
		15	Rectificado de fallas	1,0
		16	Pintado	0,5

	Eje de acero de transmisión Ø50,8 mm (m)	17	Trazado de medidas	0,5	
		18	Corte	0,5	
		19	Refrentado	1,0	
		20	Pintado	1,0	
		Barra de acero Ø 130 mm (pesas no ranuradas)	21	Trazado de medidas	1,5
			22	Corte	12,0
23	Refrentado		6,0		
24	Taladrado		6,0		
25	Calibración de pesos		6,0		
26	Pintado		2,0		
Barra de acero Ø 130 mm (pesas ranuradas)	27	Trazado de medidas	1,0		
	28	Corte	8,0		
	29	Refrentado	4,0		
	30	Taladrado	4,0		
	31	Ranurado	6,0		
	32	Calibración de pesos	4,0		
	33	Pintado	1,5		
ELABORACIÓN DE LOS PORTAPESAS	Varilla lisa Ø 8 mm	34	Trazado de medidas	1,0	
		35	Corte	3,0	
		36	Pre soldado	2,0	
		37	Escuadrado	1,5	
		38	Soldado	3,5	
		39	Rectificado de fallas	3,0	
		40	Pintado	2,0	
	Varilla lisa Ø 12.7 mm	41	Trazado de medidas	1,5	
		42	Corte	1,5	
		43	Pre soldado	1,5	
		44	Escuadrado	1,0	
		45	Soldado	2,0	
		46	Doblado	1,5	
		47	Rectificado de fallas	2,0	
		48	Pintado	1,5	
	Pletina 38 x 8 mm	49	Trazado de medidas	1,0	
		50	Corte	1,5	
		51	Taladrado	1,5	
		52	Pre soldado	1,0	
		53	Escuadrado	1,0	

		54	Soldado	1,5
		55	Pintado	1,5
	Rodamiento de bolas CMB 6001	56	Montaje	1,0
	Gancho metálico	57	Montaje	0,5
ELABORACIÓN DEL EMPOTRAMIENTO	Perfil IPN 80 (6 m)	58	Trazado de medidas	0,3
		59	Corte	0,3
		60	Taladrado	0,5
		61	Soldado	0,5
		62	Rectificado de fallas	0,5
		63	Pintado	0,5
	Perfil U 120 x 50 x 3(6 m)	64	Trazado de medidas	0,5
		65	Corte	1,0
		66	Soldado	1,0
		67	Rectificado de fallas	1,5
		68	Pintado	1,0
	Pletina 75 x 6 mm (m)	69	Trazado de medidas	0,3
		70	Corte	0,3
		71	Taladrado	0,5
		72	Soldado	0,3
		73	Rectificado de fallas	0,3
		74	Pintado	0,5
	Pletina 70 x 12 mm (m)	75	Trazado de medidas	0,3
		76	Corte	0,3
		77	Soldado	0,3
		78	Rectificado de fallas	0,3
		79	Pintado	0,5
	Tuercas Ø 3/8"	80	Soldado	0,3
	Pernos Ø 3/8" x 1"	81	Empernado	0,3

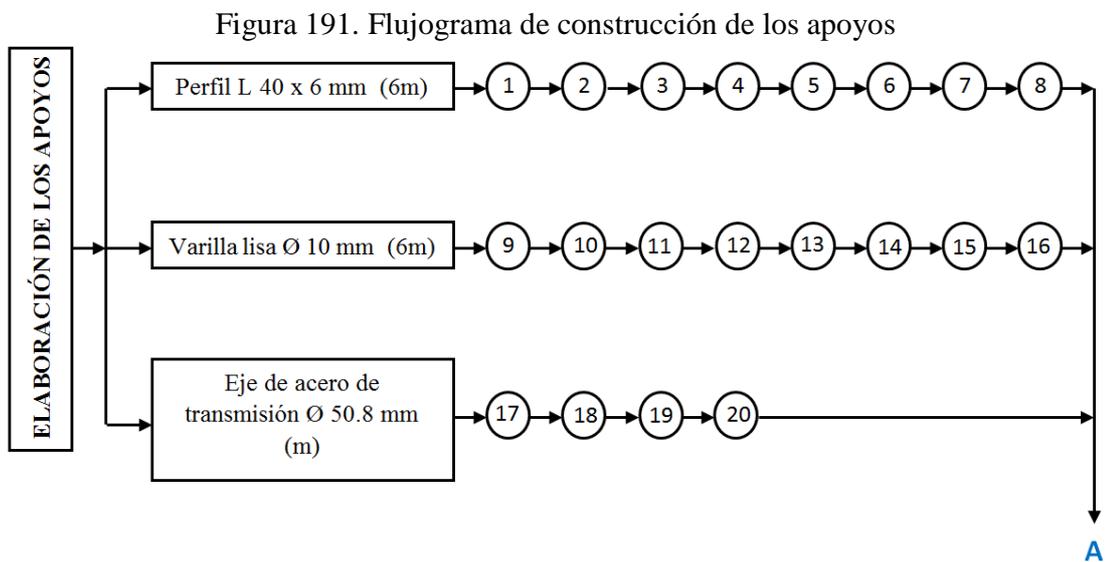
MONTAJE DE LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS	Galga extensométrica	82	Lijado de superficie	15,0
		83	Limpieza de superficie	2,0
		84	Trazado de líneas guías	6,0
		85	Ubicación y centrado	4,0
		86	Pegado de galga	2,0
		87	Aplicación de recubrimiento	4,0
MONTAJE DE LOS ELEMENTOS DE CONEXIÓN	Borneras	88	Ubicación	1,0
		89	Pegado	1,0
	Cable UTP	90	Trazado de medidas	2,0
		91	Corte	1,0
		92	Preparación de extremos	1,5
		93	Soldado	6,0
		94	Aplicación de recubrimiento	4,0
	Accesorios NI 9944 y NI 9949	95	Ubicación	1,0
		96	Pegado	1,0
	ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	Compac DAQ NI 9217	97	Colocación de módulos y cables de conexión
98			Verificación de la conexión del puente de Wheatstone	1,0
99			Comprobación de continuidad en los cables	1,0
Software: LabView 2010		100	Elaboración del software	120,0
		101	Pruebas de funcionamiento	40,0
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y VALIDACIÓN DE DATOS	Montaje general de los elementos para cada caso de flexión	102	Colocación de la viga y sus apoyos	2,0
		103	Conexiones	2,0
		104	Calibración de las galgas extensométricas	2,0
		105	Pruebas de funcionamiento del banco de pruebas	40,0
		106	Validación de datos obtenidos	40,0
TOTAL				435,0

Fuente: Autores

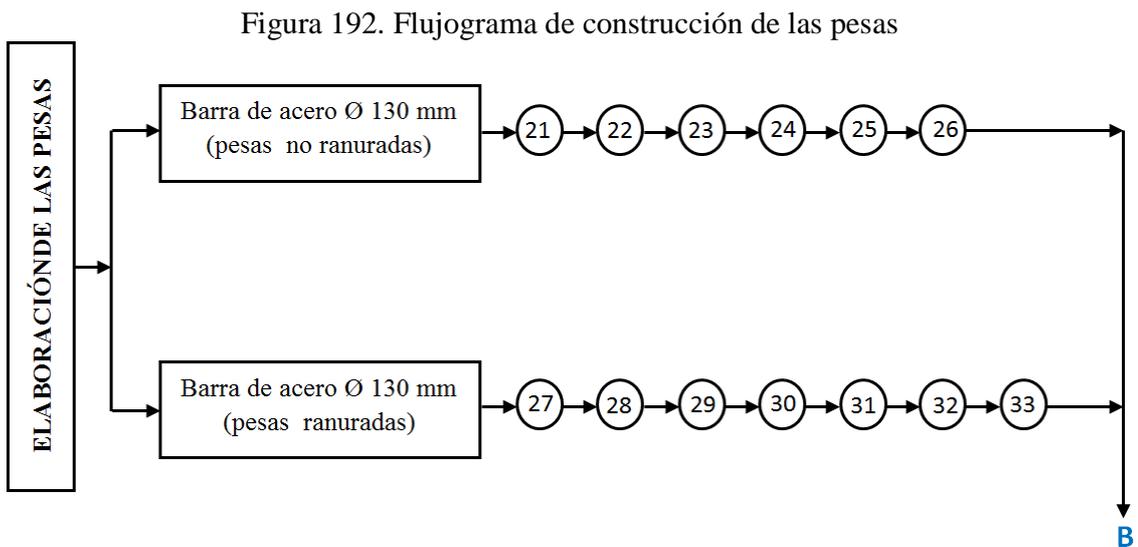
6.4 Flujogramas de construcción y montaje de cada uno de los elementos del banco de pruebas

A continuación se muestran los flujogramas de construcción (elaboración) y montaje del banco de pruebas.

Cabe indicar que cada uno de los círculos  representa una operación.

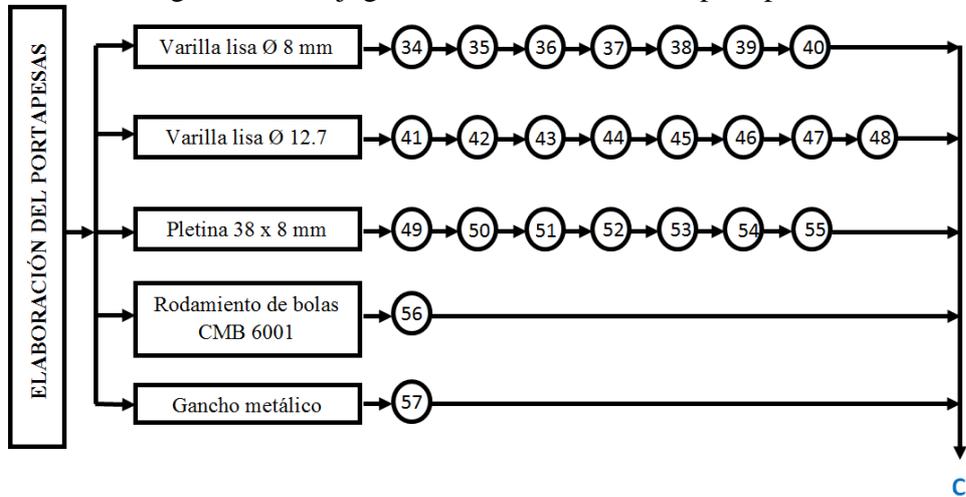


Fuente: Autores



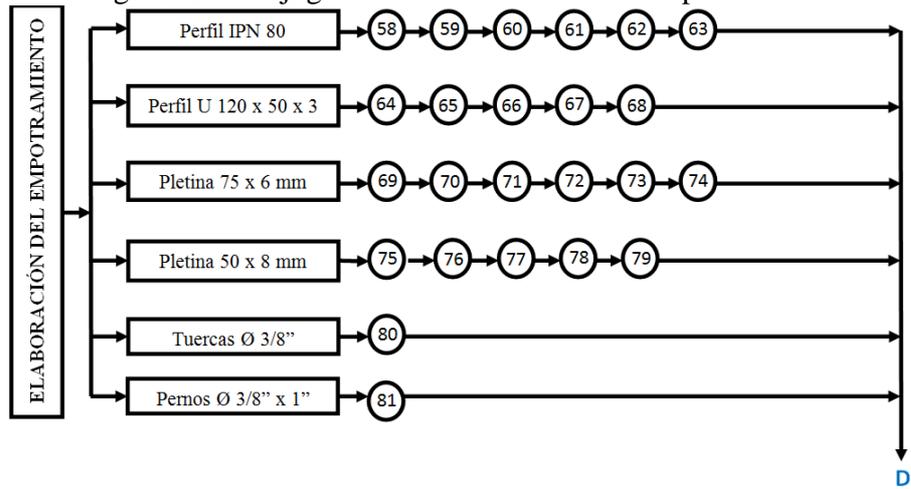
Fuente: Autores

Figura 193. Flujograma de construcción del portapesas



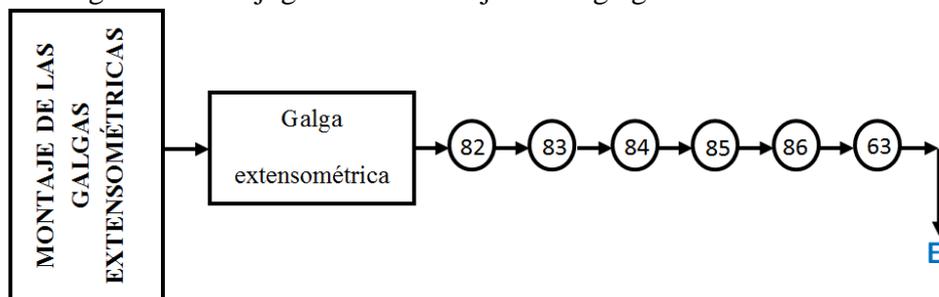
Fuente: Autores

Figura 194. Flujograma de construcción del empotramiento



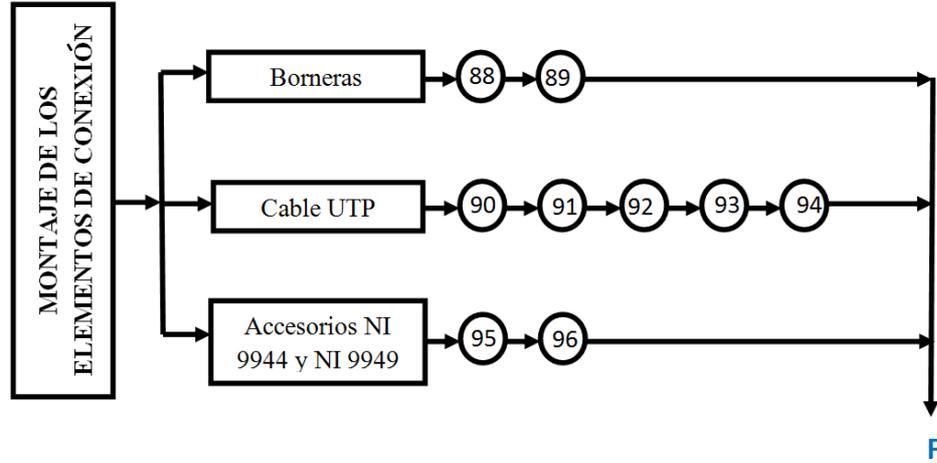
Fuente: Autores

Figura 195. Flujograma de montaje de las galgas extensométricas



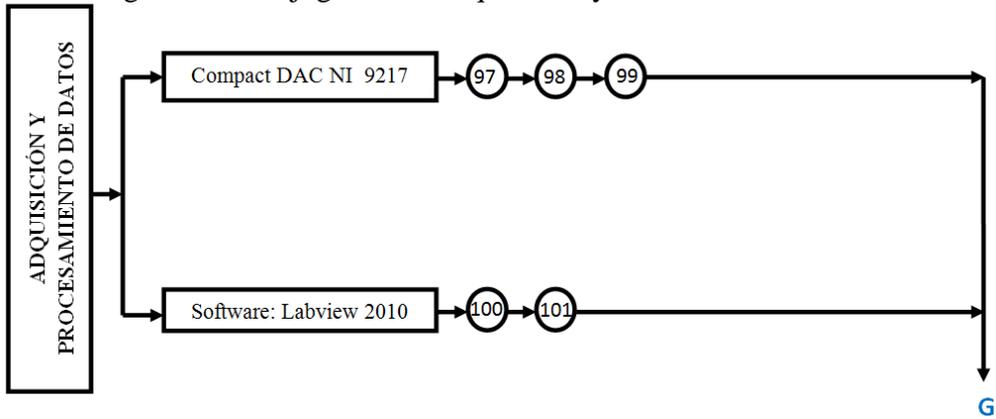
Fuente: Autores

Figura 196. Flujograma de montaje de los elementos de conexión



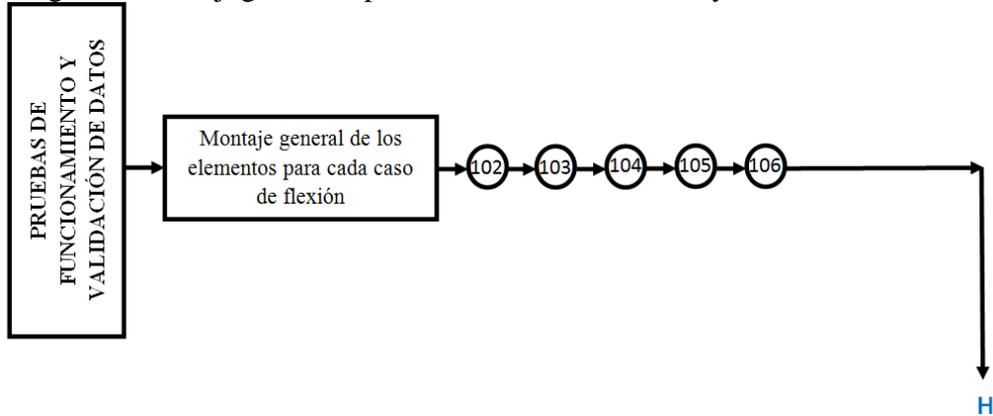
Fuente: Autores

Figura 197. Flujograma de adquisición y construcción de datos



Fuente: Autores

Figura 198. Flujograma de pruebas de funcionamiento y validación de datos



Fuente: Autores

Tabla 63. Tiempo de construcción del banco de pruebas.

TIEMPO DE CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS	
PROCESOS	HORAS
Construcción y montaje de elementos	435
Imprevistos	60
TOTAL	495

Fuente: Autores

Una vez indicados los tiempos empleados en cada una de las operaciones realizadas durante la construcción y montaje del banco de pruebas, además del tiempo empleado en imprevistos tenemos un tiempo total de 495 horas, tomando en cuenta que las jornadas de trabajo son de 8 horas tenemos en total 62 días.

6.5 Costos del proyecto

A continuación se realiza una descripción de todos los gastos realizados para obtener un valor total de inversión tanto de diseño y construcción del banco de pruebas.

6.5.1 Costos directos. En esta sección se incluye los costos por materiales, mano de obra y equipos, y transporte.

6.5.1.1 Costos de materiales

Tabla 64. Costos de materiales

MATERIALES				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	V. UNITARIO (\$)	CANTIDAD	SUBTOTAL (\$)
Varilla lisa Ø 8 mm, L=6 m	U	3,29	0,5	1,65
Varilla lisa Ø 12.7 mm, L=6m	U	6,74	0,5	3,37
Varilla lisa Ø 10 mm, L=6m	U	5,17	1	5,17
Electrodos E6011	libra	1,50	2	3,0
Pletina 38 x 8 mm, L=6m	U	23,59	0,5	11,80
Pletina 75 X 6 mm, L=6m	U	26,81	0,5	13,41
Pletina 50 X 8 mm, L=6m	U	31,30	0,5	15,65
Pletina 10 X 80, L=6m	U	32,00	0,25	8,00
Perfil L 40 x 6 mm, L=6m	U	26,43	3	79,29

Barra de acero Ø 130 mm	m	1480	2,3	851
Barra de acero Ø 50.8 mm	m	800	1,4	280
Rodamiento de bolas CMB 6001	U	1,80	2	3,60
Bornes de conexión ZOLODA UKM-4-AZ	U	0,25	16	4,00
Cable UTP sólido	m	0,50	6	3,00
Strain gages OMEGA SGD-6/120-LY11	U	70,0	16	1 120,00
Compac DAQ NI 9172	U	1430,00	1	1430,00
Módulo NI 9237	U	1300,00	1	1300,00
Kit de conexión para módulo NI9237	U	800,00	1	800,00
Resina epóxica DEVCON	U	5,00	1	5,00
Silicona ABRO	U	4,00	1	4,00
Acetona	U	0,35	1	0,35
Algodón SANA	U	0,71	1	0,71
Pintura ULTRAESMALTE celeste	litro	3,80	1	3,80
Pintura ULTRAESMALTE negro	litro	3,80	1	3,80
Pintura ULTRAESMALTE amarilla	litro	3,80	1	3,80
Pintura ABRO spray plateada	unidad	5,00	1	5,00
Lija para metal FANDELI #80	pliego	0,50	2	1,00
Lija para metal FANDELI #100	pliego	0,50	2	1,00
Lija para metal FANDELI #400	pliego	0,50	2	1,00
Lija para metal FANDELI #600	pliego	0,50	2	1,00
Lija para metal FANDELI #1000	pliego	0,50	2	1,00
Pegamento para galgas SUPER BONDER SG496	U	3,00	1	3,00
Pegamento SUPER BOND	U	1,20	2	2,40
Disco de corte NORTON BDA-32	U	1,60	1	3,20
Disco de pulir NORTON BDA-640	U	2,70	1	2,70
Tiñer	litro	1,00	3	3,00
Perfil IPE 160, L=6m	U	156,42	1	156,42
Perfil IPN 80, L=6m	U	59,40	1	59,40

Perfil C 150X50X3, L=6m	U	38,14	1	38,14
SUBTOTAL A				6 232,66

Fuente: Autores

6.5.1.2 *Costos de mano de obra.* Los valores para la mano de obra se obtienen del ANEXO N.

Tabla 65. Costos de mano de obra

DESCRIPCIÓN	CAT.	SAL.REAL/HORA (\$)	HORAS-HOMBRE	SUBTOTAL (\$)
Maestro mecánico	I	2,71	235	636,85
Soldador	I	2,58	80	206,40
Tornero	I	2,58	120	309,60
SUBTOTAL B				1 152,85

Fuente: Autores

6.5.1.3 *Costos de maquinaria y equipos utilizados.* En la Tabla 66 se indica las diferentes máquinas utilizadas en la construcción y montaje del banco de pruebas.

Tabla 66. Costos de maquinaria y equipos

DESCRIPCIÓN	COSTO x HORA	HORAS EQUIPO	SUB TOTAL
Soldadora eléctrica	2,95	3,50	10,32
Taladro manual	0,85	5,25	4,46
Taladro pedestal	1,75	1,75	3,06
Torno	11,50	21,50	247,25
Broca	0,80	0,50	0,40
Cortadora mecánica de cinta	3,75	10,00	37,50
Cortadora de disco abrasivo	2,50	5,00	12,50
Escuadra	0,85	2,50	2,12
Esmeril	1,16	1,50	1,74
Flexómetro	0,80	1,25	1,00
Moladora	1,22	0,40	0,48
Sierra manual	0,84	2,55	2,14
Compresor	15,00	5	75,00
Otros	1,31	2,10	2,75
S U B T O T A L C			400,72

Fuente: Autores

6.5.1.4 *Costos por transporte de materiales.* El costo por transporte es de 20 dólares debido a que los materiales para construir el banco de pruebas se los encuentra con facilidad.

6.5.1.5 Costo total directo. El costo total directo es la sumatoria de los costos directos parciales, lo cual se indica en la Tabla 67.

Tabla 67. Costo total directo

DESCRIPCIÓN	PRECIO(\$)
Materiales	6 232,66
Mano de obra	1 152,85
Equipos y herramientas	400,72
Transporte	20,00
TOTAL COSTOS DIRECTOS	7 806,23

Fuente: Autores

6.5.2 Costos indirectos

Tabla 68. Costos indirectos

COSTOS INGENIERILES	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO TOTAL (\$)
Supervisión y diseño	250	Hora	780,623
Utilidad	-	-	0,00
TOTAL COSTOS INDIRECTOS			780,623

Fuente: Autores

Para los costos ingenieriles se toma el 10% de los costos directos.

6.5.3 Costos totales. Es la suma de los costos directos más los costos indirectos cabe recalcar que estos precios ya tiene incluido el IVA que es el 12% en nuestro país.

Tabla 69. Costo total

COSTOS DIRECTOS	\$7 806,23
COSTOS INDIRECTOS	\$780,62
TOTAL	\$8 586,85

Fuente: Autores

El costo total del banco de pruebas es de \$8 586,85

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

El banco de pruebas de ensayos de flexión en sistemas isostáticos e hiperestáticos en vigas reales sirve para complementar el aprendizaje de los estudiantes de la Facultad de Mecánica.

La interfaz entre usuario y computadora permite la obtención de datos en los ensayos de flexión de una manera práctica.

El proceso de montaje de las galgas es minucioso, ya que de esto depende el buen funcionamiento del sistema.

Se comprobó que la sensibilidad de medición en la configuración de puente completo de Wheatstone es mejor que la producida en una configuración de cuarto de puente, obteniendo valores más precisos.

Al comparar los datos obtenidos experimentalmente por las galgas con los generados por softwares de aplicación y los calculados teóricamente, existe un error porcentual debido a que los softwares consideran condiciones ideales para el cálculo, mientras que las galgas funcionan en condiciones reales.

Los errores obtenidos entre los valores experimentales tomados por los deformímetros y las galgas, entran en un rango de valores aceptables menores al 5%, obteniendo un valor promedio de 2,12%, lo que asegura la confiabilidad en las mediciones.

Los errores obtenidos en el caso hiperestático de 4 apoyos en el punto medio de la viga (2000 mm), sobrepasan un rango de 5%, debido a que los sensores están muy cerca del apoyo en el cual la flecha es nula.

En la viga en voladizo existe mayor error entre los valores reales, los generados en software y los calculados, a causa de no conseguir las condiciones de empotramiento ideales.

Al aplicar pruebas de funcionalidad y repetividad, se encontró factores de corrección para los modelos matemáticos que rigen el fenómeno físico presente.

El deformímetro analógico de carátula es el que presenta mayores errores en las lecturas, lo que afecta en la comparación de resultados.

7.2 Recomendaciones

Alejar objetos magnéticos o equipos que produzcan radiación, ya que afectan las al sistema DAQ.

No manipular los cables de conexión durante el proceso de adquisición de datos, debido a que afectan la sensibilidad del equipo.

Aplicar recubrimientos adecuados, para las galgas y los cables de unión, por estar expuestos a daños físicos y químicos.

Utilizar este trabajo como práctica de laboratorio, para ampliar el conocimiento de los estudiantes de ingeniería mecánica, en los campos de: resistencia de materiales, instrumentación y estructuras.

Usar este sistema como base para desarrollar nuevos sistemas de adquisición de datos, tales como mediciones remotas o adquisición de datos en sistemas dinámicos.

Utilizar el sistema para investigaciones en el campo de resistencia de materiales, en los cuales se requiera aplicar la técnica de extensometría.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] www.slideshare.net/luisk_44/estructuras
- [2] http://html.rincondelvago.com/estructuras_1.html
- [3] <http://www.buenastareas.com/ensayos/Grado-De-Hiperestaticidad/914541.html>
- [4] <http://www.slideshare.net/cplasarenas/estructuras-3706336>
- [5] <http://www.slideshare.net/cplasarenas/estructuras-3706337>
- [6] <http://www.slideshare.net/cplasarenas/estructuras-3706338>
- [7] es.scribd.com/doc/73754372/76/Las-cerchas-y-los-porticos
- [8] http://oceanologia.ens.uabc.mx/~fisica/FISICA_II/APUNTES/ESFUERZO.htm
- [9] http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/palmira/5000155/lecciones/lec/1_3.htm
- [10] www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema1.PDF
- [11] www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema1.PDF
- [12] http://es.wikipedia.org/wiki/Esfuerzo_cortante
- [13] <http://es.wikipedia.org/wiki/Deformaci%C3%B3n>
- [14] www.slideshare.net/vilchez/deformacin
- [15] www.slideshare.net/vilchez/esfuerzo-deformacin
- [16] http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_Poisson
- [17] http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo_de_Young
- [18] http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_elasticidad_de_Hooke
- [19] http://es.wikipedia.org/wiki/Flexi%C3%B3n_mec%C3%A1nica

- [20] redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=84934002
- [21] ESPINOZA, Moisés. Diseño y construcción de una celda de carga. México: San Nicolás de los Garza. 1995. Págs.7, 8.
- [22] www.cimco.com.mx/3_Info/GOM/GOM__ARAMIS_es.pdf
- [23] www.monografias.com/trabajos72/medidores-deformacion-laser.shtml
- [24] www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Strain_Gages_1.pdf
- [25] www.apuntesdeelectronica.com/galgas-extensiométricas.htm
- [26] BERNAL, José. Técnica de Medición de Deformación Aplicado al Diseño Mecánico con Deformímetros Eléctricos. México: San Nicolás de los Garza. 1995. Págs.73, 74.
- [27] BERNAL, José. Técnica de Medición de Deformación Aplicado al Diseño Mecánico con Deformímetros Eléctricos. México: San Nicolás de los Garza. 1995. Págs.77 – 80.
- [28] ESPINOZA, Moisés. Diseño y construcción de una celda de carga. México: San Nicolás de los Garza. 1995. Págs. 11-18
- [29] www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Strain_Gages_1.pdf
- [30] es.scribd.com/doc/38268838/puente-wheatstone
- [31] <http://www.ni.com/daq/es>
- [32] <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa>
- [33] <http://www.ni.com/labview/esa/>

BIBLIOGRAFÍA

BERNAL, José. Técnica de Medición de Deformación Aplicado al Diseño Mecánico con Deformímetros Eléctricos. México: San Nicolás de los Garza. 1995

ESPINOZA, Moisés. Diseño y construcción de una celda de carga. México: San Nicolás de los Garza. 1995

SHIGLEY, Joseph. Diseño en Ingeniería Mecánica. 3ra.ed.México, 1985.

STIOPIN, P. Resistencia de Materiales. Moscú, 1980.

TORRES, Roberto. Análisis Experimental de Esfuerzos en la Optimización de Diseños Mecánicos. México: Querétaro, 2008.

LINKOGRAFÍA

DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS

http://pdf.rincondelvago.com/estructuras_1.html

20/11/2011

SISTEMAS ISOSTÁTICOS E HIPERESTÁTICOS

http://www.uhu.es/josemiguel.davila/TeoriaEstructuras_archivos/TeoriaEstructuras_TEMAI-3_

23/11/2011

COEFICIENTE DE POISSON

http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_Poisson

01/12/2011

MÓDULO DE YOUNG

http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo_de_Young

01/12/2011

TEORÍAS DE FALLA EN EL DISEÑO

http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADas_de_fallo

03/12/2011

EXTENSOMETRÍA

<http://es.wikipedia.org/wiki/Extensometr%C3%ADa>

02/01/2012

DEFORMACIÓN

<http://es.wikipedia.org/wiki/Deformaci%C3%B3n>

03/01/2012

GALGA EXTENSOMÉTRICA

http://es.wikipedia.org/wiki/Galga_extensiom%C3%A9trica

15/01/2012

SENSORES ELÉCTRICOS

<http://www.forosdeelectronica.com/f16/sensores-242/>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor>

17/01/2012

PUENTE DE WHEATSTONE

http://www.imem.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/DyCDM/DyCD

M_Cap7.pdf

20/01/2012

SISTEMA DAQ

<http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-134/lang/es>

05/02/2012

MÓDULO NI 9237

<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/7130>

15/02/2012

INTERFAZ DE LABVIEW

<http://www.ni.com/labview/whatis/esa/>

20/03/2012

[http://www.ni.com/gettingstarted/labviewbasics/esa/\(labview\)](http://www.ni.com/gettingstarted/labviewbasics/esa/(labview))

28/03/2012

<http://www.ni.com/gettingstarted/labviewbasics/esa/environment.htm>

04/04/2012