

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO EXPERIMENTAL  
DIDÁCTICO DE ESTRUCTURAS MODELO TIPO ARMADURA Y  
PÓRTICO, PARA EL LABORATORIO DE RESISTENCIA DE  
MATERIALES DE LA FIME”**

**REALIZADO POR:**

**CÉSAR ANDRÉS GARCÉS ROCHA  
PABLO PATRICIO IZURIETA POLANCO**

**DIRECTOR: ING. CARLOS SUNTAXI  
CODIRECTOR: ING. JORGE CORREA**

**Sangolquí, 02-02-2007**

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

**El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO EXPERIMENTAL DIDÁCTICO DE ESTRUCTURAS MODELO TIPO ARMADURA Y PÓRTICO, PARA EL LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES DE LA FIME” fue realizado en su totalidad por los señores César Andrés Garcés Rocha y Pablo Patricio Izurieta Polanco como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.**

---

**Ing. Carlos Suntaxi**  
**DIRECTOR**

---

**Ing. Jorge Correa**  
**CODIRECTOR**

## **LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO EXPERIMENTAL DIDÁCTICO DE ESTRUCTURAS MODELO TIPO ARMADURA Y PÓRTICO, PARA EL LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES DE LA FIME ”.**

**ELABORADO POR:**

---

**Sr. César Andrés Garcés Rocha**

---

**Sr. Pablo Patricio Izurieta Polanco**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

---

**COORDINADOR DE CARRERA**

## DEDICATORIA

Esta dedicatoria es por toda mi vida y este proyecto es parte de ella, por eso dedico todo este trabajo primeramente a DIOS porque simplemente me ha bendecido con la oportunidad de vivir y sin él en mi corazón no estaría culminando esta etapa fuerte pero a la vez tan linda de mi vida.

A mi pa César Enrique y a mi ma Amparito del Carmen por brindarme el privilegio de vivir, por estar a mi lado en todos los momentos e inculcar en mí valores tan nobles que han sido una fortaleza en todos los aspectos de mi vida, por enseñarme la sencillez, humildad y fortaleza con la que debo enfrentar los retos que se me presentan en el camino y el orgullo que debo sentir cuando llego a cumplir mis metas porque eso conlleva el haberme levantado una y otra vez después de cada tropiezo, el aceptar y aprender de mis errores para ser un poquito mejor cada instante de mi vida. Sencillamente a mis padres por ser el ejemplo más grande, noble, digno y hermoso que DIOS puso en mi vida, y ser ese motorcito que me empuja cada segundo, cada minuto, cada hora y cada día. Los quiero, los adoro, los amo.

A todos mis familiares, mis abuelitos, los que están aquí y los que me cuidan desde el cielo, a mis primos y primas que realmente han sido mis hermanos, de los que he aprendido muchas cosas que forman parte de mí y con los cuales compartí y sigo compartiendo momentos de los más hermosos de mi vida.

A mis compañeros de la U, más que compañeros amigos y hermanos, que me han apoyado durante estos últimos años de mi vida tanto en el aspecto académico como personal, y con los cuales he vivido momentos inolvidables.

A todos mis amigos y amigas que formaron y forman parte de mi vida, que estuvieron en momentos muy especiales y son parte de recuerdos tan lindos que llevo en mi corazón.

César Andrés

Ahora que culmino una etapa importante de mi vida quiero dedicar el presente proyecto a mis padres Patricio y Pilar, a mis hermanos Lenin, Kathy, e Isabel y a la mujer que amo con todo mi corazón mi novia Sol, quienes han sido mi guía y mi apoyo a lo largo de toda mi vida.

A mis padres, por haber sido los pilares fundamentales de este logro, quienes con su amor y trabajo diario supieron inculcarme valores para ser un mejor ser humano.

A mis hermanos, por siempre haberme apoyado y brindado sus consejos cuando más los necesite; y

Al amor de mi vida Sol, mi felicidad y mi alegría quien con su amor, comprensión y confianza me ha dado las fuerzas necesarias para seguir adelante y conseguir las metas trazadas.

Pablo Patricio

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos primero a Dios por darnos la sabiduría y perseverancia para alcanzar nuestras metas y hacer que día a día crezcamos como personas de bien.

A nuestras familias ya que han sido nuestra fuente de inspiración y fortaleza para alcanzar nuestros ideales.

A nuestros amigos que han dedicado su tiempo para ayudarnos y aconsejarnos, además de darnos las fuerzas necesarias de seguir con pasos firmes hacia los objetivos planteados.

A la Escuela Politécnica del Ejército especialmente a la Facultad de Ingeniería Mecánica por acogernos en sus aulas y brindarnos una educación de excelencia.

A nuestro Director y Co-director de tesis por habernos brindado sus conocimientos y todo el apoyo para culminar de la mejor manera este proyecto, además de convertirse en más que profesores en verdaderos amigos.

Y al Sr. Andrés Guachamín por haber sido una persona fundamental para la culminación de nuestro proyecto, por brindarnos sus sabios consejos y ayudarnos a lo largo de la realización del mismo.

César Andrés y Pablo Patricio

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xix
NOMENCLATURA.....	xxi
RESUMEN.....	xxiii
<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>25</b>
1.1. ANTECEDENTES.....	25
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	26
1.3. OBJETIVOS.....	26
1.3.1. GENERAL.....	26
1.3.2. ESPECÍFICOS.....	26
1.4. ALCANCE DEL PROYECTO.....	27
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	27

<b>2. DISEÑO DE ARMADURA Y PÓRTICO MODELOS .....</b>	<b>31</b>
2.1. ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA.....	31
2.1.1. ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA LA ARMADURA .....	31
2.1.1.1. COMPONENTES ESTRUCTURALES .....	31
2.1.1.2. ARMADURA .....	32
2.1.1.3. PRIMERA ALTERNATIVA.....	34
2.1.1.4. SEGUNDA ALTERNATIVA .....	34
2.1.1.5. TERCERA ALTERNATIVA.....	35
2.1.2. ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA EL PÓRTICO .....	35
2.1.2.1. ARCOS.....	35
2.1.2.2. PÓRTICO .....	37
2.1.2.3. PRIMERA ALTERNATIVA.....	38
2.1.2.4. SEGUNDA ALTERNATIVA .....	38
2.1.2.5. TERCERA ALTERNATIVA.....	39
2.1.2.6. CUARTA ALTERNATIVA .....	40
2.2. ALTERNATIVAS DE MATERIALES.....	40
2.2.1. ALUMINIO.....	41
2.2.2. ACERO ESTRUCTURAL.....	42
2.3. MATRIZ ELEMENTAL DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	43
2.3.1. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA ARMADURA.....	44
2.3.1.1. CARACTERÍSTICAS PARA MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA ARMADURA .....	44
2.3.2. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES PARA ARMADURA.....	46
2.3.2.1. CARACTERÍSTICAS PARA MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES PARA ARMADURA.....	46
2.3.3. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA PÓRTICO.....	48
2.3.3.1. CARACTERÍSTICAS PARA MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA PÓRTICO .....	48
2.3.4. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES PARA PÓRTICO.....	50



2.3.4.1. CARACTERÍSTICAS PARA MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES PARA PÓRTICO .....	50
2.4. ANÁLISIS DE CARGAS .....	52
2.4.1. FUNDAMENTOS Y DEFINICIONES.....	52
2.4.1.1. FUERZAS ESTRUCTURALES.....	52
2.4.1.2. TIPOS DE CARGAS ESTRUCTURALES .....	52
2.4.1.3. TIPOS DE SOPORTE .....	53
2.4.1.4. ESTABILIDAD, DETERMINACIÓN E INDETERMINACIÓN .....	54
2.4.1.5. INESTABILIDAD GEOMÉTRICA.....	55
2.4.1.6. DETERMINACIÓN ESTÁTICA DE LAS ARMADURAS .....	55
2.4.2. ANÁLISIS DE CARGAS DE LA ARMADURA .....	57
2.4.2.1. CÁLCULO DE LAS REACCIONES EN LOS APOYOS .....	59
2.4.2.2. CÁLCULO DE LAS FUERZAS AXIALES EN CADA UNO DE LOS ELEMENTOS .....	60
2.4.3. ANÁLISIS DE CARGAS DEL PÓRTICO.....	65
2.4.3.1. CÁLCULO DE LAS REACCIONES EN LOS APOYOS Y EN LA ARTICULACIÓN.....	67
2.4.3.2. CÁLCULO DE MOMENTOS, CARGA AXIAL Y FUERZA CORTANTE.....	69
2.5. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA.....	78
2.5.1. DISEÑO DE LA ARMADURA .....	78
2.5.1.1. ÁREA MÍNIMA.....	78
2.5.1.2. MÉTODO DEL ESFUERZO PERMISIBLE .....	79
2.5.1.3. CARGA MÁXIMA.....	80
2.5.2. DISEÑO DEL PÓRTICO .....	80
2.5.2.1. ÁREA MÍNIMA.....	80
2.5.2.2. MÉTODO DEL ESFUERZO PERMISIBLE .....	82
2.5.2.3. CARGA MÁXIMA.....	82
2.6. PLANOS DE FABRICACIÓN .....	86
<b>3. DISEÑO DE BASTIDOR METÁLICO.....</b>	<b>87</b>
3.1. ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA .....	87
3.1.1. PRIMERA ALTERNATIVA .....	87

3.1.2. SEGUNDA ALTERNATIVA.....	88
3.2. ALTERNATIVAS DE MATERIALES.....	89
3.2.1. ACERO ESTRUCTURAL.....	89
3.3. MATRIZ ELEMENTAL DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	90
3.3.1. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA .	90
3.3.1.1. CARACTERÍSTICAS PARA MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA .....	90
3.3.2. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES	92
3.4. ANÁLISIS DE CARGAS .....	92
3.5. DISEÑO DEL BASTIDOR .....	94
3.5.1. ALTURA DE CARGA APLICADA.....	95
3.5.2. DISTANCIA EN LA BASE DEL BASTIDOR.....	96
3.5.3. CARGA MÁXIMA .....	98
3.6. PLANOS DE FABRICACIÓN .....	99
<b>4. CONSTRUCCIÓN.....</b>	<b>101</b>
4.1. DIAGRAMAS DE PROCESOS DE FABRICACIÓN Y MONTAJE.....	101
4.1.1. DIAGRAMA DE PROCESOS DE FABRICACIÓN Y MONTAJE DE LA ARMADURA .....	102
4.1.2. DIAGRAMA DE PROCESOS DE FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL PÓRTICO.....	104
4.1.3. DIAGRAMA DE PROCESOS DE FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL BASTIDOR.....	105
4.2. CONSTRUCCIÓN.....	106
4.2.1. CONSTRUCCIÓN DE ARMADURA .....	106
4.2.1.1. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS .....	106
4.2.1.2. CONSTRUCCIÓN DE PLACAS .....	108
4.2.1.3. CONSTRUCCIÓN DE GANCHOS .....	110
4.2.2. CONSTRUCCIÓN DE PÓRTICO.....	111
4.2.2.1. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS .....	111
4.2.2.2. ACOPLAMIENTO DE BUJES.....	113
4.2.2.3. CONSTRUCCIÓN DE GANCHOS .....	114
4.2.3. CONSTRUCCIÓN DE BASTIDOR.....	115

4.2.3.1. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS .....	115
4.2.3.2. CONSTRUCCIÓN DE PLANCHA .....	117
4.2.3.3. COLOCACIÓN DE REGATONES .....	117
4.2.4. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS ANEXOS .....	119
4.2.4.1. CONSTRUCCIÓN DE APOYOS .....	119
4.2.4.2. CONSTRUCCIÓN DE SOPORTES PARA COMPARADORES DE RELOJ .....	120
4.2.4.3. CONSTRUCCIÓN DE POLEA Y SOPORTE .....	122
4.2.4.4. CONSTRUCCIÓN DE PLACA BASE PARA APOYO TIPO RODILLO .....	123
4.2.4.5. CONSTRUCCIÓN DE GUÍAS Y SOPORTES .....	123
4.2.4.6. CONSTRUCCIÓN DE PESAS .....	124
4.2.4.7. CONSTRUCCIÓN DE PORTA PESAS .....	126
4.2.4.8. COLOCACIÓN DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS .....	127
4.3.  ENSAMBLAJE DE ELEMENTOS .....	130
4.3.1. ENSAMBLAJE DE LA ARMADURA .....	130
4.3.2. ENSAMBLAJE DEL PÓRTICO .....	132
4.3.3. ENSAMBLAJE DE ARMADURA EN BASTIDOR .....	135
4.3.4. ENSAMBLAJE DE PÓRTICO EN BASTIDOR .....	138
<b>5.  ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>143</b>
5.1.  PRUEBAS PRÁCTICAS .....	143
5.1.1. PRUEBAS PRÁCTICAS DE LA ARMADURA .....	145
5.1.2. PRUEBAS PRÁCTICAS DEL PÓRTICO .....	150
5.2.  ANÁLISIS COMPUTACIONAL .....	153
5.2.1. ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LA ARMADURA .....	154
5.2.2. ANÁLISIS COMPUTACIONAL DEL PÓRTICO .....	169
5.3.  COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....	184
5.3.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON RESULTADOS COMPUTACIONALES DE LA ARMADURA .....	184
5.3.1.1. ERROR DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN LOS APOYOS .....	184
5.3.1.2. ERROR DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN LOS NUDOS .....	185

5.3.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON RESULTADOS COMPUTACIONALES DEL PÓRTICO.....	187
5.3.2.1. ERROR DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN LOS APOYOS .....	187
5.3.2.2. ERROR DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN LOS NUDOS .....	188
5.3.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON RESULTADOS TEÓRICOS DE LA ARMADURA .....	190
5.3.3.1. ERROR DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN LOS APOYOS .....	190
5.3.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON RESULTADOS TEÓRICOS DEL PÓRTICO.....	191
5.3.4.1. ERROR DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN LOS APOYOS .....	191
<b>6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO .....</b>	<b>193</b>
6.1. ANÁLISIS ECONÓMICO .....	193
6.1.1. COSTOS DIRECTOS .....	193
6.1.1.1. MATERIA PRIMA DIRECTA.....	193
6.1.1.2. MANO DE OBRA DIRECTA.....	194
6.1.2. COSTOS INDIRECTOS.....	194
6.1.2.1. HONORARIO A PROFESIONALES.....	194
6.1.2.2. USO DE MAQUINARIA Y EQUIPOS DE LABORATORIO.....	194
6.1.2.3. MISCELÁNEOS.....	195
6.2 ANÁLISIS FINANCIERO.....	195
6.2.1 ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO REALIZADO.....	195
6.2.1.1. BENEFICIO DEL SISTEMA .....	196
6.2.1.2. BENEFICIO DE LA CARRERA .....	196
6.2.1.3. BENEFICIO DE LA ESPE .....	197
6.2.1.4. BENEFICIO DE LA ESPE EN LOS PRÓXIMOS 10 AÑOS.....	197

<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>199</b>
7.1. CONCLUSIONES .....	199
7.2. RECOMENDACIONES.....	200
7.3. BIBLIOGRAFÍA.....	201
7.4. ANEXOS.....	202

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Armadura de Puente.....	33
Figura 2.2 Armadura de siete elementos y cinco nodos.....	34
Figura 2.3 Armadura de trece elementos y ocho nodos.....	34
Figura 2.4 Armadura de doce elementos y siete nodos.....	35
Figura 2.5 Arco de Piedra.....	36
Figura 2.6 Pórtico para Edificación.....	37
Figura 2.7 Pórtico de tres elementos.....	38
Figura 2.8 Pórtico de tres elementos y dos soportes externos.....	39
Figura 2.9 Pórtico de tres elementos y dos soportes internos.....	39
Figura 2.10 Pórtico de cuatro elementos y dos soportes internos.....	40
Figura 2.11 Armadura para análisis estructural.....	59
Figura 2.12 Sección 1.....	61
Figura 2.13 Nodo C.....	62
Figura 2.14 Sección 2.....	63
Figura 2.15 Nodo D.....	64
Figura 2.16 Pórtico para análisis estructural.....	67
Figura 2.17 Sección A-C.....	68
Figura 2.18 DCL de la porción A-D.....	70
Figura 2.19 DCL1 del nudo D.....	71
Figura 2.20 DCL2 del nudo D.....	72
Figura 2.21 DCL1 del elemento DC.....	72
Figura 2.22 DCL2 del elemento DC.....	73
Figura 2.23 DCL de la porción B-E.....	74
Figura 2.24 DCL1 del nudo E.....	75
Figura 2.25 DCL2 del nudo E.....	76
Figura 2.26 DCL1 del elemento DC.....	76
Figura 2.27 DCL2 del elemento DC.....	77
Figura 2.28 Elemento DB.....	78
Figura 2.29 DCL del elemento DC.....	81
Figura 3.1 Primera alternativa de bastidor.....	87
Figura 3.2 Segunda alternativa de bastidor.....	88

Figura 3.3 Vistas de Bastidor.....	92
Figura 3.4 DCL Bastidor con cargas.....	93
Figura 3.5 DCL1 Bastidor vista lateral.....	94
Figura 3.6 DCL2 Bastidor vista lateral.....	96
Figura 3.7 Bastidor con elemento sometido a carga.....	98
Figura 4.1 Simbología de Diagramas de Procesos.....	101
Figura 4.2 Diagrama de procesos de fabricación y montaje de la armadura..	103
Figura 4.3 Diagrama de procesos de fabricación y montaje del pórtico.....	104
Figura 4.4 Diagrama de procesos de fabricación y montaje del bastidor.....	105
Figura 4.5 Platina de Aluminio.....	107
Figura 4.6 Elementos de la armadura.....	107
Figura 4.7 Plancha de acero.....	108
Figura 4.8 Perforación de agujeros en taladro.....	109
Figura 4.9 Placas de Acero.....	109
Figura 4.10 Cable de Acero y Grillete.....	110
Figura 4.11 Gancho tipo lazo con grillete.....	110
Figura 4.12 Acero estructural de sección cuadrada.....	112
Figura 4.13 Elementos del pórtico.....	112
Figura 4.14 Buje soldado al extremo de uno de los elementos del pórtico.....	113
Figura 4.15 Bujes en ambos elementos del pórtico.....	113
Figura 4.16 Gancho para secciones horizontales.....	114
Figura 4.17 Gancho para secciones inclinadas.....	114
Figura 4.18 Elementos soldados del bastidor.....	116
Figura 4.19 Bastidor.....	116
Figura 4.20 Plancha de acero del bastidor.....	117
Figura 4.21 Regatones de caucho.....	118
Figura 4.22 Colocación de regatones en bastidor.....	118
Figura 4.23 Apoyos tipo pasador.....	119
Figura 4.24 Apoyo tipo rodillo.....	120
Figura 4.25 Soporte para comparador de reloj con sistema de sujeción excéntrico mediante palanca.....	121
Figura 4.26 Vástagos con soportes ajustables para comparadores de reloj...	121
Figura 4.27 Sistema montado de soporte para comparador de reloj.....	121
Figura 4.28 Sistema montado de soporte y polea.....	122

Figura 4.29 Polea para cable acerado.....	122
Figura 4.30 Placa base para apoyo tipo rodillo.....	123
Figura 4.31 Soporte para guías.....	124
Figura 4.32 Guías en soporte.....	124
Figura 4.33 Pesas.....	125
Figura 4.34 Pesas de 5 kg.....	125
Figura 4.35 Pesas de 2,5 kg.....	125
Figura 4.36 Porta pesas.....	126
Figura 4.37 Porta pesas con carga.....	126
Figura 4.38 Lijado de superficies.....	128
Figura 4.39 Trazado de marcas referenciales en superficies.....	129
Figura 4.40 Colocación de galga y lámina sobre superficie.....	129
Figura 4.41 Galgas extensiométricas en apoyos tipo pasador y apoyo tipo rodillo.....	129
Figura 4.42 Galga extensiométrica en elemento de la armadura.....	130
Figura 4.43 Ensamblaje de placas con elementos y ganchos de la armadura.....	131
Figura 4.44 Elementos de la armadura dirigidos hacia el nudo en cada una de las placas.....	131
Figura 4.45 Armadura ensamblada.....	132
Figura 4.46 Acople de ganchos en elementos.....	133
Figura 4.47 Elementos con ganchos.....	133
Figura 4.48 Ensamblaje de elementos del pórtico.....	134
Figura 4.49 Pórtico ensamblado.....	134
Figura 4.50 Ensamble de apoyo tipo pasador a bastidor.....	136
Figura 4.51 Acople de armadura en apoyos y colocación de porta pesas.....	136
Figura 4.52 Ensamble de soporte, polea y nivelación horizontal de cable de gancho.....	136
Figura 4.53 Ensamble de guías y soportes.....	137
Figura 4.54 Acople de vástagos y de comparadores de reloj.....	137
Figura 4.55 Armadura y elementos anexos ensamblados en bastidor.....	137
Figura 4.56 Ensamble de apoyos tipo pasador a bastidor.....	139
Figura 4.57 Ensamble de pórtico en apoyos.....	139
Figura 4.58 Colocación de porta pesas.....	139



Figura 4.59 Acople de guías y soportes.....	140
Figura 4.60 Verificación de elementos verticales con nivelador.....	140
Figura 4.61 Acople de vástagos y de comparadores de reloj.....	140
Figura 4.62 Pórtico y elementos anexos ensamblados en bastidor.....	141
Figura 5.1 Armadura con parámetros indicados.....	145
Figura 5.2 Carga VS Deformación unitaria con Tensiómetro de 50 lb.....	147
Figura 5.3 Carga VS Deformación unitaria con Tensiómetro de 250 lb para Apoyo de tipo pasador.....	148
Figura 5.4 Carga VS Deformación unitaria con Tensiómetro de 250 lb para Apoyo de tipo rodillo.....	149
Figura 5.5 Pórtico con parámetros indicados.....	150
Figura 5.6 Carga VS Deformación unitaria con Tensiómetro de 50 lb para Apoyos de tipo pasador.....	152
Figura 5.7 RISA – 2D.....	153
Figura 5.8 Armadura en AutoCAD 2005 como DXF.....	154
Figura 5.9 Inicio del software RISA – 2D.....	155
Figura 5.10 Procedimiento para importar archivo DXF.....	155
Figura 5.11 Ventana Import DXF File.....	156
Figura 5.12 Ventana Global Parameters.....	156
Figura 5.13 Armadura con nudos numerados automáticamente.....	157
Figura 5.14 Ventana Units Selection.....	157
Figura 5.15 Procedimiento para modificar miembros de la armadura.....	158
Figura 5.16 Ventana Modify Properties for the Selected Members.....	158
Figura 5.17 Ventana Shape Selection.....	159
Figura 5.18 Ventana Add Shape.....	159
Figura 5.19 Armadura con miembros dibujados.....	160
Figura 5.20 Ventana Modify Boundary Conditions for the Selected Joints.....	160
Figura 5.21 Armadura con miembros y apoyos seleccionados.....	162
Figura 5.22 Ventana Basic Load Cases.....	162
Figura 5.23 Ventanas Load Combinations y Set BLC Entry.....	163
Figura 5.24 Ventana Loads/Deflections/Masses for Joints.....	164
Figura 5.25 Armadura con cargas, elementos y apoyos definidos.....	164
Figura 5.26 Ventana General Material Properties.....	165
Figura 5.27 Ventana Solution Choices.....	166

Figura 5.28 Programa analizando la armadura.....	166
Figura 5.29 Resultados del programa.....	167
Figura 5.30 Reacciones en los apoyos.....	167
Figura 5.31 Desplazamientos de los nudos.....	167
Figura 5.32 Fuerzas en los miembros.....	168
Figura 5.33 Pórtico en AutoCAD 2005 como DXF.....	169
Figura 5.34 Pórtico con nudos numerados automáticamente.....	170
Figura 5.35 Ventana Units Selection.....	170
Figura 5.36 Ventana Information for Member.....	171
Figura 5.37 Pórtico con representación de pasador en nudo superior.....	171
Figura 5.38 Ventana Modify Properties for the Selected Members.....	172
Figura 5.39 Ventana Add Shape.....	173
Figura 5.40 Ventana Shape Selection con nombre de sección creada.....	173
Figura 5.41 Pórtico con miembros dibujados.....	174
Figura 5.42 Ventana Modify Boundary Conditions for the Selected Joints.....	174
Figura 5.43 Pórtico con miembros y apoyos seleccionados.....	175
Figura 5.44 Ventana Basic Load Cases.....	175
Figura 5.45 Ventanas Load Combinations y Set BLC Entry.....	176
Figura 5.46 Ventana Point Loads for Selected Members.....	177
Figura 5.47 Pórtico con cargas, elementos y apoyos definidos.....	177
Figura 5.48 Ventana Hot Rolled Steel Properties.....	178
Figura 5.49 Ventana Solution Choices.....	179
Figura 5.50 Programa analizando el pórtico.....	179
Figura 5.51 Resultados del programa.....	180
Figura 5.52 Reacciones en los apoyos.....	180
Figura 5.53 Desplazamientos de los nudos.....	181
Figura 5.54 Fuerzas en los miembros.....	181
Figura 5.55 Ventana Detail Report for M2.....	182
Figura 5.56 Gráfica de Fuerza Axial para M2.....	183
Figura 5.57 Gráfica de Fuerza Cortante para M2.....	183
Figura 5.58 Gráfica de Momento Flector para M2.....	183
Figura 5.59 Semejanza de triángulos en desplazamiento de apoyos.....	185

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Sistema de puntaje en las matrices de selección.....	43
Tabla 2.2 Matriz de selección de alternativas de geometría para armadura....	45
Tabla 2.3 Matriz de selección de alternativas de materiales para armadura....	47
Tabla 2.4 Matriz de selección de alternativas de geometría para pórtico.....	49
Tabla 2.5 Matriz de selección de alternativas de materiales para pórtico.....	51
Tabla 3.1 Matriz de selección de alternativas de geometría para bastidor.....	91
Tabla 3.2 Fuerzas y Distancias para diseño de base de bastidor.....	97
Tabla 5.1 Tabla de datos obtenidos en pruebas prácticas de la armadura.....	145
Tabla 5.2 Tabla de datos obtenidos con Tensiómetro de 50 lb para Apoyo de tipo pasador.....	146
Tabla 5.3 Tabla de datos obtenidos con Tensiómetro de 250 lb para Apoyo de tipo pasador.....	148
Tabla 5.4 Tabla de datos obtenidos con Tensiómetro de 250 lb para Apoyo de tipo rodillo.....	148
Tabla 5.5 Tabla de resultados obtenidos en armadura.....	149
Tabla 5.6 Tabla de datos obtenidos en pruebas prácticas del pórtico.....	150
Tabla 5.7 Tabla de datos obtenidos con Tensiómetro de 50 lb para Apoyos de tipo pasador.....	151
Tabla 5.8 Tabla de resultados obtenidos en pórtico.....	152
Tabla 5.9 Valores de pruebas prácticas, computacionales y su error porcentual.....	184
Tabla 5.10 Error porcentual entre valor computacional y experimental.....	186
Tabla 5.11 Error porcentual entre valor computacional y experimental.....	187
Tabla 5.12 Valores de pruebas prácticas, computacionales y su error porcentual.....	188
Tabla 5.13 Error porcentual entre valor computacional y experimental.....	189
Tabla 5.14 Error porcentual entre valor computacional y experimental.....	189
Tabla 5.15 Valores de pruebas prácticas, valores teóricos y su error porcentual.....	190

Tabla 5.16 Valores de pruebas prácticas, valores teóricos y su error porcentual.....	191
Tabla 6.1 Costos Materiales.....	193
Tabla 6.2 Costos Manufactura.....	194
Tabla 6.3 Remuneración a estudiantes.....	194
Tabla 6.4 Honorarios a Profesionales.....	194
Tabla 6.5 Uso de Maquinaria y Equipos de Laboratorio.....	194
Tabla 6.6 Costos Misceláneos.....	195

## NOMENCLATURA

$S_y$	Límite de resistencia a la fluencia
$F.S.$	Factor de seguridad
$F$	Fuerza normal a la sección transversal en la armadura
$A$	Área transversal
$A_x, A_y$	Reacciones en el apoyo A
$B_x, B_y$	Reacciones en el apoyo B
$D_x, D_y, E_y$	Cargas externas aplicadas a la armadura
$F_1, F_2, F_3, F_4$	Cargas externas aplicadas al pórtico
$P$	Fuerza axial en el pórtico
$V$	Fuerza cortante
$M$	Momento flector
$\tau_{max}$	Cortante máximo
$\sigma_x(P)$	Esfuerzo normal debido a la fuerza axial P
$\tau_{xy}$	Esfuerzo normal debido a la fuerza axial V
$\sigma_x(M)$	Esfuerzo normal producido por flexión
$\sigma$	Esfuerzo normal total a lo largo del eje x
$N$	Fuerza normal
$p$	Peso
$f$	Fuerza de rozamiento
$u$	Coeficiente de rozamiento
$H$	Altura que debe tener el bastidor para que no se vuelque
$X$	Distancia mínima que debe tener la base del bastidor para no volcarse
$dc$	Desplazamiento que miden los comparadores de reloj
$\xi$	Deformación unitaria
$E$	Módulo de elasticidad
$da$	Desplazamiento de los apoyos
$dN$	Desplazamiento de los nodos

$s$	Coeficiente de seguridad a la rotura de los cables
$dk$	Diámetro del cable
$T$	Carga total a la que está sometido el cable
$k$	Coeficiente del cable según su uso
$D$	Diámetro de la polea
$\sigma'$	Esfuerzo Von Mises
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Esfuerzos principales
$kt$	Concentrador de esfuerzos
$\phi$	Diámetro del eje
$d$	Distancia a la que van ir ubicadas las galgas extensiométricas en los apoyos
$F$	Fuerza aplicada sobre los apoyos en el diseño de ejes
$Y$	Distancia de la línea neutra al extremo libre
$I$	Inercia
$P_1, P_2$	Fuerzas cortantes sobre la sección de los apoyos
$M_x, M_y$	Momentos alrededor de los ejes x,y
$\sigma_z$	Esfuerzo normal en la dirección del eje z

## RESUMEN

La funcionalidad que brindan las estructuras tipo armadura y pórtico en la vida diaria, hacen que el estudio se extienda cada día más en pos de un mejor conocimiento científico práctico, brindando de esta manera diferentes alternativas para mejorar nuestra calidad de vida.

Por tal razón el propósito del presente proyecto ha sido aplicar los conocimientos adquiridos en clases referente al análisis estructural para armaduras y pórticos, y con un sustento computacional, comparar los resultados teóricos prácticos, de tal forma que se pueda reafirmar los conocimientos adquiridos y estar seguros de obtener resultados confiables para la ejecución de un determinado proyecto.

El diseño y construcción del equipo experimental didáctico de estructuras modelo tipo armadura-pórtico, se lo ha realizado para complementar los resultados teóricos con los resultados prácticos y computacionales.

Una vez conocido a quién y el espacio al cuál va dirigido el presente proyecto lo que se hizo es buscar en el mercado los materiales que se ajusten a las necesidades y poder empezar el diseño. Para esto lo que se hizo primero fue dimensionar el bastidor en el cual va a ir asentada tanto la armadura como el pórtico, una vez hecho esto se procedió a realizar el diseño de la armadura.

En la armadura como primer paso lo que necesitaba definir es un modelo usado en la práctica y que no brinde mayores restricciones, esté hecha de un material que por condiciones didácticas permita obtener resultados apreciables y los elementos se encuentren en un solo plano. Para esto lo que se hizo fue fabricar la armadura de aluminio por sus condiciones de ofrecer menor resistencia y una larga vida útil a comparación de otros materiales y los elementos unir mediante placas, las cuales van ubicadas en los nodos de la armadura y sujetas mediante pernos.

En lo que se refiere al pórtico lo que se buscó de igual manera es un modelo en los que intervengan fuerzas en diferentes direcciones, momentos para un mayor análisis, buscando sea lo más beneficioso para el estudiante, que permita una buena apreciación de los resultados en las pruebas prácticas que por su composición no era necesario buscar un material que ofrezca menor resistencia si no más bien lo que se hizo es utilizar un material usado en la vida práctica, el acero estructural. De esta manera se logró que tanto la armadura como el pórtico tengan las condiciones de diseño apropiadas.

Posterior a esto se necesitaba definir un procedimiento para medir las reacciones en los apoyos tanto de la armadura como del pórtico, para lo cual se hizo el diseño de dos ejes, uno tipo pasador y otro tipo rodillo a los cuales se incorporó galgas extensiométricas que permiten medir una deformación unitaria al aplicar una carga, y de esta manera obtener las reacciones en los apoyos.

Una vez realizado el diseño se procedió a realizar la construcción del equipo como de elementos de sujeción con instrumentos de precisión para que las propiedades de cada uno de los elementos sean estables y obtener resultados correctos.

En lo que se refiere a las pruebas prácticas se utilizó el equipo medidor de deformación unitaria OMEGA DMD-22, 10 CHANNEL, el cual permite obtener diez lecturas a la vez de deformaciones unitarias.

Para la comparación de resultados se utilizó el programa de análisis estructural RISA-2D, el cual nos permite modelar todos y cada uno de los comportamientos que se le da a la estructura.

Para finalizar se realizó el análisis económico financiero para ver su viabilidad, para lo cual se calculó el costo de elaboración del proyecto por un valor aproximado de 3596 dólares, y luego se procedió a elaborar el flujo de caja presupuestado a 10 años obteniéndose un VAN de 3629.44 dólares, un TIR de 35% en un tiempo de recuperación de la inversión de dos años, con lo cual se justifica la ejecución del proyecto.



# **CAPÍTULO I**

## **1. GENERALIDADES**

### **ANTECEDENTES**

En la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPE se imparte la asignatura de Mecánica de Materiales, la cual es una rama de la Ingeniería que estudia el comportamiento mecánico de los cuerpos sólidos sometidos a diversas cargas.

La Facultad dispone de la infraestructura que se requiere para que el estudiante desarrolle los procesos de aprendizaje y aplique en la práctica el conocimiento científico. La FIME cuenta con nueve laboratorios en donde los alumnos realizan prácticas programadas que garantizan una sólida formación profesional. Uno de estos laboratorios es el de Resistencia de Materiales en el cual se realizan diversas prácticas con el fin de determinar las características mecánicas de los materiales, esto como complemento a la parte teórica de la asignatura Mecánica de los Materiales.

Existen prácticas que se realizan en el laboratorio de Resistencia de Materiales, donde se utilizan como referencia equipos experimentales como una armadura de aluminio y un pórtico soldado de acero. En estas prácticas no se toman datos sino que se utilizan los equipos para conocer su forma, geometría y materiales, con lo cual mediante una guía de laboratorio se procede a calcular teóricamente valores de reacciones, fuerzas y deformaciones, los cuales en forma práctica se podrían conocer utilizando instrumentos de medición como comparadores de reloj y dinamómetros, para posteriormente ser comparados con los valores obtenidos de forma teórica con el fin de cumplir los objetivos propuestos en las prácticas.

El sistema experimental y didáctico propuesto en el presente proyecto constará de: una armadura, un pórtico y un bastidor metálicos, los cuales serán

diseñados y contruidos de tal forma que se puedan acoplar correctamente de una manera fácil entre sí y con los diferentes instrumentos de medición utilizados en las prácticas de laboratorio. Este sistema además será diseñado con la ayuda de un software para estructuras, con lo cual los alumnos tendrán una referencia computacional, a más de la teórica para las prácticas realizadas en laboratorio.

## **DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

La armadura de aluminio y el pórtico de acero existentes en el laboratorio de Resistencia de Materiales que sirven como referencia visual, están deteriorados por el tiempo y no brindan las facilidades que deberían tener los alumnos para desarrollar las prácticas correspondientes. Los alumnos no trabajan en estos equipos de una forma experimental por lo cual tampoco utilizan instrumentos de medición, razones por las que se necesita implementar un sistema capaz de brindar estas facilidades y cubrir los requerimientos que demanden las diferentes prácticas de laboratorio.

## **OBJETIVOS**

### **1.3.1. GENERAL**

- Diseñar y construir un equipo experimental didáctico de estructuras modelo para el laboratorio de Resistencia de Materiales de la FIME.

### **1.3.2. ESPECÍFICOS**

- Diseñar y construir una armadura modelo didáctica, tomando en cuenta las características que debe cumplir a fin de que sea implementada como equipo experimental en el laboratorio de Resistencia de Materiales.

- Diseñar y construir un pórtico modelo didáctico, a fin de que cumpla con los requerimientos para que pueda ser utilizado en las prácticas correspondientes en el laboratorio de Resistencia de Materiales.
- Diseñar y construir un bastidor metálico que pueda ser utilizado en conjunto con las estructuras propuestas en el presente proyecto con la finalidad de evaluar sus funcionalidades de una forma experimental y computacional.

## **ALCANCE DEL PROYECTO**

Con el desarrollo del presente proyecto se llegará a diseñar y construir un equipo experimental didáctico de estructuras modelo para el laboratorio de Resistencia de Materiales de la FIME, con lo cual se podrá realizar las diferentes prácticas experimentales que corresponden al equipo antes mencionado y así descartar los inconvenientes y las dificultades que impedían realizarlas en los equipos existentes.

## **JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

En el laboratorio de Resistencia de Materiales de la FIME se realizan diferentes prácticas experimentales pero también se realizan algunas en las cuales sólo se utilizan como referencia visual algunos equipos entre los cuales se encuentra una armadura metálica modelo construida de aluminio, en estas prácticas no se utilizan instrumentos de medición como comparadores de reloj o dinamómetros, ya que el diseño de la armadura impide la utilización de los mismos, razón por la que no se puede obtener valores de reacciones, fuerzas y deformaciones de una forma experimental para poder compararlos con valores que sí son obtenidos de forma teórica, sino que son prácticas de cálculo netamente teórico, por tal motivo se requiere implementar un equipo que posea las características necesarias para poder cumplir con los objetivos propuestos.

En estas prácticas actualmente los alumnos trabajan sólo con valores teóricos, por lo cual no se puede establecer una comparación con valores experimentales que deberían ser obtenidos en laboratorio, además estos valores obtenidos de forma teórica son calculados en una armadura metálica ideal, lo que significa que se encuentra contenida en un solo plano, cosa que en forma física y real no se cumple con la armadura que se tiene en laboratorio, ya que los diferentes elementos que conforman la misma se encuentran en diferentes planos, por este motivo es necesario diseñar y construir una nueva en la que todos sus elementos trabajen en el mismo plano, de esta manera nos aproximamos a una armadura ideal.

De la misma forma se utiliza en prácticas un pórtico metálico modelo construido de acero, en el cual tampoco se toman valores de reacciones, fuerzas y deformaciones con instrumentos de medición, debido a que su diseño impide la utilización de los mismos, de la misma manera que en la armadura no se puede realizar una comparación entre los valores teóricos y experimentales.

La armadura y pórtico modelos existentes en laboratorio son equipos que además de ser independientes, por su diseño no facilitan la utilización de instrumentos de medición, razones por las que se necesita implementar todo un sistema que debe ser diseñado y construido específicamente para poder trabajar en conjunto tanto con la armadura como con el pórtico metálicos a diseñarse y construirse. Este sistema consistirá en un bastidor metálico que albergará en su estructura varios elementos que brindarán las facilidades necesarias para la colocación de los diferentes instrumentos de medición así como los elementos necesarios para la correcta ubicación de la armadura y pórtico nuevos.

Todo este sistema entonces estará constituido por: una armadura, un pórtico y un bastidor metálicos, además de elementos anexos; sistema que es necesario implementarlo en laboratorio para poder realizar las prácticas experimentales correspondientes. Este sistema también brindará todas las facilidades necesarias para poder trabajar con los diferentes instrumentos de medición, y también se trabajará con ambas estructuras dentro de un mismo

ambiente, a más de que los alumnos tendrían un apoyo computacional con un software para estructuras el cual ayudará a la realización del diseño, construcción y posteriores pruebas con todo el sistema en conjunto.



## CAPÍTULO II

### 2. DISEÑO DE ARMADURA Y PÓRTICO MODELOS

#### ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA

Para plantear las alternativas de geometría para la armadura y el pórtico primero se recordarán algunos principios básicos sobre lo que son las estructuras metálicas que van a analizarse en el presente proyecto.

#### 2.1.1. ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA LA ARMADURA

La ingeniería estructural abarca una extensa variedad de estructuras, aparte de puentes y edificios se pueden citar estadios, torres de transmisión de energía eléctrica, torres de radio y televisión, cables, arcos, tanques de agua, pavimentos de concreto, y muchas más.

#### 2.1.1.1. COMPONENTES ESTRUCTURALES<sup>1</sup>

Todos los sistemas estructurales están integrados por componentes. Las componentes principales de una estructura son las siguientes:

**2.1.1.1.1. Tirantes.-** Son miembros sometidos sólo a fuerzas axiales de tensión. Un tirante no está cargado a lo largo de su longitud y no puede resistir fuerzas generadas por flexión.

---

<sup>1</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 9-10.

**2.1.1.1.2. Puntales.-** Son miembros sometidos sólo a fuerza axiales de compresión. Al igual que un tirante, un puntal no está cargado a lo largo de su longitud y tampoco puede resistir fuerzas generadas por flexión.

**2.1.1.1.3. Vigas y trabes.-** Son miembros sometidos a fuerzas de flexión. Casi siempre son miembros horizontales sometidos principalmente a fuerzas de gravedad, aunque también pueden trabajar en posición inclinada.

**2.1.1.1.4. Columnas.-** Son miembros sometidos principalmente a fuerzas de compresión axial y también a fuerzas de flexión. Pueden ser verticales o inclinadas.

**2.1.1.1.5. Diafragmas.-** Son componentes formados por placas planas. Los diafragmas tienen una alta rigidez en su plano y se usan de manera común en pisos y muros cortantes. Los diafragmas suelen salvar claros entre vigas o columnas y pueden estar rigidizados con costillas para resistir mejor las fuerzas fuera de su plano.

Las componentes estructurales se ensamblan para formar sistemas estructurales.

## **2.1.1.2. ARMADURA<sup>2</sup>**

Una armadura es un tipo especial de marco estructural. Está compuesta enteramente de puntales y tirantes, es decir, todas sus componentes están conectadas de manera que están sometidas sólo a fuerzas axiales. Se supone que todas las cargas externas que actúan sobre las armaduras están aplicadas en sus nudos y no directamente a sus componentes, donde las primeras causarían flexión en los miembros de la armadura. La armadura es una estructura formada por un grupo de elementos estructurales dispuestos en

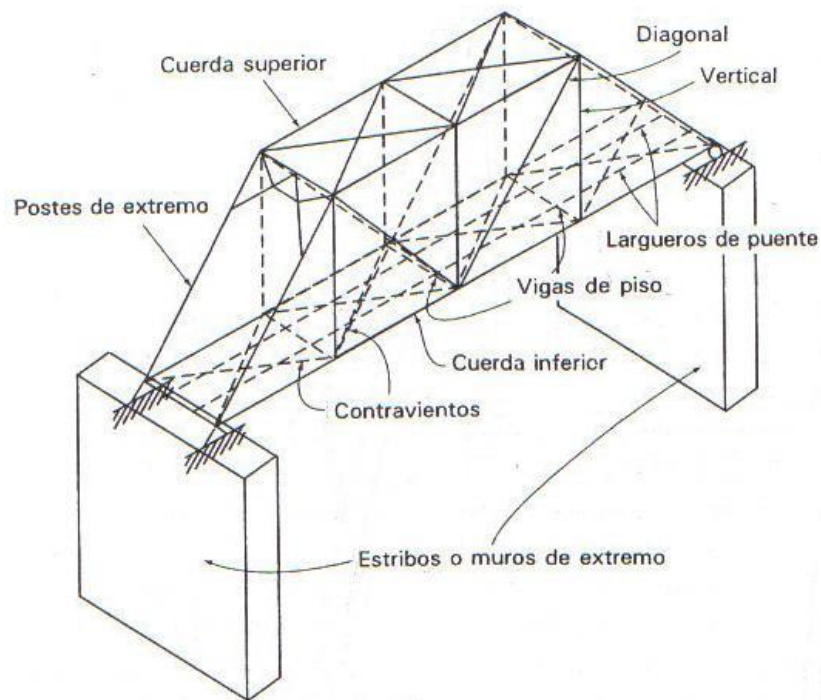
---

<sup>2</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 10, 146.



forma de uno o más triángulos. Como se supone que los elementos están conectados entre sí por medio de pasadores sin fricción, el triángulo es la única forma estable.

Ejemplo de Armadura:



**Figura 2.1 Armadura de Puente<sup>3</sup>**

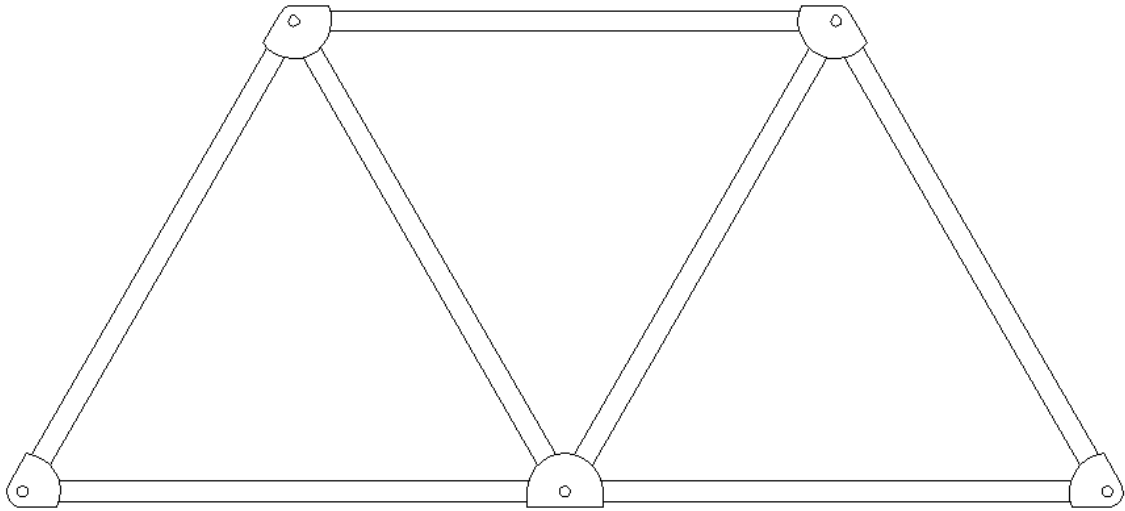
Se han planteado alternativas de geometría para la armadura tomando en cuenta que el diseño se basa en que todos sus elementos se encuentren en el mismo plano de acción, esto para ejemplificar lo que es una armadura ideal o una armadura plana.

En una armadura plana se practica todo lo que es el análisis y diseño estructural de las armaduras en dos dimensiones.

Las alternativas de armadura plana que se han planteado en el presente proyecto se muestran a continuación:

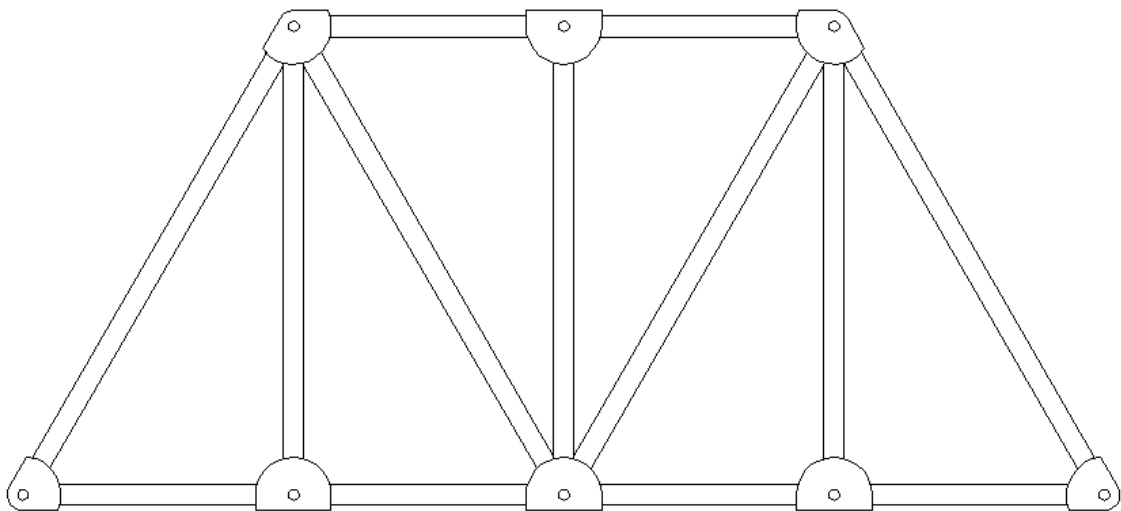
<sup>3</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 12.

**2.1.1.3. PRIMERA ALTERNATIVA.-** Esta armadura consta de siete elementos y cinco nodos, es una armadura simple y didáctica que presenta facilidades para la realización de las diferentes prácticas experimentales que se necesitan desarrollar, esta alternativa se muestra en la figura 2.2.



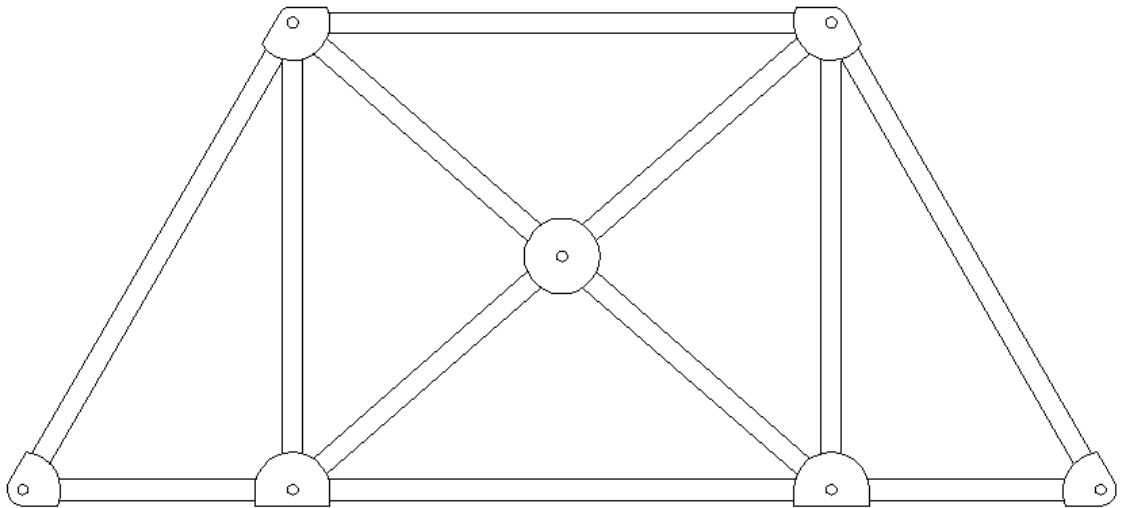
**Figura 2.2 Armadura de siete elementos y cinco nodos**

**2.1.1.4. SEGUNDA ALTERNATIVA.-** Esta armadura consta de trece elementos y ocho nodos, es una armadura didáctica, sus tres elementos ubicados verticalmente le brindan una mayor rigidez, esta alternativa se muestra en la figura 2.3.



**Figura 2.3 Armadura de trece elementos y ocho nodos**

**2.1.1.5. TERCERA ALTERNATIVA.-** Esta armadura consta de doce elementos y siete nodos, es una armadura que presenta elementos cruzados en su geometría, lo que la hace más rígida, esta alternativa se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4 Armadura de doce elementos y siete nodos**

## **2.1.2. ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA EL PÓRTICO**

Para estudiar en lo que consiste un pórtico, primero se conocerá lo que es un arco ya que de ésta estructura se deriva tanto la forma como el análisis estructural para el primero.

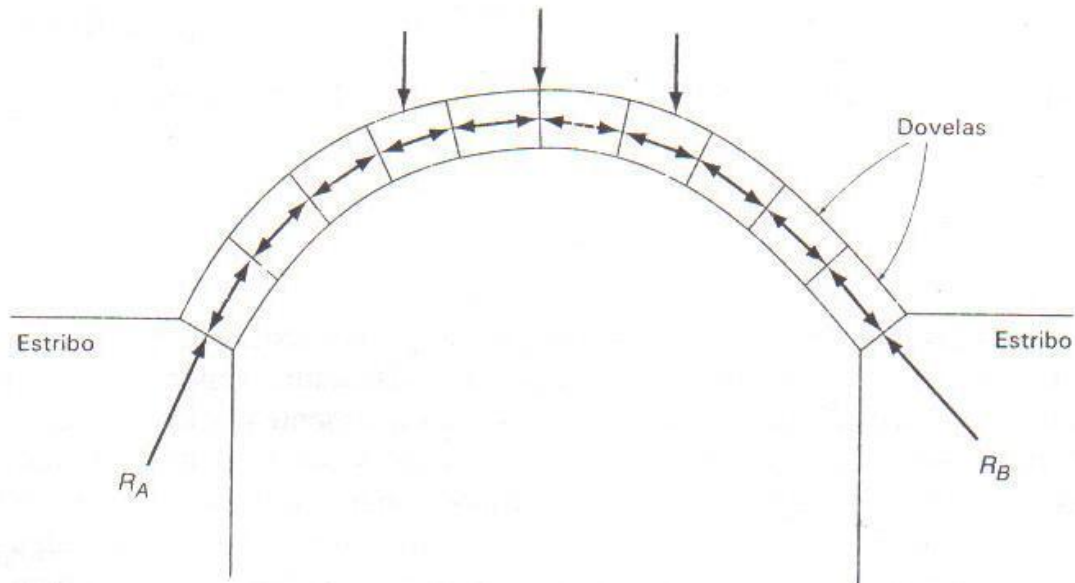
### **2.1.2.1. ARCOS<sup>4</sup>**

Históricamente, los arcos eran las únicas formas factibles que podían usarse para erigir grandes estructuras hechas de materiales con resistencia despreciable a la tensión, como son ladrillos y piedras. Los arcos de mampostería hechos de esos materiales se han usado durante miles de años.

---

<sup>4</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 93-94.

En efecto, un arco toma cargas verticales y las convierte en empujes laterales que van a lo largo del arco y colocan a los elementos del arco en estado de compresión. Esto se muestra en la figura 2.5. Las partes de un arco de piedra se llaman dovelas. Como puede verse en la figura, éstas son piedras en forma de cuña truncada. Ellas se empujan entre sí, quedando sometidas a compresión.



**Figura 2.5 Arco de Piedra<sup>5</sup>**

Los arcos son estructuras estables muy rígidas que no se ven afectadas apreciablemente por los movimientos de sus cimentaciones.

En teoría, un arco puede diseñarse para un solo conjunto de cargas de gravedad, de manera que sólo los esfuerzos de compresión axial se desarrollan en el arco. Sin embargo, en las estructuras reales las cargas cambian y se mueven de tal modo que desarrollan esfuerzos de flexión.

Después de haber conocido lo que son arcos, se puede conocer lo que es un pórtico o también llamado marco.

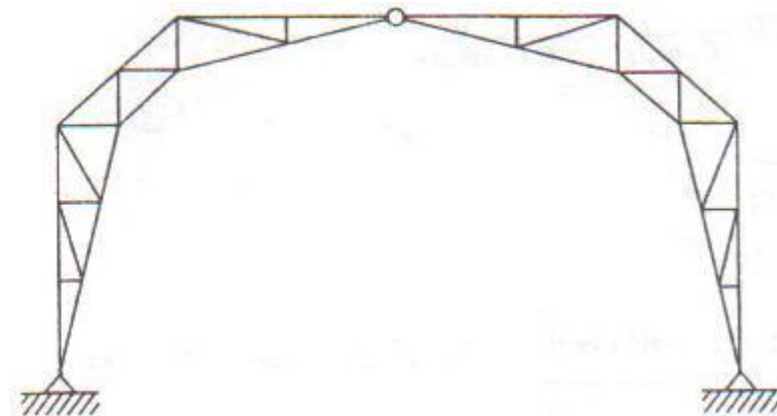
---

<sup>5</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 94.

### 2.1.2.2. PÓRTICO<sup>6</sup>

Un pórtico es una estructura que consta de elementos conectados rígidamente en sus nudos, los nudos son resistentes a momento e impiden que los elementos giren libremente, o sea sus miembros no pueden girar entre sí en sus conexiones. En consecuencia, se transmiten fuerzas axiales, fuerzas cortantes y momentos flexionantes entre los miembros en los nudos, además es una estructura que necesita cimientos o apoyos capaces de resistir las grandes reacciones horizontales, o empujes, sobre los mismos. Los pórticos se utilizan por ejemplo en puentes, edificios, grúas, hangares, gimnasios, arsenales, y muchos más.

Ejemplo de Pórtico:



**Figura 2.6 Pórtico para Edificación<sup>7</sup>**

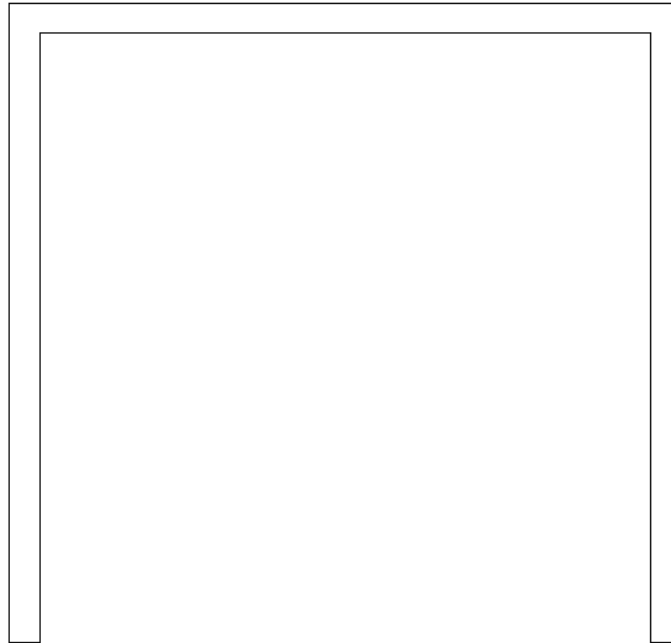
Ahora, después de conocer lo que es un pórtico, se mostrarán las alternativas de geometría para esta estructura que se han planteado para el presente proyecto, tomando en cuenta también que el diseño se basa en que todos sus elementos se encuentren en el mismo plano de acción.

---

<sup>6</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 131, 318.

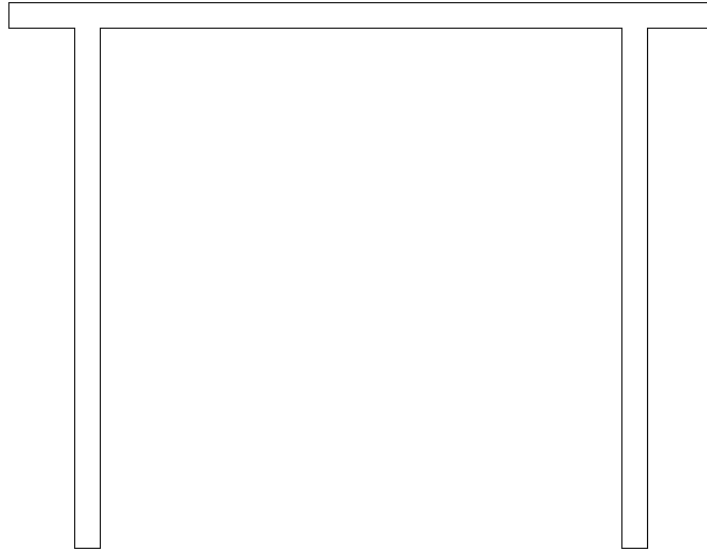
<sup>7</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 101.

**2.1.2.3. PRIMERA ALTERNATIVA.-** Este pórtico consta de tres elementos, dos elementos dispuestos de forma vertical y uno en forma horizontal, es una estructura simple y didáctica que presenta facilidades para la realización de varias prácticas experimentales, esta alternativa se muestra en la figura 2.7.



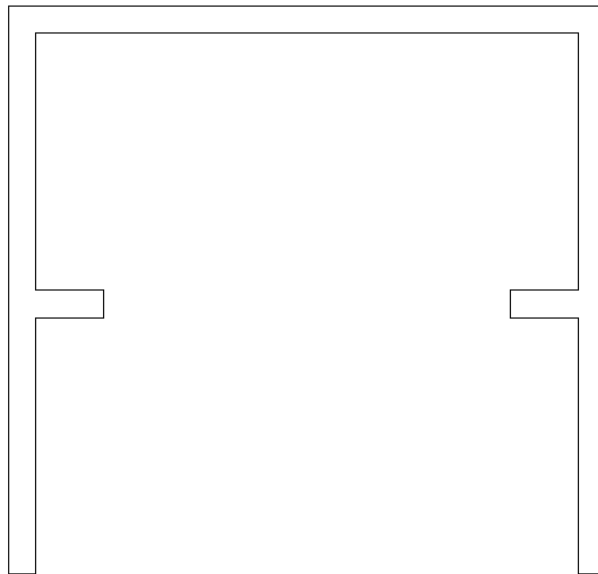
**Figura 2.7 Pórtico de tres elementos**

**2.1.2.4. SEGUNDA ALTERNATIVA.-** Este pórtico consta de tres elementos, dos elementos dispuestos de forma vertical y uno en forma horizontal, además tiene dos soportes externos con lo que se presenta la facilidad de colocar cargas y así producir momentos flexionantes adicionales para el análisis estructural de las diferentes prácticas experimentales, esta alternativa se muestra en la figura 2.8.



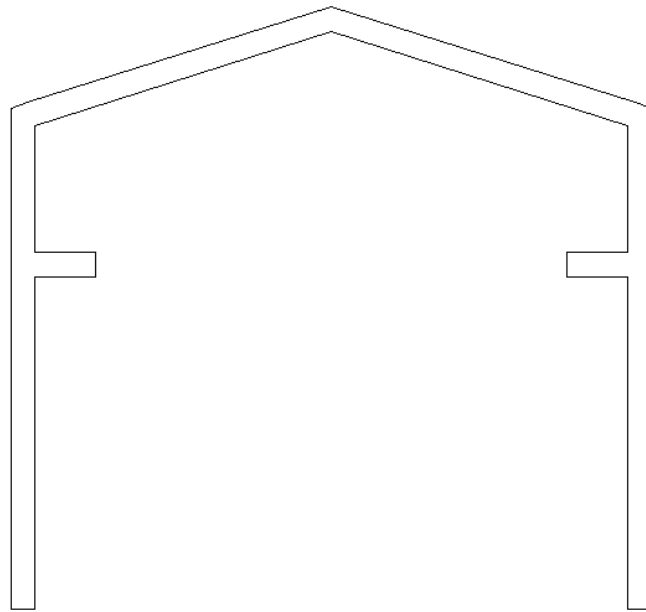
**Figura 2.8 Pórtico de tres elementos y dos soportes externos**

**2.1.2.5. TERCERA ALTERNATIVA.-** Este pórtico consta de tres elementos, dos elementos dispuestos de forma vertical y uno en forma horizontal, además tiene dos soportes internos con lo que se presenta la facilidad de colocar cargas y así producir momentos flexionantes adicionales para el análisis estructural de las diferentes prácticas experimentales, esta alternativa se muestra en la figura 2.9.



**Figura 2.9 Pórtico de tres elementos y dos soportes internos**

**2.1.2.6. CUARTA ALTERNATIVA.-** Este pórtico consta de cuatro elementos, dos elementos dispuestos de forma vertical y dos en forma inclinada, esto para asemejarse a los pórticos utilizados en edificaciones, además tiene dos soportes internos con lo que se presenta la facilidad de colocar cargas y así producir momentos flectores adicionales para el análisis estructural de las diferentes prácticas experimentales, esta alternativa se muestra en la figura 2.10.



**Figura 2.10 Pórtico de cuatro elementos y dos soportes internos**

## **ALTERNATIVAS DE MATERIALES**

En el mercado nacional se encuentran muchos materiales para la construcción de estructuras metálicas, cada uno con sus respectivas características y propiedades, también con una inmensa variedad de formas de presentación como: perfiles, ángulos, tubos, ejes, planchas, etc., de muchas medidas cada una, todos estos materiales son utilizados de acuerdo a las características que las estructuras requieran para cumplir su cometido.



Así mismo, de acuerdo a las características antes mencionadas de cada material, estos varían en precio, algunos muy costosos y otros más económicos.

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente nosotros necesitamos materiales que se encuentren fácilmente en el mercado, con una presentación lo más sencilla posible para facilidad de los cálculos, y que sean económicos para poder adquirir la cantidad de material necesaria para la construcción de todos los elementos que conforman el presente proyecto.

Los materiales que se han considerado como alternativas son los siguientes:

### **2.2.1. ALUMINIO**

El aluminio es el elemento metálico más abundante de la corteza terrestre y siempre se presenta en estado combinado, con otros elementos como hierro, oxígeno y silicio. La bauxita, que consta principalmente de óxidos hidratados de aluminio, es el mineral comercial más usado para la producción de aluminio.

Este metal posee una combinación de propiedades que lo convierten en un material extremadamente útil en ingeniería, tiene una densidad baja ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ), que le confiere una utilidad particularmente importante en lo que son productos manufacturados, tiene buena resistencia a la corrosión en la mayoría de los entornos naturales debido a la película de óxido que se forma en su superficie. El precio relativamente bajo del aluminio, junto a sus útiles propiedades convierten a este metal en uno de los más importantes a nivel industrial<sup>8</sup>.

El aluminio es de fácil manufactura, y además permite obtener buenas apreciaciones en la práctica de análisis estructural. El aluminio se puede

---

<sup>8</sup> SMITH William, *FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES* (McGraw-Hill, Tercera Edición, España 1998), pp. 453.

obtener en el mercado con las siguientes presentaciones que podríamos utilizar para cumplir el propósito del presente proyecto:

**Platina:** perfil 19,05 x 4,76 (mm), largo 6 m.

**Tubo cuadrado:** perfil 7/8 (pulg), largo 6 m.

Lo más factible para el análisis es la platina de aluminio debido a que los elementos que posteriormente se van a construir necesitan tener las características y especificaciones que la misma nos puede ofrecer.

## 2.2.2. ACERO ESTRUCTURAL

Los metales y aleaciones poseen muchas propiedades útiles en ingeniería, por lo que presentan gran aplicación en los diseños de ingeniería. El hierro y sus aleaciones, principalmente el acero, suponen aproximadamente el noventa por ciento de la producción mundial de metales, fundamentalmente por la combinación de buena resistencia, tenacidad y ductilidad a un coste relativamente bajo.

Los aceros ordinarios al carbono son esencialmente aleaciones de hierro y carbono con un contenido de hasta aproximadamente un 1,2 % de carbono. Sin embargo, la mayoría de los aceros contienen menos de un 0,5 % de carbono. La mayoría del acero se obtiene mediante oxidación del carbón y otras impurezas del arrabio hasta que el contenido de carbono del hierro se reduce al nivel requerido<sup>9</sup>.

El acero estructural es un metal de fácil adquisición en el mercado además que es muy utilizado en estructuras metálicas, también brinda la facilidad de poder soldar elementos necesarios para el análisis sin alterar sus propiedades mecánicas, además presenta facilidad para ser manufacturado.

---

<sup>9</sup> SMITH William, *FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES* (McGraw-Hill, Tercera Edición, España 1998), pp. 411-412.

En el mercado se pueden encontrar varias presentaciones en lo que es el acero estructural y para el propósito a cumplir en el presente proyecto se pueden citar las siguientes:

**Platina:** perfil 18 x 4 (mm), largo 6 m.

**Tubo de sección cuadrada:**

- perfil 20 x 20 (mm), espesor 1,2 mm, largo 6 m.

- perfil 30 x 30 (mm), espesor 1,5 mm, largo 6 m.

**Acero de sección cuadrada:** perfil 11 x 11 (mm), largo 6 m.

De estas opciones, las más factibles para ser utilizadas en el presente proyecto son el tubo de sección cuadrangular y el acero de sección cuadrada, que por sus características serían las más apropiadas para el presente proyecto.

## **MATRIZ ELEMENTAL DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

Para todas las alternativas que se presentan en el proyecto, se aplicará una matriz, en la cual mediante un proceso de calificación se obtendrá la mejor y más adecuada alternativa para cumplir con los objetivos propuestos en el proyecto, esta alternativa será la que mayor calificación obtenga. Se aplicará el siguiente sistema de puntaje en las matrices:

**Tabla 2.1 Sistema de puntaje en las matrices de selección**

<b>Puntaje</b>	<b>Definición</b>
0	No cumple
1	Cumple muy poco
2	Cumple relativamente bien
3	Cumple satisfactoriamente

## **2.3.1. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA ARMADURA**

Mediante esta matriz se obtendrá la mejor alternativa de geometría para armadura que se aplicará tanto para su análisis como para su construcción. Para esto se calificará a cada una de las alternativas tomando en cuenta características que se deben cumplir para la correcta realización del proyecto.

### **2.3.1.1. CARACTERÍSTICAS PARA MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA ARMADURA**

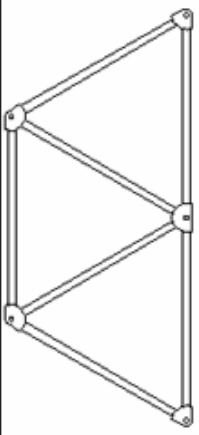
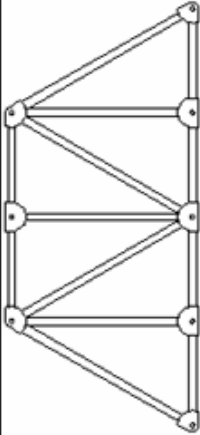
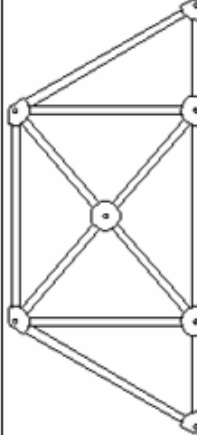
**2.3.1.1.1. Estructura práctica y sencilla:** la armadura debe ser lo más práctica y sencilla posible para facilidad tanto en su análisis como en su construcción.

**2.3.1.1.2. Aplicación de cargas factible en prácticas reales:** en laboratorio la aplicación de cargas se hace mediante colocación de pesos, los cuales requieren sus respectivos soportes, por esto la armadura debe constar con los espacios adecuados para la correcta realización de las pruebas experimentales.

**2.3.1.1.3. Facilidad para el análisis comparativo entre datos del software y datos experimentales:** la armadura debe facilitar la toma de datos en las pruebas experimentales, así como debe ser factible de ser analizada mediante un software, esto con el fin de comparar los datos experimentales con los computacionales.

**2.3.1.1.4. Montaje y desmontaje factibles:** para las diferentes prácticas experimentales la armadura debe presentar la facilidad de montar y desmontar sus elementos, y sobre todo con todo el sistema en conjunto.

Tabla 2.2 Matriz de selección de alternativas de geometría para armadura

Características	Estructura práctica y sencilla	Aplicación de cargas factible en prácticas reales	Facilidad para el análisis comparativo entre datos del software y datos experimentales	Montaje y desmontaje factibles	Puntaje Total
Alternativas 	3	3	3	3	12
	2	1	2	2	7
	1	1	2	2	6

Como se puede observar en la matriz, la alternativa que alcanzó el mayor puntaje fue la primera con 12, por tal razón será ésta armadura la que se va a analizar y construir para realizar las prácticas experimentales y computacionales.

### **2.3.2. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES PARA ARMADURA**

Con esta matriz se obtendrá el mejor material para la construcción de la armadura, considerando los elementos que se tienen que fabricar y los procesos que se deben llevar a cabo en estos materiales para obtener todas las partes que la conforman. También se considerará las propiedades mecánicas que posee el material, puesto que éstas juegan un papel muy importante en lo que es el análisis para esta estructura. Se calificará a cada una de las alternativas tomando en cuenta características que deben cumplir.

#### **2.3.2.1. CARACTERÍSTICAS PARA MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES PARA ARMADURA**

**2.3.2.1.1. Factible para realizar procesos necesarios de manufactura:** el material debe presentar todas las facilidades para ser manufacturado, esto con el fin de obtener los elementos que conforman a toda la armadura, tanto en su forma como en su medida.

**2.3.2.1.2. Brinda menor resistencia a deformaciones para una mejor apreciación de resultados:** en la realización de pruebas experimentales en esta estructura se obtienen resultados que dependen mucho de la apreciación del ejecutor, por esta razón la resistencia del material a deformaciones debe ser baja, y con esto conseguir valores que nos eviten obtener grandes errores.

**2.3.2.1.3. Propiedades mecánicas son las más aptas para el estudio y análisis de este tipo de armadura modelo:** este tipo de armaduras brindan una gran resistencia a las cargas a las cuales son sometidas, son muy resistentes a desplazamientos y deformaciones, para nuestro estudio necesitamos que éstos parámetros sean lo más apreciable posibles, por tal motivo necesitamos que las propiedades mecánicas del material que conforme la armadura sean apropiadas para su correcto análisis estructural.

**Tabla 2.3 Matriz de selección de alternativas de materiales para armadura**

<b>Características</b>	<b>Factible para realizar procesos necesarios de manufactura</b>	<b>Brinda menor resistencia a deformaciones para una mejor apreciación de resultados</b>	<b>Propiedades mecánicas son las más aptas para el estudio y análisis de este tipo de armadura modelo</b>	<b>Puntaje Total</b>
<b>Alternativas</b>				
<b>Aluminio</b>	3	3	3	<b>9</b>
<b>Acero Estructural</b>	3	1	2	<b>6</b>

En la matriz, tomando en cuenta todas las características propuestas, se puede observar que el mayor puntaje lo obtuvo el aluminio con 9, por tal motivo vamos a utilizar este metal para la construcción y análisis de nuestra armadura modelo, con esto se tendrá presente todos los aspectos que se requieren para llegar a cumplir los objetivos propuestos en este proyecto.

### **2.3.3. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA PÓRTICO**

Con esta matriz se llegará a obtener la mejor alternativa de geometría para pórtico, al igual que en la armadura se aplicará para su construcción y su análisis. Se calificará a cada una de las alternativas tomando en cuenta características que se deben cumplir para la correcta realización del proyecto.

#### **2.3.3.1. CARACTERÍSTICAS PARA MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA PARA PÓRTICO**

**2.3.3.1.1. Aplicación de cargas factible en prácticas reales:** en laboratorio la aplicación de cargas se hace mediante colocación de pesos, los cuales requieren sus respectivos soportes, por esto el pórtico debe constar con los espacios adecuados para la correcta realización de las pruebas experimentales.

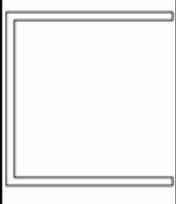
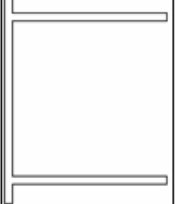
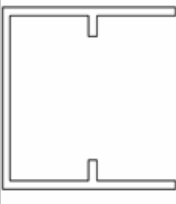
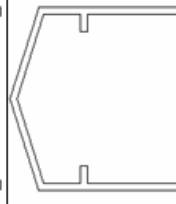
**2.3.3.1.2. Geometría de estructura más utilizada en situación real:** en las diferentes estructuras que existen en la realidad se utilizan como base constructiva el pórtico con algunas características, como el poder contar con espacios adicionales que soporten algún tipo de carga que se requiera, o el tener elementos con cierta inclinación de acuerdo a los requerimientos que tenga dicha estructura. Un pórtico modelo con estas características sería muy apto para su análisis, y muy didáctico para ser estudiado en laboratorio.

**2.3.3.1.3. Facilidad para el análisis comparativo entre datos del software y datos experimentales:** el pórtico debe facilitar la toma de datos en las pruebas experimentales, así como debe ser factible de ser analizado mediante un software, esto con el fin de comparar los datos experimentales con los computacionales.



**2.3.3.1.4. Montaje y desmontaje factibles:** para las diferentes prácticas experimentales el pórtico debe presentar la facilidad de montar y desmontar sus elementos, y sobre todo con todo el sistema en conjunto.

**Tabla 2.4 Matriz de selección de alternativas de geometría para pórtico**

Características Alternativas	Aplicación de cargas factible en prácticas reales	Geometría de estructura más utilizada en situación real	Facilidad para el análisis comparativo entre datos del software y datos experimentales	Montaje y desmontaje factibles	Puntaje Total
	2	1	3	2	8
	3	2	3	2	10
	3	2	3	2	10
	3	3	3	3	12

Se puede observar en la matriz, que la alternativa que alcanzó el mayor puntaje fue la cuarta con 12, por tal razón será éste pórtico el que se analizará y construirá para realizar tanto las prácticas experimentales como computacionales.

### **2.3.4. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES PARA PÓRTICO**

Esta matriz nos ayudará a obtener el mejor material para la construcción del pórtico, considerando los elementos que se tienen que fabricar y los procesos que se deben llevar a cabo en estos materiales para obtener todas las partes que la conforman. También se considerará las propiedades mecánicas que posee el material, puesto que éstas juegan un papel muy importante en lo que es el análisis para esta estructura. Se calificará a cada una de las alternativas tomando en cuenta características que deben cumplir.

#### **2.3.4.1. CARACTERÍSTICAS PARA MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES PARA PÓRTICO**

**2.3.4.1.1. Factible para realizar procesos necesarios de manufactura:** el material debe presentar todas las facilidades para ser manufacturado, esto con el fin de obtener los elementos que conforman a todo el pórtico, tanto en su forma como en su medida.

**2.3.4.1.2. Material que brinde facilidad para soldadura:** el pórtico modelo que va a ser objeto de nuestro estudio, en su mayoría está conformado por elementos que deben ser soldados entre sí, por tal motivo todo su diseño y construcción dependerá de un material que sea apto para este tipo de proceso, que es la suelta, sin modificar de manera drástica sus propiedades mecánicas.

**2.3.4.1.3. Propiedades mecánicas son las más aptas para el estudio y análisis de este tipo de pórtico modelo:** el material para el pórtico debe cumplir ciertas características para poder apreciar desplazamientos y deformaciones, esto además de cumplir con otras propiedades mecánicas para que pase por diferentes procesos que lo llevarán a su forma final, para nuestro estudio necesitamos que todos estos parámetros sean apropiados para su correcto análisis estructural.

**Tabla 2.5 Matriz de selección de alternativas de materiales para pórtico**

<b>Características</b>	<b>Factible para realizar procesos necesarios de manufactura</b>	<b>Material que brinde facilidad para soldadura</b>	<b>Propiedades mecánicas son las más aptas para el estudio y análisis de este tipo de pórtico modelo</b>	<b>Puntaje Total</b>
<b>Alternativas</b>				
<b>Aluminio</b>	3	1	1	<b>5</b>
<b>Acero Estructural</b>	3	3	3	<b>9</b>

Se puede observar en la matriz que el mayor puntaje lo obtuvo el acero estructural con 9, por tal motivo vamos a utilizar este metal para la construcción y análisis de nuestro pórtico modelo, considerando que ha sido el material más apto en cumplir con todas las características anteriormente mencionadas y así llegar a cumplir los objetivos propuestos en este proyecto.

## **ANÁLISIS DE CARGAS**

Previo al análisis de cargas de las estructuras anteriormente seleccionadas, se van a citar varios fundamentos y definiciones que son necesarios conocer, puesto que en ellos se basa el estudio tanto de la armadura como del pórtico modelos.

### **2.4.1. FUNDAMENTOS Y DEFINICIONES**

#### **2.4.1.1. FUERZAS ESTRUCTURALES<sup>10</sup>**

Sobre un sistema estructural actúan fuerzas. Se supone que por la influencia de esas fuerzas toda la estructura se encuentra en un estado de equilibrio estático. Las fuerzas que actúan sobre una estructura incluyen las cargas aplicadas y las reacciones resultantes.

Las cargas aplicadas son las cargas conocidas que actúan sobre una estructura. Ellas pueden ser las resultantes del peso propio de la estructura, de las cargas de ocupación, de las cargas ambientales, etc. Las reacciones son las fuerzas que los soportes ejercen sobre una estructura. Ellas se consideran como parte de las fuerzas externas aplicadas y se supone que equilibran a las otras cargas externas sobre la estructura.

#### **2.4.1.2. TIPOS DE CARGAS ESTRUCTURALES<sup>11</sup>**

En general, las cargas estructurales son clasificadas atendiendo a su carácter y a su duración. Las cargas que suelen aplicarse a sistemas estructurales se clasifican como sigue:

---

<sup>10</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 13.

<sup>11</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 23.

**2.4.1.2.1. Cargas Muertas.-** Las cargas muertas son aquellas de magnitud constante que permanecen en una sola posición. Estas incluyen el peso de la estructura considerada, así como cualquier accesorio que quede permanentemente unido a ella.

**2.4.1.2.2. Cargas Vivas.-** Las cargas vivas son las que pueden cambiar su magnitud y posición e incluyen las cargas de ocupación, los materiales almacenados, las cargas de construcción, las grúas elevadas de servicio y las cargas para operar el equipo. En general, son inducidas por gravedad.

**2.4.1.2.3. Cargas Ambientales.-** Las cargas ambientales son aquellas causadas por el ambiente en que se encuentra la estructura. Por lo que se refiere a los edificios, ellas son causadas por lluvia, nieve, viento y sismo. Estrictamente hablando, éstas también son cargas vivas, pero son el resultado del ambiente en que se localiza la estructura.

### **2.4.1.3. TIPOS DE SOPORTE<sup>12</sup>**

Las estructuras pueden soportarse por medio de articulaciones, rodillos, empotramientos o eslabones.

**2.4.1.3.1. Articulación.-** Una articulación o soporte tipo pasador se supone que está conectada a la estructura por medio de un pasador sin fricción. Este tipo de soporte impide el movimiento en dirección vertical u horizontal, pero no impide ligeras rotaciones alrededor del pasador. Hay dos fuerzas desconocidas en una articulación: la magnitud de la fuerza necesaria para impedir el movimiento horizontal y la magnitud de la fuerza necesaria para impedir el movimiento vertical. El soporte proporcionado por una articulación también puede considerarse como una fuerza inclinada, que sería la resultante de las fuerzas horizontal y vertical en el soporte.

---

<sup>12</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 78-80.

**2.4.1.3.2. Rodillo.-** Un soporte de rodillo ofrece resistencia al movimiento sólo en una dirección perpendicular a la superficie de apoyo bajo el rodillo. No presenta resistencia a ligeras rotaciones respecto al eje del rodillo ni a movimientos paralelos a la superficie de apoyo. La única incógnita es la magnitud de la fuerza que evite el movimiento perpendicular a la superficie de apoyo.

**2.4.1.3.3. Empotramiento.-** Un empotramiento ofrece resistencia a la rotación alrededor del soporte y al movimiento horizontal y vertical. Se tienen aquí tres incógnitas: la magnitud de la fuerza para impedir el movimiento horizontal, la magnitud de la fuerza para impedir el movimiento vertical y la magnitud del momento para impedir la rotación.

**2.4.1.3.4. Eslabón.-** Un soporte tipo eslabón es similar en su acción al rodillo, ya que los pasadores en cada extremo se suponen sin fricción. La línea de acción de la fuerza resistente debe tener la dirección del eslabón. Sólo se tiene una incógnita: la magnitud de la fuerza en dirección del eslabón.

#### **2.4.1.4. ESTABILIDAD, DETERMINACIÓN E INDETERMINACIÓN<sup>13</sup>**

Al estudiar los tipos de soportes se pudo observar que en un empotramiento se tienen tres componentes de reacción desconocidas, dos en una articulación y sólo una en un rodillo o en un eslabón. Si para una estructura en particular el número total de componentes de reacción es igual al número de ecuaciones disponibles, las incógnitas pueden calcularse y se dice entonces que la estructura es estáticamente determinada externamente. Si el número de incógnitas es mayor que el número de ecuaciones disponibles, entonces la estructura es estáticamente indeterminada externamente; si es menor, es inestable externamente.

---

<sup>13</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 80-81.

Una estructura puede ser estable bajo un arreglo de cargas, pero si no es estable para cualquier conjunto de cargas, entonces es inestable. A esta condición se le llama equilibrio inestable.

#### **2.4.1.5. INESTABILIDAD GEOMÉTRICA<sup>14</sup>**

La capacidad de una estructura para soportar de manera adecuada las cargas aplicadas a ella depende no sólo del número de componentes de reacción, sino también de la disposición de éstas. Es posible que una estructura tenga tantas o más componentes de reacción que el número de ecuaciones disponibles y ser, sin embargo, inestable. Esta condición se llama inestabilidad geométrica.

#### **2.4.1.6. DETERMINACIÓN ESTÁTICA DE LAS ARMADURAS<sup>15</sup>**

La armadura más sencilla posible de tener es un simple triángulo, para determinar las fuerzas y las reacciones desconocidas en esta armadura, es posible aislar los nudos y escribir para cada uno de ellos dos ecuaciones: las sumatorias de fuerzas verticales y horizontales.

La armadura de un solo triángulo puede ampliarse a una armadura de dos triángulos añadiendo dos nuevos elementos y un nuevo nudo, para ampliar a una armadura de tres triángulos se sigue el mismo procedimiento y así sucesivamente para una armadura de un mayor número de triángulos. Para cada uno de los nuevos nudos se dispone de un nuevo par de ecuaciones para calcular las fuerzas en los dos elementos adicionales. En tanto se siga este procedimiento para expandir la armadura, ésta será estáticamente determinada internamente. Si se adicionan nuevas barras sin añadir nuevos nudos, la

---

<sup>14</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 81.

<sup>15</sup> McCORMAC Jack y NELSON James, *ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS* (Alfaomega Grupo Editor, Segunda Edición, México 2002), pp. 155-156.

armadura entonces se convertirá en estáticamente indeterminada porque no se dispone de nuevas ecuaciones de nudo para calcular las fuerzas en las nuevas barras.

Con base en este análisis es posible expresar la relación que debe existir entre el número de nudos, de barras y de componentes de reacción para que una armadura sea estáticamente determinada internamente. En el análisis que sigue,  $m$  es el número de barras,  $j$  el de nudos y  $r$  el de componentes de reacción.

Si el número de ecuaciones disponibles ( $2j$ ) es suficiente para obtener las incógnitas, entonces la estructura es estáticamente determinada y puede escribirse la siguiente relación:

$$2j = m + r$$

o, como se escribe más a menudo:

$$m = 2j - r$$

Antes de tratar de aplicar esa ecuación es necesario tener una estructura exteriormente estable, pues de lo contrario los resultados carecerán de sentido; por lo tanto,  $r$  es el número mínimo de componentes de reacción necesarias para tener estabilidad externa. Si la estructura tuviese más componentes de reacción externas que las indispensables para lograr la estabilidad (y ser, de esa manera, estáticamente indeterminada externamente), el valor de  $r$  seguirá siendo el del mínimo número de componentes de reacción necesarias para darle estabilidad externa. Esto significa que  $r$  será igual a 3, por las ecuaciones usuales de la estática, más el número total de cualesquiera ecuaciones adicionales de condición que pudiera haber.



## 2.4.2. ANÁLISIS DE CARGAS DE LA ARMADURA

Después de estudiar los fundamentos y definiciones anteriormente mencionados, se va a precisar aspectos muy importantes que son propios de la armadura modelo, y necesarios para todo su análisis estructural.

- Toda la armadura bajo la influencia de fuerzas, se encontrará en un estado de equilibrio estático.
- En las pruebas experimentales que se realizarán en laboratorio, la armadura estará sujeta a un solo estado de cargas debido a las condiciones y procedimiento al que va estar inmersa la estructura; se emplearán cargas muertas ya que son constantes en su magnitud y permanecen en una sola posición.
- Los tipos de soporte de la armadura serán un apoyo tipo articulación y uno tipo rodillo, así tendremos tres componentes de reacción.
- Con los tipos de soporte escogidos, la armadura en particular tiene tres componentes de reacción que es igual al número de ecuaciones que se tendrían disponibles, éstas son las ecuaciones de la sumatoria de fuerzas tanto horizontales como verticales, y de la sumatoria de momentos, entonces la estructura es estáticamente determinada externamente.
- Al encontrarse bajo un estado de equilibrio estático por la influencia de un conjunto de fuerzas, la armadura también estará bajo un equilibrio estable.
- Bajo el sistema de fuerzas, la armadura y todos sus elementos conservan su posición al igual que su disposición entre sí, por esto la estructura se encuentra en un estado de estabilidad geométrica.

- Para la armadura se tiene que el número de barras  $m = 7$ , el número de nudos  $j = 5$ , y el número de componentes de reacción  $r = 3$ , entonces aplicamos la relación:

$$m = 2j - r$$

$$7 = 2(5) - 3$$

$$7 = 10 - 3$$

$$7 = 7$$

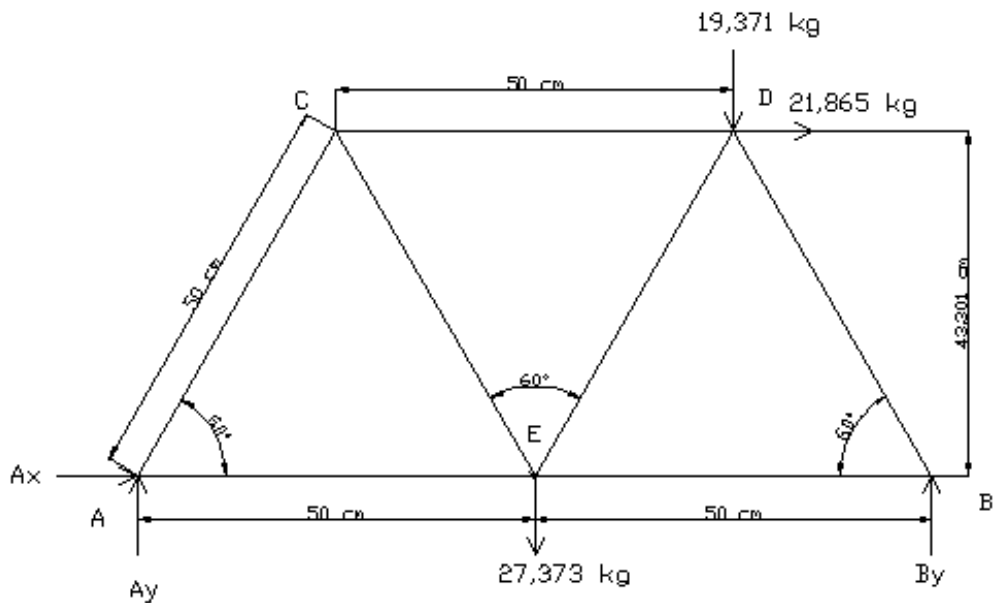
Con esto comprobamos que la armadura es estáticamente determinada internamente, y se pueden calcular sus reacciones por estática.

- Los elementos de la armadura son rectos, si no lo fuesen, las fuerzas axiales ocasionarían en ellos momentos flectores.
- Las deformaciones de la armadura cargada, causadas por los cambios en la longitud de los elementos individuales, no son de suficiente magnitud para ocasionar cambios apreciables en la forma y en las dimensiones generales.
- Los elementos están dispuestos de manera que las cargas y las reacciones se aplican sólo en los nudos de la armadura.

Con todos estos aspectos lo que se quiere llegar a producir es una armadura ideal cuyos elementos trabajen sólo a fuerzas axiales. Los elementos están sometidos a tensión, o bien, a compresión, pero no a flexión.

La armadura consta de una conexión de pasador y un apoyo de rodillo, más las cargas externas que se muestran en la figura.

Los cálculos están hechos en centímetros como unidad de longitud, debido a que brinda mayores facilidades de medición en la práctica.



**Figura 2.11 Armadura para análisis estructural**

### 2.4.2.1. CÁLCULO DE LAS REACCIONES EN LOS APOYOS

Para el cálculo de las reacciones en los apoyos se va analizar las cargas externas que se muestran en el sistema.

$$D_y = 19.371 \text{ kg}$$

$$D_x = 21.865 \text{ kg}$$

$$E_y = 27.373 \text{ kg}$$

$$\Sigma F_y := 0$$

$$A_y + B_y = D_y + E_y$$

$$A_y + B_y = 46.744 \text{ kg}$$

$$\Sigma F_x := 0$$

$$A_x := -D_x$$

$$A_x = -21.865 \text{ kg}$$

$$\Sigma M_A := 0$$

$$B_y \cdot 100 - D_y \cdot 75 - D_x \cdot 43.301 - E_y \cdot 50 = 0$$

$$B_y := \frac{D_y \cdot 75 + D_x \cdot 43.301 + E_y \cdot 50}{100}$$

$$B_y = 37.683 \text{ Kg}$$

$$A_y := 46.744 - B_y$$

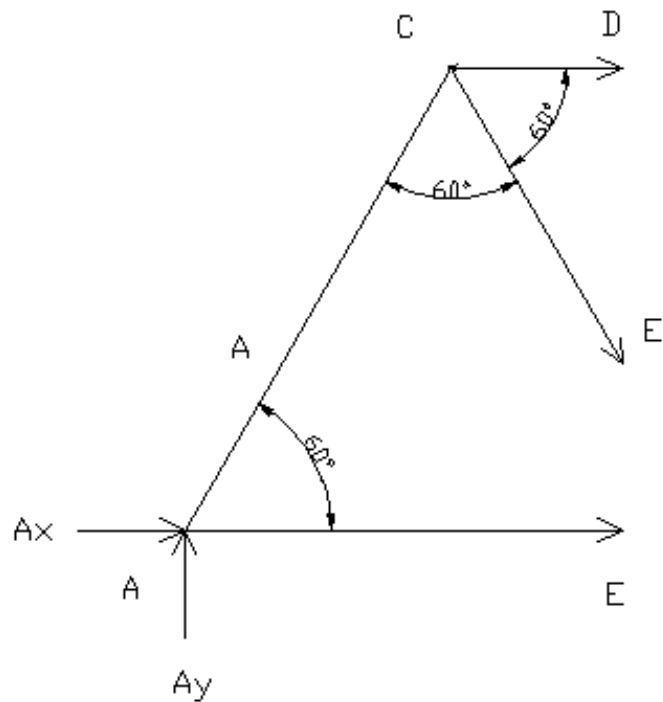
$$A_y = 9.061 \text{ Kg}$$

#### **2.4.2.2. CÁLCULO DE LAS FUERZAS AXIALES EN CADA UNO DE LOS ELEMENTOS**

Para el análisis respectivo se empezará utilizando el método de las secciones ya que tiene la ventaja de que las fuerzas, en casi todos los miembros, pueden hallarse directamente mediante el análisis de una sección que corte a dicho miembro. Posterior a este análisis y con algunas de las fuerzas anteriormente calculadas se utilizará el método de los nodos, ya que se analizarán las fuerzas concurrentes en cada nudo<sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup> MERIAM J.L., *ESTÁTICA* (Editorial Reverté, Segunda Edición, España 1976), pp. 126-132.



**Figura 2.12 Sección 1**

$$\sum MC := 0$$

$$AE \cdot 43.301 + Ax \cdot 43.301 - Ay \cdot 25 = 0$$

$$AE := \frac{Ay \cdot 25 - Ax \cdot 43.301}{43.301}$$

$$AE = 27.097 \quad \text{Kg} \quad \text{Compresión}$$

El método de las secciones nos dice que, al estar el miembro AE dirigido hacia el corte del miembro AE, éste se encuentra a compresión. Si se obtiene del cálculo un valor negativo, ello nos indicará que hay que tomar el sentido contrario al que se había supuesto<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> MERIAM J.L., *ESTÁTICA* (Editorial Reverté, Segunda Edición, España 1976), pp. 127.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$A_x + A_E + CD + CE \cdot \cos(60) = 0$$

$$CD = -A_x - A_E - CE \cdot \cos(60)$$

$$\Sigma F_y = 0$$

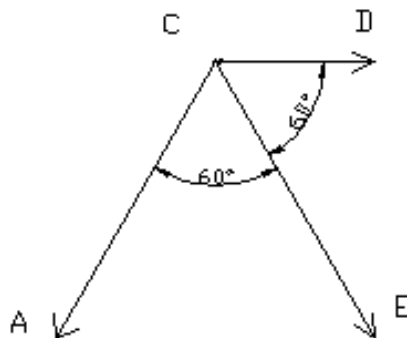
$$A_y - CE \cdot \sin\left(\frac{60 \cdot \pi}{180}\right) = 0$$

$$CE := \frac{A_y}{\sin\left(60 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}$$

$$CE = 10.463 \text{ Kg} \quad \text{Compresión}$$

$$CD := -A_x - A_E - CE \cdot \cos\left(60 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$CD = -10.463 \text{ Tracción}$$



**Figura 2.13 Nodo C**

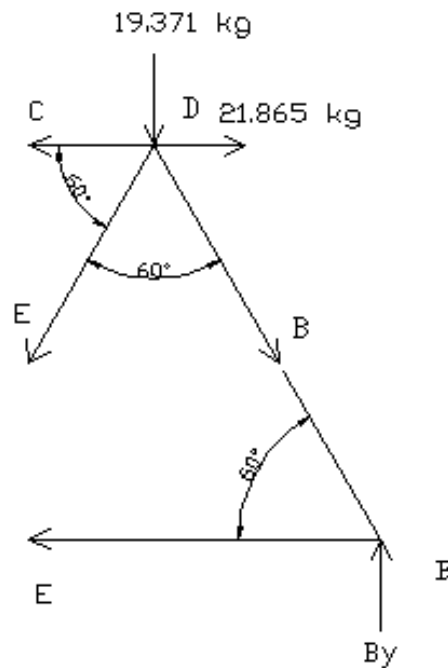
$$\Sigma F_x = 0$$

$$-CA \cdot \cos(60) + CE \cdot \cos(60) + CD = 0$$

$$CA := \frac{CD + CE \cdot \cos\left(60 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{\cos\left(60 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}$$

$$CA = -10.463 \text{ Kg} \quad \text{Tracción}$$

El método de los nodos nos dice que, si el miembro CA está dirigido hacia fuera del nodo, el miembro CA se encuentra a tracción. Si se obtiene del cálculo un valor negativo, ello nos indicará que hay que tomar el sentido contrario al que se había supuesto<sup>18</sup>.



**Figura 2.14 Sección 2**

$$\sum MD := 0$$

$$-BE \cdot 43.301 + By \cdot 25 = 0$$

$$BE := \frac{By \cdot 25}{43.301}$$

$$BE = 21.756 \text{ Kg} \quad \text{Compresión}$$

<sup>18</sup> MERIAM J.L., *ESTÁTICA* (Editorial Reverté, Segunda Edición, España 1976), pp. 123.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-BE - DE \cdot \cos(60) - DC + Dx = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

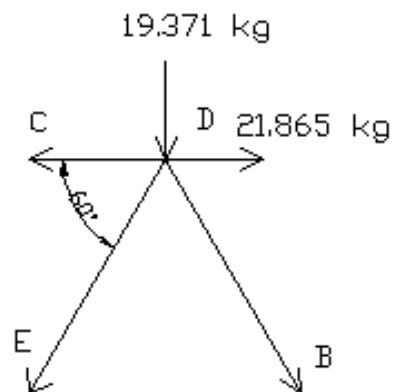
$$By - Dy - DE \cdot \sin(60)$$

$$DE := \frac{By - Dy}{\sin\left(60 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}$$

$$DE = 21.144 \quad \text{Kg} \quad \text{Compresión}$$

$$DC := -DE \cdot \cos\left(60 \cdot \frac{\pi}{180}\right) - BE + Dx$$

$$DC = -10.463 \quad \text{Kg} \quad \text{Tracción}$$



**Figura 2.15 Nodo D**

$$\Sigma F_x = 0$$

$$DB \cdot \cos(60) + Dx - DE \cdot \cos(60) - DC = 0$$

$$DB := \frac{DE \cdot \cos\left(60 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + DC - Dx}{\cos\left(60 \cdot \frac{\pi}{180}\right)}$$

$$DB = -43.512 \quad \text{Kg} \quad \text{Tracción}$$



### 2.4.3. ANÁLISIS DE CARGAS DEL PÓRTICO

El pórtico modelo escogido es una estructura que produce reacciones horizontales convergentes al estar sometido a carga vertical. Va a tender a aplanarse cuando se someta a carga y debe fijarse contra movimientos horizontales en sus apoyos.

El pórtico va a poseer un pasador interno justo en el centro en la unión superior de sus elementos, el momento interno en este pasador es cero porque no puede transmitirse ninguna rotación entre las partes adyacentes de la estructura. Se tiene aquí una condición especial, porque el momento interno en el pasador debe ser cero, independientemente de la carga. No puede decirse lo mismo de otras secciones continuas de la estructura.

Por definición, una articulación no transmite rotaciones, y las tres ecuaciones de la estática más la ecuación de sumatoria de momentos igual a cero en el pasador central permiten encontrar las cuatro componentes de reacción en los apoyos. Por esto el pórtico con las tres articulaciones es estáticamente determinado.

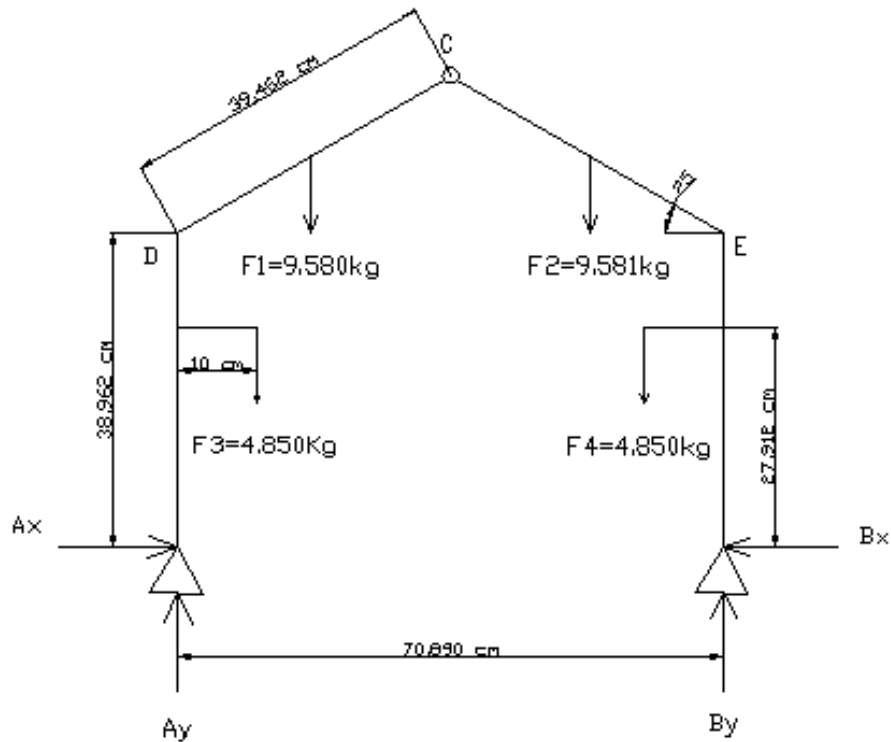
Después de estudiar los fundamentos y definiciones que se mencionaron con anterioridad, se va a precisar aspectos muy importantes que son propios del pórtico modelo, y necesarios para todo su análisis estructural.

- Todo el pórtico bajo la influencia de fuerzas, se encontrará en un estado de equilibrio estático.
- En las pruebas experimentales que se realizarán en laboratorio, el pórtico estará sujeto a un solo estado de cargas debido a las condiciones y procedimiento al que va estar inmersa la estructura; se emplearán cargas muertas ya que son constantes en su magnitud y permanecen en una sola posición.

- Los tipos de soporte del pórtico serán dos apoyos tipo articulación, así tendremos cuatro componentes de reacción.
- Con los tipos de soporte escogidos, y las tres ecuaciones de la estática más la ecuación de sumatoria de momentos igual a cero en el pasador central se puede obtener las cuatro componentes de reacción en los apoyos. Por esto el pórtico modelo con las tres articulaciones es estáticamente determinado.
- Al encontrarse bajo un estado de equilibrio estático por la influencia de un conjunto de fuerzas, el pórtico también estará bajo un equilibrio estable.
- Bajo el sistema de fuerzas, el pórtico y todos sus elementos conservan su posición al igual que su disposición entre sí, por esto la estructura se encuentra en un estado de estabilidad geométrica.

El pórtico consta de dos conexiones de pasador en los apoyos y una articulación en el nodo C, más las cargas externas que se muestran en la figura.

Los cálculos están hechos en centímetros como unidad de longitud, debido a que brinda mayores facilidades de medición en la práctica.



**Figura 2.16 Pórtico para análisis estructural**

### 2.4.3.1. CÁLCULO DE LAS REACCIONES EN LOS APOYOS Y EN LA ARTICULACIÓN

Primero se realiza el diagrama de cuerpo libre de todo el sistema, analizando las cargas externas. Esto permitirá obtener las reacciones en los apoyos y en la articulación.

$$F1 = 9.580 \text{ kg}$$

$$F2 = 9.581 \text{ kg}$$

$$F3 = 4.850 \text{ kg}$$

$$F4 = 4.850 \text{ kg}$$

$$\Sigma Fy := 0$$

$$Ay + By = F1 + F2 + F3 + F4$$

$$Ay + By = 28.861 \text{ kg}$$

$$\Sigma MA := 0$$

$$-F3 \cdot 10 - F1 \cdot 17.882 - F2 \cdot 53.008 - F4 \cdot 60.89 + By \cdot 70.89 = 0$$

$$By := \frac{F3 \cdot 10 + F1 \cdot 17.882 + F2 \cdot 53.008 + F4 \cdot 60.89}{70.89}$$

$$By = 14.431 \text{ kg}$$

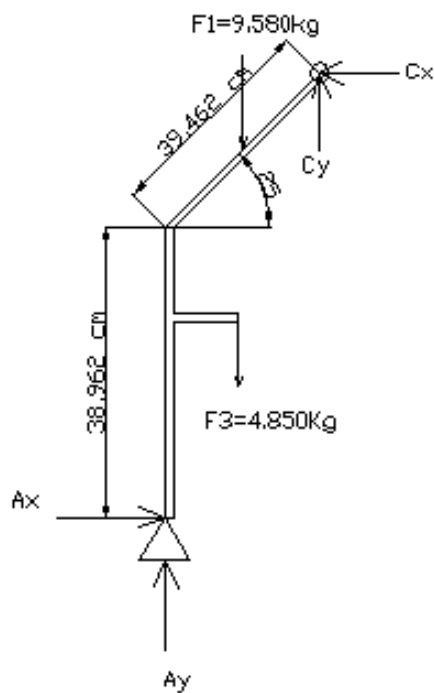
$$Ay := 28.861 - By$$

$$Ay = 14.43 \text{ kg}$$

$$\Sigma Fx := 0$$

$$Ax = Bx$$

Para el cálculo de las reacciones de A y B y las reacciones en la articulación, se procede a separar el pórtico tomando la parte que va desde el apoyo A hasta la articulación C.



**Figura 2.17 Sección A-C**

$$\Sigma F_x = 0$$

$$A_x = C_x$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$A_y - F_3 - F_1 + C_y = 0$$

$$C_y := F_3 + F_1 - A_y$$

$$C_y = -2.522 \times 10^{-4} \quad \text{kg}$$

$$\Sigma MC := 0$$

$$F_1 \cdot (19.731 \cdot \cos(25 \cdot (\pi/180))) + F_3 \cdot 25.765 + A_x \cdot 55.639 - A_y \cdot 35.765 = 0$$

$$A_x := \frac{A_y \cdot 35.765 - F_1 \cdot \left(19.731 \cdot \cos\left(25 \cdot \frac{\pi}{180}\right)\right) - F_3 \cdot 25.765}{55.639}$$

$$A_x = 3.951 \quad \text{kg}$$

$$C_x := A_x$$

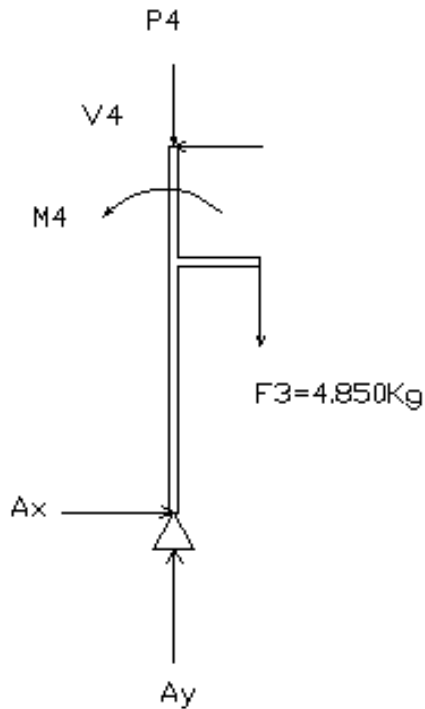
$$C_x = 3.951 \quad \text{kg}$$

$$B_x := A_x$$

$$B_x = 3.951 \quad \text{kg}$$

### 2.4.3.2. CÁLCULO DE MOMENTOS, CARGA AXIAL Y FUERZA CORTANTE

Este análisis se va a realizar a cada elemento y ver el comportamiento que tiene cada uno respecto al sistema.



**Figura 2.18 DCL de la porción A-D**

$$\sum F_y = 0$$

$$\sum F_x = 0$$

$$A_y - P_4 - F_3 = 0$$

$$V_4 := A_x$$

$$P_4 := A_y - F_3$$

$$V_4 = 3.951 \text{ Kg}$$

$$P_4 = 9.58 \text{ Kg}$$

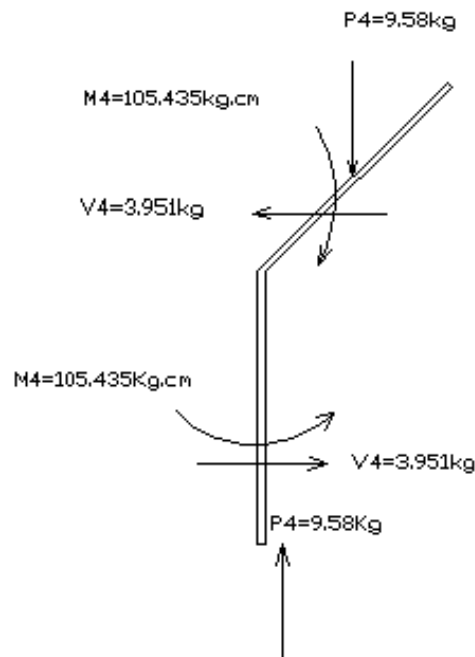
$$\sum M_A = 0$$

$$M_4 - F_3 \cdot 10 + V_4 \cdot 38.962 = 0$$

$$M_4 := F_3 \cdot 10 - V_4 \cdot 38.962$$

$$M_4 = -105.435 \text{ kg cm}$$

Considerando las acciones que aparecen en el extremo superior de la porción, en el nudo D, aparecen como reacciones con los mismos valores pero con sentido contrario por la ley de la acción y reacción.



**Figura 2.19 DCL1 del nudo D**

$$P_x := -P_4 \cdot \cos\left(65 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$P_x = -4.049 \text{ kg}$$

$$P_y := -P_4 \cdot \sin\left(65 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$P_y = -8.683 \text{ kg}$$

$$P := P_x + P_y$$

$$P = -7.63 \text{ Kg}$$

$$V_x := -V_4 \cdot \cos\left(25 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$V_x = -3.581 \text{ kg}$$

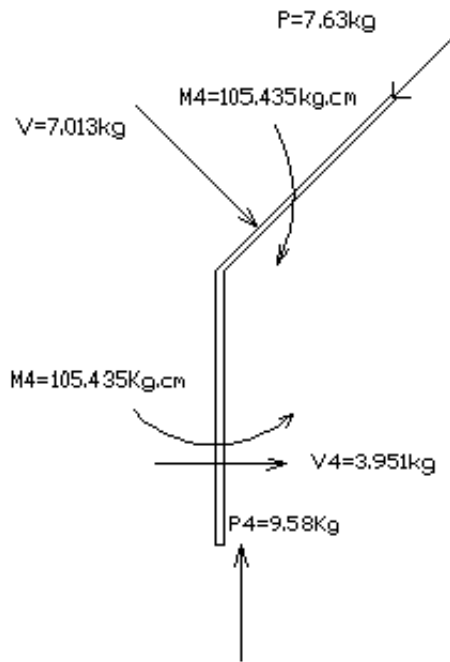
$$V_y := V_4 \cdot \sin\left(25 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$V_y = 1.67 \text{ kg}$$

$$V = V_x + V_y$$

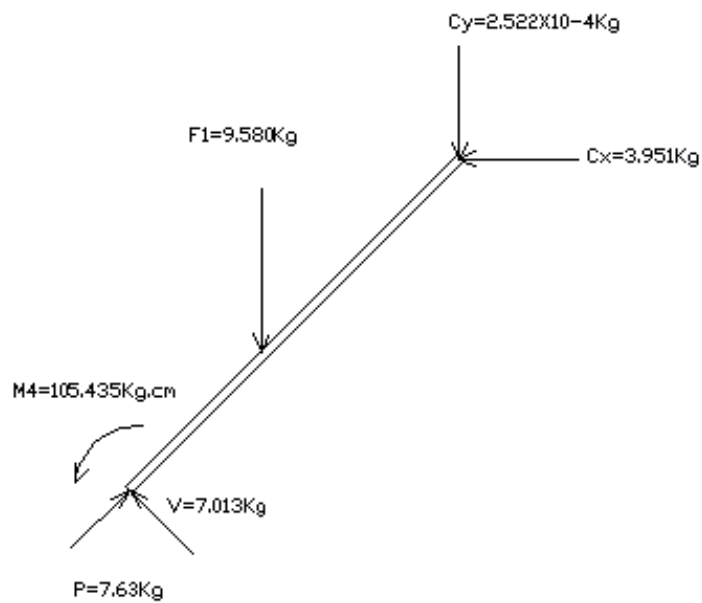
$$V = -7.013 \text{ Kg}$$

Del diagrama de cuerpo libre del nudo D, se obtienen las componentes axial y perpendicular de las fuerzas  $P = -7.63 \text{ kg}$  y  $V = -7.013 \text{ kg}$ .



**Figura 2.20 DCL2 del nudo D**

A continuación se obtendrá el DCL del elemento DC, considerando que las acciones (fuerza axial, fuerza cortante y momento flector), aparecen en el nodo D, se transforman en reacciones en el extremo del elemento.



**Figura 2.21 DCL1 del elemento DC**



$$P1 := Cy \cdot \cos\left(65 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad P2 := -Cx \cdot \cos\left(25 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

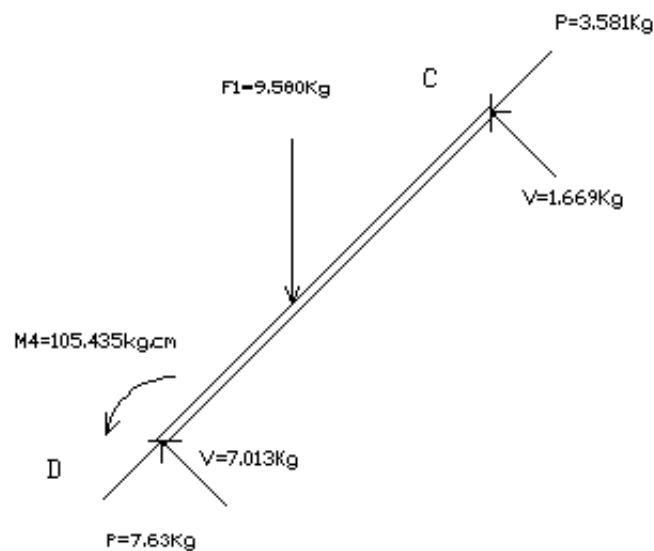
$$P1 = -1.066 \times 10^{-4} \text{ kg} \quad P2 = -3.581 \text{ Kg}$$

$$V1 := Cy \cdot \sin\left(65 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad V2 := Cx \cdot \sin\left(25 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$V1 = -2.286 \times 10^{-4} \text{ kg} \quad V2 = 1.67 \text{ Kg}$$

$$P = P1 + P2 \quad V = V1 + V2$$

$$P = -3.581 \text{ Kg} \quad V = 1.669 \text{ Kg}$$



**Figura 2.22 DCL2 del elemento DC**

Similar análisis realizamos de derecha a izquierda en la porción B-E y E-C, para calcular el resto de momentos, carga axial y fuerza cortante.

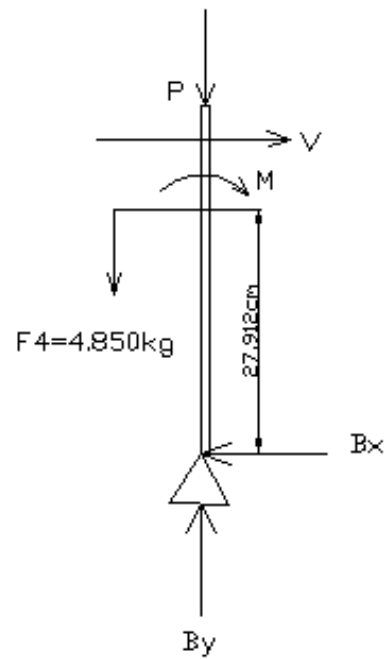


Figura 2.23 DCL de la porción B-E

$$\Sigma F_y = 0$$

$$B_y - P - F_4 = 0$$

$$P = B_y + F_4$$

$$P = 9.581 \text{ Kg}$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$-M + F_4 \cdot 10 - V \cdot 38.962 = 0$$

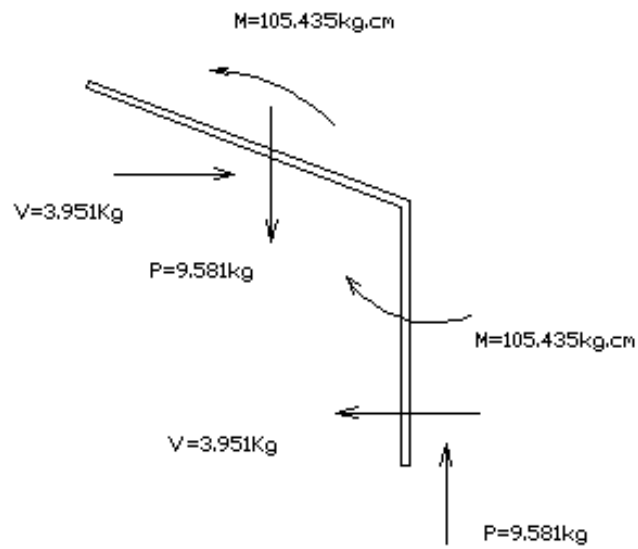
$$M := F_4 \cdot 10 - V \cdot 38.962$$

$$M = -105.435 \text{ Kg}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$V = B_x$$

$$V = 3.951 \text{ Kg}$$



**Figura 2.24 DCL1 del nodo E**

$$P_x = P \cdot \cos(65 \cdot (\pi/180)) \quad V_x = V \cdot \cos(25 \cdot (\pi/180))$$

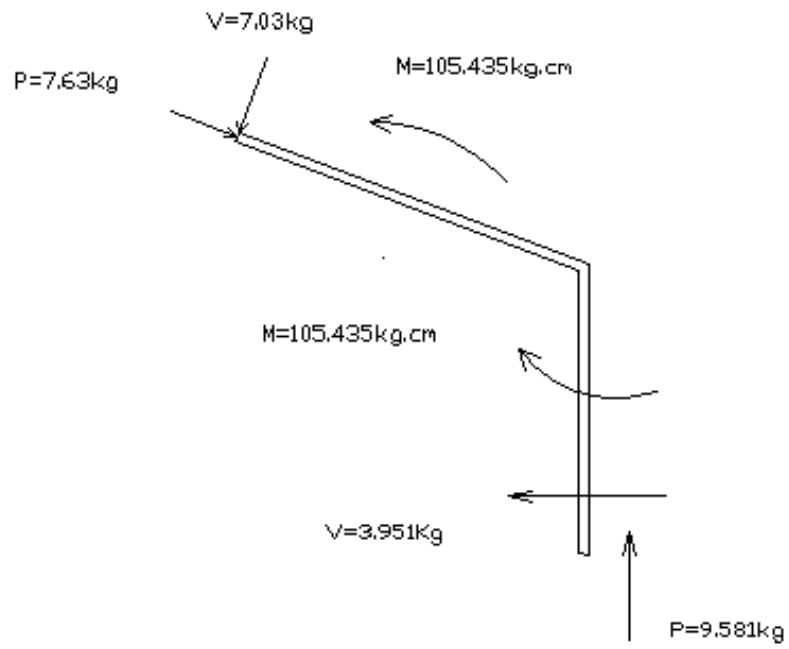
$$P_x = 4.049 \text{ kg} \quad V_x = 3.581 \text{ kg}$$

$$P_y = -P \cdot \sin(65 \cdot (\pi/180)) \quad V_y = V \cdot \sin(25 \cdot (\pi/180))$$

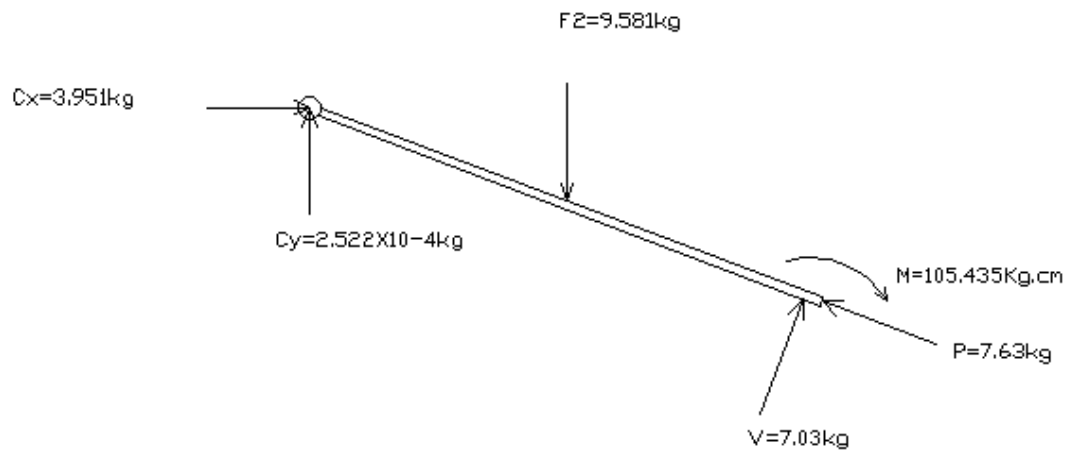
$$P_y = -8.683 \text{ kg} \quad V_y = 1.67 \text{ kg}$$

$$P = P_x + V_x \quad V = P_y + V_y$$

$$P = 7.63 \text{ kg} \quad V = -7.03 \text{ kg}$$

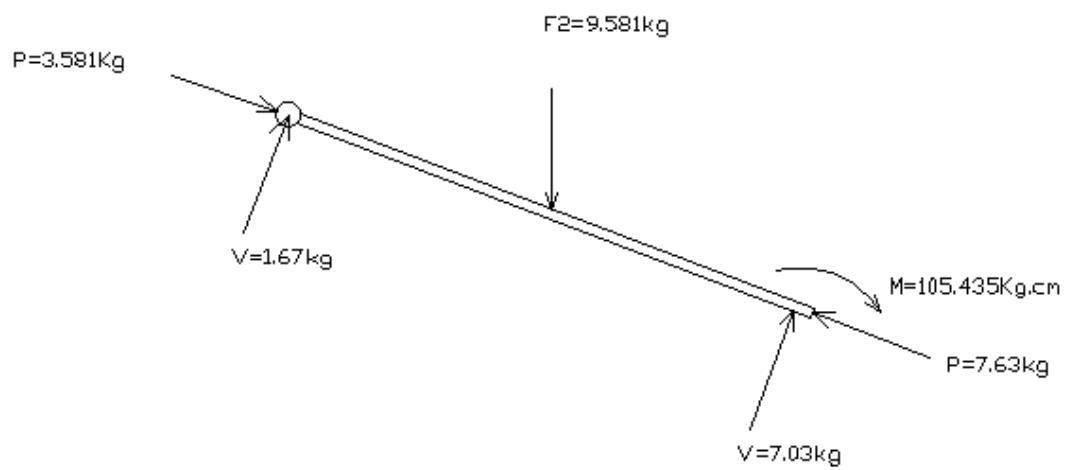


**Figura 2.25 DCL2 del nodo E**



**Figura 2.26 DCL1 del elemento DC**

$$\begin{aligned}
 P1 &= Cy \cdot \cos(65 \cdot (\pi/180)) & P2 &= Cx \cdot \cos(25 \cdot (\pi/180)) \\
 P1 &= -1.066 \times 10^{-4} \text{ kg} & P2 &= 3.581 \text{ Kg} \\
 V1 &= -Cy \cdot \sin(65 \cdot (\pi/180)) & V2 &= Cx \cdot \sin(25 \cdot (\pi/180)) \\
 V1 &= 2.286 \times 10^{-4} \text{ kg} & V2 &= 1.67 \text{ kg} \\
 P &= P1 + P2 & V &= V1 + V2 \\
 P &= 3.581 \text{ kg} & V &= 1.67 \text{ kg}
 \end{aligned}$$



**Figura 2.27 DCL2 del elemento DC**

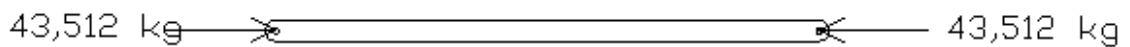
## DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

### 2.5.1. DISEÑO DE LA ARMADURA

El análisis de diseño va a estar sujeto a cual debería ser la menor sección transversal de la cuál va a estar fabricada la armadura y cuál es la máxima carga que soporta.

#### 2.5.1.1. ÁREA MÍNIMA

Para esto se va a tomar en cuenta el elemento que soporta la mayor carga. En éste caso el elemento que soporta la mayor carga es el elemento DB.



**Figura 2.28 Elemento DB**

#### Propiedades del elemento

Material: Aluminio

$S_y = 1755 \text{ kg/cm}^2$

$FS = 1$

$F = 43,512 \text{ kg}$

$S_y$  es la Resistencia a la Fluencia.

Se toma en cuenta la zona de fluencia donde el elemento puede empezar a fallar<sup>19</sup>.

---

<sup>19</sup> SHIGLEY Joseph y MISCHKE Charles, *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA* (McGraw-Hill, Sexta Edición, México 2002), pp. 1222.

FS es el factor de seguridad.

Utilizando un criterio de diseño Optimista, esto implica hacer el cálculo para la menor área que debe tener la sección transversal, se usará un Factor de Seguridad igual a uno<sup>20</sup>.

### 2.5.1.2. MÉTODO DEL ESFUERZO PERMISIBLE

Éste método se basa en una propiedad significativa del material, la resistencia<sup>21</sup>.

$$F/A = S_y/FS$$

$$A = (F \cdot FS) / S_y$$

$$A = 0.026 \text{ cm}^2$$

Ésta es el área mínima que requiere la armadura para que no falle.

Según estas condiciones, se tiene que ver en el mercado un área mínima para la fabricación de la armadura.

El área mínima que existe en el mercado son platinas con una sección transversal de 19,05 x 4,76 mm, aproximadamente 0,91 cm<sup>2</sup>. Por lo cual el diseño estaría sobredimensionado, pero por condiciones didácticas no influyen de manera sustancial.

---

<sup>20</sup> SHIGLEY Joseph y MISCHKE Charles, *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA* (McGraw-Hill, Sexta Edición, México 2002), pp. 25.

<sup>21</sup> SHIGLEY Joseph y MISCHKE Charles, *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA* (McGraw-Hill, Sexta Edición, México 2002), pp. 24.

### **2.5.1.3. CARGA MÁXIMA**

Una vez escogida el área de la sección transversal para la fabricación de la armadura, analizamos cual es la máxima carga que va a soportar.

Para esto de igual manera que el análisis del área mínima, usamos el método del área permisible para calcular la carga máxima.

$$S_y = 1755 \text{ kg/cm}^2$$

$$A = 0,91 \text{ cm}^2$$

$$F/A = S_y/FS$$

$$F = (S_y A) / FS$$

$$F = 1597,05 \text{ kg}$$

Esta es la carga máxima que va a soportar la armadura para que no falle.

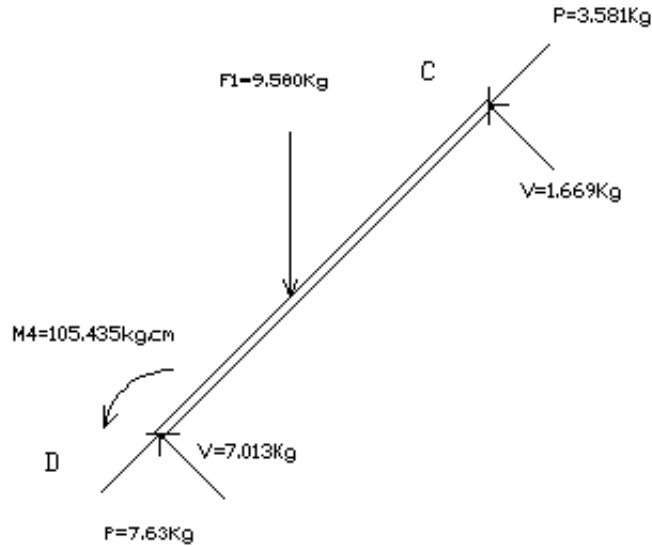
### **2.5.2. DISEÑO DEL PÓRTICO**

El análisis de diseño va a estar sujeto a, cual debería ser la menor sección transversal de la cual va a estar fabricado el pórtico y cual es la máxima carga que soporta.

#### **2.5.2.1. ÁREA MÍNIMA**

Para esto se va a tomar en cuenta el elemento que soporta la mayor carga. En éste caso el elemento que soporta la mayor carga es el elemento DC.





**Figura 2.29 DCL del elemento DC**

### Propiedades del elemento

Material: Acero estructural

$S_y = 2551,02 \text{ kg/cm}^2$

FS = 1

F = 7.63 kg

La fuerza axial , es la mayor carga que soporta el elemento.

$S_y$  es la Resistencia a la Fluencia.

Se toma en cuenta la zona de fluencia donde el elemento puede empezar a fallar<sup>22</sup>.

FS es el factor de seguridad.

Utilizando un criterio de diseño Optimista, esto implica hacer el cálculo para la menor área que debe tener la sección transversal, se usará un Factor de Seguridad igual a uno<sup>23</sup>.

<sup>22</sup> SHIGLEY Joseph y MISCHKE Charles, *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA* (McGraw-Hill, Sexta Edición, México 2002), pp. 1222.

### 2.5.2.2. MÉTODO DEL ESFUERZO PERMISIBLE

Éste método se basa en una propiedad significativa del material, la resistencia<sup>24</sup>.

$$F/A = S_y/FS$$

$$A = (F \cdot FS) / S_y$$

$$A = 2.99 \times 10^{-3} \quad \text{cm}^2$$

Ésta es el área mínima que requiere el pórtico para que no falle.

Según estas condiciones, se tiene que ver en el mercado un área mínima para la fabricación del pórtico.

El área mínima que existe en el mercado son aceros cuadrados con una sección transversal de 11 x 11 mm, aproximadamente 1.21 cm<sup>2</sup>. Por lo cual el diseño estaría sobredimensionado, pero por condiciones didácticas no influyen de manera sustancial.

### 2.5.2.3. CARGA MÁXIMA

Una vez escogida el área de la sección transversal para la fabricación del pórtico, analizamos cual es la máxima carga que va a soportar.

Para esto se va a usar el modelo de hipótesis de falla<sup>25</sup>, donde se va a determinar cual es el factor de seguridad adecuado del elemento.

---

<sup>23</sup> SHIGLEY Joseph y MISCHKE Charles, *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA* (McGraw-Hill, Sexta Edición, México 2002), pp. 25.

<sup>24</sup> SHIGLEY Joseph y MISCHKE Charles, *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA* (McGraw-Hill, Sexta Edición, México 2002), pp. 24.

<sup>25</sup> SHIGLEY Joseph y MISCHKE Charles, *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA* (McGraw-Hill, Sexta Edición, México 2002), pp. 324-326.

El modelo de hipótesis de falla indica las posibles formas en que se manifiesta la pérdida de la funcionalidad de un elemento de máquina, como son la deformación permanente, el agrietamiento y la ruptura.

Dentro del modelo de hipótesis de falla se va a usar el modelo del esfuerzo cortante máximo para materiales dúctiles<sup>26</sup>, el cual indica que la fluencia comienza cuando el esfuerzo cortante máximo de cualquier elemento iguala al esfuerzo cortante máximo en una probeta de ensayo a la tensión del mismo material cuando esa probeta empieza a fluir.

$$\tau \text{ máx} \geq \frac{S_y}{2}$$

$$a = 1.1 \text{ cm}$$

$$b = 1.1 \text{ cm}$$

$$A = a.b$$

$$A = 1.21 \text{ cm}^2$$

$$P = - 7,63 \text{ kg}$$

$$V = 7,013 \text{ kg}$$

$$M = 105,435 \text{ kg cm}$$

### **Esfuerzo normal debido a la fuerza axial P**

$$\sigma_x(P) := \frac{P}{A}$$

$$\sigma_x(P) = -6.306 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

---

<sup>26</sup> SHIGLEY Joseph y MISCHKE Charles, *DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA* (McGraw-Hill, Sexta Edición, México 2002), pp. 326-328.

## Esfuerzo normal debido a la fuerza cortante V

$$\tau_{xy} := \frac{3}{2} \cdot \frac{V}{A}$$

$$\tau_{xy} = 8.694 \quad \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

## Esfuerzo normal producido por flexión

$$M := 105.435 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

$$y := \frac{b}{2}$$

$$y = 0.55 \text{ cm}$$

$$I := \frac{1}{12} \cdot a \cdot b^3$$

$$I = 0.122 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_x(M) := \frac{M \cdot y}{I}$$

$$\sigma_x(M) = 475.289 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

## Esfuerzo normal total a lo largo del eje x

$$\sigma_t := \sigma_x P + \sigma_x M$$

$$\sigma_t = 468.983 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

$$\tau_{\max} := \sqrt{\sigma_t^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{\max} = 469.064 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

De acuerdo al modelo de hipótesis de falla en donde  $\tau_{\max} \geq \frac{S_y}{2}$ , se observa que el elemento no falla, evitando así que entre a la fluencia.

Para determinar cual es la carga máxima para que falle el elemento, se va a igualar la ecuación anterior.

De igualar la ecuación anterior tenemos:

$$\tau_{\max} = \frac{S_y}{2} \quad ; \quad S_y = 2400 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$\tau_{\max} = 1200 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\sigma^2 + \tau_{xy}^2} \quad ; \quad \tau_{xy} = 8.694 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$\sigma = 1199.97 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$\sigma = \sigma_P + \sigma_M \quad ; \quad \sigma_M = 475.289 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$\sigma_P = 724.68 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$\sigma_P = \frac{P}{A} \quad ; \quad A = 1.21 \text{ cm}^2$$

$P = 876.86 \text{ kg}$  ; Máxima carga P que soporta el elemento antes de que falle.

$$\sigma = \sigma_P + \sigma_M \quad ; \quad \sigma_P = -6.306 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$\sigma_M = 1206.276 \left[ \frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$\sigma_M = \frac{M \cdot y}{I} \quad ; \quad y = 0.55 \text{ cm} \quad ; \quad I = 0.122 \text{ cm}^4$$

$M = 267.57 \text{ kg}$  ; Momento máximo M que soporta el elemento antes de que falle.

## **PLANOS DE FABRICACIÓN**

VER ANEXO G

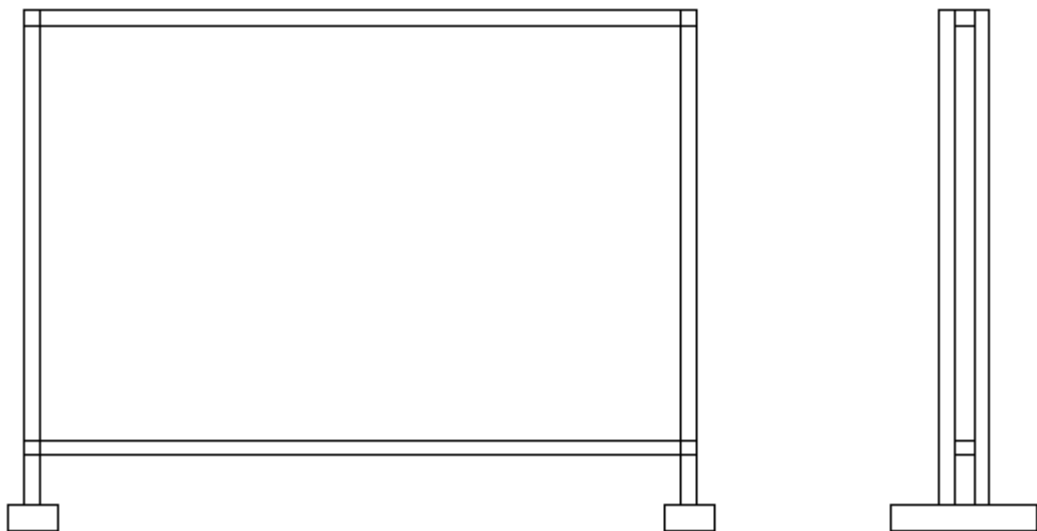
## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DE BASTIDOR METÁLICO

#### ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA

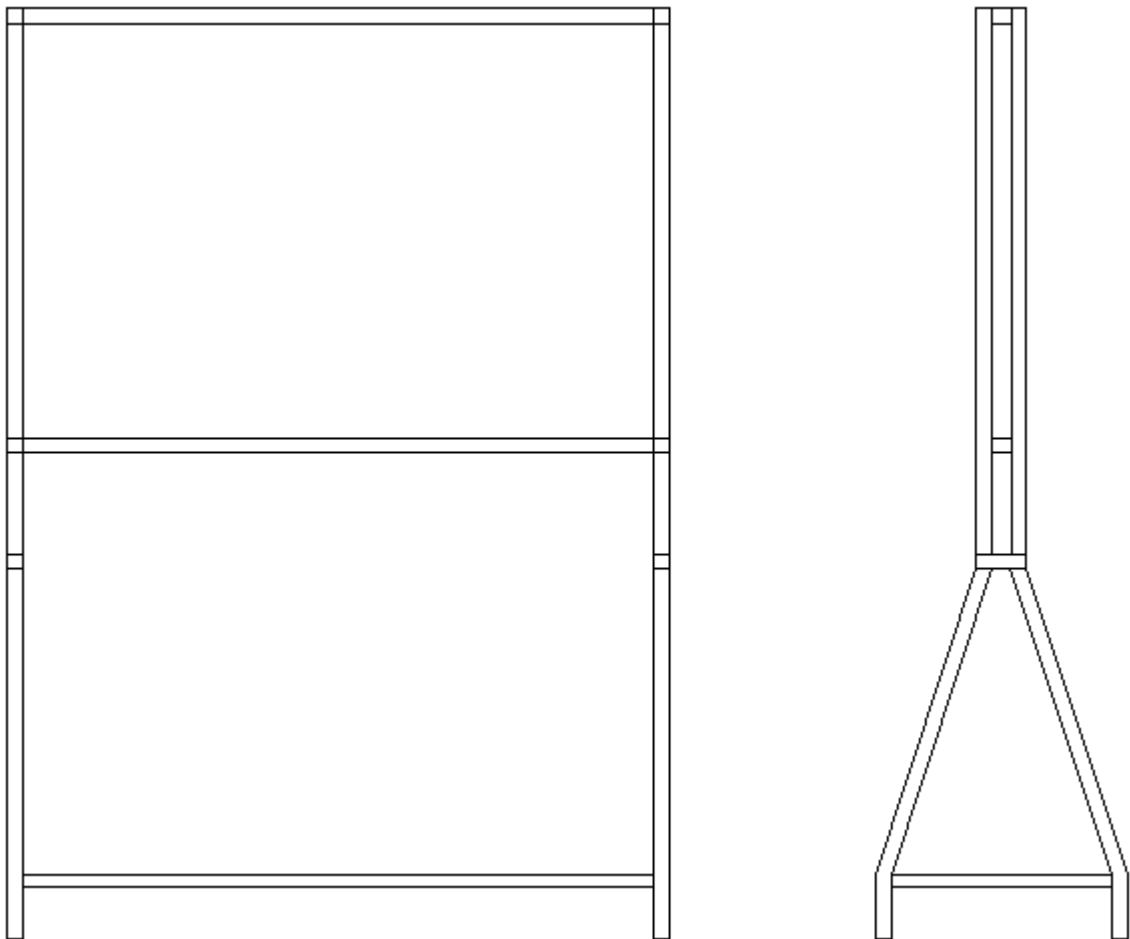
Se han planteado dos alternativas de geometría para el bastidor, tomando en cuenta varios aspectos que se necesitan para el correcto desarrollo de las pruebas experimentales, éstas se muestran a continuación:

**3.1.1. PRIMERA ALTERNATIVA.-** Este bastidor consiste de un marco hecho de doble armazón en el cual se puede montar elementos anexos como por ejemplo soportes para instrumentos de medición, así como, las estructuras a analizarse pero con la particularidad de que su diseño se aplica para ser asentado en el suelo o sobre una mesa, ésta alternativa se muestra en la figura 3.1.



**Figura 3.1 Primera alternativa de bastidor**

**3.1.2. SEGUNDA ALTERNATIVA.-** Este bastidor al igual que el anterior consiste de un marco hecho de doble armazón en el cual se puede montar elementos anexos como soportes para instrumentos de medición, también las estructuras a analizarse, pero también posee una placa en su parte inferior que facilitaría la toma de datos y la colocación de elementos que se van a utilizar en las diferentes pruebas prácticas; pero el principal propósito de su diseño es poseer una buena estabilidad así como una mayor rigidez, lo cual es de vital importancia en la realización de las pruebas que se deben desarrollar para cumplir con los objetivos propuestos en el presente proyecto, ésta alternativa se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2 Segunda alternativa de bastidor**



## **ALTERNATIVAS DE MATERIALES**

Como ya se conoció anteriormente en el mercado nacional se encuentran muchos materiales para la construcción de estructuras metálicas, cada uno con sus respectivas características y propiedades, también con una inmensa variedad de formas de presentación, todos estos materiales son utilizados de acuerdo a las características que las estructuras requieran para cumplir su cometido. Así mismo, de acuerdo a las características antes mencionadas de cada material, estos varían en precio, algunos muy costosos y otros más económicos.

Para el bastidor se requiere un material adecuado y resistente para todos los procesos que se necesitan realizar, y como en la mayoría de estructuras tipo mueble metálico que se fabrican en el mercado se va a utilizar el acero estructural como materia prima.

### **3.2.1. ACERO ESTRUCTURAL**

Anteriormente ya se conoció las características, propiedades y beneficios del acero estructural. A continuación se citan presentaciones de este material que se podrían utilizar para la fabricación del bastidor:

#### **Tubo de sección cuadrangular:**

- perfil 20 x 20 (mm), espesor 1,2 mm, largo 6 m.
- perfil 30 x 30 (mm), espesor 1,5 mm, largo 6 m.

De estas opciones, por estética, resistencia, rigidez y facilidad de análisis la opción más factible que podemos utilizar es el tubo de sección cuadrangular de 30 x 30 (mm), espesor 1,5 mm, largo 6 m.

## **MATRIZ ELEMENTAL DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

Como se pudo conocer anteriormente para todas las alternativas que se presentan en el proyecto, se aplicará una matriz, en la cual mediante un proceso de calificación se obtendrá la mejor y más adecuada alternativa para cumplir con los objetivos propuestos en el proyecto, esta alternativa será la que mayor calificación obtenga, se aplicará el sistema de puntaje que se dio a conocer previamente.

### **3.3.1. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA**

Mediante esta matriz se obtendrá la mejor alternativa de geometría para el bastidor que se aplicará tanto para su análisis como para su construcción. Para esto se calificará a cada una de las alternativas tomando en cuenta características que se deben cumplir para la correcta realización del proyecto.

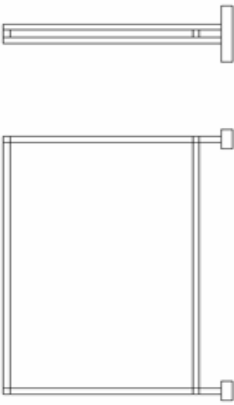
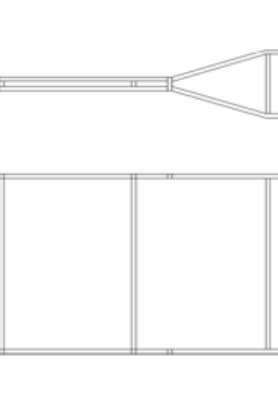
#### **3.3.1.1. CARACTERÍSTICAS PARA MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE GEOMETRÍA**

**3.3.1.1.1. Ergonomía del sistema:** el bastidor debe ser una estructura que brinde ergonomía a todo el sistema, esto quiere decir que cada uno de los elementos deben trabajar en coordinación con todo el sistema. El sistema debe brindar la facilidad y ser agradable para trabajar en él.

**3.3.1.1.2. Brinda facilidad para acoplar los diferentes elementos e instrumentos de medición:** el bastidor debe ser apto para ensamblar en él todos los elementos principales y anexos, que son necesarios para realizar correctamente todas las pruebas experimentales en laboratorio.

**3.3.1.1.3. Diseño con mayor estabilidad:** un bastidor estable asegurará una correcta realización de las prácticas experimentales, así como, un adecuado ensamblaje de todos los elementos, con esto se podrá obtener datos muy confiables.

**Tabla 3.1 Matriz de selección de alternativas de geometría para bastidor**

Características Alternativas	Ergonomía del sistema	Brinda facilidad para acoplar los diferentes elementos e instrumentos de medición	Diseño con mayor estabilidad	Puntaje Total
	2	2	1	5
	3	3	3	9

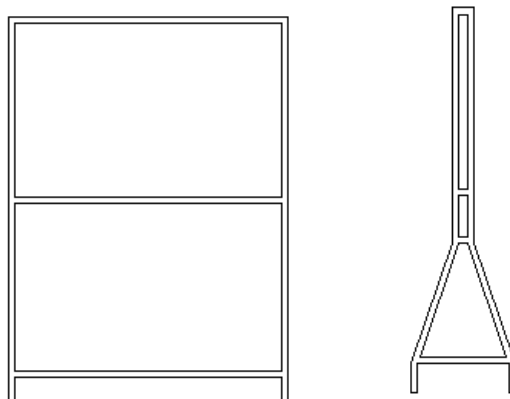
Como se puede observar en la matriz, la alternativa que alcanzó el mayor puntaje fue la segunda con 9, por tal razón este bastidor será el que se va a analizar y construir con el fin de realizar las prácticas experimentales y computacionales.

### **3.3.2. MATRIZ DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES**

Realizar una matriz de selección de alternativas de materiales para el bastidor no es necesario, puesto que con anterioridad se dio a conocer varios aspectos y características que establecían al acero estructural como el material más apto para ser utilizado tanto en su análisis como en su construcción.

### **ANÁLISIS DE CARGAS**

El bastidor está fabricado de tubo de sección cuadrangular de acero de 30x30x1,5 mm, unidos mediante soldadura. La geometría como la ergonomía del bastidor están calculadas de acuerdo a las condiciones que tiene la armadura y el pórtico en su diseño.



**Figura 3.3 Vistas de Bastidor**

El análisis de cargas del bastidor va a estar dado por la mayor carga que soporte dicho cuerpo al colocar tanto la armadura o el pórtico sobre éste.

De los valores obtenidos de cálculos anteriores tanto en la armadura como en el pórtico, donde se obtiene mayor carga es en la armadura con valores de:

$$A_y := 9.061 \quad \text{kg}$$

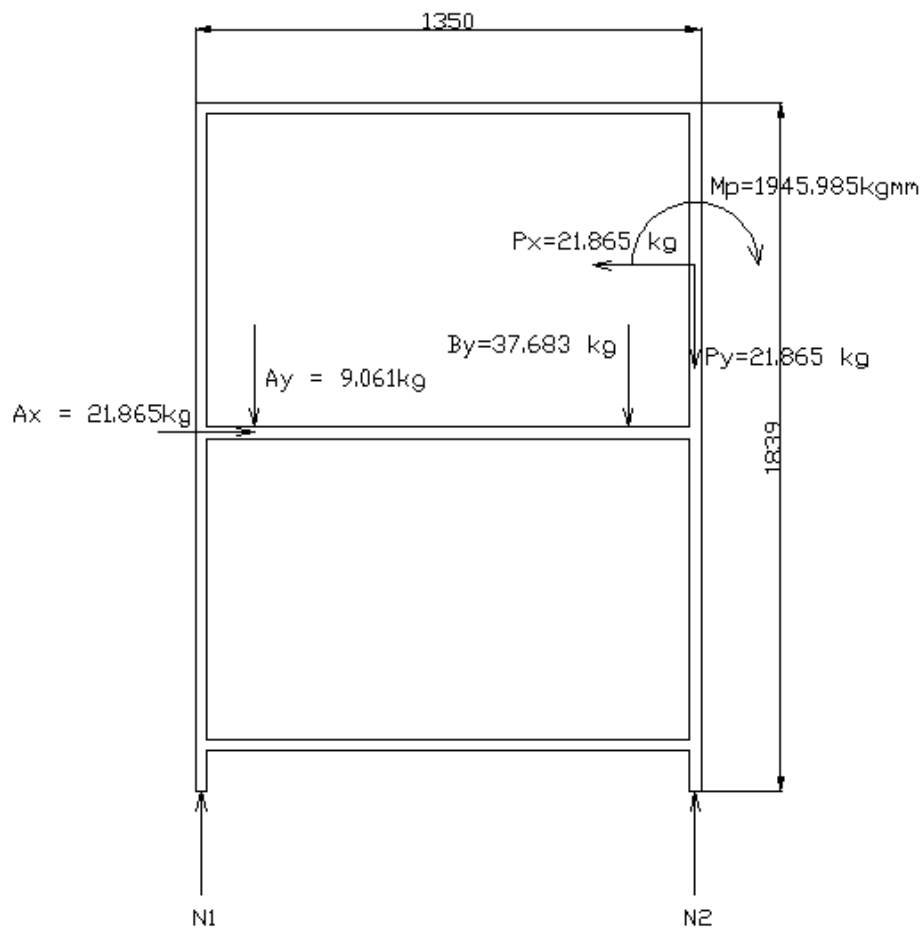
$$B_y := 37.683 \quad \text{kg}$$

$$P_y := 21.865 \quad \text{kg}$$

$$A_x := 21.865 \quad \text{kg}$$

$$P_x := 21.865 \quad \text{kg}$$

$$M_p := 1945.985 \quad \text{kg}\cdot\text{mrr}$$



**Figura 3.4 DCL Bastidor con cargas**

$$\Sigma F_y := 0$$

$$N1 + N2 - Ay - By - Py = 0$$

$$\Sigma MN1 := 0$$

$$Ay \cdot 140 + By \cdot 1140 + Py \cdot 1320 - N2 \cdot 1320 + Mp = 0$$

$$N2 := \frac{Ay \cdot 140 + By \cdot 1140 + Py \cdot 1320 + Mp}{1320}$$

$$N2 = 56.845 \text{ kg}$$

$$N1 := Ay + By + Py - N2$$

$$N1 = 11.764 \text{ kg}$$

## DISEÑO DEL BASTIDOR

Dentro del diseño del bastidor se va a analizar cual debería ser el ancho de la base más adecuado para que bajo la acción de alguna fuerza o empuje el bastidor no se vuelque, analizando también a que altura estaría aplicada ésta carga.

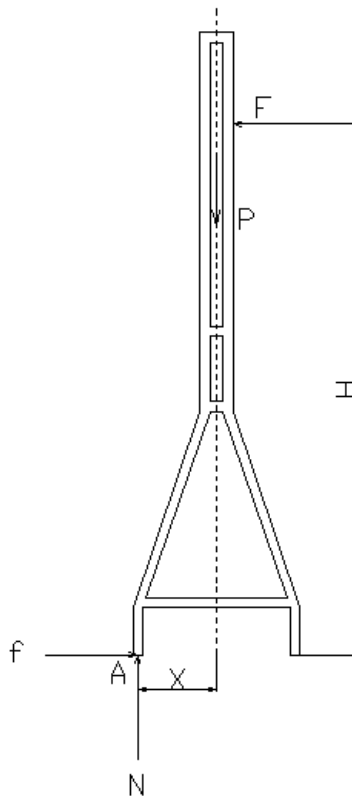


Figura 3.5 DCL1 Bastidor vista lateral

### 3.5.1. ALTURA DE CARGA APLICADA

$$P := 191.53 \text{ kg}$$

$$u := 0.9$$

$$\Sigma F_x := 0$$

$$f - F = 0$$

$$F = f$$

$$F = u \cdot N$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$N - P = 0$$

$$N = P$$

$$N = 191.53 \text{ kg}$$

$$F = u \cdot N$$

$$F = 172.377 \text{ kg}$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$F \cdot H - P \cdot 230 = 0$$

$$H = P \cdot 230 / F$$

$$H = 255.556 \text{ mm}$$

Esta es la altura en donde si se aplicaría una carga ligeramente mayor a la fuerza  $F$ , el bastidor se volcaría. El bastidor tiene una altura menor a ésta lo que quiere decir que está sobredimensionado que es lo que se desea tener para que sea lo más estable y rígido posible.

Ahora se va a hacer una consideración de carga en el caso de que una persona empuje o se arrime al bastidor y ver a que altura debería estar aplicada. La carga que se va a utilizar es de 30 kg.

$$F = 30 \text{ kg}$$

$$\Sigma MA = 0$$

$$F \cdot H - P \cdot 230 = 0$$

$$H = P \cdot 230 / F$$

$$H = 1468 \text{ mm}$$

Esto hace ver que la geometría como la ergonomía del bastidor cumplen con las condiciones de diseño, teniendo en cuenta que la altura promedio de una persona es de 1,70 m, y que si se arrima o empuja, la carga se produce a una altura aproximada de 1,50 m, lo que se aproxima y corresponde con la altura H calculada anteriormente.

### 3.5.2. DISTANCIA EN LA BASE DEL BASTIDOR

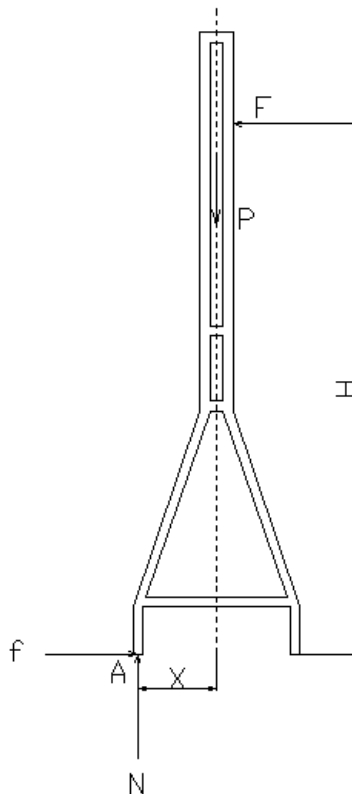


Figura 3.6 DCL2 Bastidor vista lateral



Haciendo una sumatoria de momentos respecto a A, tenemos:

$$F = \frac{X.P}{H}$$

F = Fuerza ejercida por una persona

X = Distancia mínima, para que el bastidor no vuelque

P = Peso del bastidor

H = Altura del bastidor para que no se vuelque

**Tabla 3.2 Fuerzas y Distancias para diseño de base de bastidor**

<b>ORDEN</b>	<b>DISTANCIA X [mm]</b>	<b>FUERZA F [kg]</b>
1	50	6,384333333
2	60	7,6612
3	70	8,938066667
4	175	22,34516667
5	230	29,36793333
6	250	31,92166667
7	500	63,84333333
8	700	89,38066667

Para el análisis de una distancia apropiada en la base del bastidor, se asumirá un rango de medidas arbitrarias que de un valor aproximado a la fuerza ejercida por una persona.

Del análisis realizado, según las condiciones asumidas en la carga aplicada por una persona se puede ver que la distancia óptima para la base del bastidor es de 460 mm.

### 3.5.3. CARGA MÁXIMA

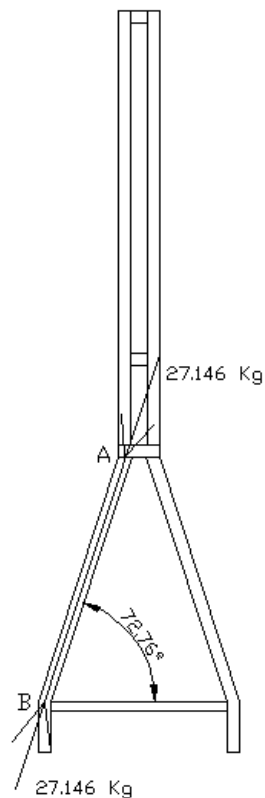
Con el análisis de cargas que se estudio anteriormente, el elemento AB es el que soporta la mayor parte y está a compresión.

$$N2 = 56.845 \text{ Kg}$$

$$N2/2 = 28.4225 \text{ Kg}$$

$$F_{ab} = 28.4225 \cdot \cos(17.24^\circ)$$

$$F_{ab} = 27.146 \text{ Kg} \quad \text{Fuerza a la que está sometido el elemento AB.}$$



**Figura 3.7 Bastidor con elemento sometido a carga**

Elemento AB:

Sección: 30x30 mm, e = 1.5 mm

Área = 171 mm<sup>2</sup> = 1.71 cm<sup>2</sup>

Ahora que se tiene las dimensiones de la sección del elemento AB que está sometido a carga de compresión, se procede a calcular la fuerza máxima que éste soportaría con la ecuación de compatibilidad.

$$\sigma_{\text{máx}} \leq [\sigma]$$

$$\sigma_{\text{máx}} \leq \frac{S_y}{FS}$$

$$\frac{F_{\text{máx}}}{\text{Área}} \leq \frac{S_y}{FS}$$

$$S_y = 2400 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

Se iguala la expresión para calcular la fuerza máxima que soporta el elemento, ya que se conoce el área.

$$\frac{F_{\text{máx}}}{\text{Área}} = \frac{S_y}{FS}$$

$$F_{\text{máx}} = \frac{S_y \cdot \text{Área}}{FS}$$

$$F_{\text{máx}} = \frac{2400 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \cdot 1.71 \text{cm}^2}{1}$$

$$F_{\text{máx}} = 4104 \text{Kg}$$

La fuerza máxima que soporta el elemento AB a compresión es 4104 Kg, y la fuerza máxima que se llega a obtener en las pruebas experimentales en este elemento a compresión es 27.146 Kg, razón por la cual se conoce y comprueba que no falla el elemento y por ende tampoco el bastidor, se justifica de por sí entonces el material y sección escogidas para el bastidor.

## PLANOS DE FABRICACIÓN

VER ANEXO G



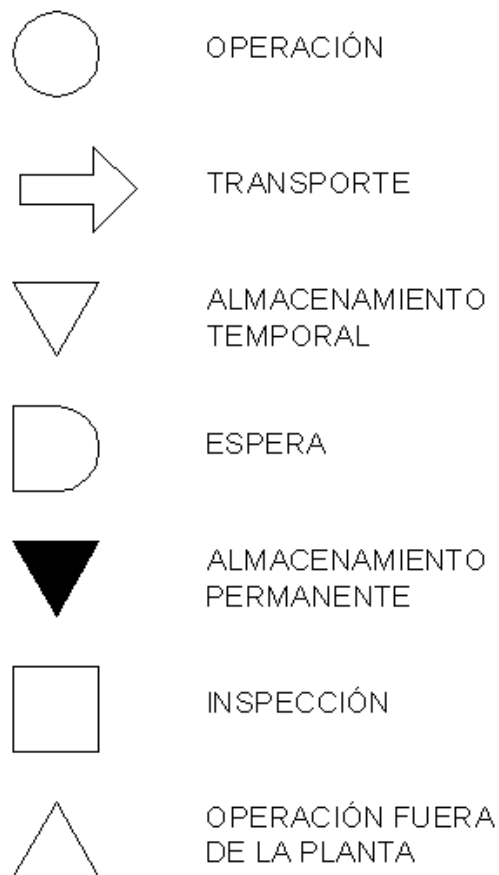
## CAPÍTULO IV

### 4. CONSTRUCCIÓN

#### DIAGRAMAS DE PROCESOS DE FABRICACIÓN Y MONTAJE

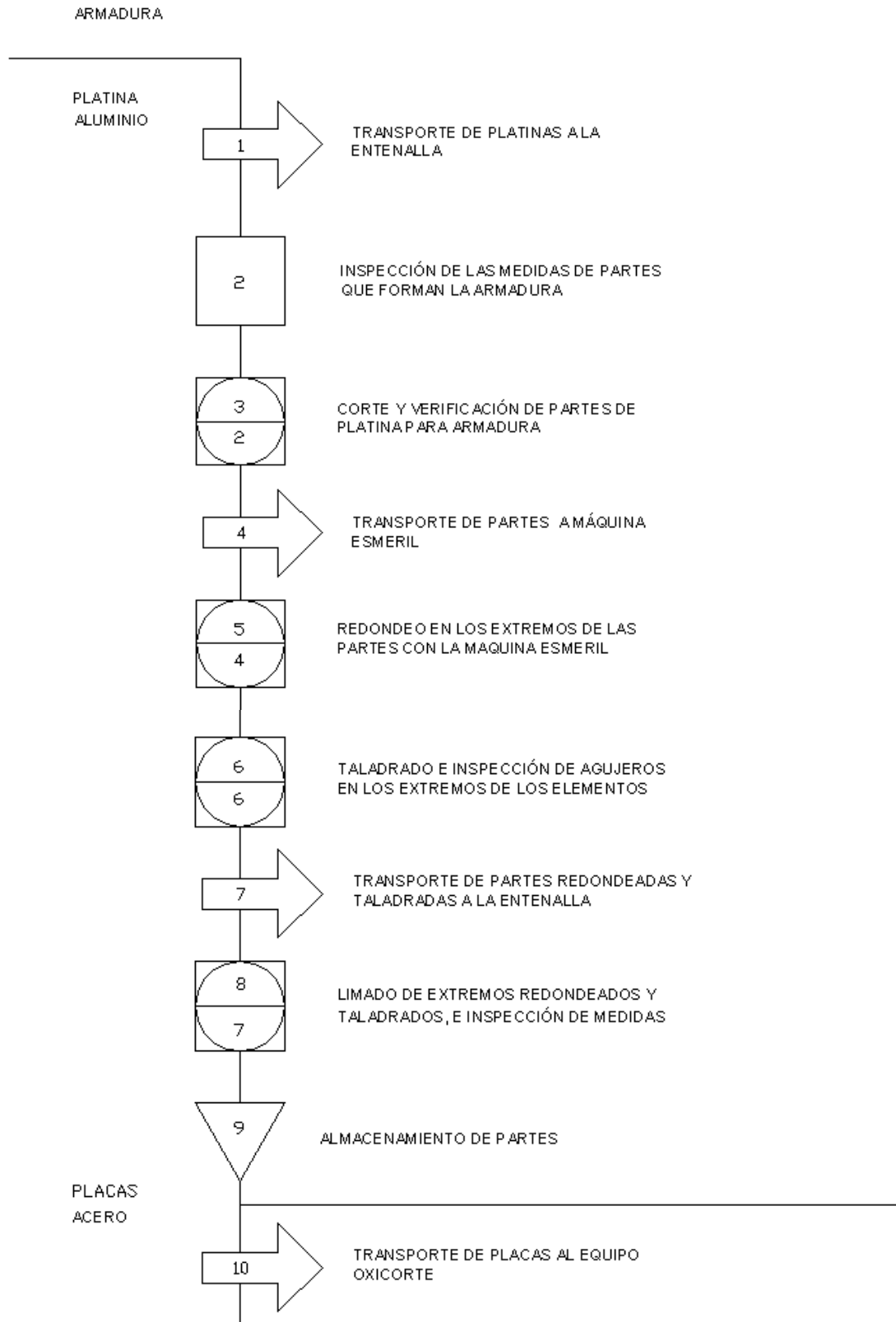
Los diagramas de procesos son una representación gráfica de las actividades y secuencias necesarias para obtener el producto final, facilitan la comparación de los distintos procesos.

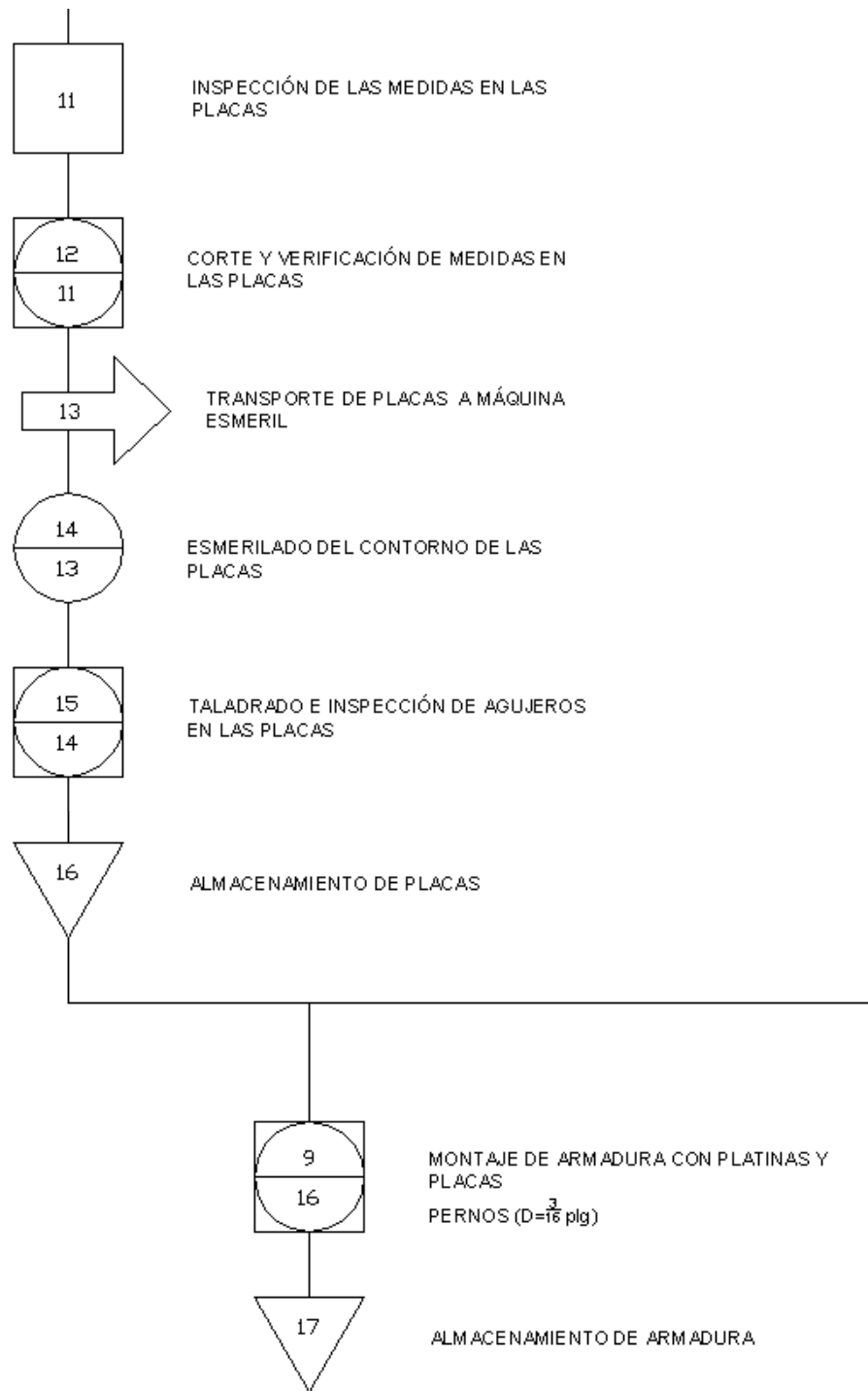
Se emplean símbolos para representar estos diagramas, siendo la simbología ASME la más utilizada, como se muestra a continuación:



**Figura 4.1 Simbología de Diagramas de Procesos**

### 4.1.1. DIAGRAMA DE PROCESOS DE FABRICACIÓN Y MONTAJE DE LA ARMADURA





**Figura 4.2 Diagrama de procesos de fabricación y montaje de la armadura**

## 4.1.2. DIAGRAMA DE PROCESOS DE FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL PÓRTICO

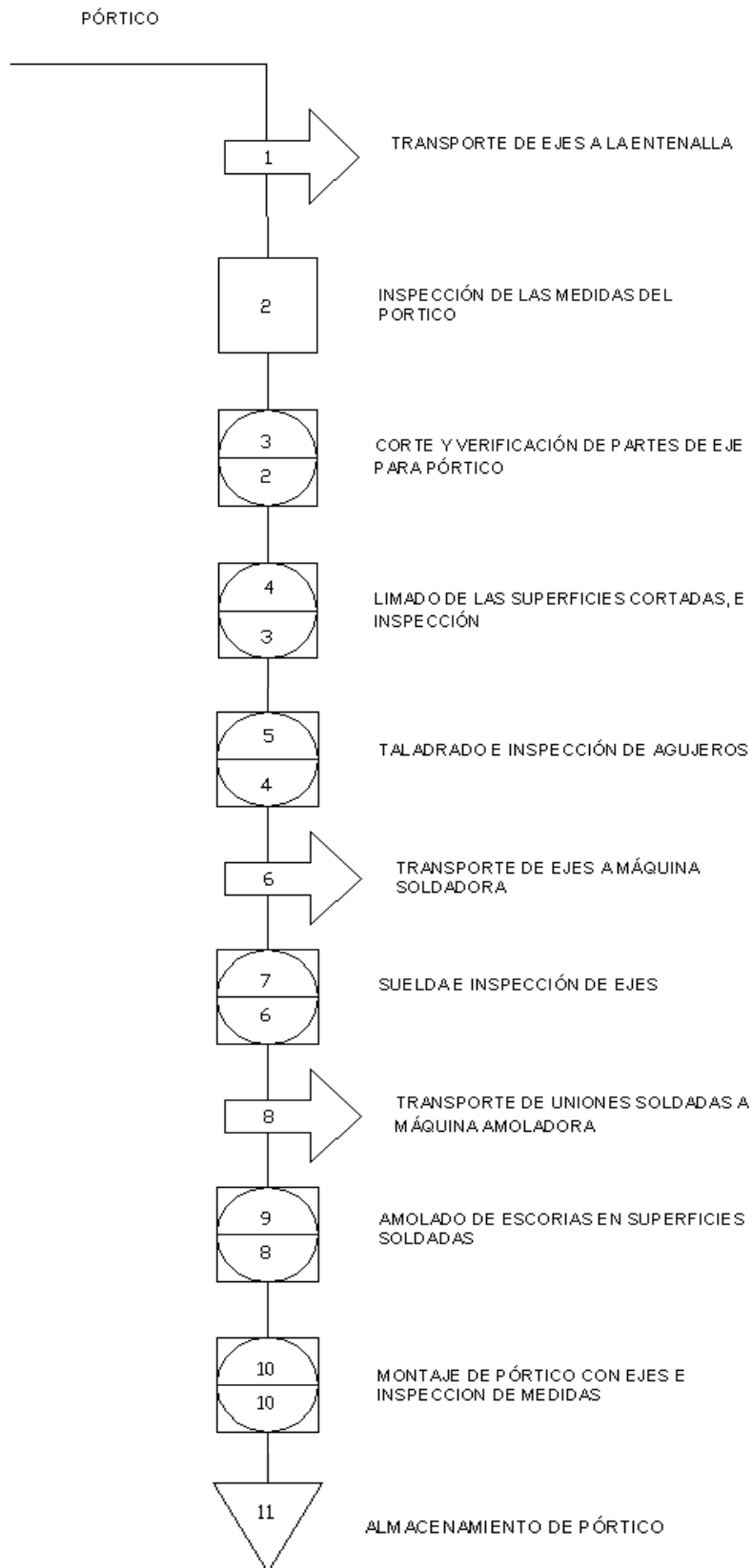


Figura 4.3 Diagrama de procesos de fabricación y montaje del pÓrtico



### 4.1.3. DIAGRAMA DE PROCESOS DE FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL BASTIDOR

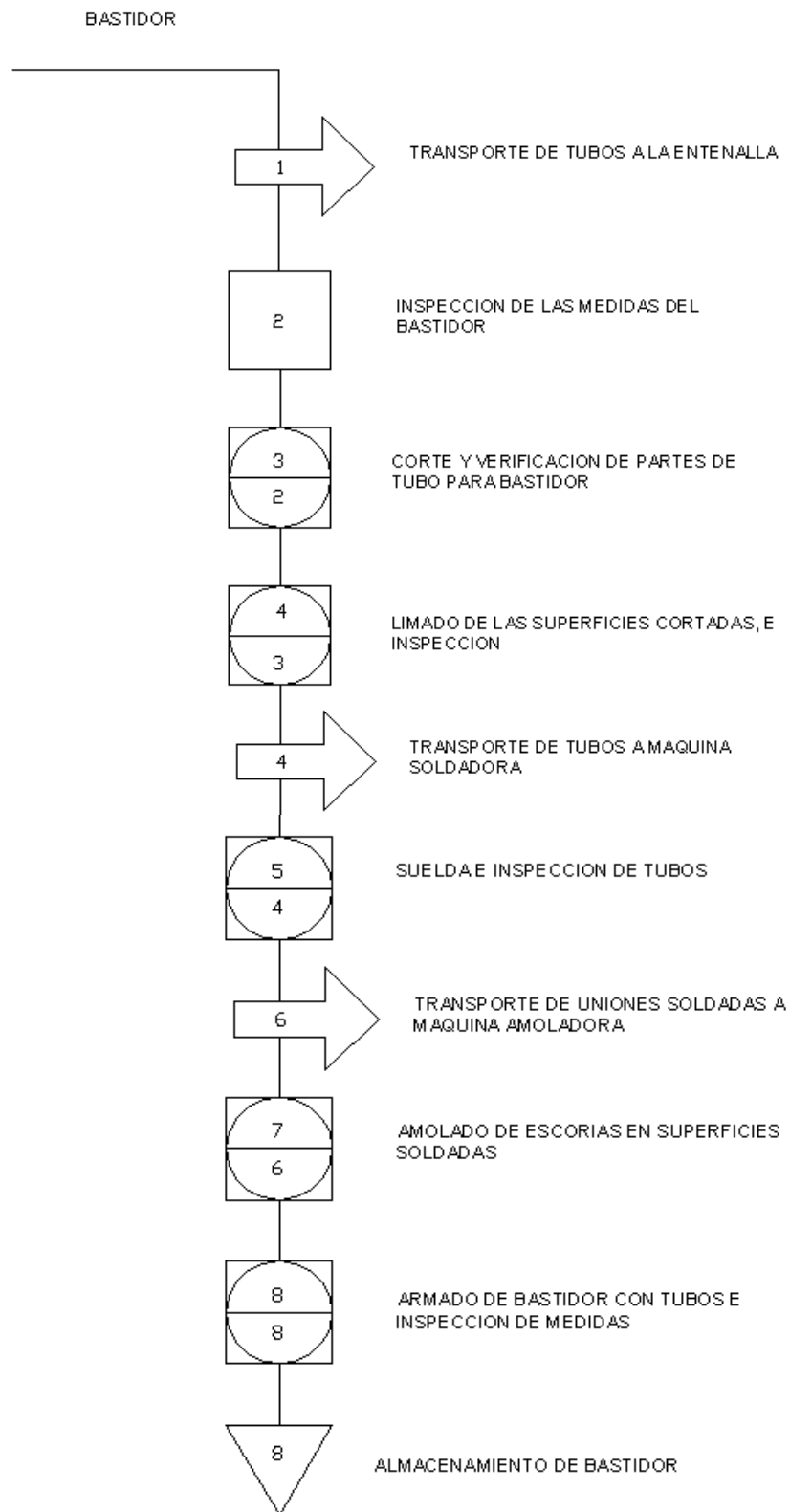


Figura 4.4 Diagrama de procesos de fabricación y montaje del bastidor

## **CONSTRUCCIÓN**

### **4.2.1. CONSTRUCCIÓN DE ARMADURA**

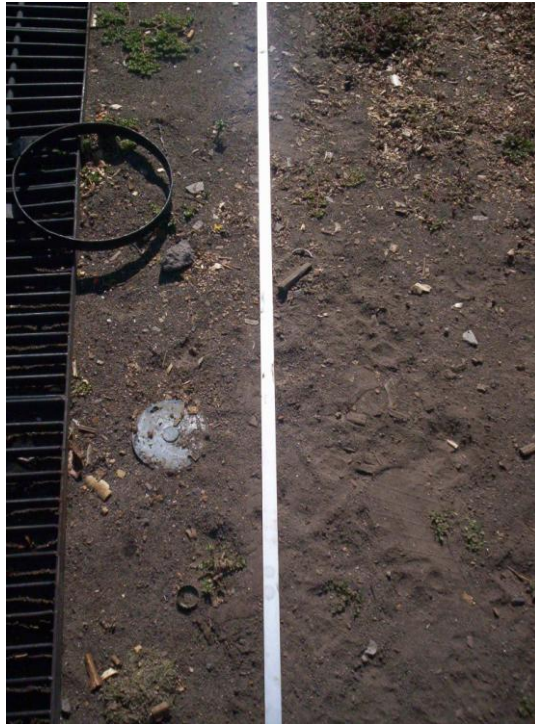
Para la construcción de la armadura se fabricaron primeramente sus partes constituyentes que son: sus elementos propiamente dichos y varias placas que a través de pernos cumplen la función de conectores entre los elementos en cada uno de los nodos, esto también con la finalidad de tener una armadura con sus componentes en un solo plano.

#### **4.2.1.1. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS**

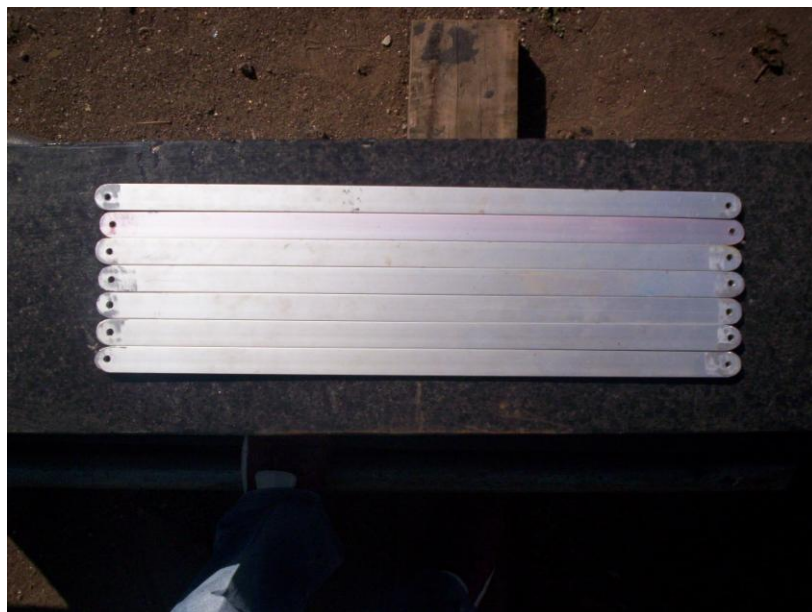
Como se conoció anteriormente los elementos de la armadura son de aluminio, son siete elementos y se siguieron algunos pasos para su fabricación que se detallan a continuación:

- Primeramente se compra la materia prima que es una platina de aluminio que tiene un largo de 6 m, con una sección transversal de 19,05 x 4,76 (mm).
- La materia prima es transportada hacia el taller, en donde se inspeccionan todas las medidas.
- Se trazan líneas y marcas referenciales en la platina para facilitar los procesos de manufactura que se llevarán a cabo.
- Se transporta la platina a la entenalla en donde se procede al corte de los elementos mediante una sierra.
- Los elementos se transportan al esmeril en donde se procede al redondeo de los extremos.

- Se lleva al taladro en donde se procede a realizar los agujeros de diámetro 3/16" en los extremos de los elementos.
- En la entenalla se lima los extremos redondeados de los elementos y se verifican todas las medidas.



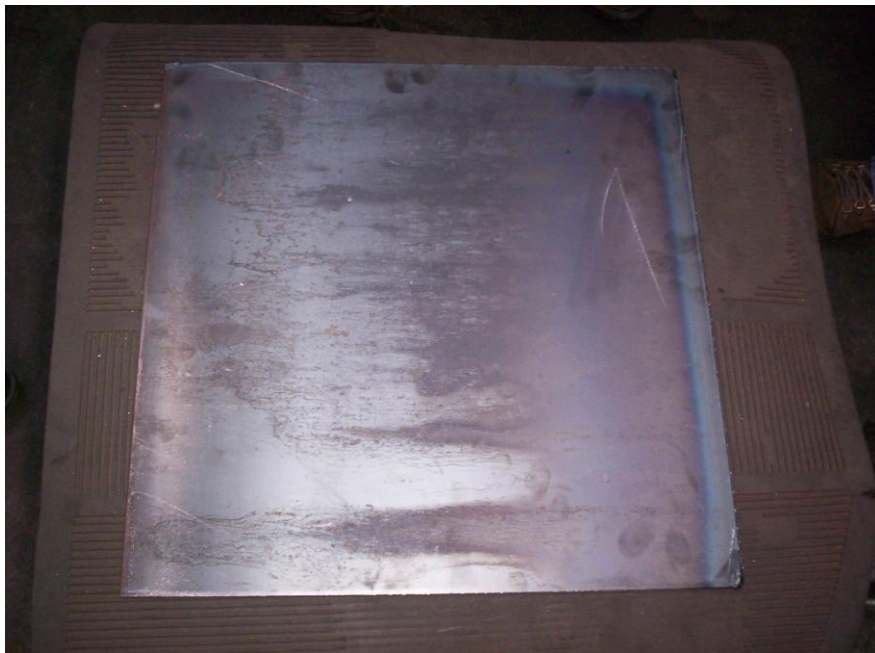
**Figura 4.5 Platina de Aluminio**



**Figura 4.6 Elementos de la armadura**

#### 4.2.1.2. CONSTRUCCIÓN DE PLACAS

- Se compra la materia prima que es una plancha de acero de 300 x 300 (mm) que tiene un espesor de 4 mm.
- La materia prima es transportada hacia el taller, en donde se inspeccionan todas las medidas.
- Se trazan líneas y marcas referenciales en la plancha para facilitar los procesos de manufactura que se llevarán a cabo.
- Se transporta la plancha al equipo de oxicorte en donde se procede al corte de cada una de las placas.
- Los elementos se transportan al esmeril para igualar el contorno de las placas.
- Se lleva las placas al taladro en donde se procede a realizar los agujeros de diámetros 3/16" y 5/16", y se verifican las medidas, son diez placas.



**Figura 4.7 Plancha de acero**



**Figura 4.8 Perforación de agujeros en taladro**



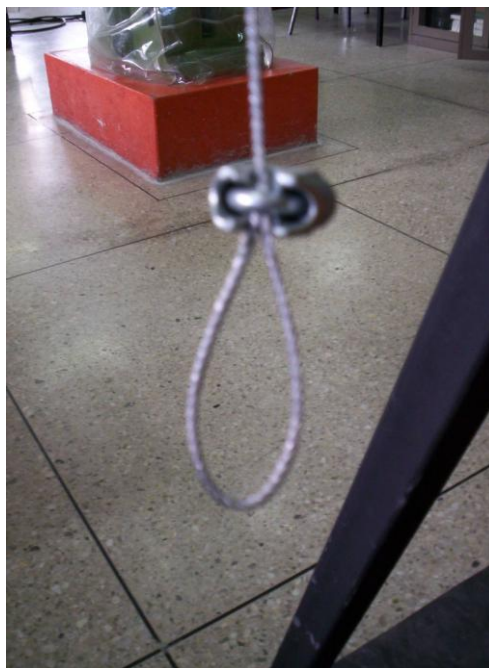
**Figura 4.9 Placas de Acero**

### 4.2.1.3. CONSTRUCCIÓN DE GANCHOS

Estos ganchos son para poder aplicar las cargas en la armadura, y su construcción es simple, se utiliza un cable de acero el cual se deshila para posteriormente hilarlo de nuevo formando un lazo el cual además es asegurado por un grillete, son cuatro ganchos y uno adicional hecho con una placa de acero debido al tamaño de uno de los porta pesas con el fin de no tener contacto con uno de los elementos de la armadura.



**Figura 4.10 Cable de Acero y Grillete**



**Figura 4.11 Gancho tipo lazo con grillete**

## **4.2.2. CONSTRUCCIÓN DE PÓRTICO**

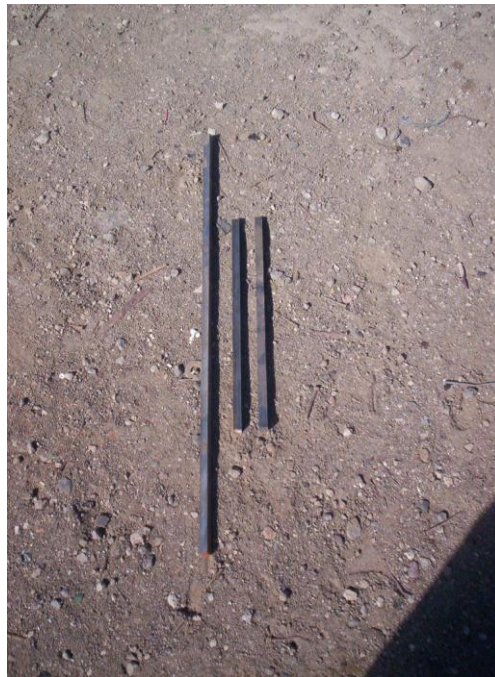
Las partes que constituyen el pórtico son dos elementos simétricos unidos mediante un perno y formados de componentes soldados entre sí, con unos pequeños bujes soldados en sus extremos inferiores para facilitar el acoplamiento de los apoyos.

### **4.2.2.1. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS**

Los elementos del pórtico son de acero estructural como se conoció anteriormente, esto para cumplir con algunas características que se necesitan, se siguieron algunos pasos para su fabricación que se detallan a continuación:

- Se compra la materia prima que es un acero estructural de sección cuadrada 11 x 11 (mm) que tiene un largo de 6 m.
- La materia prima es transportada hacia el taller, en donde se inspeccionan todas las medidas.
- Se trazan líneas y marcas referenciales en el acero para facilitar los procesos de manufactura que se llevarán a cabo.
- Se transporta el acero a la entenalla en donde se procede al corte de los elementos mediante una sierra y se procede al limado de las partes cortadas.
- En el esmeril se llevan dos de los elementos para proceder a rebajar la sección de uno de sus extremos.
- Se lleva al taladro en donde se procede a realizar los agujeros de diámetro 3/16" en los extremos de los dos elementos esmerilados.

- Se transportan los elementos a la máquina soldadora y se los procede a soldar y a verificar sus medidas.
- Con la máquina amoladora se procede a quitar las escorias de las superficies soldadas y se inspeccionan todas las medidas.



**Figura 4.12 Acero estructural de sección cuadrada**



**Figura 4.13 Elementos del pórtico**



#### 4.2.2.2. ACOPLAMIENTO DE BUJES

Los bujes con un diámetro interno de 5/16", son maquinados de acuerdo a la medida de la sección transversal del acero de sección cuadrada que es de 11 mm, luego se procede a soldarlos a los extremos de los elementos, con esto se consigue una sección uniforme para poder acoplar a los apoyos, son dos bujes.



**Figura 4.14 Bujes soldado al extremo de uno de los elementos del pórtico**



**Figura 4.15 Bujes en ambos elementos del pórtico**

### 4.2.2.3. CONSTRUCCIÓN DE GANCHOS

Los ganchos para el pórtico están compuestos de dos placas, con dos agujeros en cada una de ellas en los extremos, pero en una de las placas los agujeros son roscados, con la finalidad de poder regular la apertura entre ellas mediante dos pernos para poder movilizarlas a lo largo de los elementos del pórtico, así mismo en esta placa se han soldado una placa más pequeña con un agujero, esta placa está alineada con la línea de fuerza de las cargas y el agujero es para poder suspenderlas. Son cuatro ganchos en total para el pórtico.



**Figura 4.16 Gancho para secciones horizontales**



**Figura 4.17 Gancho para secciones inclinadas**

### **4.2.3. CONSTRUCCIÓN DE BASTIDOR**

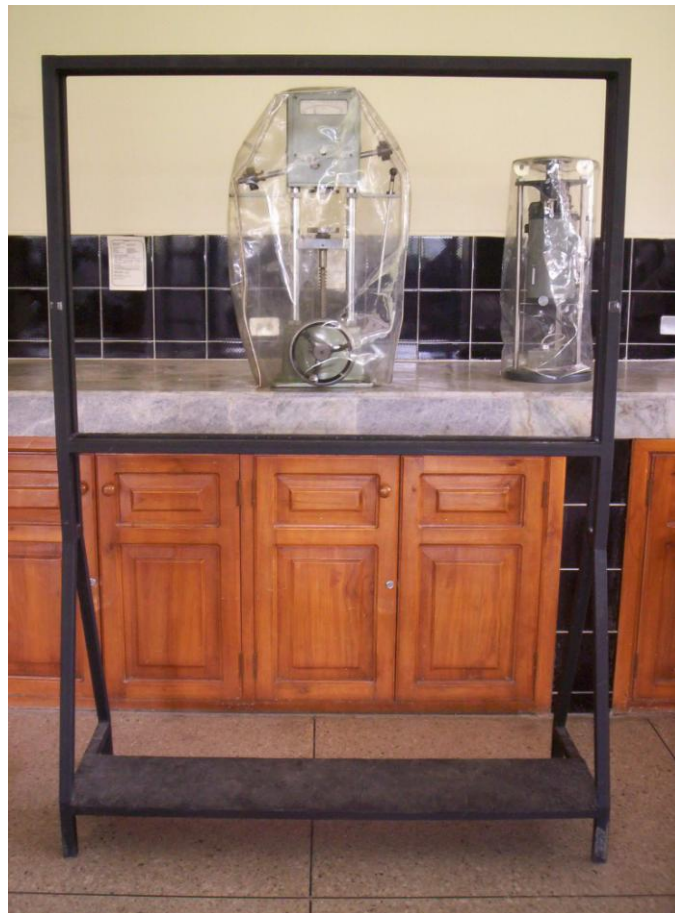
Los elementos que constituyen el bastidor son todos de tubo de acero estructural y soldados entre sí, con una placa en su parte inferior para poder colocar elementos, instrumentos o herramientas que se necesiten para las prácticas experimentales.

#### **4.2.3.1. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS**

- Se compra la materia prima que son dos tubos de acero estructural de sección cuadrangular 30 x 30 (mm), espesor 1,5 mm, largo de 6 m.
- La materia prima es transportada hacia el taller, en donde se inspeccionan todas las medidas.
- Se trazan líneas y marcas referenciales en los tubos para facilitar los procesos de manufactura que se llevarán a cabo.
- Se transportan los tubos a la entenalla en donde se procede al corte de los elementos mediante una sierra y se procede al limado de las partes cortadas.
- Se transportan los elementos a la máquina soldadora y se los procede a soldar y a verificar sus medidas.
- Con la máquina amoladora se procede a quitar las escorias de las superficies soldadas y se inspeccionan todas las medidas.
- Con el taladro se realiza algunos agujeros en ciertos componentes del bastidor, en los cuales se acoplarán mediante pernos algunos elementos anexos necesarios para la realización de las pruebas prácticas.



**Figura 4.18 Elementos soldados del bastidor**



**Figura 4.19 Bastidor**

#### **4.2.3.2. CONSTRUCCIÓN DE PLANCHA**

Esta plancha se ubica en la parte inferior del bastidor, tiene la finalidad de servir como soporte para poder colocar elementos, instrumentos o herramientas que se necesiten para las diferentes prácticas experimentales, tiene un espesor de 4 mm, se utilizó oxicorte para cortar la plancha, luego se procedió a limar todas sus imperfecciones y se procedió a soldarla al bastidor.



**Figura 4.20 Plancha de acero del bastidor**

#### **4.2.3.3. COLOCACIÓN DE REGATONES**

Se compró cuatro regatones de caucho de 29 x 29 (mm) para colocarlos en las patas del bastidor teniendo en cuenta que son de tubo de acero de 30 x 30 (mm), con esto se obtendrá una mayor estabilidad del bastidor mediante su coeficiente de rozamiento con el piso del laboratorio.



**Figura 4.21 Regatones de caucho**



**Figura 4.22 Colocación de regatones en bastidor**

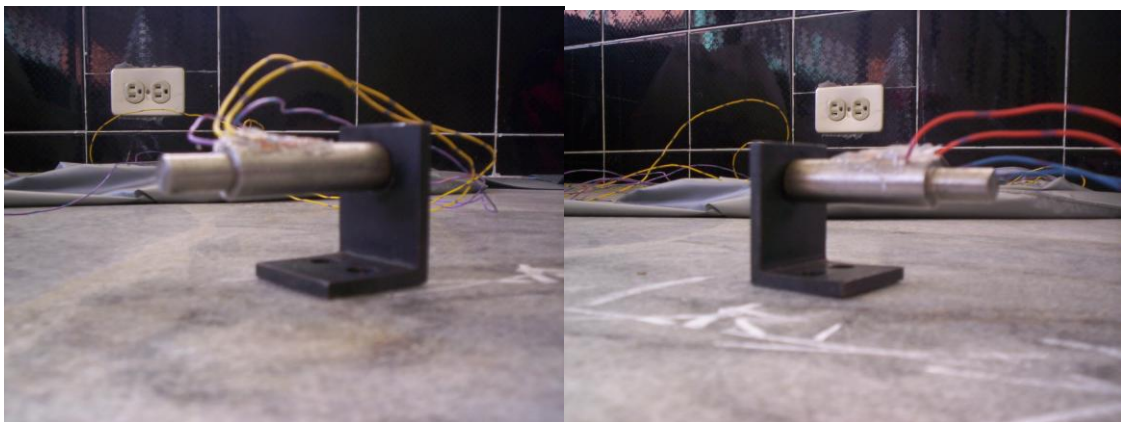
## 4.2.4. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS ANEXOS

Los elementos anexos constituyen algunas piezas adicionales que nos brindan la facilidad de realizar correctamente todas las pruebas experimentales en el equipo, entre las cuales están soportes para instrumentos de medición, apoyos para cálculo de reacciones, guías de elementos, polea para dirección de línea de fuerza, pesas y porta pesas.

### 4.2.4.1. CONSTRUCCIÓN DE APOYOS

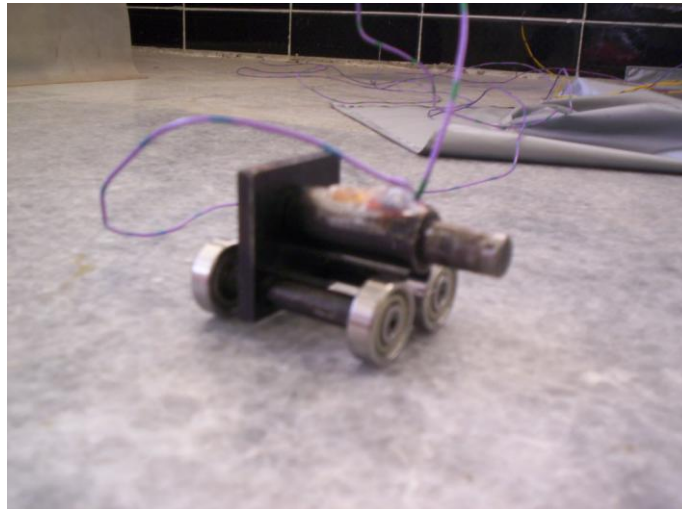
Estos apoyos son pequeños ejes de acero y son utilizados tanto en la armadura como en el pórtico, mediante estos apoyos y un sensor se podrá medir las deformaciones unitarias del material y con un cálculo se obtendrá las reacciones en cada uno de ellos como se mostrará posteriormente.

**4.2.4.1.1. Construcción de apoyos tipo pasador:** son dos apoyos que constan de un pequeño eje de acero que ha sido torneado y tiene dos secciones, la de su extremo con un diámetro menor para poder montar las estructuras, y la otra sección de diámetro mayor está acoplada a un ángulo de acero con dos agujeros en una de sus caras para poder montar en el bastidor mediante dos pernos, así funcionan como apoyos de tipo pasador.



**Figura 4.23 Apoyos tipo pasador**

**4.2.4.1.2. Construcción de apoyo tipo rodillo:** este apoyo consta de un pequeño eje de acero que ha sido torneado y tiene dos secciones, la de su extremo con un diámetro menor para poder montar la estructura, y la otra sección de diámetro mayor está acoplada a una placa de acero con dos ejes y cuatro rodamientos que cumplen la función de pequeñas ruedas con la finalidad de que todo el apoyo pueda deslizarse sobre una placa, así funciona como un apoyo tipo rodillo.

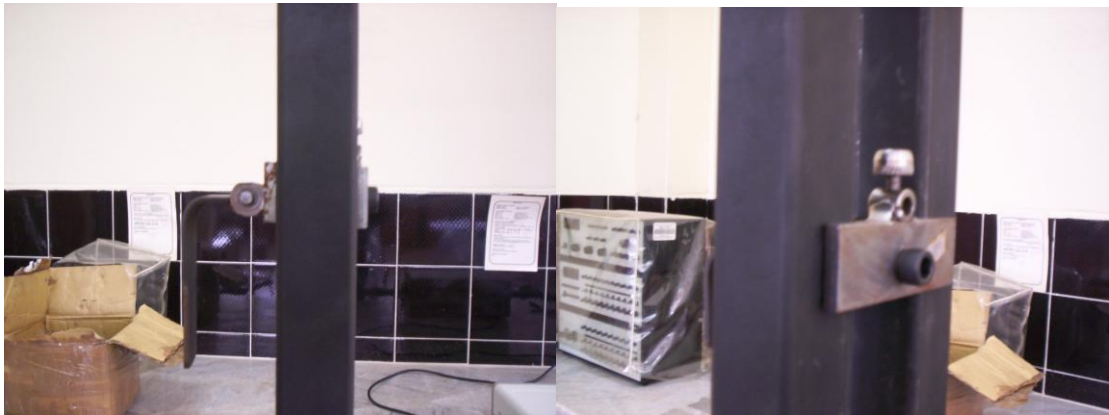


**Figura 4.24 Apoyo tipo rodillo**

#### **4.2.4.2. CONSTRUCCIÓN DE SOPORTES PARA COMPARADORES DE RELOJ**

Estos soportes son de acero, y fueron maquinados, constan de dos placas unidas mediante un perno con un sistema de sujeción excéntrico mediante una palanca, con la finalidad de poder movilizarlos a lo largo del bastidor. En las placas están soldados dos bujes con unos pequeños pernos ajustables que sirven como soporte para dos vástagos hechos de acero plata que a la vez se conectan con dos soportes también ajustables mediante unos pequeños pernos para los comparadores de reloj.





**Figura 4.25 Soporte para comparador de reloj con sistema de sujeción excéntrico mediante palanca**



**Figura 4.26 Vástagos con soportes ajustables para comparadores de reloj**



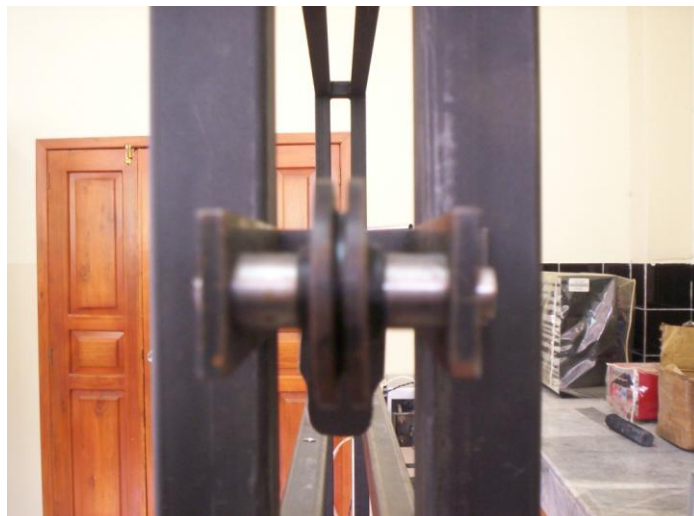
**Figura 4.27 Sistema montado de soporte para comparador de reloj**

#### 4.2.4.3. CONSTRUCCIÓN DE POLEA Y SOPORTE

Este soporte es de acero, y también fue maquinado, consta de dos placas unidas mediante un perno con un sistema de sujeción excéntrico mediante una palanca, con la finalidad de poder movilizarlos a lo largo del bastidor. Una de las placas está maquinada de tal forma que otras dos placas unidas a ella sirven como soporte para una polea fabricada de acero que fue diseñada con anterioridad para un cable acerado que soportará diferentes cargas para la realización de las prácticas experimentales.



**Figura 4.28 Sistema montado de soporte y polea**



**Figura 4.29 Polea para cable acerado**

#### **4.2.4.4. CONSTRUCCIÓN DE PLACA BASE PARA APOYO TIPO RODILLO**

Esta placa es de acero, está empernada al bastidor, sirve como base para el apoyo de tipo rodillo y así éste pueda deslizarse libremente sobre ella. El espesor de ésta placa coloca a una altura determinada al apoyo tipo rodillo logrando que todo el conjunto ensamblado esté correctamente nivelado.



**Figura 4.30 Placa base para apoyo tipo rodillo**

#### **4.2.4.5. CONSTRUCCIÓN DE GUÍAS Y SOPORTES**

Estas guías son dos tubos de acero de sección 30 x 30 (mm) y espesor de 1,5 mm, en sus extremos tienen agujeros para poder introducir unos pernos que se los puede regular. Las guías están apoyadas sobre unos soportes que constan de dos placas unidas mediante un perno con un sistema de ajuste excéntrico mediante una palanca, con la finalidad de poder movilizarlos a lo largo del bastidor, estos soportes tienen una corredera en donde los pernos se pueden deslizar con el objetivo de poder acercar o alejar las dos guías entre las cuales se encuentra la estructura. La función de este sistema es evitar el pandeo de las estructuras hacia delante o hacia atrás nivelándolas para que bajo la acción de cargas trabajen en un solo plano lo más aproximadamente posible.



**Figura 4.31 Soporte para guías**



**Figura 4.32 Guías en soporte**

#### **4.2.4.6. CONSTRUCCIÓN DE PESAS**

Las pesas son de tipo para báscula con una abertura para poder colocarlas en porta pesas, son de hierro fundido, y se mandaron a fabricar 70 kg en total que es lo que necesitamos en una de las estructuras para las pruebas experimentales, en la otra necesitamos menos carga, son diez pesas de 5 kg y ocho de 2,5 kg.



**Figura 4.33 Pesas**



**Figura 4.34 Pesas de 5 kg**



**Figura 4.35 Pesas de 2,5 kg**

#### 4.2.4.7. CONSTRUCCIÓN DE PORTA PESAS

Los porta pesas han sido fabricados de acuerdo a las medidas de las pesas de hierro fundido que se fabricaron, son cuatro en total y constan de una base de acero para asentar las pesas y una varilla en su extremo roscada para acoplar en las bases que constan en su centro con un agujero roscado, y en el otro extremo tienen un gancho para poder suspender las cargas en las estructuras para hacer las pruebas experimentales.



**Figura 4.36 Porta pesas**



**Figura 4.37 Porta pesas con carga**

#### 4.2.4.8. COLOCACIÓN DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

La galga extensiométrica nos permite obtener, mediante el adecuado acondicionamiento de la señal resultante, una lectura directa de la deformación longitudinal producida en un punto de la superficie de un material dado, en el cual se ha adherido la galga. La unidad de medida de la deformación se expresa mediante  $\epsilon$  (épsilon). Esta unidad de medida es adimensional, y expresa la relación existente entre el incremento de longitud experimentado por el objeto y la longitud inicial. El concepto de deformación engloba todas las variaciones sufridas por un cuerpo cuando éste ha sido sometido a una fuerza externa, bien sea compresión, tracción, torsión o flexión.

En los elementos del sistema donde se va a utilizar las galgas, las deformaciones se darán debido a fuerzas de tracción o compresión solamente, estos elementos son: los apoyos tipo pasador en donde se utilizarán dos galgas extensiométricas en cada uno, tanto para medir reacciones verticales como horizontales; el apoyo tipo rodillo en donde se utilizará una galga solamente para medir reacciones verticales puesto que horizontalmente no presenta ninguna restricción; y, un elemento de la armadura para poder medir las deformaciones que se dan debido a las fuerzas axiales.

Para la correcta colocación de las galgas extensiométricas se siguen algunos pasos que se detallan a continuación:

- Se lijan minuciosamente las superficies del material en donde se va a adherir las galgas a punto de dejarlas con un brillo característico, primero con lija 220 y luego con lija 400.
- Luego con ayuda de instrumentos de medición, se trazan cuidadosamente marcas referenciales con un rayador en el material donde se van a colocar las galgas, para que éstas queden correctamente alineadas en la dirección deseada.

- Sobre una cinta adhesiva con ayuda de una pinza se coloca la galga extensiométrica con sus terminales alineadas a una pequeña lámina en donde se las puede soldar, con esto se evita que éstas tengan contacto directo con el material y así se evita cualquier corto circuito.
- Sobre la superficie que se lijó anteriormente donde están trazadas las marcas referenciales se limpia con un líquido para desengrasar, después de que éste se seque se esparce un fuerte pegamento, en este caso pegamento bonder, y se procede a fijar la galga y la lámina con ayuda de la cinta adhesiva, se hace presión con la ayuda de una goma de borrar y la entenalla para conseguir una adhesión uniforme.
- Después de esperar 15 minutos se retira la goma de borrar y se despega la cinta adhesiva, con esto se tiene la galga y la lámina correctamente adheridas al material.
- Se procede a soldar un cable a cada terminal de las galgas con estaño, y la ayuda de un cautín y pasta para soldar.
- Se prueba en el equipo de lectura de deformaciones que las galgas funcionen correctamente y sean estables, y por último se las recubre con silicón para evitar la corrosión.



**Figura 4.38 Lijado de superficies**





**Figura 4.39 Trazado de marcas referenciales en superficies**



**Figura 4.40 Colocación de galga y lámina sobre superficie**



**Figura 4.41 Galgas extensiométricas en apoyos tipo pasador y apoyo tipo rodillo**



**Figura 4.42 Galga extensiométrica en elemento de la armadura**

## **ENSAMBLAJE DE ELEMENTOS**

### **4.3.1. ENSAMBLAJE DE LA ARMADURA**

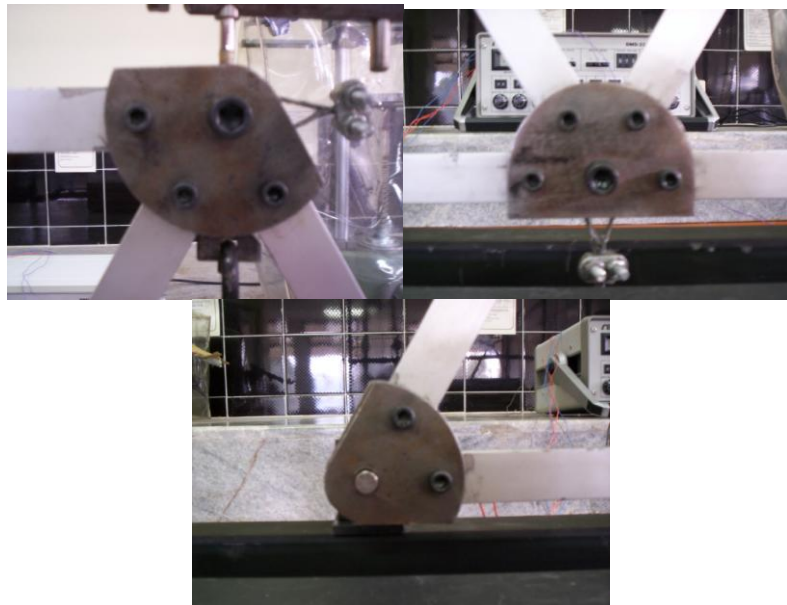
Después de la construcción de las partes que componen la armadura se procede a su ensamblaje:

- Se distribuyen las placas sobre una superficie horizontal en un orden aproximado en el que se encontrarían en la armadura.
- Se procede a colocar cada uno de los elementos sobre las placas cuidando que cada agujero coincida con los de las placas, y pasamos un perno por cada uno de los agujeros, por el diseño de las placas se logra que la dirección de los elementos coincidan en un solo punto en cada placa, este punto es el nudo en donde se pueden aplicar cargas, esto es fundamental para el análisis de la armadura.

- Los ganchos que se fabricaron para la armadura se los coloca en los nudos en donde se van a aplicar las cargas para las pruebas experimentales que se deben realizar.
- Ahora se colocan las placas restantes haciendo coincidir sus agujeros en los pernos, de manera que los elementos de la armadura y los ganchos queden entre ellas y las placas que se colocaron en un comienzo, se ajusta con tuercas los pernos de todas las placas y ya se tiene ensamblada y lista la armadura para las pruebas prácticas y su análisis.



**Figura 4.43 Ensamblaje de placas con elementos y ganchos de la armadura**



**Figura 4.44 Elementos de la armadura dirigidos hacia el nudo en cada una de las placas**



**Figura 4.45 Armadura ensamblada**

### **4.3.2. ENSAMBLAJE DEL PÓRTICO**

Después de la construcción de las partes que componen el pórtico se procede a su ensamblaje:

- En los elementos que componen el pórtico, tomando en cuenta que son inclinados y horizontales, se acoplan los ganchos que se fabricaron anteriormente, cada uno a las distancias determinadas para la realización de las pruebas prácticas, cuidando que el agujero de la placa del gancho en donde se va a suspender las cargas esté alineado con la mitad del espesor de los elementos.
- Sobre una superficie horizontal se colocan los elementos de tal manera que los extremos que fueron esmerilados y perforados estén uno sobre otro y coincidan los agujeros, con esto se forma un pórtico de tipo edificación, con los elementos inclinados simulando un techo.

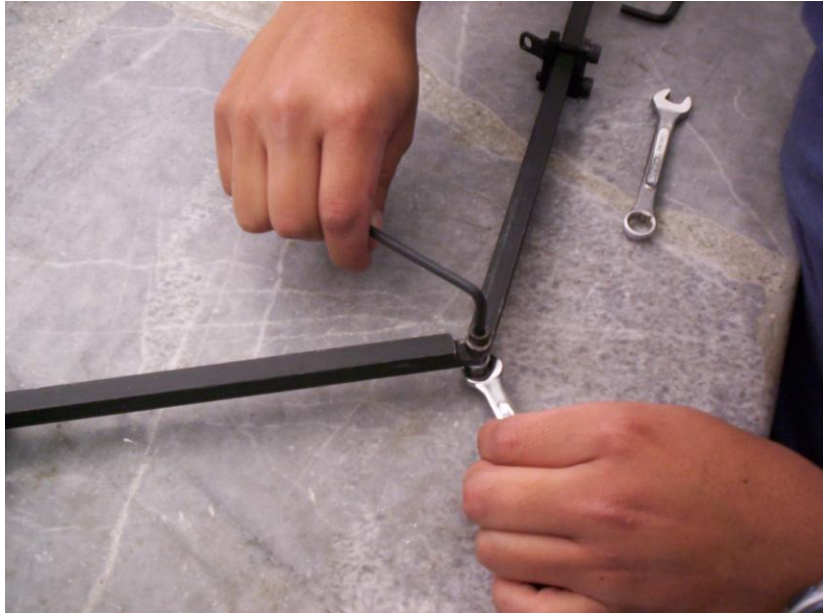
- Se ensamblan los elementos del pórtico mediante un perno que pasa por los agujeros y una tuerca, se los ajusta pero no totalmente, para que queden holgados los elementos entre sí, de tal manera que en las pruebas prácticas y en el análisis este nudo trabaje como pasador y no como un nudo rígido, con esto se tiene el pórtico listo y ensamblado.



**Figura 4.46 Acople de ganchos en elementos**



**Figura 4.47 Elementos con ganchos**



**Figura 4.48 Ensamblaje de elementos del pórtico**

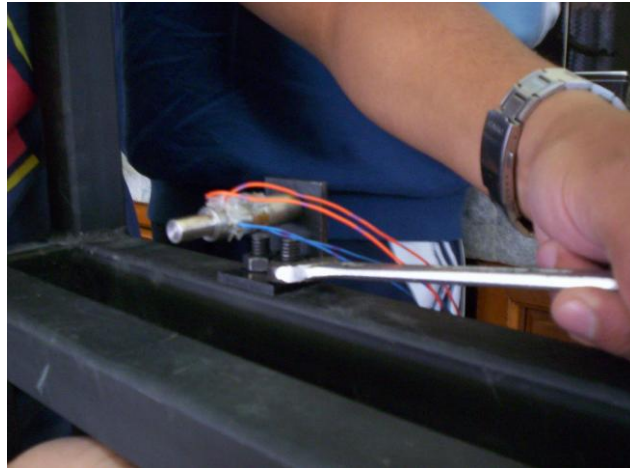


**Figura 4.49 Pórtico ensamblado**

### 4.3.3. ENSAMBLAJE DE ARMADURA EN BASTIDOR

Ahora que se tiene el bastidor, la armadura y los elementos anexos listos, procedemos a su ensamblaje para la realización de las pruebas experimentales:

- Se coloca el apoyo tipo pasador empernándolo al bastidor, al igual que la placa base para el apoyo tipo rodillo.
- En el extremo inferior derecho de la armadura se acopla el apoyo tipo rodillo, introduciendo su eje en el agujero de las placas de la armadura.
- Ahora en el apoyo tipo pasador se acopla el extremo inferior izquierdo de la armadura, y se asienta el otro extremo, el apoyo tipo rodillo en la placa base.
- Se ensambla el soporte para la polea con el sistema de sujeción y la palanca a una determinada altura de modo que el cable del gancho para aplicación de carga este horizontal.
- Se coloca los porta pesas en los ganchos donde se van a aplicar las cargas.
- Se ensamblan las guías y sus soportes a una determinada altura utilizando un nivelador, de tal forma que mediante la regulación de los pernos en las correderas las guías se acerquen entre sí logrando que la armadura y elementos que se encuentran entre ellas, trabajen en un solo plano y la estructura no se pandee hacia delante o hacia atrás.
- Se acoplan ahora los soportes para vástagos y comparadores de reloj, se los fija a una distancia apropiada para que los comparadores estén ubicados donde se va a medir los desplazamientos.



**Figura 4.50 Ensamble de apoyo tipo pasador a bastidor**

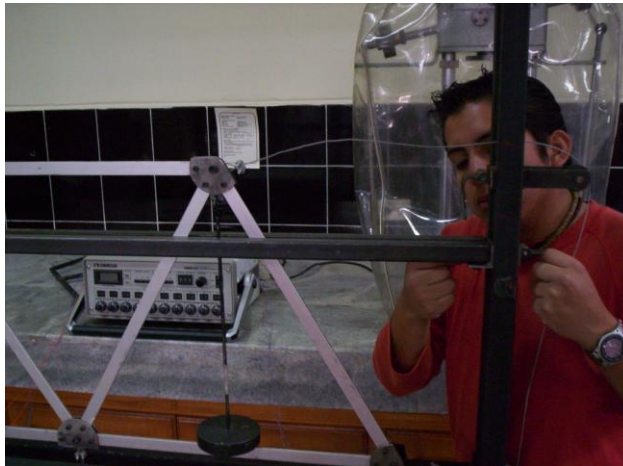


**Figura 4.51 Acople de armadura en apoyos y colocación de porta pesas**

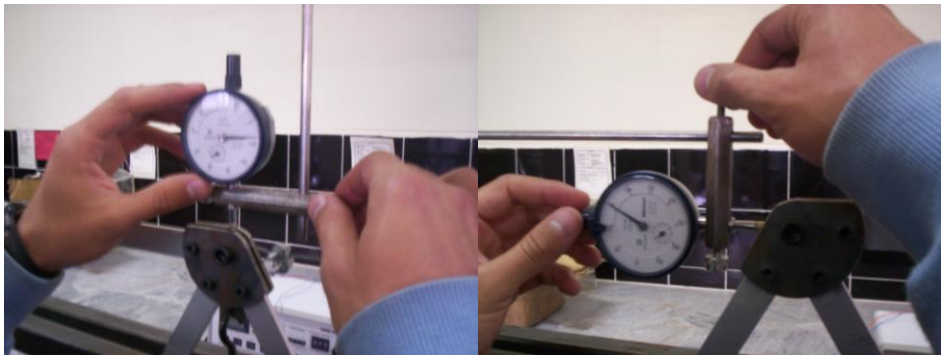


**Figura 4.52 Ensamble de soporte, polea y nivelación horizontal de cable de gancho**





**Figura 4.53** Ensamble de guías y soportes



**Figura 4.54** Acople de vástagos y de comparadores de reloj



**Figura 4.55** Armadura y elementos anexos ensamblados en bastidor

#### **4.3.4. ENSAMBLAJE DE PÓRTICO EN BASTIDOR**

Ahora que se tiene el bastidor, el pórtico y los elementos anexos listos, procedemos a su ensamblaje para la realización de las pruebas experimentales:

- Se acoplan los apoyos tipos pasador empernándolos al bastidor.
- Se ensamblan los extremos inferiores del pórtico en los apoyos tipo pasador, introduciendo los ejes de los apoyos en los bujes de la estructura, y con un nivelador se cuida que estén verticales los elementos acoplados.
- Se coloca los porta pesas en los ganchos donde se van a aplicar las cargas.
- Se ensamblan las guías y sus soportes a una determinada altura utilizando un nivelador, de tal forma que mediante la regulación de los pernos en las correderas las guías se acerquen entre sí logrando que el pórtico y elementos que se encuentran entre ellas, trabajen en un solo plano y la estructura no se pandee hacia delante o hacia atrás, con el nivelador se verifica que los elementos estén verticales.
- Se acoplan ahora los soportes para vástagos y comparadores de reloj, se los fija a una distancia apropiada para que los comparadores estén ubicados donde se va a medir los desplazamientos.



**Figura 4.56** Ensamble de apoyos tipo pasador a bastidor



**Figura 4.57** Ensamble de pórtico en apoyos



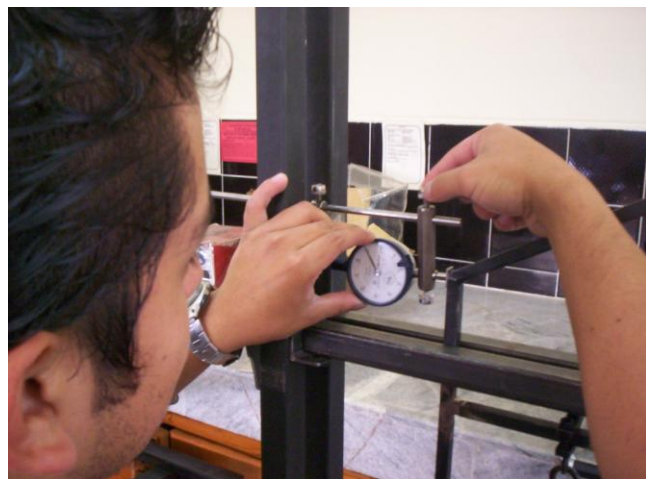
**Figura 4.58** Colocación de porta pesas



**Figura 4.59 Acople de guías y soportes**



**Figura 4.60 Verificación de elementos verticales con nivelador**



**Figura 4.61 Acople de vástagos y de comparadores de reloj**



**Figura 4.62 Pórtico y elementos anexos ensamblados en bastidor**



## CAPÍTULO V

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### PRUEBAS PRÁCTICAS

Para las pruebas prácticas del pórtico y la armadura se utilizó el equipo medidor de deformación unitaria OMEGA DMD-22, 10 CHANNEL, debido a que el número de canales utilizados en el proyecto fueron cuatro. Inicialmente deben estar conectados mediante un puente los conectores del equipo y los cables de las galgas extensiométricas según la configuración especificada: P1 con P3; P4 con P2 y S1 con D1, los cables de las galgas extensiométricas deben estar conectados en S1 y P1.

Posteriormente se procede a encerar cada canal teniendo en cuenta que el factor de operación del equipo (gauge factor) debe estar ubicado en 2.12, la palanca de lectura en READ, el voltaje para el puente BRIDGE VOLTS 2 y la modalidad de puente BRIDGE MODE  $\frac{1}{4}$ , para luego tomar los datos una vez ubicadas las cargas respectivas.

Para el enceramiento de los canales del equipo y los comparadores de reloj ubicados tanto en el pórtico y la armadura respectivamente, se lo hace con los porta pesas incluidos, de tal forma que no se toma en cuenta el peso de los porta pesas en la toma de datos.

Para cada prueba, la lectura de los datos se los hace tanto de los cuatro canales, como de los dos comparadores de reloj respectivamente. Es conveniente que primero se tome la lectura de los comparadores de reloj y posteriormente la de los canales, debido a que una vez cargado tanto el pórtico como la armadura las galgas extensiométricos se estabilizan y lo que se debe hacer únicamente es cambiar la perilla a los canales respectivos.

A los comparadores de reloj se les incorporó unas placas pequeñas a los palpadores para evitar deslizamiento y que los datos obtenidos en las pruebas sean incorrectos.

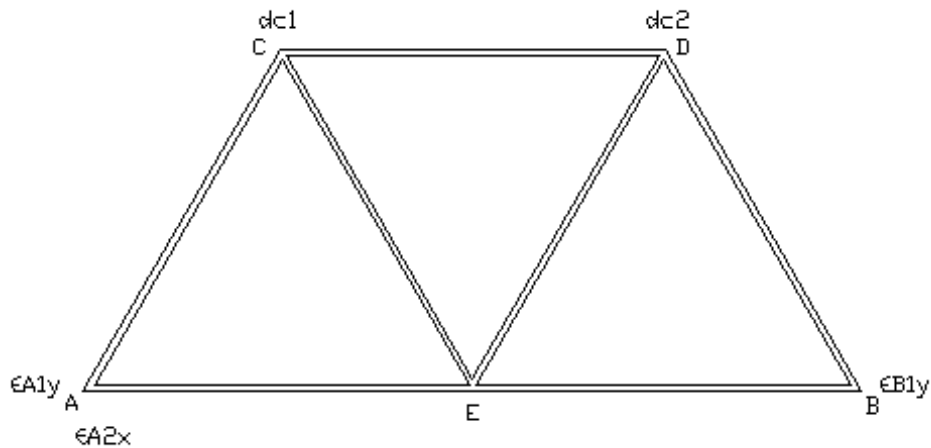
El procedimiento para ubicar las pesas es el siguiente:

- La ubicación de las pesas en los porta pesas tanto para la armadura como para el pórtico, es necesario que se lo haga con mucho cuidado.
- Si se deja caer las pesas sobre el plato del porta pesas los comparadores de reloj podrían sufrir una variación en su apreciación y los datos que se va a obtener no van a ser los correctos.
- Es muy importante distribuir de una manera adecuada las pesas sobre los distintos porta pesas a lo largo de cada prueba, de manera que ni el pórtico ni la armadura estén cargados más en uno u otro lado.
- Esto va a ayudar a que los elementos que componen la armadura y el pórtico se comporten de una forma correcta, dando resultados correctos en cada una de las pruebas.
- Así, en la armadura el modo ordenado de ubicar las pesas es; comenzar desde la parte izquierda en el nodo central de la armadura, luego la carga que va en el nodo superior con la carga hacia abajo y finalmente la carga que va en la polea.
- En lo que corresponde al pórtico, la forma apropiada de ubicar las pesas es; comenzar por la parte inferior izquierda y en sentido horario continuar ubicando el resto de cargas.
- Es conveniente que se realice un mínimo de diez pruebas seguidas, para que se estabilicen los comparadores de reloj así como las galgas extensiométricas y obtener datos correctos y confiables.



### 5.1.1. PRUEBAS PRÁCTICAS DE LA ARMADURA

A continuación se presenta las tablas con los datos obtenidos de deformaciones unitarias y desplazamientos, correspondientes a los apoyos y nodos respectivamente. La ubicación de los comparadores de reloj según se muestra en la figura, se debe a que en estas posiciones es donde se obtiene mayores desplazamientos para una mejor apreciación.



**Figura 5.1 Armadura con parámetros indicados**

dc = Desplazamiento en los comparadores de reloj, 1: horizontal, 2: vertical.

$\epsilon$  = Deformación unitaria de los apoyos, en las direcciones x,y.

**Tabla 5.1 Tabla de datos obtenidos en pruebas prácticas de la armadura**

Nº	dc1	dc2	$\epsilon A(e \cdot 10^{-6})$		$\epsilon B(e \cdot 10^{-6})$	$\epsilon(e \cdot 10^{-6})$ Elemento AC
	(mm)	(mm)	1	2	1	
1	0,92	1,23	62	-150	183	-15,2
2	0,96	1,1	71	-145	185	-15,1
3	0,95	0,7	70	-145	183	-15,0
4	0,93	1,25	70	-140	180	-15,2
5	0,91	1,26	61	-142	183	-15,1
6	0,97	1,26	65	-141	186	-15,3
7	0,93	1,16	68	-140	185	-15,0
8	0,93	1,25	62	-147	185	-14,9
9	0,91	1,15	66	-148	186	-14,8
10	1,3	1,1	68	-140	187	-14,7
11	0,96	1,14	62	-142	181	-15,4
12	0,97	1,15	65	-143	183	-15,0

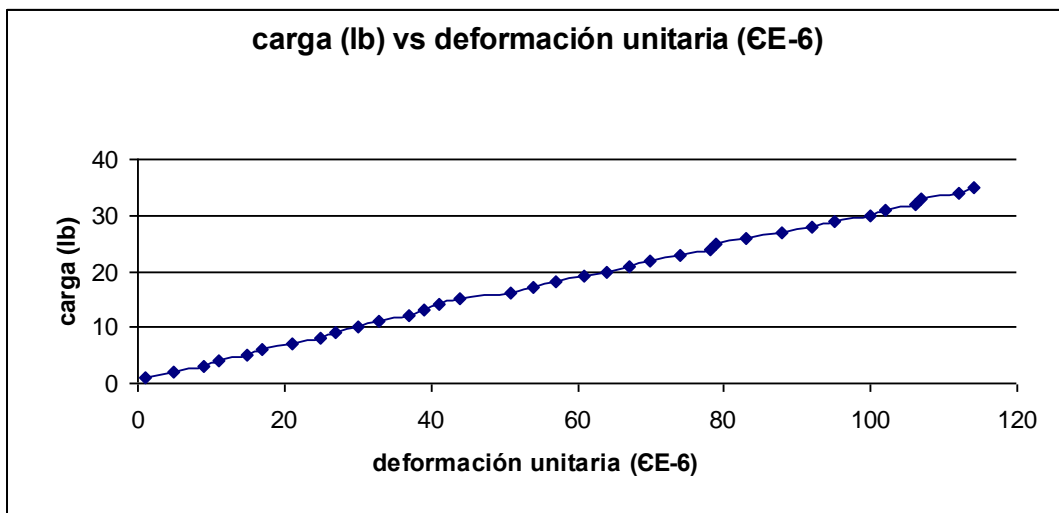
13	0,93	1,11	67	-145	182	-14,7
14	0,95	1,12	66	-145	186	-15,1
15	1,3	1,21	67	-148	179	-15,1
16	0,98	1,32	68	-142	183	-15,4
17	0,96	1,15	73	-142	182	-15,1
18	0,97	1,3	70	-146	184	-14,9
19	0,91	1,19	70	-149	182	-15,1
20	0,96	1,15	69	-147	182	-14,5
21	0,91	1,16	69	-143	186	-15,0
22	0,96	1,2	69	-144	185	-14,8
23	0,96	1,19	69	-148	185	-15,4
24	0,95	1,16	71	-148	186	-15,2
25	0,93	1,2	63	-151	186	-15,5
26	0,91	1,43	69	-145	186	-15,5
27	0,94	1,54	72	-142	184	-15,6
28	0,93	1,42	72	-146	185	-15,3
29	0,93	1,19	69	-146	181	-15,5
30	0,97	1,32	69	-146	183	-15,3
31	0,91	1,56	69	-144	185	-15,2
32	0,94	1,48	69	-141	186	-15,8
33	1,2	1,53	68	-145	183	-15,6
34	0,98	1,48	70	-142	185	-15,3
Promedio	0,96	1,241	64,1818	-148,25	185,167	-15,195

Con los promedios obtenidos, posteriormente se va a obtener los desplazamientos y las cargas que están actuando tanto en los nodos como en los apoyos y poder hacer una comparación teórica, experimental práctica. Las deformaciones unitarias nos van a permitir obtener los valores de carga que están actuando en los apoyos, para lo cual se utilizó un tensiómetro de 50 lb y un tensiómetro de 250 lb para poder comparar sus valores. Estos tensiómetros nos permiten obtener gráficas Carga (lb) vs Deformación unitaria  $\epsilon$  ( $e \cdot 10^{-6}$ ).

**Tabla 5.2 Tabla de datos obtenidos con Tensiómetro de 50 lb para Apoyo de tipo pasador**

lb	$\epsilon$
1	1
2	5
3	9
4	11
5	15

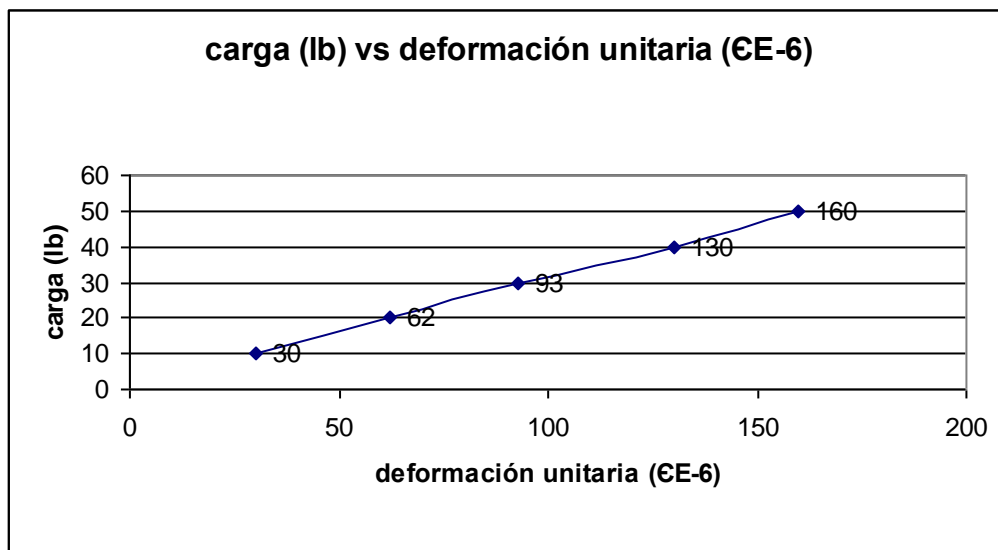
6	17
7	21
8	25
9	27
10	30
11	33
12	37
13	39
14	41
15	44
16	51
17	54
18	57
19	61
20	64
21	67
22	70
23	74
24	78
25	79
26	83
27	88
28	92
29	95
30	100
31	102
32	106
33	107
34	112
35	114



**Figura 5.2 Carga VS Deformación unitaria con Tensiómetro de 50 lb para Apoyo de tipo pasador**

**Tabla 5.3 Tabla de datos obtenidos con Tensiómetro de 250 lb para Apoyo de tipo pasador**

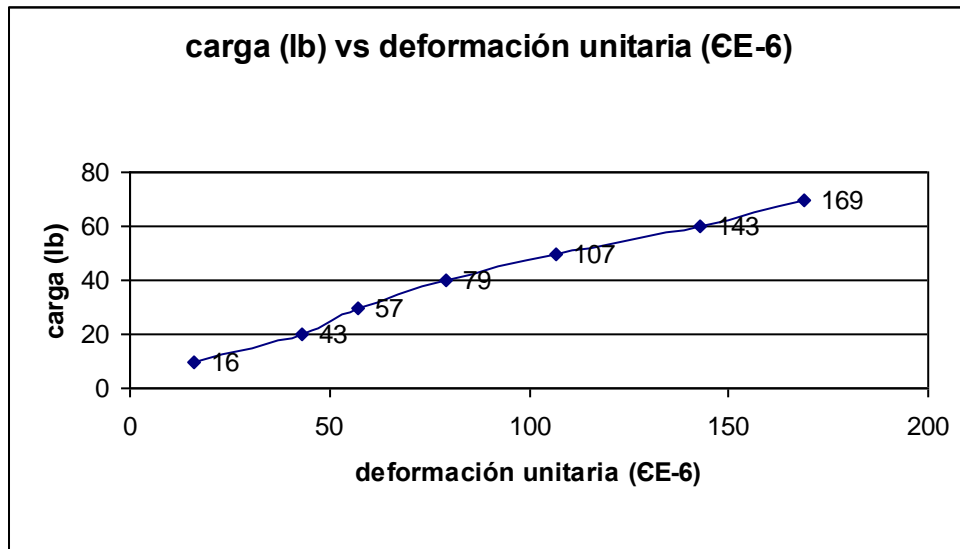
lb	ε
10	30
20	62
30	93
40	130
50	160



**Figura 5.3 Carga VS Deformación unitaria con Tensiómetro de 250 lb para Apoyo de tipo pasador**

**Tabla 5.4 Tabla de datos obtenidos con Tensiómetro de 250 lb para Apoyo de tipo rodillo**

lb	ε
10	16
20	43
30	57
40	79
50	107
60	143
70	169
80	186



**Figura 5.4 Carga VS Deformación unitaria con Tensiómetro de 250 lb para Apoyo de tipo rodillo**

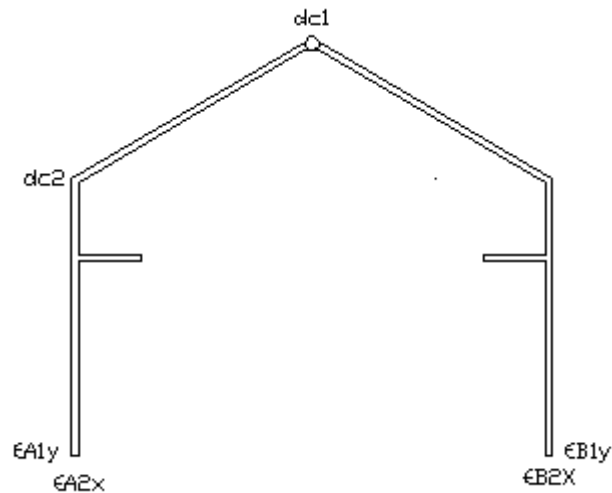
Una vez obtenidos los valores de carga y deformación, procedemos a realizar una interpolación entre dichos valores y obtener las cargas que están actuando en los apoyos.

**Tabla 5.5 Tabla de resultados obtenidos en armadura**

Strain Gauge	ε	εX10-6	lb	kg
A1	64,18	0,00006418	20,70	9,41
A2	-148,25	-0,00014825	44,93	-20,42
B2	185,16	0,00018516	76,21	34,64
Elemento AC	-15,195	-0,00015195	21,22	-9,64

## 5.1.2. PRUEBAS PRÁCTICAS DEL PÓRTICO

A continuación se presentan las tablas con los datos obtenidos, correspondientes a las pruebas realizadas. La ubicación de los comparadores de reloj según se muestra en la figura, se debe a que en estas posiciones es donde se obtiene mayores desplazamientos para una mejor apreciación.



**Figura 5.5 Pórtico con parámetros indicados**

dc = Desplazamiento en los comparadores de reloj, 1: vertical, 2: horizontal.

ε = Deformación unitaria de los apoyos, en las direcciones x,y

**Tabla 5.6 Tabla de datos obtenidos en pruebas prácticas del pórtico**

Nº	dc1 (mm)	dc2 (mm)	εA (e*10 <sup>-6</sup> )		εB (e*10 <sup>-6</sup> )	
			1	2	1	2
1	2,8	0,96	94	20	100	24
2	2,76	0,93	94	20	101	25
3	2,75	0,92	92	19	103	23
4	2,78	0,91	92	21	102	23
5	2,8	0,92	93	19	102	27
6	2,87	0,93	90	20	102	20
7	2,78	0,91	94	20	101	25
8	2,95	1,01	94	19	103	21

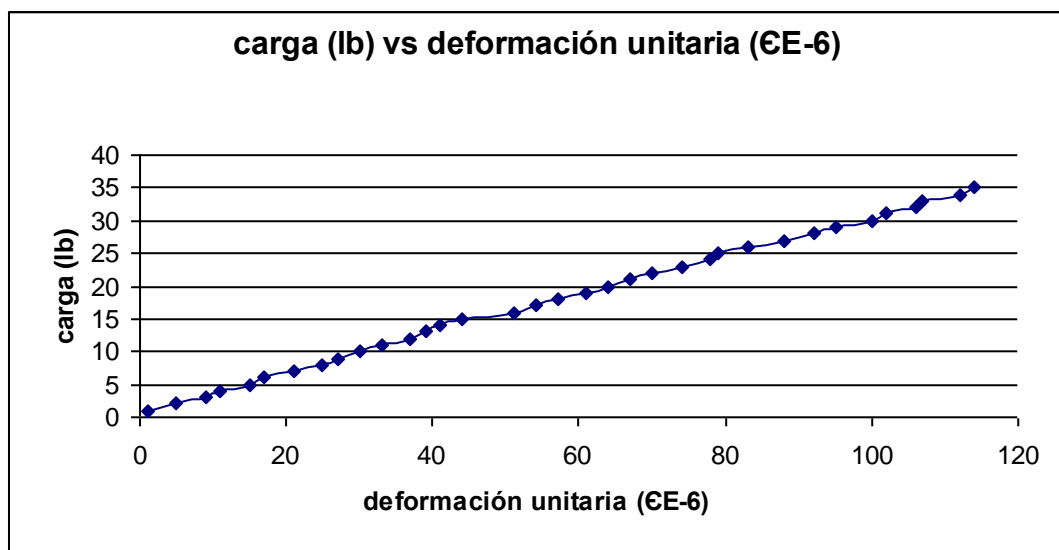
9	2,8	0,95	92	21	101	25
10	3	0,96	89	22	101	18
11	2,77	1	92	22	103	23
12	2,91	0,96	93	20	104	20
13	2,8	0,97	92	21	101	27
14	2,8	0,93	92	21	100	27
15	2,78	0,91	91	20	102	26
16	2,8	0,94	91	21	101	29
17	2,8	0,93	90	22	102	28
18	2,77	0,9	89	22	99	25
19	2,8	0,9	94	20	105	18
20	2,9	1,04	94	20	105	22
21	3,04	1,05	91	21	105	18
22	3,1	1,11	95	22	105	18
23	2,75	1,03	95	20	101	21
24	2,78	1,08	95	19	104	22
25	2,77	0,9	95	22	106	28
Promedio:	2,8344	0,962	94,3333333	21,5	100,777778	21,9473684

Para obtener el valor de las cargas se utilizó el tensiómetro de 50 lb, el cual nos permite obtener una gráfica Carga (lb) vs Deformación unitaria  $\epsilon$  ( $e \cdot 10^{-6}$ ).

**Tabla 5.7 Tabla de datos obtenidos con Tensiómetro de 50 lb para Apoyos de tipo pasador**

lb	$\epsilon$
1	1
2	5
3	9
4	11
5	15
6	17
7	21
8	25
9	27
10	30
11	33
12	37
13	39
14	41
15	44
16	51
17	54
18	57
19	61
20	64
21	67

22	70
23	74
24	78
25	79
26	83
27	88
28	92
29	95
30	100
31	102
32	106
33	107
34	112
35	114



**Figura 5.6 Carga VS Deformación unitaria con Tensiómetro de 50 lb para Apoyos de tipo pasador**

Una vez obtenidos los valores de carga y deformación, procedemos a realizar una interpolación entre dichos valores y obtener las cargas que están actuando en los apoyos.

**Tabla 5.8 Tabla de resultados obtenidos en pórtico**

Strain Gauge	ε	εX10-6	lb	kg
A1	94,33	0,00009433	30,36	15,18
B1	100,78	0,00010078	30,26	15,13
A2	21,5	0,0000215	7,13	3,56
B2	21,95	0,00002195	7,24	3,62



## ANÁLISIS COMPUTACIONAL

Para analizar la armadura y el pórtico se va a utilizar el programa computacional RISA – 2D Demonstration Version 6.0, que es un software muy didáctico y sencillo para el análisis de estructuras en dos dimensiones.

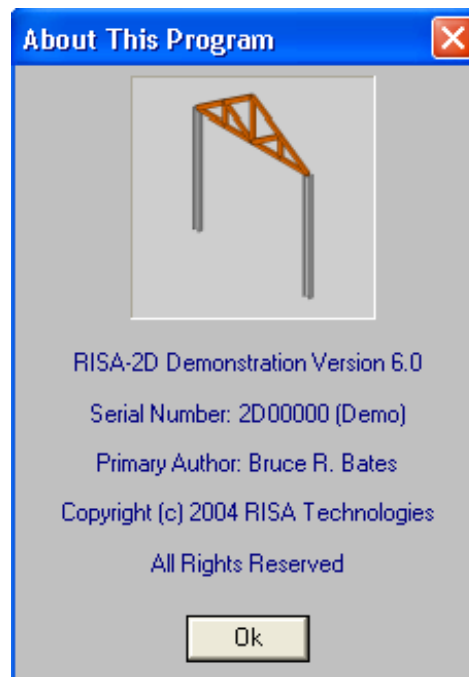
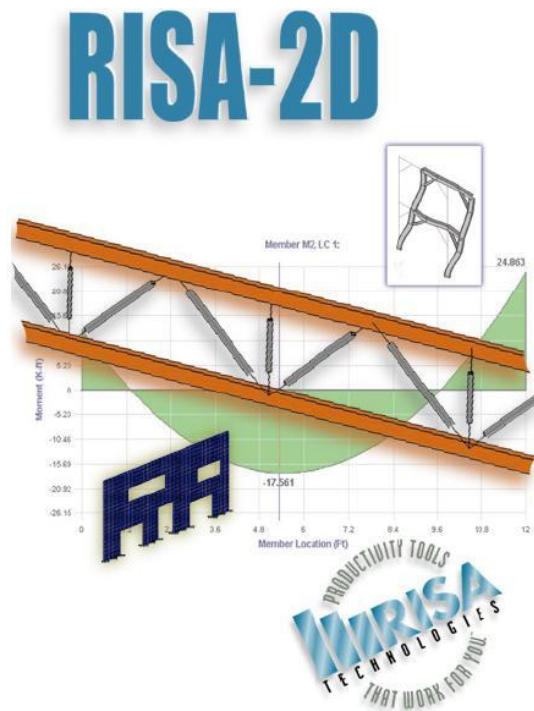
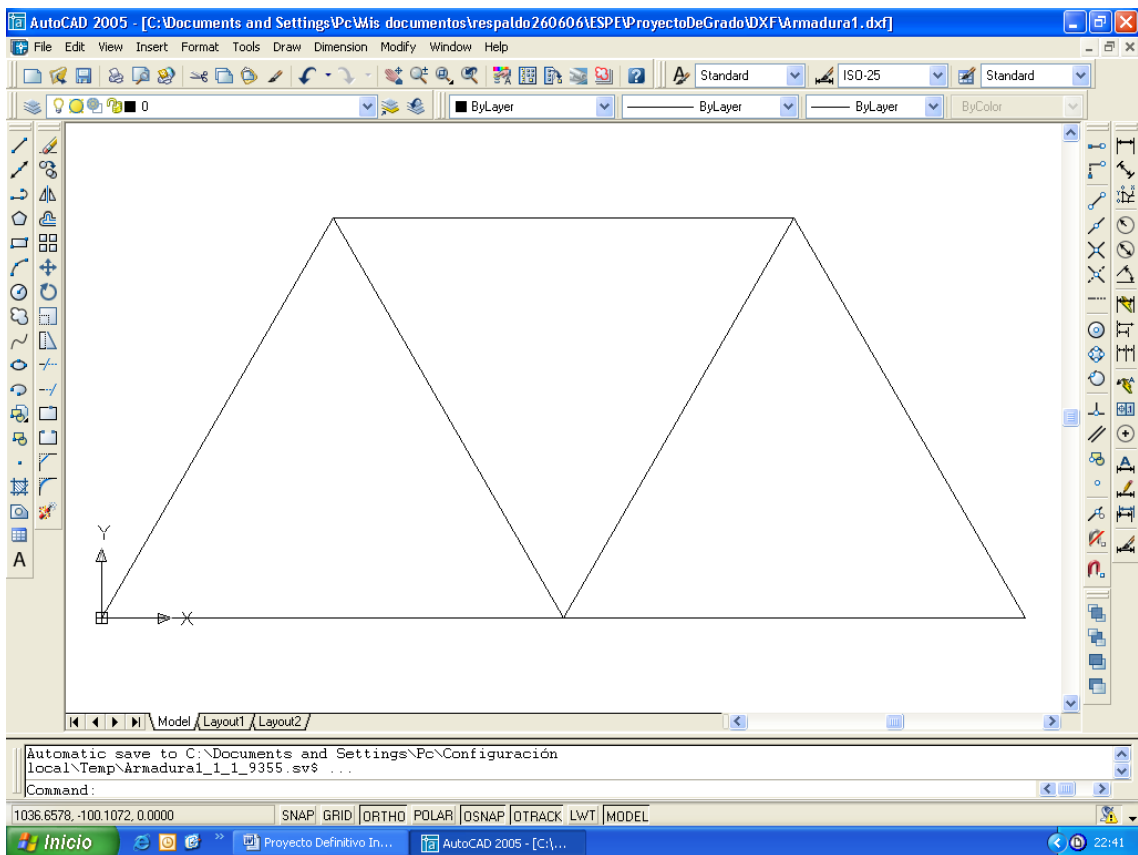


Figura 5.7 RISA – 2D

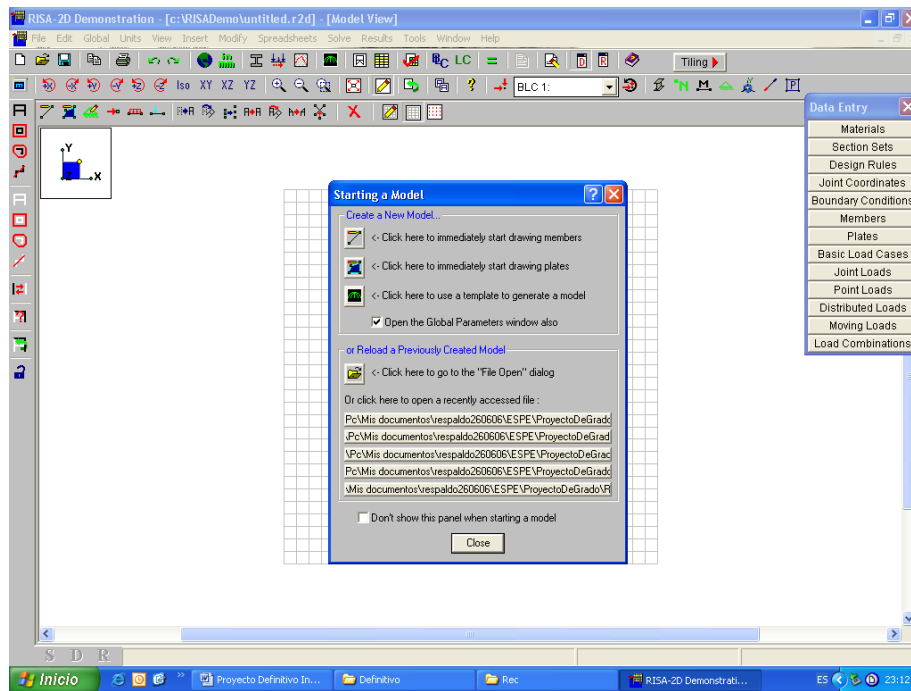
## 5.2.1. ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE LA ARMADURA

Primero se dibuja la armadura con sus medidas verdaderas en milímetros en dos dimensiones en el programa AutoCAD 2005, tomando como inicio en el punto de origen el extremo inferior izquierdo de la estructura, y se guarda el archivo como DXF.



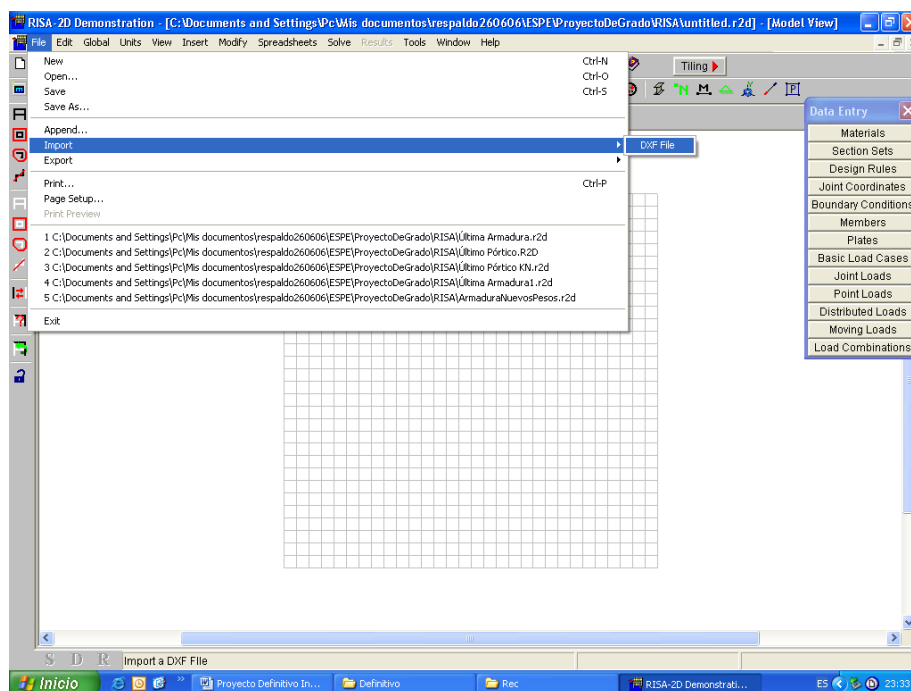
**Figura 5.8 Armadura en AutoCAD 2005 como DXF**

Después de guardar el archivo DXF en una ubicación específica, se puede cerrar el programa AutoCAD, y abrimos el software RISA – 2D, en el cual se va a realizar el análisis estructural de la armadura.



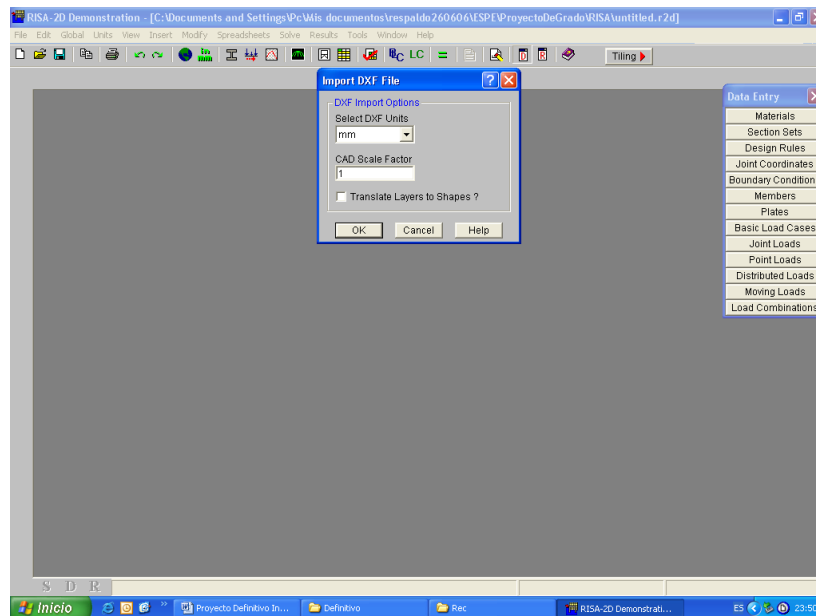
**Figura 5.9 Inicio del software RISA – 2D**

Al abrir el programa se aparecen automáticamente las ventanas **Starting a Model** y **Data Entry**, se hace clic en el botón **Close** de la primera para cerrarla, la ventana **Data Entry** queda abierta. Ahora se elige **File > Import > DXF File** para importar al programa el archivo DXF realizado anteriormente.



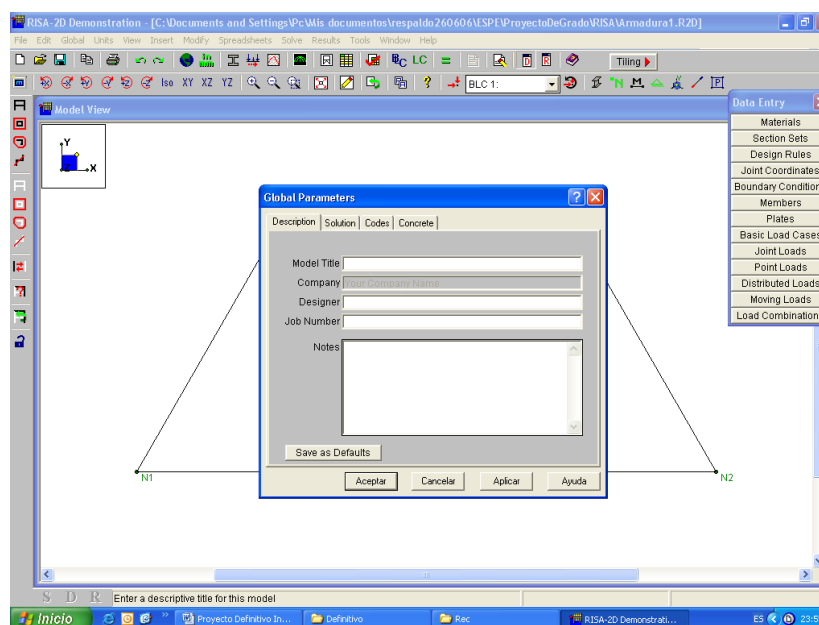
**Figura 5.10 Procedimiento para importar archivo DXF**

Luego de encontrar el archivo DXF en la ubicación donde se lo guardó anteriormente, se lo abre y aparece la ventana **Import DXF File**, en donde en el espacio **Select DXF Units** escogemos **mm**, y en el espacio **CAD Scale Factor** se deja **1**, ahora se hace clic en **OK**.



**Figura 5.11 Ventana Import DXF File**

Ahora aparece la ventana **Global Parameters**, se hace clic en el botón **Cancelar** para cerrar la ventana.



**Figura 5.12 Ventana Global Parameters**

Se tiene ahora la armadura importada en el programa con sus nudos numerados automáticamente en la ventana **Model View**.

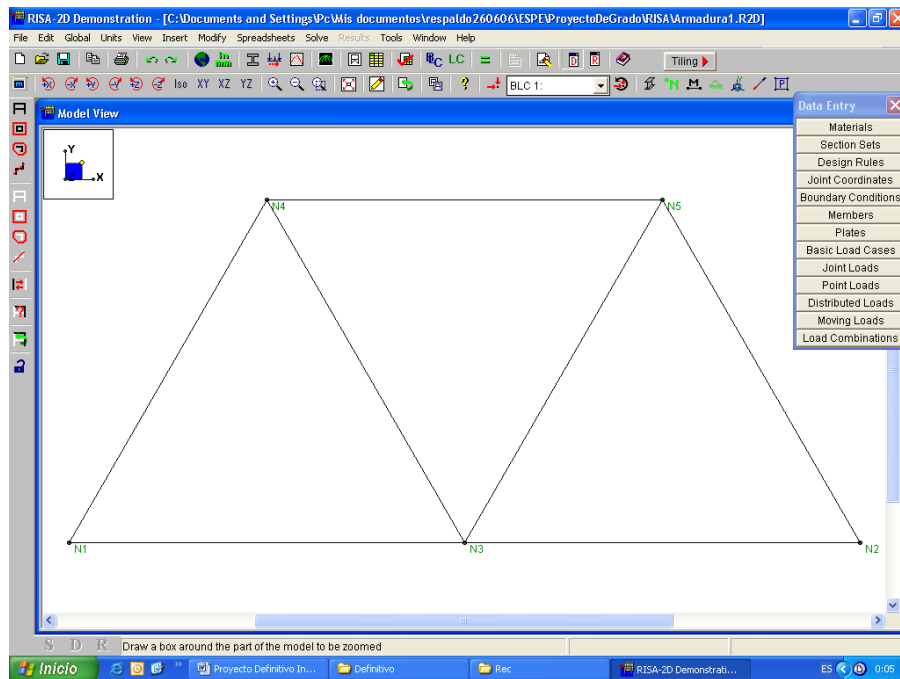


Figura 5.13 Armadura con nudos numerados automáticamente

Ahora en la parte superior se hace clic en **Units**, aparece la ventana **Units Selection**, se hace clic en el botón **Standard Metric** y luego en **OK**.

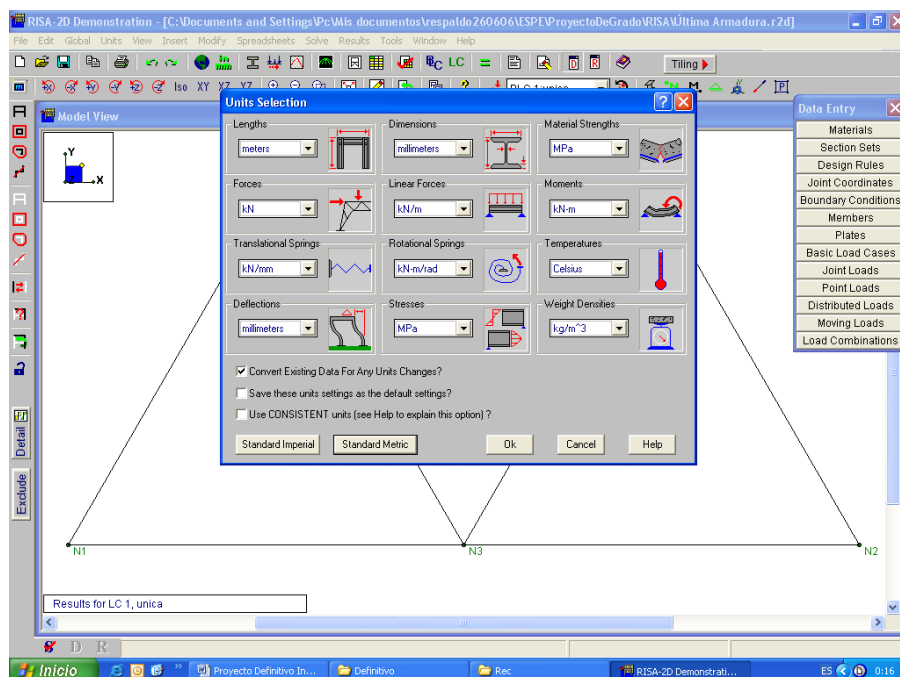
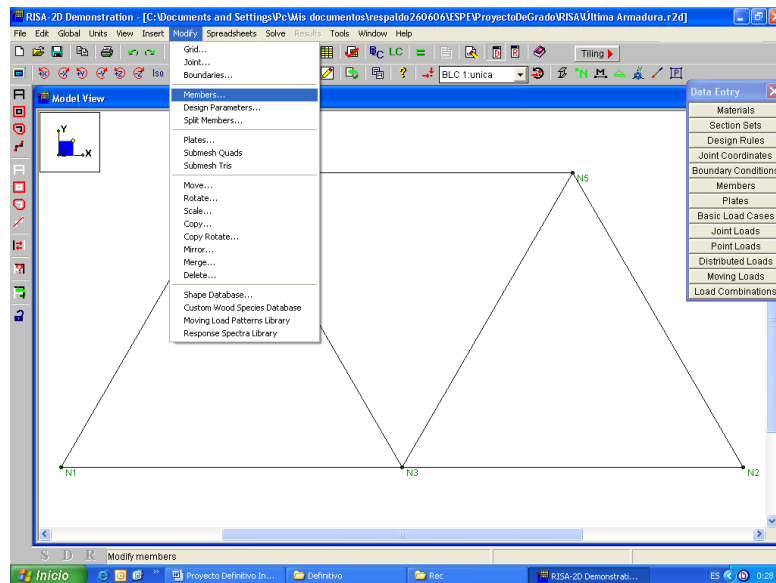


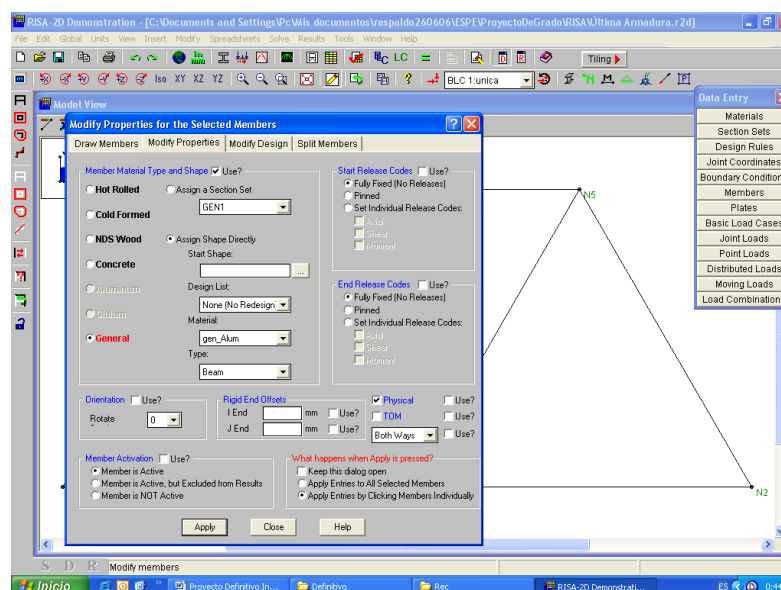
Figura 5.14 Ventana Units Selection

Para modificar las características de los miembros de la armadura se hace clic en la parte superior en **Modify > Members...**



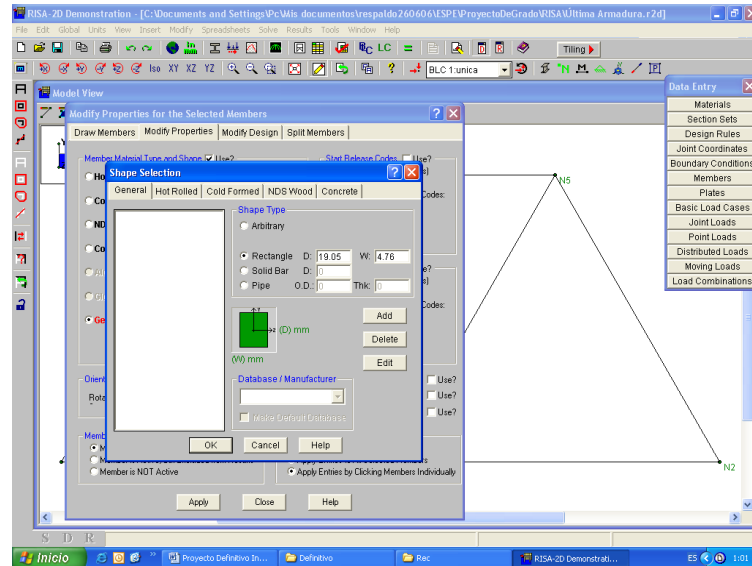
**Figura 5.15 Procedimiento para modificar miembros de la armadura**

Aparece la ventana **Modify Properties for the Selected Members**, en la pestaña **Modify Properties** en **Member Material Type and Shape** activamos las opciones **General** y **Use?**, en el espacio **Assign a Section Set** se escoge **GEN1**, ahora en **Assign Shape Directly** en **Design List** se escoge **None (No Redesign)**, en **Material** – gen\_Alum, y en **Type** – Beam.



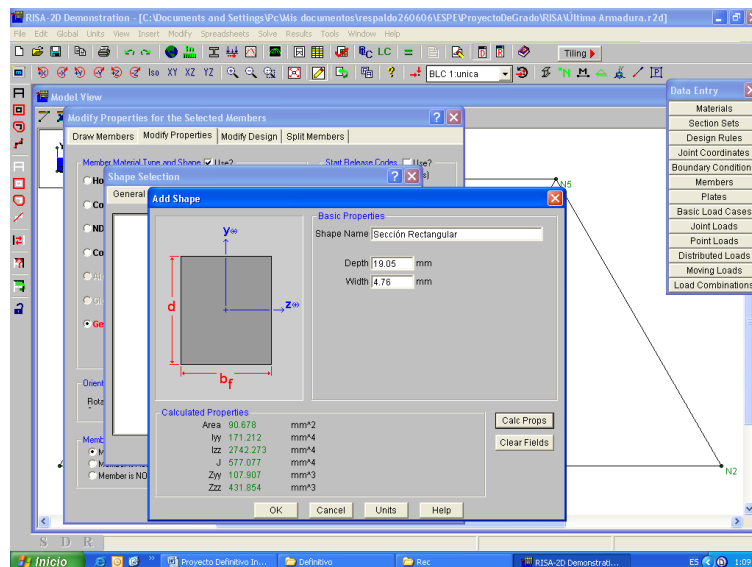
**Figura 5.16 Ventana Modify Properties for the Selected Members**

En **Assign Shape Directly**, se hace clic en el cuadrado (...) de **Start Shape**, se abre la ventana **Shape Selection**, en **Shape Type** para este caso se escoge **Rectangle** y se introduce las dimensiones de la sección rectangular que son 19,05x4,76 (mm).



**Figura 5.17 Ventana Shape Selection**

Se hace clic en el botón **Add**, y se abre la ventana **Add Shape**, en **Basic Properties** se introducen los datos requeridos y se hace clic en el botón **Calc Props**, con esto se calculan automáticamente las propiedades de la sección, luego se hace clic en **OK**.



**Figura 5.18 Ventana Add Shape**

Se hace clic también en **OK**, en la ventana **Shape Selection** para cerrarla, y en la ventana **Modify Properties for the Selected Members** se escoge **Apply**, ahora se hace clic en cada uno de los miembros de la armadura con lo cual cada uno va adquiriendo las características que se definieron anteriormente, con el botón **Toggle Between Wireframe and Rendering of Beams and Plates** ubicado en la parte superior derecha debajo del botón **Tiling**, se pueden observar los miembros dibujados.

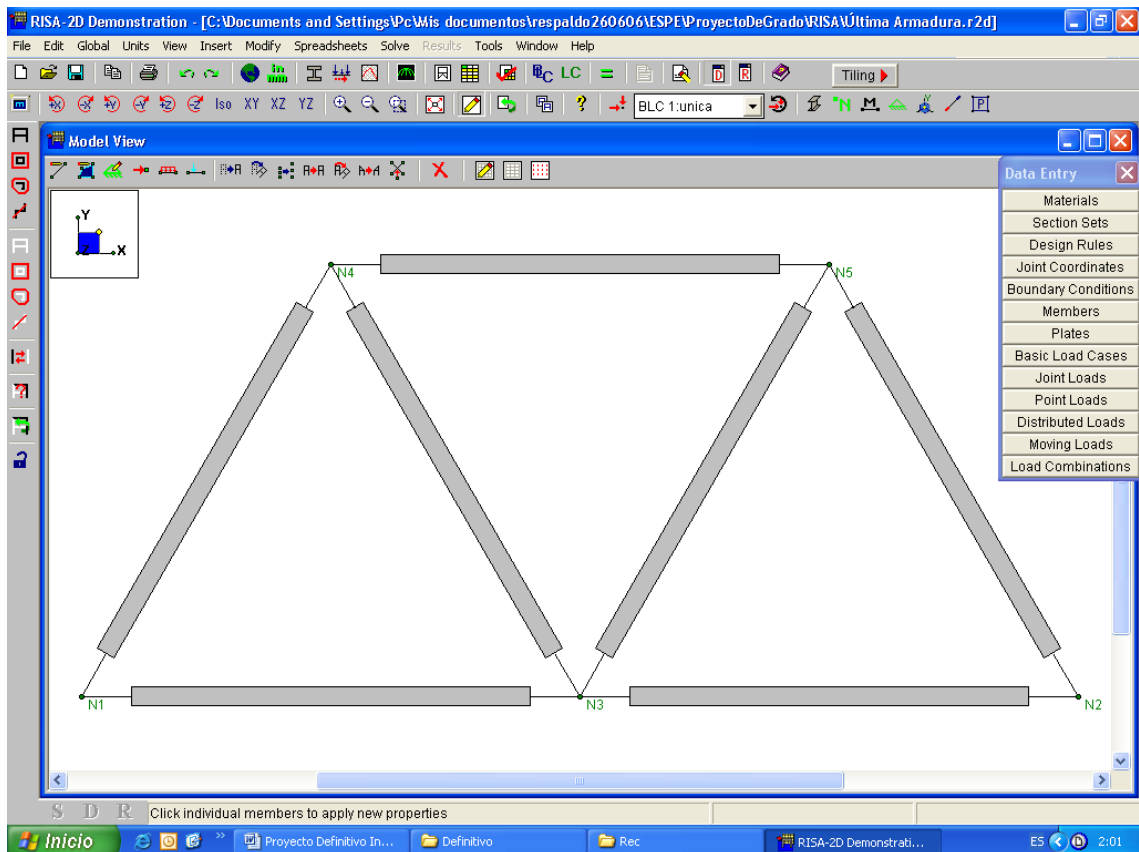
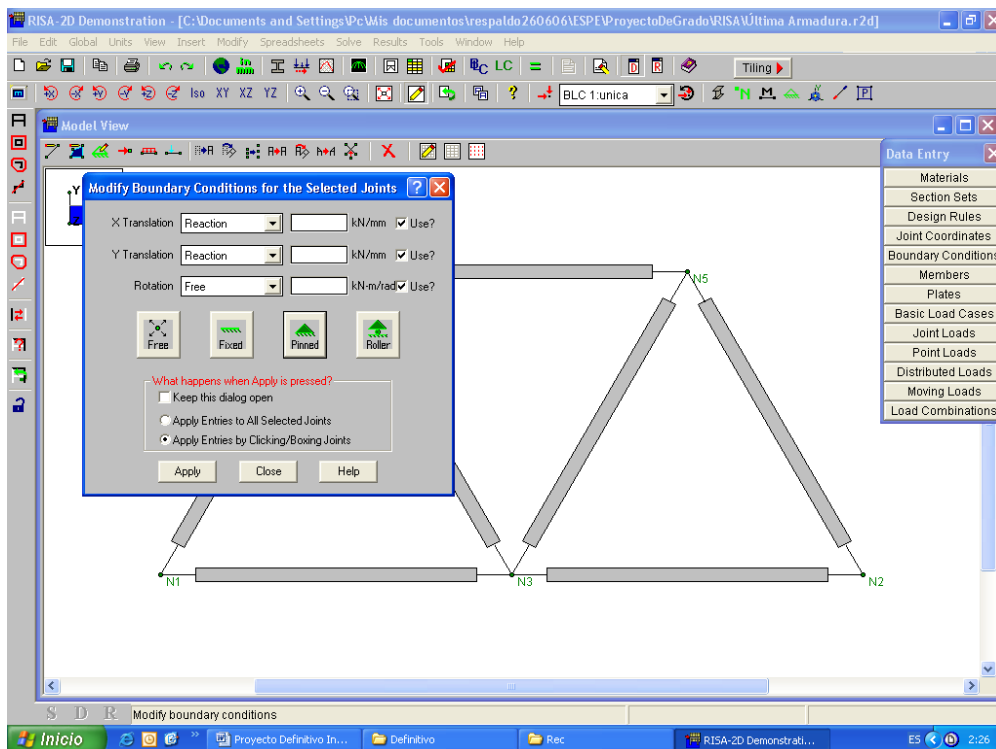


Figura 5.19 Armadura con miembros dibujados



En la ventana **Model View**, si no está activada se activa la barra de herramientas de edición gráfica con el botón **Activate the Graphic Editing Toolbar**, es el botón con un icono de lápiz amarillo, se hace clic en el botón **Modify boundary conditions** y se abre la ventana **Modify Boundary Conditions for the Selected Joints**, con esto se pueden modificar y establecer los apoyos de la armadura.

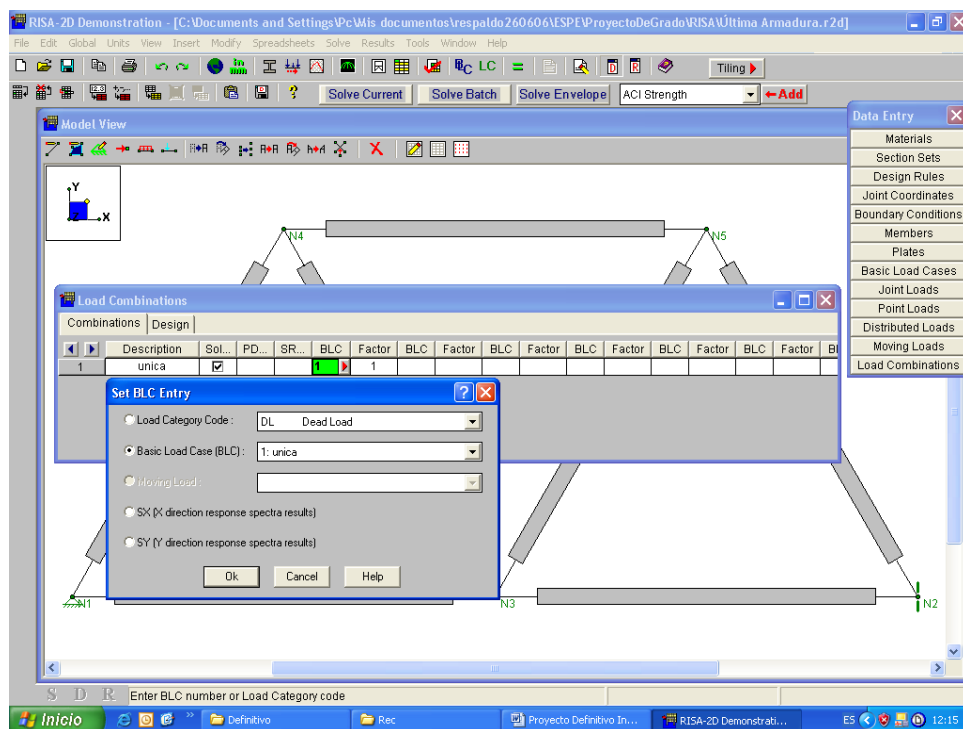


**Figura 5.20 Ventana Modify Boundary Conditions for the Selected Joints**

Con **Apply Entries by Clicking/Boxing Joints** activado se selecciona **Pinned** para el apoyo tipo pasador, se hace clic en **Apply** y se escoge el nudo seleccionado que en este caso es **N1**, lo mismo se efectúa para el nudo **N2** pero tomando en cuenta que este es un apoyo tipo rodillo por lo que se debe seleccionar **Roller** en la ventana antes mencionada.



Se hace clic en el botón **Load Combinations** en la ventana **Data Entry** se abre una ventana con el mismo nombre, se hace un clic y en la fila que aparece en la columna **Description** se escribe el mismo nombre que se puso anteriormente, en este caso **unica**, en la columna **BLC** se hace clic y se abre la ventana **Set BLC Entry** donde se activa **Basic Load Case (BLC)** y se puede observar que esta la palabra **unica** que creamos en la ventana anterior, se hace clic en **OK** y se cierra la ventana **Load Combinations**.



**Figura 5.23 Ventanas Load Combinations y Set BLC Entry**

En la ventana **Model View** en la barra de herramientas de edición gráfica se hace clic en el botón **Apply joint loads or moments to joints** para abrir la ventana **Loads/Deflections/Masses for Joints**, deben estar activados **This is a Load (L)** y **Apply Load by Clicking/Boxing Joints**, en **Direction** se puede escoger la dirección de la carga, en **Magnitude** se escribe la magnitud de la carga y con el signo positivo o negativo se define su sentido, en **Basic Load Case** debe estar el que se creó anteriormente, en este caso **unica**, se escoge **Apply** y hacemos clic en el nudo donde se va a aplicar la carga definida. Se sigue el mismo procedimiento para todas las cargas que se necesiten ubicar en los diferentes nudos.

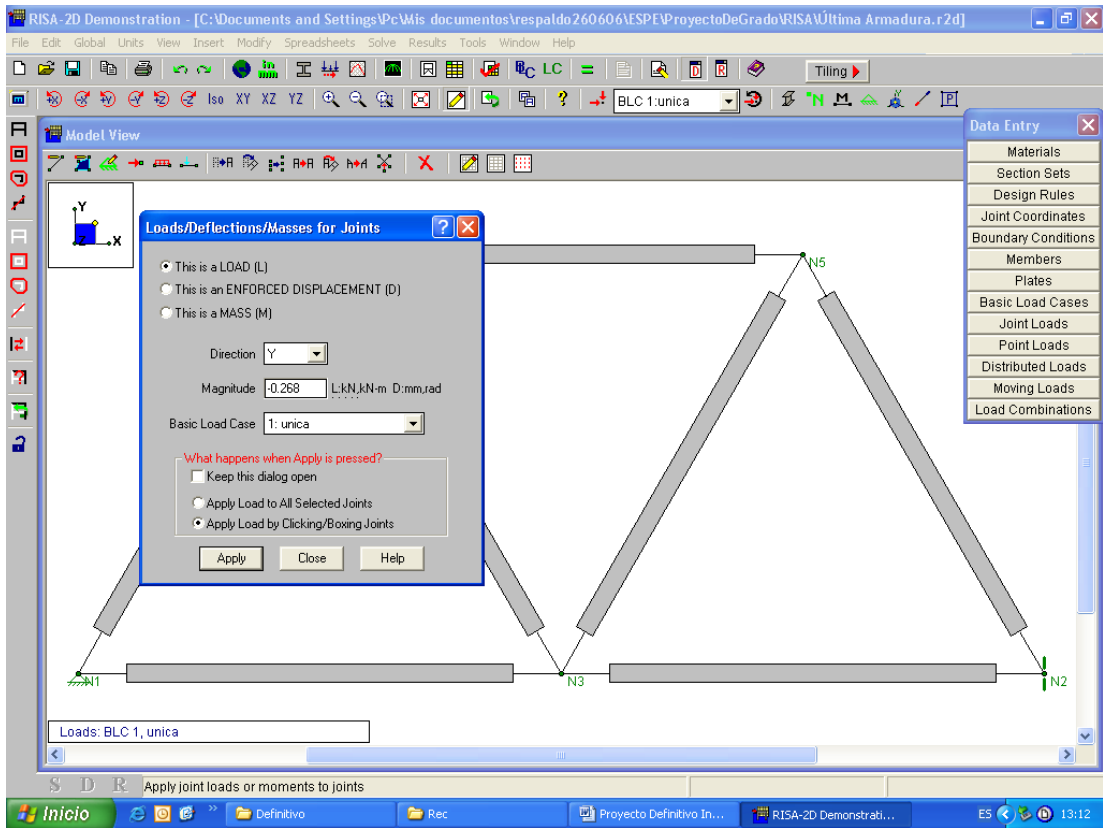


Figura 5.24 Ventana Loads/Deflections/Masses for Joints

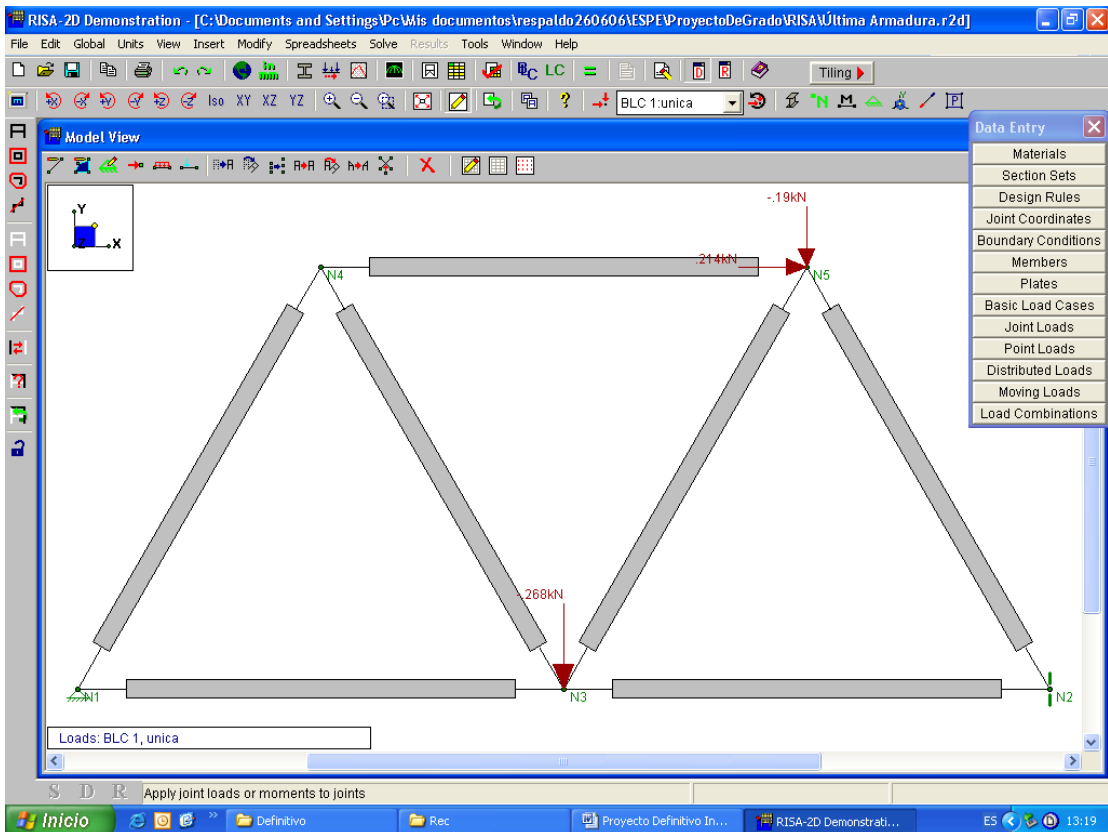
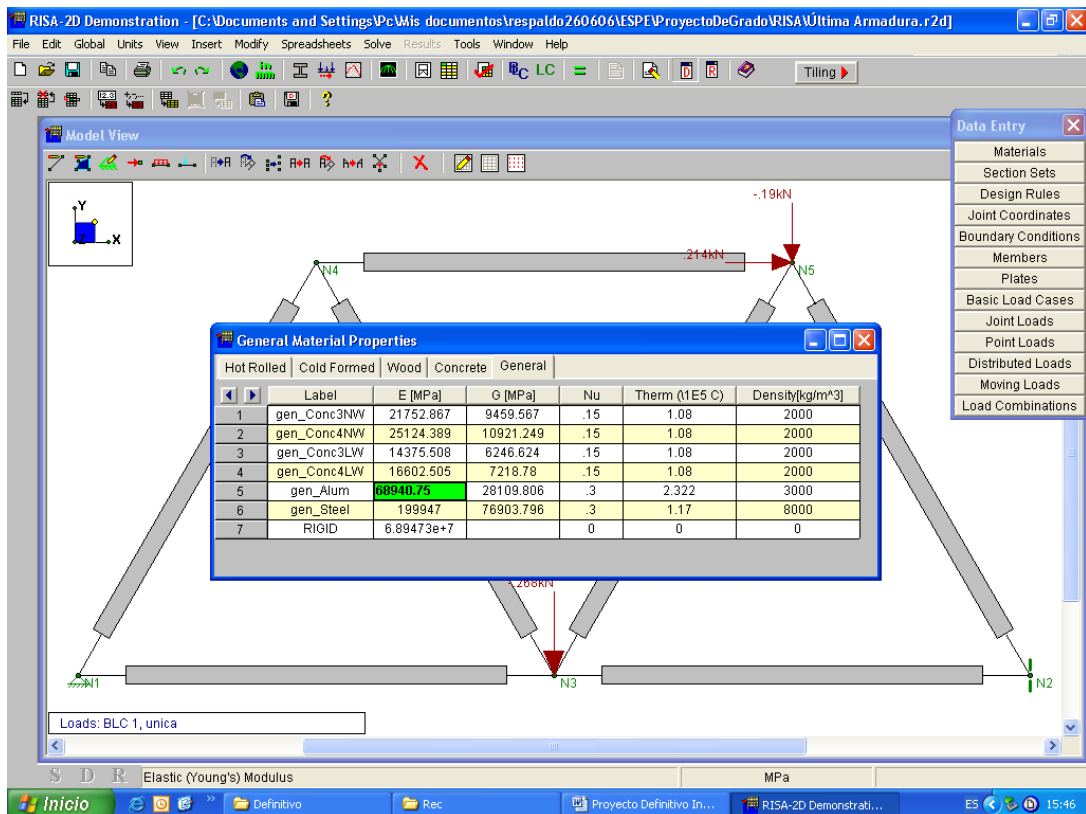


Figura 5.25 Armadura con cargas, elementos y apoyos definidos

Si se desea cambiar alguna característica del material como por ejemplo el módulo de elasticidad (E) u otros, en la ventana **Data Entry**, se elige **Materials** y se abre la ventana **General Material Properties**, aquí podemos modificar las propiedades, en nuestro caso para el aluminio trabajamos con un  $E = 68940,75$  MPa.



**Figura 5.26 Ventana General Material Properties**

Ahora se hace que el programa analice la armadura que se ha definido para obtener los resultados de acuerdo a las características y condiciones que se han planteado, para esto se hace clic en el botón **Perform the analysis and design calculations** que esta representado con un icono de signo = de color verde en la parte superior derecha del programa, se abre la ventana **Solution Choices**, y debe estar activado **Single Combination** en donde debe aparecer el BLC que se definió anteriormente, se selecciona **Solve**.

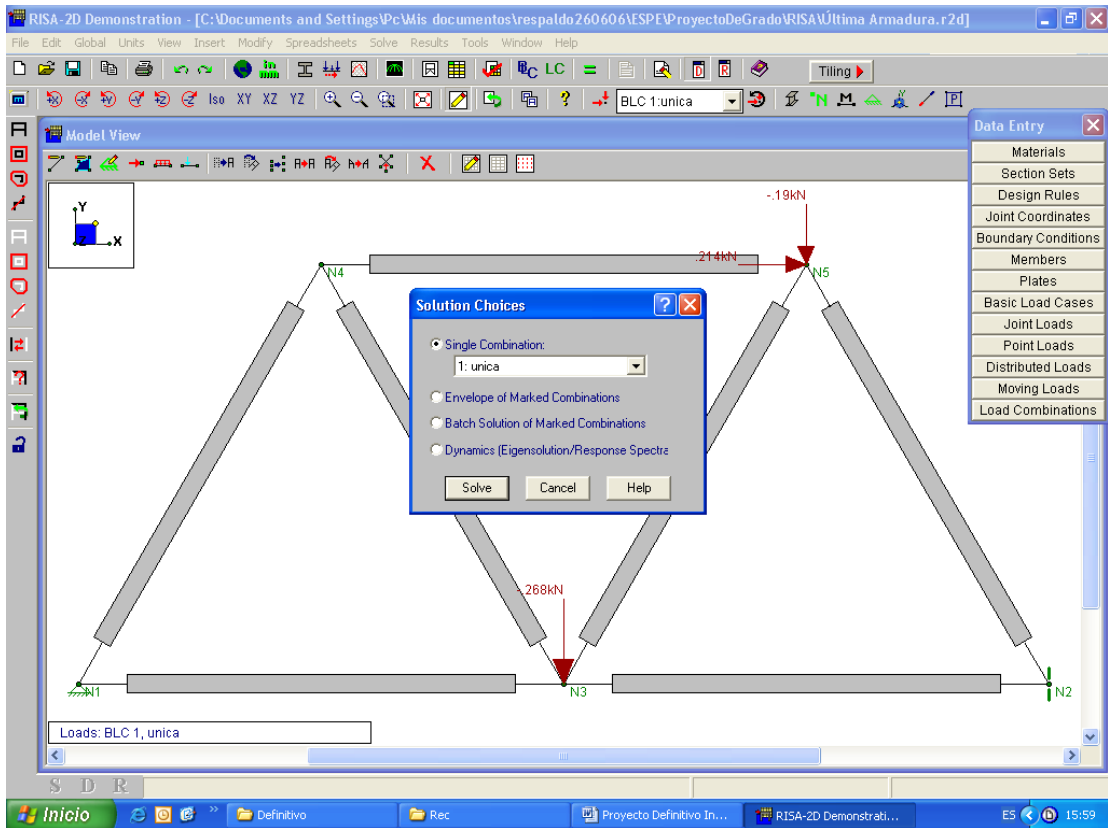


Figura 5.27 Ventana Solution Choices

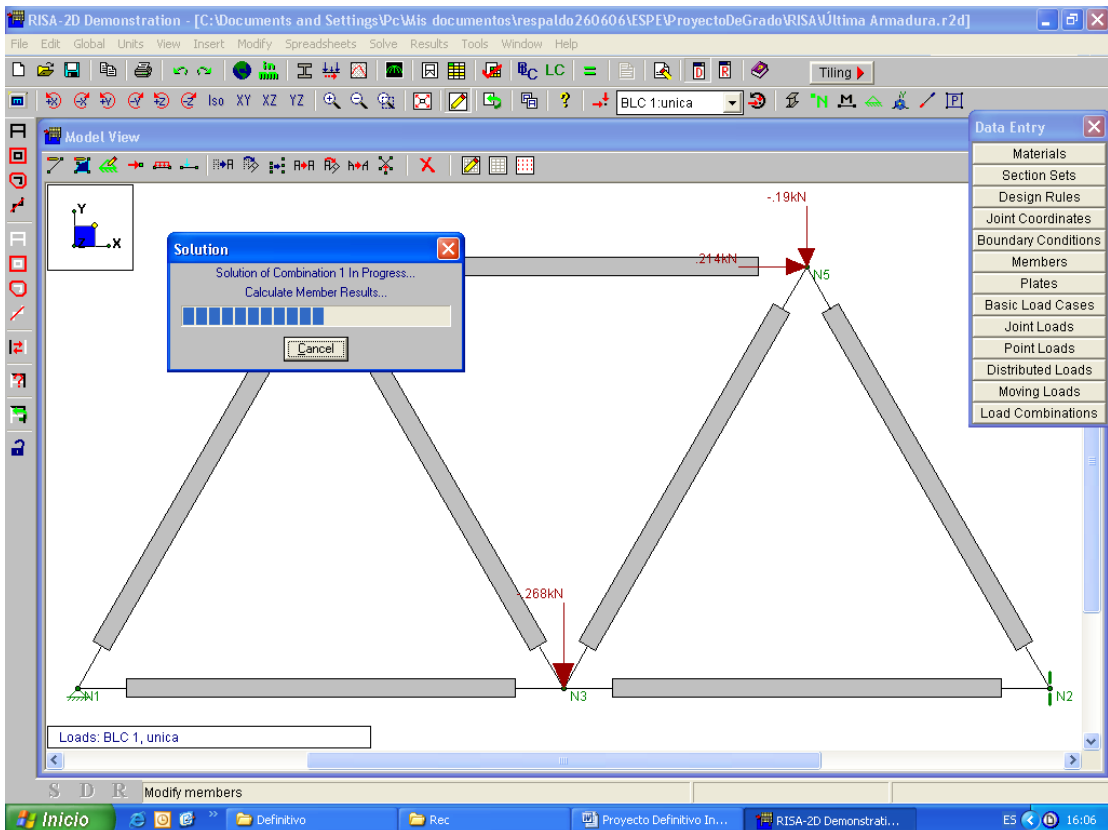


Figura 5.28 Programa analizando la armadura

Una vez que el programa acaba de analizar la estructura aparece la ventana **Results**, en donde se pueden escoger varias opciones para apreciar los resultados obtenidos, hacemos clic en **Joint Reactions** y **Joint Deflections** que son resultados que interesan en el presente proyecto con lo cual se abren dos ventanas con los mismos nombres exponiendo los resultados.

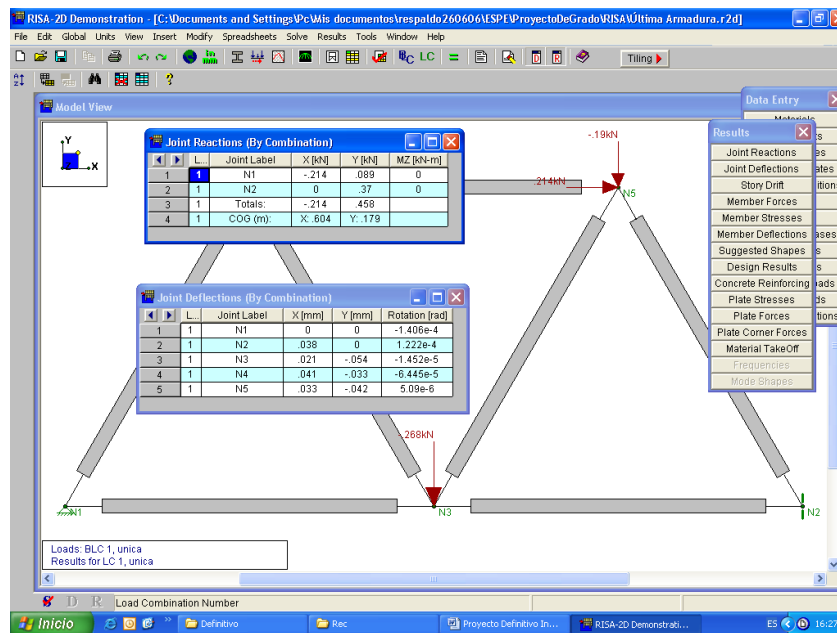


Figura 5.29 Resultados del programa

L...	Joint Label	X [kN]	Y [kN]	MZ [kN-m]
1	N1	-.214	.089	0
2	N2	0	.37	0
3	Totals:	-.214	.458	
4	COG (m):	X: .604	Y: .179	

Figura 5.30 Reacciones en los apoyos

L...	Joint Label	X [mm]	Y [mm]	Rotation [rad]
1	N1	0	0	-1.406e-4
2	N2	.038	0	1.222e-4
3	N3	.021	-.054	-1.452e-5
4	N4	.041	-.033	-6.445e-5
5	N5	.033	-.042	5.09e-6

Figura 5.31 Desplazamientos de los nudos

También se puede observar las fuerzas en todos los elementos de la armadura con el botón **Member Forces**, tomando en cuenta que la convención de signos en el programa indica que las fuerzas axiales con signo positivo están a compresión y viceversa.

	L...	Member Label	Sec	Axial[kN]	Shear[kN]	Moment[kN-m]
1	1	M1	1	-.266	0	0
2			2	-.266	0	0
3			3	-.266	0	0
4			4	-.266	0	0
5			5	-.266	0	0
6	1	M2	1	.102	0	0
7			2	.102	0	0
8			3	.102	0	0
9			4	.102	0	0
10			5	.102	0	0
11	1	M3	1	-.102	0	0
12			2	-.102	0	0
13			3	-.102	0	0
14			4	-.102	0	0
15			5	-.102	0	0
16	1	M4	1	-.213	0	0
17			2	-.213	0	0
18			3	-.213	0	0
19			4	-.213	0	0
20			5	-.213	0	0
21	1	M5	1	.426	0	0
22			2	.426	0	0
23			3	.426	0	0
24			4	.426	0	0
25			5	.426	0	0
26	1	M6	1	-.207	0	0
27			2	-.207	0	0
28			3	-.207	0	0
29			4	-.207	0	0
30			5	-.207	0	0
31	1	M7	1	.102	0	0
32			2	.102	0	0
33			3	.102	0	0
34			4	.102	0	0
35			5	.102	0	0

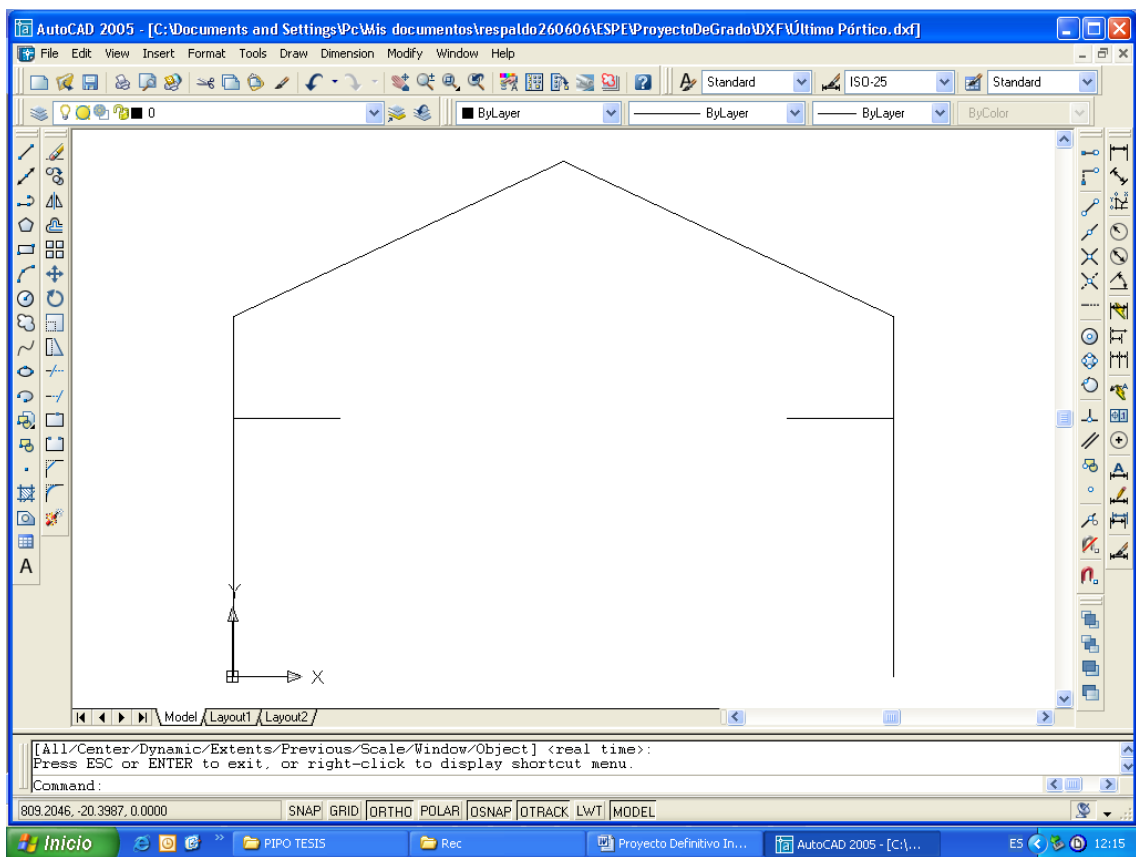
**Figura 5.32 Fuerzas en los miembros**

Como se puede ver los elementos de la armadura soportan sólo fuerzas axiales puesto que se muestra en el cuadro que las fuerzas cortantes y momentos son cero, esto indica que el programa analiza de forma correcta la estructura.



## 5.2.2. ANÁLISIS COMPUTACIONAL DEL PÓRTICO

Para realizar el análisis computacional del pórtico se siguen los mismos pasos que en el análisis de la armadura, tomando en cuenta algunos aspectos propios del pórtico que se detallan a continuación. Se dibuja el pórtico con sus medidas verdaderas en milímetros en dos dimensiones en el programa AutoCAD 2005, tomando como inicio en el punto de origen el extremo inferior izquierdo de la estructura, y se guarda el archivo como DXF.



**Figura 5.33 Pórtico en AutoCAD 2005 como DXF**

Después de guardar el archivo DXF en una ubicación específica, se puede cerrar el programa AutoCAD, y abrimos el software RISA – 2D, en el cual se va a realizar el análisis estructural del pórtico.

Se importa el pórtico al programa de la misma manera que se hizo para la armadura, y tenemos la estructura con sus nudos numerados automáticamente en la ventana **Model View**.

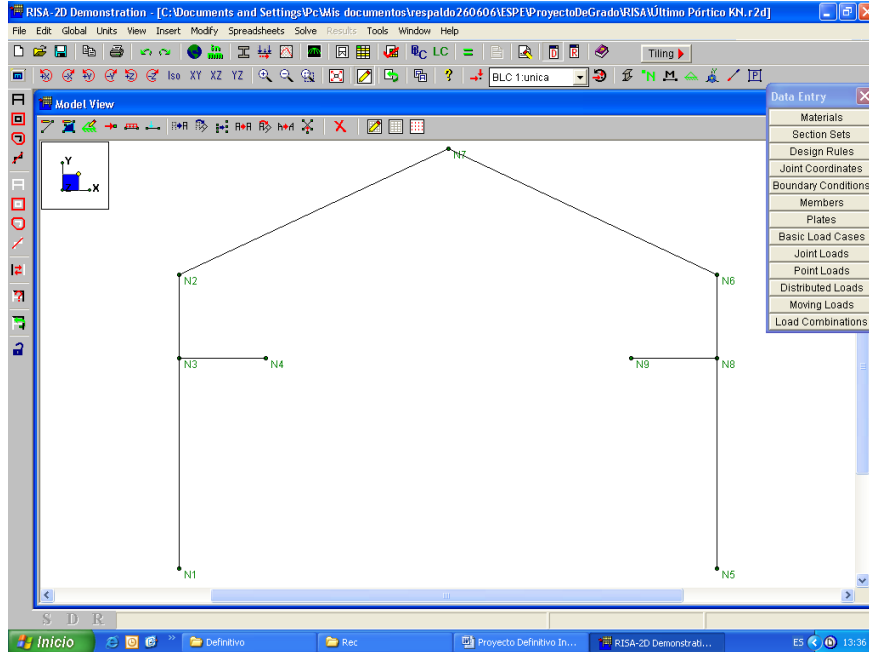


Figura 5.34 Pórtico con nudos numerados automáticamente

Ahora en la parte superior se hace clic en **Units**, aparece la ventana **Units Selection**, se hace clic en el botón **Standard Metric** y luego en **OK**.

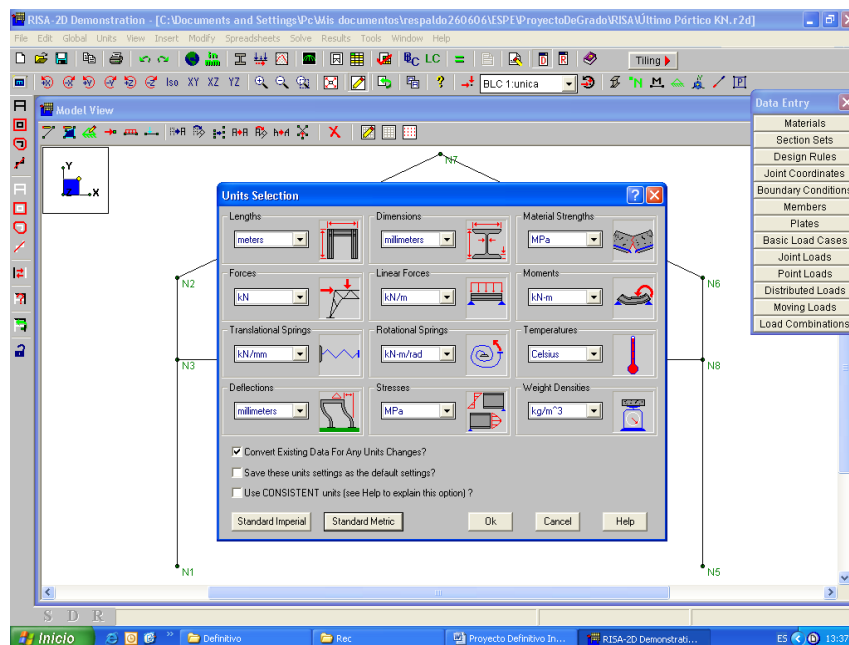


Figura 5.35 Ventana Units Selection

Por el análisis estructural del pórtico estudiado anteriormente se sabe que su nudo superior (N7 en el RISA en este caso) es un pasador por lo cual en el programa se debe hacer lo mismo, para esto se hace doble clic en cada uno de los miembros inclinados de la estructura, con esto se abre la ventana **Information for Member** y el nombre según el miembro, en la pestaña **End Releases** en la sección **End Release Codes** en **I** ó **J** según el inicio o final del miembro se activa la opción **Pinned** y se hace clic en **Aceptar**, ahora se tiene el nudo superior como pasador y se representa en el gráfico del pórtico con un pequeño círculo a uno y otro lado del punto.

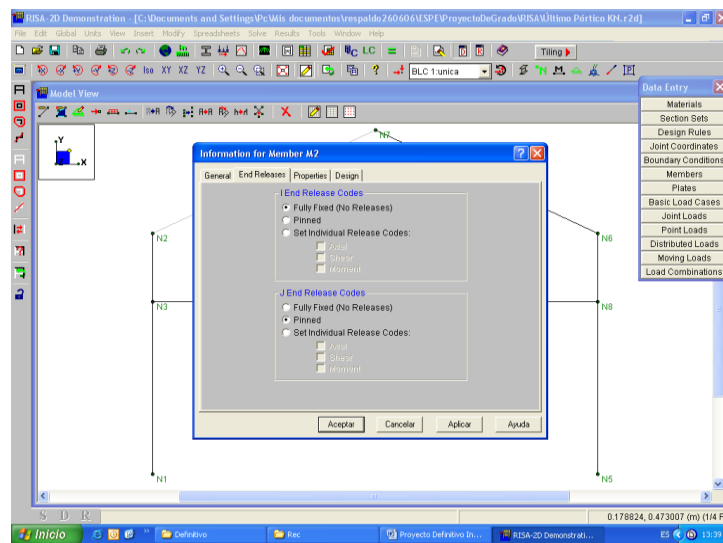


Figura 5.36 Ventana Information for Member

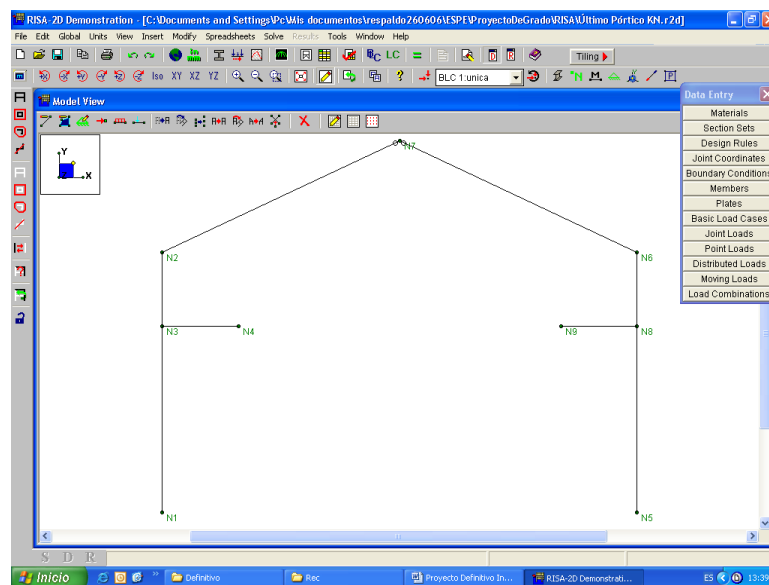
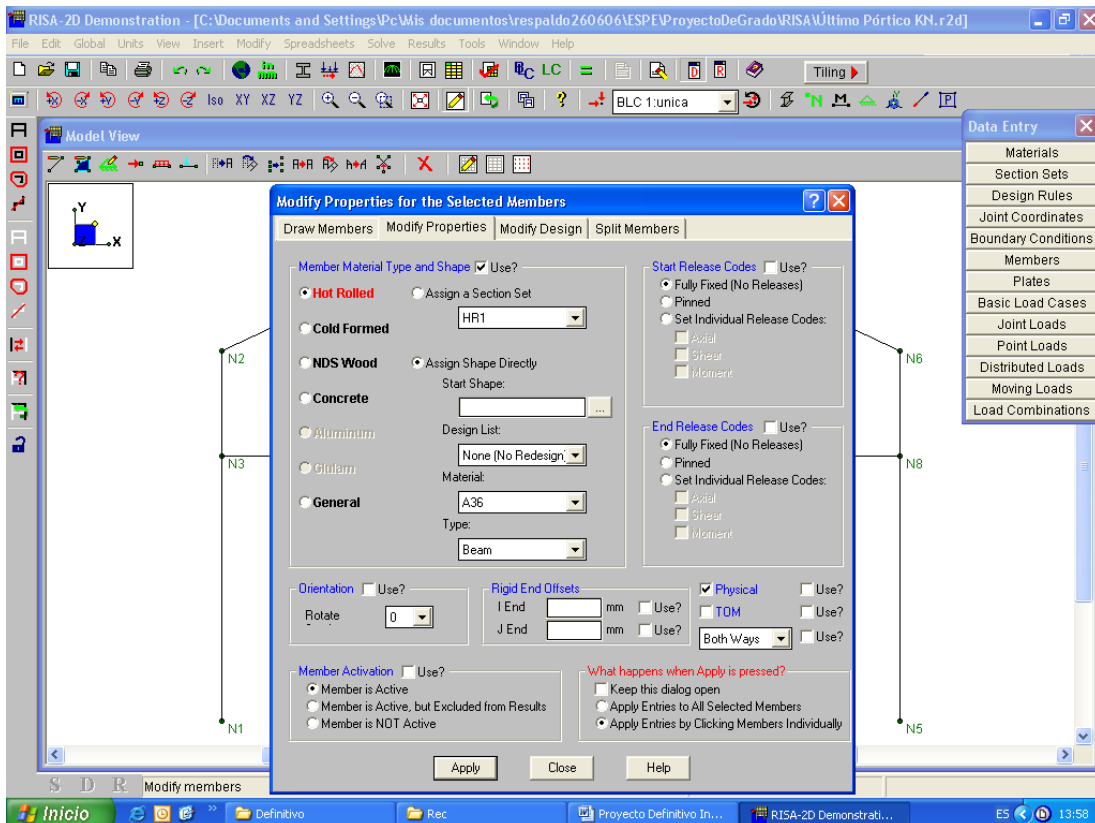


Figura 5.37 Pórtico con representación de pasador en nudo superior

Para modificar los miembros del pórtico se sigue el mismo procedimiento que para la armadura, en la ventana **Modify Properties for the Selected Members**, en la pestaña **Modify Properties** en **Member Material Type and Shape** activamos las opciones **Hot Rolled** y **Use?**, en el espacio **Assign a Section Set** se activa **HR1**, ahora en **Assign Shape Directly** en **Design List** se escoge **None (No Redesign)**, en **Material** – **A36**, y en **Type** – **Beam**.



**Figura 5.38 Ventana Modify Properties for the Selected Members**

En **Assign Shape Directly**, se hace clic en el cuadrado (...) de **Start Shape**, se abre la ventana **Shape Selection**, en **Shape Type** para este caso se escoge **Solid Rectangle** y se hace clic en **Add**, se abre la ventana **Add Shape**, en **Basic Properties** se introducen los datos requeridos como el nombre y las dimensiones de la sección que para este caso es 11 x 11 (mm), y se hace clic en el botón **Calc Props**, con esto se calculan automáticamente las propiedades de la sección, luego se hace clic en **OK**.

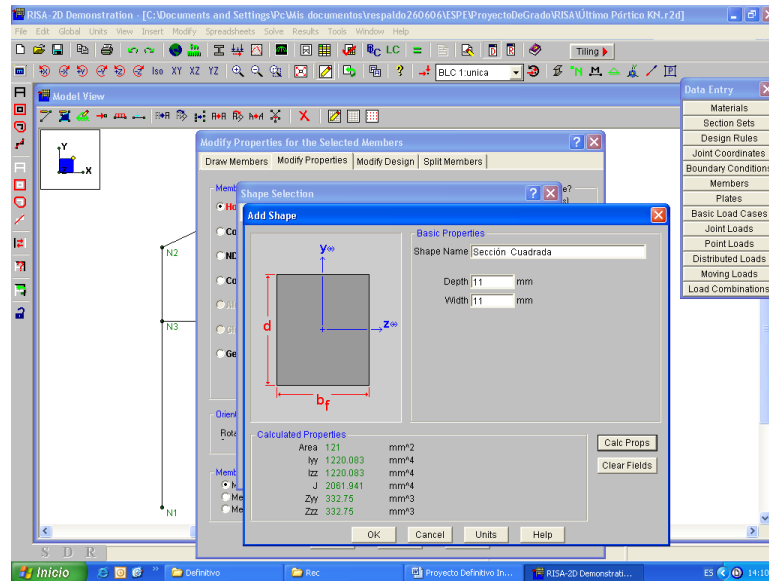


Figura 5.39 Ventana Add Shape

Ahora se tiene en la ventana **Shape Selection** el nombre de la sección que se creó anteriormente, se escoge este nombre y se hace clic en **OK**, en la ventana **Modify Properties for the Selected Members** se escoge **Apply**, ahora se hace clic en cada uno de los miembros del pórtico con lo cual cada uno va adquiriendo las características que se definieron anteriormente, con el botón **Toggle Between Wireframe and Rendering of Beams and Plates** ubicado en la parte superior derecha debajo del botón **Tiling**, se pueden observar los miembros dibujados.

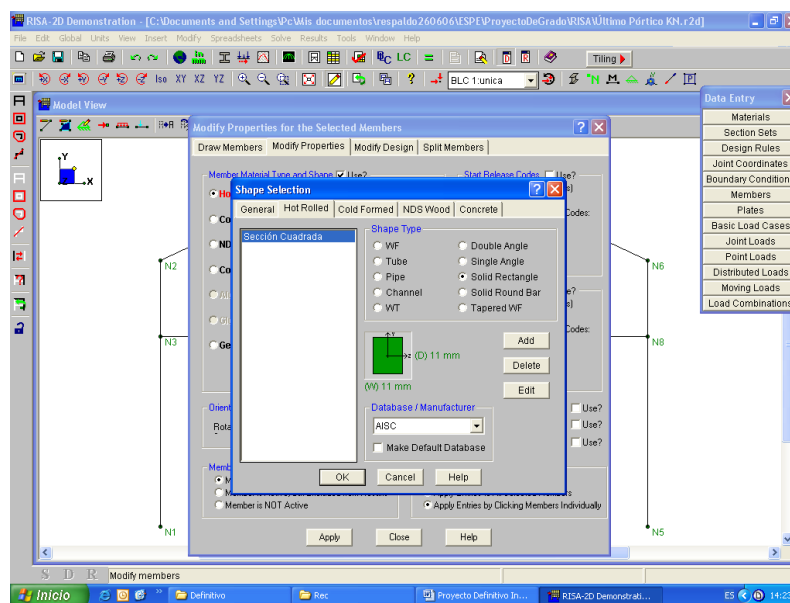


Figura 5.40 Ventana Shape Selection con nombre de sección creada

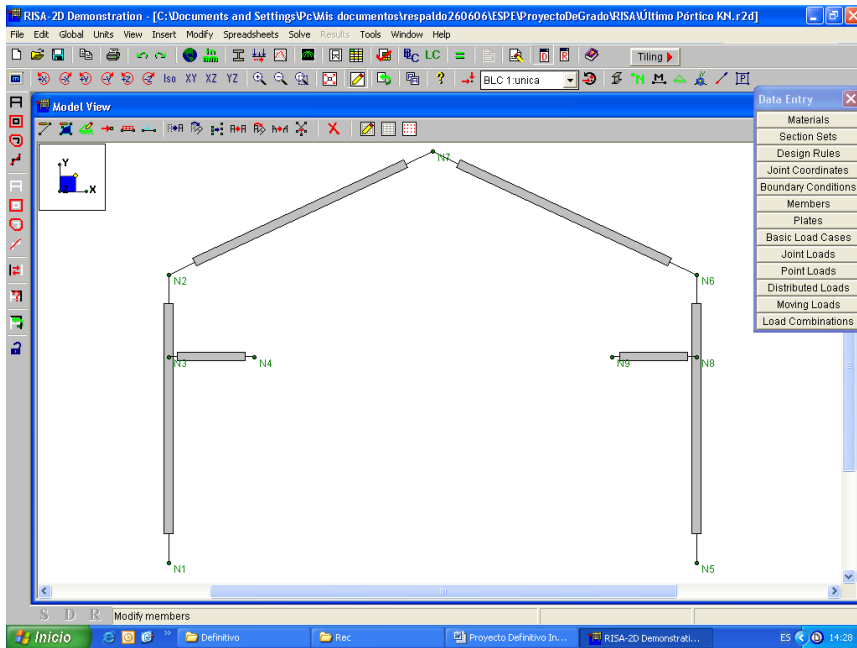


Figura 5.41 Pórtico con miembros dibujados

En la ventana **Model View**, si no está activada se activa la barra de herramientas de edición gráfica con el botón **Activate the Graphic Editing Toolbar**, es el botón con un icono de lápiz amarillo, se hace clic en el botón **Modify boundary conditions** y se abre la ventana **Modify Boundary Conditions for the Selected Joints**, con esto se pueden modificar y establecer los apoyos del pórtico.

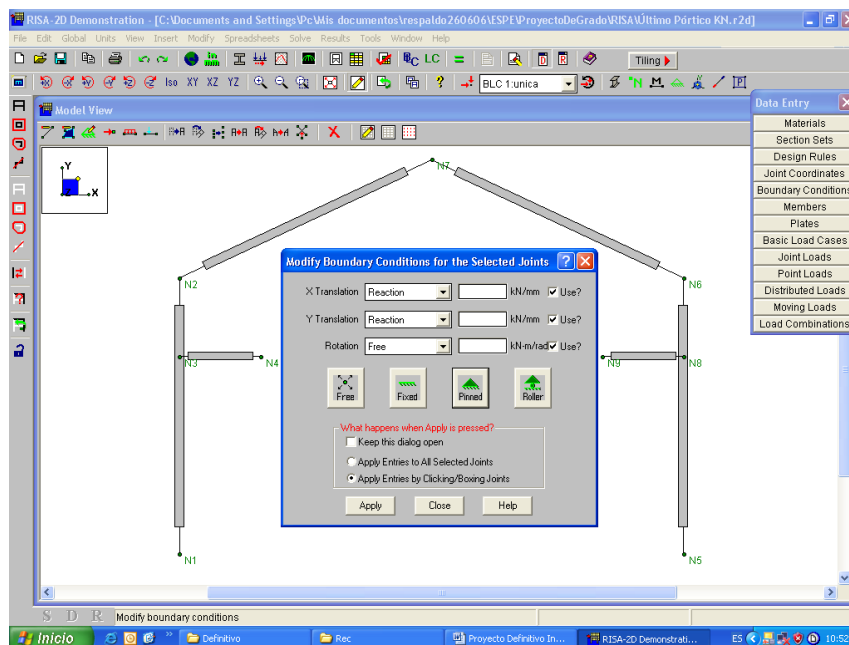
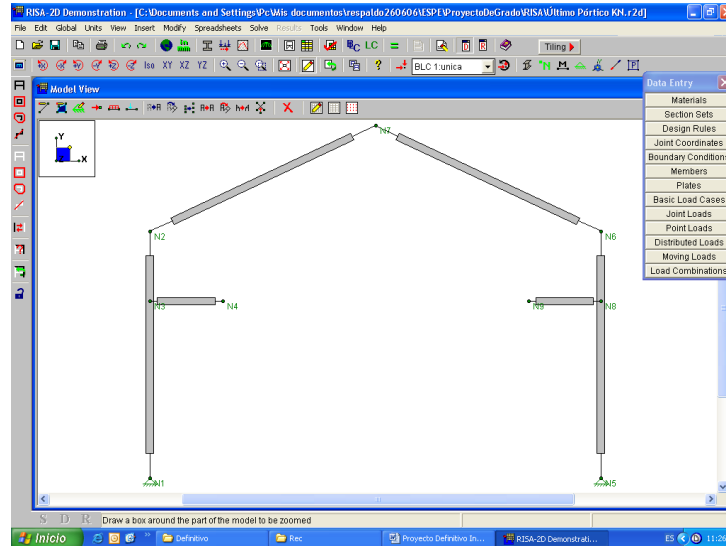


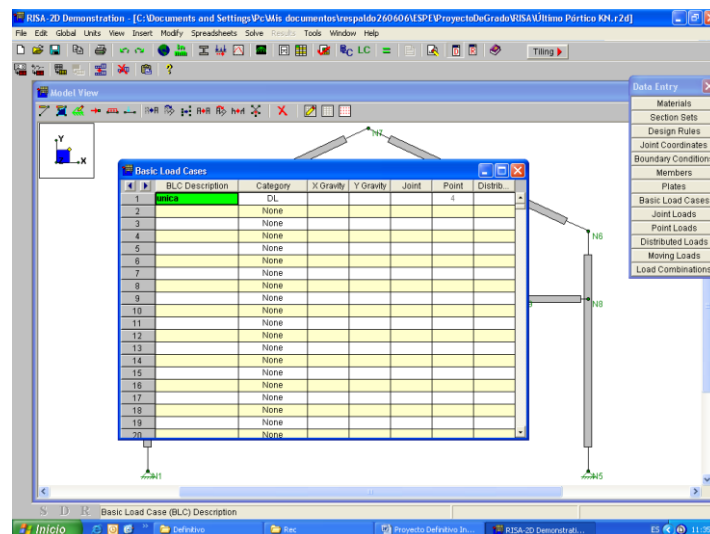
Figura 5.42 Ventana Modify Boundary Conditions for the Selected Joints

Con **Apply Entries by Clicking/Boxing Joints** activado se selecciona **Pinned** para apoyo tipo pasador, se hace clic en **Apply** y se escoge los nudos seleccionados que en este caso son **N1** y **N5**.



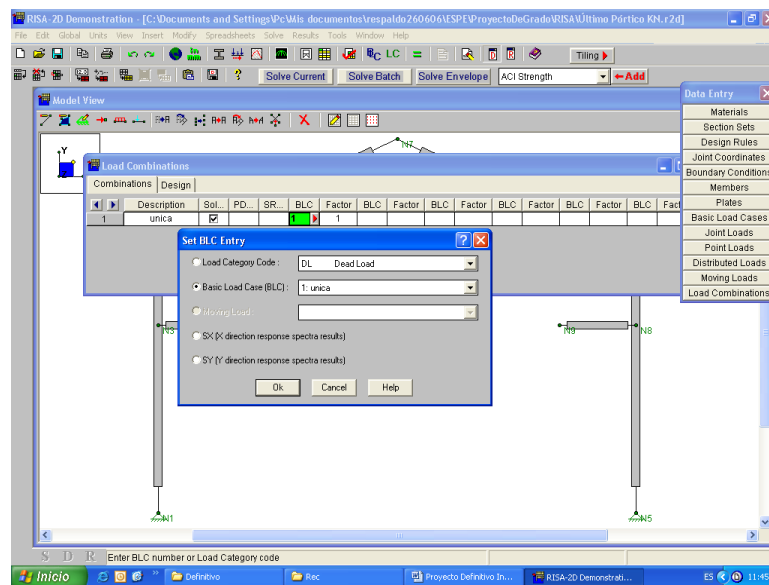
**Figura 5.43 Pórtico con miembros y apoyos seleccionados**

Ahora en la ventana **Data Entry** se hace clic en el botón **Basic Load Cases** con lo cual se abre una ventana con el mismo nombre, en la primera fila en la columna **BLC Description** se escribe cualquier nombre, en este caso también se puso **unica** por ser un solo tipo de cargas, en la columna **Category** se selecciona **DL (Dead Load)** por ser cargas muertas las utilizadas y se cierra la ventana.



**Figura 5.44 Ventana Basic Load Cases**

Se hace clic en el botón **Load Combinations** en la ventana **Data Entry** se abre una ventana con el mismo nombre, se hace un clic y en la fila que aparece en la columna **Description** se escribe el mismo nombre que se puso anteriormente, en este caso **unica**, en la columna **BLC** se hace clic y se abre la ventana **Set BLC Entry** donde se activa **Basic Load Case (BLC)** y se puede observar que esta la palabra **unica** que creamos en la ventana anterior, se hace clic en **OK** y se cierra la ventana **Load Combinations**.



**Figura 5.45 Ventanas Load Combinations y Set BLC Entry**

En la ventana **Model View** en la barra de herramientas de edición gráfica se hace clic en el botón **Apply points loads or moments to members** para abrir la ventana **Point Loads for Selected Members**, debe estar activado **Apply Load by Clicking Members Individually**, en **Direction** se puede escoger la dirección de la carga, en **Magnitude** se escribe la magnitud de la carga y con el signo positivo o negativo se define su sentido, en **Location** se escribe la distancia desde el inicio del miembro hasta donde va a estar la carga o también la distancia en porcentaje, por ejemplo si se desea poner la carga a la mitad del miembro se escribe 50%, en **Basic Load Case** debe estar el que se creó anteriormente, en este caso **unica**, se escoge **Apply** y hacemos clic en el miembro donde se va a aplicar la carga definida. Se sigue el mismo procedimiento para todas las cargas que se necesiten ubicar en los diferentes miembros.



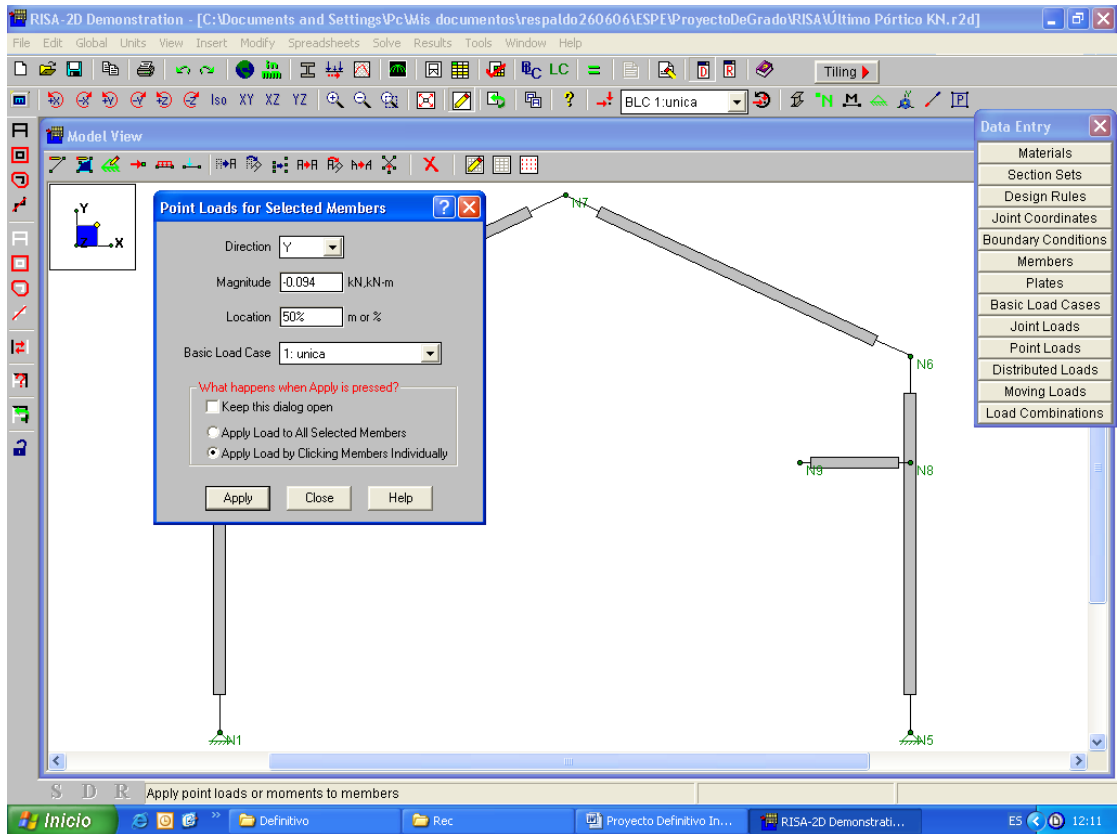


Figura 5.46 Ventana Point Loads for Selected Members

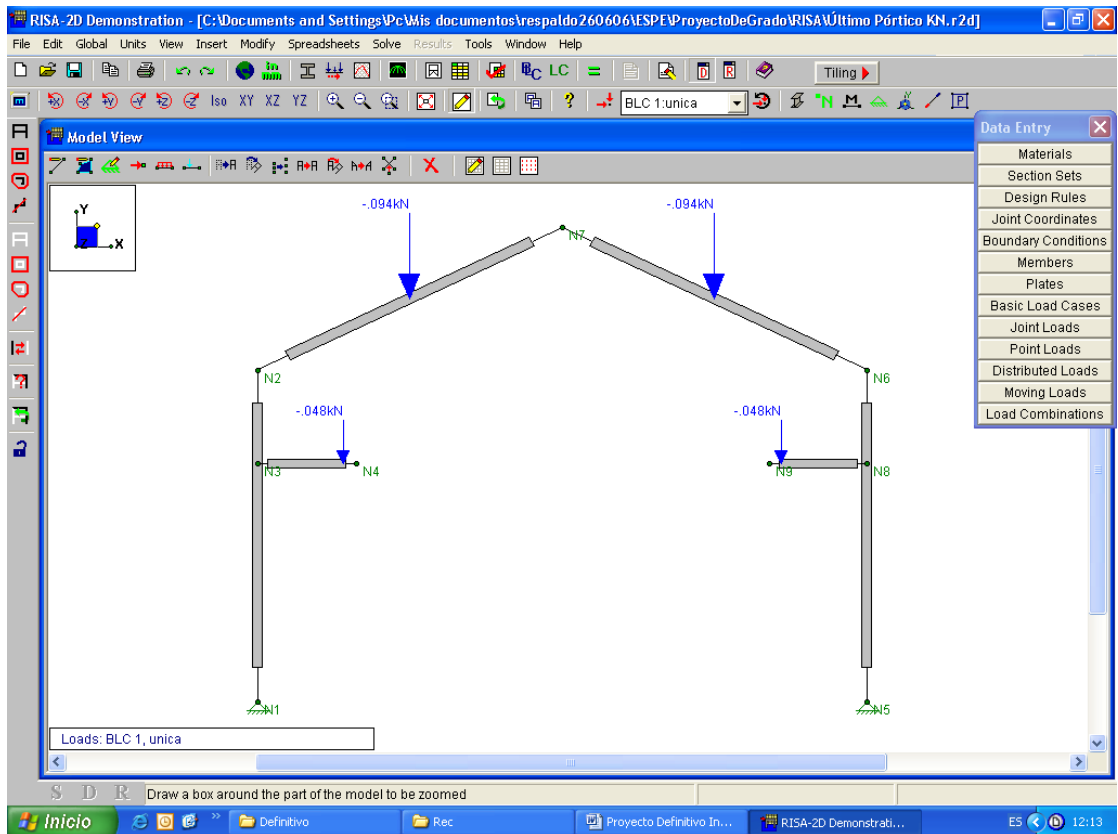
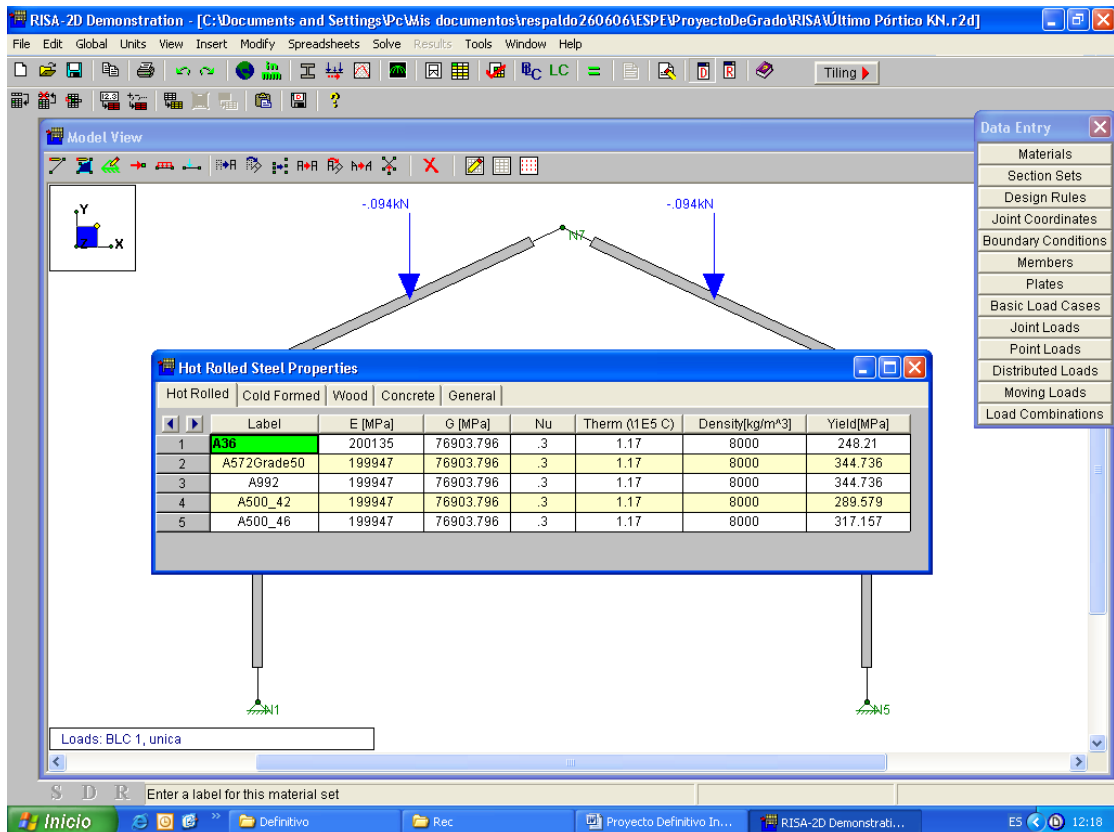


Figura 5.47 Pórtico con cargas, elementos y apoyos definidos

Si se desea cambiar alguna característica del material como por ejemplo el módulo de elasticidad (E) u otros, en la ventana **Data Entry**, se elige **Materials** y se abre la ventana **Hot Rolled Steel Properties**, aquí podemos modificar las propiedades, en nuestro caso para acero A36 trabajamos con un  $E = 200135$  MPa.



**Figura 5.48 Ventana Hot Rolled Steel Properties**

Ahora se hace que el programa analice el pórtico que se ha definido para obtener los resultados de acuerdo a las características y condiciones que se han planteado, para esto se hace clic en el botón **Perform the analysis and design calculations** que esta representado con un icono de signo = de color verde en la parte superior derecha del programa, se abre la ventana **Solution Choices**, y debe estar activado **Single Combination** en donde debe aparecer el BLC que se definió anteriormente, se selecciona **Solve**.

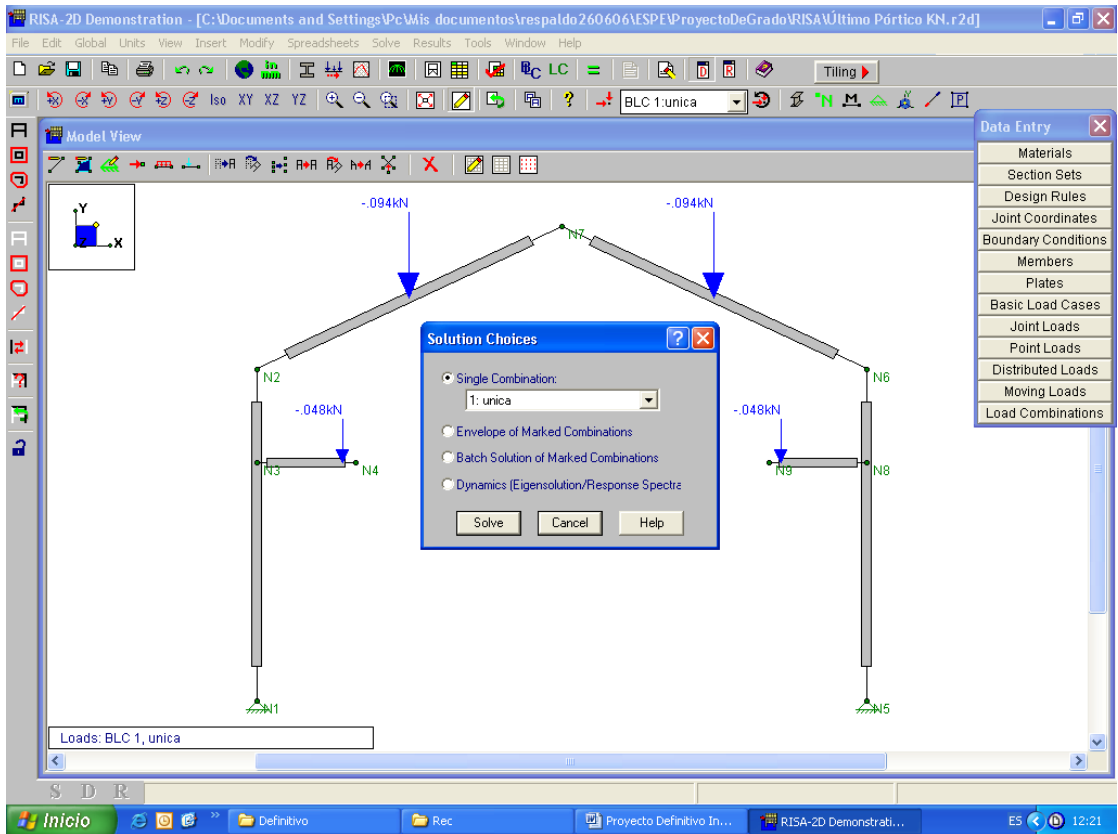


Figura 5.49 Ventana Solution Choices

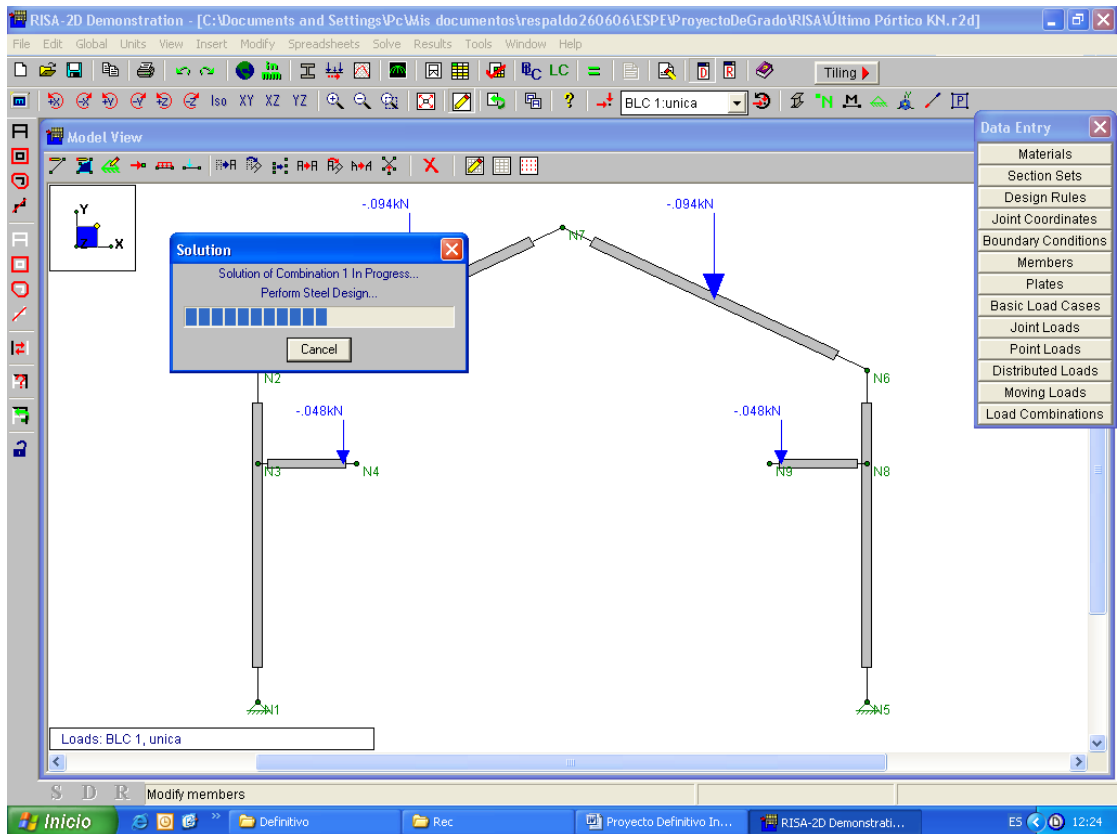


Figura 5.50 Programa analizando el pórtico

Una vez que el programa acaba de analizar la estructura aparece la ventana **Results**, en donde se pueden escoger varias opciones para apreciar los resultados obtenidos, hacemos clic en **Joint Reactions** y **Joint Deflections** que son resultados que interesan en el presente proyecto con lo cual se abren dos ventanas con los mismos nombres exponiendo los resultados.

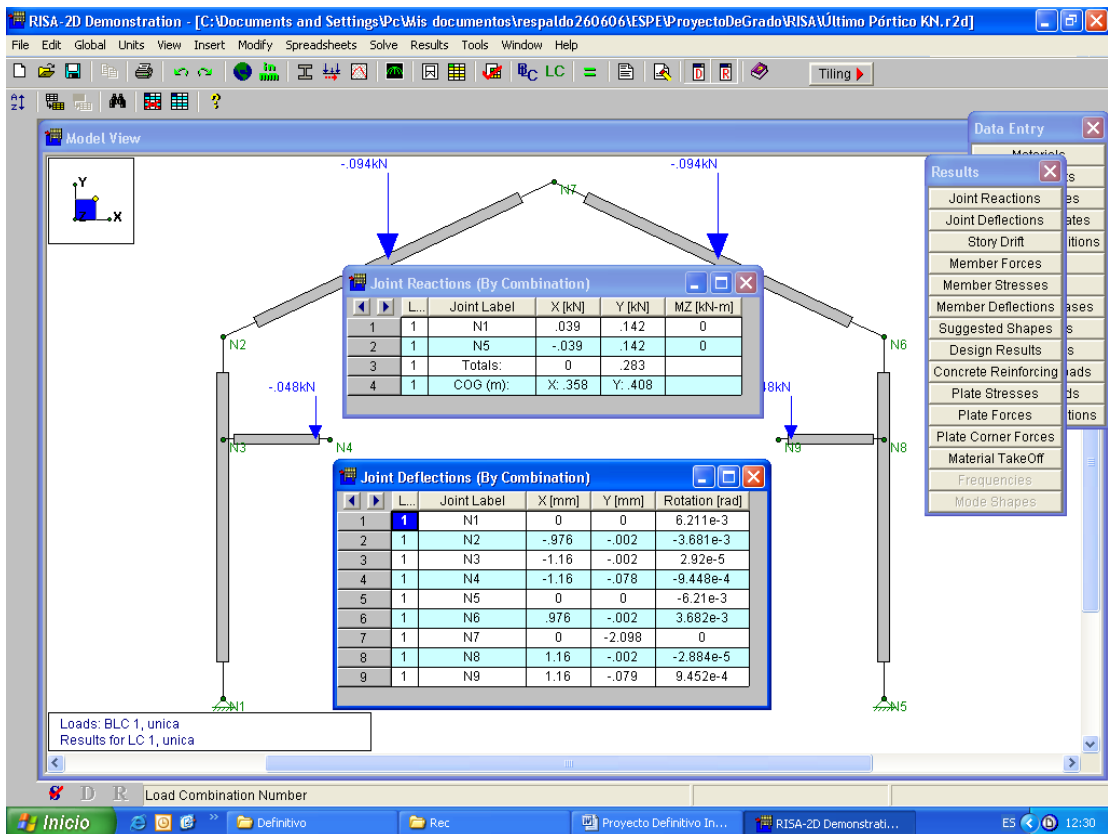


Figura 5.51 Resultados del programa

Joint Reactions (By Combination)					
	L...	Joint Label	X [kN]	Y [kN]	MZ [kN-m]
1	1	N1	.039	.142	0
2	1	N5	-.039	.142	0
3	1	Totals:	0	.283	
4	1	COG (m):	X: .358	Y: .408	

Figura 5.52 Reacciones en los apoyos

	L...	Joint Label	X [mm]	Y [mm]	Rotation [rad]
1	1	N1	0	0	6.211e-3
2	1	N2	-.976	-.002	-3.681e-3
3	1	N3	-1.16	-.002	2.92e-5
4	1	N4	-1.16	-.078	-9.448e-4
5	1	N5	0	0	-6.21e-3
6	1	N6	.976	-.002	3.682e-3
7	1	N7	0	-2.098	0
8	1	N8	1.16	-.002	-2.884e-5
9	1	N9	1.16	-.079	9.452e-4

Figura 5.53 Desplazamientos de los nudos

También se puede observar fuerzas y momentos en todos los elementos del pórtico con el botón **Member Forces**, tomando en cuenta que la convención de signos en el programa indica que las fuerzas axiales con signo positivo están a compresión y viceversa.

	L...	Member Label	Sec	Axial[kN]	Shear[kN]	Moment[kN-m]
1	1	M1	1	.142	-.039	0
2			2	.142	-.039	.004
3			3	.142	-.039	.008
4			4	.094	-.039	.007
5			5	.094	-.039	.01
6	1	M2	1	.075	.069	.01
7			2	.075	.069	.004
8			3	.075	.069	-.003
9			4	.035	-.016	-.002
10			5	.035	-.016	0
11	1	M3	1	0	.048	.005
12			2	0	.048	.003
13			3	0	.048	.002
14			4	0	.048	0
15			5	0	0	0
16	1	M4	1	.142	.039	0
17			2	.142	.039	-.004
18			3	.142	.039	-.008
19			4	.094	.039	-.007
20			5	.094	.039	-.01
21	1	M5	1	.075	-.069	-.01
22			2	.075	-.069	-.004
23			3	.075	-.069	.003
24			4	.035	.016	.002
25			5	.035	.016	0
26	1	M6	1	0	-.048	-.005
27			2	0	-.048	-.003
28			3	0	-.048	-.002
29			4	0	-.048	0
30			5	0	0	0

Figura 5.54 Fuerzas en los miembros

Además el programa brinda la opción de poder observar las gráficas de fuerza axial, fuerza cortante y momento flector de cualquier miembro de la estructura, para esto se hace clic en el botón **Detail** que está al lado izquierdo en el programa y se escoge el miembro que queremos observar, se abre la ventana **Detail Report for** y el nombre del miembro que elegimos, en este caso **M2** por ser el miembro que soporta mayor carga, en donde se pueden observar las gráficas. Se hace clic en la gráfica que se desee para que ésta se amplíe y se la puede analizar con mayor detalle.

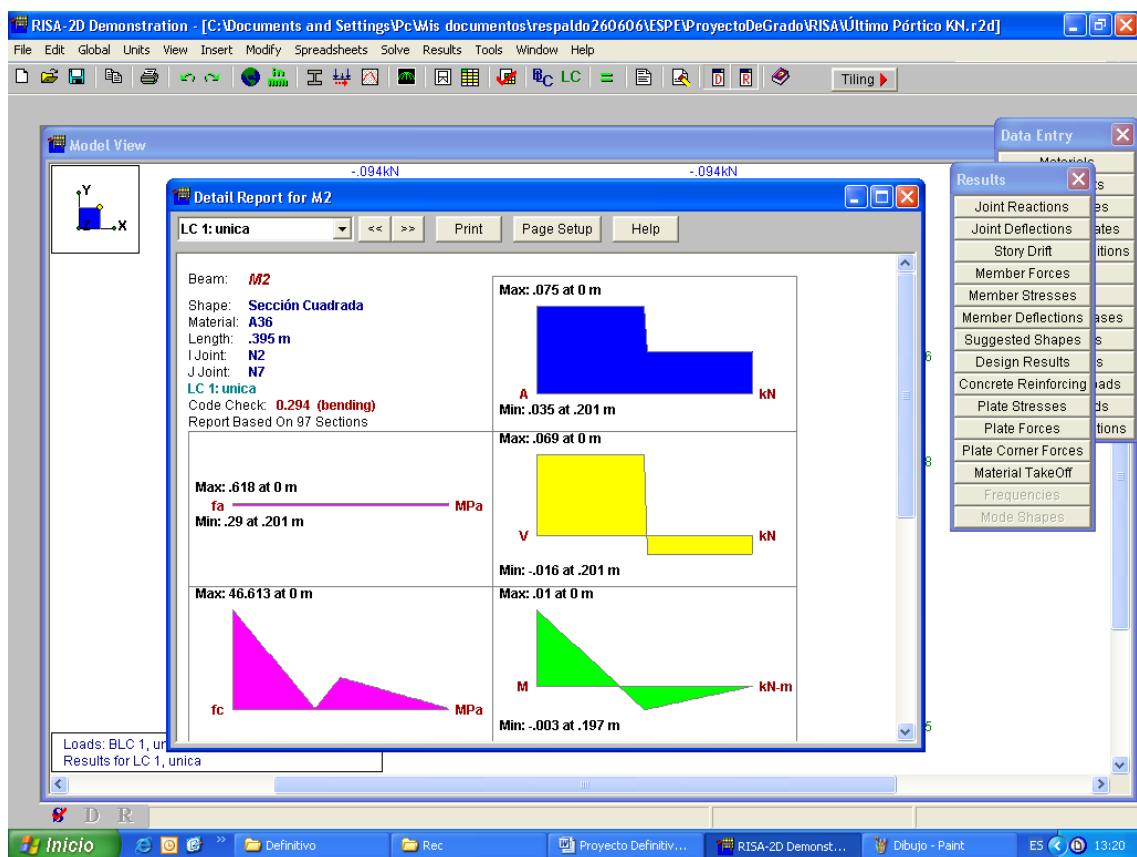


Figura 5.55 Ventana Detail Report for M2

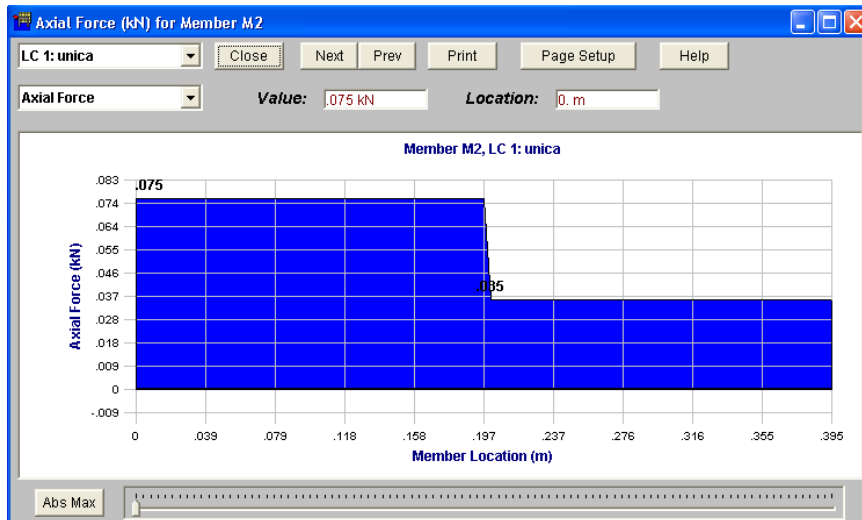


Figura 5.56 Gráfica de Fuerza Axial para M2

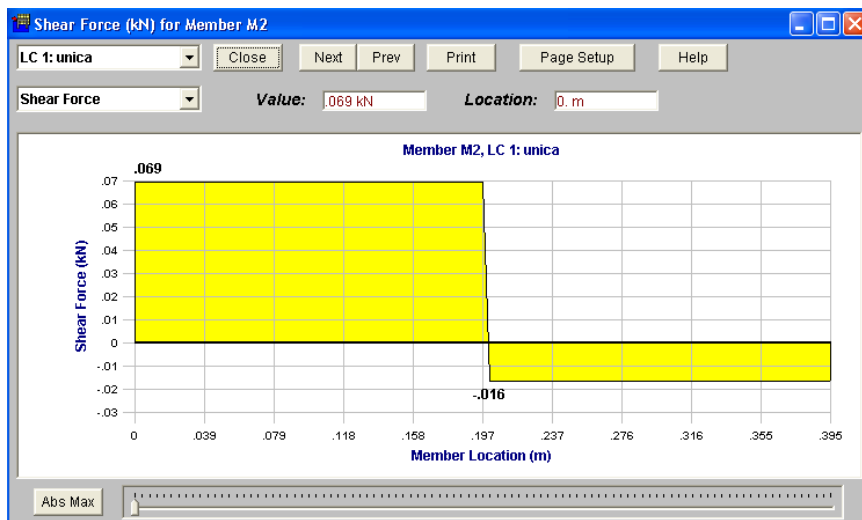


Figura 5.57 Gráfica de Fuerza Cortante para M2

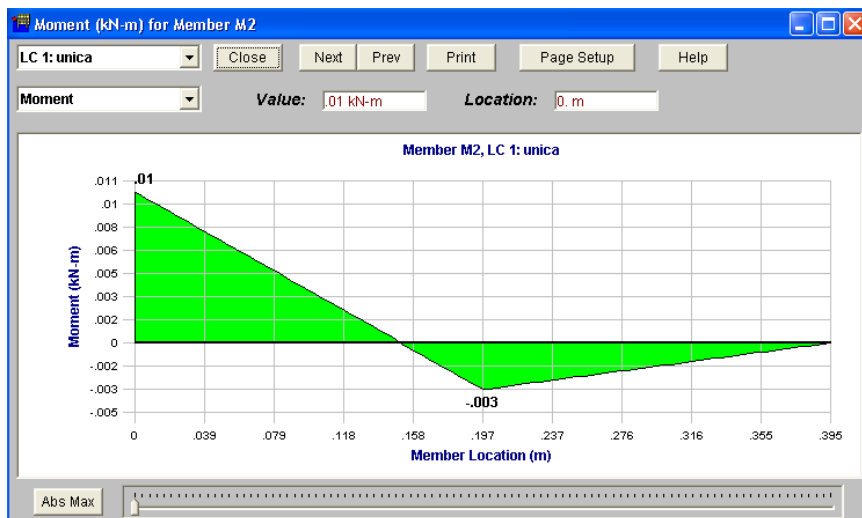


Figura 5.58 Gráfica de Momento Flector para M2

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS

### 5.3.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON RESULTADOS COMPUTACIONALES DE LA ARMADURA

#### 5.3.1.1. ERROR DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN LOS APOYOS

Tabla 5.9 Valores de pruebas prácticas, computacionales y su error porcentual

<b>Carga</b>	<b>Valores experimentales obtenidos de las pruebas prácticas</b>	<b>Valores computacionales obtenidos del programa RISA-2D</b>	<b>Error porcentual entre valores computacionales y experimentales</b>
<b>Nombre</b>	<b>Kg</b>	<b>Kg</b>	<b>%</b>
Ay	9,41	9,08	-3,63
Ax	-20,42	-21,84	6,47
By	34,64	37,76	8,24
Elemento AC	-9,64	-10,41	-7,91

De los valores obtenidos se puede decir que la armadura al estar sometida a carga es estable, y por lo tanto apropiada para poder hacer una comparación entre las partes experimental y computacional.



### 5.3.1.2. ERROR DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN LOS NUDOS

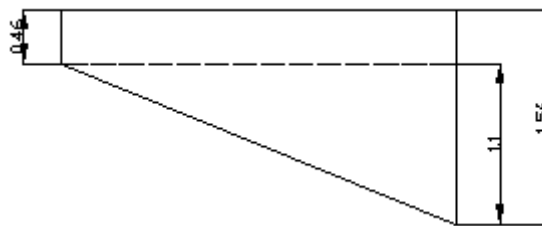
Para sacar el error de los desplazamientos medidos en los comparadores de reloj, se tomó en cuenta los desplazamientos que sufren los apoyos; lo cual permite obtener el desplazamiento real que está actuando en cada uno de los nudos.

#### Nudo 5 (N5)

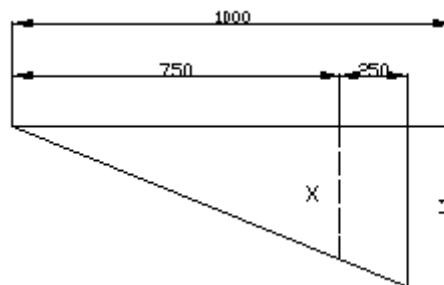
Mediante una semejanza de triángulos realizada con los desplazamientos en los apoyos y la lectura del comparador; es posible obtener el error del desplazamiento en el nodo.

da A = 0.46 mm ; desplazamiento del apoyo A

da B = 1.56 mm ; desplazamiento del apoyo B



(a)



(b)

Figura 5.59 Semejanza de triángulos en desplazamiento de apoyos

$$\frac{1.1}{X} = \frac{1000}{750}$$

$$X = 0.825 \text{ mm}$$

$$dn5 = X + da A$$

$$dn5 = 0.825 + 0.46$$

$$dn5 = 1.285 \text{ mm}$$

$$dN5 = dn5 - dc2$$

$$dN5 = 1.285 - 1.241$$

$$dN5 = 0.044 \text{ mm}$$

**Tabla 5.10 Error porcentual entre valor computacional y experimental**

<b>N5 (mm)</b>	<b>dN5 (mm)</b>	<b>error %</b>
<b>computacional</b>	<b>experimental</b>	<b>error porcentual</b>
0,042	0,044	-4,76

#### **Nudo 4 (N4)**

A diferencia del nudo 5, para calcular cuanto se desplaza el nudo 4; se toma en cuenta cuanto se desplaza el nudo a lo largo del eje x y se resta del valor obtenido en el comparador de reloj.

$$dc1 = 0.96 \text{ mm}$$

$$da A = 0.91 \text{ mm}$$

$$dN4 = dc1 - da A$$

$$dN4 = 0.96 - 0.91$$

$$dN4 = 0.05 \text{ mm}$$

**Tabla 5.11 Error porcentual entre valor computacional y experimental**

<b>N4 (mm)</b>	<b>dN4 (mm)</b>	<b>error %</b>
<b>computacional</b>	<b>experimental</b>	<b>error porcentual</b>
0,041	0,05	21

Debido a que son valores demasiado pequeños, el error calculado es bastante aceptable para pruebas de laboratorio, esta afirmación es respaldada por ingenieros que han estado encargados de laboratorio.

### **5.3.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON RESULTADOS COMPUTACIONALES DEL PÓRTICO**

#### **5.3.2.1. ERROR DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN LOS APOYOS**

**Tabla 5.12 Valores de pruebas prácticas, computacionales y su error porcentual**

<b>Carga</b>	<b>Valores experimentales obtenidos de las pruebas prácticas</b>	<b>Valores computacionales obtenidos del programa RISA-2D</b>	<b>Error porcentual entre valores computacionales y experimentales</b>
<b>Nombre</b>	<b>kg</b>	<b>kg</b>	<b>%</b>
Ay	15,18	14,43	-5,19
By	15,13	14,43	-4,85
Ax	3,56	3,951	9,83
Bx	3,62	3,951	8,41

De los valores obtenidos se puede decir que el pórtico al estar sometido a carga es estable, y por lo tanto apropiado para poder hacer una comparación entre la partes experimental y computacional.

### **5.3.2.2. ERROR DE LOS DESPLAZAMIENTOS EN LOS NUDOS**

Para sacar el error de los desplazamientos medidos en los comparadores de reloj, se tomó en cuenta los desplazamientos que sufren los apoyos; lo cual permite obtener el desplazamiento real que está actuando en cada uno de los nudos.

#### **Nudo 7 (N7)**

Al estar aplicadas las cargas uniformemente en el pórtico, se pudo observar un desplazamiento similar en ambos apoyos; por lo cual se procedió a sacar la media entre ambos valores.

da A = 0.812 mm

da B = 0.801 mm

$$x = \frac{da A + da B}{2}$$

$$x = \frac{0.812 + 0.801}{2}$$

$$x = 0.807 \text{ mm}$$

$$dN7 = dc1 - x$$

$$dN7 = 2.834 - 0.807$$

$$dN7 = 2.027 \text{ mm}$$

**Tabla 5.13 Error porcentual entre valor computacional y experimental**

dN5 (mm)	dN5 (mm)	error %
computacional	experimental	error porcentual
2,098	2,027	3,38

## **Nudo 2 (N2)**

En este caso el desplazamiento del apoyo es casi despreciable, por lo cual el error se calcula directamente de la lectura que se obtuvo del comparador de reloj.

**Tabla 5.14 Error porcentual entre valor computacional y experimental**

dN5 (mm)	dN5 (mm)	error %
computacional	experimental	error porcentual
0,976	0,96	1,64

### 5.3.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON RESULTADOS TEÓRICOS DE LA ARMADURA

#### 5.3.3.1. ERROR DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN LOS APOYOS

Con los promedios obtenidos de las pruebas prácticas procedemos a determinar la carga que está actuando en los apoyos y comparar con los valores teóricos obtenidos del análisis de cargas.

**Tabla 5.15 Valores de pruebas prácticas, valores teóricos y su error porcentual**

<b>Carga</b>	<b>Valores experimentales obtenidos de las pruebas prácticas</b>	<b>Valores teóricos obtenidos del análisis de cargas</b>	<b>Error porcentual entre valores teóricos y experimentales</b>
<b>Nombre</b>	<b>kg</b>	<b>kg</b>	<b>%</b>
Ay	9,41	9,06	-3,86
Ax	-20,42	-21,87	6,59
By	34,64	37,68	8,07
Elemento AC	-9,64	-10,46	7,82

De los valores obtenidos se puede decir que la armadura al estar sometida a carga es estable, y por lo tanto apropiada para poder hacer una comparación entre las partes experimental y teórica.

## 5.3.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON RESULTADOS TEÓRICOS DEL PÓRTICO

### 5.3.4.1. ERROR DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA EN LOS APOYOS

Una vez obtenidas las deformaciones unitarias, con los promedios procedemos a determinar la carga que está actuando en los apoyos y comparar con los valores teóricos obtenidos del análisis de cargas.

**Tabla 5.16 Valores de pruebas prácticas, valores teóricos y su error porcentual**

<b>Carga</b>	<b>Valores experimentales obtenidos de las pruebas prácticas</b>	<b>Valores teóricos obtenidos del análisis de cargas</b>	<b>Error porcentual entre valores teóricos y experimentales</b>
<b>Nombre</b>	<b>kg</b>	<b>kg</b>	<b>%</b>
Ay	15,18	14,43	-5,19
By	15,13	14,43	-4,85
Ax	3,56	3,951	9,83
Bx	3,62	3,951	8,41

De los valores obtenidos se puede decir que el pórtico al estar sometido a carga es estable y por lo tanto apropiado para poder hacer una comparación entre la parte experimental y teórica.





## CAPÍTULO VI

### 6. ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

#### ANÁLISIS ECONÓMICO

##### 6.1.1. COSTOS DIRECTOS

##### 6.1.1.1. MATERIA PRIMA DIRECTA

**Tabla 6.1 Costos Materiales**

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	USD/ unidad	TOTAL [USD]
8	Pesas para báscula (2,5 kg)	8,75	70
10	Pesas para báscula (5 kg)	17,5	175
2	Comparador de reloj (0,01mm)	68,25	136,5
1	Barra cuadrada 11mm	4,33	4,33
3	Tubo cuadrado 30x30x1,5	11,48	34,44
1	Platina de aluminio	10,37	10,37
4	Rulimanes 16X12	2,5	10
5	Oxicorte 5mm	1,25	6,25
8	Galga extensiométrica	12,5	100
13	Perno acero 5/16X3/4"	0,054	0,702
9	Tuerca hexagonal 5/16"	0,03	0,27
4	Arandela plana 5/16"	0,03	0,12
16	Tornillo c.redonda 3/16X3/4"	0,04	0,64
4	Perno acero 5/16X2"	0,12	0,48
4	Tuerca hexagonal 5 1/2"	0,1	0,4
6	Tuerca hexagonal 3/16"	0,022	0,13
2	Arandela plana 3/16"	0,02	0,04
1	Llave mixta MM 8mm	1,1	1,1
1	Llave mixta SAE 3/8"	1,2	1,2
1	Llave hexagonal 3/16"	0,3	0,3
1	Llave hexagonal 7/32"	0,35	0,35
1	Llave hexagonal 1/4"	0,4	0,4
1	Llave mixta MM 7mm	1,05	1,05
1	Llave hexagonal 5/32"	0,25	0,25
2	Perno allen acero 10X3/4"	0,15	0,3
1	Pega instantanea	3,74	3,74
1	Nivel 9"	5,3	5,3
2	Lija de agua #400	0,35	0,7
2	Lija de agua #200	0,35	0,7
2	Cable de acero 1/16"	0,0982	0,2
2	Grillete 1/8"	0,0446	0,09
Sumatoria			565,352
12% IVA			67,84224
TOTAL 1			633,19424

## 6.1.1.2. MANO DE OBRA DIRECTA

Tabla 6.2 Costos Manufactura

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	USD/ unidad	TOTAL [USD]
1	Bastidor	50	50
1	Pórtico	25	25
1	Armadura	25	25
	Varios		150
TOTAL 2			250

Tabla 6.3 Remuneración a estudiantes

Nombre	Cargo	Horas-H	USD	USD
			Valor H-H	Valor Total
Sr. César Garcés	Responsable del Proyecto	960	3	2880
Sr. Pablo Izurieta	Responsable del Proyecto	960	3	2880
TOTAL 3				5760

## 6.1.2. COSTOS INDIRECTOS

### 6.1.2.1. HONORARIO A PROFESIONALES

Tabla 6.4 Honorarios a Profesionales

EMPRESA	Cargo	Horas-H	USD	USD
			Valor H-H	Valor Total
FIM-E	Ingenieros	80	12.50	1000
TOTAL 4				1000

### 6.1.2.2. USO DE MAQUINARIA Y EQUIPOS DE LABORATORIO

Tabla 6.5 Uso de Maquinaria y Equipos de Laboratorio

DESCRIPCIÓN	Horas	[USD/h]	TOTAL
Uso de Maquinaria	10	15	150
Uso de Equipo	20	5	100
TOTAL 5			350

### 6.1.2.3. MISCELÁNEOS

**Tabla 6.6 Costos Misceláneos**

Artículos	Costo (USD)
Útiles de oficina	60
Transporte terrestre	200
Servicios básicos (electricidad, agua potable , teléfono, otros)	170
Internet	50
<b>TOTAL 6</b>	<b>480</b>

TOTAL = TOTAL 1 + TOTAL 2 + TOTAL 3 + TOTAL 4 + TOTAL 5 + TOTAL 6

TOTAL = 8473 USD

**Nota:** El financiamiento del presente proyecto fue cubierto en su totalidad por los ejecutores de la tesis de grado, excepto los rubros de honorarios a profesionales.

## 6.2 ANÁLISIS FINANCIERO

### 6.2.1 ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO REALIZADO

La vida útil del proyecto va a estar dado por la pérdida en la elasticidad de los distintos elementos que forman el equipo. Para mantener una vida útil larga es necesario que se mantenga las condiciones de diseño propuestas, es decir se mantenga las cargas establecidas para que la elasticidad del material no se pierda.

Estimando un número de prácticas de 80 al año, la vida útil que podría tener el proyecto es de alrededor de 10 años.

### 6.2.1.1. BENEFICIO DEL SISTEMA

- Consolidación de los conocimientos teóricos con experimentales.
- Uso práctico del software
- Mejora en criterios de diseño de estructuras
- Mejora en posibles diseños de estructuras
- Mejora en la inventiva

### 6.2.1.2. BENEFICIO DE LA CARRERA

La vida útil del Ingeniero mecánico es de aproximadamente 40 años.

- Materias de especialización 16
- Materia relacionada: Resistencia de Materiales, aporte del 20%. De donde análisis estructural representa un 10%
- El factor de mejora de conocimientos va a estar dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{15} \times 0.1 \times 0.2 \times 100 = 0.13\%$$

El sueldo promedio de un Ingeniero Mecánico en toda su vida laboral es de aproximadamente 2500 USD, de donde:

$$40 \text{ vida útil} \times 12 \times 2500 = 1200000 \text{ USD}$$

$$1200000 \times 0.13 = 156000 \text{ USD} \quad (\text{Mejora por ingeniero})$$

$$156000 \times 60 \text{ número egresados} \times 10 \text{ vida útil} = 93600000 \text{ USD} \quad (\text{Mejora por egresados})$$

### 6.2.1.3. BENEFICIO DE LA ESPE

- Número de Carreras, 10
- Ingeniería Mecánica, con un factor de mejora de 0.13, de donde:

$$\frac{1}{10} \times 0.13 = 0.013\% \quad (\text{Factor de Mejora})$$

- Presupuesto de la ESPE al año de aproximadamente 40 000 000 USD

$$0.00013 \times 40000000 = 5200 \text{ USD} \quad (\text{Mejora de la Espe al año})$$

Costo:

- Profesor,  $\frac{9 \text{ USD}}{1h} \times 80 \text{ h año} = 720 \text{ USD}$
- Uso de equipo,  $\frac{10 \text{ USD}}{1h} \times 80 \text{ h año} = 800 \text{ USD}$
- Mantenimiento, 1000 USD
- Uso de equipos, 1000 USD

*Costo Total = 3520 USD*

### 6.2.1.4. BENEFICIO DE LA ESPE EN LOS PRÓXIMOS 10 AÑOS

- De los 10 años de beneficio solo son aprovechables 6 años, esto es debido que la utilidad que da el equipo es a partir del cuarto nivel de estudio, de donde:

$$\frac{93600000 \text{ USD}}{40 \text{ años vida útil}} \times 6 \text{ años} = 14040000 \text{ USD}$$

$$5200 \text{ USD} \times 6 \text{ años} = 31200 \text{ USD}$$

$$\textit{Beneficio Total} = 14040000 + 31200$$

$$\textit{Beneficio Total} = 14071200 \textit{ USD}$$

Costos:

- Proyecto, 8473 USD
- Costos anuales, 3520 USD
- Vida útil, 10 años

$$\textit{Costo Total} = 8473 + (3520 \times 10) = 43673 \textit{ USD}$$

De donde,

$$\frac{\textit{Beneficio}}{\textit{Costo}} = \frac{\textit{Beneficio Total}}{\textit{CostoTotal}} = \frac{14071200}{43673}$$

$$\frac{\textit{Beneficio}}{\textit{Costo}} = 322.19$$

La relación Beneficio-Costo, de este tipo de proyectos está sobre el 100%, lo que indica que el proyecto es beneficioso tanto para los ejecutores, alumnos como para la institución.

## **CAPÍTULO VII**

### **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **CONCLUSIONES**

1. Los resultados de las pruebas prácticas realizadas tanto a la armadura como al pórtico muestran que existen errores con porcentajes bajos, alrededor del 5 %, lo que indica un diseño adecuado y un proceso de construcción preciso en las estructuras.
2. Los resultados obtenidos de las pruebas prácticas, permiten garantizar la veracidad y el correcto uso del programa utilizado para análisis estructural RISA-2D. De esta manera es posible hacer una comparación entre la teoría y la práctica, consolidando los conocimientos adquiridos.
3. El correcto proceso de fabricación y montaje, permite establecer un comportamiento adecuado del material con el cual están hechas las estructuras al momento de aplicar cargas externas sobre las mismas, evitando de esta manera un cambio en sus propiedades mecánicas.
4. Para la selección del material utilizado en la construcción es necesario que el diseño se ajuste a lo que existe en el mercado local.
5. En el análisis de los apoyos las condiciones de diseño se muestran dentro del límite elástico, lo que permite obtener resultados correctos y estables mediante el uso de las galgas extensiométricas.

6. La fabricación de los porta pesas como la de las pesas debe cumplir con las normas de fabricación requeridas, esto permite que el peso se distribuya uniformemente a lo largo de la línea de acción y se pueda obtener resultados correctos en las pruebas.

## **RECOMENDACIONES**

1. Para obtener errores bajos en la realización de las pruebas tanto de la armadura como del pórtico, es conveniente que el proceso de construcción se lo lleve a cabo con instrumentos de precisión y además tener en cuenta que en el proceso se conserve las propiedades de los elementos.
2. En la utilización del programa de análisis estructural RISA, es conveniente que se ingrese correctamente todas y cada una de las propiedades del material como de la sección del elemento para que los resultados sean correctos.
3. En las uniones soldadas es necesario que se conozca y se ejecute de manera correcta los procesos de soldadura, de esta forma no se afectan las propiedades de los elementos que conforman la estructura.
4. Para la selección del material es necesario tomar en cuenta su aplicación, en éste caso para la armadura era necesario un material menos resistente con el fin de obtener deformaciones que sean factibles de ser cuantificables en la práctica, el aluminio fue el más adecuado para éstas condiciones.
5. En el diseño de los apoyos es conveniente que las galgas extensiométricas se las ubique lo más lejos posible de la aplicación de una carga para obtener lecturas claramente apreciables.



6. Para la realización de las pruebas es necesario que se tenga cuidado el momento de ubicar las pesas sobre los porta pesas, esto va a permitir que tanto la armadura como el pórtico no se desestabilicen y se evite obtener resultados erróneos.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- **MCCORMAC Nelson, ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS**, Editorial Alfaomega, Segunda Edición, México 2005.
- **MERIAM J.L, ESTÁTICA, Editorial Reverté S.A.**, Segunda Edición, Barcelona 1976.
- **RILEY William, MECÁNICA DE MATERIALES**, Editorial Limusa S.A, Primera Edición, 2001.
- **SHIGLEY Joseph, DISEÑO EN INGENIERÍA MECÁNICA**, Editorial McGraw-Hill, Quinta Edición, México 1990.
- **NORTON Robert, DISEÑO DE MÁQUINARIA**, Editorial McGraw-Hill, Segunda Edición, México 2000.
- **SMITH Willam, FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES**, Editorial McGraw-Hill, Tercera Edición, 1998.
- **LARBURU Nicolás, MÁQUINAS PRONTUARIO**, Editorial Paraninfo, Décima Edición, Madrid 1998
- **NAYLER J.L, DICCIONARIO DE INGENIERÍA MECÁNICA**, Editorial Grijalbo, Segunda Edición, Barcelona 1987.

- **INEN, DIBUJO TÉCNICO MECÁNICO**, Serie: Normalización, Número: 009, Quito Ecuador 1989.
- **ELOUSA Marcelino, DIRECCIÓN DE EMPRESAS PEQUEÑAS Y MEDIANAS DEL SIGLO XXI**, Segunda Edición, España 2001.

## **ANEXOS**