

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PÓRTICO DEL VIBRÓFORO DE BAJA FRECUENCIA DEL LRM Y VERIFICACIÓN UTILIZANDO UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS”

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

**KEYVAN RAHMANI NAZARI
LUIS ALBERTO VÁSCONEZ BALDA**

**DIRECTOR: ING. JOSÉ PÉREZ
CODIRECTOR: ING. LUIS ECHEVERRÍA**

Sangolquí, 2005-06-03

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PÓRTICO DEL VIBRÓFORO DE BAJA FRECUENCIA DEL LRM Y VERIFICACIÓN UTILIZANDO UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS” fue realizado en su totalidad por los Srs. KEYVAN RAHMANI NAZARI y LUIS ALBERTO VÁSCONEZ BALDA, como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingenieros Mecánicos.

**Ing. José Pérez.
DIRECTOR DE TESIS**

**Ing. Luis Echeverría.
CODIRECTOR DE TESIS**

Sangolquí, 2005-06-03

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PÓRTICO DEL VIBRÓFORO DE BAJA
FRECUENCIA DEL LRM Y VERIFICACIÓN UTILIZANDO UN SISTEMA DE
ADQUISICIÓN DE DATOS”

ELABORADO POR:

Keyvan Rahmani Nazari

Luis Alberto Vásquez Balda

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

Mayo. Ing. Hugo Ruiz

Sangolquí, 2005-06-09

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mis padres, por haber sembrado en mí el carácter y los valores que me hacen ser quien soy.

Keyvan Rahmani Nazari

Este trabajo está dedicado a mis padres y a mis hermanas, pilares fundamentales para el logro de esta meta.

Luis Alberto Vásquez Balda

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por el apoyo en mi decisión de formarme como ingeniero mecánico, a la Escuela Politécnica del Ejército por acogerme en ese objetivo, a mis amigos por el tiempo vivido, a mis compañeros por las experiencias y a todos los profesores por compartir sin egoísmo sus conocimientos.

Keyvan Rahmani Nazari

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional, a mis hermanas, a toda mi familia por el ejemplo y a mis amigos por su ayuda. Agradezco además a Dios por darme la fuerza para terminar esta difícil tarea, y a la Escuela Politécnica del Ejército por formarme. “Gracias a los forajidos por sus valiosas enseñanzas.”

Luis Alberto Vásconez Balda

INDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|----------|
| CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO..... | ii |
| LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO..... | iii |
| DEDICATORIA..... | iv |
| AGRADECIMIENTOS..... | v |
| INDICE DE CONTENIDOS..... | vi |
| TABLAS..... | xii |
| CUADROS..... | xiii |
| FIGURAS..... | xiv |
| NOMENCLATURA..... | xxi |
| ANEXOS..... | xxiv |
| RESUMEN..... | xxv |
| CAPÍTULO 1: GENERALIDADES..... | 1 |
| 1.1 ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA..... | 1 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN..... | 2 |
| 1.4 OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.4.1 OBJETIVO GENERAL..... | 4 |
| 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 4 |
| 1.5 ALCANCE..... | 5 |
| CAPÍTULO 2: FUNDAMENTO TEÓRICO..... | 7 |
| 2.1 GENERALIDADES, DEFINICIÓN E IMPORTANCIA DE LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS..... | 7 |
| 2.1.1 MARCOS RÍGIDOS O PÓRTICOS RÍGIDOS..... | 9 |
| 2.1.1.1 Nudo..... | 9 |
| 2.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PÓRTICOS..... | 12 |
| 2.1.3 CLASIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS..... | 14 |
| 2.1.3.1 Estructuras de cascarón..... | 14 |
| 2.1.3.2 Estructuras reticulares..... | 15 |
| 2.1.3.2.1 Armaduras..... | 15 |
| 2.1.4 MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS..... | 15 |
| 2.1.4.1 Bastidor y sus accesorios..... | 16 |

| | |
|---|----|
| 2.1.4.1.1 Elementos estructurales..... | 16 |
| 2.1.4.1.2 Elementos de unión | 17 |
| 2.1.4.2 Cimentación | 19 |
| 2.1.5 CARGAS | 21 |
| 2.1.5.1 Cargas fijas | 21 |
| 2.1.5.2 Cargas vivas | 22 |
| 2.1.5.3 Códigos de diseño | 24 |
| 2.2 GENERALIDADES, DEFINICIÓN Y USOS DE LAS ROSETAS DE DEFORMACIÓN..... | 26 |
| 2.2.1 INTRODUCCIÓN..... | 26 |
| 2.2.2 ESFUERZO Y DEFORMACIÓN UNITARIA | 28 |
| 2.2.3 DEFINICIÓN Y TIPOS DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS..... | 29 |
| 2.2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS | 30 |
| 2.2.4.1 Galgas metálicas..... | 30 |
| 2.2.4.2 Galgas biaxiales o rosetas | 31 |
| 2.2.5 RELACIONES MATEMÁTICAS DE LOS EXTENSIÓMETROS ELÉCTRICOS..... | 32 |
| 2.2.6 CIRCUITOS ACONDICIONADORES PARA GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS (TRANSDUCTORES PASIVOS)..... | 36 |
| 2.2.6.1 Circuito de medida por puente de wheastone..... | 36 |
| 2.2.6.1.1 Circuito en puente completo..... | 38 |
| 2.2.6.1.2 Circuito en medio puente | 39 |
| 2.2.6.1.3 Circuito en cuarto de puente | 39 |
| 2.2.7 LÍMITES DE UTILIZACIÓN DE UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA..... | 40 |
| 2.2.8 MEDICIÓN EN GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS..... | 40 |
| 2.2.9 INSTALACIÓN DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS..... | 46 |
| 2.2.9.1 Preparación de la superficie..... | 46 |
| 2.2.9.2 Fijación de la galga | 48 |
| 2.2.9.3 Soldadura de los terminales de la galga | 49 |
| 2.2.9.4 Aplicación de la capa protectora | 51 |
| 2.3 SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 51 |
| 2.3.1 INTRODUCCIÓN..... | 51 |
| 2.3.2 SEÑALES EN EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS | 53 |
| 2.3.3 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL..... | 55 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3.4 CONVERSIÓN ANALOGO-DIGITAL EN SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 56 |
| 2.3.5 TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS | 59 |
| 2.4 SOFTWARE..... | 63 |
| 2.4.1 GENERALIDADES..... | 63 |
| 2.4.1.1 Método de los elementos finitos | 64 |
| 2.4.2 IMPORTANCIA DE LA TECNOLOGÍA INFORMÁTICA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL..... | 65 |
| 2.4.3 DEFINICIÓN | 65 |
| 2.4.4 DISPONIBILIDAD | 65 |
| 2.4.5 SELECCIÓN DEL SOFTWARE A UTILIZARSE | 71 |
| 2.4.6 PROSESAMIENTO DE DATOS..... | 72 |
| 2.4.6.1 Procesamiento de datos “teóricos” | 72 |
| 2.4.6.2 Procesamiento de datos “reales” | 73 |
| CAPÍTULO 3: ANÁLISIS ESTRUCTURAL | 75 |
| 3.1 ANÁLISIS DEL PÓRTICO UTILIZANDO EL SOFTWARE ADECUADO..... | 75 |
| 3.1.1 CÁLCULO DE CARGAS | 76 |
| 3.1.2 CÁLCULO DE ESFUERZOS | 83 |
| 3.1.3 CALCULO DE DEFLEXIONES. | 90 |
| 3.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ACCESORIOS | 93 |
| 3.2.1 INTRODUCCIÓN | 93 |
| 3.2.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ACCESORIO 1 | 94 |
| 3.2.2.1 Diseño cinemático | 94 |
| 3.2.2.2 Diseño mecánico | 95 |
| 3.2.2.3 Construcción..... | 102 |
| 3.2.2.4 Diagrama de proceso | 103 |
| 3.2.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ACCESORIO 2 | 104 |
| 3.2.3.1 Diseño cinemático | 104 |
| 3.2.3.2 Diseño mecánico | 105 |
| 3.2.3.3 Construcción..... | 107 |
| 3.2.3.4 Diagrama de proceso | 109 |
| 3.2.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ACCESORIO 3 | 110 |
| 3.2.4.1 Diseño cinemático | 110 |
| 3.2.4.2 Diseño mecánico | 111 |

| | |
|--|------------|
| 3.2.4.3 Construcción | 113 |
| 3.2.4.4 Diagrama de proceso..... | 115 |
| 3.2.5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ACCESORIO 4 | 116 |
| 3.2.5.1 Diseño cinemático..... | 116 |
| 3.2.5.2 Diseño mecánico..... | 117 |
| 3.2.5.3 Construcción | 119 |
| 3.2.5.4 Diagrama de proceso..... | 121 |
| 3.3 MODIFICACIONES AL PÓRTICO SELECCIONADO | 122 |
| 3.3.1 INTRODUCCIÓN..... | 122 |
| 3.3.2 SIMULACIÓN DEL CONJUNTO ACCESORIOS - PÓRTICO | 122 |
| 3.3.2.1 Simulación cinemática | 122 |
| 3.3.2.2 Simulación mecánica | 127 |
| 3.3.3 ENSAMBLAJE FINAL..... | 130 |
| 3.4 ANÁLISIS Y UBICACIÓN DE LAS ROSETAS DE DEFORMACIÓN..... | 132 |
| 3.4.1 ANÁLISIS Y UBICACIÓN DE LAS ROSETAS DE DEFORMACIÓN EN SOLID WORKS | 132 |
| 3.4.2 UBICACIÓN DE LAS ROSETAS DE DEFORMACIÓN | 138 |
| CAPÍTULO 4: SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS | 143 |
| 4.1 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS..... | 143 |
| 4.1.1 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS..... | 143 |
| 4.1.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS | 152 |
| 4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SELECCIONADO | 154 |
| 4.2.1 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL..... | 154 |
| 4.2.2 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 156 |
| 4.3 SOFTWARE PARA ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS | 165 |
| 4.3.1 PRESENTACIÓN Y ESTRUCTURA DEL SOFTWARE | 165 |
| 4.3.2 ADQUISICIÓN DE DATOS Y CÁLCULOS GENERALES | 167 |
| 4.3.3 CÁLCULOS | 179 |
| 4.3.3.1 Análisis con Cosmos Works..... | 179 |
| 4.3.3.2 Análisis con SAP | 182 |
| 4.3.3.2.1 Importar archivos y obtener datos del SAP | 182 |
| 4.3.3.2.2 Análisis, comparación y resultados | 189 |
| 4.3.4 RESETEO DE TODAS LAS VARIABLES..... | 194 |
| 4.3.5 GENERACIÓN DE INFORME | 196 |

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO 5: PRUEBAS | 199 |
| 5.1 PLAN DE PRUEBAS..... | 199 |
| 5.1.1 DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS DE PRUEBA Y RANGO DE UTILIZACIÓN..... | 200 |
| 5.1.2 DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DE TRANSFORMACIÓN | 201 |
| 5.1.3 CÁLCULOS PREVIOS EN SAP2000 Y COSMOS WORKS | 202 |
| 5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 206 |
| CAPÍTULO 6: APLICACIÓN A OTROS SISTEMAS | 219 |
| 6.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS | 219 |
| 6.1.1 INTRODUCCIÓN | 219 |
| 6.1.2 VENTAJAS..... | 220 |
| 6.1.3 DESVENTAJAS | 222 |
| 6.2 LIMITACIONES A ESTRUCTURAS DE GRAN TAMAÑO | 222 |
| 6.3 COMPARACIÓN CON OTROS SISTEMAS SEMEJANTES..... | 224 |
| 6.3.1 INTRODUCCIÓN | 224 |
| 6.3.2 SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA | 225 |
| 6.3.3 SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN..... | 227 |
| 6.3.4 MEDIDORES LÁSER DE DESPLAZAMIENTO Y VELOCIDAD | 228 |
| 6.4 APLICACIÓN DEL SISTEMA A UNA NAVE INDUSTRIAL | 232 |
| 6.4.1 INTRODUCCIÓN..... | 232 |
| 6.4.2 REDISEÑO DE LA ESTRUCTURA..... | 232 |
| 6.4.3 VERIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA | 239 |
| CAPÍTULO 7: ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO | 247 |
| 7.1 ANÁLISIS ECONOMICO..... | 247 |
| 7.1.1 DISEÑO Y ADMINISTRACIÓN | 247 |
| 7.1.1.1 Personal | 247 |
| 7.1.1.2 Misceláneos..... | 248 |
| 7.1.2 COSTOS DIRECTOS..... | 249 |
| 7.1.2.1 Honorarios profesionales..... | 249 |
| 7.1.2.2 Honorarios a no profesionales..... | 249 |
| 7.1.2.3 Materia prima y adquisición de equipos..... | 250 |
| 7.1.3 FINANCIAMIENTO | 251 |
| 7.2 ANÁLISIS FINANCIERO | 252 |
| CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 255 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 8.1 CONCLUSIONES..... | 255 |
| 8.2 RECOMENDACIONES..... | 257 |

TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 2.1 Definición de Perfiles Existentes en el pórtico..... | 17 |
| Tabla 2.2 Características de pernos existentes en el pórtico. | 18 |
| Tabla 2.3 Tipos de sistemas de anclaje existentes en el pórtico..... | 20 |
| Tabla 2.4 Características de galgas extensiométricas | 28 |
| Tabla 2.5 Tipos de extensiómetros eléctricos | 30 |
| Tabla 2.6 Tipos de adhesivos utilizados y características..... | 51 |
| Tabla 3.1 Interacción de la fuerza | 78 |
| Tabla 3.2 Resumen de los esfuerzos existentes en el pórtico. | 89 |
| Tabla 3.3 Deflexiones de cada uno de los nodos..... | 91 |
| Tabla 3.4 Matriz de decisión para el mecanismo de giro ideal..... | 93 |
| Tabla 4.1 Características de la tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS | 149 |
| Tabla 4.2 Matriz de decisión para escoger el sistema de adquisición..... | 153 |
| Tabla 5.1 Resumen de mediciones de voltaje y deformación | 201 |
| Tabla 5.2 Resumen de esfuerzos calculados | 206 |
| Tabla 6.1 Comparación entre sistemas hallados y desarrollado en el LRM.... | 231 |
| Tabla 6.2 Tabla de codificación de las secciones. | 244 |
| Tabla 7.1 Costo del personal por diseño y plantación..... | 247 |
| Tabla 7.2 Costos por varios conceptos (misceláneos)..... | 248 |
| Tabla 7.3 Costos por varios conceptos 2 (misceláneos)..... | 248 |
| Tabla 7.4 Costos totales de diseño y administración. | 249 |
| Tabla 7.5 Honorarios Profesionales..... | 249 |
| Tabla 7.6 Honorarios de No Profesionales. | 250 |
| Tabla 7.7 Materia prima y equipos adquiridos..... | 250 |
| Tabla 7.8 Costos directos totales..... | 251 |
| Tabla 7.9 Costos totales. | 251 |
| Tabla 7.10 Recursos de financiamiento. | 251 |
| Tabla 7.11 Personas y entidades de financiamiento..... | 252 |
| Tabla 7.12 Balance general del proyecto..... | 252 |
| Tabla 7.13 Cálculo del valor interno de retorno..... | 253 |

CUADROS

| | |
|---|-----|
| Cuadro 5.1 Datos de esfuerzos necesarios para cálculo en SAP 500Kg | 204 |
| Cuadro 5.2 Datos de esfuerzos necesarios para cálculo en SAP 1000Kg | 204 |
| Cuadro 5.3 Datos de esfuerzos necesarios para cálculo en SAP 1500Kg | 205 |
| Cuadro 5.4 Datos de esfuerzos necesarios para cálculo en SAP 2000Kg | 205 |
| Cuadro 5.5 Datos de esfuerzos necesarios para cálculo en SAP 2500Kg | 206 |
| Cuadro 5.6 Informe 1 del ensayo con 4Kg en la probeta..... | 207 |
| Cuadro 5.7 Informe 2 del ensayo con 4Kg en la probeta..... | 207 |
| Cuadro 5.8 Informe 1 del ensayo con 500Kg en el pórtico | 208 |
| Cuadro 5.9 Informe 2 del ensayo con 500Kg en el pórtico | 209 |
| Cuadro 5.10 Informe 1 del ensayo con 1000Kg en el pórtico | 210 |
| Cuadro 5.11 Informe 2 del ensayo con 1000Kg en el pórtico..... | 211 |
| Cuadro 5.12 Informe 1 del ensayo con 1500Kg en el pórtico | 212 |
| Cuadro 5.13 Informe 2 del ensayo con 1500Kg en el pórtico..... | 213 |
| Cuadro 5.14 Informe 1 del ensayo con 2000Kg en el pórtico | 214 |
| Cuadro 5.15 Informe 2 del ensayo con 2000Kg en el pórtico..... | 215 |
| Cuadro 5.16 Informe 1 del ensayo con 2500Kg en el pórtico | 216 |
| Cuadro 5.17 Informe 2 del ensayo con 2500Kg en el pórtico..... | 217 |

FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Junta Soldada ----- | 10 |
| Figura 2.2 Junta Empernada ----- | 10 |
| Figura 2.3 Pórticos Rígidos----- | 11 |
| Figura 2.4 Pórtico Metálico Empotrado ----- | 12 |
| Figura 2.5 Pórtico Metálico Articulado ----- | 13 |
| Figura 2.6 Pórtico Metálico de alma llena ----- | 13 |
| Figura 2.7 Pórtico Metálico de miembros armados ----- | 14 |
| Figura 2.8 Carga muerta en función del tiempo ----- | 22 |
| Figura 2.9 Carga viva en fusión del tiempo ----- | 23 |
| Figura 2.10 Tipos de esfuerzos----- | 28 |
| Figura 2.11 Esquema de rosetas----- | 32 |
| Figura 2.12 Puente de Wheastone ----- | 37 |
| Figura 2.13 Circuito de puente completo ----- | 38 |
| Figura 2.14 Circuito de medio puente----- | 39 |
| Figura 2.15 Circuito de cuarto de puente----- | 40 |
| Figura 2.16 Circuito en puente de Wheaston completo ----- | 41 |
| Figura 2.17 Disposición de galgas que minimiza la sensibilidad ----- | 43 |
| Figura 2.18 Puente con dos resistencias variables ----- | 43 |
| Figura 2.19 Galgas a tracción y compresión ----- | 43 |
| Figura 2.20 Puente con cuatro resistencias variables----- | 44 |
| Figura 2.21 Problema de medición debida a distanciamiento del circuito ----- | 45 |
| Figura 2.22 Corrección de medición debida a distanciamiento del circuito ----- | 45 |
| Figura 2.23 Limpieza de la superficie ----- | 46 |
| Figura 2.24 Pulido de la superficie----- | 46 |
| Figura 2.25 Marcación del punto donde se pegará la galga----- | 47 |
| Figura 2.26 Preparación posterior al marcado de superficie----- | 47 |
| Figura 2.27 preparación de la galga----- | 48 |
| Figura 2.28 Colocación de cinta adhesiva en los conectores y galga ----- | 48 |
| Figura 2.29 Colocación de adhesivo ----- | 49 |
| Figura 2.30 Aplicación de presión----- | 49 |
| Figura 2.31 Tratamiento de los conductores posterior al pegado ----- | 50 |
| Figura 2.32 Colocación de los terminales ----- | 50 |

| | |
|---|-----|
| Figura 2.33 Soldado de terminales | 50 |
| Figura 2.34 Aplicación de silicona | 51 |
| Figura 2.35 Proceso de adquisición de datos | 52 |
| Figura 2.36 Señal digital | 54 |
| Figura 2.37 Señal analógica..... | 55 |
| Figura 2.38 Señal muestreada..... | 57 |
| Figura 2.39 Señal cuantizada | 58 |
| Figura 2.40 Tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS | 62 |
| Figura 2.41 Panel frontal | 70 |
| Figura 2.42 Diagrama de bloques..... | 70 |
| Figura 3.1 Análisis Cinemático del pórtico modificado. | 77 |
| Figura 3.2 Introducción de las componentes de la fuerza en SAP200 | 79 |
| Figura 3.3 Intensidad y posición de la carga con 10000Kg. | 80 |
| Figura 3.4 Valores de demanda- capacidad. | 81 |
| Figura 3.5 Valores de demanda- capacidad para 4000 Kg..... | 82 |
| Figura 3.6 Factores demanda-capacidad para cada punto de la columna. | 83 |
| Figura 3.7 Tabla de resultados para columna No 1..... | 84 |
| Figura 3.8 Modificación del coeficiente de longitud. | 85 |
| Figura 3.9 Deflexión producida en el pórtico con 4000 Kg. | 90 |
| Figura 3.10 Numeración de los nodos dentro del pórtico del vibróforo. | 92 |
| Figura 3.11 Deflexión producida en el pórtico con 4000 Kg., calculada en Solid Works..... | 92 |
| Figura 3.12 Modelación en AutoCad del accesorio 1..... | 94 |
| Figura 3.13 Exportando desde el AutoCad el accesorio 1 | 96 |
| Figura 3.14 Abriendo el archivo ACIS en el SolidWorks del accesorio 1 | 96 |
| Figura 3.15 Desactivando las supresiones del ensamblaje del accesorio 1 | 97 |
| Figura 3.16 Detección de interferencias del accesorio 1 | 97 |
| Figura 3.17 Definición del análisis del accesorio 1..... | 98 |
| Figura 3.18 Selección del material del accesorio 1 | 98 |
| Figura 3.19 Preferencias del mallado del accesorio 1..... | 99 |
| Figura 3.20 Cargas y restricciones en Cosmos del accesorio 1 | 100 |
| Figura 3.21 Resultados del esfuerzo de Von Misses en el accesorio 1 | 100 |
| Figura 3.22 Lugar del esfuerzo de Von Misses máximo en el accesorio 1 | 101 |
| Figura 3.23 Resultados de deformación unitaria equivalente en accesorio 1 | 101 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.24 Fotografía del accesorio 1 | 102 |
| Figura 3.25 Modelación en AutoCad del accesorio 2..... | 104 |
| Figura 3.26 Cargas y restricciones en Cosmos del accesorio 2 | 105 |
| Figura 3.27 Resultados del esfuerzo de Von Misses en el accesorio 2 | 106 |
| Figura 3.28 Lugar del esfuerzo de Von Misses máximo en el accesorio 2---- | 106 |
| Figura 3.29 Resultados de deformación unitaria equivalente en accesorio 2 | 107 |
| Figura 3.30 Fotografía del accesorio 2 | 107 |
| Figura 3.31 Modelación en AutoCad del accesorio 3..... | 110 |
| Figura 3.32 Cargas y restricciones en Cosmos del accesorio 3 | 111 |
| Figura 3.33 Resultados del esfuerzo de Von Misses en el accesorio 3..... | 112 |
| Figura 3.34 Lugar del esfuerzo de Von Misses máximo en el accesorio 3---- | 112 |
| Figura 3.35 Resultados de deformación unitaria equivalente en accesorio 3 | 113 |
| Figura 3.36 Lugar del desplazamiento máximo en el accesorio 3..... | 113 |
| Figura 3.37 Fotografía del accesorio 3 | 114 |
| Figura 3.38 Modelación en AutoCad del accesorio 4..... | 116 |
| Figura 3.39 Cargas y restricciones en Cosmos del accesorio 4 | 117 |
| Figura 3.40 Resultados del esfuerzo de Von Misses en el accesorio 4..... | 118 |
| Figura 3.41 Lugar del esfuerzo Von Misses máximo y placas del accesorio 4 | 118 |
| Figura 3.42 Resultados de deformación unitaria equivalente en accesorio 4 | 119 |
| Figura 3.43 Deformación unitaria en las placas rigidizadoras en accesorio 4 | 119 |
| Figura 3.44 Fotografía del accesorio 4 | 120 |
| Figura 3.45 Modelación en AutoCad del pórtico en posición vertical 0° | 123 |
| Figura 3.46 Modelación en AutoCad del inicio del cambio..... | 124 |
| Figura 3.47 Modelación en AutoCad de la nueva posición vertical 0°..... | 124 |
| Figura 3.48 Modelación en AutoCad del giro (0°) | 125 |
| Figura 3.49 Modelación en AutoCad del giro (15°) | 125 |
| Figura 3.50 Modelación en AutoCad asentamiento del cilindro en accesorio 4 | 126 |
| Figura 3.51 Modelación en AutoCad del pórtico en posición girada 15°..... | 127 |
| Figura 3.52 Cargas y restricciones en Cosmos del pórtico | 128 |
| Figura 3.53 Resultados del esfuerzo de Von Misses en el pórtico | 129 |
| Figura 3.54 Lugar del esfuerzo de Von Misses máximo en el pórtico | 129 |
| Figura 3.55 Pórtico modificado visto de frente | 130 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.56 Los accesorios sostienen al cilindro óleo-hidráulico en su nueva posición | 131 |
| Figura 3.57 El cilindro girado 15° asienta perfectamente sobre accesorio 4-- | 131 |
| Figura 3.58 Estado de esfuerzos para el pórtico del vibróforo con 4000Kg. -- | 133 |
| Figura 3.59 Deformaciones unitarias con 4000Kg. | 133 |
| Figura 3.60 Codificación de los elementos..... | 134 |
| Figura 3.61 Punto A elemento C1 (Esfuerzo máximo). | 135 |
| Figura 3.62 Punto B elemento C2. | 135 |
| Figura 3.63 Punto C elemento V1. | 136 |
| Figura 3.64 Punto D elemento V2. | 136 |
| Figura 3.65 Punto E elemento V2. | 137 |
| Figura 3.66 Limpieza de la sección en donde se colocara la roseta. | 138 |
| Figura 3.67 Colocación del acondicionador. | 139 |
| Figura 3.68 Aplicación del neutralizador. | 139 |
| Figura 3.69 Preparación antes del pegado 1. | 140 |
| Figura 3.70 Preparación antes del pegado 2. | 140 |
| Figura 3.71 Fijación de la roseta con la cinta adhesiva. | 141 |
| Figura 3.72 Pegado de la roseta..... | 141 |
| Figura 3.73 Fijación de la roseta con ayuda de un borrador. | 142 |
| Figura 3.74 Colocación de capa de silicona y soldado de cables. | 142 |
| Figura 4.1 PLC..... | 144 |
| Figura 4.2 PLC modular | 145 |
| Figura 4.3 Transmisión de datos para PLC's compactos. | 146 |
| Figura 4.4 Medidor de deformaciones unitarias..... | 147 |
| Figura 4.5 Tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS..... | 148 |
| Figura 4.6 Configuración medio puente del DMD 20 A. | 155 |
| Figura 4.7 Circuito electrónico DMD 20 A. | 155 |
| Figura 4.8 Posición de los conectores en la tarjeta de adquisición de datos. | 157 |
| Figura 4.9 Codificación de los conectores en la tarjeta de adquisición de datos. | 158 |
| Figura 4.10 Error debido a la suma de la ganancia y la compensación para una escala de 10V. | 159 |
| Figura 4.11 Diagramas de bloques de la tarjeta de adquisición de datos ---- | 159 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.12 Diagramas de bloques total del sistema de adquisición de datos. ----- | 160 |
| Figura 4.13 Diagrama de la tarjeta de relés con sus componentes ----- | 161 |
| Figura 4.14 Circuito Eléctrico interno del dispositivo de adquisición de datos. ----- | 162 |
| Figura 4.15 Dispositivo de adquisición de datos y selección automática de galgas----- | 163 |
| Figura 4.16 Dispositivo de adquisición de datos y selección automática de galgas conectado ----- | 164 |
| Figura 4.17 Sistema completo conectado----- | 164 |
| Figura 4.18 Tabulaciones, botón salir del programa y fecha ----- | 166 |
| Figura 4.19 Presentación del software de adquisición de datos ----- | 166 |
| Figura 4.20 Ventana de adquisición de datos----- | 167 |
| Figura 4.21 Seteo de banderas y animación del botón de encerado ----- | 168 |
| Figura 4.22 Configuración de las salidas digitales ----- | 169 |
| Figura 4.23 Encendido de salidas digitales ----- | 169 |
| Figura 4.24 Generación de arreglo para señal análoga ----- | 170 |
| Figura 4.25 Selección de la galga a medir----- | 170 |
| Figura 4.26 Toma de datos análogos y transformación a valores numéricos reconocibles----- | 171 |
| Figura 4.27 Interferencia producida por los relays, la señal luego se estabiliza ----- | 171 |
| Figura 4.28 Eliminación de los 100 primeros datos del arreglo Voltaje ----- | 172 |
| Figura 4.29 Creación del arreglo con deformaciones unitarias iniciales ----- | 172 |
| Figura 4.30 Apagado del relay correspondiente a la galga medida ----- | 173 |
| Figura 4.31 Final del proceso de encerado ----- | 173 |
| Figura 4.32 Llenado del arreglo con la diferencia de deformaciones unitarias iniciales y finales ----- | 174 |
| Figura 4.33 Gráficas de interpolación ----- | 174 |
| Figura 4.34 Ecuación de transformación de voltaje a deformación unitaria--- | 175 |
| Figura 4.35 Creación de las variables necesarias para la formación de las matrices ----- | 176 |
| Figura 4.36 Creación de las cuatro matrices y obtención de los determinantes ----- | 177 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.37 Obtención de las soluciones----- | 178 |
| Figura 4.38 Calculo de los esfuerzos x, y y cortante xy----- | 178 |
| Figura 4.39 Ventana para el análisis y comparación de datos del CosmosWorks ----- | 179 |
| Figura 4.40 Cálculo de los esfuerzos principales en dos dimensiones----- | 180 |
| Figura 4.41 Cálculo del esfuerzo equivalente e ingreso del valor de esfuerzo del Cosmos ----- | 180 |
| Figura 4.42 Comparación de esfuerzos práctico y teórico ----- | 181 |
| Figura 4.43 Cálculo del error porcentual ----- | 181 |
| Figura 4.44 Comparación del error y el límite permisible----- | 182 |
| Figura 4.45 Presentación en pantalla de los archivos importados ----- | 183 |
| Figura 4.46 Algoritmo para importar los documentos desde SAP----- | 184 |
| Figura 4.47 Algoritmo para escaneo del documento del SAP con las fuerzas de la sección ----- | 185 |
| Figura 4.48 Algoritmo para escaneo del documento del SAP con el Tipo de Sección----- | 186 |
| Figura 4.49 Algoritmo para escaneo del documento del SAP con las áreas e inercias ----- | 186 |
| Figura 4.50 Algoritmo para escaneo del documento del SAP los módulos de sección ----- | 187 |
| Figura 4.51 Algoritmo para escaneo del documento del SAP las características de la sección ----- | 187 |
| Figura 4.52 Algoritmo de presentación en pantalla del gráfico correspondiente a al tipo de sección ----- | 188 |
| Figura 4.53 Pantalla de análisis y resultados del SAP ----- | 189 |
| Figura 4.54 Ingreso de esfuerzos por el usuario ----- | 190 |
| Figura 4.55 Cálculo de las constantes de la ecuación de esfuerzos triaxiales | 190 |
| Figura 4.56 Construcción del arreglo V con la forma de la ecuación de esfuerzos triaxial ----- | 191 |
| Figura 4.57 Resolución de la ecuación por medio del Matlab Script----- | 192 |
| Figura 4.58 Extracción de los esfuerzos principales 1, 2 y 3 en variables----- | 192 |
| Figura 4.59 Resolución de la ecuación de esfuerzo equivalente en 3D ----- | 193 |
| Figura 4.60 Cálculo del error porcentual ----- | 193 |
| Figura 4.61 Animación del botón de Reseteo----- | 194 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.62 Borrado de los arreglos ----- | 194 |
| Figura 4.63 Encerado de las variables numéricas, de texto y banderas----- | 195 |
| Figura 4.64 Informe presentado en el Bloc de notas ----- | 196 |
| Figura 4.65 Concatenado de las variables de texto ----- | 197 |
| Figura 4.66 Generación del informe ----- | 197 |
| Figura 5.1 Graficas de líneas de tendencia con cero en el origen ----- | 202 |
| Figura 6.1 El sistema de instrumentación sísmica de la empresa CIRES. ---- | 226 |
| Figura 6.2 Corrosímetro con su respectivo sensor. ----- | 228 |
| Figura 6.3 Medidor láser para velocidades y desplazamientos. ----- | 229 |
| Figura 6.4 Medición en un puente por medio de LVTD's. ----- | 230 |
| Figura 6.5 Estructura a ser verificada en SAP2000. ----- | 233 |
| Figura 6.6 Cargas presentes en la estructura en estudio.----- | 234 |
| Figura 6.7 Detalle de las cargas presentes en la estructura en estudio.----- | 237 |
| Figura 6.8 Factores de longitud para una parte de la estructura en estudio. - | 238 |
| Figura 6.9 Restricciones para el paso de fuerzas. ----- | 238 |
| Figura 6.10 Posición de las cargas de prueba en la estructura metálica. ---- | 240 |
| Figura 6.11 Magnitud de las cargas de prueba en la estructura metálica. ---- | 240 |
| Figura 6.12 Valores del factor demanda-capacidad luego de aplicar la carga de prueba. ----- | 241 |
| Figura 6.13 Valor mas alto de demanda-capacidad luego de aplicar la carga de prueba (0.619). ----- | 241 |
| Figura 6.14 Ubicación del elemento critico luego de aplicar la carga de prueba. ----- | 242 |
| Figura 6.15 Deformación en el elemento crítico producida por la aplicación de la carga de prueba. ----- | 242 |
| Figura 6.16 División del elemento critico en varios segmentos. ----- | 243 |
| Figura 6.17 División en elementos finitos con su respectivo valor demanda-capacidad. ----- | 243 |
| Figura 6.18 Cambio del nombre del elemento (label) crítico.----- | 244 |
| Figura 6.19 Cambio del nombre de la sección 1.----- | 245 |
| Figura 6.20 Cambio del nombre de la sección 2 ----- | 245 |
| Figura 6.20 Creación del documento de propiedades.----- | 245 |
| Figura 6.21 Creación del documento de reacciones.----- | 246 |

NOMENCLATURA

| | |
|--------------|--|
| A | = Área del elemento. |
| A_{vx} | = Área resistente al esfuerzo cortante en eje x-x. |
| b | = Ancho del cajón. |
| bf | = Ancho recto del cajón |
| C_b | = Coeficiente de flexión |
| C_c | = Coeficiente para esfuerzo axial. |
| C_{mx} | = Coeficiente de momento en el eje x-x. |
| E | = Modulo de elasticidad. |
| F_a | = Esfuerzo axial permisible (compresión) |
| f_a | = Esfuerzo axial. |
| f_{bx} | = Esfuerzo flector en el eje x-x. |
| F_{bx} | = Esfuerzo flector permisible en el eje x-x. |
| | Factor de Euler, dividido para un coeficiente de |
| F'_{ex} | = seguridad. |
| f_{vx} | = Esfuerzo cortante en el eje x. |
| F_{vx} | = Esfuerzo cortante permisible en el eje x. |
| F_y | = Esfuerzo de fluencia |
| K | = Factor de longitud. |
| l | = Longitud del elemento. |
| $l_{c_{xx}}$ | = Longitud critica par el eje x-x. |
| L_r | = Coeficiente de longitud |
| L_t | = Longitud total del elemento |
| L_u | = Longitud arriostrada |
| M_a, M_b | = Momentos en los ejes a y b. |
| M_{xx} | = Momento en el eje x-x. |
| P | = Fuerza axial. |
| qs | = Capacidad de carga media para el suelo. |
| r_{xx} | = Radio de giro alrededor del eje x-x |
| S_{xx} | = Coeficiente de forma en la dirección x-x. |
| tf | = Espesor del cajón |
| V_x | = Fuerza cortante en el eje x. |
| σ | = Esfuerzo |

| | |
|---------------|---|
| σ_x | = Esfuerzo en el eje x |
| σ_y | = Esfuerzo en el eje y |
| F | = Fuerza |
| Δl | = Variación en la longitud |
| e | = Deformación unitaria |
| e_t | = Deformación unitaria transversal |
| e_l | = Deformación unitaria longitudinal |
| ν, μ | = Coeficiente de Poisson |
| ϵ_a | = Deformación unitaria en el eje a |
| ϵ_b | = Deformación unitaria en el eje b |
| ϵ_c | = Deformación unitaria en el eje c |
| ϵ_x | = Deformación unitaria en el eje x |
| ϵ_y | = Deformación unitaria en el eje y |
| ϵ_z | = Deformación unitaria en el eje z |
| G | = Factor de galga |
| ΔR | = Variación en la resistencia eléctrica |
| R | = Resistencia eléctrica |
| ΔA | = Diferencia de área |
| w | = Ancho |
| Δw | = Diferencia de ancho |
| t | = Espesor |
| Δt | = Diferencia de espesor |
| θ_a | = Angulo entre el eje y la roseta a |
| θ_b | = Angulo entre el eje y la roseta b |
| θ_c | = Angulo entre el eje y la roseta c |
| γ_{xy} | = Deformación por cortante |
| τ_{xy} | = Esfuerzo cortante en los ejes x - y |
| V, V1, Vx | = Voltaje |
| Vex | = Voltaje de excitación |
| ΔE | = Diferencia de potencial |
| Sc | = Sensibilidad del circuito |

fm = Frecuencia de muestreo
fs = Frecuencia máxima de trabajo

ANEXOS

ANEXO A) Planos constructivos, de detalle y conjunto del pórtico del vibróforo

ANEXO B) Hojas de resultados de SAP 2000

ANEXO C) Informes de resultados de pruebas en VibroSoft 2.0

ANEXO D) Manual de usuario de VibroSoft 2.0

ANEXO E) Manual de operación del dispositivo de adquisición de datos

RESUMEN

El desarrollo que han tenido las estructuras metálicas en el país en los últimos años es muy grande, por lo tanto el estudio de estas ha logrado gran importancia, por esta razón y ante la inexistencia en el mercado ecuatoriano de un sistema de verificación de estructuras metálicas se optó por crearlo de tal manera que cumpla con las expectativas y necesidades presentes en el país.

El sistema fue desarrollado a partir del mes de octubre del 2004 concluyéndose en el mes de mayo del 2005. En el presente trabajo de tesis se encuentra detallado el diseño e implementación de un sistema de verificación de estructuras metálicas, para esto y con el fin de realizar el análisis en una estructura real se procederá a dividir dicho trabajo en dos partes principales con el objetivo de entenderlo de mejor manera, en la primera parte se explicará y determinará la estructura en la cual se trabajará, por esta razón se procedió a realizar modificaciones al pórtico del vibróforo de baja frecuencia del laboratorio de mecánica de materiales de la Escuela Politécnica del Ejército.

Las modificaciones obedecieron a la necesidad de simular las condiciones de carga reales en estructuras metálicas, puesto que la configuración original del conjunto pórtico-vibróforo no cumplía con las expectativas, ya que el conjunto presentaba condiciones de estudio muy particulares. Por lo anterior expuesto se decidió aplicar la carga ejercida por el pistón óleo-hidráulico de manera tridimensional en un ángulo de 15° , además se desplazó el cilindro óleo-hidráulico del eje de simetría del pórtico.

Tal tarea se la pudo cumplir gracias al diseño y construcción de cinco accesorios metálicos, el diseño mecánico de los mismos fue realizado en un programa computacional llamado Cosmos Works y el análisis cinemático se lo realizó en otro programa llamado Autocad. El sistema construido es seguro y económico y puede ser usado indistintamente aplicando una inclinación de 15° al cilindro o no de acuerdo con las necesidades particulares y de acuerdo con las prácticas programadas en el laboratorio, además el cambio de posición es rápido y fácil, optimizando de esta manera el tiempo y esfuerzos para el uso de

este sistema. Debido a los cambios en las condiciones de carga originales fue necesario un análisis estructural del pórtico del vibróforo, dicho análisis se lo realizó basándonos en el código de diseño AICS-ASD89, encontrándose en dicho análisis la carga máxima de utilización del sistema.

La segunda parte del sistema de verificación de estructuras metálicas fue la implementación de un sistema de adquisición y procesamiento de datos. Este sistema consta de manera general de los siguientes elementos: sensor, dispositivo de acondicionamiento de señal, dispositivo de adquisición de datos, y programa para el procesamiento de datos. Los sensores son los dispositivos encargados de detectar el cambio de comportamiento en los elementos de cualquier estructura, dichos datos son amplificados y filtrados, de esta manera acondicionándose la señal. Posteriormente es necesario un dispositivo de adquisición de datos el para que envíe la señal hacia el computador en donde se encuentra un programa de procesamiento de datos codificado y diseñado por los ejecutores del proyecto que será el encargado de controlar el sistema, procesar, obtener y realizar los cálculos necesarios para efectuar una comparación entre los datos reales detectados por el elemento sensor y los datos teóricos calculados en dos programas computacionales SAP2000 y Solid Works, finalmente se presentará un informe en donde se encontrará el error porcentual y mas datos técnicos importantes para el análisis del comportamiento de la estructura en estudio, es importante señalar que se comprobó el buen funcionamiento de este sistema asegurando de esta manera los datos mostrados en dichos informes.

El Laboratorio de Mecánica de Materiales de La Escuela Politécnica del Ejército es en general el principal beneficiario del presente proyecto ya que debido a la implementación de este sistema dicho laboratorio incrementará su capacidad instalada permitiendo de esta manera realizar prácticas de gran valor didáctico, empresas constructoras podrán también ser beneficiadas en segundo lugar puesto que podrán disponer de un sistema para la validación de sus construcciones metálicas, automatizando la verificación y de esta manera incrementado la calidad en las mismas.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad no existe un método rápido y técnicamente sustentado con el cual se pueda validar estructuras metálicas, lo que se ha hecho hasta hoy, es colgar en las vigas de las estructuras cargas muertas, como por ejemplo, costales de cemento y medir con una regla la deflexión de la estructura en diferentes puntos y en base a su experiencia el constructor determina si los valores son o no aceptables.

Algunas de las estructuras construidas en nuestro país son realizadas en lugares remotos y de difícil acceso, esta es la razón principal por la que se torna difícil utilizar tecnología de punta para su verificación, además el factor económico prima un papel importantísimo, por lo tanto los costos de un sistema de verificación deben ser bajos y el tiempo requerido también.

La mayoría de las empresas en nuestro país las cuales construyen estructuras metálicas no poseen una herramienta para la verificación de las mismas, por lo tanto sus diseños son sobredimensionados ya que poseen una gran incertidumbre del comportamiento de la estructura ya construida. En otros casos los métodos usados son poco eficientes y por lo tanto poco confiables, dichos métodos no generan datos y sin dichos datos es imposible ponderar el estado de una estructura.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En un mundo cambiante y cada vez más competitivo las exigencias a las construcciones son cada vez más estrictas, y el significado de la calidad va cobrando cada vez más importancia, por esta razón los métodos deben evolucionar conforme al desarrollo tecnológico.

Se crea por lo tanto la necesidad de comprobar el estado de las estructuras metálicas de una manera más confiable, rápida y que pueda ser sustentada con bases técnicas, utilizando las herramientas tecnológicas existentes hoy en día.

En la construcción de puentes de estructura metálica se comprueba el buen funcionamiento de las mismas mediante la aplicación de una carga cuando el puente ya está montado. El tipo de carga aplicada es fija o móvil, y se la aplica con ayuda de camiones cargados de material de desecho obtenidos en el montaje, luego se mide la deflexión en el punto medio del puente y se la compara con los valores admisibles de acuerdo con el criterio del diseñador. El problema de este tipo de verificación es que la base técnica utilizada para la verificación es muy pobre y por lo tanto poco confiable, además la selección del elemento crítico no siempre es la correcta, y los criterios utilizados para la selección del mismo son puramente empíricos.

En construcciones en donde es difícil determinar cual o cuales son los elementos críticos, ya sea por la cantidad de los elementos o por la dificultad geométrica de la estructura se torna por lo tanto casi imposible verificar su buen funcionamiento, por esta razón se crea la necesidad de valerse de la tecnología para librar dichos obstáculos y verificar eficazmente el funcionamiento de este tipo de estructuras.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Esta tesis se plantea con el fin de comprobar en el Laboratorio de Resistencia de Materiales un procedimiento para el cual se utilizará el pórtico del vibróforo de baja frecuencia el cual será modificado para trabajar con una serie de sensores y una interfaz que transmitan datos de deflexión a un ordenador en el cual un programa computacional previamente implementado, comparará y verificará la resistencia real del pórtico con la resistencia teórica del mismo calculada en un paquete computacional comercial.

De esta manera quedará comprobado en laboratorio que este procedimiento puede ser aplicado para cualquier estructura con tan solo modificar ciertos parámetros, ayudará a la comprobación de otras que se están construyendo y a las que ya se encuentran implementadas, con el fin de encontrar posibles errores de diseño o problemas que pudieren existir con los elementos que se encuentran implicados en una estructura.

El desarrollo de este proyecto se justifica debido a que todas las empresas constructoras tienen la necesidad de comprobar el estado de sus estructuras tanto construidas como en proceso, puesto que existen muchos factores que pueden influir en la resistencia y seguridad de la estructura, por ejemplo la falta de calidad del acero, el envejecimiento de los elementos, procesos de soldadura inadecuados debidos a causas humanas o mecánicas, etc.

Muchas veces se ha conocido de casos cuyas estructuras están aparentemente bien implementadas. Lastimosamente no se toma en cuenta que la mente del hombre puede no siempre realizar cálculos correctamente por razones como el estrés, fatiga, cansancio y tantos factores que pueden poner en riesgo la buena conciencia de la persona destinada a realizar dicho trabajo.

Por esta razón, se precisa de un elemento que pueda realizar cálculos muchas veces repetitivos y que para el hombre son motivo de confusión por los muchos datos que se deben obtener y muchas veces que pueden dar lugar a cometer errores, que son supuestamente minúsculos pero pueden llegar a repercutir mucho en la realización de una estructura.

Este elemento es el mencionado, pues dentro de sus habilidades realiza la medición correcta de datos como son la deflexión etc. y encontrar los errores que se puede estar cometiendo al no tomar en cuenta variables que a la vista del hombre son imperceptibles.

Además el Laboratorio de Resistencia de Materiales se beneficiará puesto que el pórtico del vibróforo de baja frecuencia será modificado para trabajar con una interfase que transmita datos de deflexión a un ordenador, en donde se los

analizará mediante un programa computacional y donde se comparará esfuerzos reales con teóricos, esto ayuda a la modernización del laboratorio haciéndolo más eficiente y aumentando su capacidad instalada para la realización de prácticas académicas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el análisis estructural del pórtico del vibróforo de baja frecuencia del LRM y verificar utilizando un sistema de adquisición de datos.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar fundamento teórico relacionado con estructuras metálicas, rosetas de deformación, sistemas de adquisición de datos y software.
- Realizar el análisis estructural del pórtico que incluya cálculo de cargas, esfuerzos y deflexiones utilizando el software adecuado.
- Modificar el pórtico del vibróforo de baja frecuencia del LRM, para generalizar las condiciones de carga.
- Analizar y seleccionar el sistema de adquisición de datos.
- Realizar las pruebas en el pórtico seleccionado y analizar los resultados.
- Realizar las correcciones necesarias, en caso que exista errores con sus respectivas pruebas.
- Realizar un análisis económico y financiero.

1.5 ALCANCE

Para la realización del proyecto mencionado, se precisará realizar el análisis estructural exhaustivo del pórtico del vibróforo (LRM) utilizando el programa de cálculo estructural SAP2000, se realizará la instalación de un sistema mecánico el cual aplicará la carga en dos componentes una horizontal y otra vertical con el fin de generalizar las condiciones de carga que podrían presentarse en una estructura, para este caso en particular en el pórtico del vibróforo de baja frecuencia, a continuación se procederá con la codificación del programa que se encargará de la recepción y procesamiento de la señal, y la instalación del hardware que dará lugar a la interfaz computador-vibróforo.

Una vez realizadas las modificaciones e implementaciones antes propuestas, se procederá a la puesta en marcha del conjunto, en esta etapa se realizarán las pruebas pertinentes para garantizar el buen funcionamiento y la confiabilidad del mismo.

Finalmente se realizará el análisis total del pórtico y se procederá a la creación de un manual en el cual se detallará los pasos a seguir para posteriores prácticas y ensayos.

El aporte de este proyecto es muy amplio en lo que se refiere a construcción de estructuras metálicas, ayudando a las empresas constructoras a ahorrar tiempo, dinero y ayudando a detectar errores en lugares precisos y con el menor esfuerzo.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES, DEFINICIÓN E IMPORTANCIA DE LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS

El desarrollo y construcción de las estructuras es tan antiguo como la misma humanidad en la antigüedad los hombres vieron la necesidad de crear un refugio el cual les brindará confort y los acercará a las fuentes de alimento. En el principio los hombres buscaban estructuras tales como cuevas o refugios naturales pero se dieron cuenta de la necesidad de crear su propio refugio ya sea porque las condiciones naturales no satisfacían sus necesidades o por que no existía la suficiente cantidad de estas como para abastecer la necesidad de vivienda, así se comenzaron a desarrollar técnicas y métodos para la construcción de estructuras. Ahora tenemos gran variedad de estructuras y las podemos encontrar en infinidad de aplicaciones tales como casas, edificios, puentes, etc. Con la evolución de estas técnicas en el tiempo surgieron nuevos materiales los cuales mostraban mejores capacidades que la piedra y la madera, de esta manera se comenzó a usar el hierro, pero este tampoco satisfacía las necesidades y las expectativas puesto que existían grandes fallos estructurales y en respuesta a este requerimiento apareció el acero para las estructuras el cual tenía un precio competitivo y muchas bondades en relación con otros materiales constructivos, gracias a él se lograron grandes desarrollos en la rama estructural permitiendo una evolución gigantesca en los últimos 100 años.

Se define a una estructura metálica como un conjunto o combinación de cuerpos rígidos de material metálico capaces de transmitir fuerzas y soportar cargas sin que exista movimiento relativo entre estas o que dicho movimiento sea imperceptible con lo cual se lo podría considerar nulo. El tipo de material metálico usado depende del carácter de la estructura y de las necesidades así se tiene estructuras de aluminio, hierro, aleaciones especiales, pero el material mas usado por sus características es el acero y mas específicamente el acero estructural.

En el diseño de estructuras metálicas no tiene un carácter estrictamente científico realmente lo que se hace es realizar una estimación¹ con bases teóricas debidamente fundamentadas con el fin de predecir el comportamiento que tendrá la estructura, y se trata de realizar la mejor aproximación posible.

La importancia de las estructuras metálicas radica en la diversidad de formas que estas pueden tomar y la facilidad de construcción de las mismas, gracias al material del que están hechas.

El desarrollo urbano obliga a la construcción de estructuras mas grandes y cada mas seguras tanto por el crecimiento de la población como por salvar nuevos obstáculos tales como ríos, entradas de mar etc. Por esta razón el estudio las estructuras metálicas cobran en la actualidad gran importancia y no se debe tomar a la ligera.

En la actualidad el acero prima un papel protagónico como elemento estructural, tanto así que es el material predilecto para la construcción de las estructuras. La tendencia global se guía a la construcción de estructuras metálicas y en países de primer mundo las estructuras mas importantes son hechas de acero. No se puede pasar por alto que el hormigón armado si bien es cierto aun ocupa un papel importante en la construcción poco a poco esta siendo sustituido por el acero debido a que este ofrece ventajas importantes.

Hoy en día el acero sin lugar a duda es el material estructural por excelencia, desplazando también a otros materiales metálicos tales como el aluminio u otras aleaciones, se lo encuentra en las mas importantes obras de ingeniería estructural, tales como edificios, puentes, coliseos, estadios y demás construcciones insignias de nuestra era, por esta razón la importancia del desarrollo, y estudio de las mismas.

¹ Charles Head Norris-John Benson Wilbur- Senol Utku, Análisis Elemental de Estructuras, Segunda Edición en español, McGRAW-HILL, 1982, Pág. 40

2.1.1 MARCOS RÍGIDOS O PÓRTICOS RÍGIDOS

Son estructuras que están compuestas de elementos los cuales están unidos entre si por uniones rígidas es decir estas uniones son capaces de resistir momentos, carga axial y cortante, esta es la diferencia con las armaduras. Se define entonces un pórtico rígido como

“Una estructura compuesta por cierto número de elementos situados todos en un plano y unidos entre si para formar un entramado rígido por medio de nudos, algunos de los cuales, o todos ellos, son capaces de resistir momentos (rígidos) en lugar de estar articulados”.²

Es importante señalar que esta definición se la realiza en función de pórticos bidimensionales puesto que en el cálculo de una estructura esta condición bidimensional puede ser ampliada a tridimensional, pero por facilidad el cálculo se lo realiza únicamente en dos dimensiones.

2.1.1.1 Nudo

Se define un nudo como la unión de dos elementos, dentro de estos podemos encontrar nudos rígidos³ o nudos articulados para marcos rígidos y armaduras respectivamente, las técnicas más usadas para la creación de nudos rígidos son: soldadura, pernos, remaches, etc. los cuales encontramos en la figura 2. 1 y figura 2.2

²Charles Head Norris-John Benson Wilbur- Senol Utku, Análisis Elemental de Estructuras, Segunda Edición en español, McGRAW-HILL, 1982, pp. 138.

³www.construaprende.com, Estructuras Metálicas, Español, 2004

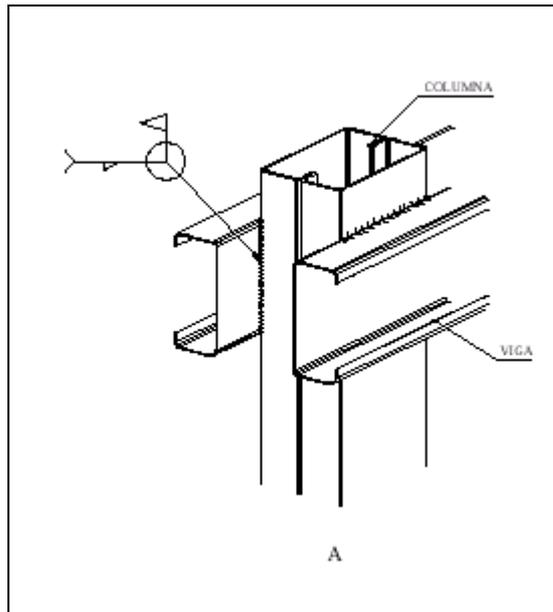


Figura 2.1 Junta Soldada⁴

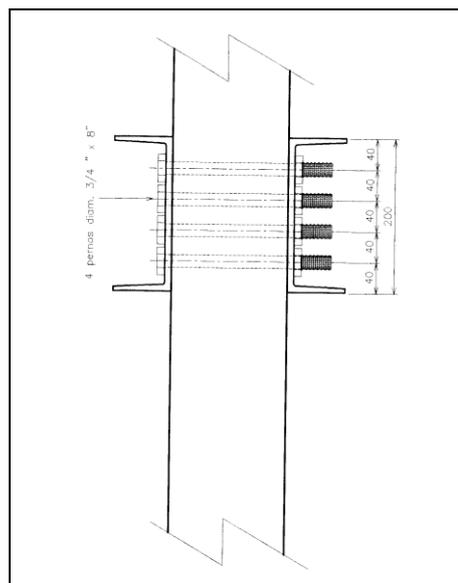


Figura 2.2 Junta Empernada⁵

Debido a la organización de los nudos los ángulos entre los extremos de las barras permanecen constantes al momento de ser cargado el pórtico por esta razón a estos nudos se los suele llamar nudo rígidos.

⁴ www.construaprende.com, Estructuras Metálicas, Español, 2004

⁵ Francisco Montalvo Granizo – Cristhian Alvarado Cevallos, (1998), Implementación del vibróforo de baja frecuencia marca AMSLER, Anexo B.

Para el caso de cerchas con nudos roblonados o soldados y siguiendo estrictamente la definición se las definiría como pórtico, sin embargo se ha notado que se obtiene un análisis satisfactorio si solamente se las considera como armaduras, por tal razón se aplica el término de pórticos a las estructuras mostradas en la figura 2.3 siendo estas los casos más generales de pórticos.

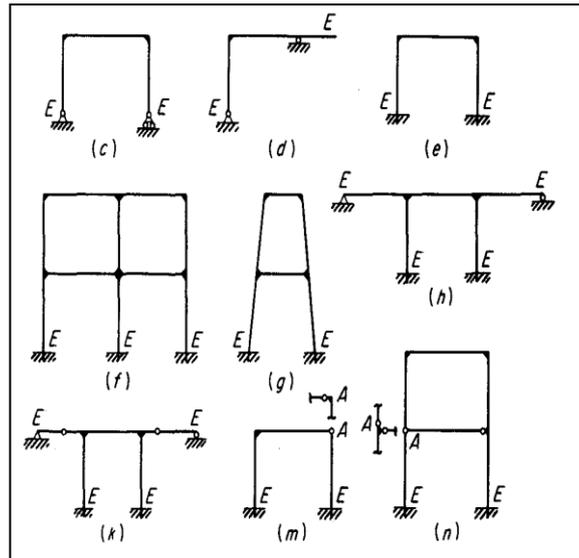


Figura 2.3 Pórticos Rígidos⁶

El rango de utilización de los pórticos varía entre 9 y 60 metros, son usados de la misma manera que las armaduras pero estos ofrecen una ventaja sobre ellas debido a que presentan mayor facilidad y rapidez en la construcción y montaje, traduciéndose de manera general en menor inversión de dinero.

Es importante señalar que la mayoría de estructuras poseen la forma de las detalladas en la figura 2.3 o son una mezcla entre ellas por ejemplo, el pórtico del vibróforo de baja frecuencia se la encuentra en el literal (e) de dicha figura.

⁶ Charles Head Norris-John Benson Wilbur- Senol Utku, Análisis Elemental de Estructuras, Segunda Edición en español, McGRAW-HILL, 1982, Pág. 138.

2.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PÓRTICOS

Los marcos rígidos generalmente tienen pequeñas variaciones entre unos y otros y por esta razón es muy difícil encontrar una clasificación satisfactoria de estos, pero existen diversos criterios mediante los cuales se los puede clasificar por ejemplo de acuerdo con sus apoyos se los clasifica en: empotrados y articulados figuras 2.4 y 2.5 ⁷ respectivamente, también se los puede clasificar como marcos rígidos de alma llena o de miembros armados figuras 2.6 y 2.7 o mediante criterios constructivos, pero en general no existe una gran variación entre cada uno de ellos.

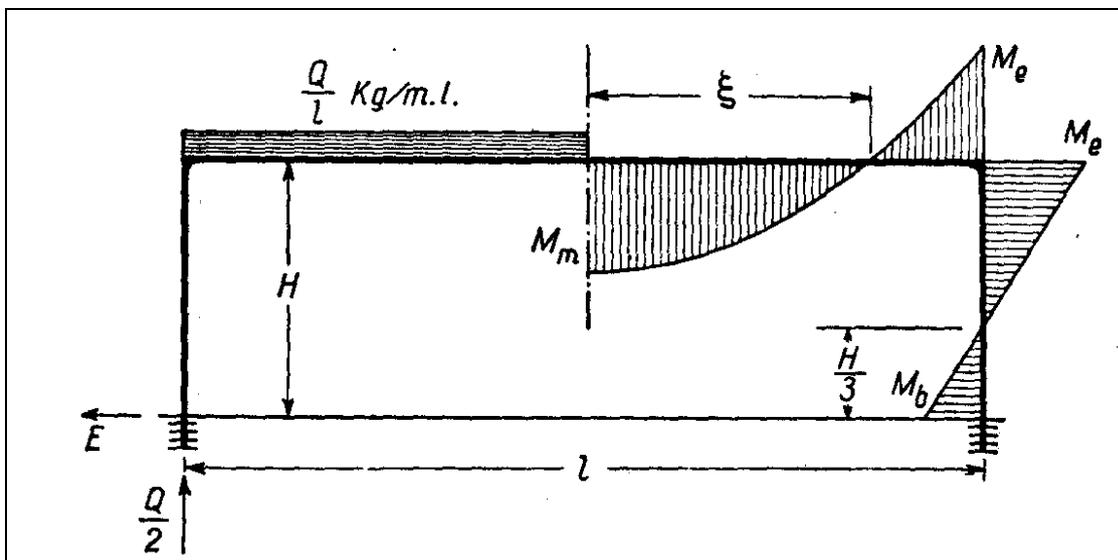


Figura 2.4 Pórtico Metálico Empotrado

⁷MAMUEL COMPANY, Ing., Cálculos de Construcción, Novena Edición, G. GILI, S.A., 1983, Págs. 126,138.

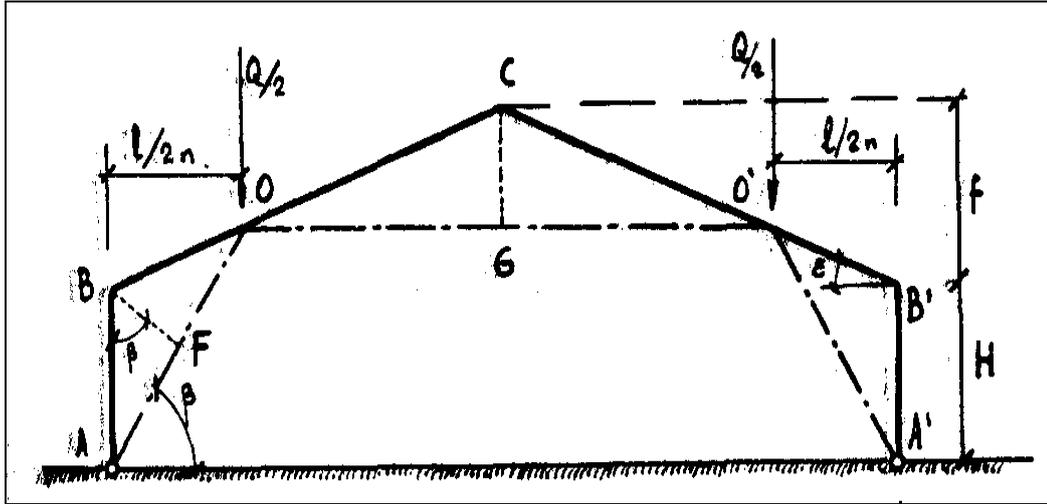


Figura 2.5 Pórtico Metálico Articulado

La utilización de los pórticos empotrados es mas usual en estructuras grandes puesto que los anclajes poseen gran tamaño, en el caso del vibróforo de baja frecuencia se encuentra una viga la cual da la característica de empotramiento además de amentar la rigidez.



Figura 2.6 Pórtico Metálico de alma llena



Figura 2.7 Pórtico Metálico de miembros armados

2.1.3 CLASIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS

Para la clasificación de las estructuras metálicas se debe tomar en cuenta algunos parámetros importantes tales como son:

- Forma
- Tipo de construcción
- Por las condiciones de esfuerzo predominante

La clasificación mas común que se realiza es de acuerdo a la forma de las estructuras así a continuación se da una breve información en relación a esta clasificación.

Se las puede clasificar en dos grandes grupos que son:

2.1.3.1 Estructuras de cascarón

Son estructuras compuestas por láminas o placas y se las usa en la construcción de tanques, silos, barcos (Cascos), cascos de ferrocarril, aeroplanos o en cubiertas de estructuras grandes tales como edificios, coliseos, etc.

El papel que desempeñan dichos elementos es doble, puesto que son cubiertas y de elemento de carga. Desde el punto estético es factible realizar dichos elementos de casi cualquier forma gracias a las técnicas modernas de procesamiento de materiales.

2.1.3.2 Estructuras reticulares

Las estructuras reticulares están compuestas por miembros alargados y se las puede clasificar en:

- Armaduras
- Marcos Rígidos (Pórticos)

2.1.3.2.1 Armaduras

Son estructuras donde se supone para el cálculo que los elementos trabajan para tracción o compresión es decir las uniones no son rígidas y se permiten movimientos relativos de rotación entre cada uno de los elementos. Debido a esto es fácil notar que los elementos no transmiten momentos.

Se las encuentra principalmente en claros comprendidos entre 20 a 120 metros.

2.1.4 MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE ESTRUCTURAS METÁLICAS

Existe diversidad de aceros para distintos usos en la ingeniería, tanto para la estructura en sí como para los accesorios y uniones entre las piezas para esto se han creado aceros con propiedades específicas para brindar mayor seguridad y eficiencia en cada uno de los elementos antes mencionados. Además se debe tomar en cuenta, que no solo se dispone de elementos metálicos sino también se usan materiales tales como el concreto ya que en toda estructura metálica es necesaria una unión con el suelo.

Por esta razón se ha realizado una división de materiales para el conjunto del pórtico de baja frecuencia en dos grupos principales que son:

- Bastidor y sus accesorios
- Cimentación

2.1.4.1 Bastidor y sus accesorios

Se definen como elementos pertenecientes al bastidor y sus accesorios a todos los elementos metálicos que se encuentren en la estructura.

Dentro de estos elementos los podemos subdividir de acuerdo a su forma y función, así tenemos:

- Elementos estructurales (vigas y columnas)
- Elementos de unión (pernos, juntas soldadas, accesorios)

2.1.4.1.1 Elementos estructurales

Son elementos hechos de acero y debidamente normalizados las propiedades en la composición de dichos materiales depende de las distintas necesidades particulares que se pueden presentar.

Los aceros estructurales según la ASTM (American Society of Testing Materials) ⁸se clasifican en:

- Aceros generales (A-36)
- Aceros estructurales de carbono (A-529)
- Bajo contenido de carbono (<0.15 %)
- Dulce al carbono (0.15 – 0.29 %)
- Medio al carbono (0.30 – 0.59 %)
- Alto contenido de carbono (0.6 – 1.7 %)

⁸ www.contruaprende.com, Estructuras Metálicas, Español, 2004

- Aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación (Mo, V y Cr), (A-441 y A-572) aleación al 5 %.
- Aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación, resistentes a la corrosión atmosférica (A-242, A-588).
- Acero templado y revenido (A-514).

ASTM A-36.- Acero al carbono de formas tales como barras, perfiles y placas es usado en la construcción de puentes, edificios estructurales en general. Las principales formas de unión para este tipo de aceros son tornillos, remaches y soldadura.

Para el caso particular del pórtico del vibróforo de baja frecuencia se tiene que casi todos los elementos estructurales son de Acero ASTM-36 laminados en caliente dichos perfiles se encuentran debidamente normalizados el numero de elementos y su forma son definidos en la Tabla 2.1.⁹

Tabla 2.1 Definición de Perfiles Existentes en el pórtico

| Elemento | Denominación | Nro. De elementos |
|---------------------|--------------------|-------------------|
| Columnas | Cajón 150x100x5 | 4 |
| Vigas | UPN200/U 150x100x5 | 4 |
| Angulo porta poleas | Angulo 50x50x5 | 2 |
| Perfil Lateral | Canal U 80x40x5 | 2 |

2.1.4.1.2 Elementos de unión

Como ya se dijo existen diversos tipos de unión ya sea por soldadura, pernos o remaches para unir los elementos estructurales, a continuación detallamos cada uno de los sistemas de unión encontrados en el vibróforo de baja frecuencia.

⁹ Francisco Montalvo Granizo – Cristhian Alvarado Cevallos, (1998), Implementación del vibróforo de baja frecuencia marca AMSLER, Pág. 23-36..

Uniones atornilladas.- Son usadas cuando se desea que los elementos unidos puedan ser separados sin la utilización de métodos destructivos pero es importante realizar un buen diseño, puesto que una unión de este tipo puede ser peligrosa si no se la diseña apropiadamente.

En el vibróforo de faja frecuencia se dispuso este tipo de unión, puesto que es necesario variar la altura de la viga que porta el pistón, en este sistema de sujeción tenemos 8 pernos de grado SAE 5 de $\frac{3}{4}$ pulg. las características de estos están definidas en la tabla 2.2.¹⁰

Tabla 2.2 Características de pernos existentes en el pórtico.

| | |
|--|--|
| Resistencia limite mínima a la tensión (Kpsi) | 85-74 |
| Resistencia Ultima mínima a la tensión (Kpsi) | 120-105 |
| Resistencia de fluencia mínima a la tensión (Kpsi) | 92-81 |
| Material | Acero de Mediano carbono templado y revenido (T y R) |
| Marca en la cabeza | Tres líneas a 120 grados, triangulo equilátero. |

Para el cálculo en pernos se considera además un efecto conocido como aplastamiento para lo cual las columnas han sido reforzadas con placas de 6mm de espesor para aumentar el área de aplastamiento.

Uniones Soldadas.- La unión de elementos metálicos por soldadura es muy común hoy en día, el pórtico del vibróforo de baja frecuencia no es la excepción así tenemos que todas las juntas soldadas de este pórtico fueron

¹⁰ Joseph Edward Shigley – Charles R. Mischke, Diseño en Ingeniería Mecánica, 4th Edición en Español, McGRAW-HILL Interamericana de México S.A., 1993, Pág. 386.

soldadas de electrodo continuo tipo MIG, se lo realizó con soldadura tipo MIG puesto que el cordón posee buena apariencia y da a las uniones mayor resistencia que los materiales base. En esta estructura encontramos soldadura de cordón y de filete, en los 2 casos con un tamaño de base de filete de 4 y 5 mm. Siendo el de 5 mm el más común.

2.1.4.2 Cimentación

La cimentación es el medio mediante el cual se une la estructura metálica con el suelo con el fin de transmitir al mismo las cargas que soporta la estructura. Dicha unión debe transmitir las cargas lo más uniformemente posible para dar un buen sustento a la estructura.

Del estudio realizado por la Facultad de Ingeniería Civil de la Facultad de la Escuela Politécnica del Ejército se tienen los siguientes datos:¹¹

Tipo de suelo: Depósito sedentario arenoso

Capacidad de carga media: $qs = 2 \frac{Kg}{cm^2}$

Modulo de elasticidad Media: $E = 400 \frac{Kg}{cm^2}$

Tipo de cimentación recomendada: Superficial.

Y de acuerdo con el trabajo realizado por la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica del Ejército se concluyó que la carga ejercida por el conjunto tiene un porcentaje muy pequeño de la carga media, por tal razón las modificaciones en carga no afectarán para nada el comportamiento del suelo.¹²

¹¹ Edgar Álvarez Ruiz –Rodrigo Contreras Ubidia, (1989), Estudio y Diseño para la habilitación de un banco de pruebas ASMLER electro hidráulico para ensayos estáticos y dinámicos a baja frecuencia de elementos y sistemas reales. p. 113.

¹² Francisco Montalvo Granizo – Cristhian Alvarado Cevallos, (1998), Implementación del vibróforo de baja frecuencia marca AMSLER, pp. 74-75.

El anclaje de una estructura se la puede realizar por varios métodos, para este objetivo se utilizan una variedad de accesorios como por ejemplo pernos, placas e inclusive adhesivos especiales. En lo que se refiere al anclaje del vibróforo de baja frecuencia se puede encontrar que se tiene en total 18 pernos distribuidos de la siguiente manera:

- 8 de $\Phi = \frac{1}{2}$ pulg. unidos por medio de adhesivo híbrido los cuales anclarán el perfil base del bastidor.
- 8 de $\Phi = \frac{1}{2}$ pulg. anclados por medio de placas. (Pernos de instalación rápida)
- 2 $\Phi = \frac{1}{2}$ pulg. anclados al perfil base del bastidor.(Pernos de instalación rápida)

Según el trabajo realizado en relación a este tema se puede observar que en el análisis estático realizado con la capacidad máxima se observan valores de factor de seguridad muy altos para los pernos y en general para el sistema de anclaje. Estos valores deberán ser recalculados en el momento de realizar las adecuaciones en el pórtico del vibróforo, pero se esperan no surjan mayores inconvenientes.

A continuación se presentan algunos de los datos más importantes en la tabla 2.3 para este sistema de anclaje.¹³

Tabla 2.3 Tipos de sistemas de anclaje existentes en el pórtico.

| Tipo | Carga de Tensión |
|--|------------------|
| HIT HY 150 –Para material sólido Adhesivo | 3497.5 Lb. |
| Tipo HILTI –Instalación Rápida | 3500.0 Lb. |

¹³ Francisco Montalvo Granizo – Cristhian Alvarado Cevallos, (1998), Implementación del vibróforo de baja frecuencia marca AMSLER, pp. 74-77.

2.1.5 CARGAS

La estimación de las cargas que va a soportar una estructura es de vital importancia para el diseño, dichas cargas deben ser calculadas de la manera mas precisa posible tanto en intensidad como en la posición dentro de la estructura, para esto es indispensable tener el conocimiento de los tipos de cargas y el grado de afectación de cada una de estas, por último se debe tomar una combinación de cargas criticas antes de realizar el diseño de los elementos.

2.1.5.1 Cargas fijas

Son llamadas cargas fijas las que tienen intensidad prácticamente constante y no cambian de posición a lo largo del tiempo figura 2.8. , por esta razón se las llama también cargas muertas. Algunos ejemplos de cargas muertas son: el peso propio de la estructura, elementos fijos con peso considerable, peso de la cubierta, acabados, deformaciones permanentes y otros elementos misceláneos. En el caso particular del pórtico del vibróforo las cargas muertas o fijas presentes en este son: el peso propio de la estructura, el peso del pistón hidráulico y el peso de los accesorios.

A continuación se muestran los valores de las cargas muertas presentes en el pórtico del vibróforo de baja frecuencia:¹⁴

Peso de la estructura: $P_{est} = 250 \text{ Kg.}$

Peso del pistón hidráulico: $P_{pho} = 100 \text{ Kg.}$

Peso de los accesorios: $P_{acs} = 60 \text{ Kg.}$

¹⁴ Francisco Montalvo Granizo – Cristhian Alvarado Cevallos, (1998), Implementación del vibróforo de baja frecuencia marca AMSLER, p. 72

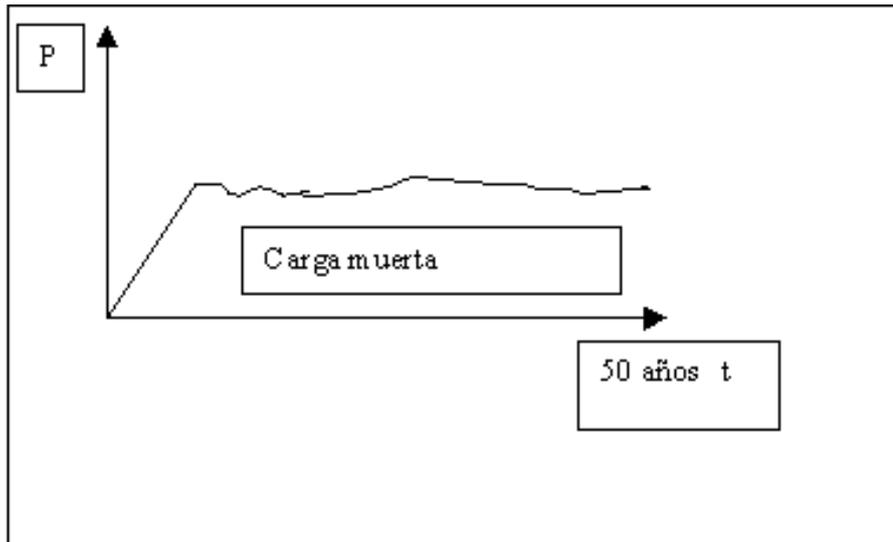


Figura 2.8 Carga muerta en función del tiempo¹⁵

2.1.5.2 Cargas vivas

Son las que cambian en intensidad o posición a lo largo del tiempo (figura 2.9), estas cargas son consideradas y se las encuentran en las distintas normativas AISC, LRFD, etc. Ejemplos clásicos de este tipo de cargas son el personal, cambio de posición de material (cuando las estructuras trabajan como bodegas o almacenes), paso de vehículos motorizados (en puentes), cargas hidráulicas, etc.

En el caso del pórtico se tiene el vibróforo el cual generará la carga viva, el vibróforo consta de una unidad de aplicación de carga a baja frecuencia AMSLER NFB 987 y un pistón hidráulico del tipo 20/10 (capacidad máxima 20 toneladas en pruebas estáticas y 10 toneladas en pruebas dinámicas), la posibilidad de variación de la carga determina el valor de la carga viva en esta estructura, en base a estas especificaciones técnicas el cálculo del comportamiento estructural del pórtico se lo realizará tomando en cuenta únicamente los valores para pruebas estáticas es decir en la escala de 20 toneladas.

¹⁵ www.construaprende.com, Estructuras Metálicas, Español, 2004

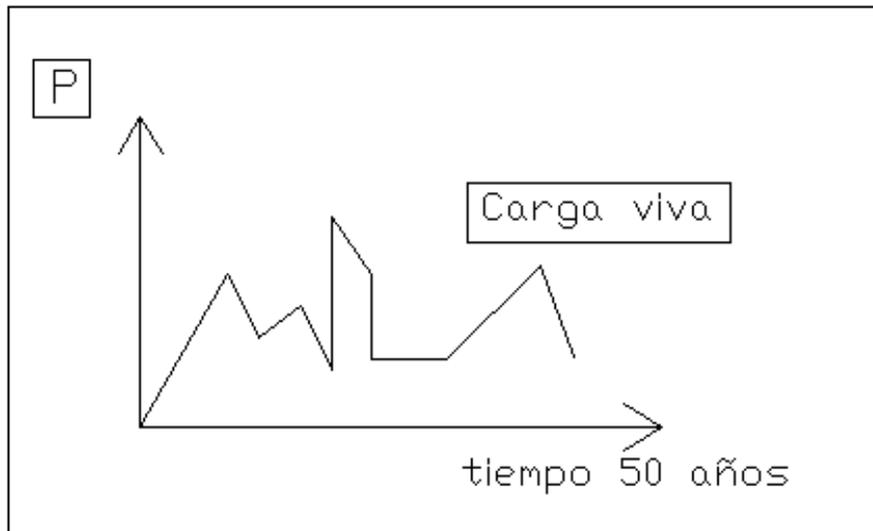


Figura 2.9 Carga viva en función del tiempo¹⁶

Para el cálculo de cargas vivas existen normas especiales como son:

- Norma para puentes de carretera, AASHTO, (Association of State Highway and Transportation Officials)
- Especificaciones para puentes de acero para ferrocarril, AREA, (American Railway Engineering Association).
- Especificaciones para el diseño, fabricación y montaje del acero estructural para edificaciones, AISC, American Institute of Steel Construction.

Para el caso de la carga producida por el pistón hidráulico y por el tipo de sujeción en la viga que lo soporta se la podrá tomar en cuenta como una carga puntual debido a que la longitud que trasmite la fuerza es muy pequeña de igual manera la carga producida por el peso del pistón hidráulico se la tomará en cuenta como una carga puntual.

¹⁶ www.construaprende.com, Estructuras Metálicas, Cargas, 2004

2.1.5.3 Códigos de diseño

Para el diseño de estructuras metálicas existen diferentes códigos de diseño y construcción de acuerdo a la posición geográfica entre ellos podemos encontrar:

- AISC-ASD89
- AISC-LRFD93
- AASHTO STEEL 97
- EUROCODIGO 3-1993

En nuestro país el de mayor difusión es el AISC-ASD89 por lo cual se lo utilizará para la comprobación del pórtico del vibróforo de baja frecuencia.

Dentro de los aspectos más importantes acerca de este código es que se divide en tomos, en el tomo número uno se encuentra de manera general todo lo relacionado con materiales utilizados para construcción de estructuras metálicas, formas de perfiles disponibles en el mercado (En EUA), características de dichos perfiles estructurales, etc.

Cabe señalar que dicha información es adecuada para los Estados Unidos en donde se puede encontrar la mayoría de perfiles detallados en el código pero también es aplicable en nuestro medio puesto que mediante importación nosotros podemos disponer de algunos de ellos.

En el tomo dos se encuentra los criterios de diseño y de construcción de las estructuras metálicas así como también normas de calidad y algunas consideraciones importantes para la utilización del mismo.

De manera puntual nosotros nos referiremos a la sección cinco del código, la cual habla acerca de cálculo de vigas columnas sometidas a los distintos tipos de cargas. A continuación detallaremos algunas de las más importantes formulas a tomarse en cuenta y que serán utilizadas para la realización de esta tesis:

Para determinación de elementos compactos:

$$\frac{b}{tf} \leq \frac{190}{\sqrt{F_y}} \quad \text{Ec 2.1}$$

$$b = bf - 3tf \quad \text{Ec 2.2}$$

Para cálculo de esfuerzos:

$$fa = \frac{P}{A} \quad \text{Ec 2.3}$$

$$fbxx = \frac{M_{xx}}{S_{xx}} \quad \text{Ec 2.4}$$

$$fvx = \frac{V_x}{A_{vx}} \quad \text{Ec 2.5}$$

Para cálculo de esfuerzos admisibles:

Esfuerzo axial admisible:

$$Cc = \sqrt{\frac{(2\pi^2 E)}{F_y}} \quad \text{Ec 2.6}$$

$$Fa = \frac{[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2Cc^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8Cc} - \frac{(Kl/r)^3}{8Cc^3}} \quad \text{Ec 2.7}$$

$$Ft = 0.6F_y \quad \text{Ec 2.8}$$

Esfuerzo admisible para la flexión:

$$lc = (1950 + 1200 \frac{Ma}{Mb}) \frac{b_{xx}}{F_y} \quad \text{Ec 2.9}$$

$$Fb_{xx} = 0.60F_y \quad \text{Ec 2.10}$$

Diseño de los elementos a flexo tensión:

$$\frac{fa}{Fa} + \frac{Cmxfbx}{(1 - \frac{fa}{F'ex})Fbx} + \frac{Cmyfby}{(1 - \frac{fa}{F'ey})Fby} \leq 1.0 \quad \text{Ec. 2.11}$$

$$Cb = 1.75 + 1.05 \frac{Ma}{Mb} + 0.3 \left(\frac{Ma^2}{Mb} \right) \leq 2.3 \quad \text{Ec. 2.12}$$

$$Lr = \frac{Lt}{Lu} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Cálculo del coeficiente de longitud, que es una relación entre la longitud real y la longitud utilizada.

2.2 GENERALIDADES, DEFINICIÓN Y USOS DE LAS ROSETAS DE DEFORMACIÓN

2.2.1 INTRODUCCIÓN

Hasta ahora no se ha desarrollado un transductor para medir esfuerzos con todas las características que se necesitan, pero las galgas extensiométricas de resistencia eléctrica están muy cerca de satisfacer todos estos requerimientos. Esta es la razón por la cual es el dispositivo más utilizado para el análisis de esfuerzos o como sensores en transductores diseñados para medir fuerza, par, presión y aceleración.

Los esfuerzos están directamente vinculados con las deformaciones unitarias que se producen en los elementos bajo un estado de carga, estas deformaciones son debidas a que las partículas en los materiales se desplazan hasta una posición que permita establecer un equilibrio entre las fuerzas interiores del material y las fuerzas exteriores o externas, una vez que estas fuerzas deformadoras dejan de actuar, las fuerzas interiores tienden a restituir las partículas a su posición original o a una nueva posición si el material fue

deformado hasta la plasticidad caso en el cual las fuerzas externas fueron mayores a las internas y las partículas buscan una nueva posición de equilibrio.

Por lo tanto se concluye que un cuerpo se deforma en la zona elástica o en la zona plástica, dependiendo del material del que está formado y de la magnitud de las cargas aplicadas, sin embargo también se llega a la conclusión de que *todo cuerpo se deforma en la zona elástica si las deformaciones son pequeñas.*

Para determinar los valores de esfuerzos en el pórtico, se medirá deflexiones en los elementos de la estructura metálica a través de una serie de sensores conocidos como medidores de deformación, sin embargo, existe un sin número de medidores de deformación entre los cuales están los mecánicos, ópticos, eléctricos y acústicos.

Para el análisis de estructuras metálicas los que mejor se adecuan son los medidores de deformación eléctricos, por esto es que se ha escogido trabajar con medidores tipo resistencia eléctrica o mejor conocidos como galgas extensiométricas.

Las galgas extensiométricas son muy buenos medidores de deformación pues además cumplen con requerimientos básicos para una medición óptima:

- La calibración de los sensores es estable y no cambia significativamente con el tiempo y las variaciones por temperatura son bajas.
- El tamaño del sensor es bastante pequeño y en relación al tamaño de la estructura podríamos decir que la medición se la realiza prácticamente en un punto.
- La instalación y posterior operación de los sensores no requieren de técnicas complicadas.
- El sensor tiene una salida de onda lineal, lo que permite tener deformaciones lineales y el acondicionamiento de esta se facilita.

Las galgas que se utilizarán para este proyecto tienen las siguientes características:

Tabla 2.4 Características de galgas extensiométricas

| | |
|------------------------------------|--|
| Resistencia | 120.00 $\Omega \pm 0.35\%$ |
| Factor de galga "K" | 1.94 $\pm 1\%$ |
| Sensibilidad transversal | -0.2% |
| Compensación de temperatura | $\square = 10.8 \times 10^{-6} (1/^{\circ}\text{C})$ |
| Coefficiente de temperatura de "K" | $(104.0 \pm 10) \times 10^{-6} (1/^{\circ}\text{C})$ de -10 a 45°C |

FUENTE: Hottinger Baldwin Messtechnik Gmbh, Strain Gauges, Typ6/120RY11

Para explicar el concepto o definición de una galga extensiométrica, se debe tener claros varios conceptos de la resistencia de materiales: esfuerzo, deformación unitaria, modulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

2.2.2 ESFUERZO Y DEFORMACIÓN UNITARIA

Esfuerzo.- El esfuerzo se define como la presión que ejerce una fuerza sobre un área, este esfuerzo puede ser de tracción o de compresión.

$$\sigma = +\frac{F}{A} \quad (\text{Tracción}) \quad \text{Ec 2.14}$$

$$\sigma = -\frac{F}{A} \quad (\text{Compresión}) \quad \text{Ec 2.15}$$

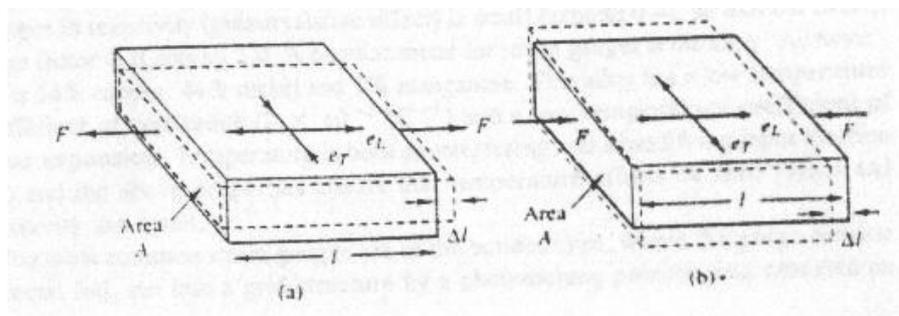


Figura 2.10 Tipos de esfuerzos¹⁷

¹⁷ Bentley, Figura 8.3

Deformación unitaria.- Se define como el coeficiente entre la variación en la longitud de un elemento sobre su longitud inicial causada como consecuencia de un esfuerzo aplicado sobre el mismo. Esta deformación por lo tanto puede ser de tracción o compresión dependiendo del esfuerzo que se aplique.

$$e = +\frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Tracción}) \quad \text{Ec 2.16}$$

$$e = -\frac{\Delta l}{l} \quad (\text{Compresión}) \quad \text{Ec 2.17}$$

Modulo de elasticidad.- Es la pendiente de la curva formada por la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria del cuerpo.

$$Y = m * X \quad (\text{Ecuación de la recta}) \quad \text{Ec 2.18}$$

$$\sigma = E * e \quad (\text{Relación esfuerzo-deformación}) \quad \text{Ec 2.19}$$

Para tracción o compresión de un cuerpo dentro de los límites de la ley de Hooke, el modulo de elasticidad es conocido como **módulo de Young**.

Coefficiente de Poisson.- Es la relación entre la deformación longitudinal y la deformación transversal que se produce al aplicar un esfuerzo sobre un cuerpo. Por ejemplo, al aplicar un esfuerzo de tracción sobre un cuerpo, este se alarga y la sección transversal se ve disminuida en ancho y alto.

$$e_t = -\nu * e_l \quad \text{Ec 2.20}$$

El coeficiente de Poisson varia entre 0.25 y 0.4 para la mayoría de materiales.

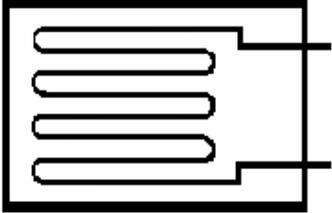
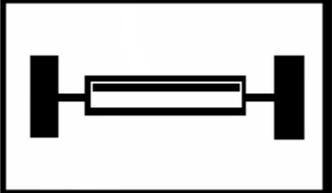
2.2.3 DEFINICIÓN Y TIPOS DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

Las galgas extensiométricas son transductores pasivos que permiten medir deformación unitaria sobre un elemento sensor (el cual puede ser un alambre,

una lámina metálica o una barra de material semiconductor) a partir de la deformación que este sufre.

Existe un sin número de tipos de galgas extensiométricas en el mercado, su forma depende de su aplicación y medio ambiente en el cual tiene que trabajar, sin embargo todos ellos se basan en tres tipos básicos de extensiómetros el de alambre, el laminar y el semiconductor, y sobre estos se juega con la distribución, número de galgas, ángulo, posición, etc dependiendo de la magnitud a sensar.

Tabla 2.5 Tipos de extensiómetros eléctricos

| Tipo | Material | Tamaño | Esquema |
|-----------------------------|--|-----------------------------|--|
| Extensiómetro de alambre | Constantán = Cu al 55% y Ni al 45% Nicrom = Ni al 80% y Cr al 20% | $0.0127 < \phi < 0.0254$ mm |  |
| Extensiómetro laminar | Constantán = Cu al 55% y Ni al 45% Nicrom = Ni al 80% y Cr al 20%, además aleaciones de platino | Espesor ≈ 0.0254 mm |  |
| Extensiómetro semiconductor | cristal dopado de silicio | Espesor ≈ 0.254 mm |  |

2.2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

2.2.4.1 Galgas metálicas

Están formadas por un conductor metálico de sección circular, soportado por una lámina de material aislante. El conductor puede ser de constantán que es una aleación de cobre al 55% y níquel al 45% o de nicrom que es una

aleación de níquel al 80% y cromo al 20% que tiene una mejor respuesta ante la temperatura.

El material aislante que sirve de soporte puede estar hecho de nylon, vinilo, polietileno o teflón y son escogidos en función de la temperatura a la que tengan que operar.

Hoy en día son muy utilizadas las bandas extensiométricas metálicas que consisten en una película de metal de 20 a 30 micras de grosor realizada con los mismos procesos de fabricación de los circuitos impresos y presentan varias ventajas frente a las galgas compuestas por filamentos:

- Optimización del diseño de la galga y reducción dimensional
- Mayor superficie de evacuación térmica
- Reducción del error debido a la distancia elemento-sensor-galga

Las galgas metálicas tienen una resistencia eléctrica que se encuentra entre los 100Ω y los 5000Ω y un factor de galga que varía entre 2 y 4 (Para aleaciones de platino y tungsteno), en las galgas que se utilizarán en este proyecto la resistencia eléctrica es de 120Ω y el factor de galga de 1.94.

2.2.4.2 Galgas biaxiales o rosetas

Estas son asociaciones de dos o más galgas extensiométricas, también se las conoce como rosetas de deformación, estas están fijadas sobre un mismo elemento soporte y forman entre sí un ángulo de 120° . Este tipo de rosetas son las que se utiliza para el cálculo de esfuerzos en distintas direcciones o para conocer la dirección principal del esfuerzo. En el campo de la resistencia de materiales y las estructuras estas son las más utilizadas.

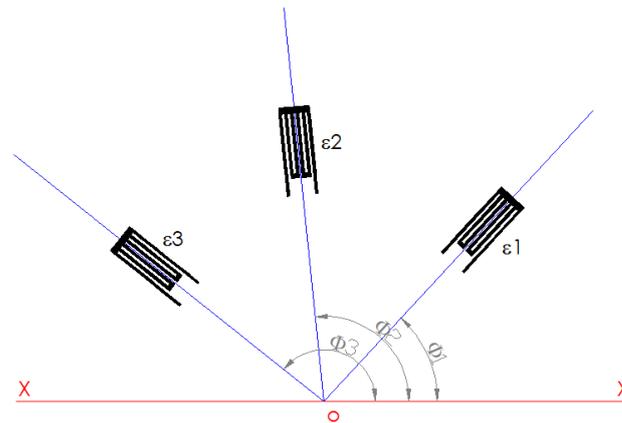


Figura 2.11 Esquema de rosetas

2.2.5 RELACIONES MATEMÁTICAS DE LOS EXTENSIÓMETROS ELÉCTRICOS

Las fuerzas de compresión, tracción o flexión aplicadas sobre materiales que trabajan en el límite elástico (Ley de Hooke) generan deformaciones que son traducidas a la galga, respondiendo ésta con una variación en su resistencia eléctrica y esta relación causa-efecto se conoce como factor de galga:

$$G = \frac{\Delta R / R_0}{e} \quad \text{Ec 2.21}$$

El principio de funcionamiento de las galgas extensiométricas se basa en el efecto *piezorresistivo* para metales y materiales semiconductores, en el cual la resistividad varía en función a la presión a la cual están sometidos, debido a que la presión reduce el volumen y por lo tanto la distancia interatómica para los metales o la concentración de portadores para los semiconductores.

Las galgas extensiométricas disponen de un muy buen margen de medida limitadas por su propia elasticidad, los ruidos eléctricos de fondo y de los otros elementos asociados.

Dado que las galgas extensiométricas son transductores pasivos, el proceso de medida es indirecto, esto quiere decir que previamente al cálculo de

la fuerza o esfuerzo, es preciso realizar la correspondencia entre la resistencia y tensión a partir de un circuito adaptador.

Las galgas extensiométricas son elementos de metal o de semiconductores cuya resistencia cambia bajo deformación, por lo tanto, se puede trabajar con la siguiente relación que considera todos los factores que afectan la resistencia eléctrica en una galga:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{Ec 2.22}$$

Donde:

R = Resistencia del alambre

ρ = Resistividad

A = Sección del alambre

L = Longitud del alambre

En una situación real varían todos los factores que afectan a la resistencia de una galga extensiométrica, es decir, longitud, área y resistividad:

$$\Delta R = \left(\frac{\partial R}{\partial l} \right) \Delta l + \left(\frac{\partial R}{\partial A} \right) \Delta A + \left(\frac{\partial R}{\partial \rho} \right) \Delta \rho \quad \text{Ec 2.23}$$

Si en uno de los casos la galga es sometida a esfuerzo en el sentido efectivo de medición, la ecuación diferencial ya reemplazada sus derivadas queda:

$$\Delta R = \left(\frac{\rho}{A} \right) \Delta l - \left(\frac{\rho l}{A^2} \right) \Delta A + \left(\frac{l}{A} \right) \Delta \rho \quad \text{Ec 2.24}$$

Simplificando:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{Ec 2.25}$$

Como se puede ver el primer factor puede ser reemplazado por la deformación unitaria en el sentido longitudinal de la fuerza:

$$e_l = \frac{\Delta l}{l} \quad \text{Ec 2.26}$$

El segundo factor puede ser trabajado para obtener la deformación unitaria transversal producida sobre el área transversal del cuerpo:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta w}{w} + \frac{\Delta t}{t} = 2 * e_t \quad \text{Ec 2.27}$$

Reemplazando las dos ultimas ecuaciones en la ecuación principal:

$$\frac{\Delta R}{R} = e_l - 2 * e_t + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{Ec 2.28}$$

Ahora unificando las deformaciones, es decir gracias al coeficiente de Poisson, se reemplaza la deformación transversal de la galga que no interesa por deformación longitudinal:

$$\frac{\Delta R}{R} = e_l - 2 * (-\nu * e_l) + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{Ec 2.29}$$

Simplificando:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) e_l + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{Ec 2.30}$$

Puesto que el factor de galga es el coeficiente entre el cambio de resistencia de una galga extensiométrica y su respectiva deformación en el sentido del esfuerzo.

$$G = \frac{\Delta R / R_0}{e} \quad \text{Ec 2.31}$$

Entonces reemplazando esta ecuación en la anterior, se obtiene la ecuación del factor de galga para cualquier galga extensiométrica:

$$G = 1 + 2\nu + \frac{1}{e} \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad \text{Ec 2.32}$$

La mayoría de metales tiene un coeficiente de Poisson que se encuentra en un valor de aproximadamente 0.3 y el factor que representa el efecto piezorresistivo $\left(\frac{1}{e}\right)\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)$ se encuentra en valores de aproximadamente 0.4, con estos datos podemos darnos cuenta que el factor de galga para galgas extensiométricas metálicas se encuentra en aproximadamente 2.

$$G = 1 + 2\nu + \frac{1}{e} \frac{\Delta\rho}{\rho} = 1 + 2*0.3 + 0.4 \approx 2 \quad \text{Ec 2.33}$$

Las galgas extensiométricas de materiales semiconductores tienen valores de factor piezorresistivo $\left(\frac{1}{e}\right)\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)$ mucho mayores y esto dispara al factor de galga a valores entre +100 y +175 para semiconductores tipo P y a valores entre -100 y -140 para semiconductores tipo N. Un valor negativo de factor de galga representa una disminución en la resistencia para una deformación en tracción.

Para determinar el estado de esfuerzos experimentalmente utilizando la roseta de deformaciones se tienen las siguientes fórmulas:

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right) \cdot \cos(2 \cdot \theta_a) + \gamma_{xy} \cdot \text{sen}(2 \cdot \theta_a) \quad \text{Ec 2.34}$$

$$\varepsilon_b = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right) \cdot \cos(2 \cdot \theta_b) + \gamma_{xy} \cdot \text{sen}(2 \cdot \theta_b) \quad \text{Ec 2.35}$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cdot \cos(2 \cdot \theta_c) + \gamma_{xy} \cdot \text{sen}(2 \cdot \theta_c) \quad \text{Ec 2.36}$$

Ley de Hooke del estado biaxial:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_x + \mu \cdot \varepsilon_y) \quad \text{Ec 2.37}$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_y + \mu \cdot \varepsilon_x) \quad \text{Ec 2.38}$$

$$\tau_{xy} = G \cdot \gamma_{xy} \quad \text{Ec 2.39}$$

2.2.6 CIRCUITOS ACONDICIONADORES PARA GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS (TRANSDUCTORES PASIVOS)

Las galgas extensiométricas responden a variaciones de su impedancia producidas por la variación de las magnitudes a las que son sensibles, por lo tanto, para obtener señales eléctricas útiles para el proceso de medida es necesario complementarlo con un circuito que permita la conversión eléctrica de esta variación de impedancia. Estos circuitos adaptadores están constituidos por:

- El circuito de medida potenciométrico.
- El circuito de medida por puente de Wheastone.

2.2.6.1 Circuito de medida por puente de wheastone

El circuito de medida por puente de Wheastone de cuatro brazos es por tanto el que más se utiliza debido a su proceso de medida diferencial que permite eliminar la componente de tensión permanente y una alta reducción de las señales parásitas generadas por el sistema de alimentación, pues en el puente de Wheastone, la condición de equilibrio solo depende del valor de las resistencias, más no de la resistencia interna de la fuente de alimentación ni de la carga del dispositivo medidor. Entonces, el puente de Wheastone se encuentra balanceado cuando:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \text{ y } E = 0$$

Ec 2.40

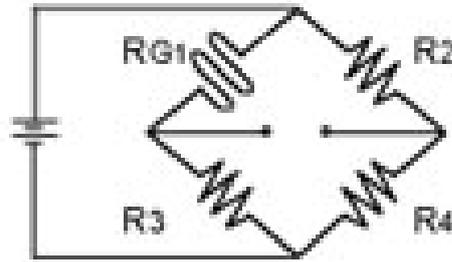


Figura 2.12 Puente de Wheastone¹⁸

Si la resistencia R1 se deforma, el circuito se desequilibra y el voltaje E deja de ser cero para presentar un ligero incremento que representa la longitud deformada.

En el caso de que se deformen las resistencias R1, R2, R3 y R4, el voltaje de salida sería:

$$\Delta E = V \frac{r}{(1+r)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \text{Ec 2.41}$$

La sensibilidad del circuito es igual a:

$$S_c = \frac{\Delta E}{\varepsilon} \quad \text{Ec 2.42}$$

De acuerdo con el problema de medida que se presente, se conectarán al puente una o varias bandas las denominaciones de circuito en puente completo, medio puente o cuarto de puente, indican que las cuatro, dos o una de las resistencias del circuito respectivamente son galgas extensiométricas.

Los puentes completo y medio permiten amplificar la señal producida por la deformación de las galgas extensiométricas, lo que facilita la medida de la

¹⁸ BENTLEY J.P., Principles of Measurement Systems, 3ra ed., Londres, Addison Wesley Longman, 1995.

misma, también permite filtrar componentes de la deformación y amplificar otras.

2.2.6.1.1 Circuito en puente completo

Está constituido por un puente de Wheatstone que tiene sus cuatro ramas constituidas por bandas extensiométricas que sufren deformación. A las ramas de un circuito en puente de Wheatstone cuya resistencia eléctrica puede variar por causa de una deformación se las denomina **ramas activas**, caso contrario se dirá que es una **rama pasiva**. En las figuras 2.13, 2.14 y 2.15 se representa esta diferencia por medio de un tono gris que indica banda activa.

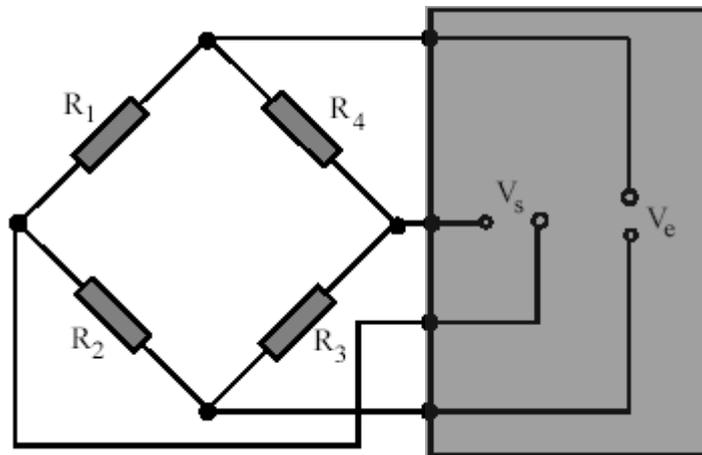


Figura 2.13 Circuito de puente completo

La señal de salida de este circuito viene dada por la ecuación:

$$\frac{\Delta V_s}{V_e} = \frac{1}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Ec 2.43

Los efectos de las bandas sobre la medida total se suman o restan dos a dos, según las bandas sean contiguas u opuestas.

2.2.6.1.2 Circuito en medio puente

Está constituido por un puente de Wheatstone que tiene dos de sus ramas constituidas por bandas. Las otras dos ramas se completan con resistencias eléctricas comunes de alta precisión.

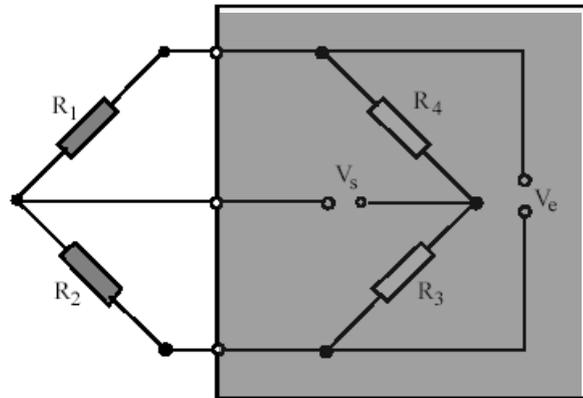


Figura 2.14 Circuito de medio puente

La señal de salida de este circuito viene dada por la ecuación:

$$\frac{\Delta V_s}{V_e} = \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$$

Ec 2.43

Los efectos de las bandas instaladas en ramas contiguas son de signo opuesto.

2.2.6.1.3 Circuito en cuarto de puente

Está constituido por un puente de Wheatstone en el que solamente una de sus ramas es una banda extensiométrica.

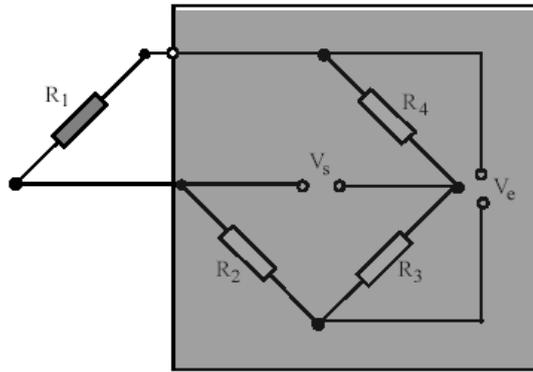


Figura 2.15 Circuito de cuarto de puente

Suponiendo que la banda está colocada en la rama 1, la salida de este circuito viene dada por la ecuación:

$$\frac{\Delta V_s}{V_e} = \frac{K}{4} (\varepsilon_1)$$

Ec 2.44

2.2.7 LÍMITES DE UTILIZACIÓN DE UNA GALGA EXTENSIOMÉTRICA

1. **Margen nominal de medida.**- Límite superior para el cual el valor de error no supera el valor nominal.
2. **Margen de servicio.**- Zona en la que la galga puede realizar mediciones con valores de error superiores al nominal.
3. **Límite de carga.**- Es la fuerza aplicada en la misma dirección de la medición para la cual la galga no dispone de capacidad de medida y los límites de error son grandes.
4. **Carga de rotura.**- Es la fuerza aplicada en la misma dirección de medida que produce cambios y desperfectos permanentes en la galga.

2.2.8 MEDICIÓN EN GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

Las galgas extensiométricas se utilizan en su mayoría para realizar mediciones de deformación muy pequeñas, que están generalmente en $\varepsilon \times 10^{-3}$, por esto los elementos que serán de ayuda para medir la variación en la resistencia deben ser muy precisos.

Por ejemplo, suponiendo que se utiliza una galga extensiométrica metálica de 120Ω y factor de galga 2. Se la somete a fuerzas que causan una deformación de $500\mu\epsilon$ en el elemento sensor, en este caso la galga varía su resistencia en tan solo 0.1% que es equivalente a 0.12Ω .

Para medir esta pequeña variación en la resistencia de la galga se utiliza una serie de circuitos de configuración en puente (completo, medio o un cuarto de puente), el más usado es el puente de Wheaston completo por sus múltiples ventajas antes ya explicadas antes y consiste en cuatro resistencias y una fuente de voltaje externo V_{ex} de la siguiente manera:

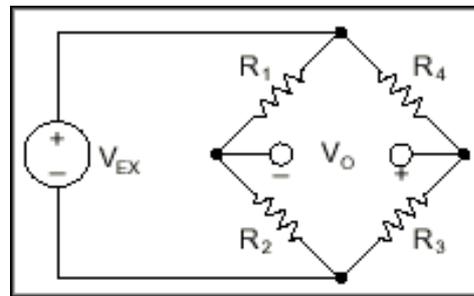


Figura 2.16 Circuito en puente de Wheaston completo¹⁹

Bajo este esquema el voltaje de salida del circuito es igual a:

$$V_o = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) * V_{ex} \quad \text{Ec 2.45}$$

Claramente se puede ver en esta ecuación que cuando:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad \text{Ec 2.46}$$

¹⁹ www.ni.com, Sensores, Inglés, 2002

El voltaje de salida $V_o = 0$ y que bajo estas condiciones por lo tanto el circuito está balanceado y que cualquier variación en las resistencias R_1 , R_2 , R_3 o R_4 resultará en la variación del voltaje de salida V_o .

Por lo tanto si se reemplaza la resistencia R_4 del circuito por la resistencia variable de la galga extensiométrica R_G , se vuelve a la ecuación del factor de galga:

$$G = \frac{\Delta R / R_o}{e} \quad \text{Ec 2.47}$$

La cual quedaría:

$$\frac{\Delta R}{R_G} = G * e \quad \text{Ec 2.48}$$

Si ahora consideramos que $R_1 = R_2$ y $R_3 = R_G$ y la ecuación del voltaje de salida V_o sería:

$$V_o = -\frac{G * e}{4} \left(\frac{1}{1 + G * \frac{e}{2}} \right) * V_{ex} \quad \text{Ec 2.49}$$

En esta expresión se puede ver claramente la presencia del término:

$$\frac{1}{1 + G * \frac{e}{2}} \quad \text{Ec 2.50}$$

Que representa la no linealidad del circuito respecto a la deformación.

Hasta el momento solo se ha analizado la variación de la resistencia de la galga debida a la deformación, sin embargo, las galgas extensiométricas al igual que el cuerpo sensor experimentan una expansión térmica.

Los fabricantes de galgas minimizan la sensibilidad térmica utilizando materiales especiales, además es bueno usar dos galgas extensiométricas de la siguiente manera:

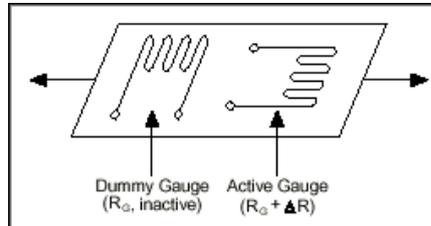


Figura 2.17 Disposición de galgas que minimiza la sensibilidad

En esta disposición, se ubican dos galgas una en sentido longitudinal (activa) y otra en sentido transversal (inactiva), puesto que la galga activa es la única que varía su resistencia debido a la deformación pero ambas galgas varían su resistencia en función de la temperatura podemos minimizar las variaciones de la temperatura.

La sensibilidad del circuito también puede ser mejorada eliminando la no linealidad del mismo armando un circuito con dos galgas extensiométricas que varíen la resistencia de dos de las cuatro resistencias:

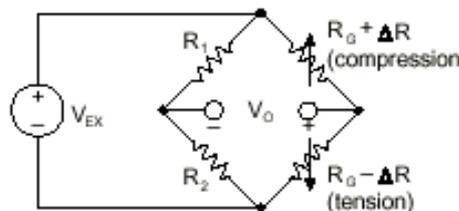


Figura 2.18 Puente con dos resistencias variables

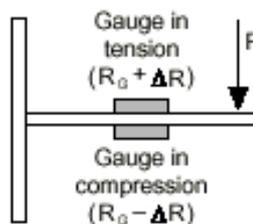


Figura 2.19 Galgas a tracción y compresión

Las galgas han sido colocadas en las caras sometidas a tracción y compresión de una viga en cantiliver y su ecuación de voltaje de salida es:

$$V_o = -\frac{G^*e}{2} * V_{ex} \quad \text{Ec 2.51}$$

En la cual ya no hay el término que provoca la no linealidad y el voltaje de salida además es mucho mayor (el doble) que en el caso anterior.

Lo ideal entonces sería cambiar todas las resistencias del circuito por galgas extensiométricas con la siguiente configuración:

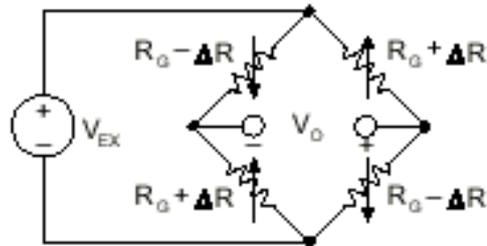


Figura 2.20 Puente con cuatro resistencias variables

Esta configuración no es fácil de balancear, por lo tanto, es adecuado tomar los valores iniciales de voltaje para restarlos de los finales (luego de la deformación), para de esta manera trabajar con la diferencia de voltaje que corresponde a la deformación del elemento sensado. También se puede corregir este valor en el software del ordenador al final del proceso. La ecuación del voltaje de salida sería:

$$V_o = G^*e * V_{ex} \quad \text{Ec 2.52}$$

Todas las ecuaciones anteriores no toman en cuenta la impedancia de los cables de la galga extensiométrico, esto es un punto muy importante puesto que al tener que medir variaciones de resistencia muy bajas, la impedancia introduce grandes errores en la medición y los datos obtenidos no son reales.

Tampoco toman en cuenta que estos cables se estiran o contraen en función de la temperatura.

Si por ejemplo se tiene una galga extensiométrica separada del circuito unos 12m y cada cable que llega a ella tiene una resistencia propia de 0.5Ω , y estos además se deforman debido a una variación repentina de temperatura al momento de realizar la medición, no se está en capacidad de obtener datos reales:

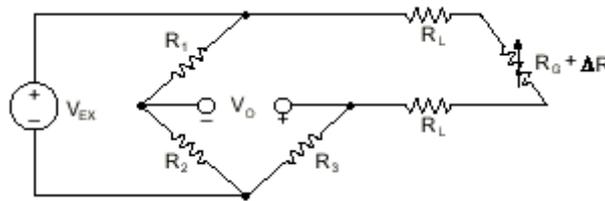


Figura 2.21 Problema de medición debida a distanciamiento²⁰

Para corregir estos errores se debe conectar el circuito de distinta manera y tomar el valor del voltaje de salida V_0 de la siguiente manera:

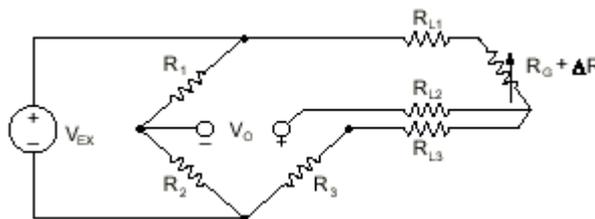


Figura 2.22 Corrección de medición debida a distanciamiento²¹

De esta manera se elimina el error que se producía por la impedancia de los cables y el error producido por el cambio de temperatura también se cancela.

²⁰ www.ni.com, Compensación por longitud y temperatura, Inglés, 2003

²¹ www.ni.com, Compensación por longitud y temperatura, Inglés, 2003

2.2.9 INSTALACIÓN DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

La instalación de una galga es un aspecto al cual se le debe dar la mayor importancia. Para esto se tienen distintos métodos para adherir la galga a la superficie entre ellos está la soldadura, el pegamento y mediante una cinta adhesiva, siendo este último el más común de utilizar y cuyos pasos se detallan a continuación:

2.2.9.1 Preparación de la superficie

En primera instancia, se debe remover todas las impurezas de la superficie en la que se desea pegar la galga. Esto se realiza con la ayuda de disolventes y desengrasantes como el REINIGUNGSMITTEL RMS1 que esta conformado de acetona y propanol-2.



Figura 2.23 Limpieza de la superficie

A continuación se pule la superficie con lijas, teniendo en cuenta que no se debe lijar excesivamente. Esto se realiza para remover moho, óxidos, que no se eliminaron en el paso anterior (utilizar lija #120-180 para acero y #240-320 para aluminio)

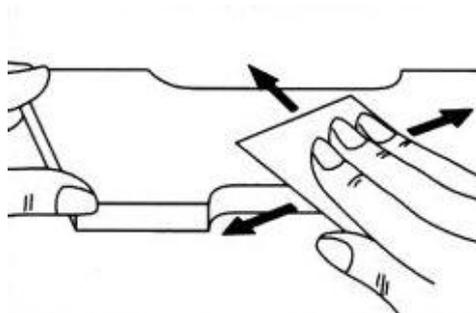


Figura 2.24 Pulido de la superficie

Acto seguido, se recomienda ubicar el punto exacto donde se pegará la galga con un marcador o lápiz de punta fina.

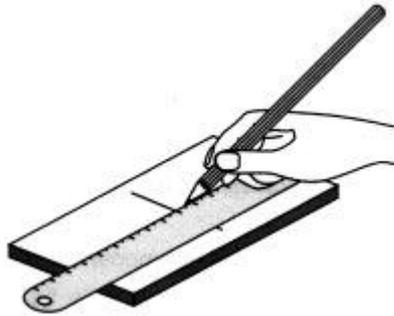


Figura 2.25 Marcación del punto donde se pegará la galga

Se coloca cinta adhesiva alrededor del punto que se ha trazado anteriormente para poder removerla cuando se haya secado el pegamento y evitar desbordes alrededor del área donde se encontrará el sensor e impedir que realiza mediciones no exactas.

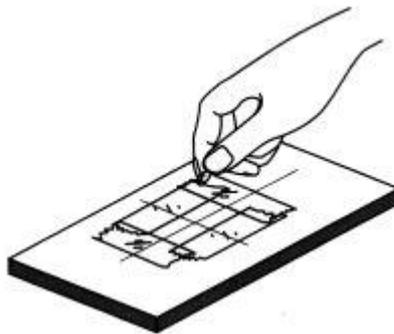


Figura 2.26 Preparación posterior al marcado de superficie

El siguiente paso será volver a usar solventes para asegurar que no quede ningún residuo de los pasos anteriores. Se debe tener cuidado de borrar las marcas que se las hizo anteriormente.

Se recomienda utilizar algún elemento para modificar el pH de la zona para que tenga mayor factibilidad con el pegamento.

2.2.9.2 Fijación de la galga

Antes de empezar se debe limpiar todos los elementos que se usen, incluyendo las manos con agua y jabón y los elementos con los solventes y desengrasantes.

Con las pinzas previamente limpiadas, se coloca la galga en un lugar limpio con el área de pegado boca abajo y se coloca de manera exacta los conectores.

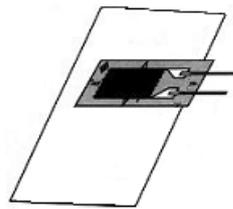


Figura 2.27 preparación de la galga

Para aumentar la perfección del trabajo, utilizar cinta adhesiva para sujetar a la galga y trasladar al área de medición.

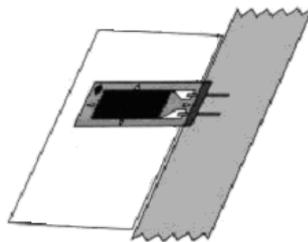


Figura 2.28 Colocación de cinta adhesiva en los conectores y galga

Ya en el área de medición se debe elevar uno de los extremos de la cinta, con el fin de colocar el catalizador, si se requiere, y el adhesivo BORDEN “La Brujita”.

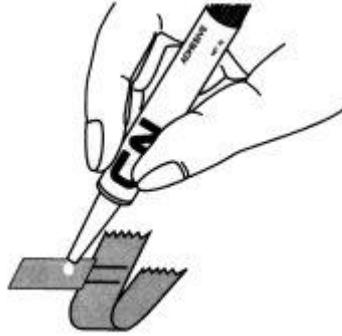


Figura 2.29 Colocación de adhesivo

Se recomienda colocar cantidad suficiente de adhesivo, una vez realizado esto se vuelve a la galga a su posición con suavidad y firmeza.

Recubrir todo el sensor con cinta adhesiva y aplicar presión por lo menos por un minuto con el dedo o con un borrador.

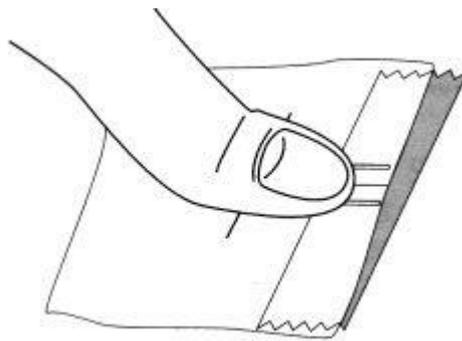


Figura 2.30 Aplicación de presión

Una vez que haya actuado el adhesivo, remover las cintas anteriormente colocadas.

2.2.9.3 Soldadura de los terminales de la galga

Cortar los conductores cuanto se crea necesario y pelar el cable 2 o 3 centímetros. Torcer el alambre con mucho cuidado.

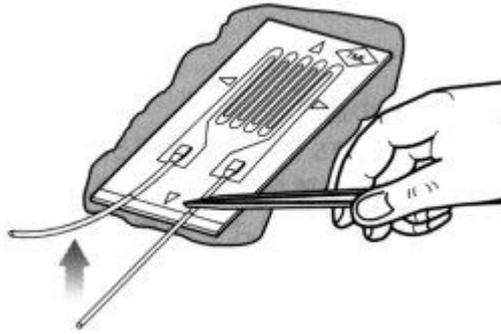


Figura 2.31 Tratamiento de los conductores posterior al pegado

Con el mismo adhesivo usado anteriormente, colocar el terminal de conexiones, con el fin de soldar dichos terminales con el alambre pelado de la galga.

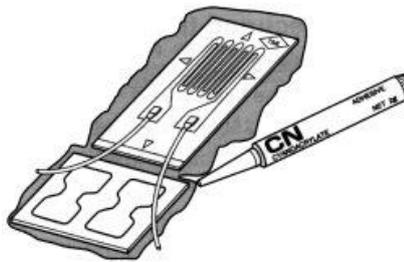


Figura 2.32 Colocación de los terminales

A continuación, se suelda los alambres en los respectivos terminales.



Figura 2.33 Soldado de terminales

Enseguida se remueve todos los excesos de pasta para soldar con un solvente indicado. Verificar que no haga contacto algún alambre con la superficie.

2.2.9.4 Aplicación de la capa protectora

Se debe empezar limpiando completamente toda el área. A continuación aplicar una capa significativa de silicona, poliuretano, laca, etc

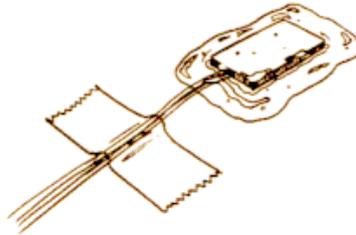


Figura 2.34 Aplicación de silicona

Tabla 2.6 Tipos de adhesivos utilizados y características

| | |
|---------------|--|
| Z-70 | Temperatura máxima ambiente para el curado 120°C y superficie lisa. |
| X-60 | Temperatura máxima ambiente para el curado 80°C |
| EP-250/EP-310 | Temperatura máxima ambiente para el curado 250°C o 310°C, especialmente utilizado para la construcción de transductores. |

FUENTE: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Strain Gauges, Typ6/120RY11

2.3 SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

2.3.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el número de industrias y empresas que utilizan computadoras personales en sus plantas y laboratorios, para realizar mediciones, probar productos y automatizar procesos ha aumentado de manera exorbitante. Al implementar sistemas basados en PC, los usuarios están aprovechando las grandes ventajas que tiene la tecnología de computación como son: las tarjetas de adquisición de datos, almacenamiento

de datos en disco duro, Active X e Internet y de la misma manera que los ingenieros utilizan la PC en sus aplicaciones, las PC se han vuelto más exigentes como es el caso de los sistemas en tiempo real.

La adquisición de datos es un proceso que consiste en tomar variables físicas para convertirlas en variables eléctricas con el fin de poder utilizarlas en el computador, es decir, consiste en la recolección de datos “crudos” (analógicos) y convertirlos en datos “procesables” (digitales) por el o los software que serán destinados a la su utilización en el proyecto.

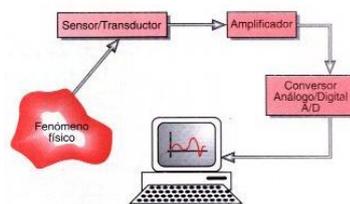


Figura 2.35 Proceso de adquisición de datos²²

En la adquisición de datos se miden variables, se las convierte en un formato digital, se las almacena en un computador y se las procesa de alguna manera. Para realizar todo el proceso mencionado, se necesita de un “interfaz” entre el mundo físico y el computador que se suele llamar como tarjeta de adquisición de datos.

El proceso de adquisición de datos está formado por los siguientes pasos fundamentales:

- Se debe utilizar un sensor/transductor adecuado, el cual tiene la finalidad de detectar y convertir una variable física en una señal analógica, ya sea esta de voltaje o corriente, para nuestro caso este paso se dará en las galgas extensiométricas.
- Se debe realizar la amplificación de ésta señal, pues normalmente la señal que entrega el sensor es muy débil y propensa al ruido, por lo

²² http://hgr.tripod.com/adquisicion_datos.html, Adquisición de datos, Inglés, 2001

que se debe utilizar acondicionadores que hagan que la señal obtenida sea maniobrable.

- El siguiente paso es lograr que la señal analógica hable el mismo idioma que el computador, esto es, que sea digital.
- La adquisición de los datos propiamente dicha, en este paso se almacena los datos en memoria para ser llevados a pantalla, procesados o llevados a cualquier otro periférico del ordenador.

Las principales ventajas que se obtiene al implementar métodos de control modernos con sensores, tarjetas de adquisición de datos y computadores son entre otros los siguientes:

- Flexibilidad en el procesamiento.
- Capacidad de realizar mediciones en tiempo real, y con esto realizar operaciones que necesiten de un análisis instantáneo
- La capacidad de almacenamiento es muy alta, pues se esta trabajando con computadores modernos que tienen mucha memoria.
- Al realizar medidas en tiempo real se tiene un rápido acceso a la información y gracias al análisis se realiza la toma de decisión de manera automática.
- Es una herramienta útil para la simulación de dispositivos.
- Tiene la capacidad de activar varios instrumentos al mismo tiempo.

2.3.2 SEÑALES EN EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Cabe mencionar que las señales con magnitudes físicas que circulan a través del sistema DAQ, su magnitud y variación con el tiempo son las que tienen la información del proceso que genera. Estas señales pueden ser de dos tipos:

1. Señales digitales
2. Señales analógicas

Las señales digitales representan dígitos decimales o caracteres alfabéticos, esto es, variables discretas y niveles mediante una señal discontinua en el tiempo, esto quiere decir que las señales digitales no representan a valores proporcionales sino a dígitos. Existen sistemas que utilizan señales digitales de varios niveles, pero los más utilizados tienen únicamente dos niveles y se conocen como señales digitales binarias.

A estos dos niveles se los conoce como: alto (activado, On, "1") y bajo (desactivado, Off, "0").

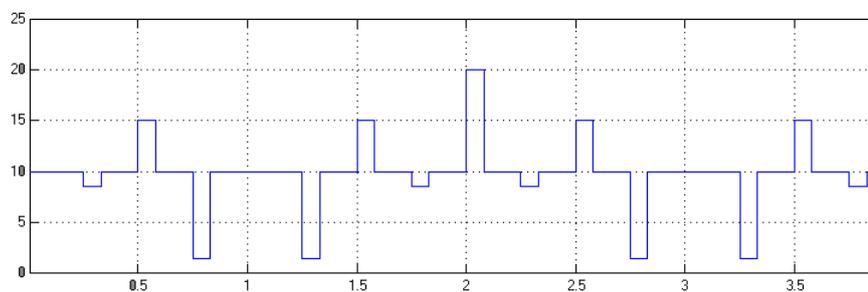


Figura 2.36 Señal digital

La señal digital es de dos tipos:

1. La señal On-Off, la cual lleva información de acuerdo al estado que posee; y,
2. La señal tren de pulsos, que es una serie de variaciones entre estados altos y bajos y la información depende del número de estados en un tiempo determinado.

Las señales analógicas son voltajes continuamente variables u ondas que pueden representar un número infinito de valores dentro del rango del dispositivo que produce, mide, graba o transmite dicha señal.

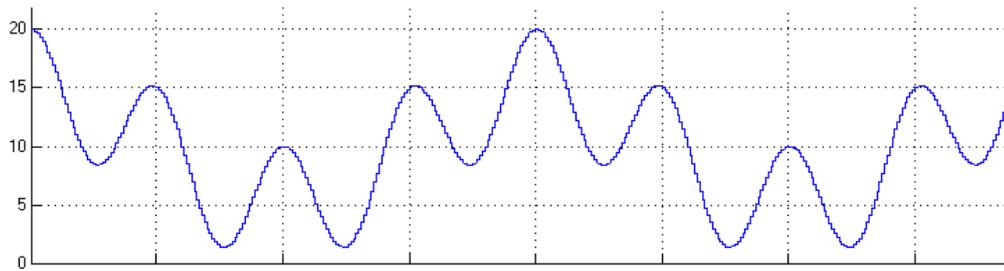


Figura 2.37 Señal analógica

Existen tres clases de señales analógicas:

1. Señales DC que son aquellas que presentan valores continuos durante el período de muestreo.
2. Señales en el dominio del tiempo que llevan la información de acuerdo a la forma como la señal varía en el tiempo.
3. Señal en el dominio de la frecuencia, que a diferencia de las señales en el dominio del tiempo, llevan la información en la frecuencia de la señal.

2.3.3 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

El acondicionamiento de señal es un conjunto de operaciones que transforma una señal no estandarizada a una señal estandarizada. Para la transmisión de la señal se necesita un transmisor de datos que mejora el envío de señales, por lo general se transmite corriente en lugar de voltaje ya que el voltaje va cayendo paulatinamente por la resistencia intrínseca del cable mientras que la corriente en malla se mantiene constante; otra razón para que comúnmente se transmita corriente es porque solo se necesita un punto de transmisión mientras que para la transmisión de voltaje se necesitan dos puntos.

En este punto, el proceso de acondicionamiento tiene las siguientes partes:

- Amplificación
- Excitación de transductores
- Linealización

- Aislamiento
- Filtraje

El proceso de **amplificación** consiste en aumentar el valor de la señal, gracias a esto se puede aumentar el uso del rango de digitalización y así maximizar la precisión de la señal digitalizada, además de aumentar la relación señal a ruido (SNR), que es uno de los objetivos primordiales de todo sistema.

La **excitación** es necesaria en los transductores que no generan su propia señal y necesitan una fuente externa de alimentación (proporcionada por el acondicionador de señal), para poder transmitir la señal.

La **linealización** es un proceso en el cual se encuentra una función equivalente más sencilla y fácil de procesar pues dependiendo del tipo de señal sensada y del sensor utilizado, se puede tener diferentes tipos de formas de señales que resultan difíciles de procesar.

El **aislamiento** entre los circuitos físicos y la computadora es muy importante, ya que en algunos casos la señal puede dañar al equipo por las corrientes que se forman debidas al campo magnético entre los cables.

La **filtración** es necesaria para eliminar señales parásitas que no son deseadas, estas señales pueden variar considerablemente el funcionamiento del sistema y se las debe filtrar para evitar este problema.

2.3.4 CONVERSIÓN ANALOGO-DIGITAL EN SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La conversión análogo-digital es un paso muy importante en la adquisición de datos. Mientras mayor sea el proceso de conversión, las frecuencias de muestreo serán mayores. Lo más importante es que el conversor tenga la capacidad de convertir la señal en palabras digitales en el menor tiempo posible, a este tiempo se le llama el **tiempo de muestreo**, que en adelante es inverso a la conocida **frecuencia de muestreo**. Un proceso rápido adquiere

más valores en un tiempo dado que un proceso lento, y esto permite representar mejor las señales.

La resolución es otro elemento importante en la conversión análogo-digital, la **resolución** es el cambio más pequeño del valor medido al cual el sensor responde, y en cuanto al conversor, es el número de bits que éste utiliza para representar una señal.

La **frecuencia de muestreo** es un paso previo a la conversión digital de los datos de la señal y esta determinada según el criterio de Nyquist, el cual indica que la frecuencia de muestreo debe ser mayor al doble valor de la frecuencia máxima de trabajo:

$$f_s \geq 2f_m$$

Ec 2.53

Para dar un ejemplo de muestreo, se toma una señal aleatoria la misma que será muestreada de la manera mostrada a continuación:

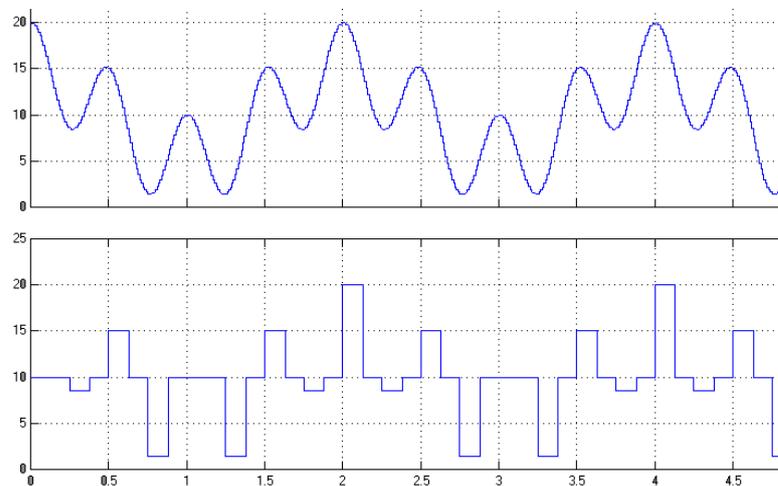


Figura 2.38 Señal muestreada

Los picos de la señal digital son los valores que la tarjeta DAQ toma para su análisis.

Después de ser muestreada, es necesario realizar la **cuantización** de la señal, en la cual se divide el rango analógico en un determinado número de intervalos (8bit, 12 bit, 16bit, etc.) como se muestra la figura 2.39:

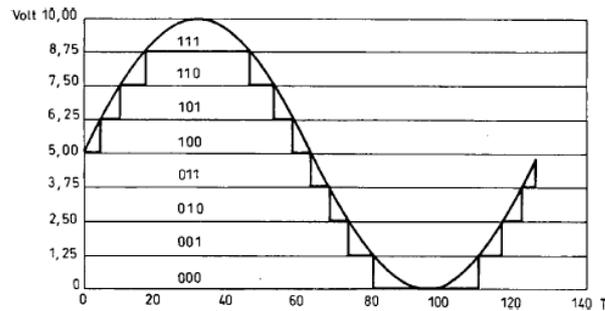


Figura 2.39 Señal cuantizada²³

Es obvio que la representación digital introduce un error de cuantificación, este error cada vez puede ser aminorado si se aumenta la resolución.

La **resolución** es el número de bits que utiliza el conversor análogo-digital junto al proceso de transformación analógica a digital para la representación de la señal. Mientras mayor es la resolución, mayor es el número de divisiones en los cuales el rango de voltaje es dividido y por esto es el mínimo cambio de voltaje detectado. La expresión que define a un conversor análogo-digital es la siguiente:

$$resolución = 2^n \quad \text{Ec 2.54}$$

Donde n es el número de bits del conversor. Si se conoce el valor de voltaje de escala completa V, que se requiere para producir una salida digital de todos los unos, se puede calcular la resolución mediante:

$$resolución = \frac{V}{2^n - 1} \quad \text{Ec 2.55}$$

²³<http://studies.ac.upc.es/ETSETB/ARISO/Treballs/Tardor2002/EquipoA/TARJETAS%20DE%20ADQUISICION%20DE%20DATOS.htm>, Resolución y muestreo, Español, 1999

Se debe tomar en cuenta que al incrementar el nivel de voltaje de una señal, debe también incrementarse el valor digital que genera el ADC, pero este incremento debe ser lineal. Si no existe esta relación lineal se considera una no linealidad, esto puede hacer que la representación digital de una señal sea alterada y al recuperar esta señal no sea la que se ha enviado, pues al realizar la cuantización, la señal puede tomar un valor digital que no le corresponde y perderse de esa manera información.

2.3.5 TARJETAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Las **tarjetas de adquisición de datos** son implementos que se conectan directamente al bus del computador para adquirir y procesar datos en tiempo real.

La función que cumplen normalmente las tarjetas de adquisición de datos son el enrutamiento y la amplificación de las señales, mientras que las funciones de cálculo, memoria y visualización las cumple el ordenador donde se encuentra conectada.

La principal ventaja de estas tarjetas es la posibilidad de ahorrarse instrumentación, así como la facilidad de instalación en comparación con otros tipos de módulos que requieren dispositivos adicionales para una mejor captura del ordenador.

El autómata programable o más conocido como PLC (Programmable Logic Controller), es muy usado en la industria para la automatización de procesos, debido a su naturaleza robusta es ideal para el ambiente industrial.

Consta de una unidad central de proceso la cual realiza el procesamiento de los datos exteriores tomados de los sensores, para este caso en particular las rosetas de deformación.

Dentro de las ventajas y desventajas de la utilización de un PLC se podrían mostrar como ventajas principales: fácil utilización, variedad y disponibilidad en el mercado, es capaz de ser utilizado en otras tareas es decir se lo puede utilizar con más de una máquina o proceso dependiendo de su capacidad.

Dentro de las desventajas tenemos: costo muy elevado, es posible conectarlo a un ordenador común pero esto significaría la adquisición de accesorios adicionales lo cual se traduciría en un incremento del costo, sub utilización del sistema debido a que la mayoría de los PLC's tienen una capacidad muy grande para las expectativas planteadas en el actual proyecto.

Existen también en el mercado los llamados PLC modulares los cuales son mucho más pequeños y con la capacidad de ser ampliados estos son más convenientes para nuestro proyecto debido a que el costo también se reduce.

La diferencia esencial entre un sistema modular y un PLC normal es el lugar en donde se realiza el procesamiento de la información puesto que en los sistemas modulares normalmente el procesamiento se lo realiza en un ordenador común, es decir no poseen un procesador por lo cual se hace indispensable su conexión a un computador.

Para la transmisión de los datos son necesarios accesorios adicionales tales como tarjetas, cables, antenas, etc. dependiendo de la vía de transmisión.

Dentro de estas alternativas se notan conexiones mediante el puerto serial de la computadora, redes de Ethernet, sistemas inalámbricos, entre otros, dependiendo de las necesidades de cada persona, particularizando y para este caso bastaría con una conexión mediante el puerto serial.

Se tiene, además, un instrumento del Laboratorio de Resistencia de Materiales llamado **Medidor de Deformaciones (DMD 20A)**, cuyas características más importantes se tiene:

- Mediciones para medio cuarto y puente completo.

- Factor de galga ajustable.
- Balance continuo (para el enceramiento).
- Pantalla digital de 4 dígitos y medio
- Salida Analógica.
- Puede trabajar de 10 a 15 horas con las baterías cargadas.
- Facilidad de operación debido a su tamaño (pequeño y liviano).
- Energiza el transductor (galga extensiométrica).

El DMD 20 A tiene dos funciones primordiales proporcionar poder al transductor en este caso la roseta de deformación y amplificar la señal medida.

Para las necesidades de este proyecto no es viable trabajar solamente con este aparato puesto que la señal deberá ser enviada al ordenador para posteriormente ser procesada en el mismo gracias a un software, por esta razón se debe tener otro aparato el cual realice la adquisición de datos y sea capaz de enviar dichos datos al computador.

Existe la posibilidad de realizar la adquisición ayudados de otro equipo para esto se ha escogido otro elemento del laboratorio, este elemento es la tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS de la empresa Measurement Computing, mostrada en la figura 4.5 gracias a esta tarjeta se logrará completar el proceso de adquisición de datos es decir toma de datos del sensor en nuestro caso las rosetas de deformación, amplificación y filtrado que lo realizaría el medidor de deformaciones (DMD 20 A), y por último la adquisición de la señal estaría a cargo de la tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS la cual además llevaría la señal al computador, por medio del puerto USB, es importante decir que dicha tarjeta no puede trabajar por si misma ya que no tiene el circuito necesario para el tratamiento de la señal es decir: amplificación, filtrado, acondicionamiento ,etc.



Figura 2.40 Tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS²⁴

Las características principales de esta tarjeta de adquisición de datos son presentadas a continuación:

- Valor máximo de voltaje en las entradas analógicas 40 Voltios.
- 8 canales analógicos de los cuales 4 son seleccionados por software.
- 8 entradas y 8 salidas digitales.
- El rango de voltaje máximo inyectado en las entradas ("1") es de 2 a 5.5 Voltios.
- El rango de voltaje mínimo inyectado en las entradas ("0") es de -0.5 a 0.8 Voltios.
- Voltaje máximo de salida es de 3 Voltios.
- Voltaje mínimo de salida es de 0.4 Voltios.

Dentro de las ventajas y desventajas que se puede citar en relación con esta última alternativa se tiene:

Ventajas:

- El costo de la tarjeta es bajo.

²⁴ Measurement Computing, Manual de Usuario PMD-1208LS, pp 2-1

- Se tiene toda la información necesaria puesto que existe el cilindro de pared gruesa que se encuentra en el laboratorio de resistencia de materiales que trabaja de forma similar.
- Es un aparato compacto y de fácil manejo
- Posee un puerto USB para la conexión al ordenador, dicho puerto entrega la corriente para el funcionamiento de la tarjeta minimizando así el riesgo de daño por sobrecarga eléctrica.
- Posee librerías las cuales trabajan con LabView programa conocido por los ejecutores de este proyecto.

Desventajas:

- La velocidad de muestreo es baja en comparación con otras tarjetas.
- La tarjeta presenta sensibilidad a la corriente estática.

Las desventajas que presenta esta tarjeta no influyen en los resultados y las ventajas son visibles.

2.4 SOFTWARE

2.4.1 GENERALIDADES

El desarrollo en la construcción y el diseño para las estructuras metálicas ha sido inmenso en los últimos 50 años, varios métodos han sido desarrollados para la optimización del tiempo y de los recursos. Con el nacimiento y la evolución de las computadoras fue posible la realización de cálculos de manera mas rápida y confiable y el cálculo de las estructuras no podía ser la excepción por lo cual se desarrollaron programas computacionales los cuales ayudan a los diseñadores a realizar dichos cálculos. En la actualidad existen en el mercado diversas opciones al momento de elegir un programa el cual nos ayuda al cálculo y diseño de las estructuras, cada uno de estos programas posee características particulares dependiendo de las necesidades del diseñador y del entorno , así los programas cada vez son creados de tal forma que sean simples y fáciles de manejar presentándose ante el usuario de una

manera amigable, se los crea de tal manera que consideren las mayor cantidad de variables que son necesarias para los cálculos estructurales y simulen las condiciones reales mas importantes tanto de: cargas, materiales, esfuerzos, etc. . La naturaleza de las estructuras permite la creación de los algoritmos de cálculo puesto que la mayoría de los cálculos estructurales son repetitivos para cada elemento, dichos cálculos no son en extremo complicados pero el problema radica en que en algunas estructuras la cantidad de elementos es demasiado grande como para realizar el cálculo a mano, por esta razón con la creación de dichos programas se permite el cambio en el diseño antes de que la estructura esté construida, varios programas computacionales permiten la simulación de la estructura dando así a los diseñadores una idea clara de cómo será la estructura después de construida, esto permite un gran ahorro de tiempo y dinero y además deja sentado un patrón de comparación de las múltiples alternativas de solución.

En nuestro país se viene usando desde hace algunos años dichos programas computacionales por las evidentes ventajas que estos presentan, siendo usados en la mayoría de empresas dedicadas al cálculo de estructuras metálicas por lo que el conocimiento de su funcionamiento en la actualidad es indispensable.

2.4.1.1 Método de los elementos finitos

La gran mayoría de estos programas funciona en base al MEF (Método de los Elementos Finitos), cuyo funcionamiento se basa en:

Preproceso.- En esta etapa se define la geometría de la estructura, se define materiales, carga, secciones, etc, para su posterior división en una malla de elementos finitos de acuerdo con las características antes definidas.

Proceso de cálculo.- En esta etapa se realizan cálculos de cada uno de los elementos finitos.

Presentación.- Se muestra los resultados de los cálculos anteriormente realizados.

2.4.2 IMPORTANCIA DE LA TECNOLOGÍA INFORMÁTICA PARA EL CÁLCULO ESTRUCTURAL

En el cálculo de una estructura se deben tener conocimientos básicos de matemática, física, y luego más tarde conocimientos prácticos, al conjugar todos estos conocimientos se logra entender y prever el comportamiento de materiales, técnicas de cálculo y las fuerzas existentes en la naturaleza, para que el diseño estructural sea aplicable en la vida real.

En épocas pasadas se realizaban cálculos con la ayuda de tablas, gráficos con el fin de simplificar los cálculos analíticos y de obtener resultados más precisos y confiables. En la actualidad dichas técnicas se han simplificado con la ayuda de los paquetes informáticos obteniendo resultados más precisos que los que una mente humana podría obtener, el cansancio y la cantidad de información prima un papel importante, por tal motivo dicha tarea resultaba larga y engorrosa.

Por lo tanto la informática es una herramienta poderosa e indispensable hoy en día en casi todas las actividades que requieren de alta tecnología, razón por la cual se entiende su importancia.

2.4.3 DEFINICIÓN

Un programa computacional o en inglés software es un producto o programa de soporte lógico, consta de procedimientos, datos debidamente especificados para el suministro a un cliente, dicho conjunto debe satisfacer las necesidades de sus operantes, tanto de manera estrictamente técnica como en la interfaz.

2.4.4 DISPONIBILIDAD

En la actualidad existe en el mercado una gran variedad de programas que ayudan al cálculo estructural entre ellos tenemos:

- SAP2000
- Robot Millenium
- STAAD Pro
- ANSYS
- COSMOS/M
- TOCHNOG
- Tricalc
- STR Análisis
- FreeWare para el cálculo de estructuras
- Etabs
- Safe

Entre los más conocidos y difundidos alrededor del mundo.

ROBOT MILENIUM.- Un programa completamente en español con características muy parecidas a SAP2000, pero con la ventaja de una mayor facilidad de utilización y una interfaz más estilizada, además este paquete computacional posee la opción de generación de planos.

STAAD PRO.- Este es el típico programa estructural mediante elementos finitos, su interfaz y la presentación de datos es mucho mas estilizada que los anteriores.

ANSYS.- Es uno de los programas computacionales mas conocidos en EE.UU. y en Europa, en este programa es posible diseñar todo tipo de estructura mediante el método de elementos finitos, en el también se puede realizar cálculos relacionados con transferencia de calor, fluidos, entre otros.

COSMOS/M & WORKS.- Es un programa basado en el método de elementos finitos con un entorno gráfico mejorado en relación a sus otros competidores, la esencial ventaja de este programa es que con el se puede interactuar con otros paquetes computacionales CAD (Diseño Asistido por computadora por sus siglas en ingles) como por ejemplo SolidWorks, de

modelado tridimensional, pero también se pueden utilizar Autodesk Mechanical Desktop, Inventor, MicroStation Modeler, etc.

Este programa además proporciona opciones de cálculo referente a tensiones, frecuencias, parámetros térmicos etc. Es capaz de analizar piezas o ensamblajes y en el se puede definir el tipo de contacto entre cada uno de los componentes, posee un potente gestor de datos, el motor de calculo es mas rápido y usa menor capacidad del sistema que otros programas similares. La detección de fallas puede ser calibrada de acuerdo al grado de seguridad deseado.

Gracias a que este programa puede interactuar con Solid Works el manejo es rápido y muy fácil de utilizar.

SAP2000.- Dentro de nuestro país el más conocido es SAP2000, que según los conocedores es el programa líder para el cálculo de estructuras.

Un excelente programa de cálculo estructural por el método de elementos finitos, es de la familia del SAP90 muy utilizado un par de décadas atrás, la versión actual esta integrada completamente para los actuales sistemas operativos, mediante este programa es posible modelar complejas formas estructurales , definir gran cantidad de estados de carga, definir el peso propio de los elementos, definir secciones de los diversos elementos pudiendo cambiar su forma y material, y calcular y comprobar estructuras de acuerdo con las normativas vigentes (LRFD, AISC, Euro, etc.)

De manera general este programa se lo puede encontrar en diversas versiones, de acuerdo con la necesidad del diseñador, he inclusive existe una versión educacional en circulación gratuita por Internet.

La naturaleza de este programa permite la importación y la exportación de datos, tanto en textos como en imágenes, con lo cual puede interactuar con otros programas de diseño, hojas electrónicas, modeladores, etc.

SAP2000 posee un entorno gráfico muy amigable y además posee un archivo de geometrías determinadas gracias a esto y además a la determinación de una grilla es muy fácil definir la geometría a utilizarse.

SAP2000 posee también la opción de importar datos de otros programas generadores de gráficos tales como AutoCad, esto facilita aun más la definición de la geometría.

Para la definición de cargas SAP2000 tiene cargadas algunas de las cargas más comunes las cuales el usuario puede definir tales como son:

- Carga Viva
- Carga Muerta
- Carga de Viento
- Carga de Nieve

Inclusive se puede tomar en cuenta la carga propia de los elementos. Luego SAP2000 realiza un cálculo en base a las combinaciones de cargas definidas en el programa lo que el usuario a de hacer es solamente elegir la combinación de cargas mas apropiada o incluso puede definir una nueva de acuerdo a sus necesidades.

Este programa trabaja esencialmente con acero y con hormigón pero presenta la posibilidad de definir las características para cualquier otro material.

En lo que se refiere a las secciones SAP2000 posee una base de datos con las secciones definidas por la AISC pero el usuario puede definir tamaños y formas de diferentes secciones si fuera necesario.

Los resultados logrados después del análisis realizado por SAP2000 son muy claros ya que este programa presenta:

- Diagramas de momento flector, fuerza cortante, torque, y fuerzas axiales.
- Relaciones demanda-capacidad de manera grafica de acuerdo con la normativa usada.

- Diagramas totales de fuerzas combinadas a lo largo de la estructura.
- Relaciones de Esbeltez de cada uno de los elementos
- Deformación de la estructura de manera grafica.
- Deformación de cada uno de los elementos que componen la estructura.

Además SAP2000 genera una base de datos con todos los parámetros antes mencionados, dicha base de datos puede ser exportada a otros programas computacionales.

LABVIEW.- Es un programa creado para la formulación de líneas de código, realiza una función muy similar a C++ o Visual Basic pero mucho más moderno. Las librerías y demás herramientas que posee lo hacen mucho más fácil de usar y además este programa incluye además opciones de simulación y de adquisición de datos más modernas por lo cual su utilización se simplifica convirtiéndolo en una herramienta poderosísima para la consecución de los objetivos planteados en esta tesis.

El objetivo general de este paquete computacional es programar sistemas, pero debido a la inclusión de otras librerías y herramientas también es capaz de adquirir datos de sensores externos para su subsiguiente utilización.

Su interfaz con el usuario es muy amigable ya que simula una consola de instrumentos por lo que es llamada “front panel” (panel frontal) dicha consola posee opciones tales como botones, gráficos, y posee una gran ventaja ya que la programación es mediante diagramas facilitando así el desarrollo del proyecto. Cada uno de los sistemas diseñados puede ser analizado en partes con la finalidad de simplificar el análisis la comprensión misma de un proyecto, luego se puede unir cada uno de los pasos para la conformación del sistema total. Debido a dicha programación por partes dichas partes pueden ser usadas en otros sistemas es decir se puede formar una base de datos con subsistemas que el usuario usa a menudo.

El lenguaje de programación usado es el llamado G este lenguaje facilita las dificultades de programación debido a su característica grafica. Dentro de

este tipo de programación se tienen tres partes principales el panel frontal, el diagrama de bloques y el llamado conector.

De manera general el panel de control es una interfaz con el usuario en donde se encuentran los instrumentos y se visualizan las simulaciones, el diagrama de bloques es el lugar en donde el usuario realiza la codificación propiamente dicha, y el conector tiene la función de hacer interactuar las dos primeras partes antes mencionadas.

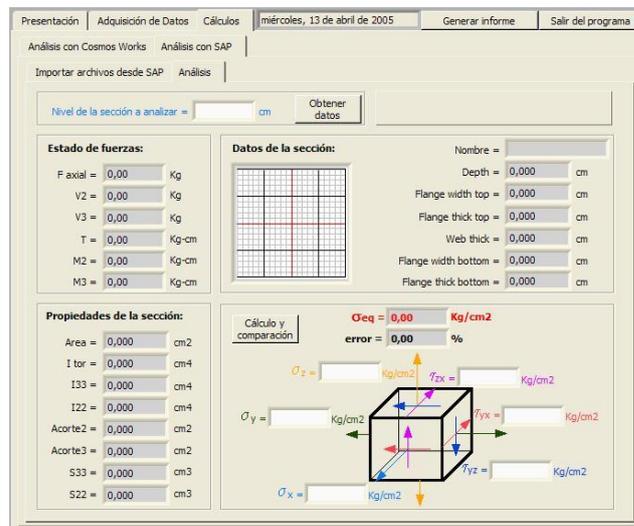


Figura 2.41 Panel frontal

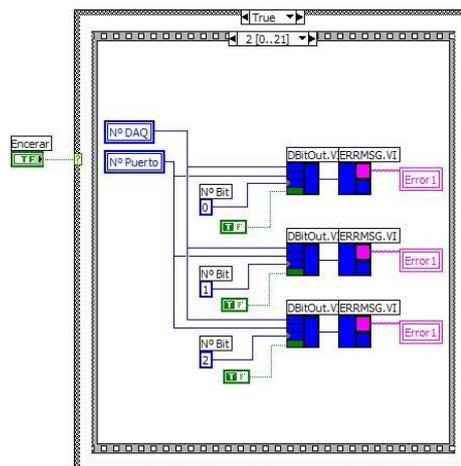


Figura 2.42 Diagrama de bloques

Para comenzar se debe conocer el lenguaje G, luego se prosigue con la formulación del sistema y luego con su respectiva comprobación. Es importante

señalar que los datos de entrada pueden ser tomados por uno o varios sensores en el exterior como ya se dijo y hacer interactuar dichos datos con la codificación antes mencionada, y enviar los datos de salida también a periféricos exteriores.

2.4.5 SELECCIÓN DEL SOFTWARE A UTILIZARSE

En nuestro país la disponibilidad y la poca difusión de estos programas computacionales ha obligado a los diseñadores a optar por los paquetes computacionales más conocidos, desde este punto de vista SAP2000 es el programa estructural más conocido y con mayores ventajas sobre los otros antes detallados.

Este programa además es muy conocido en sector constructivo del país y la mayoría de compañías dedicadas al cálculo de estructuras metálicas lo conocen y lo usan, por lo cual es el programa que se ha elegido para realizar el análisis estructural del pórtico del vibróforo de baja frecuencia.

Es importante señalar que las personas confían en los paquetes computacionales que conocen y solo esta confianza podrá otorgar a este proyecto un carácter serio y aplicable dentro de los estándares normales de la construcción de estructuras metálicas en el país.

Para el diseño y verificación de los cambios que se realizarán al pórtico del vibróforo de baja frecuencia se utilizara Cosmos/W puesto que es un programa muy potente y con gran variedad de opciones las cuáles servir mucho al momento del cálculo de cada una de las piezas y del conjunto.

La gran disponibilidad de información sobre este paquete computacional será de gran ayuda al momento del diseño y la disponibilidad del mismo ayudara a realizar un cálculo preciso y libre de errores.

LabView es un programa de gran utilidad para el desarrollo del proyecto de tesis ya que en este programa serán adquiridos y procesados los datos que

entreguen las rosetas de deformación, razón por la cual es de vital importancia su conocimiento y buen manejo.

En el país es utilizado en algunas empresas debido a las bondades que este ofrece, debido a dichas bondades se lo ha elegido para ser utilizado.

2.4.6 PROSESAMIENTO DE DATOS

Ya se explico en la parte concerniente a sistema de adquisición de datos la manera mediante la cual se trataría los datos recibidos de las rosetas de deformación pero es también importante entender como estas señales digitales van a ser tratadas y mediante cual paquete computacional se podría lograr este objetivo, para entender esto es indispensable entender que de manera general se tienen dos tipos de datos, los primeros provenientes de un programa de calculo estructural para este caso particular SAP2000 y otros datos provenientes de sensores externos para este caso rosetas de deformación, ya que estos dos tipos de datos son los que deberán ser comparados y con los cuales se trabajara para el desarrollo medular del presente proyecto.

Ya entendido lo antes mencionado definiremos a los datos provenientes del paquete estructural como “datos teóricos” y a los datos provenientes de los sensores como “datos reales”.

2.4.6.1 Procesamiento de datos “teóricos”

El programa SAP2000 crea una hoja de datos y resultados en donde se encuentra toda la información del modelo en el cual se ha trabajado, dicha hoja puede ser abierta desde cualquier programa que tenga la capacidad de reconocer caracteres tales como letras, números, y signos tal es el caso de las hojas de calculo. La ventaja de exportar dichos datos a una hoja de calculo es que se puede obtener los datos de manera ordenada en forma de una matriz con lo cual se facilita el posterior envío de dichos datos al programa comparador para nuestro caso LabView.

Otra opción existente es enviar los datos directamente desde SAP2000 a Labview, en donde posteriormente se debería crear un algoritmo el cual sea el encargado de ordenar los datos obtenidos de SAP2000 la selección del método a usarse depende de muchos factores tales como son facilidad, practicidad, y factibilidad todo esto se deberá tomar en cuenta en el momento de elegir una alternativa de solución.

En lo que se refiere al programa receptor de datos para nuestro caso LabView es capaz de recibir datos de otros programas y en su manual se detallan los pasos necesarios para la consecución de esta empresa, pero de manera general existen funciones las cuales permiten enviar y recibir datos alfanuméricos.

2.4.6.2 Procesamiento de datos “reales”

Para la adquisición de los datos reales el programa LabView posee una base de datos con los controladores de los principales sistemas de adquisición de datos (tarjetas módulos, etc.) con lo cual se hace posible la transmisión de dicho datos a la computadora. Si dichos controladores no se encuentran disponibles en dicha base de datos se puede acceder a la dirección electrónica particular de cualquiera de los fabricantes de este sistema y copiar dichos controladores. Si esto tampoco es posible por cualquier razón LabView posee la capacidad de crear dichos controladores los detalles de esto se los puede encontrar en el manual del usuario de dicho paquete computacional.

Recordemos que los datos provenientes del sistema del “adquisición de datos” son a manera de señales digitales LabView posee funciones especiales mediante las cuales el usuario puede obtener dichas señales o enviarlas luego las transformará para que las mismas puedan ser procesadas.

De esta manera se lograría tener tanto los datos “teóricos” como “reales” para la comparación y procesamiento base fundamental en el desarrollo del proyecto planteado.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

3.1 ANÁLISIS DEL PÓRTICO UTILIZANDO EL SOFTWARE ADECUADO

Este capítulo está enfocado a realizar el análisis estructural del pórtico del vibróforo de baja frecuencia con el fin de determinar la carga permitida sobre dicho pórtico así como los puntos mas convenientes en donde se colocaran las rosetas de deformación para recoger datos significativos y con un margen de error pequeño. Antes de dicho cálculo se realizarán algunas modificaciones al pórtico antes mencionado con el fin de poseer una combinación de cargas general de esta manera será posible simular lo que en realidad sucedería en una estructura metálica.

Primeramente se definirán las variables de entrada tales como cargas, geometría, materiales etc. Estos datos serán introducidos en el programa de cálculo estructural con lo que se podrá calcular los datos de salida así como son esfuerzos, deflexiones, etc.

Una vez comprobado el modelo se procederá al diseño de los accesorios necesarios para la modificación del pórtico ayudándonos de otro programa computacional basado en el método de elementos finitos, esto con el fin de contar con datos lo más cercanos a la realidad gracias a las simulaciones que se realizarán.

Luego se proseguirá con la construcción de los accesorios para lo cual se dispondrá antes de planos, diagramas de proceso etc, con el fin de realizar la construcción de una manera técnica y optimizada. Por último se procederá a la colocación de las rosetas de deformación en los puntos revelados por el programa y a la implementación de los accesorios antes diseñados.

El programa estructural el cual será usado es SAP2000, las razones para su utilización están definidas en el capítulo II en la parte concerniente a “software”.

3.1.1 CÁLCULO DE CARGAS

Lo primero que se debe tomar en cuenta al momento de calcular una estructura metálica es la definición correcta de las cargas tanto en intensidad como ubicación. El proceso normal de cálculo de estructuras metálicas consta de 3 partes principales primero la definición de cargas de todo tipo, luego el cálculo de esfuerzos, deformaciones, etc. y por último selección de las secciones tanto en material como en forma, longitud etc. Para nuestro caso en particular y debido a la existencia del pórtico la metodología ha cambiado, en este caso los datos de entrada son: la geometría y dimensiones de los elementos del pórtico, el material, y el tipo de uniones. Con todos estos datos y mediante un proceso de iteración se ha calculado la intensidad de la fuerza que ejercerá en el pórtico de baja frecuencia el pistón hidráulico. La ubicación de dicha fuerza en el pórtico ha sido cambiada de su posición original para conseguir un estado general de carga, se ha movido la carga una longitud de 20 cm. sobre la viga que porta al pistón hidráulico y se ha hecho rotar dicha carga 15° alrededor del eje que esta viga define.

El desplazamiento de la carga 20cm sobre el eje que porta al pistón fue determinado de manera arbitraria, debido a que el objetivo de moverla era crear una combinación de cargas triaxial, este objetivo se ha conseguido con dicho desplazamiento y no se ha cargado en exceso ninguna de las columnas, por lo tanto el desplazamiento correspondiente a 20cm, esta debidamente justificado.

Para lo referente al ángulo de giro que se ha definido, es importante señalar que se lo obtuvo de un respectivo análisis cinemático del sistema, dicho análisis basó sus cálculos en diferentes factores tales como factibilidad de construcción, para lo cual se trató de trabajar con ángulos comunes ya sea 15°, 30°, 45°, etc.

Además se consideró el espacio disponible en el laboratorio, la estética, la magnitud de la carga en cada una de las componentes de la fuerza, etc. Con todas estas consideraciones se llegó al modelo final como se indica en la figura 3.1.

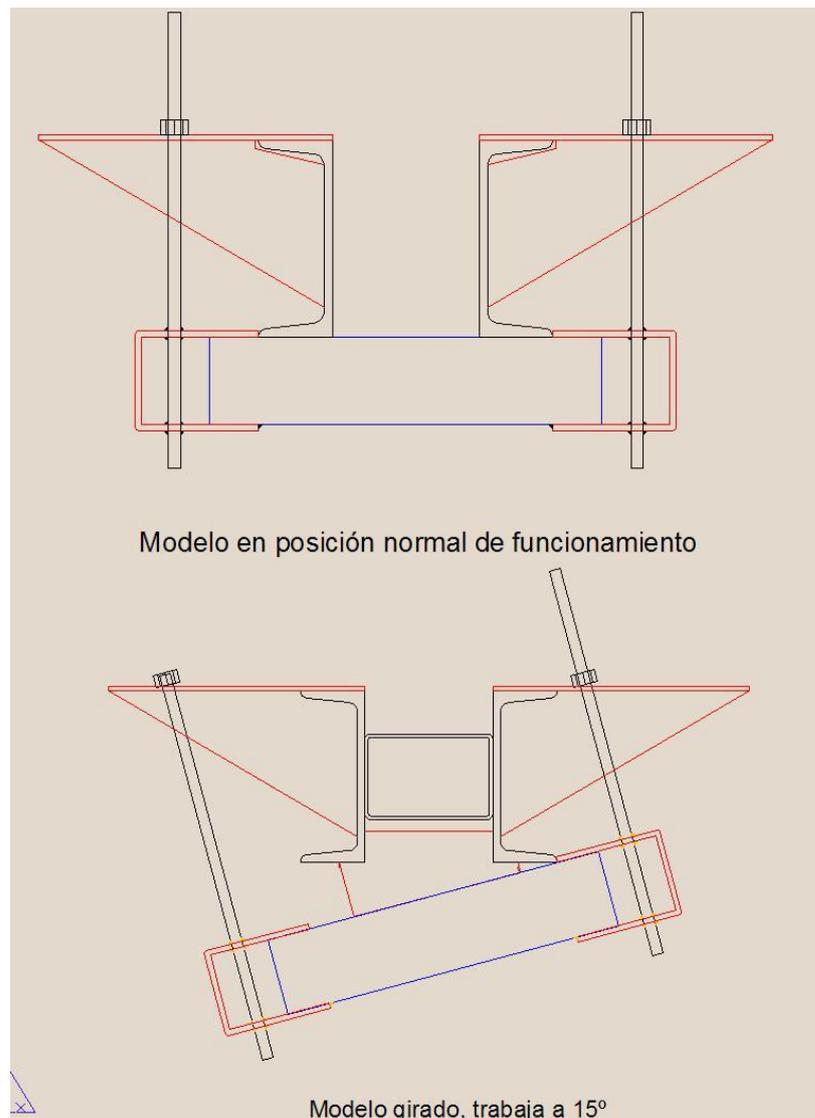


Figura 3.1 Análisis Cinemático del pórtico modificado.

El ángulo elegido fue de 15° y las demás magnitudes geométricas se detallan en los planos constructivos que se los puede encontrar en el Anexo A.

La iteración realizada para el cálculo de la intensidad de la fuerza se ha basado en 3 criterios principales:

- Factibilidad puesto que el pistón hidráulico es capaz de generar una carga máxima de 20 Ton (carga estática) , pero en la actualidad se ha definido que el cilindro trabaja con una carga máxima de 10 Ton debido a factores tales como tiempo de operación de la máquina, cantidad de aceite en el sistema óleo- hidráulico, seguridad, etc.
- Resistencia puesto que al cambiar la dirección de la carga el pórtico podría no resistir las componentes creadas en otros ejes y sus elementos podrían fallar con dichas cargas.
- Buena apreciación de las deformaciones puesto que como se explicó en el capítulo II los sensores que serán utilizados poseen cierto rango en donde pueden medir deformaciones sin errores exagerados, debemos lograr que las deformaciones lleguen a dichos rangos.

Para el cálculo de la fuerza que se ejercerá con el pistón hidráulico se realizará una serie de iteraciones a continuación se presenta una tabla con todos los valores de fuerza en las 2 direcciones dichos valores serán cargados en SAP2000 con el fin de determinar si el pórtico resiste la carga impuesta:

Tabla 3.1 Interacción de la fuerza

| F | Fy | Fz |
|----------|-----------|-----------|
| 20000 Kg | 5176 Kg | 19319 Kg |
| 10000 Kg | 2588 Kg | 9659 Kg |
| 8000 Kg | 2071 Kg | 7727 Kg |
| 7000 Kg | 1812 Kg | 6761 Kg |
| 6000 Kg | 1553 Kg | 5796 Kg |
| 5000 Kg | 1294 Kg | 4830 Kg |
| 4500 Kg | 1165 Kg | 4347 Kg |
| 4000 Kg | 1035 Kg | 3864 Kg |
| 3500 Kg | 906 Kg | 3381 Kg |
| 3000 Kg | 776 Kg | 2898 Kg |

De la tabla 3.1 se toman los datos y se los coloca en un cuadro para editar la magnitud de la carga como se nota en la figura 3.2 en este gráfico se trabaja con una carga de 10000 Kg., una vez realizado el cambio notado en la figura 3.3 se prosigue a la validación, para este caso se nota claramente que en la estructura existen valores demanda-capacidad mayores que 1 figura 3.4.

| Joint Forces | |
|----------------------------------|------------------------|
| Load Case Name | CILINDRO |
| Loads | |
| Force Global X | 0. |
| Force Global Y | 2588 |
| Force Global Z | 9659 |
| Moment Global XX | 0. |
| Moment Global YY | 0. |
| Moment Global ZZ | 0. |
| Options | |
| <input type="radio"/> | Add to existing loads |
| <input checked="" type="radio"/> | Replace existing loads |
| <input type="radio"/> | Delete existing loads |
| OK | |
| Cancel | |

Figura 3.2 Introducción de las componentes de la fuerza en SAP2000

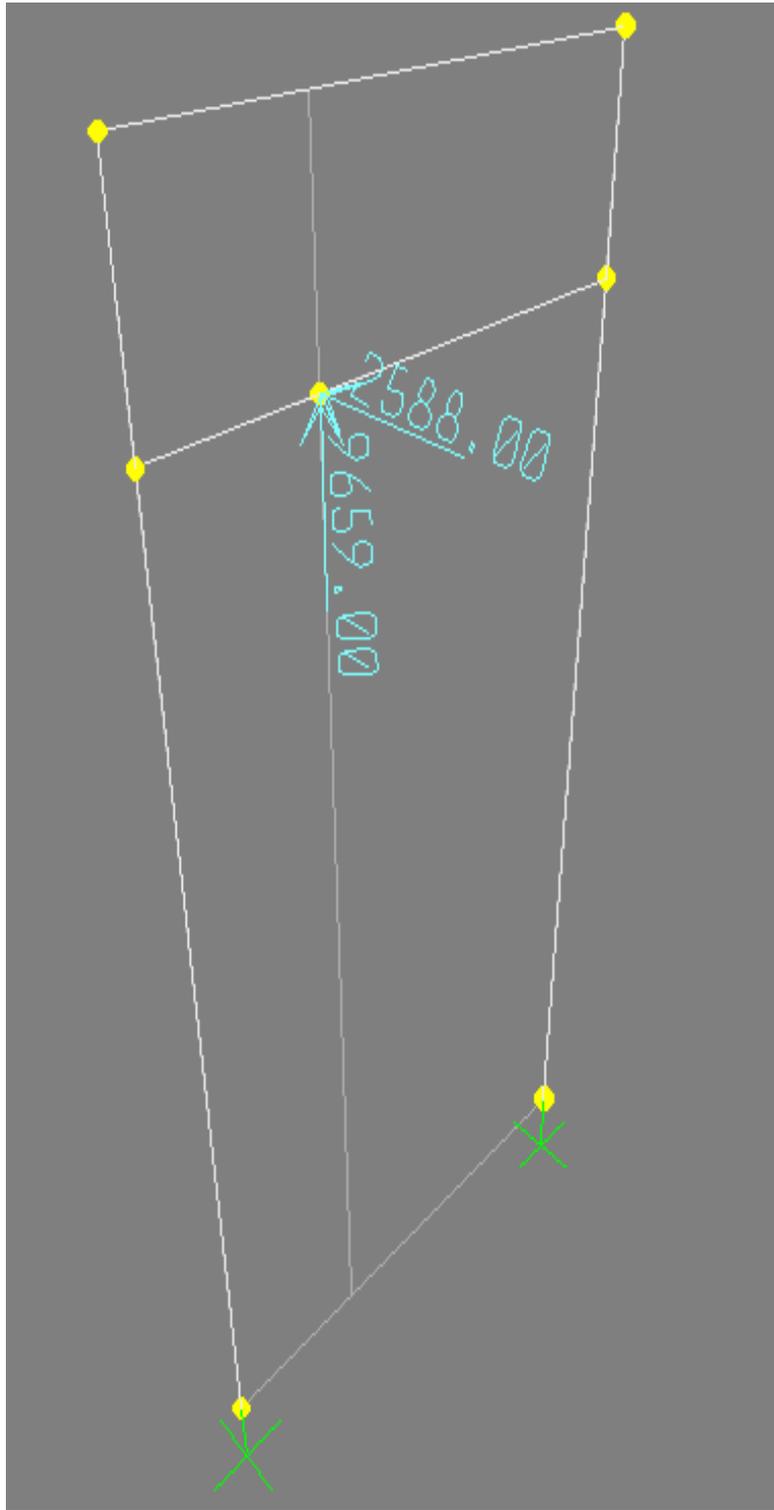


Figura 3.3 Intensidad y posición de la carga con 10000Kg.

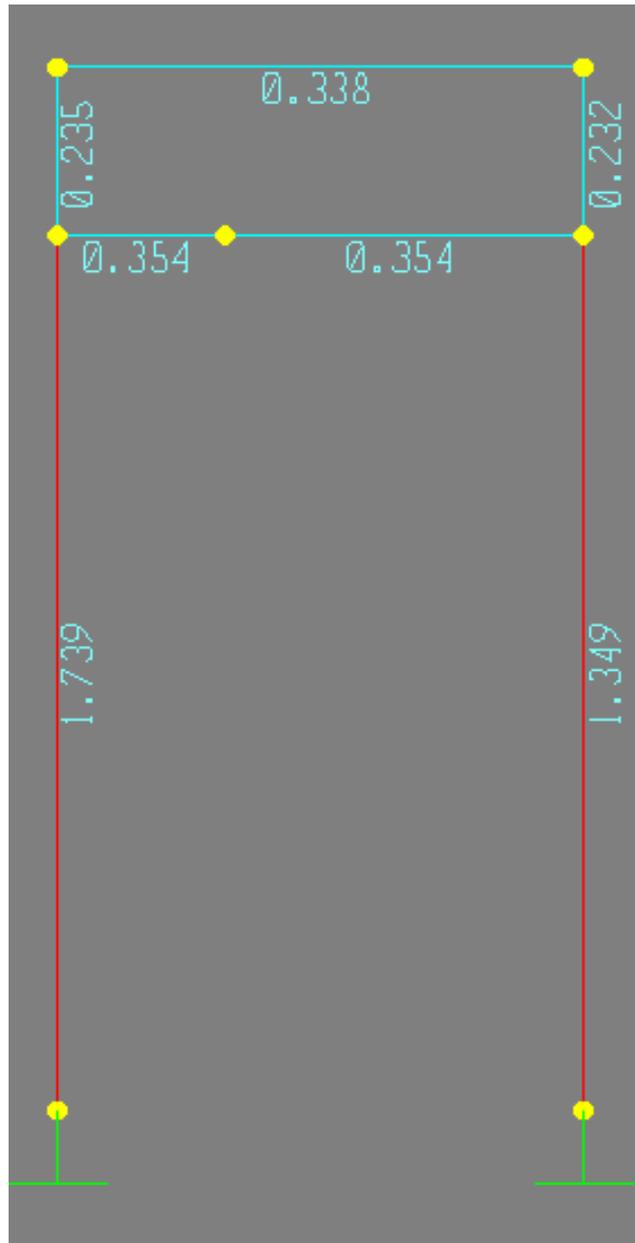


Figura 3.4 Valores de demanda- capacidad.

En la tabla 3.1 se tiene el valor de la última interacción y se define que la carga máxima con la cual se trabajará es de 4000 Kg. En la figura 3.5 se determina que todos los valores de demanda capacidad están dentro de los márgenes adecuados de funcionamiento.

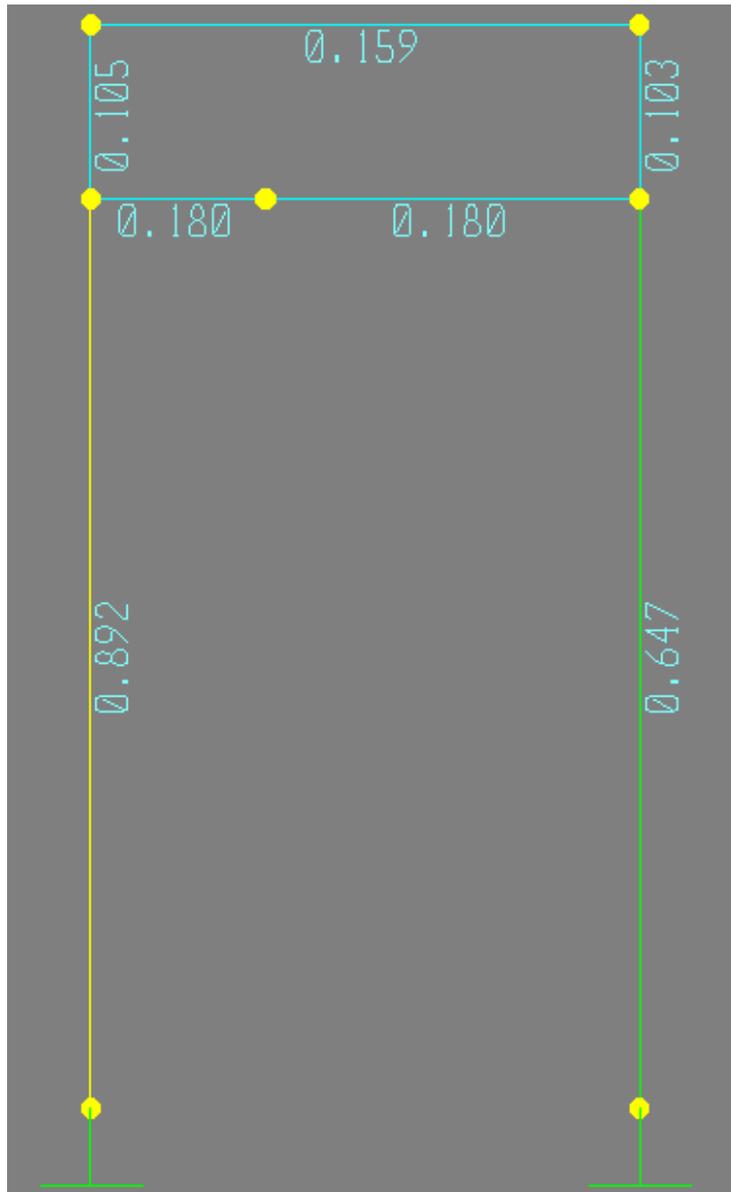


Figura 3.5 Valores de demanda- capacidad para 4000 Kg.

Se han realizado algunas simplificaciones para realizar el cálculo de manera más rápida, por ejemplo se ha omitido el peso del pistón hidráulico y de sus accesorios puesto que es insignificante ante la carga que se ejercerá sobre el pórtico, además se ha considerado que la viga que porta al pistón está conformada únicamente por dos perfiles UPN200, despreciando en perfil rectangular de 100X150 entre ellos.

3.1.2 CÁLCULO DE ESFUERZOS

SAP2000 permite calcular los esfuerzos existentes en cada uno de los elementos pertenecientes a una estructura y presenta los datos en una tabla de resultados figura 3.7. En dicha tabla se detalla el tipo de fuerza ya sea: cortante, axial, etc. y el tipo de esfuerzo que cada una de estas produce en el elemento, por último presenta un factor de demanda-capacidad menor a uno para cada tipo de carga, los suma y de esta manera logra obtener el valor de demanda-capacidad total que obligatoriamente será menor que uno para cada uno de las combinaciones de carga definidas por el programa según lo recomendado por el código AISC-ASD89, para nuestro caso se tiene una sola combinación de cargas con el nombre DSLT2 para cada una de las divisiones de la viga tal como se muestra en la figura 3.6.

| COMBO ID | STATION LOC | /---MOMENT INTERACTION CHECK---/ | /-MAJ-SHR---MIN-SHR-/ RATIO | RATIO |
|----------|-------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------|
| DSTL2 | 0,00 | 0,892 (T) = 0,087 + 0,789 + 0,015 | 0,050 | 0,003 |
| DSTL2 | 12,24 | 0,835 (T) = 0,087 + 0,735 + 0,012 | 0,050 | 0,003 |
| DSTL2 | 24,49 | 0,778 (T) = 0,087 + 0,681 + 0,009 | 0,050 | 0,003 |
| DSTL2 | 36,73 | 0,721 (T) = 0,088 + 0,627 + 0,006 | 0,050 | 0,003 |
| DSTL2 | 48,98 | 0,664 (T) = 0,088 + 0,573 + 0,003 | 0,050 | 0,003 |

Figura 3.6 Factores demanda-capacidad para cada punto de la columna.

| AISC-ASD89 STEEL SECTION CHECK | | Units: Kgf-cm | |
|--|-------------------------|-------------------|------------|
| Frame ID: 1 | Station Loc: 0.000 | Section ID: BOXB2 | |
| Element Type: Moment Resisting | Classification: Compact | | |
| L=183.670 | | | |
| A=19.360 i22=328.553 i33=617.313 | | | |
| s22=65.711 s33=82.308 r22=4.120 r33=5.647 | | | |
| E=2038901.916 fy=2531.051 | | | |
| P-M33-M22 Demand/Capacity Ratio is 0.892 = 0.087 + 0.789 + 0.015 | | | |
| STRESS CHECK FORCES & MOMENTS | | | |
| Combo | DSTL2 | P | M33 |
| | | 2568.070 | 108521.516 |
| | | | M22 |
| | | | -1675.644 |
| | | | U2 |
| | | | 605.863 |
| | | | U3 |
| | | | -26.605 |
| AXIAL FORCE & BIAxIAL MOMENT DESIGN (H2-1) | | | |
| | | Fa | Fa |
| | | Stress | Allowable |
| Axial | | 132.648 | 1265.378 |
| | | | Ft |
| | | | 1518.630 |
| | | Fb | Fb |
| | | Stress | Allowable |
| Major Bending | | 1318.475 | 1670.493 |
| Minor Bending | | 25.500 | 1670.493 |
| | | | Fe |
| | | | 6984.258 |
| | | | Cm |
| | | | Factor |
| | | | 1.000 |
| | | | K |
| | | | Factor |
| | | | 1.000 |
| | | | L |
| | | | Factor |
| | | | 1.192 |
| | | | Cb |
| | | | Factor |
| | | | 1.777 |
| SHEAR DESIGN | | | |
| | | Fv | FU |
| | | Stress | Allowable |
| Major Shear | | 50.489 | 1012.420 |
| Minor Shear | | 3.326 | 1012.420 |
| | | | Stress |
| | | | Ratio |
| | | | 0.050 |
| | | | 0.003 |

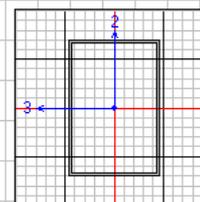


Figura 3.7 Tabla de resultados para columna No 1

Según el código AISC-ASD89 existen ciertos factores importantes a tomarse en cuenta al momento del diseño de una estructura metálica tales como son:

- Coeficiente de momento (Cm)
- Coeficiente de flexión (Cb)
- Factor de longitud efectiva (k)
- Coeficiente de longitud (Lenght ratio, Lr)

Dichos factores deben ser determinados en base al código y a las condiciones particulares de cada estructura, para el caso particular del pórtico del vibróforo de baja frecuencia se comprobó que dichos factores fueran calculados de acuerdo con la normativa descrita en la sección V del código AISC-ASD89, luego se determinó el valor del coeficiente de longitud y se lo reemplazó en la ventana mostrada en la figura 3.8.

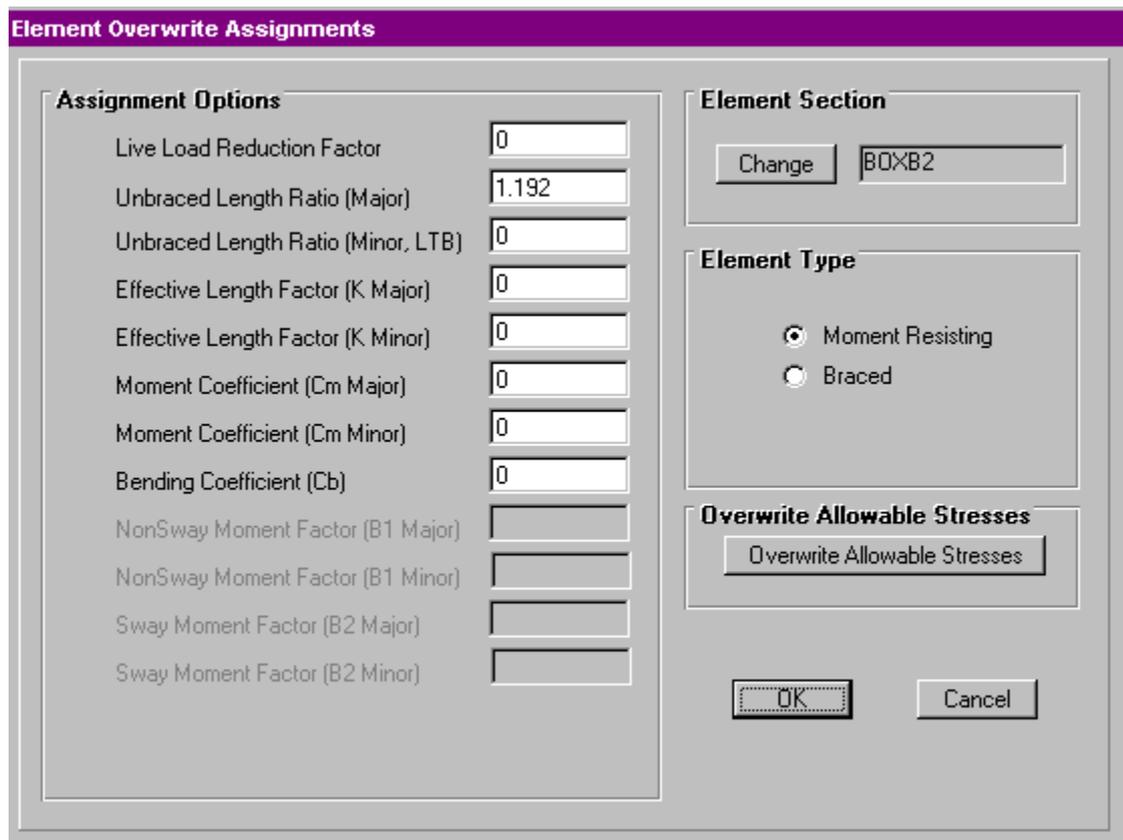


Figura 3.8 Modificación del coeficiente de longitud.

Dicho factor de longitud fue el único que se lo debió recalculer debido a las condiciones particulares de la estructura, a continuación se detalla dicho cálculo con la ayuda de la ecuación 2.13:

$$Lr = \frac{Lt}{Lu}$$

Por lo cual se tiene:

$$Lr = \frac{242.0cm}{203.0cm}$$

$$Lr = 1.1923$$

También se calculó el coeficiente de momento (C_b) para comprobar su valor a manera de ejemplo según la ecuación 2.12 así se tiene:

$$Cb = 1.75 + 1.05 \frac{Ma}{Mb} + 0.3 \left(\frac{Ma^2}{Mb} \right) \leq 2.3$$

$$Cb = 1.75 + 1.05 \frac{1.454 \text{kip} \cdot \text{pu lg}}{94.193 \text{kip} \cdot \text{pu lg}} + 0.3 \left(\frac{1.454 \text{kip} \cdot \text{pu lg}^2}{94.193 \text{kip} \cdot \text{pu lg}} \right) \leq 2.3$$

$$Cb = 1.77$$

Con lo que se comprueba el valor dado por SAP2000

A continuación se detalla el cálculo de coeficiente demanda-capacidad para la columna crítica:

Cálculo de elementos compactos con ecuaciones 2.1 y 2.2:

$$b = bf - 3tf$$

$$b = 150 \text{mm} - 3(5 \text{mm})$$

$$b_{22} = 135 \text{mm} = 13.5 \text{cm}$$

$$b_{33} = 85 \text{mm} = 8.5 \text{cm}$$

$$\frac{b}{tf} \leq \frac{190}{\sqrt{Fy}}$$

$$\frac{135 \text{mm} \frac{1 \text{pu lg}}{25.4 \text{mm}}}{5 \text{mm} \frac{1 \text{pu lg}}{25.4 \text{mm}}} \leq \frac{190}{\sqrt{36 \text{ksi}}}$$

$$27 \leq 311.66$$

Por lo tanto la sección es compacta.

Cálculo de Esfuerzos con las ecuaciones 2.3, 2.4 y 2.5:

$$fa = \frac{P}{A}$$

$$fa = \frac{5.66 \text{kip}}{3.001 \text{pu lg}^2} = 1.887 \text{ksi} = 132.640 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$fb_{xx} = \frac{M_{xx}}{S_{xx}}$$

$$fb_{33} = \frac{94.193 \text{kip} \cdot \text{pu lg}}{5.023 \text{pu lg}^3} = 18.753 \text{ksi} = 1318.475 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$fb_{22} = 0.363 \text{ksi} = 25.5 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$fv_x = \frac{V_x}{A_{v_x}}$$

$$fv_2 = \frac{1.336 \text{kip}}{1.86 \text{pu lg}^2} = 0.718 \text{ksi} = 3.326 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$fv_3 = 0.047 \text{ksi} = 50.489 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

Cálculo de esfuerzos admisibles según AISC-ASD89 con las ecuaciones 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10.

$$Cc = \sqrt{\frac{(2\pi^2 E)}{F_y}}$$

$$Cc = \sqrt{\frac{2(3.1415)^2 29000 \frac{\text{kip}}{\text{pu lg}^2}}{36 \text{kip}}} = 126.035$$

$$Fa = \frac{[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2Cc^2}]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3(Kl/r)}{8Cc} - \frac{(Kl/r)^3}{8Cc^3}}$$

$$Fa = \frac{[1 - \frac{(1.21) \cdot (72.311 \text{pu lg}) / 1.622 \text{pu lg}}{2(126.035 \text{pu lg})^2}]36}{\frac{5}{3} + \frac{3(1.21) \cdot (72.311 \text{pu lg}) / 1.622 \text{pu lg}}{8(126.035)} - \frac{(1.21) \cdot (72.311) / 1.622 \text{pu lg}}{8(126.035)^3}}$$

$$Fa = 17.995 \text{ksi} = 1265.378 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$Ft = 0.6F_y$$

$$Ft = 0.6(36 \text{ksi}) = 21.6 \text{ksi} = 1518.630 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$l_c = (1950 + 1200 \frac{M_a}{M_b}) \frac{b}{F_y}$$

$$l_{c33} = (1950 + 1200 \frac{1.454 \text{kip}\cdot\text{pulg}}{93.193 \text{kip}\cdot\text{pulg}}) \frac{5.32 \text{pulg}}{36 \text{ksi}} = 290.62 \text{pulg} = 738.17 \text{cm}$$

$$l_{c22} = 182.99 \text{pulg} = 439.18 \text{cm}$$

$$72.311 \text{pulg} \leq 182.99 \text{pulg}$$

Por lo tanto:

$$F_{bxx} = 0.66 F_y$$

$$F_{b33} = 0.66(36 \text{ksi}) = 23.76 \text{ksi} = 1670.493 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$F_{b22} = 0.66(36 \text{ksi}) = 23.76 \text{ksi} = 1670.493 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$$

Con lo cual se tiene según la ecuación 2.11:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{(1 - \frac{f_a}{F'_{ex}}) F_{bx}} + \frac{C_{my} f_{by}}{(1 - \frac{f_a}{F'_{ey}}) F_{by}} \leq 1.0$$

$$\text{De donde: } f_a = 1.887 \frac{\text{Kip}}{\text{pulg}^2} \text{ y } F_a = 17.995 \frac{\text{Kip}}{\text{pulg}^2}$$

Debido a que $\frac{f_a}{F_a} \leq 0.15 \rightarrow \frac{1.887}{17.995} = 0.105$ la fórmula se puede reducir a:

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$$

Ec. 3.1

De donde:

$$\frac{1.887}{21.6} + \frac{18.753}{23.76} + \frac{0.363}{23.76} \leq 1.0$$

$$0.892 \leq 1.0$$

El cual representa el coeficiente demanda-capacidad mostrado en la figura 3.5 calculado según la tabla mostrada en la figura 3.7. Es importante señalar que el cálculo de demanda-capacidad es realizado en sistema ingles debido a que las formulas y demás son en este sistema.

Si fuera necesario el cálculo de los otros coeficientes refiérase al código AISC-ASD89, Tomo II, en donde se encontrará toda la información necesaria, y debidamente detallada.

Una vez determinados todos los coeficientes, definidas las secciones, determinadas las cargas y escogido el código a utilizarse se procedió con el cálculo estructural cuya información esta detallada en el Anexo B y de la cual se han obtenido los datos mostrados en la tabla 3.2 a manera de resumen.

Tabla 3.2 Resumen de los esfuerzos existentes en el pórtico.

| Elemento | Unid. | Columna 1 | Columna 2 | Viga 1 | Viga 2 | Refuerzo 1 | Refuerzo 2 |
|----------|----------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| P | kip | 5.662 | 2.57 | -0.51 | 0.58 | -0.024 | -0.017 |
| M3-3 | kip*pulg | 94.193 | 70.806 | -68.489 | -0.127 | -2.192 | 2.192 |
| M2-2 | kip*pulg | -1.454 | 1.326 | 24.401 | 3.728 | -8.188 | 0.04 |
| V2 | kip | 1.336 | 0.946 | -2.732 | -0.012 | -0.157 | 0.157 |
| V3 | kip | -0.059 | 0.059 | 0.789 | 0.157 | -0.58 | 0.58 |
| fa | ksi | 1.8877 | 0.859 | 0.052 | 0.394 | 0.008 | 0.006 |
| Fa | ksi | 17.998 | 17.998 | 20.06 | 14.961 | 19.286 | 19.286 |
| Ft | ksi | 21.6 | 21.6 | 21.6 | 21.6 | 21.6 | 21.6 |
| Fb 3- 3 | ksi | 18.753 | 14.097 | 2.912 | 0.329 | 0.436 | 0.436 |
| Fb 3-3 | ksi | 23.76 | 23.76 | 23.76 | 21.6 | 23.76 | 23.76 |
| Fb 2-2 | ksi | 0.363 | 0.031 | 1.188 | 2.702 | 2.042 | 2.005 |
| Fb 2-2 | ksi | 23.76 | 23.76 | 21.6 | 21.6 | 23.76 | 23.76 |
| Fv 3-3 | ksi | 0.718 | 0.509 | 0.518 | 0.016 | 0.084 | 0.084 |
| Fv 3-3 | ksi | 14.4 | 14.4 | 14.4 | 14.4 | 14.4 | 14.4 |
| Fv 2-2 | ksi | 0.047 | 0.047 | 0.148 | 0.203 | 0.467 | 0.467 |
| Fv 2-2 | ksi | 14.4 | 14.4 | 14.4 | 14.4 | 14.4 | 14.4 |
| Dem/cap | N/A | 0.892 | 0.647 | 0.18 | 0.159 | 0.105 | 0.103 |

3.1.3 CALCULO DE DEFLEXIONES.

SAP2000 permite observar las deflexiones producidas en una estructura metálica una vez aplicada la carga, además permite obtener los desplazamientos de cada uno de los nodos de dicha estructura tanto en traslación como en rotación los cuales son mostrados en base al sistema de referencia global, tal como muestra la figura 3.9.

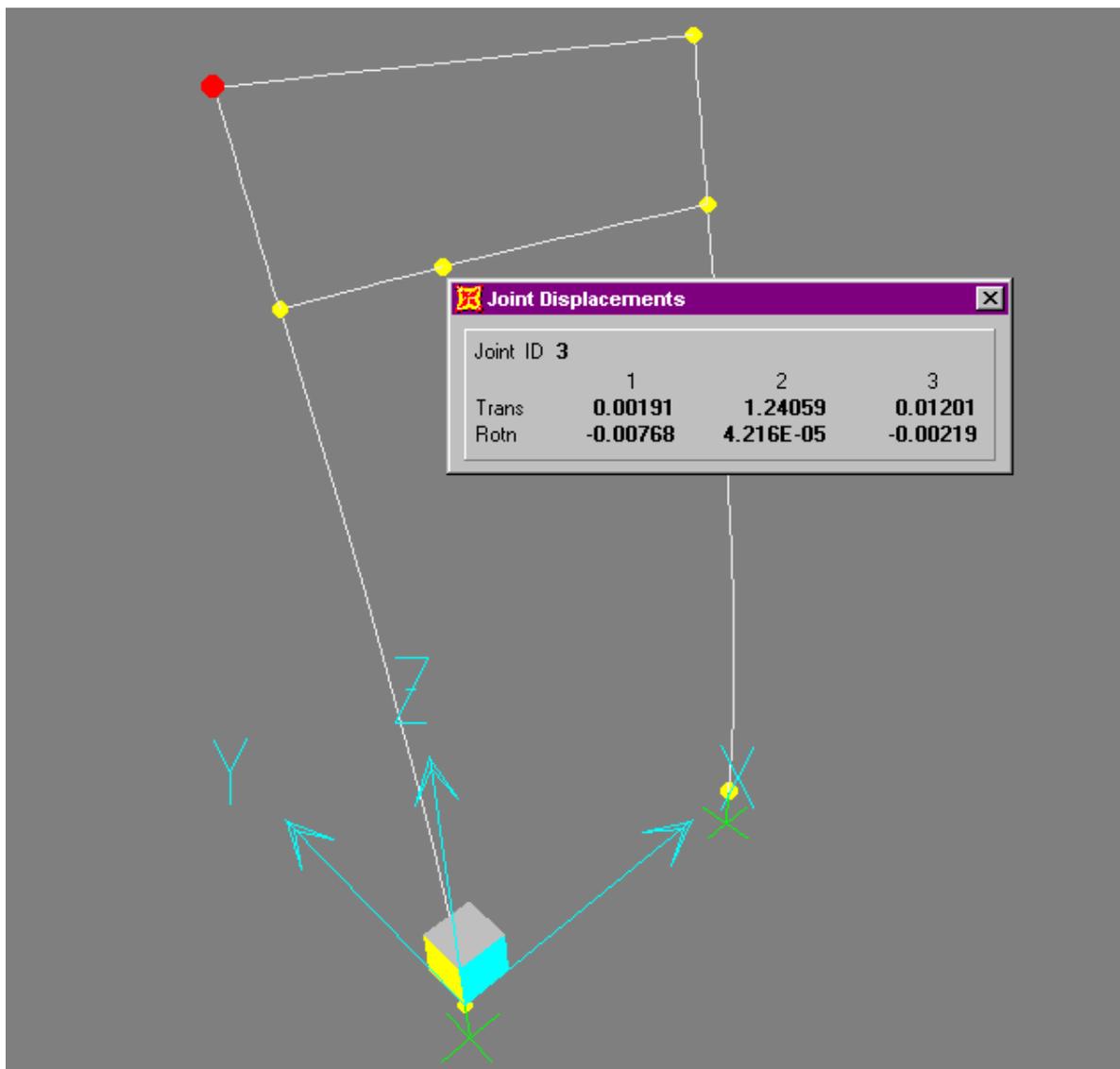


Figura 3.9 Deflexión producida en el pórtico con 4000 Kg.

En la tabla 3.3 se muestran los desplazamientos para cada uno de los nodos de la estructura.

Tabla 3.3 Deflexiones de cada uno de los nodos.

| Nodo | Rot 1-1 | Rot 1-2 | Rot 1-3 | Trasn 1-1 | Trasn 1-2 | Trasn 1-3 |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Unidades | (cm) | (cm) | (cm) | (cm) | (cm) | (cm) |
| 1 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| 2 | -7.72E-04 | -2.11E-04 | -1.89E-03 | 1.96E-03 | 9.69E-01 | 1.22E-02 |
| 3 | -7.68E-03 | -4.05E-05 | -2.19E-03 | 1.89E-03 | 1.24E+00 | 1.20E-02 |
| 4 | -6.19E-03 | 8.97E-06 | -2.31E-03 | 3.40E-03 | 9.68E-01 | 5.48E-03 |
| 5 | -6.15E-03 | 2.51E-01 | -2.07E-03 | 1.76E-03 | 7.50E-01 | 5.49E-03 |
| 6 | -7.22E-03 | -6.46E-05 | -1.95E-03 | 1.90E-03 | 9.03E-01 | 2.14E-02 |
| 7 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |

En la figura 3.10 se encuentran cual es la posición de cada nodo dentro del pórtico del vibróforo en consecuencia con la tabla 3.3.

Se ha utilizado otro programa computacional para mostrar la figura deformada del pórtico del vibróforo de baja frecuencia, dicho programa funciona como ya se mencionó bajo el criterio de elementos finitos al igual que SAP2000, este programa es conocido como Cosmos Works, la ventaja de utilizarlo es que este programa puede mostrar los valores de deflexión no solo en los nodos sino en cualquier parte de la estructura, como se muestra en la figura 3.11.

Debido a la naturaleza del estudio que se está llevando a cabo ya que se trata de un proyecto de tesis en donde la precisión en los datos es de vital importancia se decidió realizar el análisis en Cosmos Works, pero generalmente bastaría con un análisis en SAP2000, ya que como se puede observar los valores obtenidos son muy similares, con errores que se los podría considerar como despreciables.

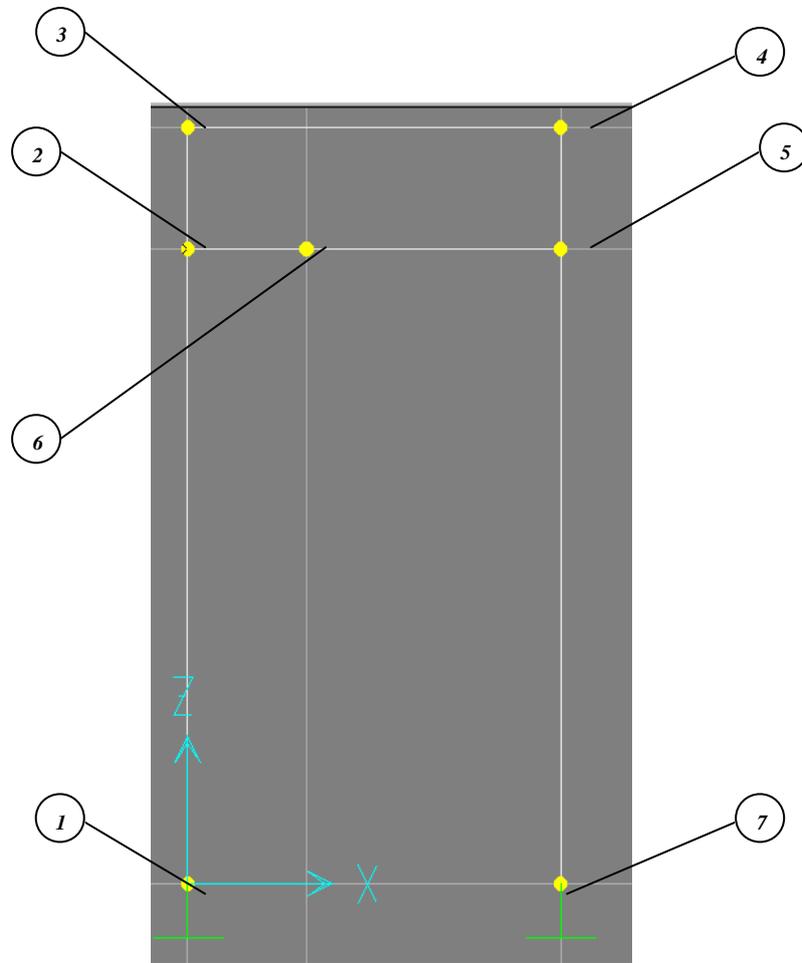


Figura 3.10 Numeración de los nodos dentro del pórtico del vibróforo.

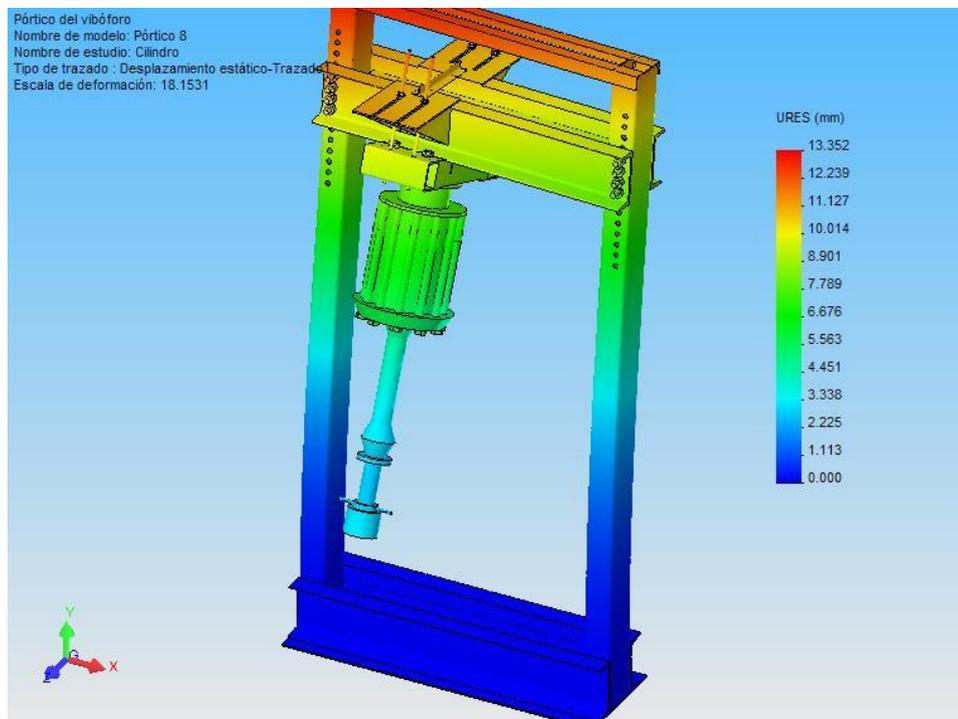


Figura 3.11 Deflexión producida en el pórtico con 4000 Kg., calculada en Solid Works

3.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ACCESORIOS

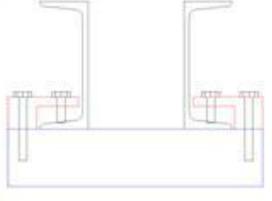
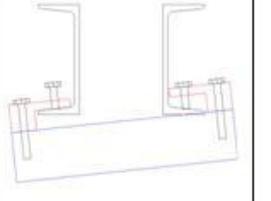
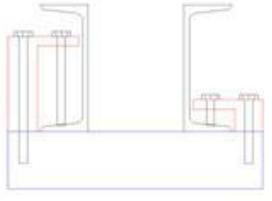
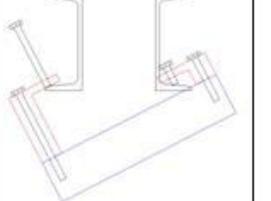
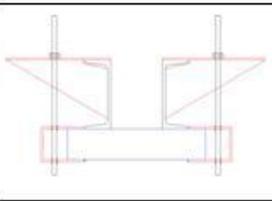
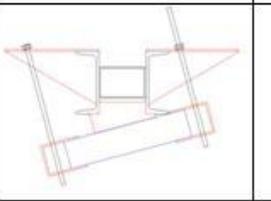
3.2.1 INTRODUCCIÓN

Luego de que se calculó los esfuerzos y cargas máximas que soporta el pórtico en el SAP, se procedió a realizar un levantamiento a detalle del pórtico del vibróforo y consecuentemente se lo llevó al AutoCAD en donde se lo dibujó en 3D para con esto realizar los respectivos análisis y diseñar los más eficientes accesorios que nos permitan comprobar la tesis.

En este capítulo se muestra el procedimiento llevado a cabo para el diseño en CAD de cada pieza antes de su construcción y el procedimiento para su construcción real.

El CAD es una herramienta que nos permitió iterar varias veces hasta llegar a la solución más óptima pues uno de los problemas planteados para la construcción de los accesorios era que sean seguros, fáciles y rápidos para operar por los estudiantes en las prácticas del laboratorio.

Tabla 3.4 Matriz de decisión para el mecanismo de giro ideal

| | Posición normal | Posición girada | Angulo | Observaciones |
|-----------------------|---|--|--------|--|
| Accesorios originales |  |  | 5° | El ángulo es muy pequeño, los accesorios originales no fueron diseñados para trabajar así. |
| Opción 1 |  |  | 27° | El ángulo es bueno, pero el perno desgastará la U.P.N pues camina sobre ella, tendríamos que analizar esfuerzos de contacto. |
| Opción 2 |  |  | 15° | Opción óptima pues los elementos son independientes del giro y el ángulo es aceptable. |

3.2.2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ACCESORIO 1

Este accesorio es una cuña a 15° que debía resistir una carga máxima de 5000Kg, este se encarga de transmitir la fuerza del pistón a la viga principal del pórtico.

Su forma surge del análisis principal en la matriz de decisión Tabla 3.4 en la cual se realiza la concepción del mecanismo, luego en base a esos datos se procedió a diseñar la pieza en 3D en el AutoCAD.

3.2.2.1 Diseño cinemático

El diseño cinemático de esta pieza se la realizó en el AutoCAD, en este programa se procedió primero a dibujarla en 3D e implementarla en el pórtico ya dibujado en 3D para verificar que no interfiera con otras piezas del pórtico o accesorios.

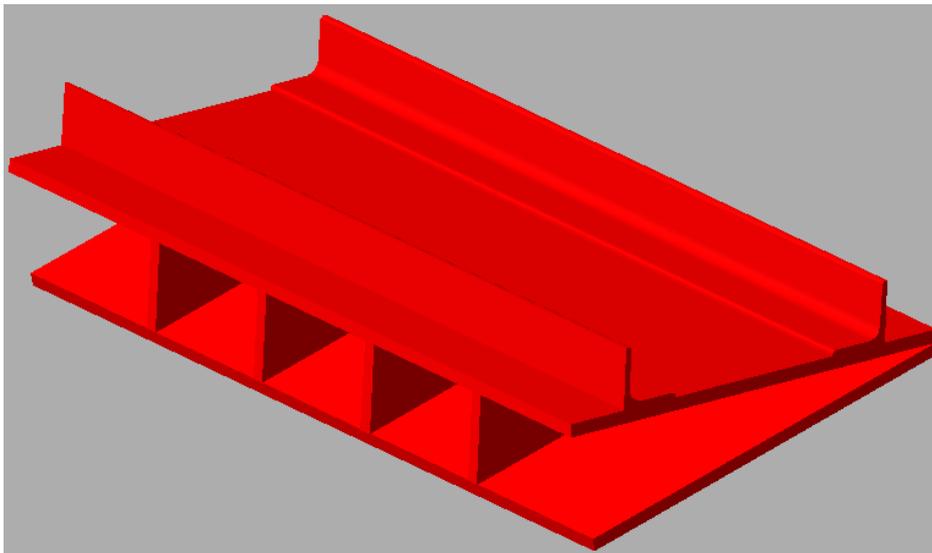


Figura 3.12 Modelación en AutoCad del accesorio 1

Para la construcción de este accesorio se utiliza plancha de acero de 6mm y ángulos AN30X3mm los cuales luego serán revisados en el diseño mecánico.

Se colocan nervios en el interior de la cuña para rigidizar el elemento en la zona de carga y los ángulos para fijarlo a la UPN 200 (viga principal) del pórtico.

3.2.2.2 Diseño mecánico

Luego de realizado el diseño cinemático en AutoCad en el cual se levantó sólidos en 3D de todos los accesorios, se procedió a analizarlos en el CosmosWorks que trabaja bajo interfaz SolidWorks.

El SolidWorks es un programa muy completo e ideal para la ingeniería mecánica en el cual también pudiéramos haber realizado el análisis y diseño cinemático, además de los planos de todos los accesorios, sin embargo, este es un programa nuevo en el país y como todos sabemos su introducción demorará unos años, por la inercia natural que tienen los ingenieros a seguir utilizando los programas con los que se formaron y a diseñar elementos mecánicos a mano o en el papel y no con software que optimiza los diseños y mejora la competitividad de las empresas si se los utiliza con criterio de ingeniería.

Por esto es que en nuestra tesis se investigó el método para utilizar el AutoCad que es un programa ya aceptado por los ingenieros como plataforma y pasar de este al SolidWorks donde se analiza el elemento con el CosmosWorks.

La conclusión no fue inesperada, existen algunos problemas que se presentan al trabajar con archivos de empresas diferentes y que compiten en el mercado del software mundial, sin embargo, el procedimiento se detalla a continuación.

El primer paso es exportar el accesorio dibujado en el AutoCad a una nueva carpeta de trabajo en la cual se guardarán todos los archivos del accesorio analizado que se formen al importarlo en el SolidWorks y ser transformado en múltiples piezas y un ensamblaje (ensamblaje es el archivo en el cual están todas las piezas en su respectiva posición).

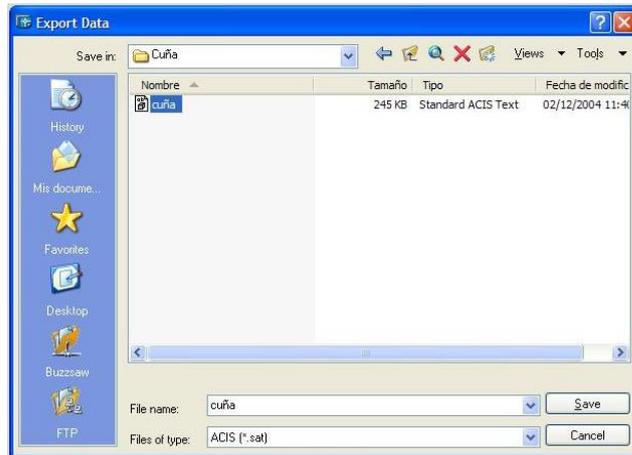


Figura 3.13 Exportando desde el AutoCad el accesorio 1

El archivo exportado es de tipo ACIS y trabaja bajo la extensión *.sat y puede ser abierto en el SolidWorks como un documento:



Figura 3.14 Abriendo el archivo ACIS en el SolidWorks del accesorio 1

En este punto se puede presentar el primer problema, el programa no advierte nada, sin embargo, luego al intentar analizar el ensamblaje una serie de errores se pueden presentar, por lo tanto, en este punto se sugiere seleccionar todos los elementos desde el “Gestor de diseño del FeatureManager”, ir a Edición y desactivar las supresiones con dependientes de la configuración actual.

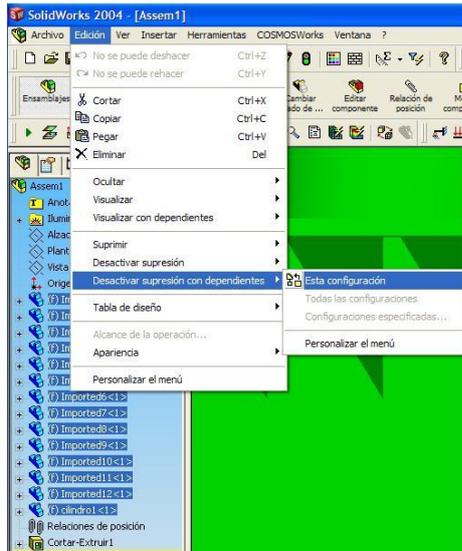


Figura 3.15 Desactivando las supresiones del ensamblaje del accesorio 1

También es conveniente fijar todos los elementos importados pues como todos se encuentran en su posición de trabajo la cual se definió en el AutoCad y no con “relaciones de posición” en el SolidWorks, estos pueden moverse indeseablemente durante el análisis al utilizar el Mouse. Además, es importante verificar que no existan interferencias entre los elementos dibujados en el AutoCad pues esto imposibilita el mallado posterior, para esto se selecciona todos los elementos y en la pestaña de las herramientas se selecciona detección de interferencias. En este punto se sugiere guardar el ensamblaje en la carpeta antes formada.



Figura 3.16 Detección de interferencias del accesorio 1

Ahora se procedió a definir un estudio en el “CosmosWorks Manager” de tipo estático y con un mallado de sólido.

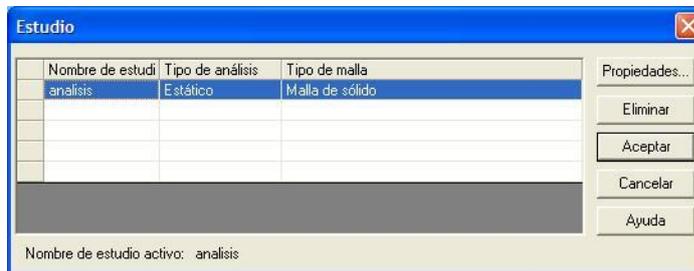


Figura 3.17 Definición del análisis del accesorio 1

Una vez definido el análisis se procede a colocar el tipo de material a todos los elementos importados, en este punto es importante definir a todos los elementos como acero. Si se va a utilizar algún tipo de “Verificación de diseño” es importante que el acero sea el mismo que el de los elementos reales, caso contrario si los análisis se los realizará de alguna otra manera como por ejemplo bajo el criterio de Von Misses - Henkins en donde los esfuerzos son independientes del tipo de metal utilizado, simplemente se plantea un límite de esfuerzo permisible de por ejemplo 200MPa, se puede simplificar un paso.

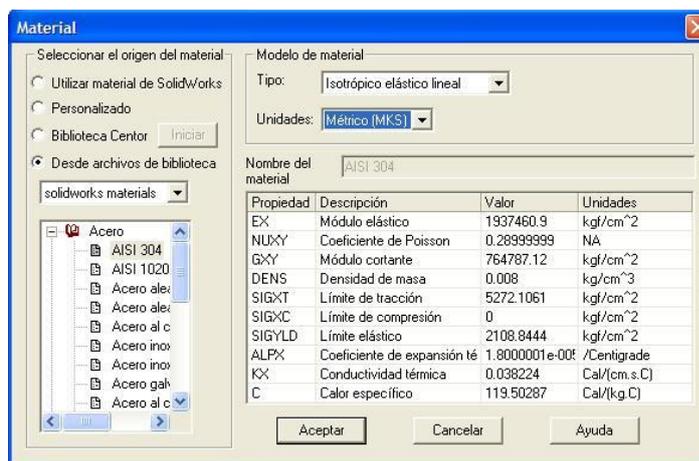


Figura 3.18 Selección del material del accesorio 1

Este punto es crucial en el análisis pues el mallado debe ser configurado de manera que el análisis sea adecuado y el computador trabaje dentro de sus posibilidades, para esto se define un mallado de alta calidad si el análisis es el

definitivo, se utiliza un mallador estándar y una verificación jacobiana de 4 puntos, es importante utilizar transición automática para que el análisis en las intersecciones de los elementos importados sean analizados con más cuidado y también que se active el bucleado automático con 3 iteraciones (si se eleva mucho este número el mallado se demorará mucho), para que encuentre por sí solo el tamaño de malla mínimo requerido, claro está luego de haber separado activando controles para los elementos muy pequeños que requerían un mallado especial aparte.

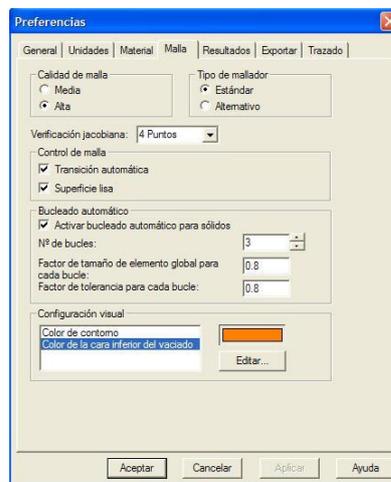


Figura 3.19 Preferencias del mallado del accesorio 1

Se procede a colocar las cargas y las restricciones al elemento en cuestión y analizamos que el esfuerzo de Von Mises sea menor a 200MPa o 2000Kg/cm² y que sus deformaciones sean aceptables.

Se cargó al elemento con 5000Kg sobre un elemento cilíndrico (color verde) tomado del cilindro original para simular la forma de la carga y a su vez este está ejerciendo esta fuerza sobre la base prismática (color plomo) que actualmente soporta al cilindro y es esta la que ejerce la fuerza sobre nuestro accesorio (color rojo). Las restricciones obviamente son las que ejerce la UPN200 superior (viga principal del pórtico) y se encuentran como se muestra en el siguiente gráfico.

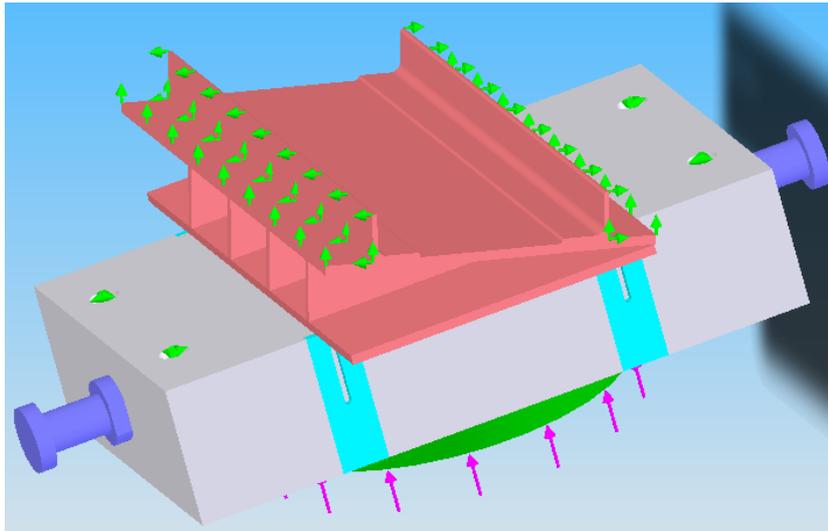


Figura 3.20 Cargas y restricciones en Cosmos del accesorio 1

El resultado de esfuerzos de Von Mises indica que el valor máximo es de 1115.13Kg/cm² en un punto de una de los rigidizadores interiores en el cual la sección se hace mínima.

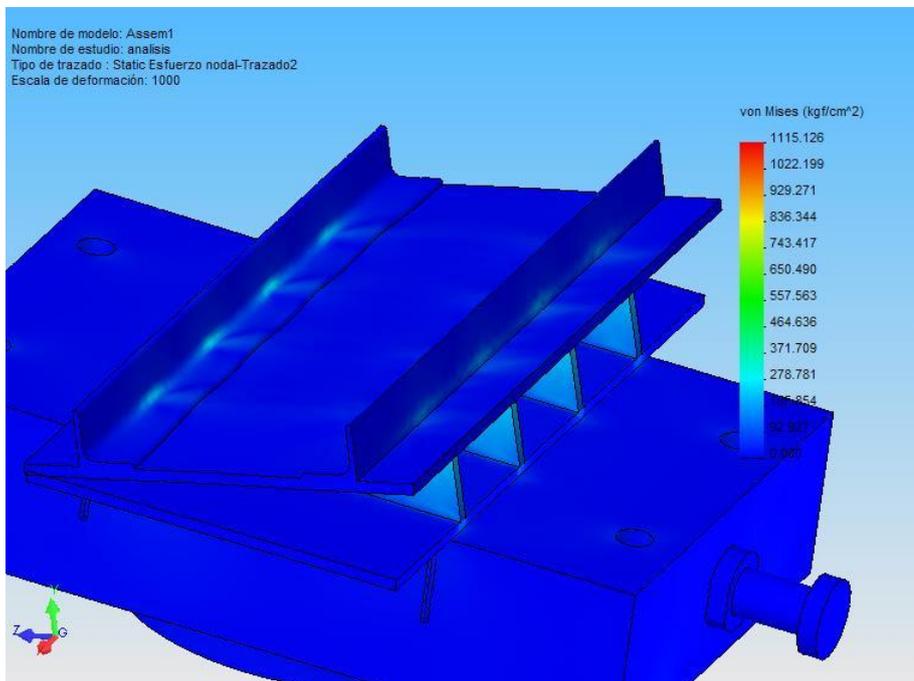


Figura 3.21 Resultados del esfuerzo de Von Misses en el accesorio 1

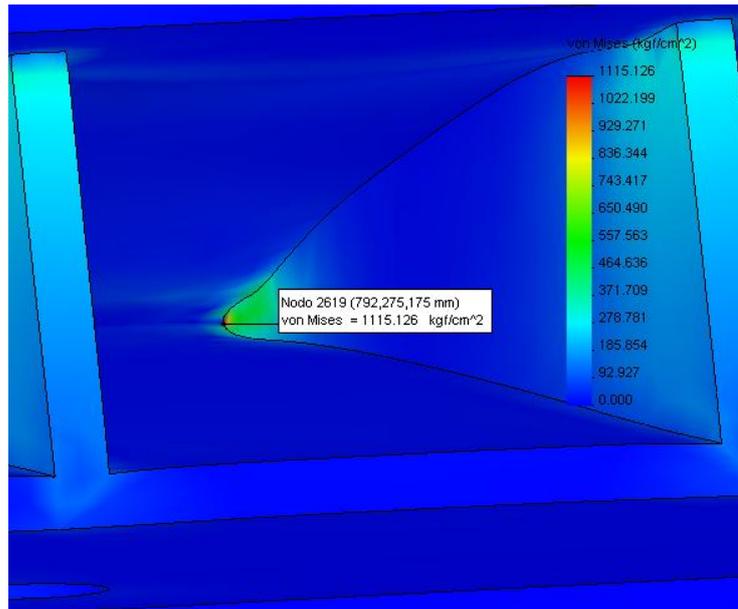


Figura 3.22 Lugar del esfuerzo de Von Mises máximo en el accesorio 1

El resultado de la deformación unitaria equivalente indica que en su punto máximo es de $3.997e-4$ en uno de los rigidizadores centrales de la cuña en la parte en la que la sección disminuye debido a la forma del elemento.

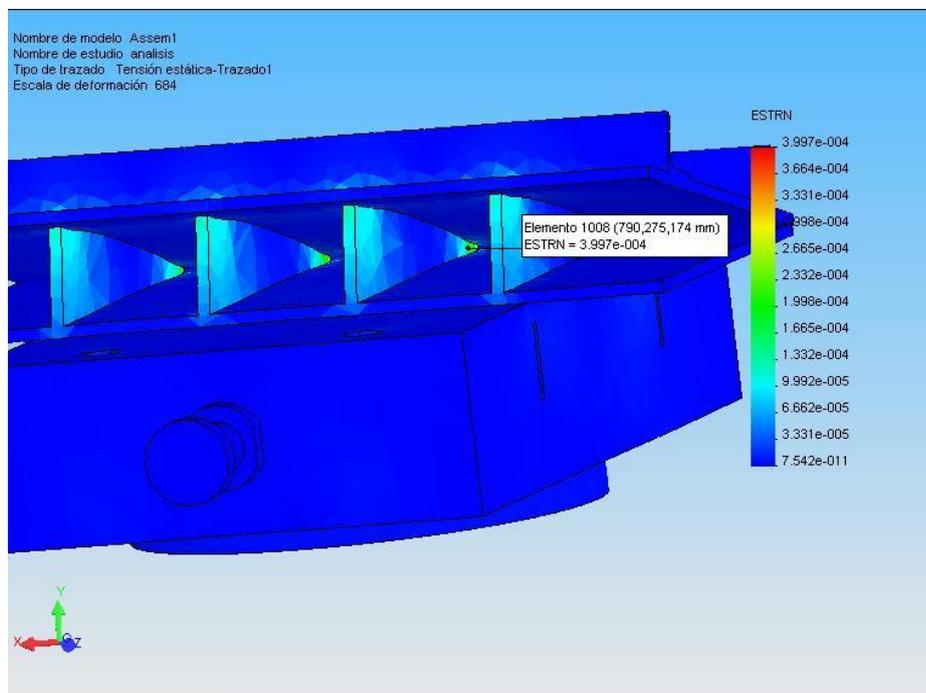


Figura 3.23 Resultados de la deformación unitaria equivalente en el accesorio 1

3.2.2.3 Construcción

Lo primero fue hacer los planos de detalle del elemento en el cual se especificaban los elementos, sus dimensiones y soldaduras; luego se hizo los planos de cortes (dimensiones de las placas a usarse y cantidad por placa) y finalmente los diagramas de procesos. Una vez terminados los análisis de todos los elementos y sus planos se cuantificó cuanto material se necesitaba y se cotizó el trabajo.



Figura 3.24 Fotografía del accesorio 1

La construcción de esta pieza no era sencilla pues se debía garantizar que no se deformen las placas al soldar y los espacios para soldar entre placas eran muy pequeños.

Primero se cortó todas las placas y los dos ángulos en las dimensiones especificadas, luego se punteó todo el accesorio con un electrodo E6011 para cuadrar todos los elementos, se tuvo mucho cuidado con los ángulos pues a estos se los punteó de ambos lados para que no se levanten al soldarlos por completo.

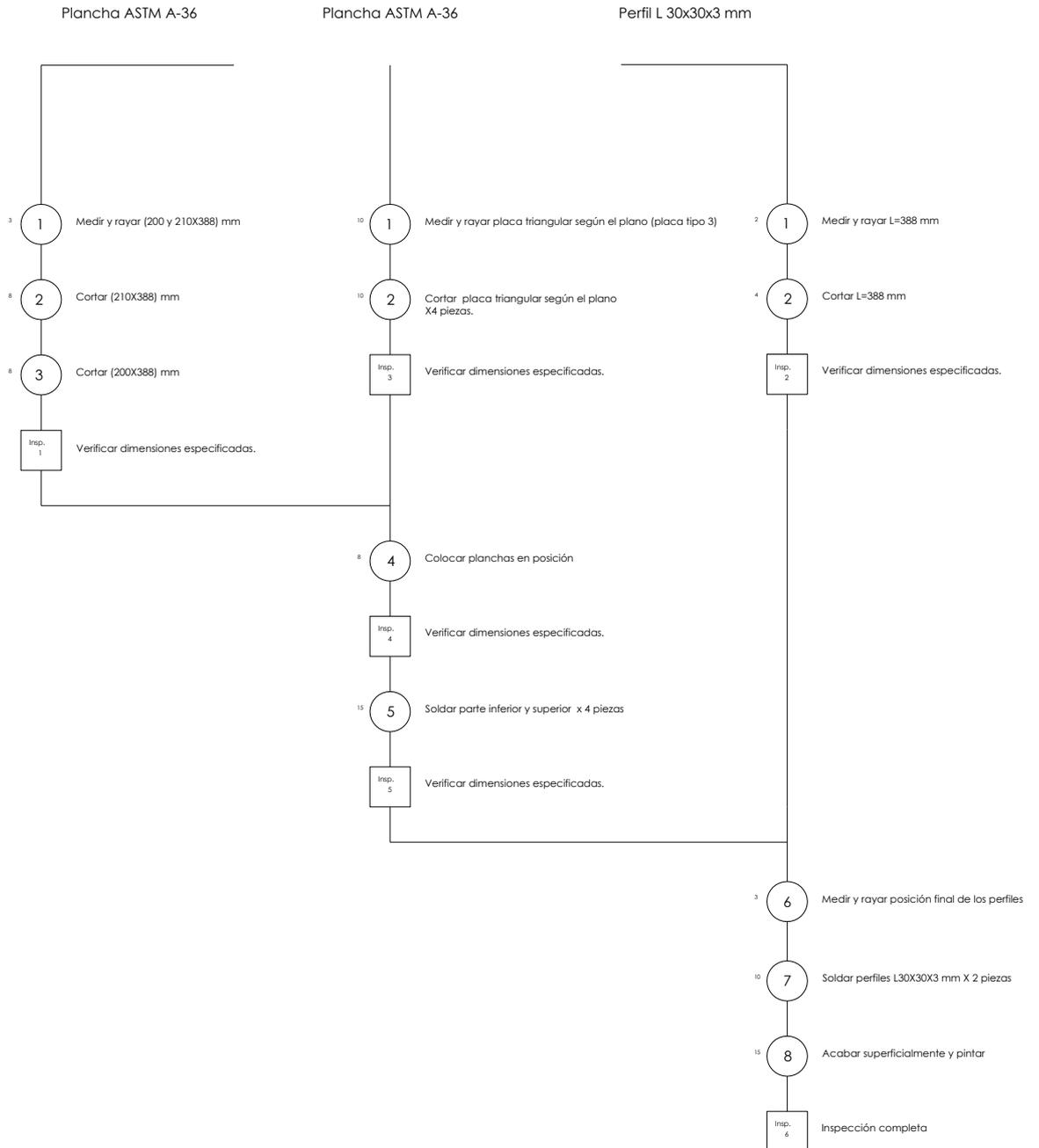
Luego se soldó con un electrodo E6013 en los lugares especificados en los planos, luego se limpió las escorias y amoló las imperfecciones de la suelda. Finalmente se lijó el elemento y procedió a pintar con un antioxidante.

3.2.2.4 Diagrama de proceso

ELEMENTO A FABRICARSE: Accesorio 1

CÓDIGO DEL PLANO: TP-01

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 08/12/2004



3.2.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ACCESORIO 2

Este accesorio resiste el peso del pistón, además es el encargado de transmitir el movimiento de giro al mismo, pues a este se conectan los ejes roscados.

Su forma surge del análisis principal en la matriz de decisión Tabla 3.4 en la cual se realiza la concepción del mecanismo, luego en base a esos datos se procedió a diseñar la pieza en 3D en el AutoCAD.

3.2.3.1 Diseño cinemático

El diseño cinemático de esta pieza se lo realizó en el AutoCAD, en este programa se procedió primero a dibujarla en 3D e implementarla en el pórtico ya dibujado en 3D para verificar que no interfiera con otras piezas del pórtico o accesorios.

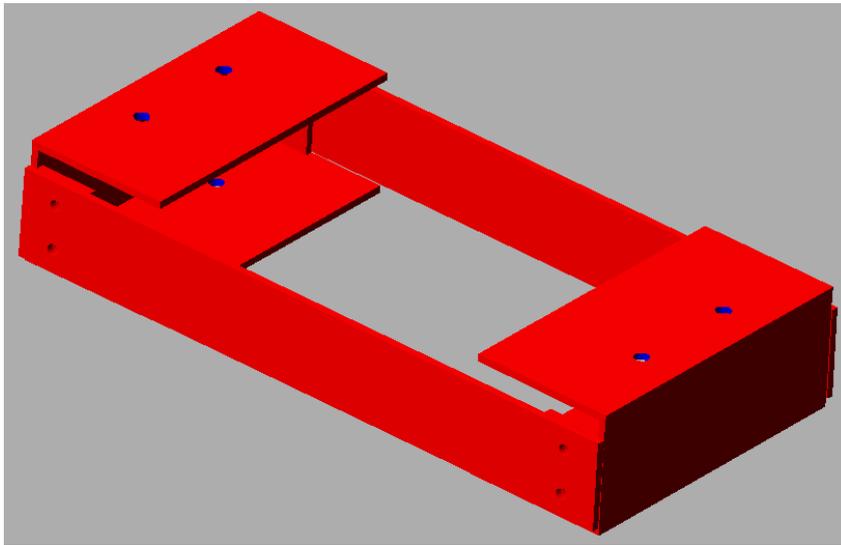


Figura 3.25 Modelación en AutoCad del accesorio 2

Para la construcción de este accesorio se utilizan varias planchas de acero de 6mm, las cuales deben ser cuidadosamente perforadas como se indica en los planos, la posición de los agujeros es producto del análisis cinemático, el cual se ve en la matriz de decisión Tabla 3.4.

3.2.3.2 Diseño mecánico

Luego de realizado el diseño cinemático en AutoCad en el cual se levantó sólidos en 3D de todos los accesorios, se procedió a analizarlos en el CosmosWorks que trabaja bajo interfaz SolidWorks y se repite el procedimiento descrito para el accesorio 1.

Se carga el accesorio con el peso del cilindro de manera que se asemeje a la carga real sobre el accesorio, para esto se exporta al COSMOS otros accesorios adicionales como son: parte del cilindro y su acople con el accesorio diseñado, esto permitirá simular el momento flector que este causa sobre los accesorios al estar girado 15° y esto provocará que uno de los sujetadores del accesorio se deforme y trabaje más que el otro. Se coloca restricciones fijas sobre las caras cilíndricas que acogerán a los ejes ASTM A36 que soportan el peso del cilindro.

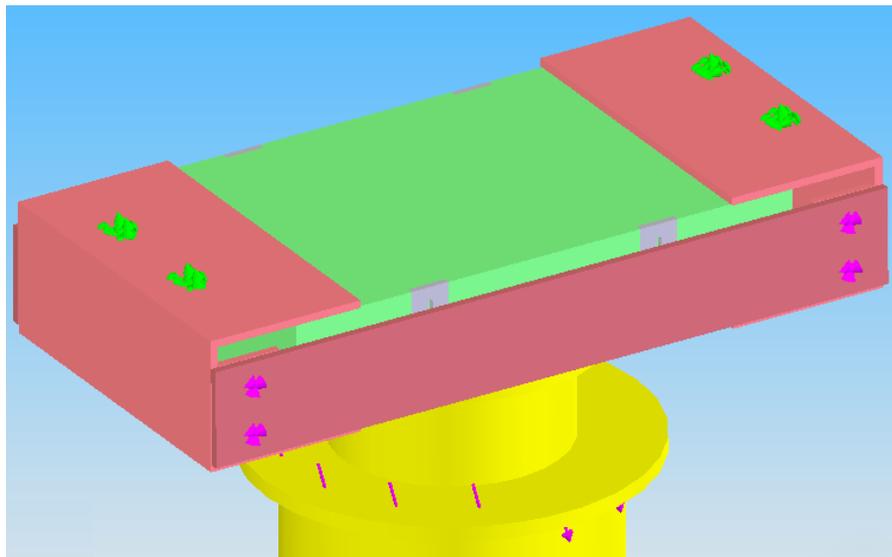


Figura 3.26 Cargas y restricciones en Cosmos del accesorio 2

El resultado de esfuerzos de Von Mises indica que el valor máximo es de 130.056Kg/cm² alrededor de los agujeros de las placas superiores frontales.

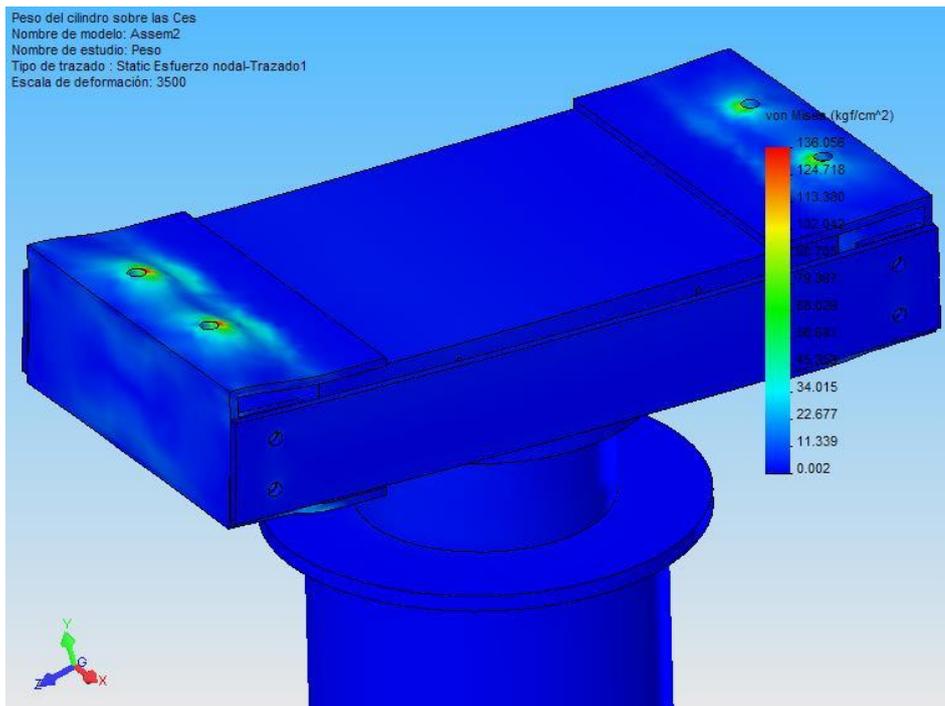


Figura 3.27 Resultados del esfuerzo de Von Misses en el accesorio 2

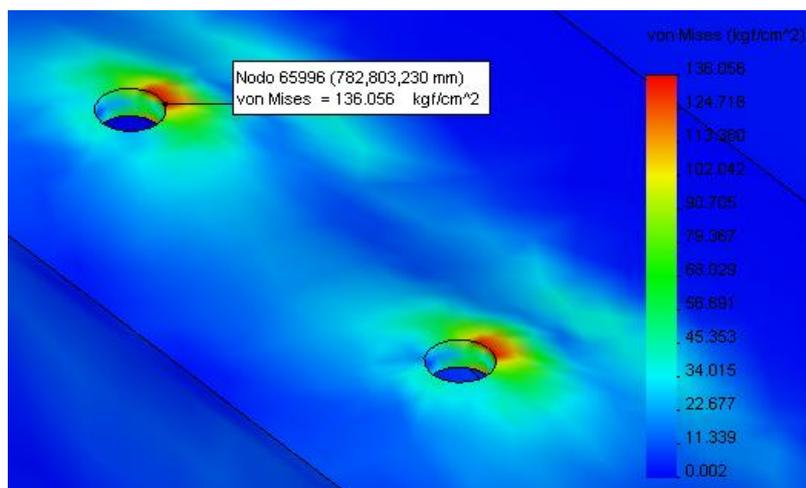


Figura 3.28 Lugar del esfuerzo de Von Misses máximo en el accesorio 2

El resultado de la deformación unitaria equivalente del Cosmos indica que el punto de deformación máxima de $4.237e-5$ es en la pared anterior del accesorio, sin embargo las deformaciones en los agujeros donde se aplica la fuerza son de magnitud similar a la de la pared. Claramente se nota que tan solo uno de los elementos del accesorio, el que se encuentra del lado del cilindro (pues este se encuentra a 15° de la vertical) es el que se encargará de soportar la mayor cantidad de carga y por tanto se deformará más que el otro.

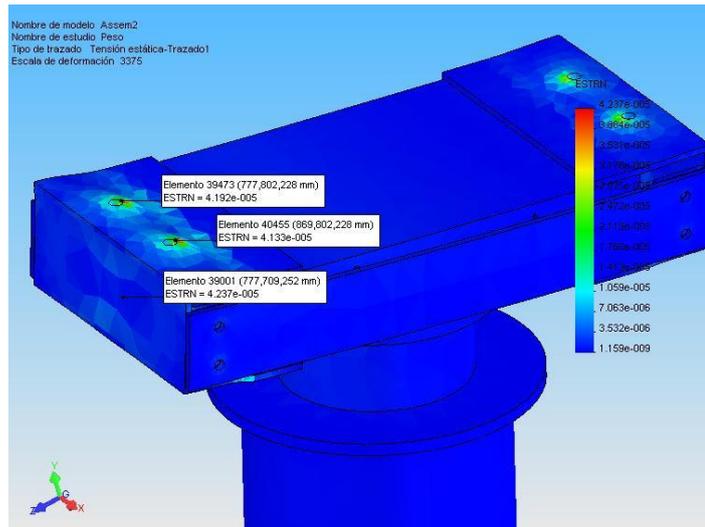


Figura 3.29 Resultados de la deformación unitaria equivalente en el accesorio 2

3.2.3.3 Construcción

Lo primero fue hacer los planos de detalle del elemento en el cual se especificaban los elementos, sus dimensiones y soldaduras; luego se hizo los planos de cortes (dimensiones de las placas a usarse y cantidad por placa) y finalmente los diagramas de procesos. Una vez terminados los análisis de todos los elementos y sus planos se cuantificó el material a utilizarse y se cotizó el trabajo.



Figura 3.30 Fotografía del accesorio 2

La construcción de esta pieza fue relativamente sencilla, se cortó todas las placas necesarias para ambos accesorios gemelos, luego se marcó y punteó los lugares a taladrar y se procedió a perforar las placas. Se punteó las placas con un electrodo E6011 en su posición final especificada en los planos y se colocó también unas varillas para evitar que los accesorios en forma de C se cierren luego de soldar el cordón definitivo.

Una vez listo el accesorio se procedió a soldar con un electrodo E6013 en los lugares especificados en los planos, luego se limpió las escorias y amoló las imperfecciones de la suelda. Finalmente se lijó el elemento y procedió a pintar con un antioxidante.

3.2.3.4 Diagrama de proceso

ELEMENTO A FABRICARSE: Accesorio 2

CÓDIGO DEL PLANO: TP-02

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 08/12/2004



3.2.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ACCESORIO 3

Este accesorio es uno de los más importantes pues es el que nos permitirá girar 15° el pistón óleo hidráulico y mover el lugar de aplicación de la fuerza durante las prácticas de forma muy rápida y versátil.

Su forma surge del análisis principal en la matriz de decisión Tabla 3.4 en la cual se realiza la concepción del mecanismo, luego en base a esos datos se procedió a diseñar la pieza en 3D en el AutoCAD.

3.2.4.1 Diseño cinemático

El diseño cinemático de esta pieza se la realizó en el AutoCAD, en este programa se procedió primero a dibujarla en 3D e implementarla en el pórtico ya dibujado en 3D para verificar que no interfiera con otras piezas del pórtico o accesorios.

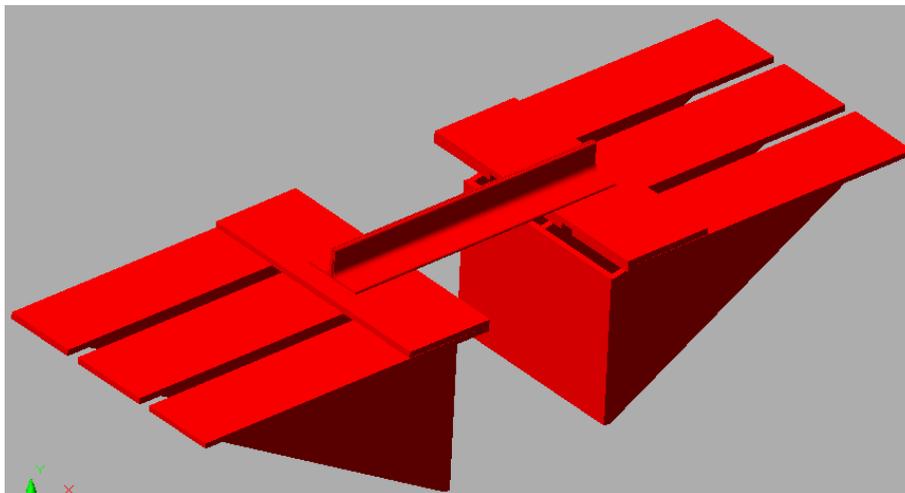


Figura 3.31 Modelación en AutoCad del accesorio 3

Para la construcción de este accesorio se utiliza plancha de acero de 6mm y ángulos AN30X3mm los cuales luego serán revisados en el diseño mecánico.

Inicialmente se pensó que este elemento estaría formado por una sola plancha de acero arriba en la cual se fresara los caminos para los ejes roscados y a esta plancha se la soldaría los rigidizadores inferiores, sin

embargo, luego de analizar el elemento y su función, la forma inicial fue cambiada, se requería otra placa de acero lateral interna para facilitar el traslado del accesorio sobre la UPN y se decidió reemplazar la plancha de acero de arriba por varias planchas más pequeñas y soldadas entre sí para evitar el fresado.

3.2.4.2 Diseño mecánico

Luego de realizado el diseño cinemático en AutoCad en el cual se levantó sólidos en 3D de todos los accesorios, se procedió a analizarlos en el CosmosWorks que trabaja bajo interfaz SolidWorks y se repite el procedimiento descrito para el accesorio 1.

Se cargó al elemento con 200Kg sobre cada eje, valores sumamente superiores a los que soportará pues todo el pistón pesa menos de 200Kg. Y se colocó restricciones como se muestra a continuación.

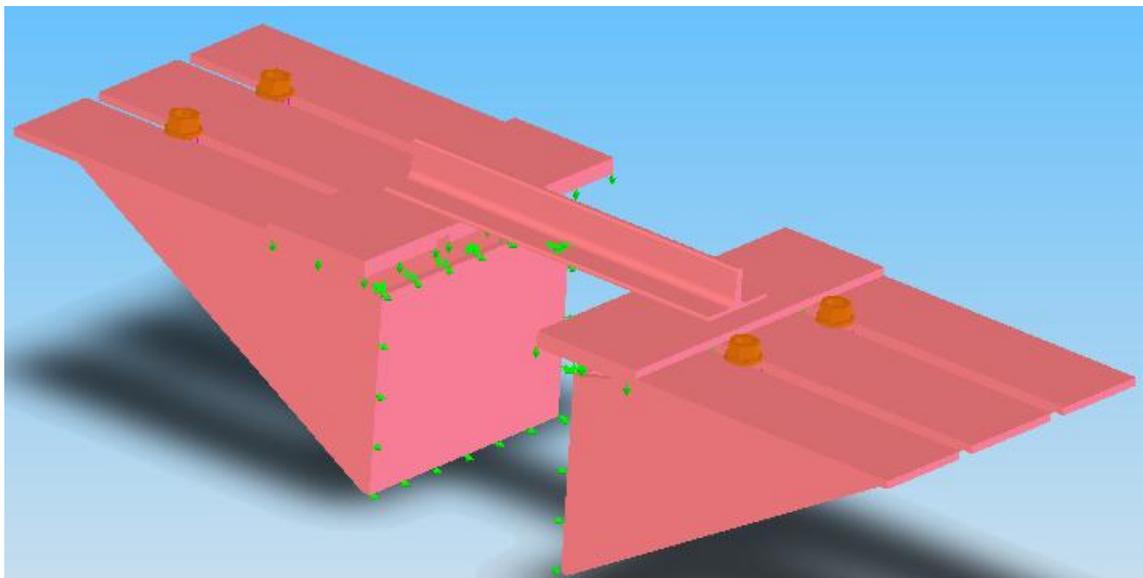


Figura 3.32 Cargas y restricciones en Cosmos del accesorio 3

El resultado de esfuerzos de Von Mises indica que el valor máximo es de 813.5Kg/cm² en un punto en el que el perno ejerce fuerza sobre la plancha.

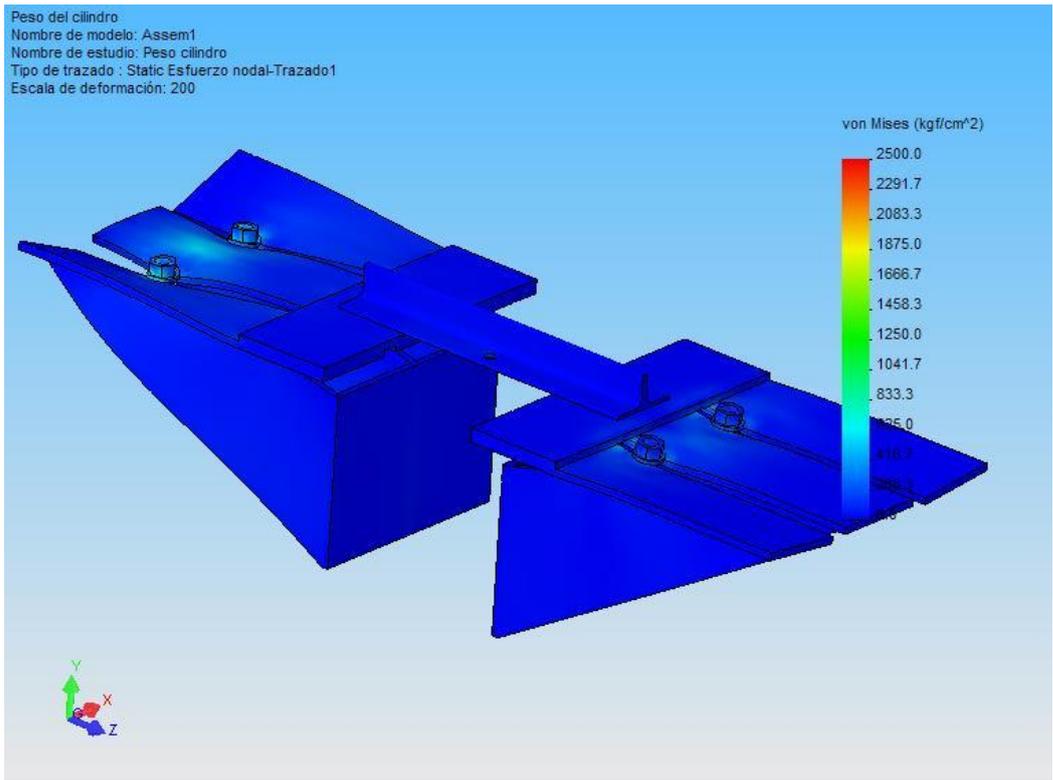


Figura 3.33 Resultados del esfuerzo de Von Misses en el accesorio 3

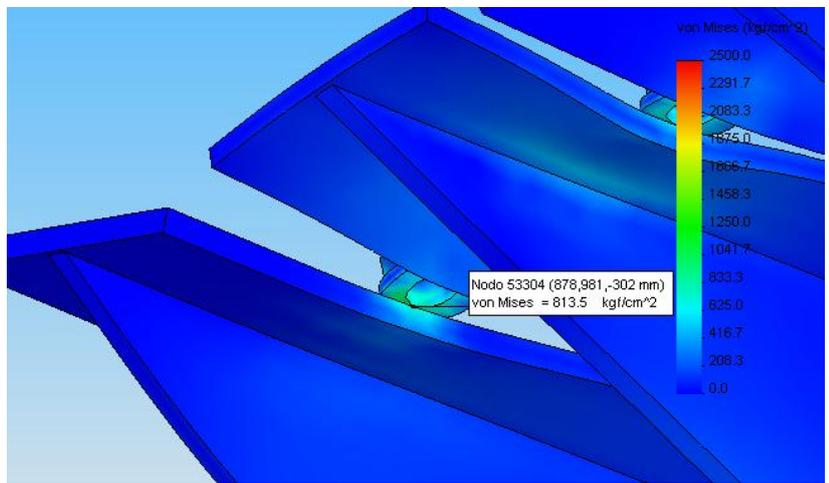


Figura 3.34 Lugar del esfuerzo de Von Misses máximo en el accesorio 3

El resultado del análisis de deformaciones unitarias equivalentes del cosmos indica que el punto máximo sobre el accesorio se dará en la placa central del lado en el que se apoyará el cilindro óleo-hidráulico al estar girado 15° y este será de $1.333e-4$, la placa inferior también sufrirá gran deformación en relación al resto del accesorio pero estas serán muy inferiores a las de la placa superior.

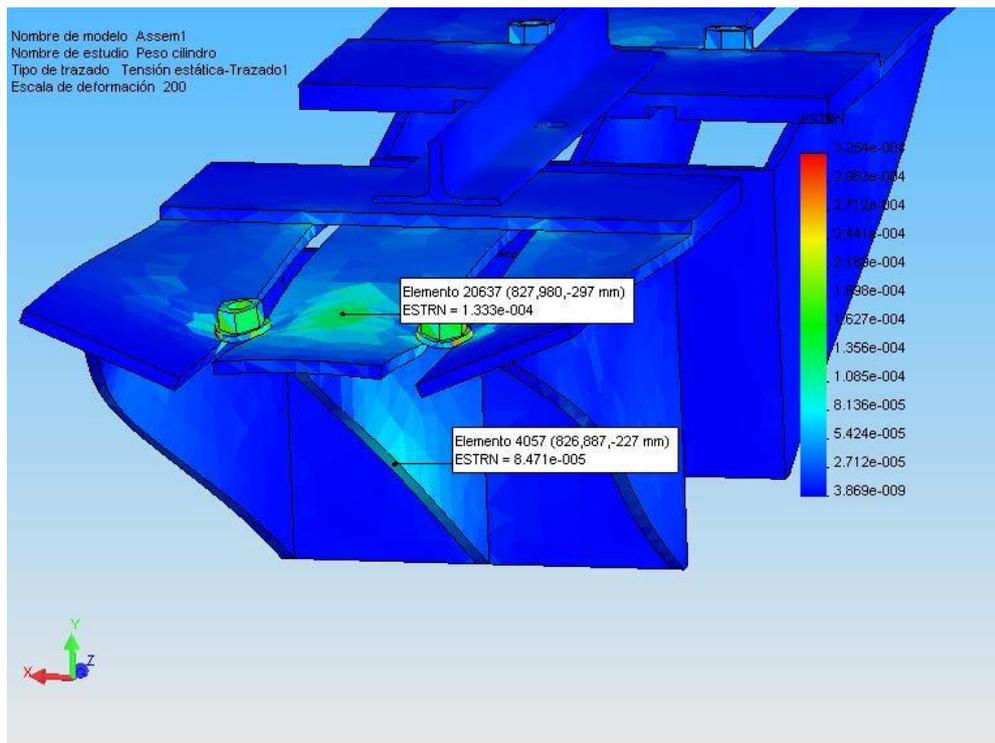


Figura 3.35 Resultados de la deformación unitaria equivalente en el accesorio 3

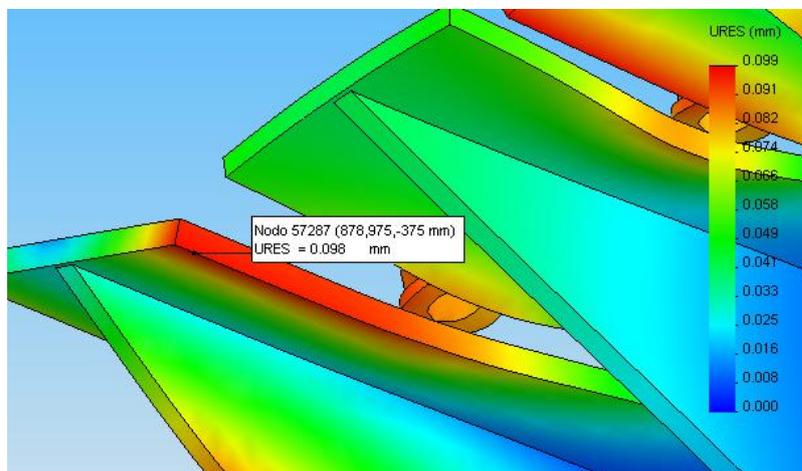


Figura 3.36 Lugar del desplazamiento máximo en el accesorio 3

3.2.4.3 Construcción

Lo primero fue hacer los planos de detalle del elemento en el cual se especificaban los elementos, sus dimensiones y soldaduras; luego se hizo los planos de cortes (dimensiones de las placas a usarse y cantidad por placa) y

finalmente los diagramas de procesos. Una vez terminados los análisis de todos los elementos y sus planos se cuantificó cuanto material se necesitaba y se cotizó el trabajo.



Figura 3.37 Fotografía del accesorio 3

Para su construcción primero se cortó todas las placas y los dos ángulos en las dimensiones especificadas y se perforó en un taladro todos los agujeros para pernos, luego se punteó por separado las dos partes gemelas del accesorio con un electrodo E6011 y los ángulos AN30X3 espalda con espalda, se tuvo mucho cuidado con los rigidizadores pues estos podían deformarse luego de soldados, por lo tanto, se punteó a estos temporalmente una varilla cuadrada la cual sería removida una vez la pieza se enfríe al final del proceso de soldadura.

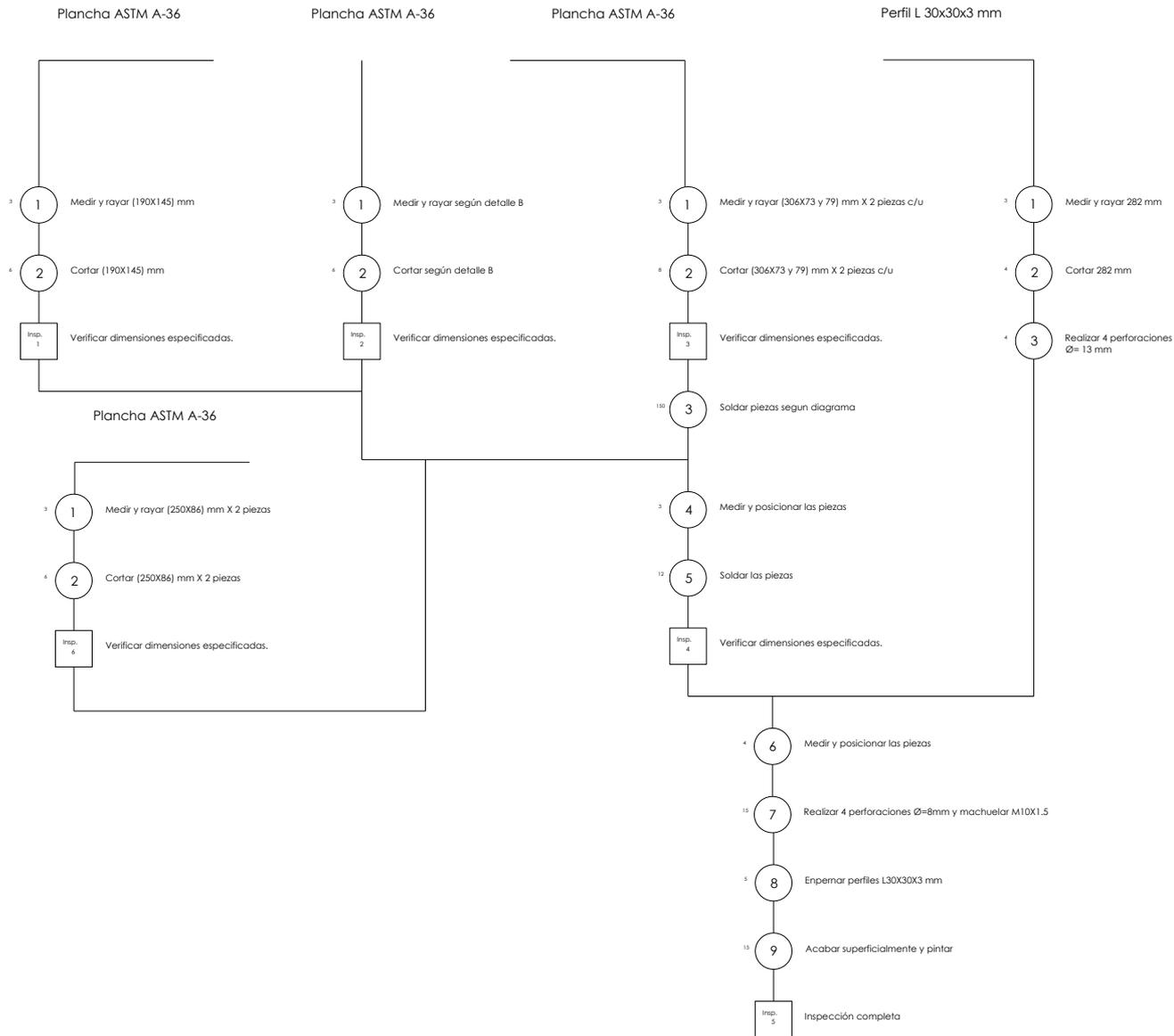
Luego se soldó con un electrodo E6013 en los lugares especificados en los planos, se limpió la escoria y amoló las imperfecciones de la suelda. Finalmente se lijó el elemento y procedió a pintar con un antioxidante.

3.2.4.4 Diagrama de proceso

ELEMENTO A FABRICARSE: Accesorio 3

CÓDIGO DEL PLANO: TP-03

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 09/12/2004



3.2.5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ACCESORIO 4

Este es un accesorio que va colocado en el piso y es fácilmente desmontable, sirve como apoyo para el pistón óleo hidráulico pues cuando este es girado 15° a la posición del ensayo necesita un lugar fijo, de alta resistencia mecánica y mínima deformación en el cual apoyarse.

Su forma surge de la forma del lugar a colocarlo, el ángulo del pistón oleo hidráulico y el requerimiento de alta resistencia y mínima deformación.

3.2.5.1 Diseño cinemático

El diseño cinemático de está pieza se la realizó en el AutoCAD, en este programa se procedió primero a dibujarla en 3D e implementarla en el pórtico ya dibujado en 3D para verificar su correcto funcionamiento y acople al conjunto.

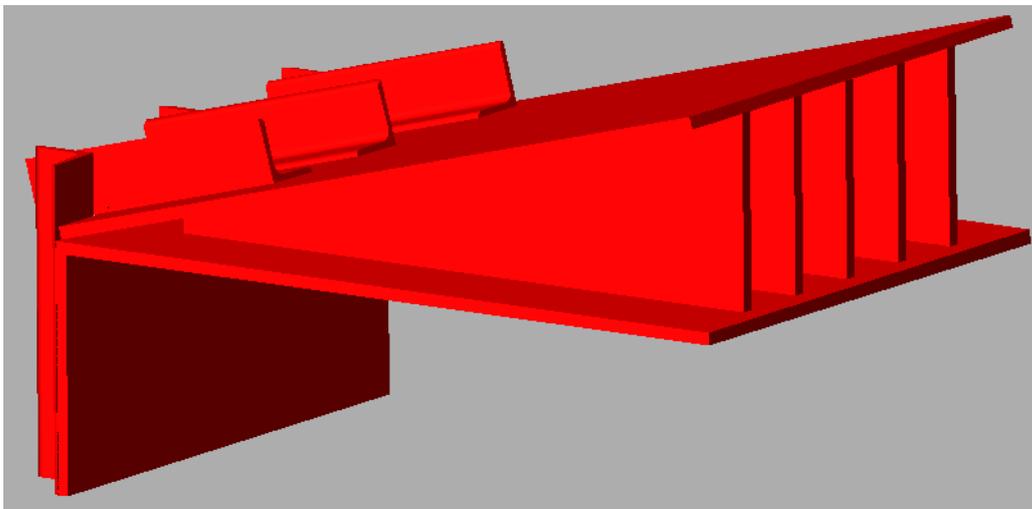


Figura 3.38 Modelación en AutoCad del accesorio 4

Para la construcción de este accesorio se utiliza plancha de acero de 6mm y ángulos AN30X3mm los cuales luego serán revisados en el diseño mecánico.

El elemento está formado por 5 placas trapezoidales que son las que junto con las planchas rectangulares superior e inferior forman un bloque rígido el

cual está unido a través de unos ángulos a otra placa que soportará la otra componente de la fuerza aplicada por el pistón.

3.2.5.2 Diseño mecánico

Luego de realizado el diseño cinemático en AutoCad en el cual se levantó sólidos en 3D de todos los accesorios, se procedió a analizarlos en el CosmosWorks que trabaja bajo interfaz SolidWorks y se repite el procedimiento descrito para el accesorio 1.

Se cargó al elemento con 5000Kg perpendiculares a la cara superior, para esto se importó el elemento del pistón óleo hidráulico que nos ayuda a simular la forma de la carga.

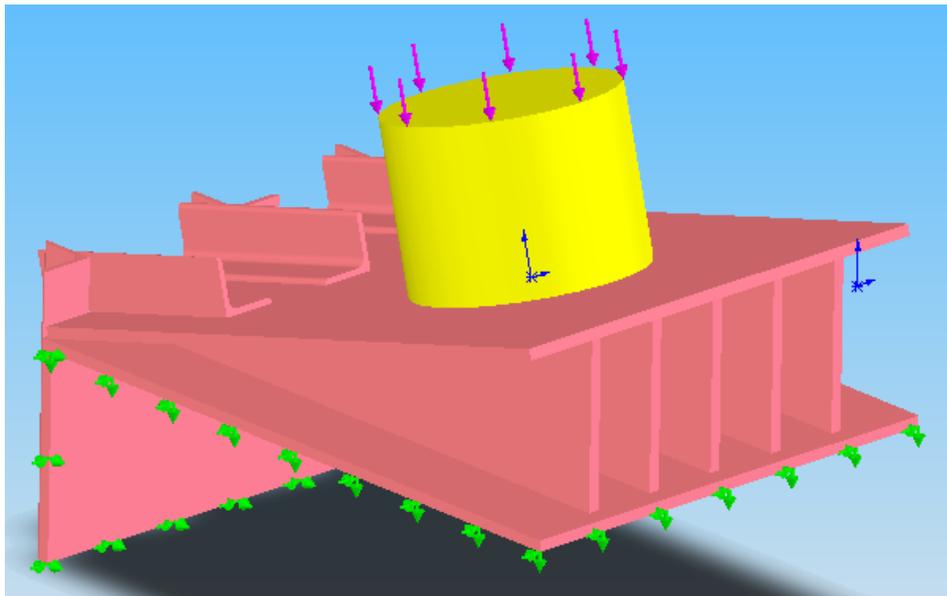


Figura 3.39 Cargas y restricciones en Cosmos del accesorio 4

El resultado de esfuerzos de Von Mises indica que el valor máximo es de 496.03Kg/cm² en la unión de los ángulos como se puede observar en la figura 3.39, pero también es importante observar que sobre los elementos que resisten directamente los 5000Kg el esfuerzo de Von Mises es de 496.06Kg/cm², es decir están trabajando con un factor de seguridad de 5.

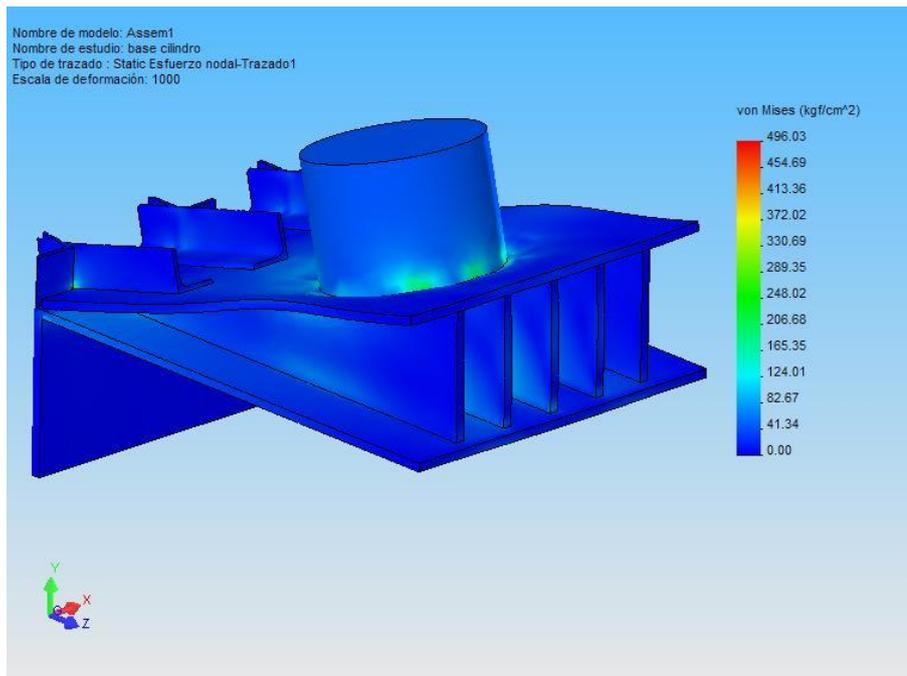


Figura 3.40 Resultados del esfuerzo de Von Misses en el accesorio 4

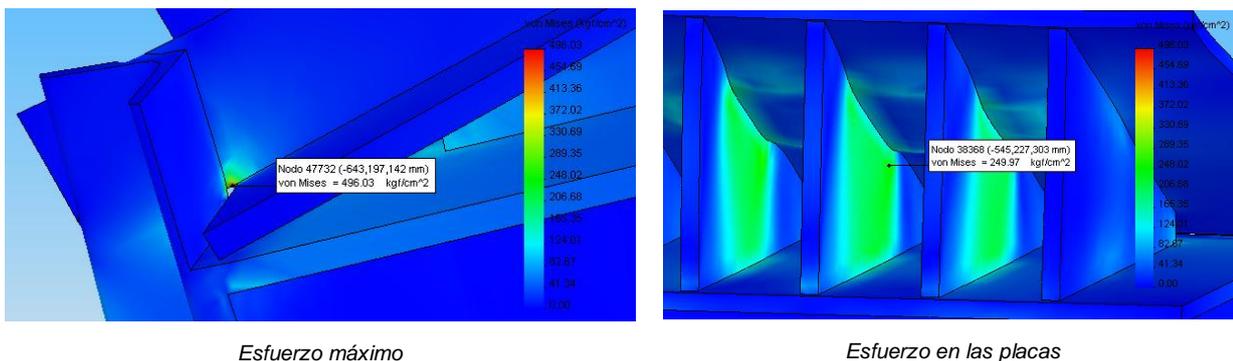


Figura 3.41 Lugar del esfuerzo de Von Misses máximo y en placas del accesorio 4

El resultado de las deformaciones unitarias máximas es de $1.6e-4$ y se encuentran en la intersección que se forma con ángulos AN30X3 en el accesorio. La deformación en las placas rigidizadoras es de alrededor de $1.0e-4$ en el centro de las mismas.

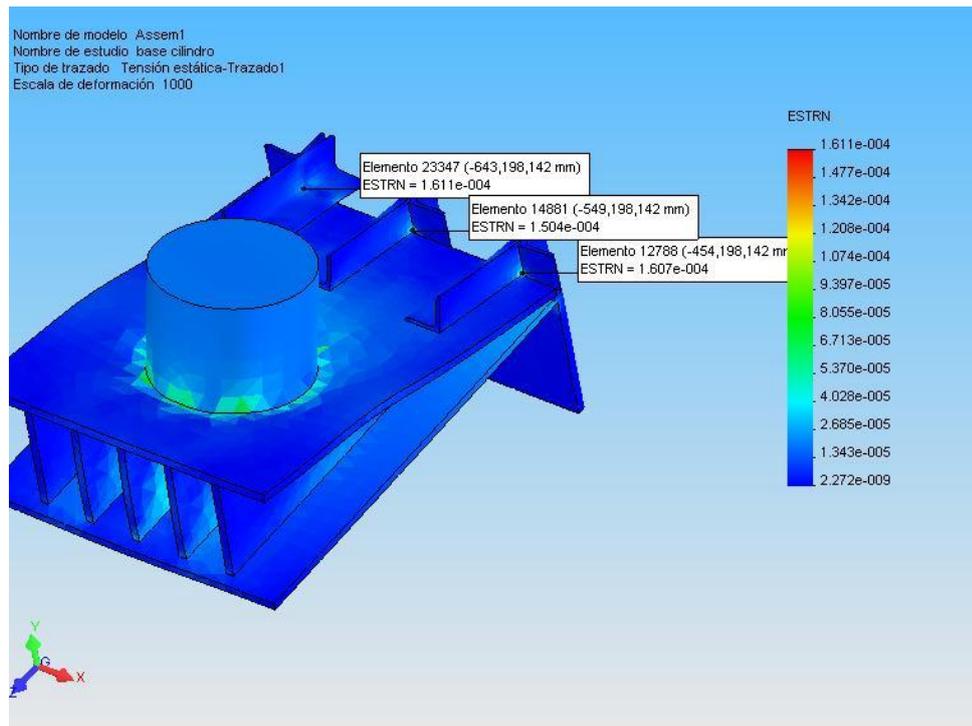


Figura 3.42 Resultados de la deformación unitaria equivalente máxima en el accesorio 4

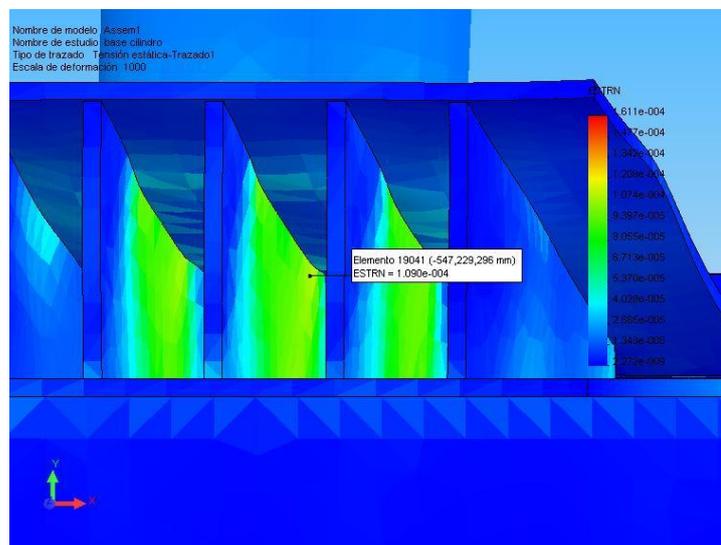


Figura 3.43 Deformación unitaria en las placas rigidizadoras en el accesorio 4

3.2.5.3 Construcción

Lo primero fue hacer los planos de detalle del elemento en el cual se especificaban los elementos, sus dimensiones y soldaduras; luego se hizo los planos de cortes (dimensiones de las placas a usarse y cantidad por placa) y

finalmente los diagramas de procesos. Una vez terminados los análisis de todos los elementos y sus planos se cuantificó cuanto material se necesitaba y se cotizó el trabajo.



Figura 3.44 Fotografía del accesorio 4

Para su construcción primero se cortó las placas cuadradas, las trapezoidales y los ángulos, luego se punteó todos los elementos con electrodo E6011 y se cuadro todo el conjunto.

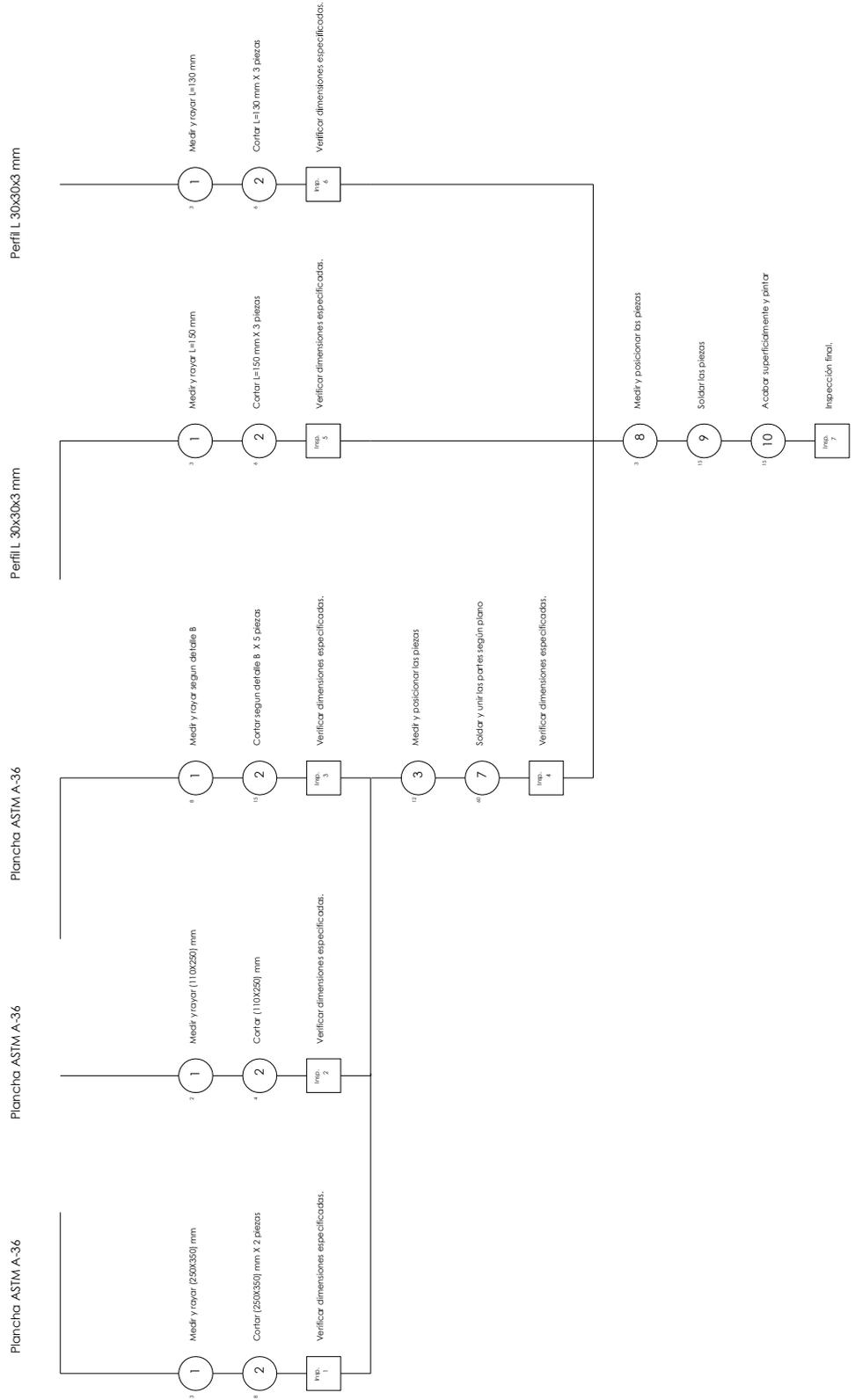
Luego se soldó con un electrodo E6013 en los lugares especificados en los planos, se limpió la escoria y amoló las imperfecciones de la suelda. Finalmente se lijó el elemento y procedió a pintar con un antioxidante.

3.2.5.4 Diagrama de proceso

ELEMENTO A FABRICARSE: Accesorio 4

CÓDIGO DEL PLANO: TP-04

FECHA DE CONSTRUCCIÓN: 09/12/2004



3.3 MODIFICACIONES AL PÓRTICO SELECCIONADO

3.3.1 INTRODUCCIÓN

Luego de diseñados y construidos los accesorios se procedió a modificar el pórtico con dichos accesorios, para ello se analizó los efectos que estos causarían sobre el mismo y como se comportaría el conjunto en Cosmos, el mismo que nos indicaría el correcto funcionamiento del mismo, también se debió analizar si los anclajes resistirían la nueva carga, pues estos fueron diseñados para soportar otro tipo de carga.

Una vez analizados los efectos y confirmado que el pórtico trabajaría correctamente con ellos, se procedió a instalarlos en el pórtico del vibróforo del laboratorio de resistencia de materiales.

Luego de instalados todos los componentes se verificó que el mecanismo de giro y posicionamiento diseñado funcionara correctamente.

3.3.2 SIMULACIÓN DEL CONJUNTO ACCESORIOS - PÓRTICO

La simulación tiene dos etapas, la cinemática y la mecánica, la primera se la realizó en el AutoCad en la cual se procedió a simular el movimiento del cilindro de la posición vertical a la inclinada. La segunda etapa se la realizó en Cosmos, en esta etapa se verifica una vez más el estado de esfuerzos del pórtico y todos los accesorios trabajando en conjunto, la resistencia de los anclajes y el desplazamiento que sufrirá el pórtico con la modificaciones realizadas, estos análisis también nos ayudarán en el siguiente sub-capítulo a determinar la ubicación de las galgas extensiométricas.

3.3.2.1 Simulación cinemática

Para la simulación cinemática se procede a trabajar con un archivo de AutoCad en el cual se encuentra el levantamiento en 3D de todo el pórtico del vibróforo. En este archivo se procede a insertar los accesorios dibujados también en 3D en la posición con el cilindro vertical.

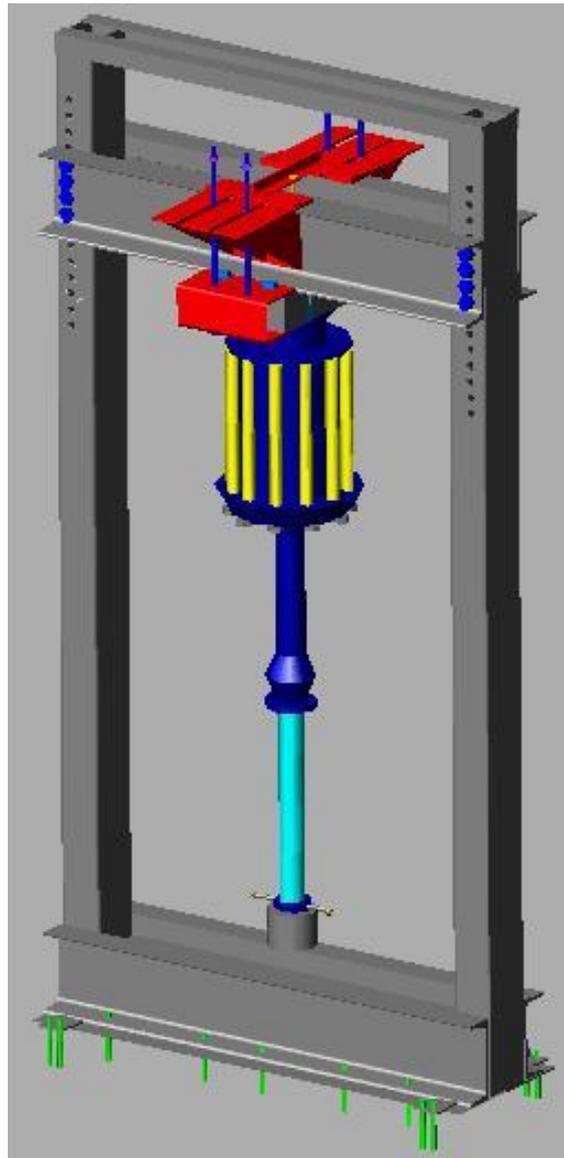


Figura 3.45 Modelación en AutoCad del pórtico en posición vertical 0°

Lo primero que analizamos es como se va a proceder a mover el cilindro y simulamos los pasos que se requieren para llevar al cilindro de la posición vertical a una inclinada 15°. Durante este proceso se reviso con mucho cuidado que ningún accesorio choque contra otro o que destruya al pórtico.

El primer paso consiste en retirar un pasador colocado en el accesorio 3 el cual nos ayudará a posicionar el cilindro a 200mm del eje de simetría del pórtico.

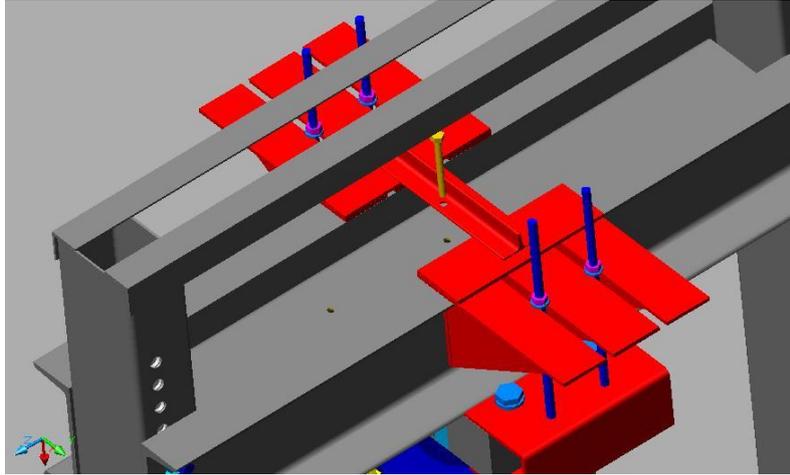


Figura 3.46 Modelación en AutoCad del inicio del cambio

Luego movemos el conjunto accesorios – cilindro desde la posición central hasta el punto designado a 200mm desde el eje de simetría y colocamos el pasador.

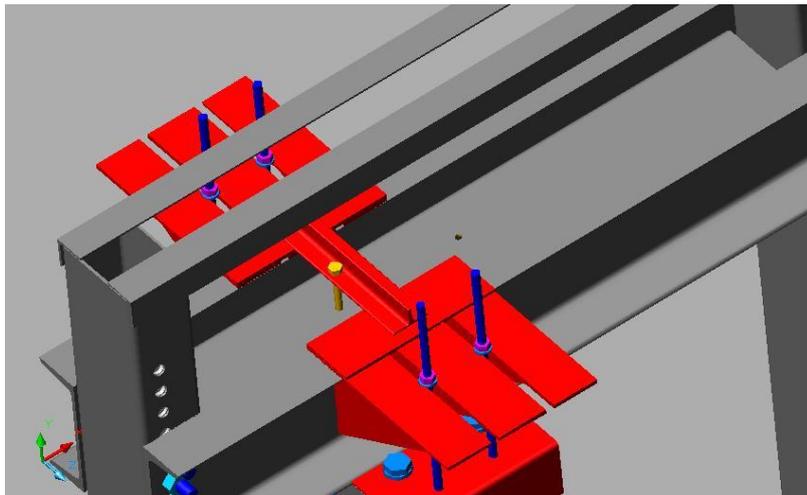


Figura 3.47 Modelación en AutoCad de la nueva posición vertical 0°

Ahora se procede a girar el cilindro, para esto se debe girar las tuercas superiores de los ejes roscados la distancia indicada con pintura en los mismos, dicha distancia corresponde a girar el cilindro 15° desde la vertical. El movimiento debe ser lento y siempre tratando de alternar los pernos para evitar que los ejes se deformen.

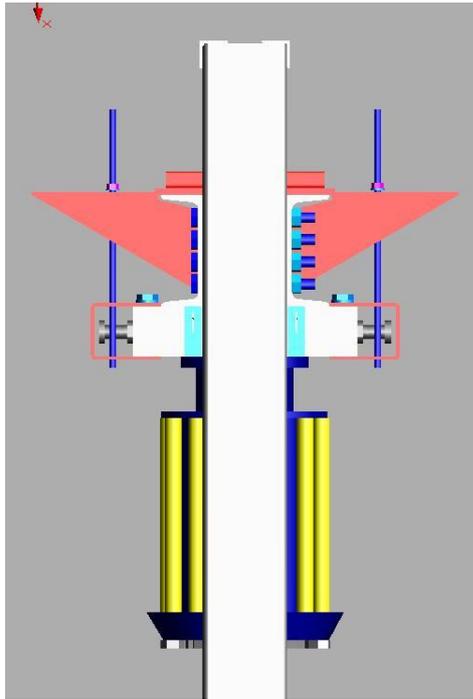


Figura 3.48 Modelación en AutoCad del giro (0°)

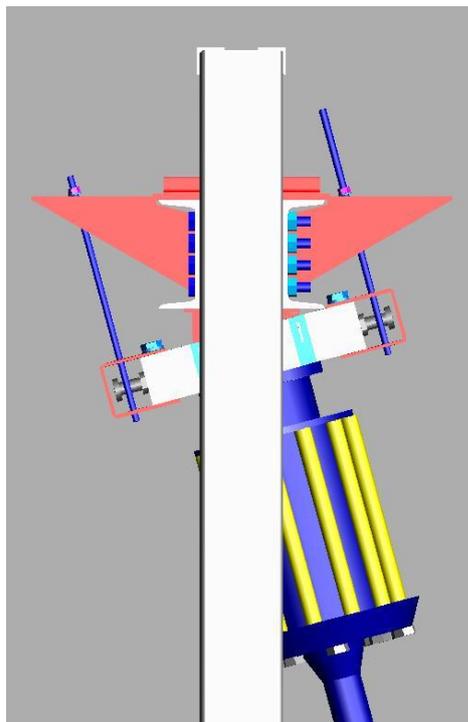


Figura 3.49 Modelación en AutoCad del giro (15°)

Ahora procedemos a colocar el último accesorio en la grada inferior de empotramiento del pórtico y a alargar el cilindro hasta hacerlo topar en la cara del accesorio 4.

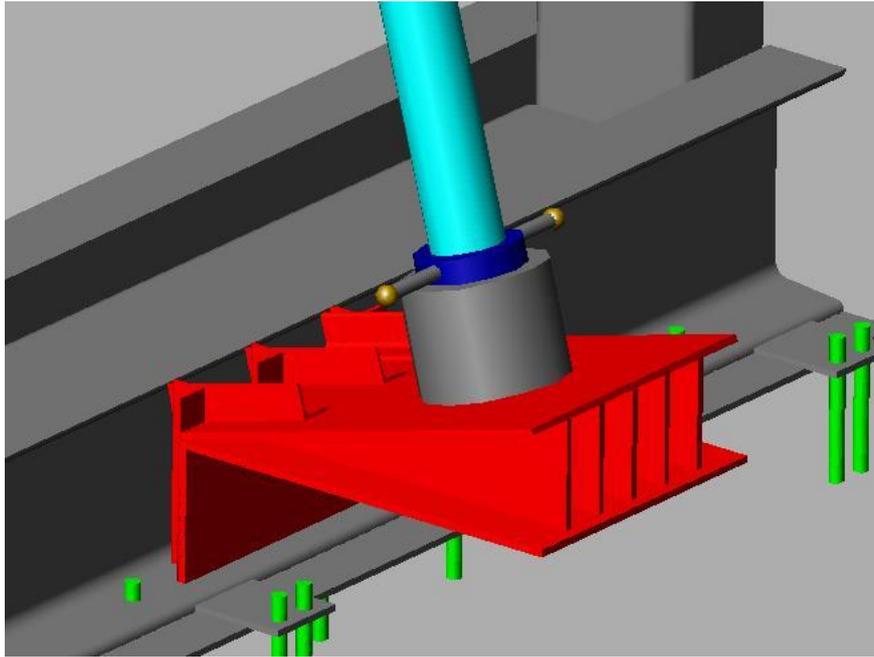


Figura 3.50 Modelación en AutoCad asentamiento del cilindro en el accesorio 4

Finalmente tenemos al cilindro óleo-hidráulico listo para aplicar carga en la nueva posición a 15° de la vertical y podemos garantizar que ningún accesorio interferirá en la movilidad de otro, además, este análisis nos permitió encontrar las mejores y más indicadas geometrías que los accesorios deberían tener.

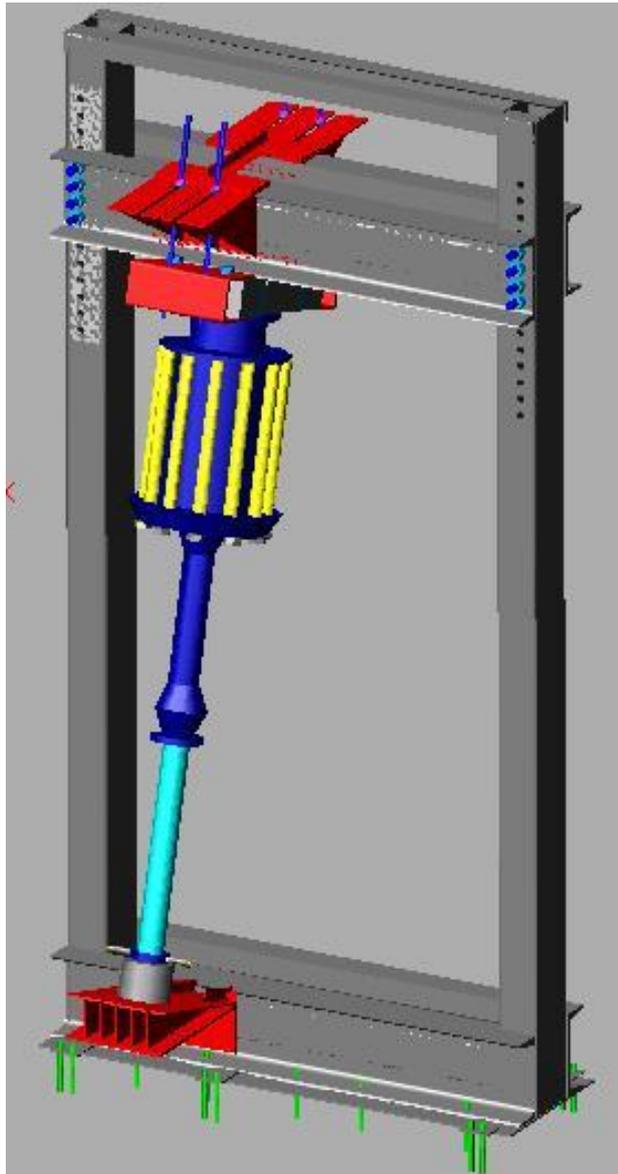


Figura 3.51 Modelación en AutoCad del pórtico en posición girada 15°

3.3.2.2 Simulación mecánica

El diseño mecánico se la llevo a cabo en Cosmos Works, para esto se exportó un archivo tipo ACIS de extensión *.sat del AutoCAD, el cual puede ser importado por el SolidWorks y guardado como ensamblaje. Se procede a colocar el tipo de material, las cargas y las restricciones al pórtico y a los accesorios insertados para luego analizar el esfuerzo, la deformación, los posibles lugares críticos, las reacciones en los anclajes, etc.

Luego de importar el archivo y mallar el conjunto, se procedió a analizar los lugares en los cuales se colocarían las restricciones y la carga máxima de 4000Kg. Los lugares elegidos se pueden ver en la siguiente imagen, estos no son completamente reales, pero se aproximan mucho a la situación real.

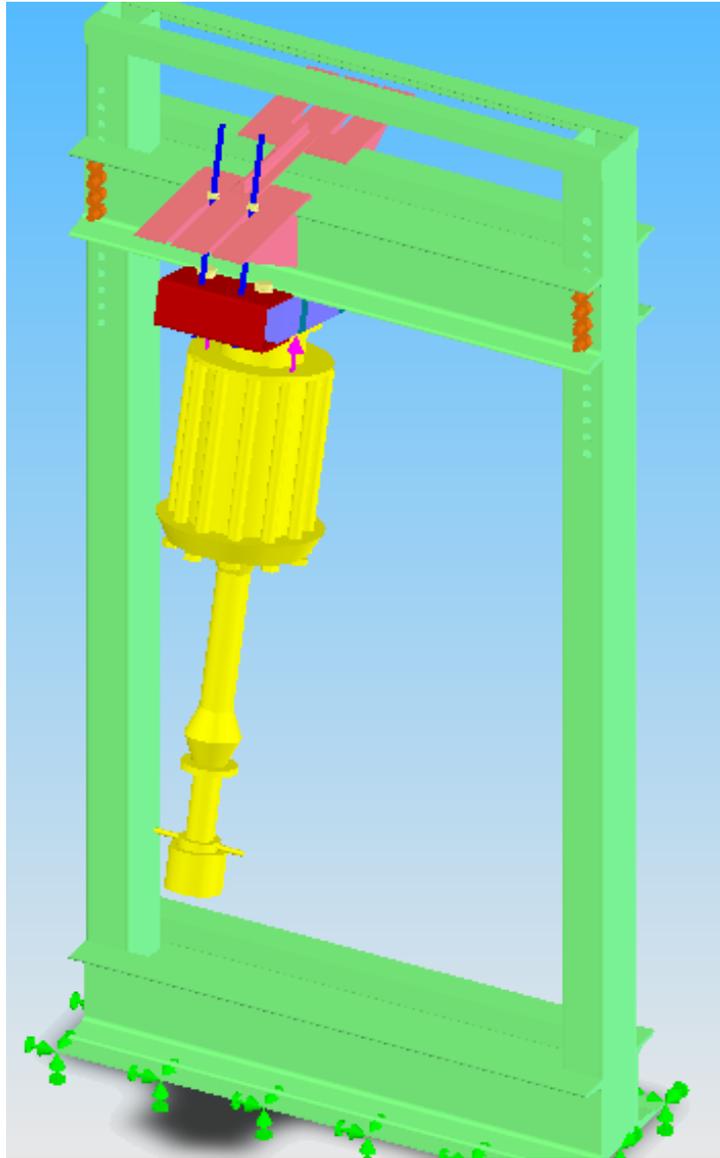


Figura 3.52 Cargas y restricciones en Cosmos del pórtico

Una vez hecho esto se procedió a correr el programa y verificar los esfuerzos en cada uno de los accesorios y además en el pórtico del vibróforo, estos son obviamente menores que los de diseño, pues estos fueron diseñados para una carga de 5000Kg y con factores de seguridad altísimos.

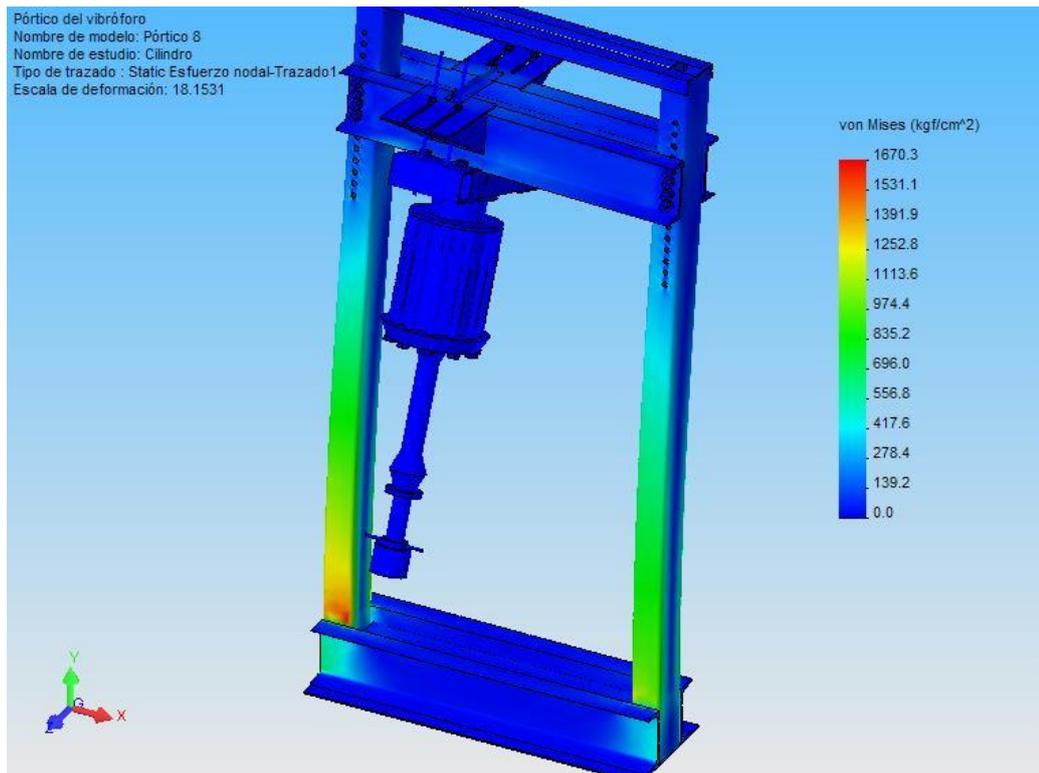


Figura 3.53 Resultados del esfuerzo de Von Misses en el pórtico

Podemos notar que el esfuerzo de Von Mises máximo es de 1670.3Kg/cm² y se encuentra en una de las columnas del pórtico, esta situación se analizará más a fondo en el siguiente sub-capítulo, lo interesante a este punto es que se confirma que el pórtico y sus accesorios luego de realizadas las modificaciones resisten perfectamente la carga.

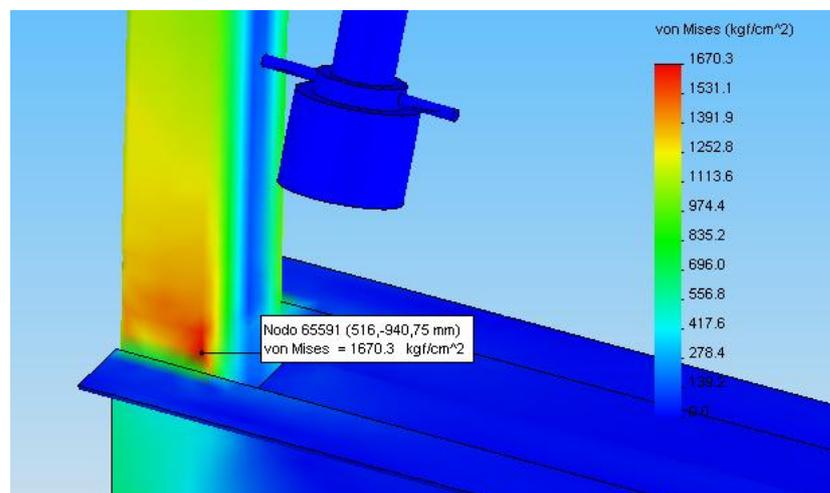


Figura 3.54 Lugar del esfuerzo de Von Misses máximo en el pórtico

3.3.3 ENSAMBLAJE FINAL

Una vez verificado que el pórtico soporta la carga de diseño y construidos todos los accesorios, se procedió a ensamblar el pórtico.



Figura 3.55 Pórtico modificado visto de frente

Para esto se procedió primero a bajar el cilindro óleo-hidráulico con muchas precauciones y seguridad, una vez bajado el cilindro se procedió a colocar el accesorio 3 en la viga superior y el accesorio 2 en el cilindro. Luego se colocaron los ejes en el accesorio 2 y se levantó nuevamente el cilindro a su posición vertical.



Figura 3.56 Los accesorios sostienen al cilindro óleo-hidráulico en su nueva posición



Figura 3.57 El cilindro girado 15° asienta perfectamente sobre el accesorio
4

El accesorio 1 y 4 son únicamente necesarios al girar 15° el cilindro por tanto se los colocó luego de el procedimiento de giro del cilindro y se realizaron pruebas de carga para verificar su construcción y resistencia.

3.4 ANÁLISIS Y UBICACIÓN DE LAS ROSETAS DE DEFORMACIÓN

En este sub capítulo se procederá a analizar la ubicación de los puntos mas convenientes para la colocación de las rosetas de deformación dentro del pórtico del vibróforo de baja frecuencia del LRM, este análisis es muy importante puesto que la toma de datos de la deformación unitaria debe ser obtenida de sectores claves de la estructura, tales sectores presentarán una deformación unitaria apreciable con el fin de obtener datos mas precisos.

Luego de este análisis se procederá a la colocación de las rosetas de deformación, dicha labor deberá ser realizada con extremo cuidado y siguiendo estrictamente los pasos debidamente detallados en el capítulo II, para finalizar se procederá a verificar la correcta colocación de las rosetas, así como su correcto funcionamiento.

3.4.1 ANÁLISIS Y UBICACIÓN DE LAS ROSETAS DE DEFORMACIÓN EN SOLID WORKS

Para este análisis nos valdremos del programa computacional Solid Works y Cosmos Works, estos programas son capaces de realizar un análisis de esfuerzo de manera muy precisa, presentan los valores de esfuerzo en un gráfico coloreado, en donde se puede notar claramente el o los puntos de mayor esfuerzo figura 3.57.

Para este análisis se ha trabajado con el esfuerzo de Von Misses, y se han comparado dichos valores con los valores de resistencia de los perfiles que componen el pórtico para determinar que no exista fallo de ninguno de los elementos, si bien ya se detalló este particular con SAP2000 en la parte

primera de este capítulo se ha podido comprobar nuevamente con otro paquete computacional, con lo cual se ratifica la veracidad del cálculo.

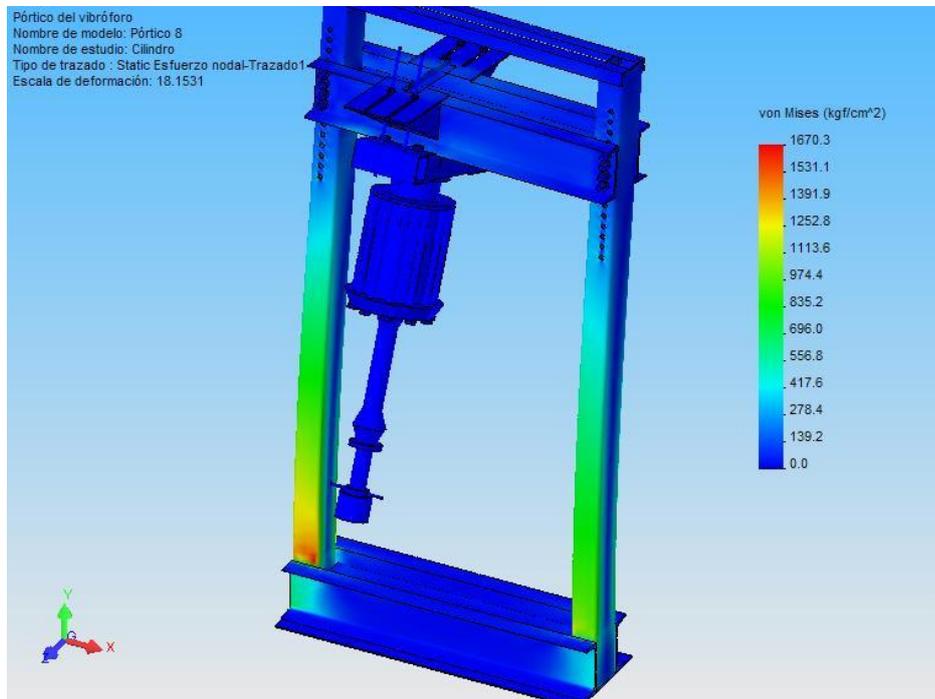


Figura 3.58 Estado de esfuerzos para el pórtico del vibróforo con 4000Kg.

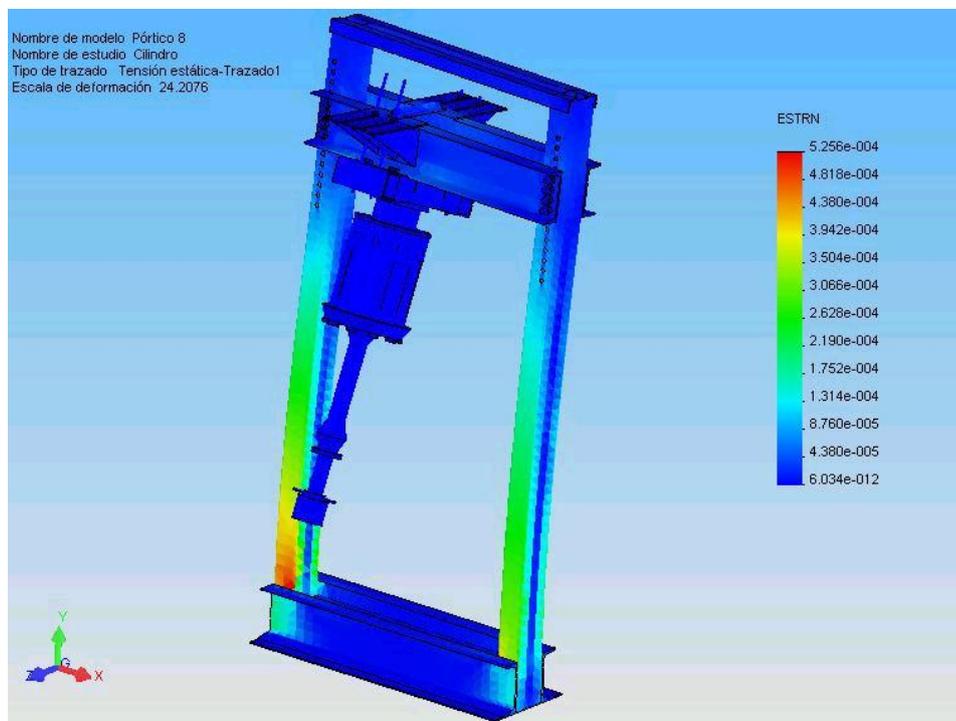


Figura 3.59 Deformaciones unitarias con 4000Kg.

Debido a que se debe comprobar los valores de demanda-capacidad de cada uno de los elementos se procederá a elegir un punto de cada uno de ellos, este punto será en donde se encuentre el esfuerzo máximo y por lo tanto la deformación máxima. También se elegirá un punto en el cual la deformación unitaria sea igual a cero o que su valor sea tan pequeño que se lo pueda considerar como cero, para poder ubicar cada uno de los elementos se les ha dado una codificación la cual se muestra en la figura 3.59.

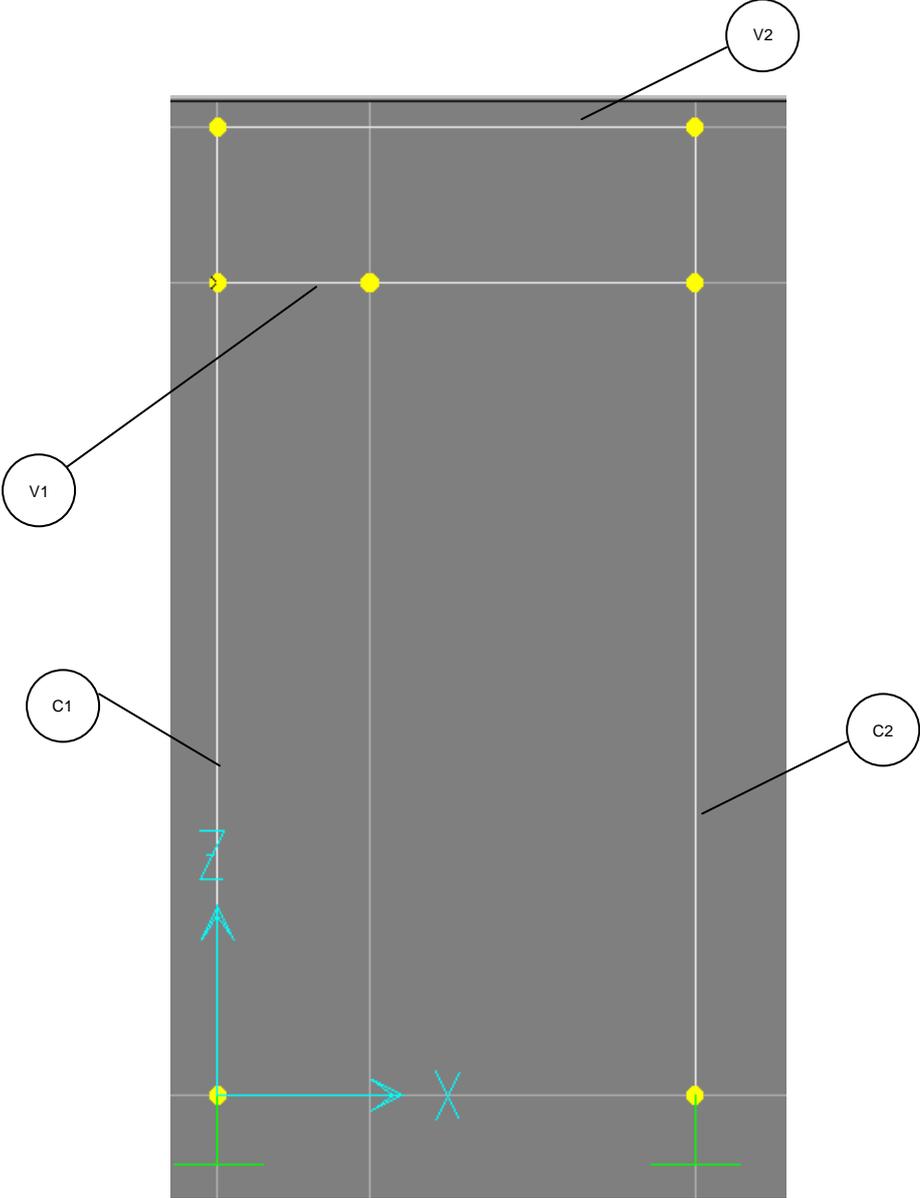


Figura 3.60 Codificación de los elementos.

Una vez revisados los datos calculados por Comos Works se determinaron los puntos de mayor esfuerzo dentro de esta estructura, la ubicación de dichos puntos es detallada a continuación.

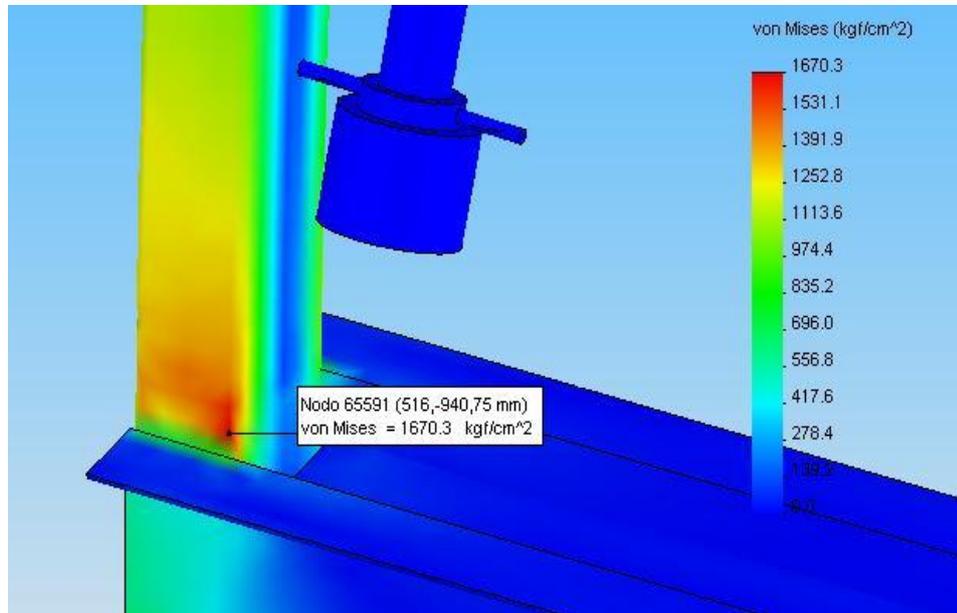


Figura 3.61 Punto A elemento C1 (Esfuerzo máximo).

Punto de esfuerzo máximo dentro del pórtico del vibróforo de baja frecuencia, en este punto es primordial contar con una roseta de deformación, la codificación del elemento es C1.

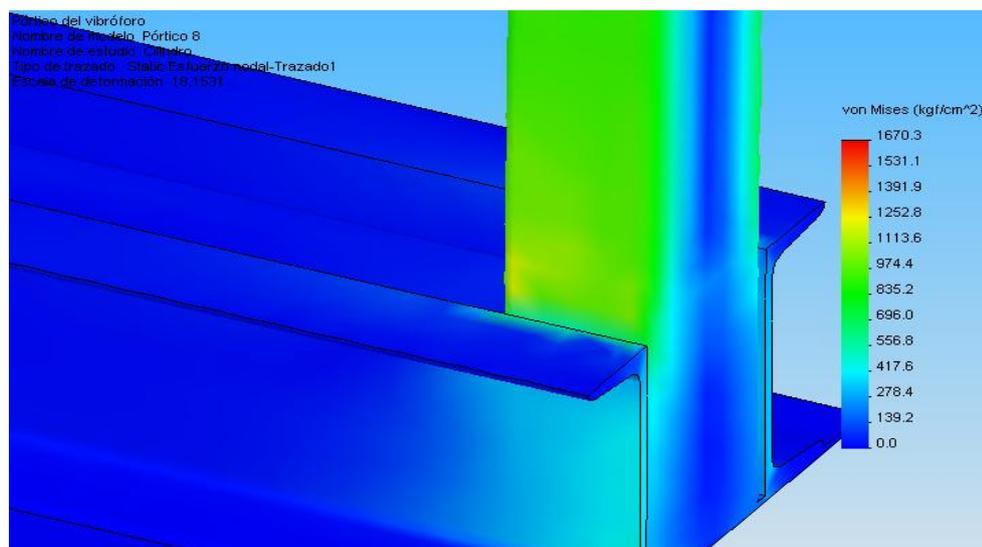


Figura 3.62 Punto B elemento C2.

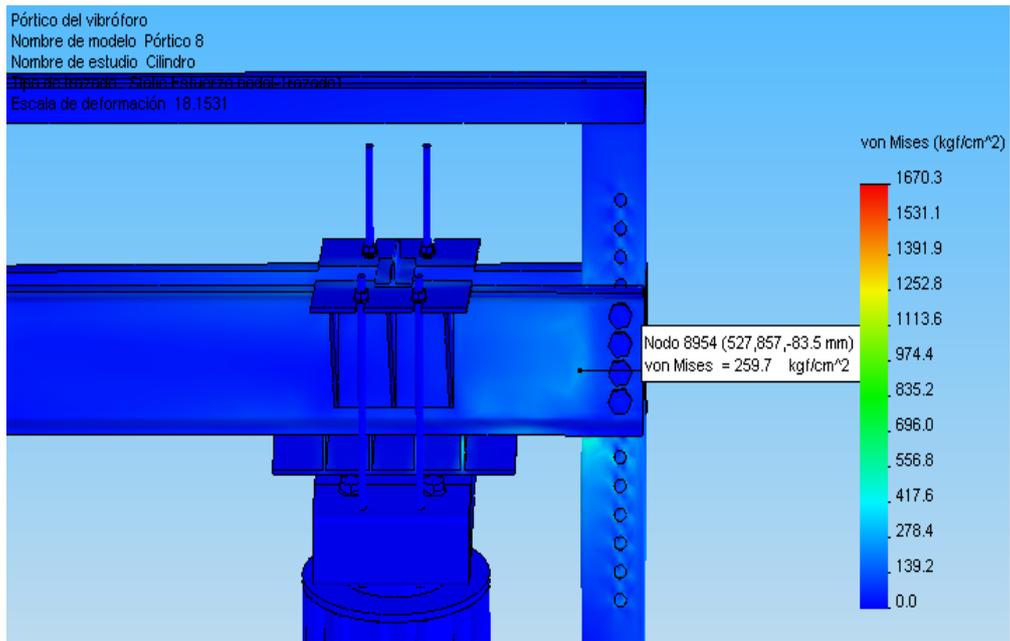


Figura 3.63 Punto C elemento V1.

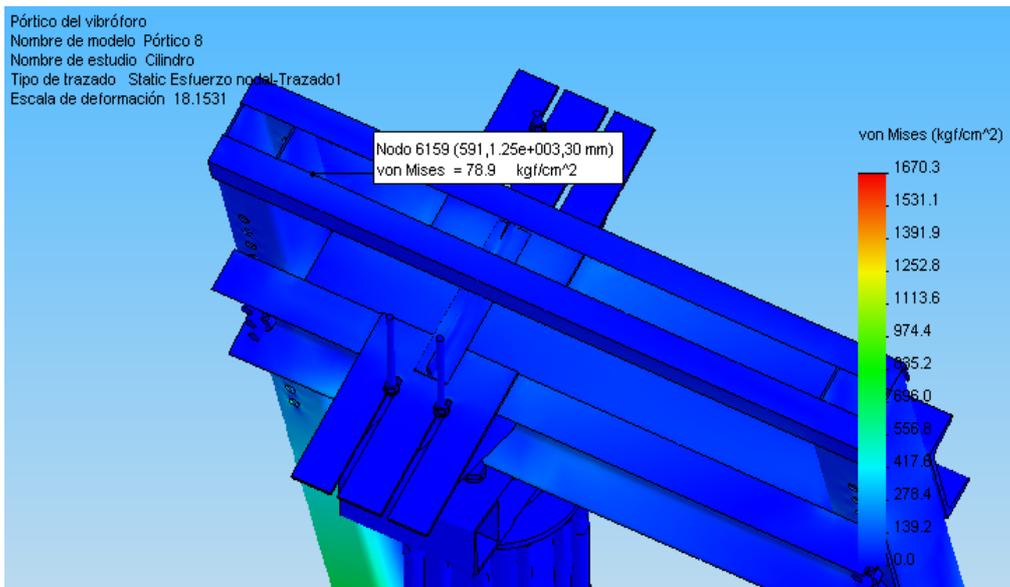


Figura 3.64 Punto D elemento V2.

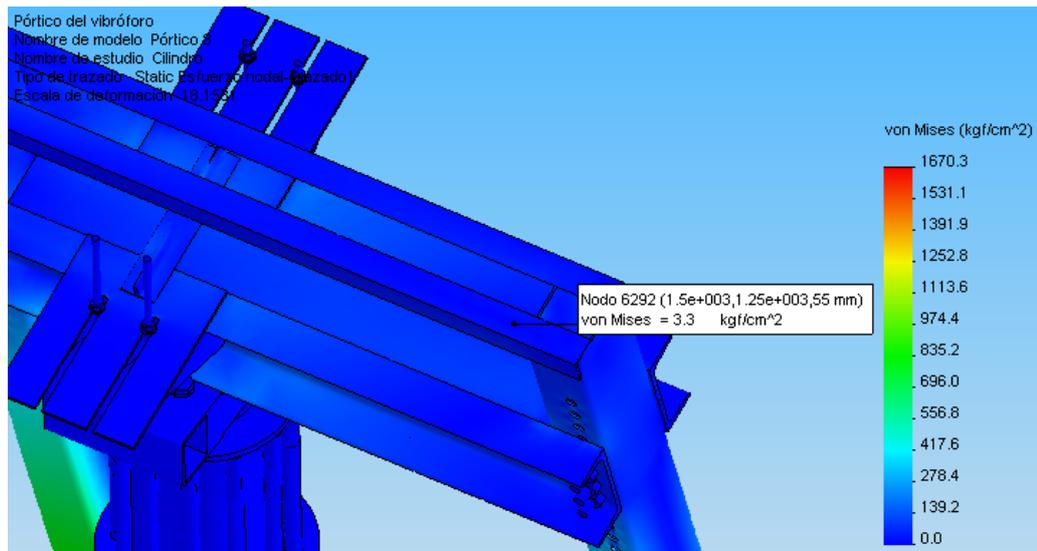


Figura 3.65 Punto E elemento V2.

En la figura 3.65 se muestra el punto en donde el esfuerzo es mínimo dentro de la estructura del pórtico, el valor de 3.3 Kgf/cm² es muy bajo y se lo puede considerar como cero.

Una vez conocidos los puntos de esfuerzo máximo para cada elemento y el punto en donde el esfuerzo es igual a cero se determinará que en dichos puntos la deformación unitaria será también máxima y mínima respectivamente, debido a que el esfuerzo y la deformación unitaria son proporcionales antes de la fluencia.

Se necesitan por lo tanto 5 rosetas de deformación para colocarlas dentro de la estructura, pero por razones económicas se deberá elegir los puntos mas importantes, por esto se ha elegido la columna C1 en donde se encuentra el punto A, y en la viga V1 el punto C se considerará también como opcional para la toma de datos y se extenderá el significado de los resultados para los otros puntos, es importante señalar que si bien la colocación de las rosetas no puede ser completamente exacta pero se debe procurar que lo sea, puesto que el esfuerzo varia de punto a punto y una mala colocación podría producir un error demasiado grande.

3.4.2 UBICACIÓN DE LAS ROSETAS DE DEFORMACIÓN

La ubicación de las rosetas de deformación se la realizó siguiendo los pasos debidamente detallados en el capítulo II, algunos de las sustancias, materiales fueron remplazadas por las existentes en el laboratorio debido a que estas han demostrado funcionar con efectividad en otras aplicaciones.

A continuación se presentan los pasos realizados para el pegado de las rosetas de deformación en los puntos determinados anteriormente.

Paso 1 Limpiar la superficie lo cual se realizará primeramente lijando para la remoción de la pintura, y luego con la ayuda de un esparadrapo y tiñer.



Figura 3.66 Limpieza de la sección en donde se colocara la roseta.

Paso 2 Remoción de todos los óxidos y colocación del acondicionador para limpiar debidamente la superficie.



Figura 3.67 Colocación del acondicionador.

Paso 3 Se aplicó el neutralizador en la superficie varias veces con ayuda de pinzas y esparadrapo, luego se lo removi6.



Figura 3.68 Aplicaci6n del neutralizador.

Paso 4 Se recortaron los conectores y se posicionaron los contactos antes de pegar la galga.



Figura 3.69 Preparación antes del pegado 1.



Figura 3.70 Preparación antes del pegado 2.

Paso 5 Para esto el posicionamiento fue realizado de manera aproximada sin los ejes que se recomiendan, esto debido a la dificultad de hacerlo.

Paso 6 Colocación de la cinta adhesiva para evitar el movimiento al momento del pegado.



Figura 3.71 Fijación de la roseta con la cinta adhesiva.

Paso 7 Pegar colocando un poco de adhesivo, para nuestro caso pega común llamada “La Brujita”.



Figura 3.72 Pegado de la roseta.

Paso 8 Aplicación de carga uniforme con ayuda de un borrador durante algunos minutos.



Figura 3.73 Fijación de la roseta con ayuda de un borrador.

Paso 9 Colocación de una capa de silicona y soldado de los cables para la conexión eléctrica.



Figura 3.74 Colocación de capa de silicona y soldado de cables.

CAPÍTULO 4

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

4.1 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En este capítulo se hablará del sistema de adquisición de datos el cual será utilizado para la realización del presente trabajo de tesis, en su primera parte se definirán las distintas alternativas existentes detallando cada una de estas para luego escoger la mejor alternativa e implementarla.

Para determinar la mejor alternativa se realizará una matriz de decisión en la cual se encontrarán algunos criterios importantes de selección tales como son: precio, utilización, disponibilidad en el mercado, etc.

Una vez determinada la mejor opción e implementada esta brindará una pequeña guía en relación al funcionamiento del equipo seleccionado, es decir se explicará como se llevará a cabo el proceso de acondicionamiento de señal así como también se brindará información de las características esenciales de la tarjeta de adquisición de datos.

Por último se procederá al diseño del programa el cual procesará los datos y mostrará los resultados, en esta etapa se mostrará los pasos necesarios para la realización del mismo así como el programa en su debido lenguaje.

4.1.1 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

A continuación se detallan las distintas alternativas existentes para la adquisición y procesamiento de datos, estas alternativas están basadas en las posibilidades de los ejecutores del proyecto.

El autómata programable o más conocido como **PLC** por sus siglas en ingles (Programmable logic controller) controlador lógico programable figura 4.1, es muy usado en la industria para la automatización de procesos, debido a su naturaleza robusta es ideal para el ambiente industrial. Su campo de utilización

es muy amplio y se lo puede encontrar en cualquier parte en donde existan procesos de transformación industriales o control de instalaciones.



Figura 4.1 PLC.²⁵

De manera general se podría decir que un PLC es una computadora puesto que tiene una unidad central de proceso la cual realiza el procesamiento de los datos exteriores tomados de los sensores, para nuestro caso particular las rosetas de deformación, por lo tanto el PLC obtiene, procesa, y muestra la información relacionada con el proceso, esto debido a que posee los componentes necesarios para dichas tareas.

Dentro de las ventajas y desventajas de la utilización de un PLC se podrían mostrar como ventajas principales: fácil utilización, variedad y disponibilidad en el mercado, es capaz de ser utilizado en otras tareas es decir se lo puede utilizar con más de una máquina o proceso dependiendo de su capacidad. Dentro de las desventajas tenemos: costo muy elevado, es posible conectarlo a un ordenador común pero esto significaría la adquisición de accesorios adicionales lo cual se traduciría en un incremento del costo, sub utilización del

²⁵ <http://digilander.libero.it/mikimoni/immagini/plc7.jpg>, Foto de un PLC, 2001

sistema debido a que la mayoría de los PLC's tienen una capacidad muy grande para las expectativas planteadas en el actual proyecto. Existen además muchísimas ventajas y desventajas de la utilización de un PLC que no han sido mencionadas aun y que son de gran importancia pero las detalladas anteriormente son las que se han considerado indispensables tomando en cuenta las condiciones particulares.

Existen también en el mercado los **llamados PLC modulares** mostrados en la figura 4.2 los cuales son mucho más pequeños y con la capacidad de ser ampliados, estos son más convenientes para nuestro proyecto debido a que el costo también se reduce.



Figura 4.2 PLC modular

La diferencia esencial entre un sistema modular y un PLC normal es el lugar en donde se realiza el procesamiento de la información puesto que en los sistemas modulares normalmente el procesamiento se lo realiza en un ordenador común, es decir no poseen un procesador por lo cual se hace indispensable su conexión a un computador.

Para la transmisión de los datos son necesarios accesorios adicionales tales como tarjetas, cables, antenas, etc. dependiendo de la vía de transmisión de información. La transmisión de datos en este tipo de sistemas al ordenador se la realiza de maneras muy diferentes en la figura 4.3 se muestran algunas de las alternativas.

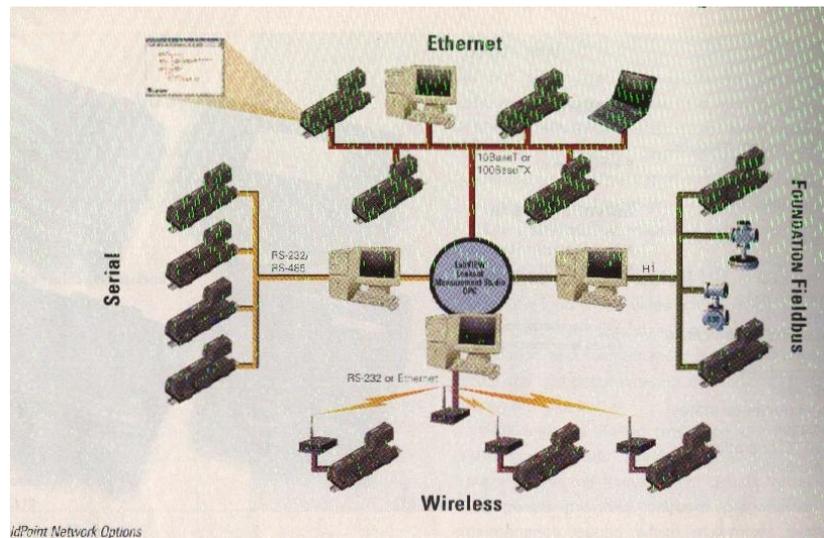


Figura 4.3 Transmisión de datos para PLC's compactos.²⁶

Dentro de estas alternativas se notan conexiones mediante el puerto serial de la computadora, redes de ethernet, sistemas inalámbricos, entre otros, dependiendo de las necesidades de cada persona, particularizando y para el caso en estudio bastaría con una conexión mediante el puerto serial o USB.

Dependiendo de las necesidades el usuario puede adquirir los distintos módulos entre los cuales tenemos: módulos para entrada y salida tanto de datos digitales como análogos, fuentes de energía, módulos para trabajos en redes, módulos para transmisión y adquisición de datos vía radio, etc.

Se observó además que el laboratorio poseía un aparato el cual tomaba datos de las galgas extensiométricas, dicho aparato puede trabajar con configuraciones de: cuarto de puente, medio puente, y puente completo. El aparato antes mencionado es el **medidor de deformaciones (DMD 20 A)** el cual se indica en la figura 4.4, entre las características más importantes para este aparato se tiene:

- Mediciones para medio cuarto y puente completo.
- Factor de galga ajustable.
- Balance continuo (para el enceramamiento).

²⁶ National Instruments, The Measurement and Automation Catalog, 2002, pp 496. (Similar a Field Point)

- Pantalla digital de 4 dígitos y medio
- Salida Analógica.
- Puede trabajar de 10 a 15 horas con las baterías cargadas.
- Facilidad de operación debido a su tamaño (pequeño y liviano).
- Energiza el transductor (galga extensiométrica).



Figura 4.4 Medidor de deformaciones unitarias.

El DMD 20 A tiene dos funciones primordiales proporcionar poder al transductor en este caso la roseta de deformación y amplificar la señal medida.

Para las necesidades de este proyecto no es viable trabajar solamente con este aparato puesto que la señal deberá ser enviada al ordenador para posteriormente ser procesada en el mismo gracias a un software, por esta razón se debe tener otro aparato el cual realice la adquisición de datos y sea capaz de enviar dichos datos al computador.

Existe la posibilidad de realizar la adquisición ayudados de otro equipo para esto se ha escogido otro elemento del laboratorio, este elemento es la **tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS de la empresa Measurement Computing**, mostrada en la figura 4.5 gracias a esta tarjeta se logrará

completar el proceso de adquisición de datos es decir toma de datos del sensor en nuestro caso las rosetas de deformación, amplificación y filtrado que lo realizaría el medidor de deformaciones (DMD 20 A), y por último la adquisición de la señal estaría a cargo de la tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS la cual además llevaría la señal al computador, por medio del puerto USB, es importante decir que dicha tarjeta no puede trabajar por si misma ya que no tiene el circuito necesario para el tratamiento de la señal es decir: amplificación, filtrado, acondicionamiento ,etc.



Figura 4.5 Tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS

Las características principales de esta tarjeta de adquisición de datos son presentadas a continuación en la tabla 4.1:

Tabla 4.1 Características de la tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS²⁷

| Entradas Analógicas | | |
|---|--------------------------|---|
| Parámetro | Condición | Especificaciones |
| Convertidor tipo A/D | | Tipo aproximaciones sucesivas |
| Rango de voltaje lineal de entrada, Modo final | CHx a GND | ±10V max |
| Rango de voltaje en modo operación, Modo diferencial | CHx a GND | -10V min, +20V max |
| Voltaje absoluto de entrada máximo | CHx a GND | ±40V max |
| Corriente de entrada (Note 1) | Vin = +10V | 70µA typ |
| | Vin = 0V | -12µA typ |
| | Vin = -10V | -94µA typ |
| Número de canales | | 8 simples / 4 diferenciales |
| Rango de entrada ,Modo simple | | ±10V, G=2 |
| Rangos de entrada modo diferencial. | | ±20V, G=1; ±10V, G=2; ±5V, G=4; ±4V, G=5; ±2.5V, G=8; ±2.0V, G=10; ±1.25V, G=16; ±1.0V, G=20; Software elegible |
| Datos | Software | 50 S/s |
| | Escaneo continuo | 1.2 kS/s |
| | escaneo a 4K simple FIFO | 8 kS/s |
| Canal de ganancia | Mas de 8 elementos | Canales y ganancia |
| Resolución (Nota 2) | Diferencial | 12 bits, sin códigos perdidos |
| | Simple | 11 bits |
| CAL Precisión | CAL = 2.5V | ±0.05% typ, ±0.25% max |
| Error lineal integral | | ±1 LSB typ |
| Error lineal diferencial | | ±0.5 LSB typ |
| CAL corriente | Recurso | 5mA max |
| | Penetración | 20µA min, 200nA typ |
| Recurso de desencadenamiento | Software elegible | Digital Externo: TRIG_IN |

²⁷ Measurement Computing, User`s Guide, PMD- 1208LS, pp. 6-1 – 6-3

Tabla 4.1 Características de la tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS28 (Continuación)

| Entradas y Salidas Digitales | | |
|---|---|------------------------|
| Tipo digital | 82C55 | |
| Número de I/O | 16 (Puerto A0 a través A7, Puerto B0 a través B7) | |
| Configuración | 2 orillas de 8 | |
| Configuración Arranque/parar | Todos los pines están en 47k via por defecto. Posición disponible para apagar. Hardware seleccionable via zero ohm resistors como una opción desde fábrica. | |
| Voltaje máximo de entrada | 2.0V min, 5.5V absoluto max | |
| Voltaje mínimo de entrada | 0.8V max, -0.5V absoluto mínimo | |
| Voltaje máximo de salida (IOH = -2.5mA) | 3.0V min | |
| Voltaje mínimo de salida (IOL = 2.5mA) | 0.4V max | |
| <i>Características Generales</i> | | |
| Parámetros | Condiciones | Especificaciones |
| Controlador del reloj (error)USB | 25 °C | ±30 ppm max |
| | 0 a 70 °C | ±50 ppm max |
| | -40 a 85 °C | ±100 ppm max |
| Dispositivo tipo | | USB 1.1 baja velocidad |
| Compatibilidad del dispositivo | | USB 1.1, USB 2.0 |

Dentro de las ventajas y desventajas que se puede citar en relación con esta última alternativa se tiene:

Ventajas:

- El costo de la tarjeta es bajo.
- Se tiene toda la información necesaria puesto que existe el cilindro de pared gruesa que se encuentra en el laboratorio de resistencia de materiales que trabaja de forma similar.
- Es un aparato compacto y de fácil manejo

²⁸ Measurement Computing, User`s Guide, PMD- 1208LS, pp. 6-1 – 6-3

- Posee un puerto USB para la conexión al ordenador, dicho puerto entrega la corriente para el funcionamiento de la tarjeta minimizando así el riesgo de daño por sobrecarga eléctrica.
- Posee librerías las cuales trabajan con LabView programa conocido por los ejecutores de este proyecto.

Desventajas:

- La velocidad de muestreo es baja en comparación con otras tarjetas.
- La tarjeta presenta sensibilidad a la corriente estática.

Las desventajas que presenta esta tarjeta no influyen en los resultados y las ventajas son visibles.

Si se necesita profundizar en el conocimiento del funcionamiento de cualquiera de estos equipos refiérase a los manuales del usuario existentes en el laboratorio de resistencia de materiales de la Escuela Politécnica del Ejército.

De esta manera se ha determinado que se poseen 4 alternativas las cuales a continuación se las enlista para posteriormente elegir la mejor opción.

- Adquisición de datos por medio de un PLC.
- Adquisición de datos por medio de un PLC modular.
- Adquisición de datos por medio de un medidor de deformaciones unitarias.
- Adquisición de datos por medio de un medidor de deformación y una tarjeta de adquisición de datos.

4.1.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Una vez detalladas las alternativas se procederá a la selección de la mejor opción mediante una matriz de decisión, dentro de las características a valorar encontramos facilidad de uso puesto que se necesita ciertos conocimientos para la utilización de los equipos pero debido a la formación de los ejecutantes del proyecto se esperaría que los mismos estén lo suficientemente bien calificados para usar cualquiera de los aparatos detallados anteriormente, además es importante el rendimiento del equipo es decir que se aprovechen las capacidades del equipo lo mejor posible, esto tampoco tiene gran peso puesto que si el equipo esta subutilizado este podría servir para otras aplicaciones dentro del laboratorio. El tiempo es importante puesto que el proyecto esta planeado para un cierto tiempo, y para cumplir este tiempo y el objetivo general del proyecto es necesario tener la información adecuada y los aparatos deben cumplir con las expectativas. El factor económico será siempre un factor clave puesto que en calidad de estudiantes es imposible disponer de demasiado dinero, además se deberá tomar en consideración la compatibilidad de los equipos con los programas a usarse además de un tratamiento de datos adecuado, con estas consideraciones se plantea la matriz de decisión la cual encontramos en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Matriz de decisión para escoger el sistema de adquisición de datos adecuado.

| Matriz de decisión | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
| Características a valorar | FP | PLC | PLC Modular | MDU | MDU y TAD | Observaciones |
| Facilidad de uso | 4.00% | 7.00 | 7.00 | 8.00 | 7.00 | Ya que el MDU es antiguo |
| Rendimiento del equipo | 5.00% | 3.00 | 4.00 | 9.00 | 8.00 | La capacidad del PLC es sub utilizada |
| Disponibilidad de Información | 8.00% | 6.00 | 6.00 | 8.00 | 8.00 | Existe una tesis realizada con el mismo DAQ |
| Tiempo de implementación | 8.00% | 4.00 | 5.00 | 10.00 | 9.00 | El aparato esta construido |
| Compatibilidad con LabView | 9.00% | 10.00 | 10.00 | 1.00 | 9.00 | Todos trabajan con LabView menos MDU |
| Manejo adecuado de datos | 15.00% | 9.00 | 9.00 | 0.00 | 8.00 | La velocidad de la TAD es un poco baja |
| Costo del sistema | 25.00% | 2.00 | 3.00 | 10.00 | 8.00 | El valor de la TAD es bajo y el MDU ya se lo tiene |
| Cumplimiento de requerimientos | 26.00% | 9.00 | 9.00 | 1.00 | 9.00 | Los datos deben ser transmitidos al computador |
| Total | 100.00% | 6.32 | 6.70 | 5.06 | 8.39 | El MDU y TAD tienen la mejor calificación sobre 10 |
| | | X | X | X | √ | |

Donde:

FP = Factor de peso (peso a tomarse en cuenta en la decisión).

MDU = Medidor de deformaciones unitarias.

TAD = Tarjeta de adquisición de datos.

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA SELECCIONADO

Debido a que el sistema de adquisición de datos será utilizado para otros equipos existentes en el laboratorio a continuación se procederá a detallar el funcionamiento del sistema de adquisición de datos para esto lo dividiremos en dos partes principales el acondicionamiento de señal y la tarjeta de adquisición de datos. Como ya se mencionó anteriormente en el capítulo II el tratamiento de datos está dividido en 4 partes principales tales como acondicionamiento de la señal, excitación de los transductores, conversión análogo-digital, y por último tratamiento de datos.

El acondicionamiento de la señal será realizado por el medidor de deformaciones unitarias (DMD 20 A), el envío de datos a la computadora será realizado por la tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS de la empresa Measurement Computing mediante su conexión por el puerto USB, por último el tratamiento de datos será realizado por un programa computacional desarrollado por los ejecutores del proyecto de tesis en lenguaje G en el programa LabView 6.1. De esta manera se ha completado el ciclo de tratamiento de datos a continuación se detalla los elementos necesarios para este ciclo.

4.2.1 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

El aparato a utilizarse para el acondicionamiento de la señal funciona en configuraciones de medio, un cuarto y puente completo en donde la resistencia a variar es la galga extensiométrica, para nuestro caso se trabajará con la configuración de medio puente mostrada en la figura 4.6, el voltaje con el que se trabaja en el puente es de 1 V y con una frecuencia de 225 Hz. En la figura 4.7 se encuentra el diagrama electrónico con todas las partes del medidor de deformaciones, de manera general se parte del puente (medio puente para nuestro caso) el cual es energizado por la fuente, esta señal entregada por el puente es amplificada en el diferencial amplifer (amplificador diferencial), se posee además un selector en donde se define el factor de galga en una escala de 0 a 28, para nuestro caso y por ser una característica íntimamente

relacionada con la galga se tomará el valor de 2, posteriormente la señal es entregada al demodulador el cual rectifica la señal, para luego pasar por medio de un filtro el cual elimina cualquier ruido finalmente la señal es amplificada antes de tenerla lista en la salida análoga o digital dependiendo de la necesidad del usuario, para nuestro caso se utilizará la salida análoga.

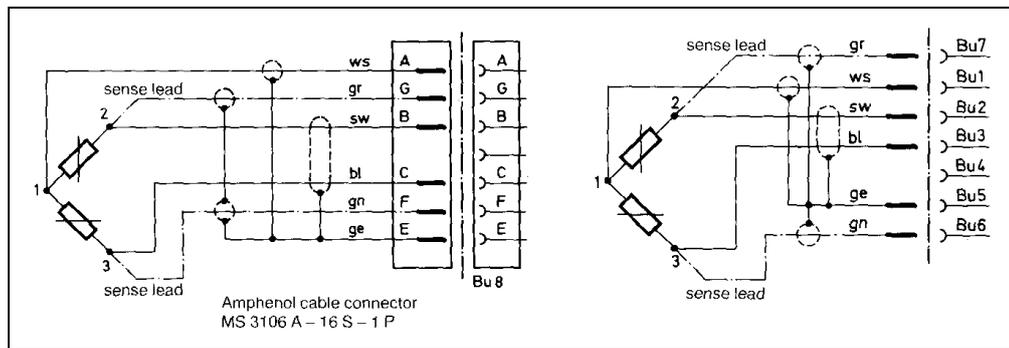


Figura 4.6 Configuración medio puente del DMD 20 A.²⁹

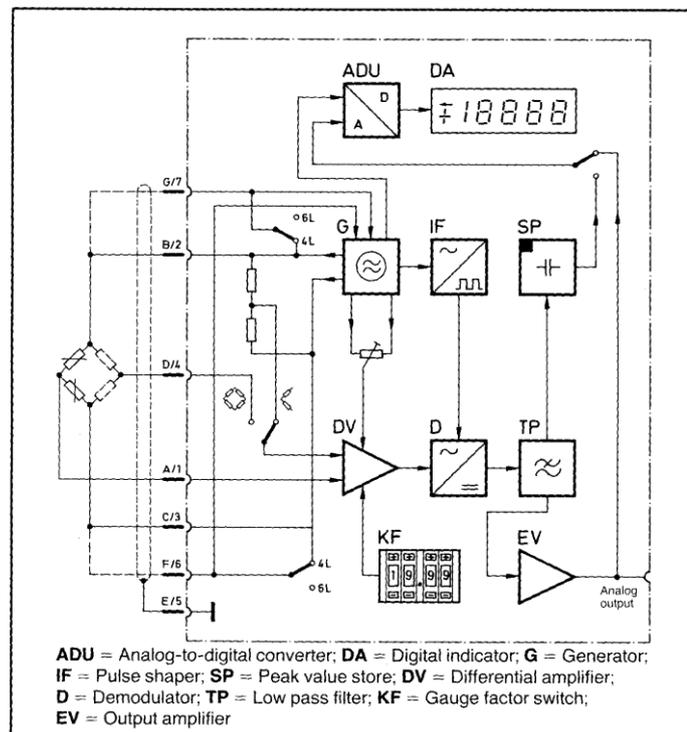


Figura 4.7 Circuito electrónico DMD 20 A.³⁰

²⁹ Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, User's Guide, DMD 20 A

³⁰ Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, User's Guide, DMD 20 A

El medidor puede trabajar con galgas con una resistencia de 60 a 2000 Ω la máxima longitud del cable de conexión es de 500 m, el rango de salida de la señal analógica es de -2 a +2 V, los errores producidos por cambios térmicos son muy pequeños menos del 1%, por todas estas razones y comparando los rangos de funcionamiento del medidor, de la galga y de la tarjeta se concluye que el sistema en conjunto funcionará de manera adecuada.

4.2.2 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

La segunda parte del sistema la conforma la tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS de la empresa Measurement Computing, con esta tarjeta se procederá a adquirir la señal (señal previamente acondicionada por el MDU) y transportarla hacia el computador mediante el puerto USB.

Esta tarjeta fue desarrollada como un sistema personal de adquisición de datos por esta razón su tamaño es pequeño y su peso también lo es, gracias a esto es completamente portable y fácil de manejar. Está diseñada para trabajar bajo Microsoft Windows y fue diseñada y probada para ser compatible con el puerto USB. Las entradas analógicas son configurables para 8 entradas simples con una resolución de 11 bits o cuatro entradas diferenciales de 12 bits, para este caso se trabajará con ocho entradas simples. La tarjeta además posee compatibilidad completa con LabView programa el cual será usado para el tratamiento de los datos, esto gracias a librerías universales que permiten crear programas de control.

La instalación de la tarjeta en el computador es muy fácil puesto que la computadora lo considera como un periférico más y gracias a dicho programa es posible comprobar el estado y buen funcionamiento de la tarjeta, tanto en las salidas analógicas como en las digitales.

Las señales analógicas pueden ser adquiridas de tres diferentes maneras, mediante el programa, de manera continua, o de manera total, esto influye directamente en la velocidad de toma de datos, para este caso este parámetro ya está dado puesto que la tarjeta está unida a una caja de relés y está siendo

usada en otro aparato presente en el laboratorio, los datos están siendo adquiridos mediante el programa de manera individual.

Este dispositivo posee dos bancos de salidas una en la parte superior y otro en la parte inferior como lo muestra la figura 4.8, se notan los pines desde el número 1 al 20 en la parte superior y del 21 al 40 en la parte inferior, en la figura 4.9 se puede ver a que corresponden cada uno de esos conectores en la conexión simple.

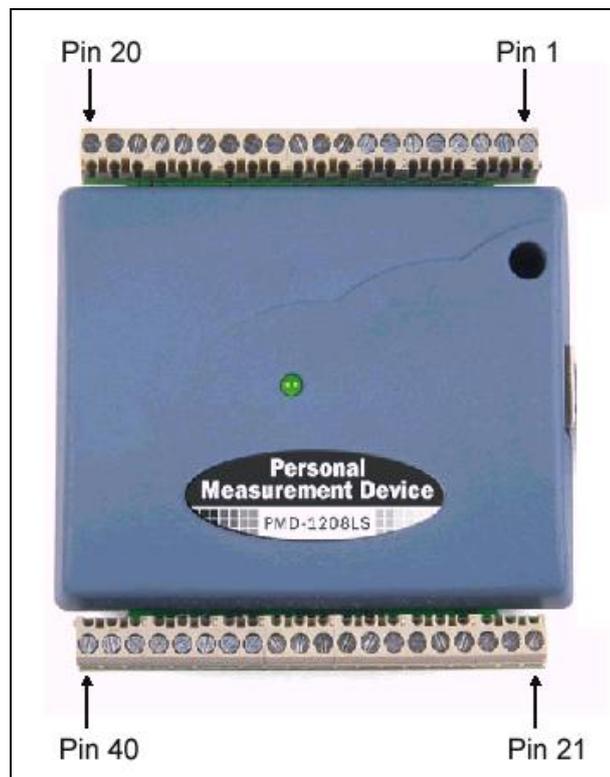


Figura 4.8 Posición de los conectores en la tarjeta de adquisición de datos.³¹

³¹ Measurement Computing, Manual del Usuario, PMD-1208LS, p. 4-3

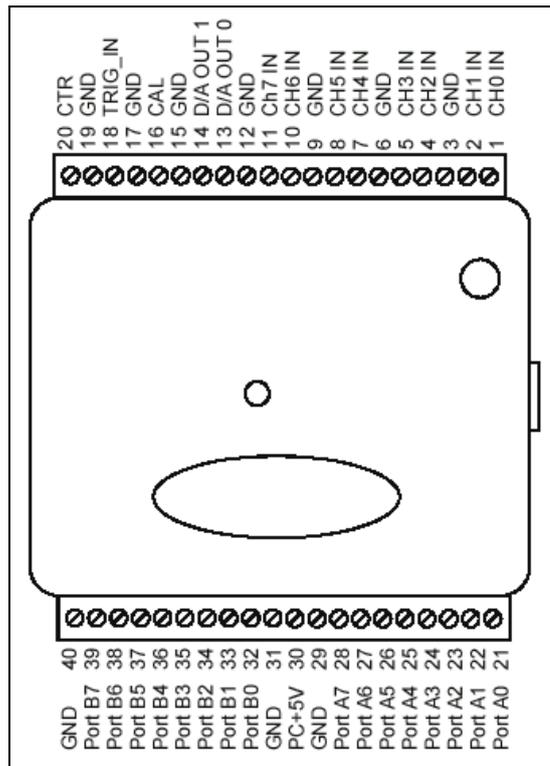


Figura 4.9 Codificación de los conectores en la tarjeta de adquisición de datos.³²

La exactitud de un instrumento está íntimamente relacionada con el error que producen sus componentes, en este caso el error está ligado con 3 factores importantes que son: la no linealidad, compensación, y la ganancia.

El error producido por la no linealidad es muy pequeño y se lo puede despreciar pero el error producido por los otros componentes es de aproximadamente 20mV cuando se trabaja en la escala de 10V. La figura 4.10 muestra el error total presentado en una lectura debido al efecto sumado de compensación y ganancia.

³² Measurement Computing, Manual del Usuario, PMD-1208LS, p. 4-4

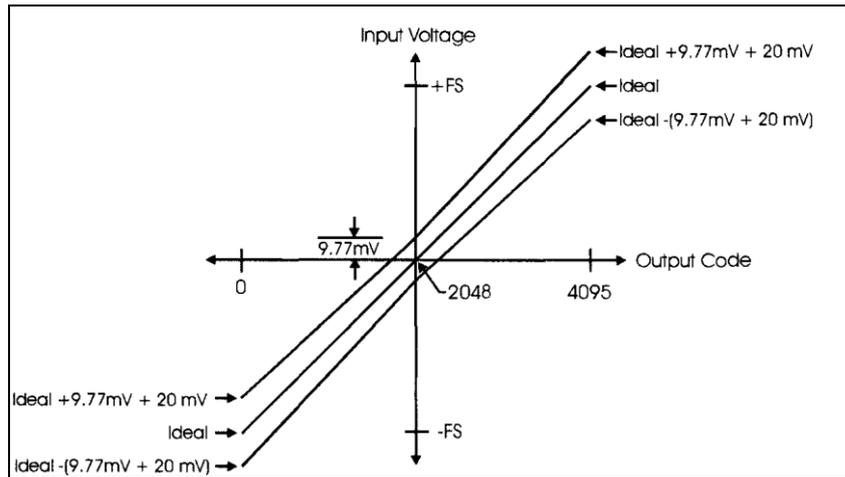


Figura 4.10 Error debido a la suma de la ganancia y la compensación para una escala de 10V³³

De esta manera se completa la transmisión de datos a la computadora en la figura 4.11 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a la tarjeta de adquisición de datos.

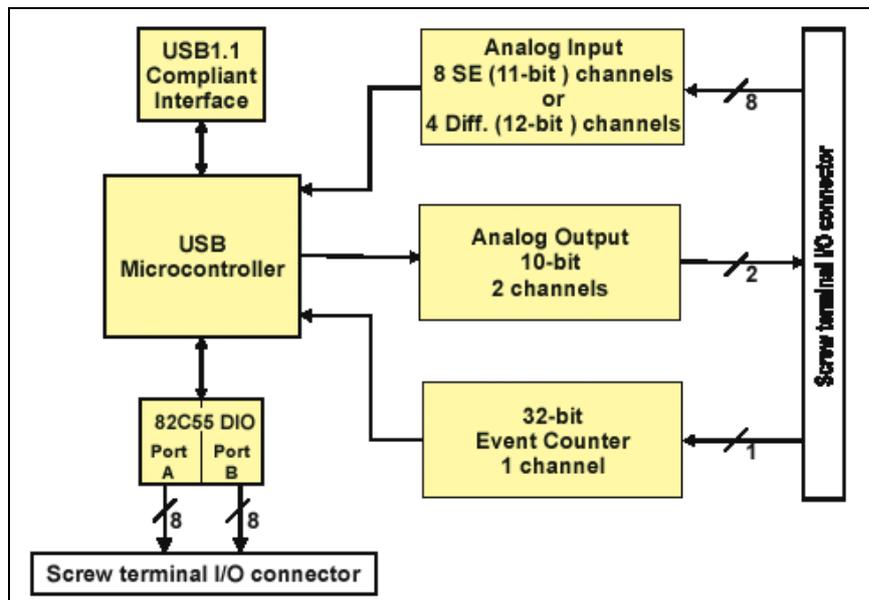


Figura 4.11 Diagramas de bloques de la tarjeta de adquisición de datos³⁴

³³ Manual del Usuario, PMD-1208LS, Measurement Computing, p. 4-13

³⁴ Measurement Computing, Manual del Usuario, PMD-1208LS, p. 1-2

En la figura 4.12 se muestra lo realizado por cada uno de los instrumentos detallados anteriormente a manera de resumen.

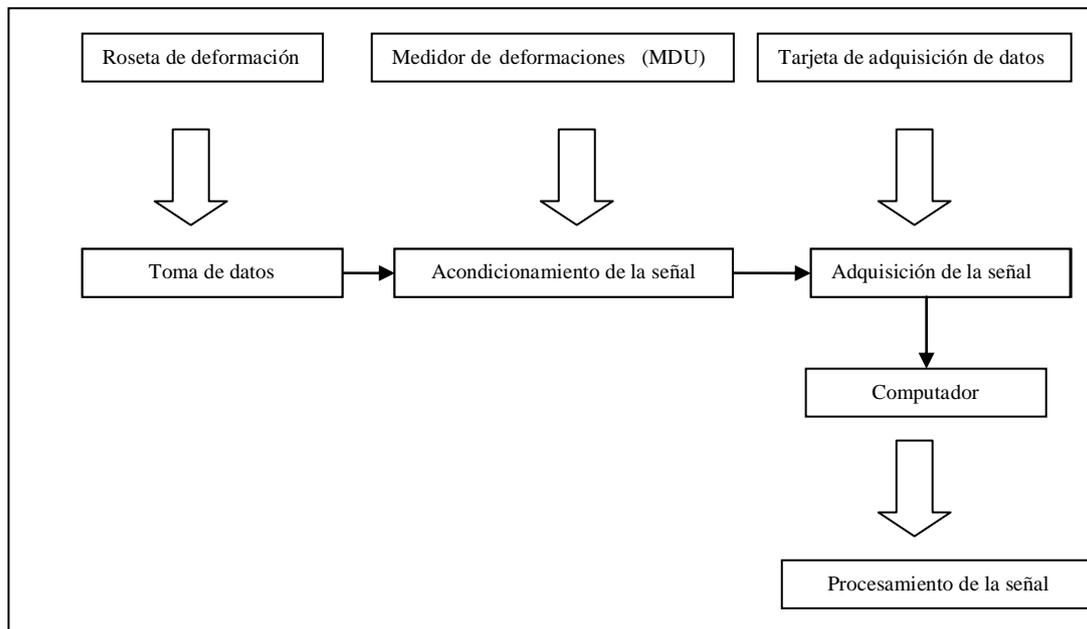


Figura 4.12 Diagramas de bloques total del sistema de adquisición de datos.

Es importante mencionar que la tarjeta está unida a una caja de relés los cuales permiten medir las deformaciones unitarias de cada una de las galgas extensiométricas que conforman la roseta de deformación, la tarjeta está conectada a 13 relés con esto puede medir 13 sensores activos (galgas extensiométricas) para este caso solo se utilizarán 3 galgas los relés funcionan a manera de enchufes con lo cual se enciende o se apaga el funcionamiento de los mismos para cada selección, es decir el relé permite el funcionamiento de cada una de las galgas extensiométricas por separado por lo cual nunca dos galgas pueden funcionar de manera simultánea.

Además existe en dispositivo de adquisición de datos y selección de señal una resistencia de 120 Ω la cual realiza la función de galga pasiva, esto debido a que la mayoría de las galgas existentes en el laboratorio y las utilizadas en el proyecto de tesis tienen una resistencia de 120 Ω , si no es necesario la utilización de dicha galga pasiva para completar el diagrama de medio puente la caja de relés posee un selector en donde se puede elegir desactivar dicha

resistencia mediante un interruptor. La tarjeta de adquisición de datos esta conectada a dicha tarjeta de relés y mediante dicha tarjeta se puede controlar el encendido y el apagado de los mismos desde el computador.

En la figura 4.13 y 4.14 se puede observar el diagrama eléctrico y la placa lista para ser quemada con el detalle de todos sus componentes.

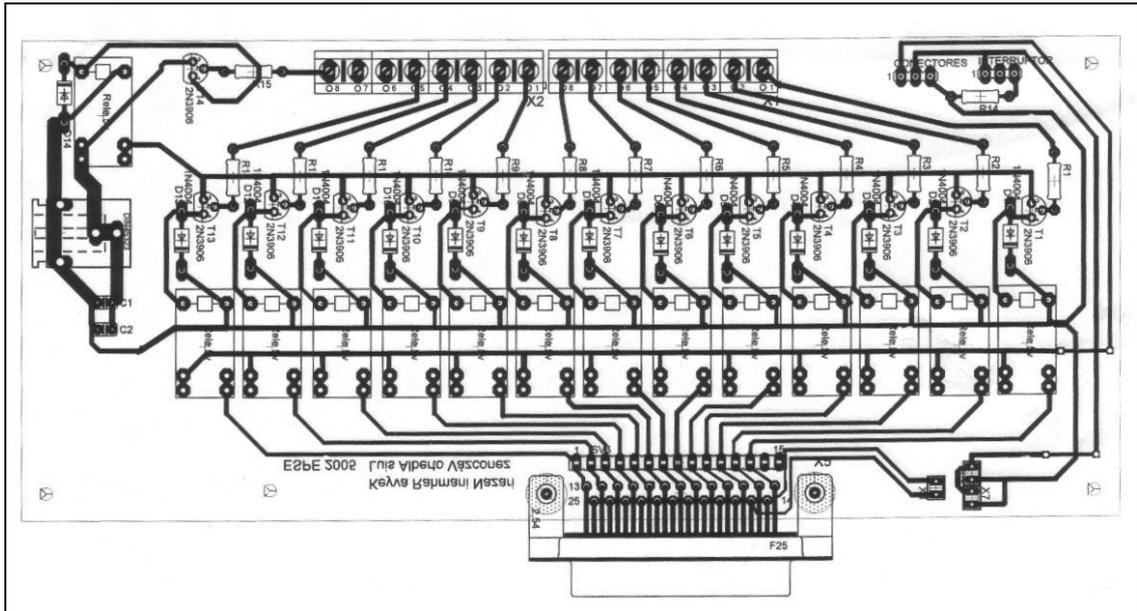


Figura 4.13 Diagrama de la tarjeta de relés con sus componentes

El dispositivo de adquisición de datos y selección automática de galgas, tiene una tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS que se encarga de realizar dos tareas, la primera es la de seleccionar la galga a medir, trabajo que lo realiza gracias a sus 16 salidas digitales y a la tarjeta de relés antes mencionada, el sistema escoge la señal análoga de la galga de deformación a medir. La segunda tarea es precisamente la de adquirir la señal análoga seleccionada y transmitirla al computador a través del puerto USB, puerto que además energiza a la tarjeta de adquisición de datos.

El acondicionamiento de señal se lo efectúa en el medidor de deformaciones unitarias DMD 20A, y este proceso también lo realiza la tarjeta de relés, precisamente antes de enviar la señal a la tarjeta de adquisición de datos para ser llevada al computador.

La conexión con los sensores o galgas de deformación se la puede realizar a través del puerto paralelo o a través del panel central (lado izquierdo) desde el cual se puede conectar hasta tres galgas con bananas (es decir, una roseta de deformación). El puerto paralelo siempre será más confiable, sin embargo, durante las pruebas se comprobó que el panel central funciona a la perfección y si la practica se realiza con cuidado las diferencias con los datos tomados desde el puerto paralelo son pequeñas.

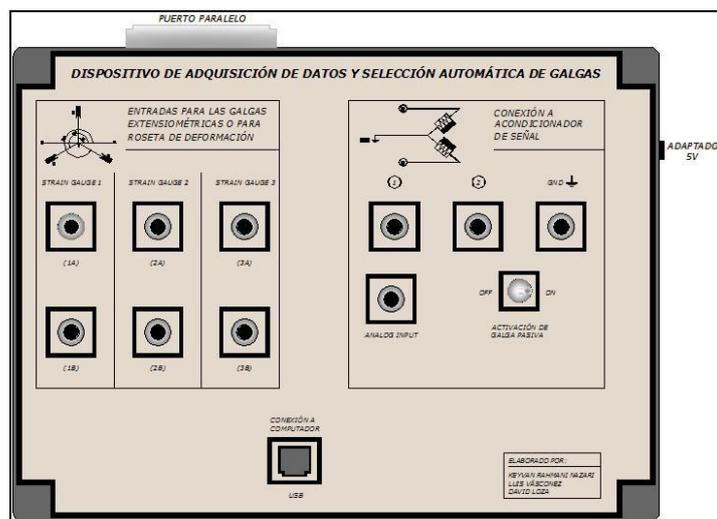


Figura 4.15 Dispositivo de adquisición de datos y selección automática de galgas



Figura 4.16 Dispositivo de adquisición de datos y selección automática de galgas conectado

La conexión del sistema es sumamente sencilla y para detalles puede referirse al manual de operación (Anexo E), además, los diagramas explicativos en el panel de control del dispositivo son bastante didácticos.

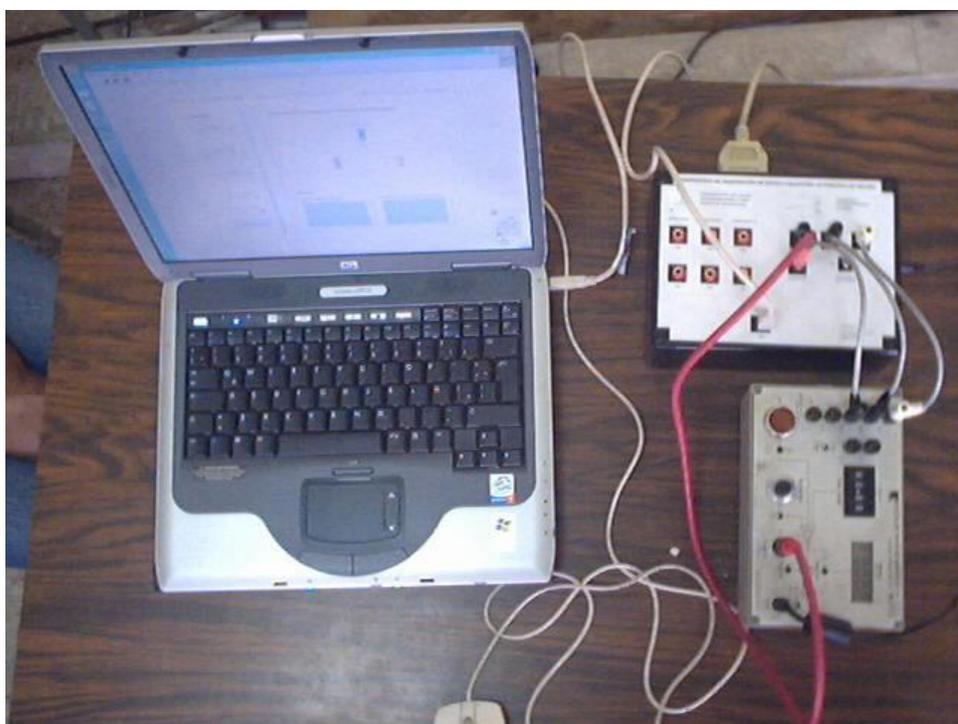


Figura 4.17 Sistema completo conectado

4.3 SOFTWARE PARA ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

El desarrollo del software para el análisis y procesamiento de datos fue desarrollado en **LabView** que es un programa creado para la formulación de líneas de código (lenguaje G) el cual realiza una función muy similar al C++ o Visual Basic pero más moderno. Las librerías y demás herramientas que posee lo hacen mucho más fácil de usar y además este programa incluye opciones de simulación y de adquisición de datos más modernas por lo cual su utilización se simplifica convirtiéndolo en una herramienta poderosísima para la consecución de los objetivos planteados en esta tesis.

La programación en **LabView** tiene tres partes principales:

El **panel de control** es una interfaz con el usuario en donde se encuentran los instrumentos y se visualizan las simulaciones.

El **diagrama de bloques** es el lugar en donde el usuario realiza la codificación propiamente dicha.

El **conector** tiene la función de hacer interactuar las dos primeras partes antes mencionadas.

Por lo tanto, en este capítulo se explicará rápidamente la programación realizada en el diagrama de bloques y la interfaz con el usuario, es decir, el panel de control.

4.3.1 PRESENTACIÓN Y ESTRUCTURA DEL SOFTWARE

Lo primero que se diseñó es la estructura de la interfaz visual del software, para esto se utilizó varias pestañas **Tab control 1, 2 y 3** y se colocó los botones generales: generar informe (el cual se explica luego) y salir del programa con el comando **Quit LabVIEW**, además con el comando **Get Date/Time String** se muestra la fecha.

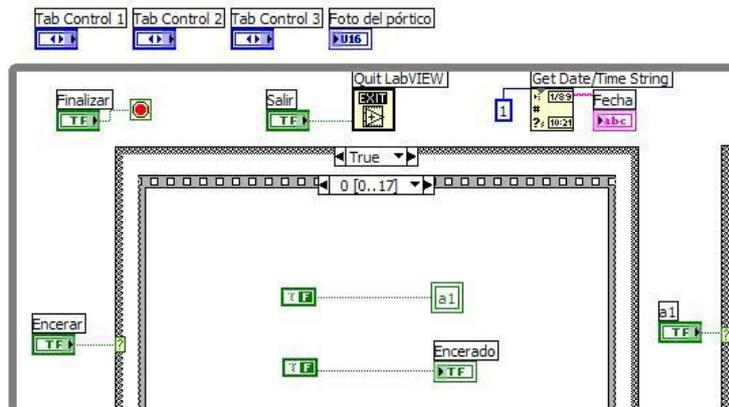


Figura 4.18 Tabulaciones, botón salir del programa y fecha

Además se importó una imagen del pórtico del vibróforo la cual se colocó en la variable **Foto del pórtico** y se colocó texto referente a la Institución, el laboratorio, la tesis y sus autores.



Figura 4.19 Presentación del software de adquisición de datos

4.3.2 ADQUISICIÓN DE DATOS Y CÁLCULOS GENERALES

Para adquirir los datos de deformación unitaria generados por la roseta de deformación pegada en el punto crítico del pórtico del vibróforo de baja frecuencia del laboratorio de resistencia de materiales se debe seguir algunos pasos:

1. Encerar.
2. Tomar datos.
3. Cálculos de variables globales.

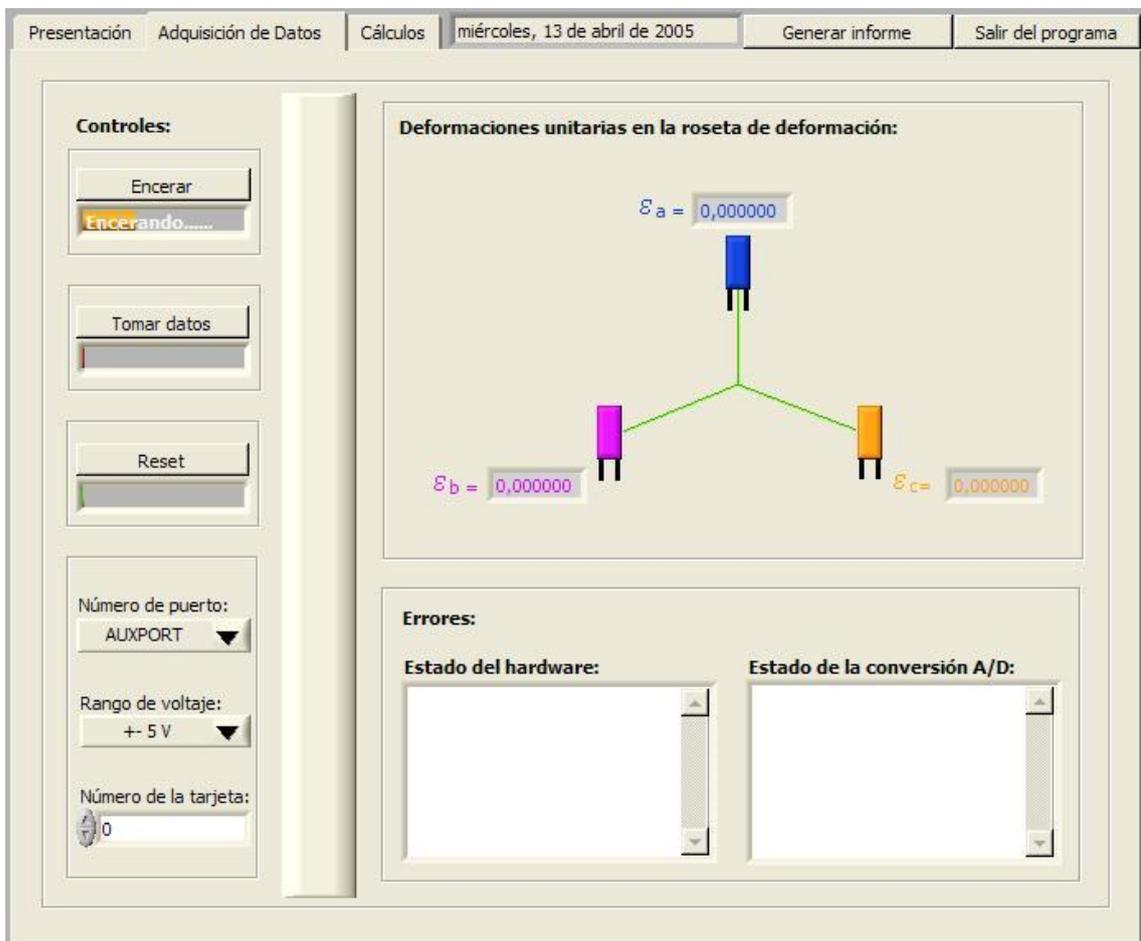


Figura 4.20 Ventana de adquisición de datos

El encerado es requerido puesto que lo que se mide en las rosetas de deformación es una diferencia de voltaje, por lo tanto, al encerar se toma los valores de voltajes iniciales en cada una de las galgas. El tomar datos significa tomar los valores de voltajes finales en las galgas y restarlos de los iniciales

tomados al encerar. Finalmente se procede a calcular las deformaciones unitarias que serán utilizadas para los análisis posteriores.

La programación para el encerado y toma de datos es similar, lo primero que se necesita es un botón para encerado o toma de datos el cual se vincula a una estructura tipo **case** la cual funciona gracias a una variable que cambia de valor según el estado del botón y cambia su estado de **False** a **True**. Por tanto, una vez accionado el botón se inicia una secuencia (similar a tener líneas de sentencias en el lenguaje C).

Se apaga la bandera Encerado y se llena la variable Slide correspondiente al Encerado o Toma de datos gracias a una estructura tipo For.

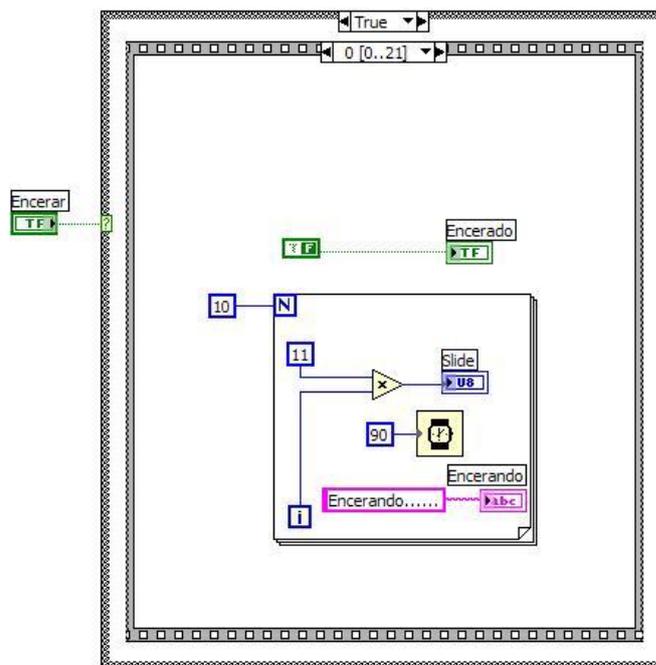


Figura 4.21 Seteo de banderas y animación del botón de encerado

Se configura las salidas digitales de la tarjeta de adquisición de datos PDM-1208 con el comando DCFGPORT.VI. Este comando coloca a todas las salidas digitales con un valor de cero lógico.

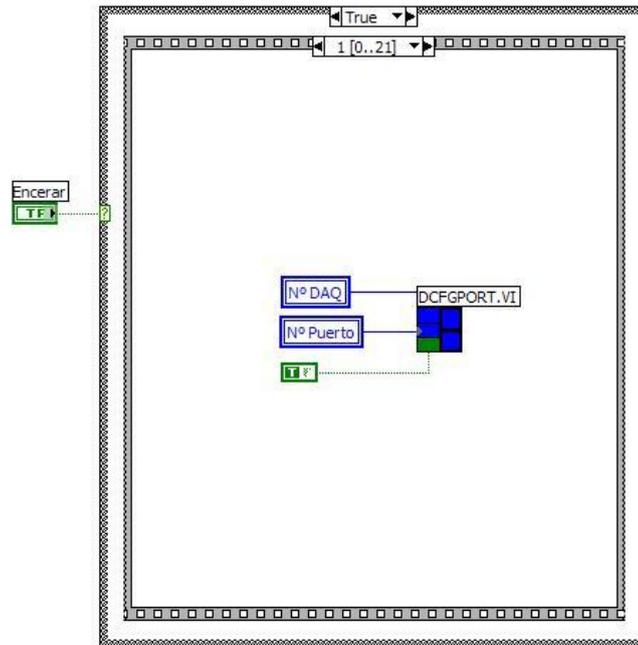


Figura 4.22 Configuración de las salidas digitales

Debido al diseño en lógica inversa de la placa de relays, se procede a encender las salidas digitales (Colocarlas con 5 Voltios).

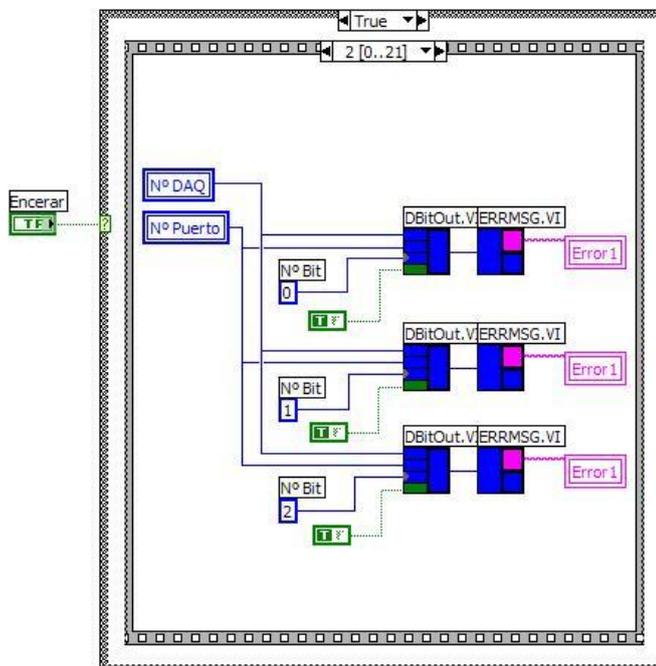


Figura 4.23 Encendido de salidas digitales

A continuación se genera un arreglo para guardar 300 valores de voltaje inicial el cual será llenado luego.

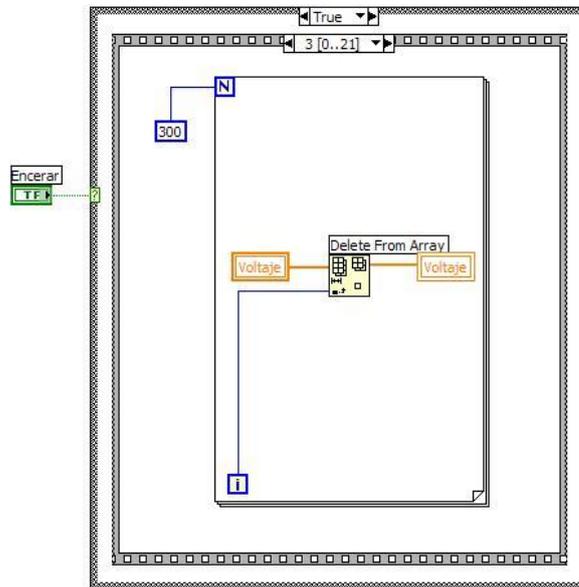


Figura 4.24 Generación de arreglo para señal analógica

Luego se utiliza el comando DBitOut.vi que pertenece a la tarjeta de adquisición de datos para encender el relay correspondiente a la primera galga de la roseta de deformación.

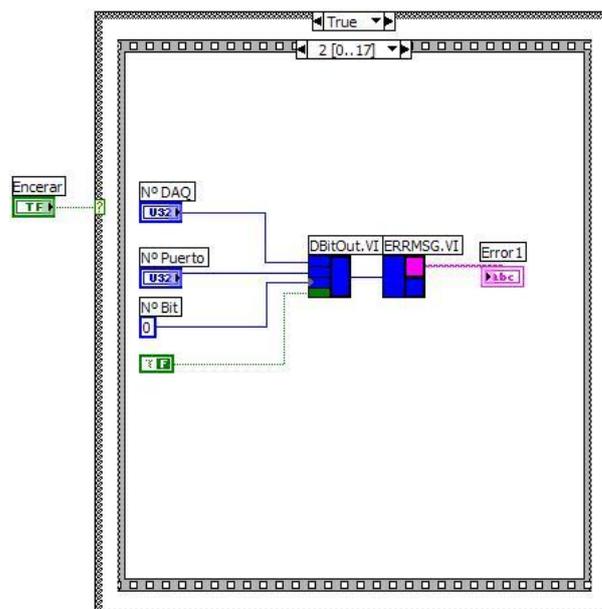


Figura 4.25 Selección de la galga a medir

Se procede a encender la entrada análoga 0 con el comando AIn.vi por la cual se tomarán 300 datos los cuales serán transformados a valores numéricos por el comando ToEng.vi y luego guardados en el arreglo generado antes.

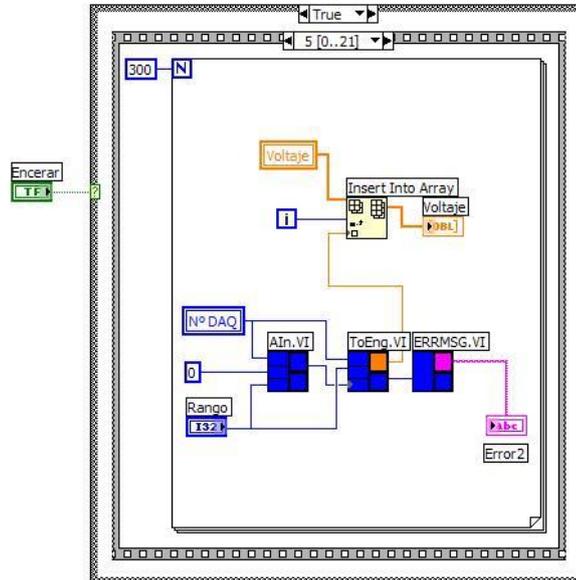


Figura 4.26 Toma de datos análogos y transformación a valores numéricos reconocibles

A continuación se procede a eliminar los datos con interferencia, pues al abrirse o cerrarse los relays, estos producen que los primeros datos análogos de voltaje tomados sean muy grandes y estos dañan la medición; aumentar el número de mediciones no es la solución, sino eliminarlos, por lo tanto se procedes a eliminar los 100 primeros datos análogos tomados en el arreglo llamado Voltaje.

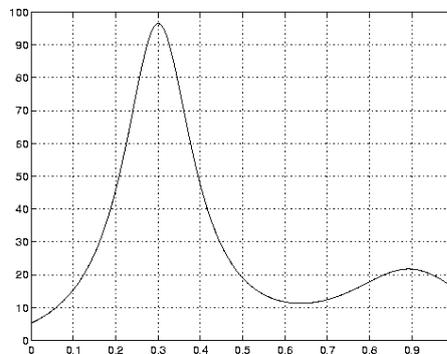


Figura 4.27 Interferencia producida por los relays, la señal luego se estabiliza

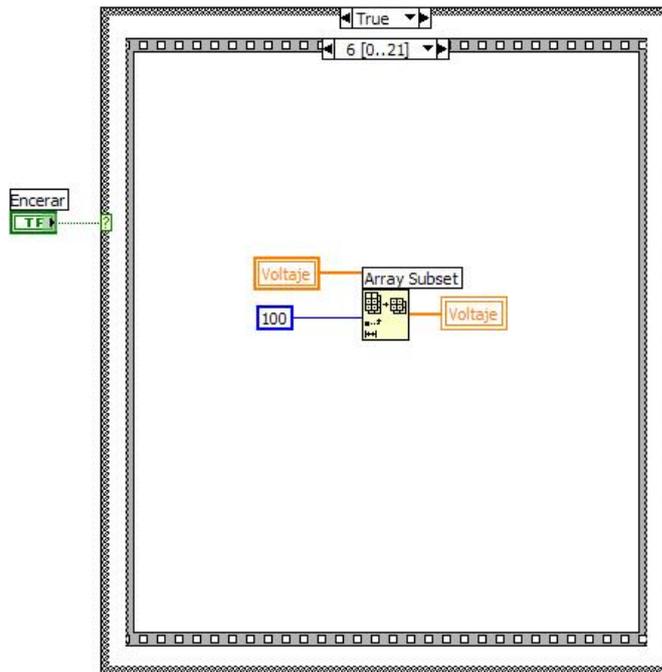


Figura 4.28 Eliminación de los 100 primeros datos del arreglo Voltaje

Se saca el promedio del arreglo de voltajes y guardamos el valor de voltaje inicial de la primera galga en la posición 0 de un nuevo arreglo de deformaciones unitarias iniciales.

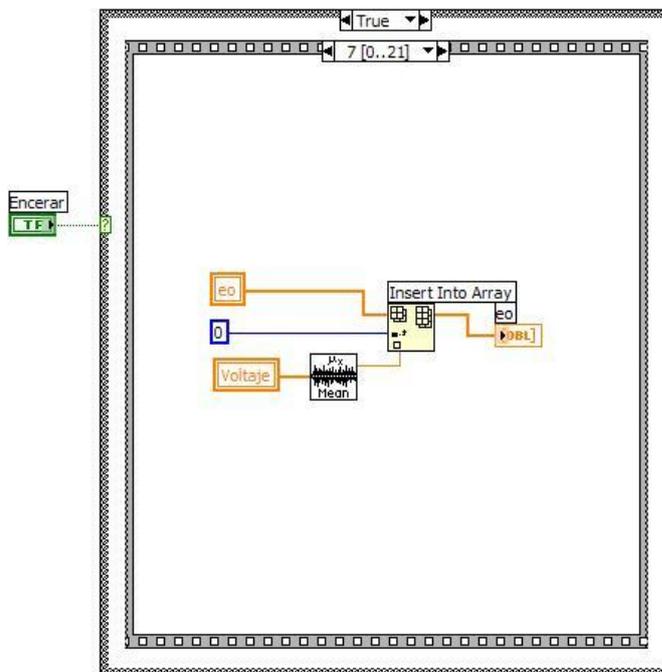


Figura 4.29 Creación del arreglo con deformaciones unitarias iniciales

Finalmente el comando DBitOut.vi apaga el relay correspondiente a la primera galga de la roseta de deformación.

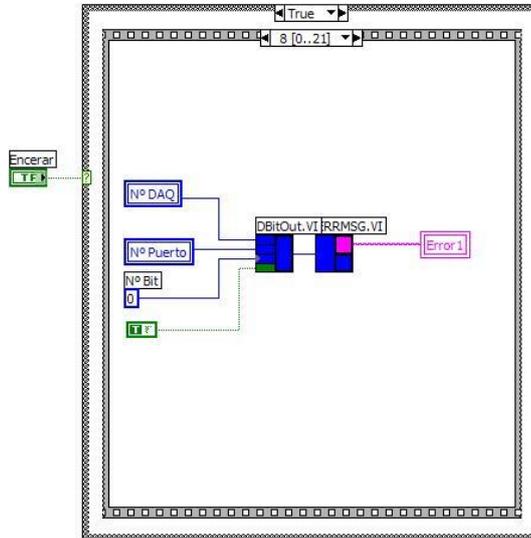


Figura 4.30 Apagado del relay correspondiente a la galga medida

Se repite este procedimiento de encendido para las dos siguientes galgas de la roseta, luego para tomar datos y finalmente se cambia los valores de las banderas.

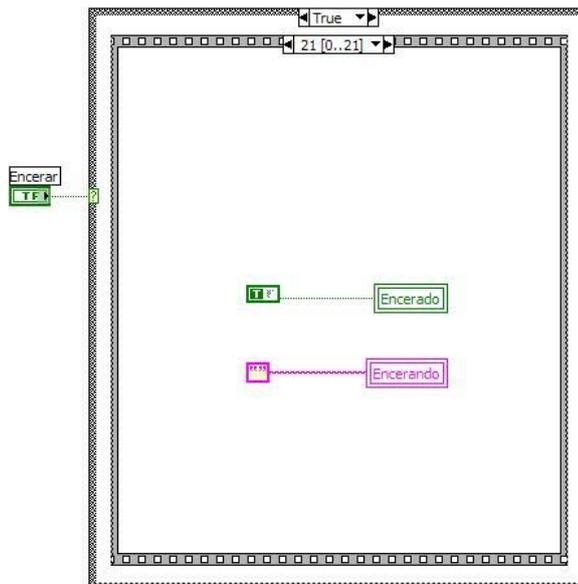


Figura 4.31 Final del proceso de encendido

La programación para la toma de datos es similar, pues se toma datos de los voltajes finales, es decir, luego de realizada la carga sobre el pórtico, pero además se debe restar los arreglos generados de deformación unitaria inicial y final y colocar su valor en el arreglo Def Uni.

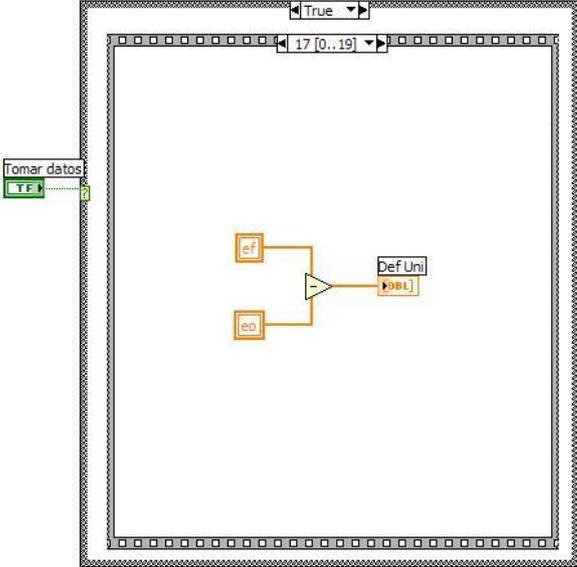


Figura 4.32 Llenado del arreglo con la diferencia de deformaciones unitarias iniciales y finales

Luego se corrige los valores medidos con la ecuación de transformación obtenida luego de una serie de ensayos.

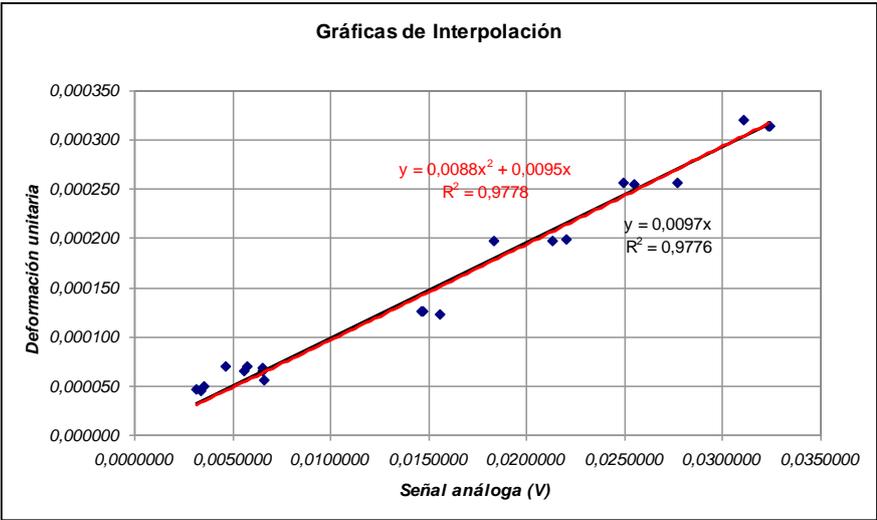


Figura 4.33 Gráficas de interpolación

Los datos y otras gráficas se encuentran en el siguiente capítulo correspondiente a pruebas, en la cual se explica el por qué se escogió la ecuación lineal y otra información de su interés.

El algoritmo siguiente contiene la ecuación de transformación de voltaje a deformación unitaria, se repite para los tres valores obtenidos en las tres galgas de deformación y se lleva los resultados a pantalla en las variables E1, E2 y E3.

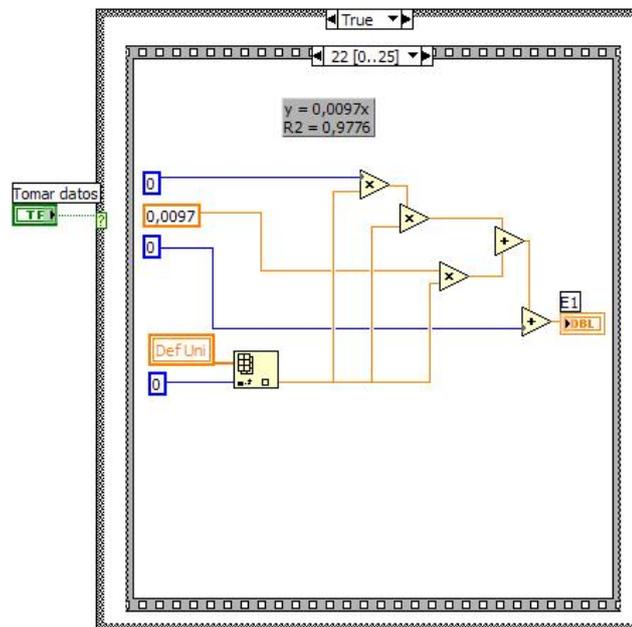


Figura 4.34 Ecuación de transformación de voltaje a deformación unitaria

El cálculo de las deformaciones en x, en y y la deformación por cortante, requiere la resolución de tres ecuaciones con tres incógnitas, para esto se calcula los valores de la matriz de ángulos (Depende de la forma como se pega la roseta).

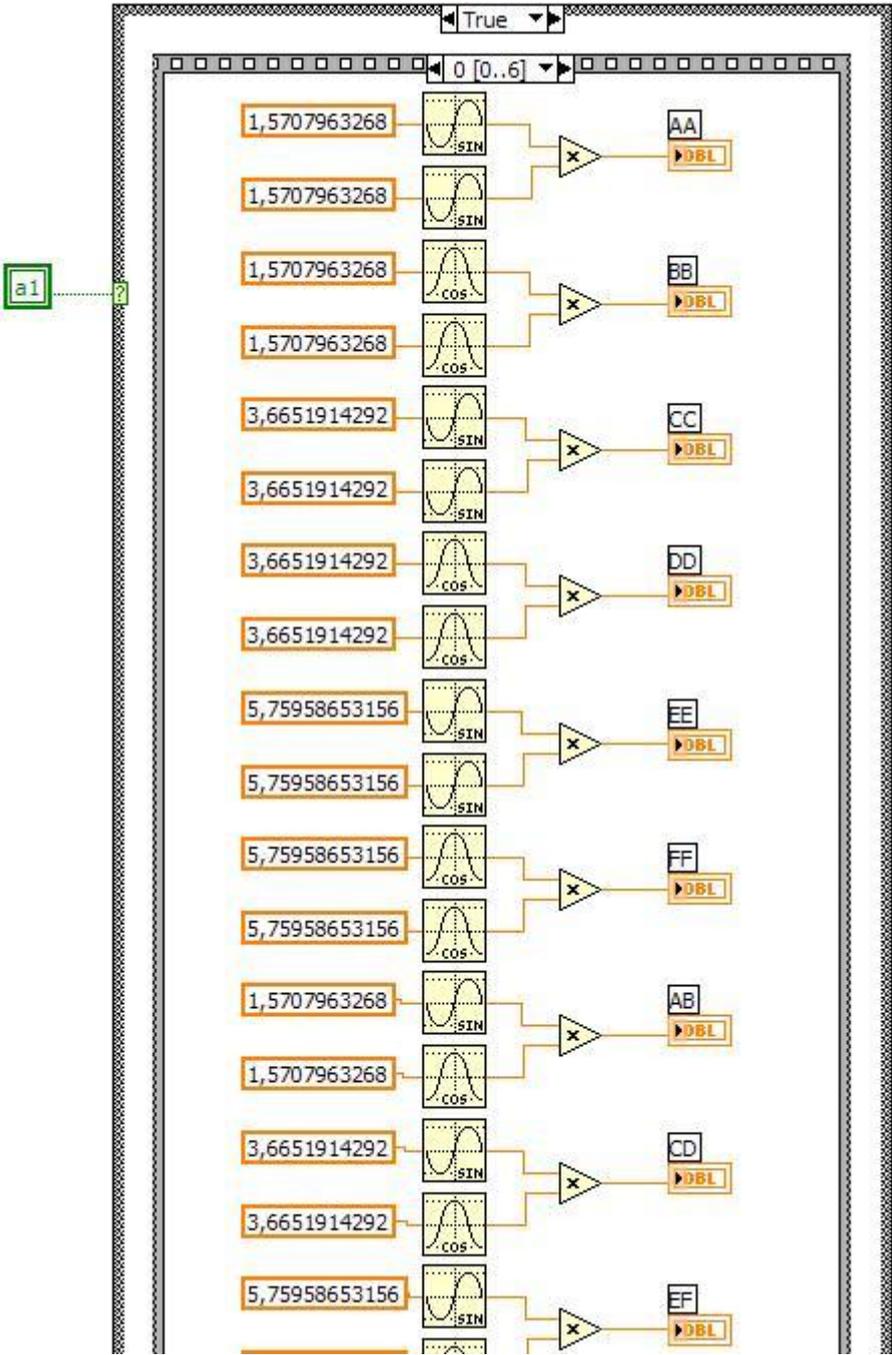


Figura 4.35 Creación de las variables necesarias para la formación de las matrices

A continuación se calcula los determinantes de las cuatro matrices que nos ayudarán a resolver las ecuaciones:

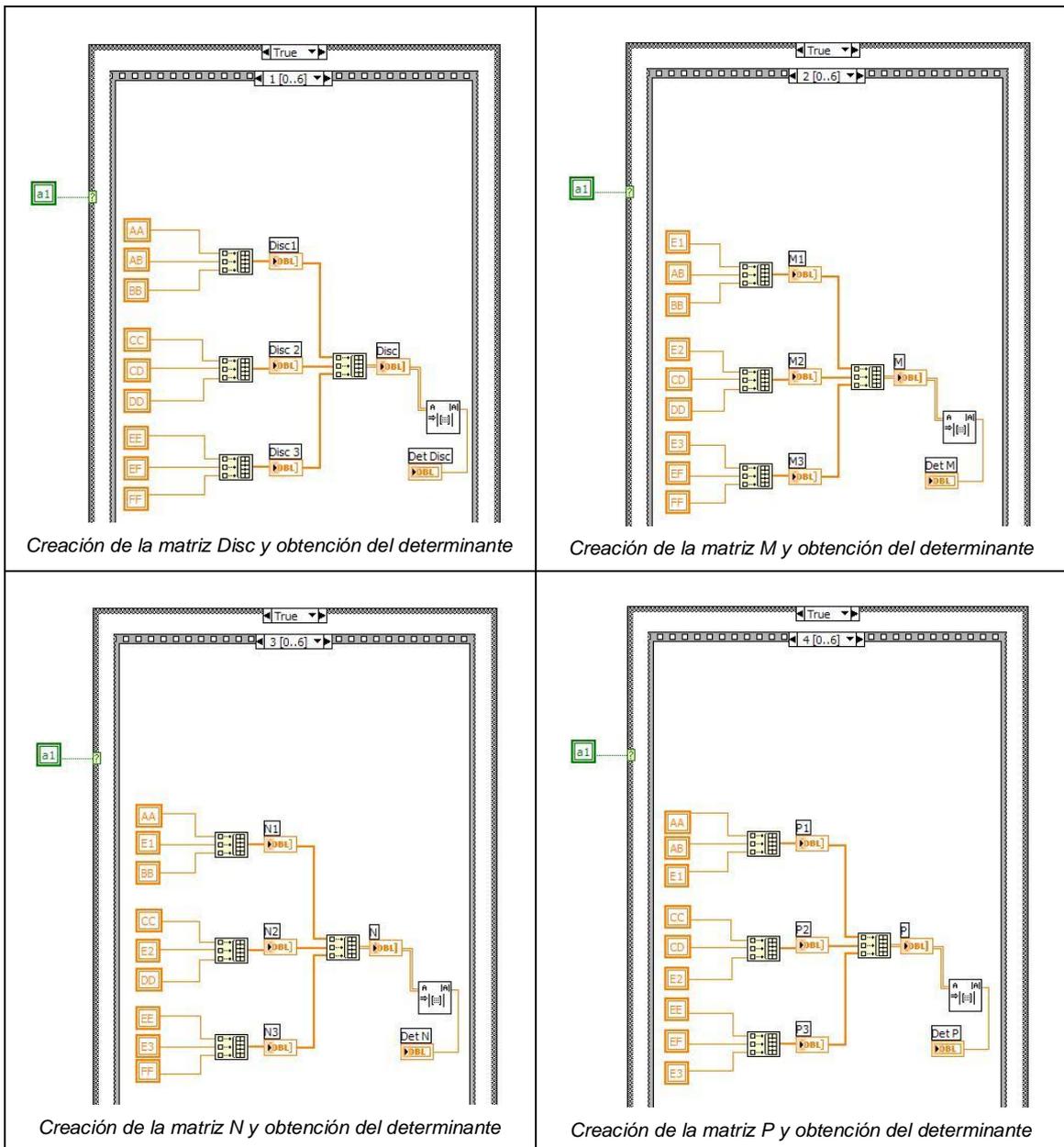


Figura 4.36 Creación de las cuatro matrices y obtención de los determinantes

Luego se divide los determinantes de las matrices M, N y P para el determinante de la matriz discriminante y se obtiene la solución de las ecuaciones en ex, ey y rxy.

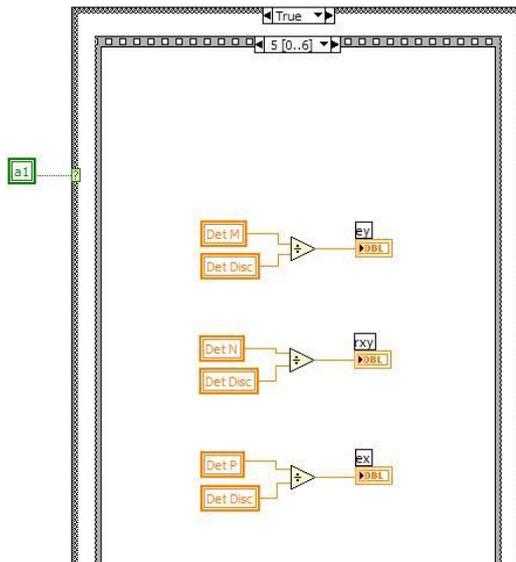


Figura 4.37 Obtención de las soluciones

Adicionalmente con estos valores se calculan los esfuerzos en x, y, cortante xy que serán presentados en la interfaz correspondiente al análisis para CosmosWorks.

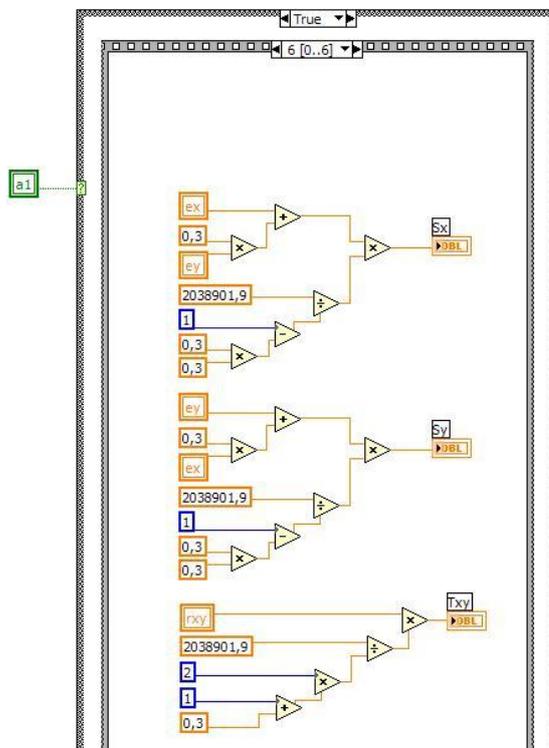


Figura 4.38 Calculo de los esfuerzos x, y y cortante xy

4.3.3 CÁLCULOS

La pestaña de cálculo, nos permite ver varias pestañas más en las que se compara los datos teóricos del Cosmos y del SAP con los datos prácticos obtenidos en la adquisición de datos.

4.3.3.1 Análisis con Cosmos Works

En esta pestaña se compara el valor del esfuerzo de Von Misses – Henkis en Kg/cm², el cual es introducido por el usuario luego de analizar en el CosmosWorks, con el esfuerzo equivalente en 2D obtenido en la roseta de deformación y se obtiene también algunas conclusiones y el error porcentual para el punto crítico.

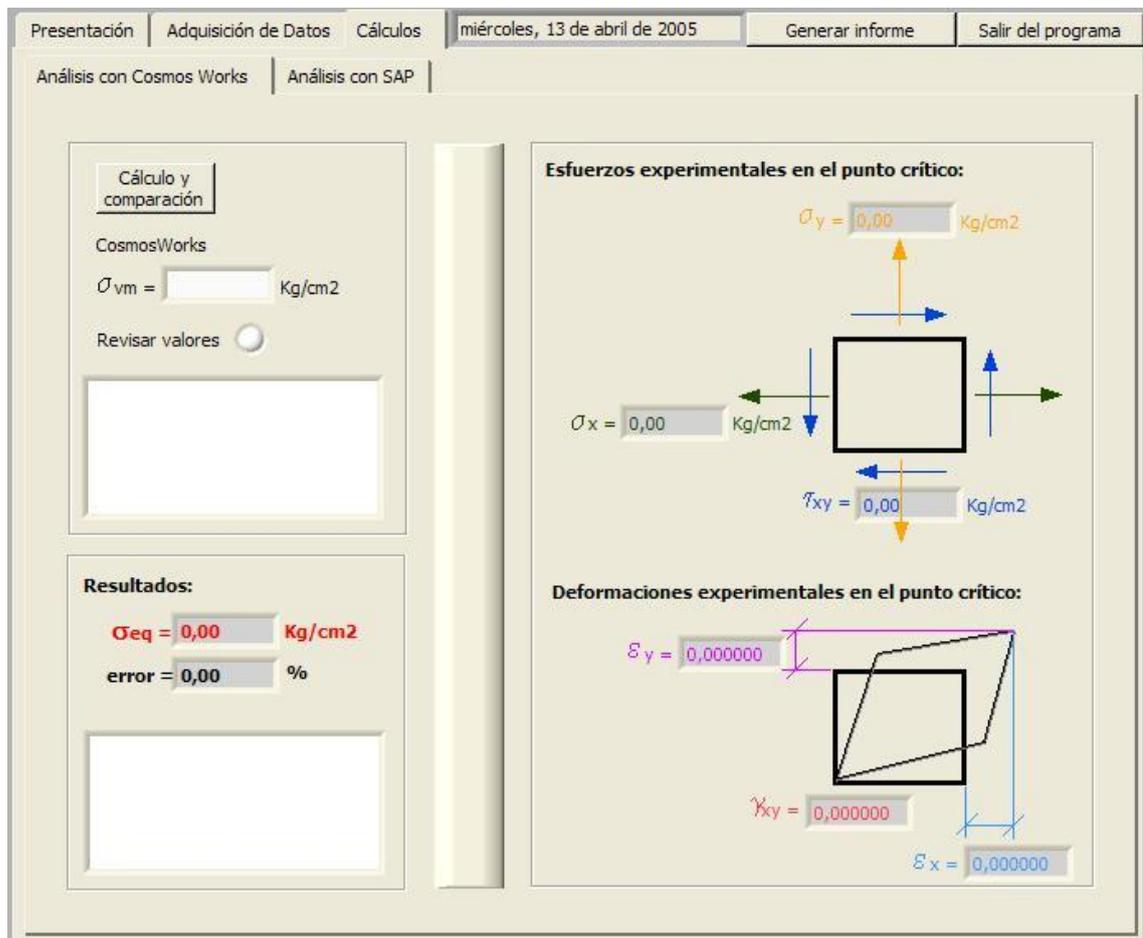


Figura 4.39 Ventana para el análisis y comparación de datos del CosmosWorks

Como primer paso en el diagrama de bloques, se procede a calcular los esfuerzos principales 1 y 2, esto lo hacemos en los siguientes dos pasos:

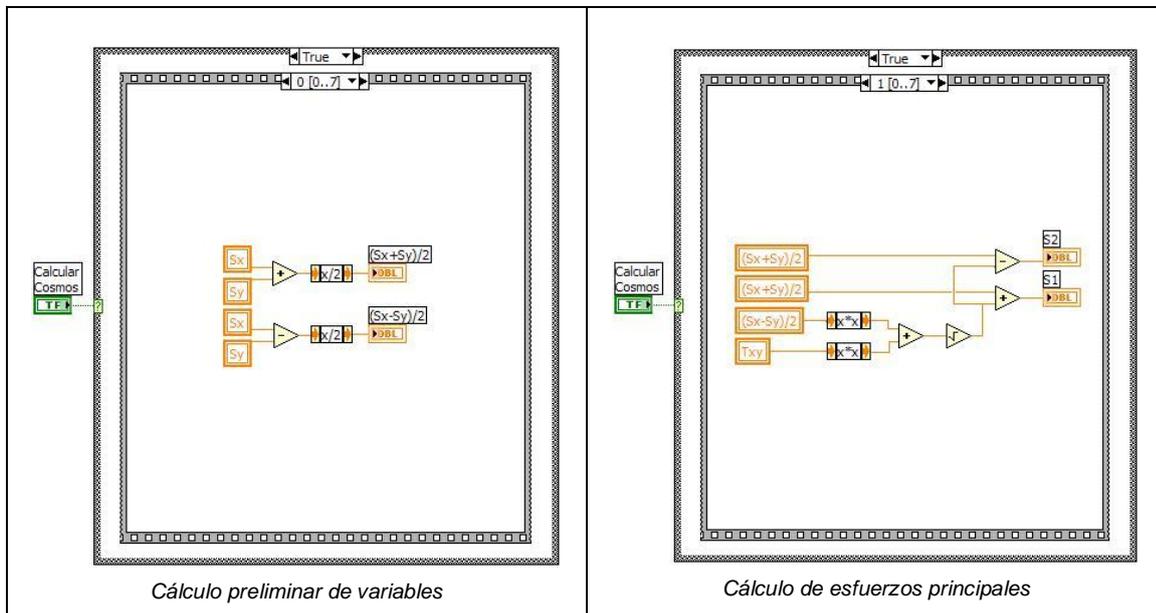


Figura 4.40 Cálculo de los esfuerzos principales en dos dimensiones

Luego de obtener los esfuerzos principales S_1 y S_2 , se procede a calcular el esfuerzo equivalente Seq y además leemos, transformamos a valor numérico y guardamos el valor del esfuerzo de Von Misses – Henkis ingresado por el usuario en la variable S_{vm} gracias al comando **Fract/Exp String To Number**.

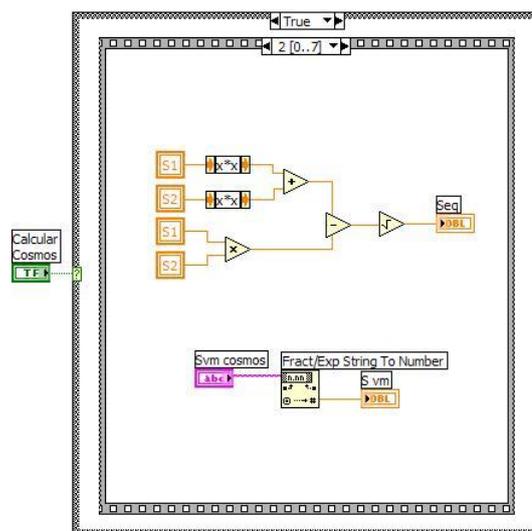


Figura 4.41 Cálculo del esfuerzo equivalente e ingreso del valor de esfuerzo del Cosmos

Se compara los valores de esfuerzo equivalente práctico y teórico con comparadores y banderas para mostrar en la interfaz del usuario los resultados.

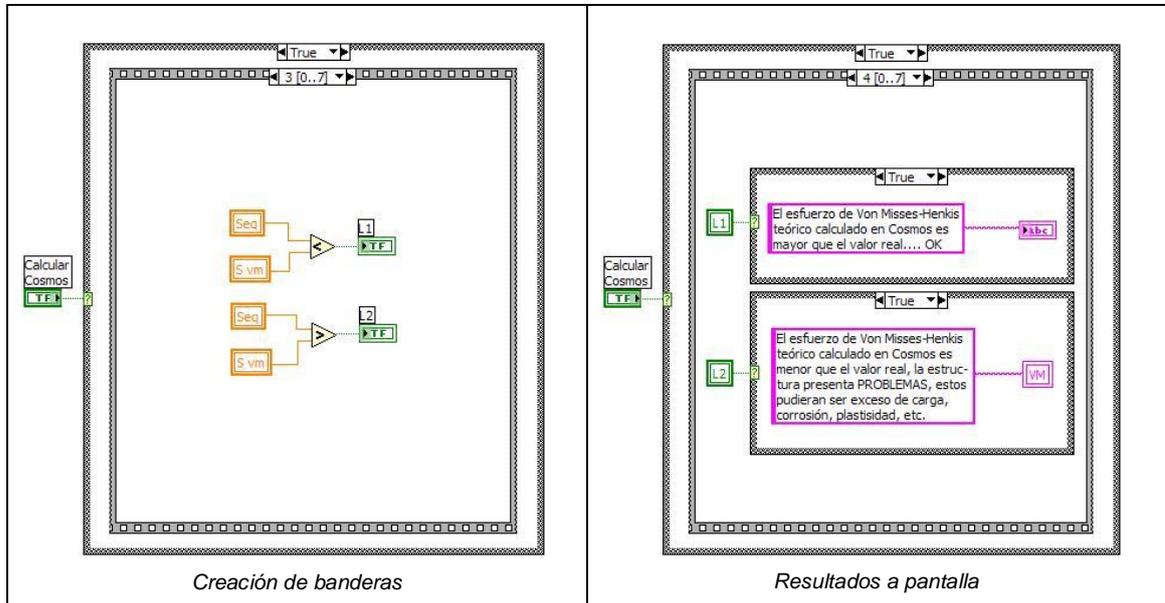


Figura 4.42 Comparación de esfuerzos práctico y teórico

Luego se calcula el valor del error porcentual entre el valor de esfuerzo práctico y teórico.

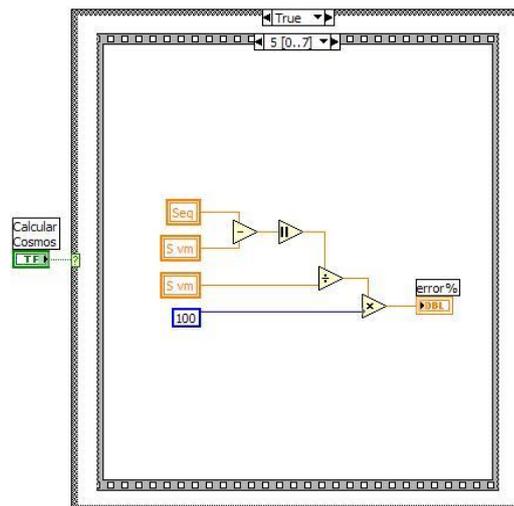


Figura 4.43 Cálculo del error porcentual

Finalmente se compara los valores de error porcentual y se guarda en banderas para mostrar en la interfaz del usuario los resultados.

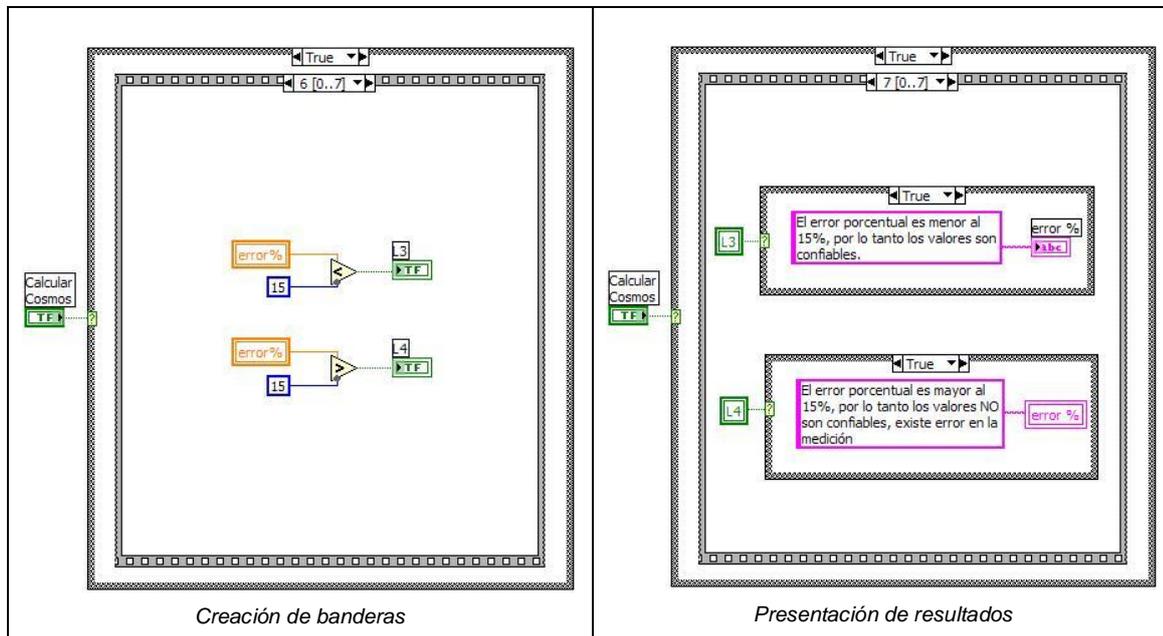


Figura 4.44 Comparación del error y el límite permisible

4.3.3.2 Análisis con SAP

Para realizar el análisis con SAP, se requiere importar archivos generados por el SAP durante el calculo de las estructuras y luego obtener de estos los datos necesarios para mostrarlos en pantalla y calcular los esfuerzos correspondientes al punto crítico.

4.3.3.2.1 Importar archivos y obtener datos del SAP

La primera parte consiste en importar los archivos de propiedades de la sección y fuerzas en la sección del punto crítico generados por el SAP. La interfaz del usuario permite escoger la ubicación y el nombre del archivo que se generó con anterioridad y ver el archivo de texto en la pantalla.

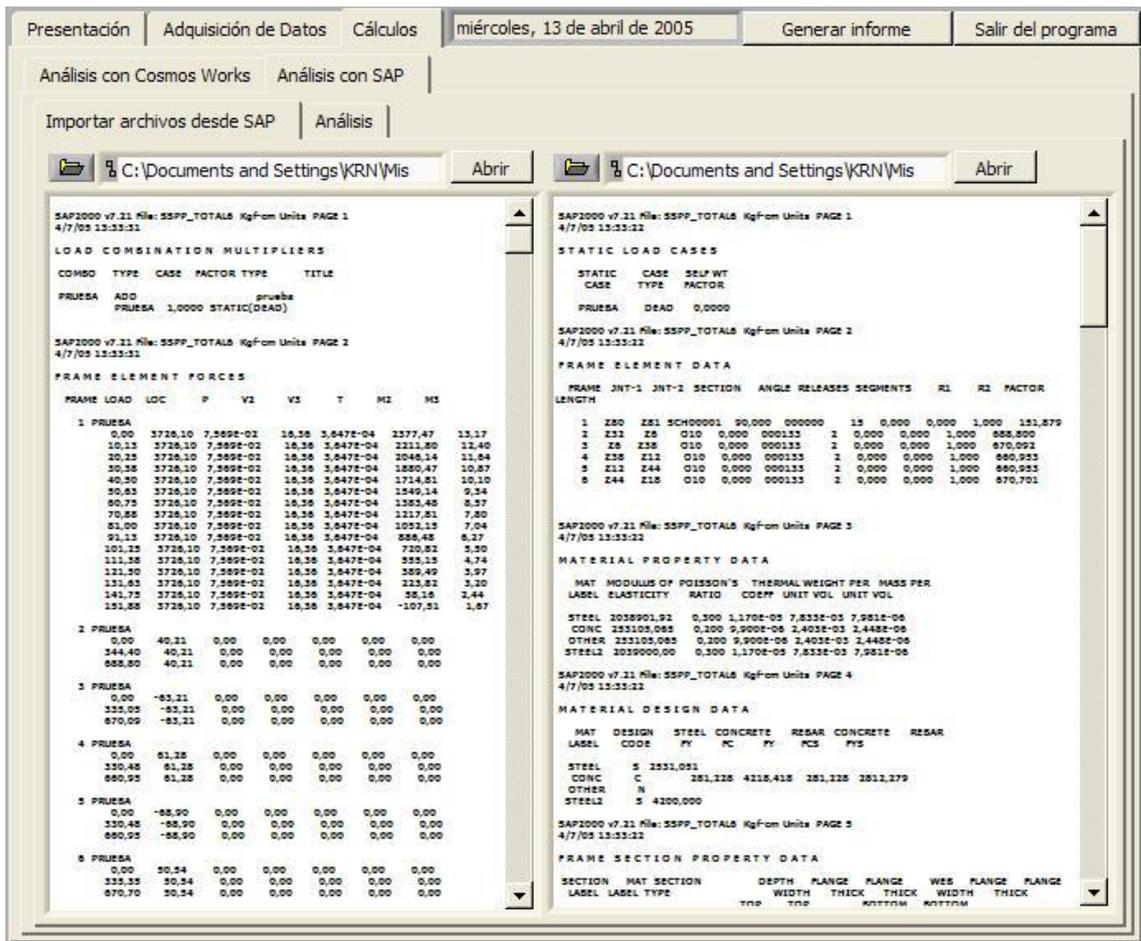


Figura 4.45 Presentación en pantalla de los archivos importados

Para importar los archivos de fuerzas y propiedades, se utiliza una estructura tipo **Case** conectada al botón **Abrir**, que en el diagrama de bloques toma el nombre de **Fuerzas** o **Propiedades**, el cual tiene otra estructura tipo **Secuencia** en la cual se abre el archivo de texto con el comando **Open File** y se guarda la dirección del archivo en un **Refnum** para poder trabajar con los datos del mismo o mostrarlos el archivo en la interfaz del usuario.

A continuación se procede a guardar el archivo en una variable gracias al comando **Read File** que lo lee desde la ubicación guardada en el **Refnum**, y se muestra el archivo en la interfaz del usuario para comprobar que el archivo se abrió en el software de adquisición de datos exitosamente.

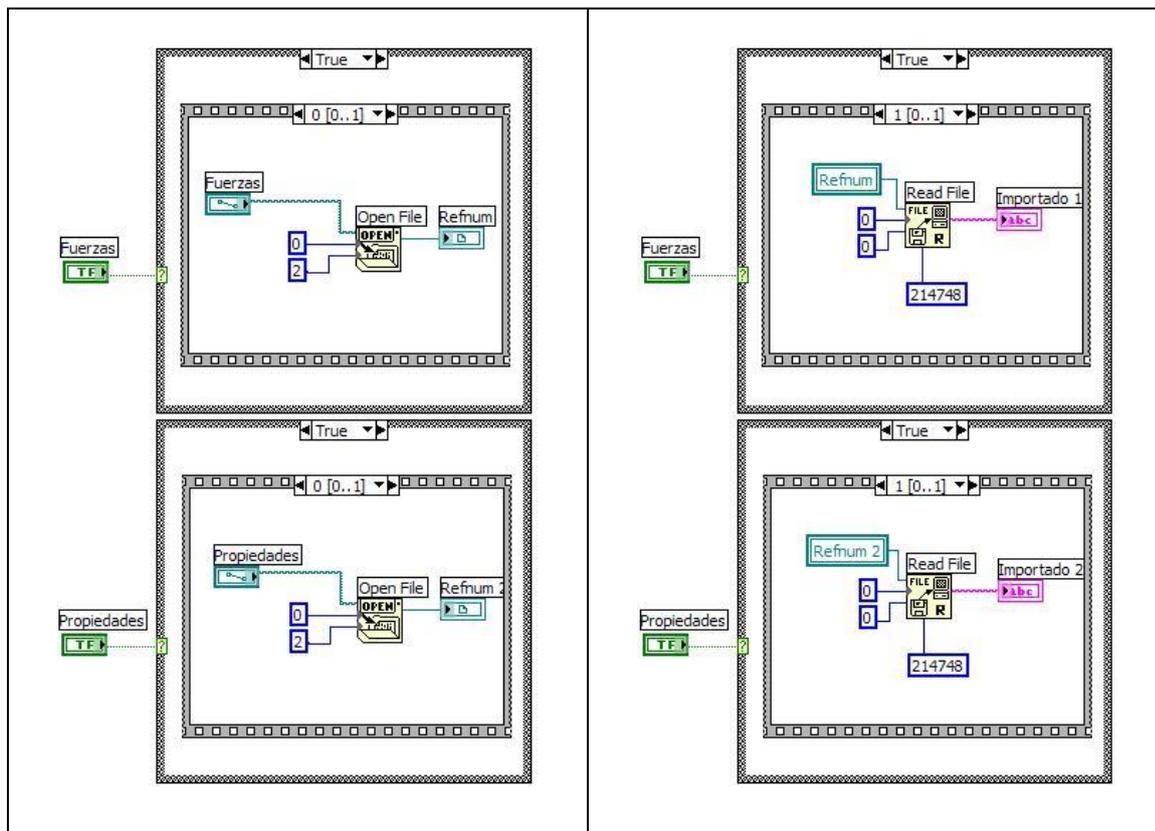


Figura 4.46 Algoritmo para importar los documentos desde SAP

Ahora que se tiene los archivos en el software de adquisición de datos, se procede a la extraer los datos que nos servirán para calcular el estado de esfuerzos del punto crítico.

El proceso se realiza escaneando el documento hasta encontrar una referencia desde la cual se busca el dato que necesitamos. Para esto se buscó palabras que el SAP exporta en sus documentos de texto como por ejemplo los membretes de las tablas, así para identificar la tabla de fuerzas que exporta el SAP, se podría buscar las palabras **Frame Forces**.

Así para el caso de extraer los datos de fuerzas y momentos en una sección determinada, se escanea el documento **Importado 1** hasta encontrar la palabra **M3** (Momento 3-3) con el comando **Scan String For Tokens** dentro de una estructura tipo Wile que finaliza al guardar la posición de la palabra encontrada en la variable **Dir1**.

Luego se busca la posición o nivel de la sección introducida por el usuario en la variable **Location** de la cual se necesita las fuerzas y repetimos el proceso. A continuación se extrae con el comando **Fract/Exp String To Number** los valores de fuerza axial, cortantes, momentos y torsión en la sección y se la guarda en variables.

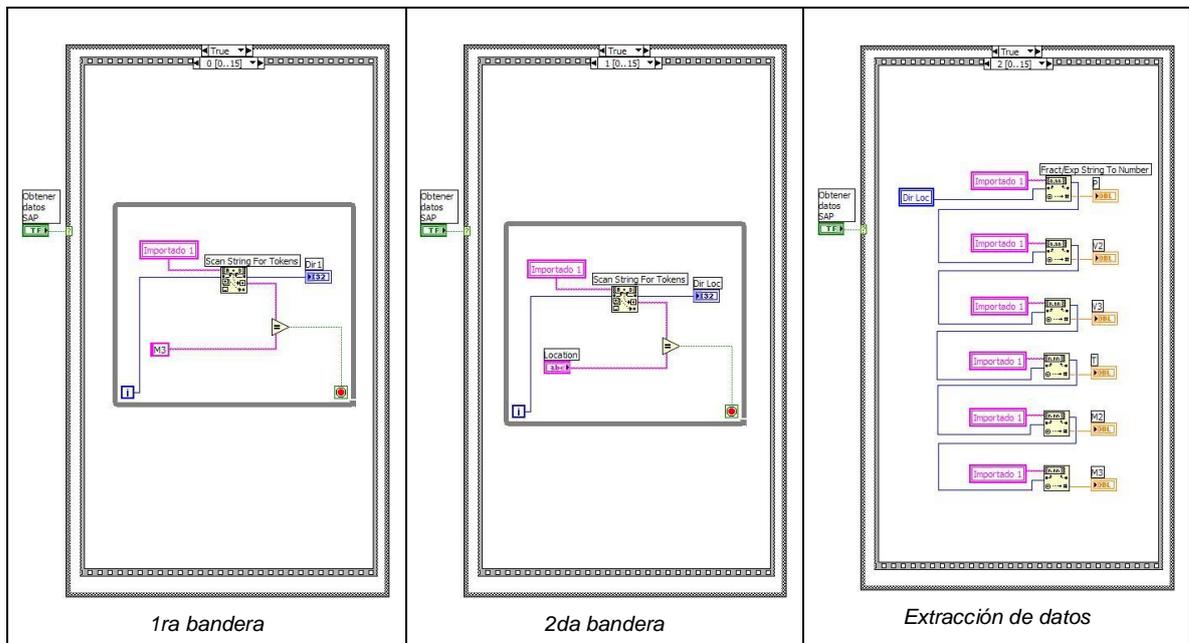


Figura 4.47 Algoritmo para escaneo del documento del SAP con las fuerzas de la sección

Luego se procede a sacar los valores referentes a las propiedades de la sección, para esto primero se debe identificar en el documento el tipo de sección (por ejemplo: IPN, ángulo, canal, etc).

Para esto igual que se procedió para las fuerzas, se escanea el documento en busca de la palabra **Lenght**, y se suma 29 espacios a esta dirección para encontrar la palabra que identifica el tipo de sección. Los 29 espacios fueron descubiertos de manera experimental (ensayos múltiples) y corresponden a la distancia que hay entre ambas palabras.

Esta dirección se guarda en la variable Dir loc y será utilizada luego para mostrar en pantalla el dibujo de la sección importada.

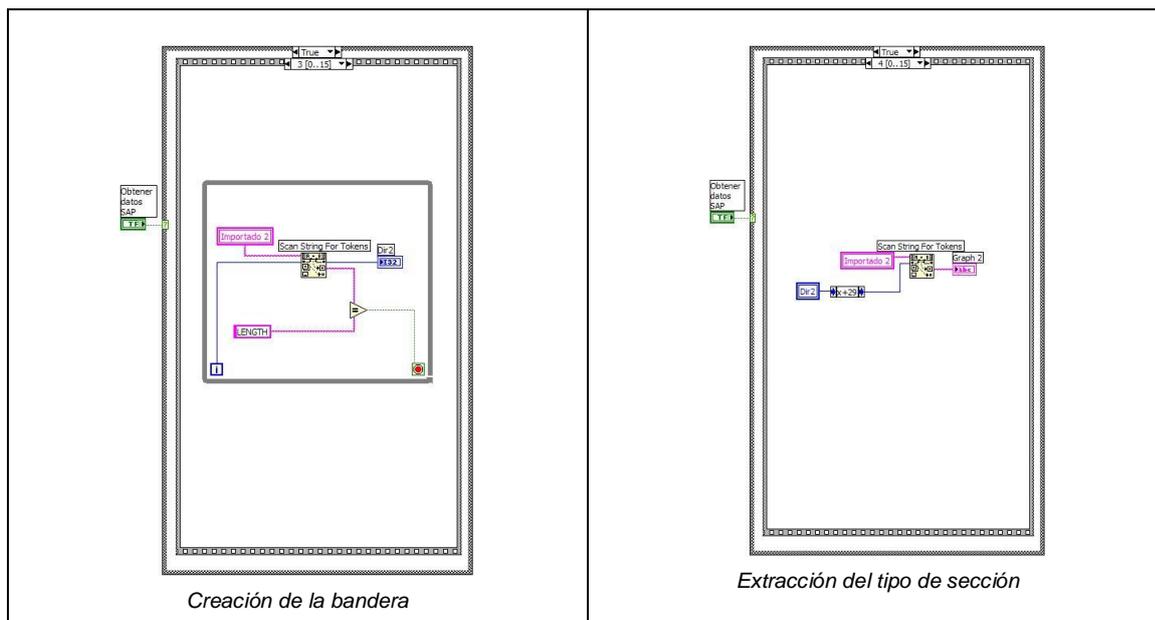


Figura 4.48 Algoritmo para escaneo del documento del SAP con el Tipo de Sección

Se repite en procedimiento practicado antes para extraer los valores de áreas e inercias, con la particularidad de que luego de encontrar la palabra característica **Shear**, buscamos el tipo de sección en análisis ya encontrado en el paso anterior y guardado en la variable **Graph 2**.

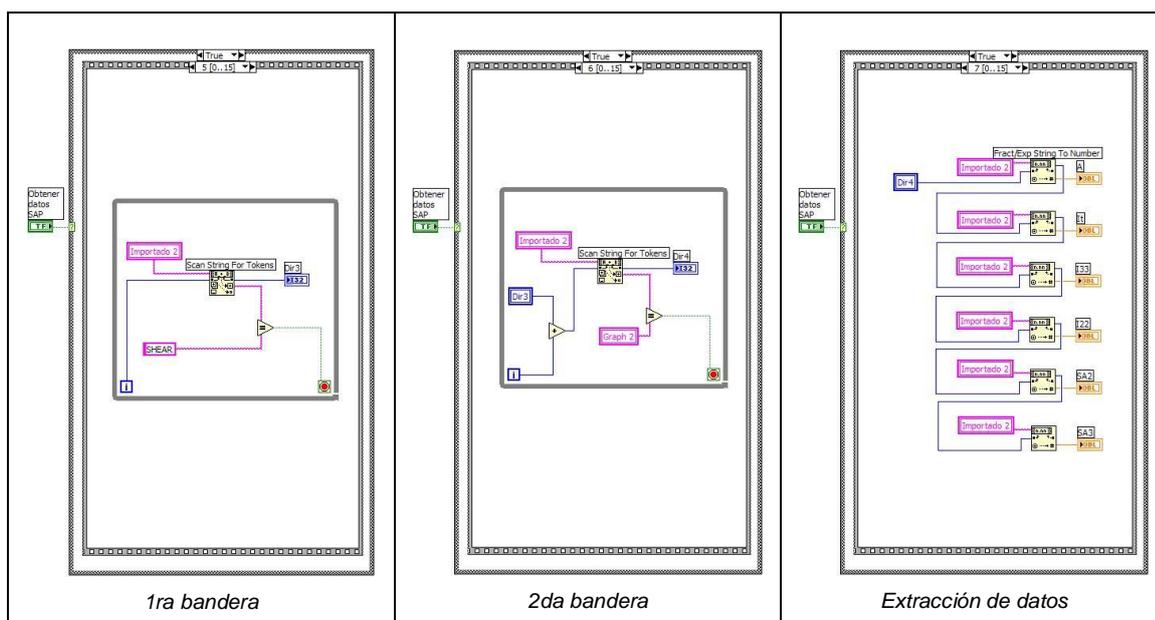


Figura 4.49 Algoritmo para escaneo del documento del SAP con las áreas e inercias

Repetimos el procedimiento para los módulos de sección como se muestra en los siguientes gráficos:

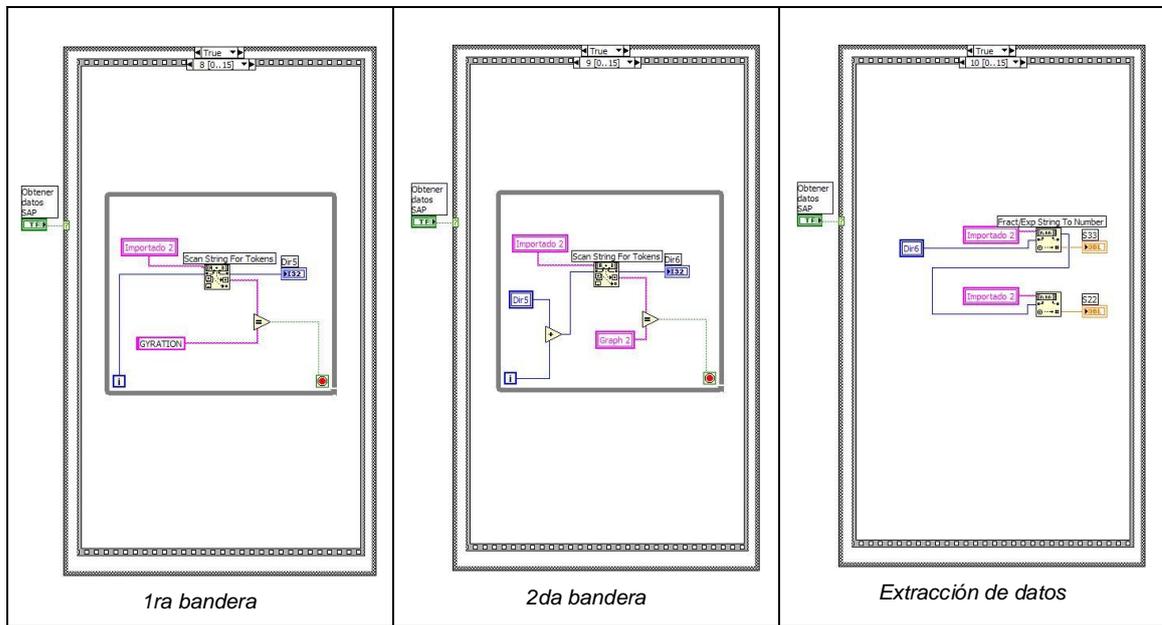


Figura 4.50 Algoritmo para escaneo del documento del SAP los módulos de sección

Finalmente se escanea el documento una última vez para sacar los datos de la sección:

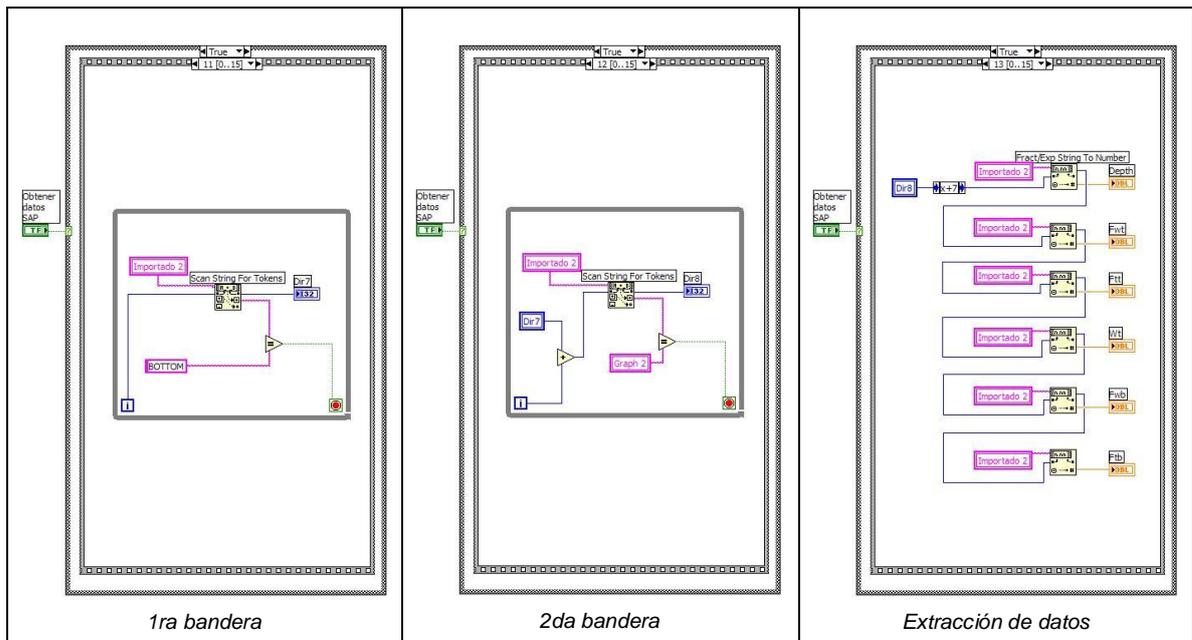


Figura 4.51 Algoritmo para escaneo del documento del SAP las características de la sección

Para comparar el tipo de sección guardado en la variable **Graph 2**, se escribió un algoritmo muy simple, primero se guarda en variables el tipo de propiedad con el comando **Match Pattern** si la palabra guardada en **Graph 2** coincide con el tipo de sección conocida en el software de adquisición de datos.

Luego se compara las variables nuevamente y si alguna coincide con los tipos conocidos, se activa una estructura tipo **Case** y esta muestra un gráfico en la interfaz del usuario.

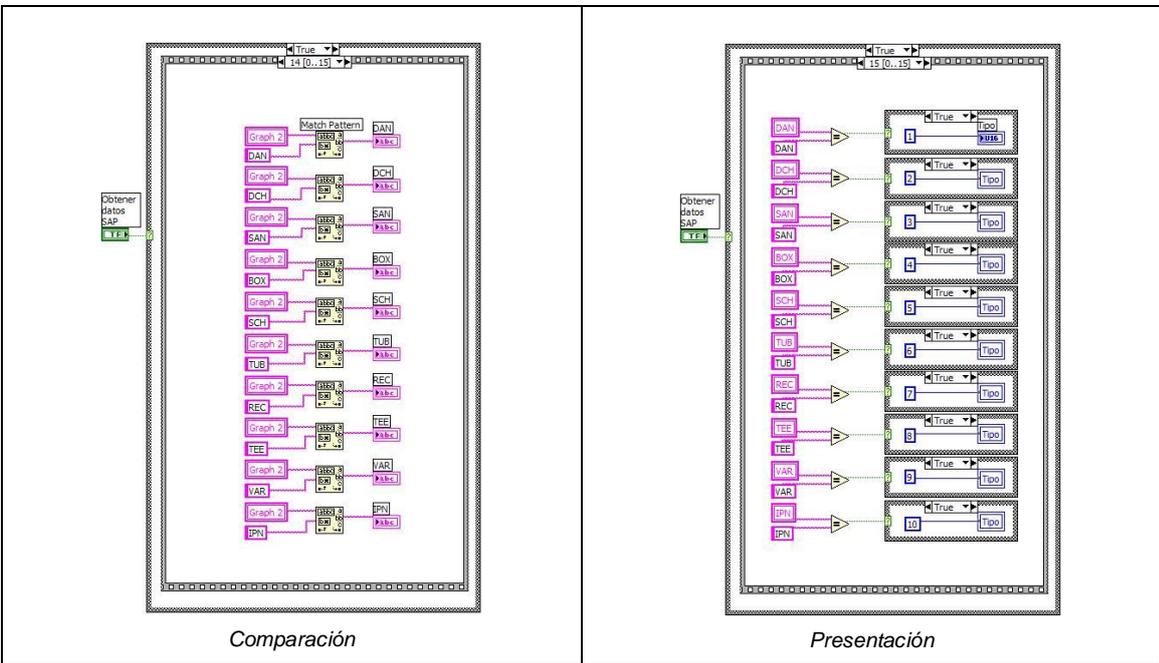


Figura 4.52 Algoritmo de presentación en pantalla del gráfico correspondiente a al tipo de sección

4.3.3.2 Análisis, comparación y resultados

Con los datos de la pantalla en la interfaz de usuario se calcula los esfuerzos en x, y, z y los cortantes xz, yx, yz; con estos valores el software calculará el esfuerzo equivalente y el error porcentual con el esfuerzo práctico obtenido antes.

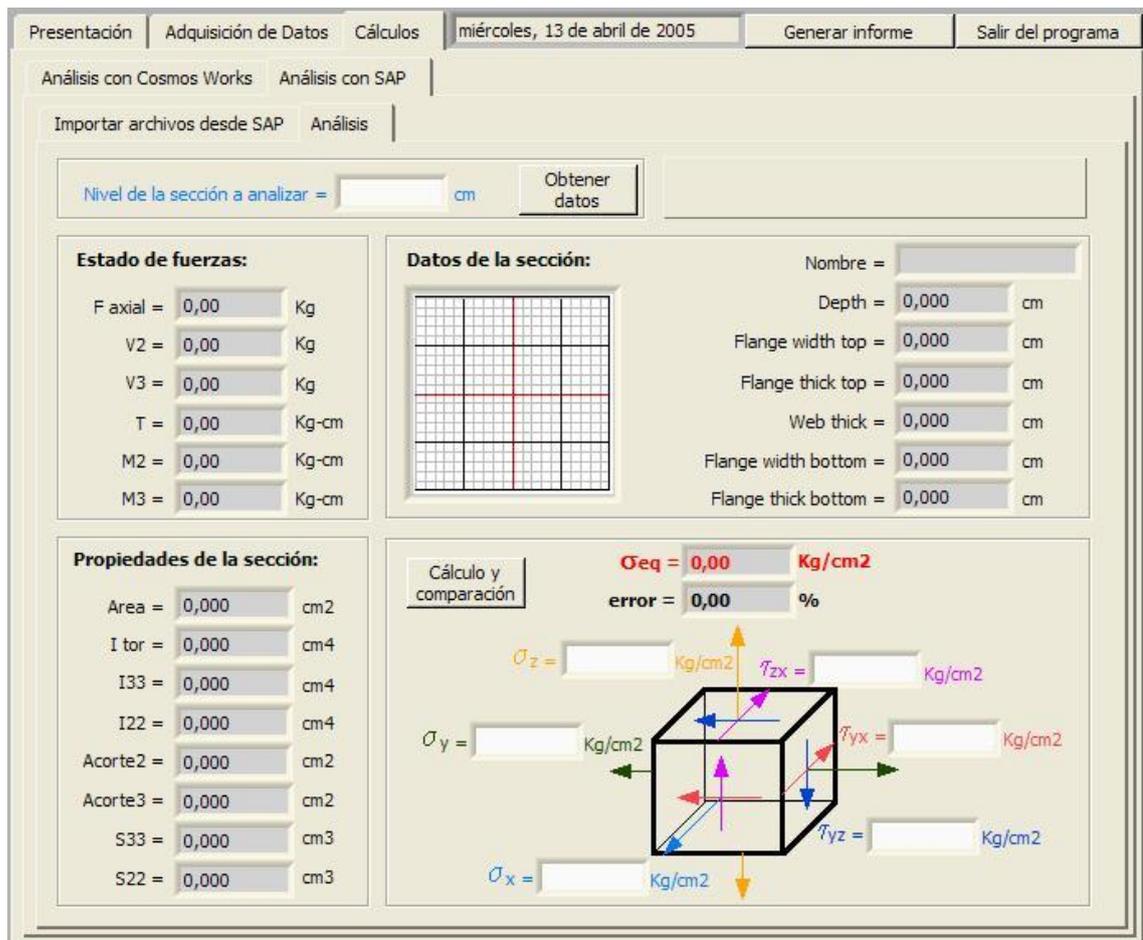


Figura 4.53 Pantalla de análisis y resultados del SAP

Luego de que el usuario ingresó los valores de esfuerzos normales y cortantes, se guarda los valores ingresados en variables numéricas gracias al comando **Fract/Exp String To Number**, para poder utilizarlos para la obtención posterior de los resultados.

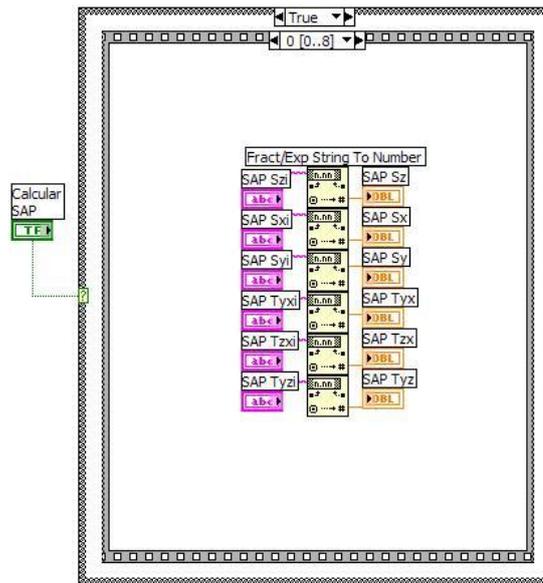


Figura 4.54 Ingreso de esfuerzos por el usuario

Por medio de la ecuación de esfuerzo triaxial, se obtiene los esfuerzos principales 1, 2 y 3 y posteriormente el valor de esfuerzo equivalente, para esto se procede a formar la ecuación calculando las constantes de la misma.

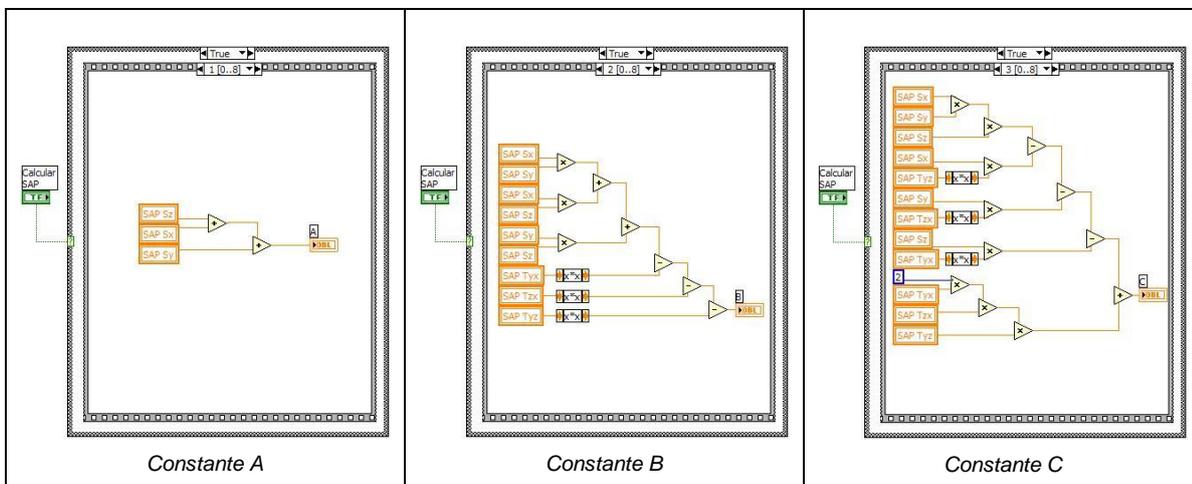


Figura 4.55 Cálculo de las constantes de la ecuación de esfuerzos triaxiales

Se guarda los términos independientes en un arreglo con la forma de la ecuación de esfuerzo triaxial.

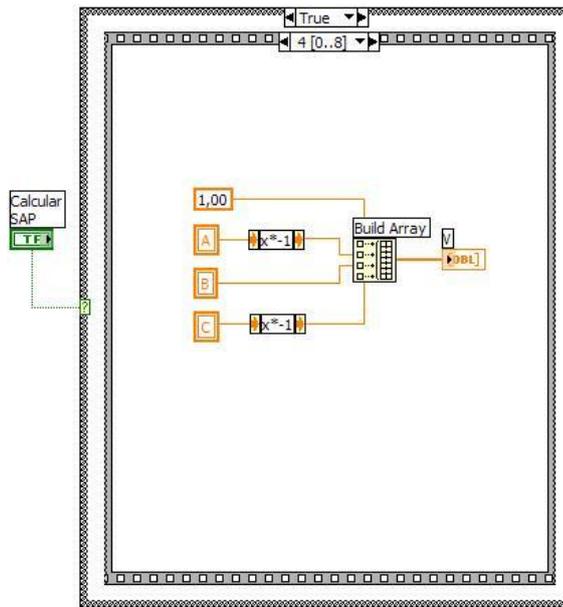


Figura 4.56 Construcción del arreglo V con la forma de la ecuación de esfuerzos triaxial

Se envía el arreglo o vector con la ecuación de esfuerzos triaxiales al **Matlab** por medio de un **Script Node** para que la ecuación sea resuelta en el **Matlab** y los resultados sean devueltos al Software de adquisición de datos en una matriz llamada S1S2S3, la cual contendrá los esfuerzos principales 1, 2 y 3.

El texto escrito en el **Script Node** se lo hace igual que si se lo estuviera escribiendo en **Matlab**, esta resulta ser una herramienta muy poderosa, pues como es conocido el **Matlab** es una calculadora de ingeniería excelente y en esta se puede resolver muchos problemas, por ejemplo de ser el caso se podría enviar a graficar al Matlab y luego mostrar los resultados en el Software de adquisición de datos.

Se ha resuelto esta simple ecuación de esta manera para incentivar a la resolución de los problemas de **LabView** por medio del **Matlab Script** el cual abre un campo muy interesante y disminuirá el tamaño de la programación del **LabView**, facilitando así el trabajo.

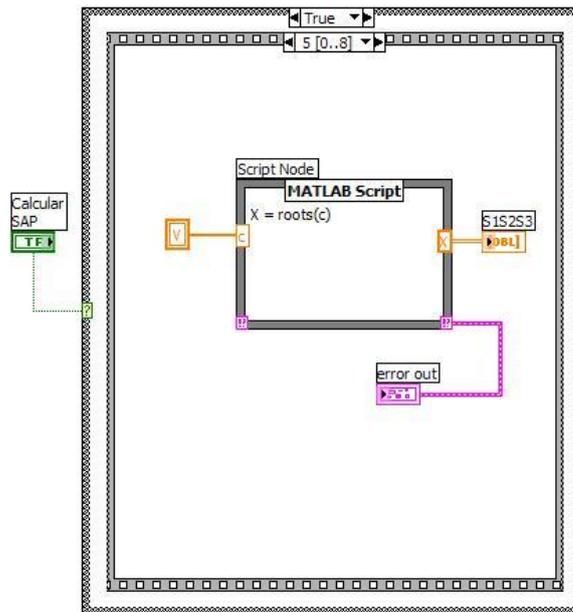


Figura 4.57 Resolución de la ecuación por medio del Matlab Script

Se extrae de la matriz S1S2S3 los valores de esfuerzos principales 1, 2 y 3 en variables.

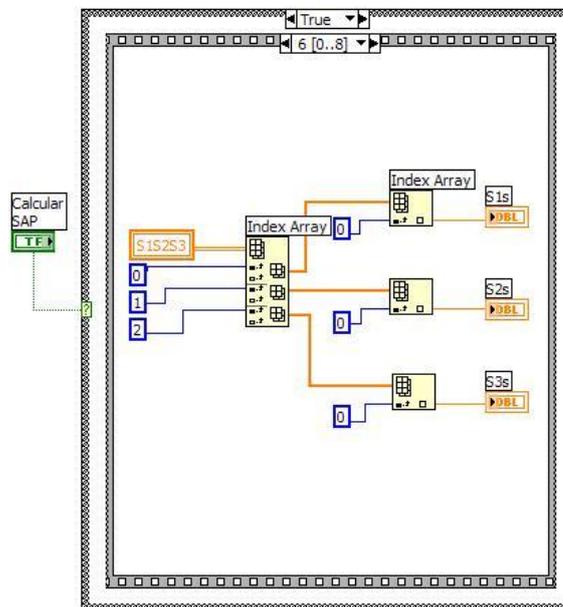


Figura 4.58 Extracción de los esfuerzos principales 1, 2 y 3 en variables

Se utiliza un **Formula Node** para resolver la ecuación de esfuerzo equivalente y se guarda el resultado en la variable **esf vm SAP**.

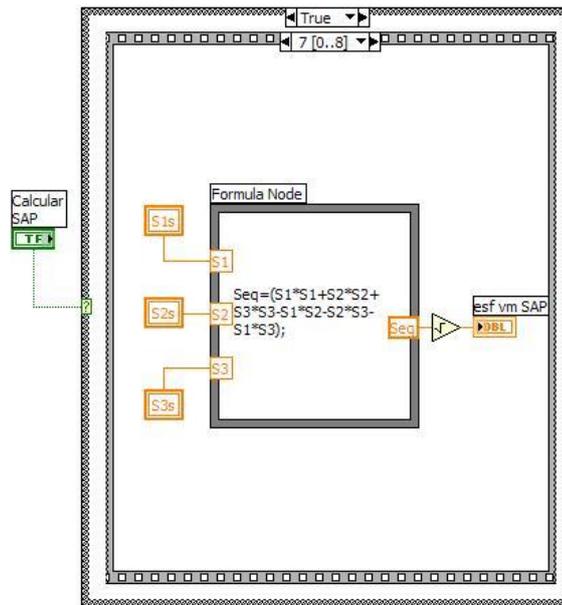


Figura 4.59 Resolución de la ecuación de esfuerzo equivalente en 3D

Finalmente se calcula el error porcentual y se la guarda en la variable **errorSAP** para indicarla en pantalla.

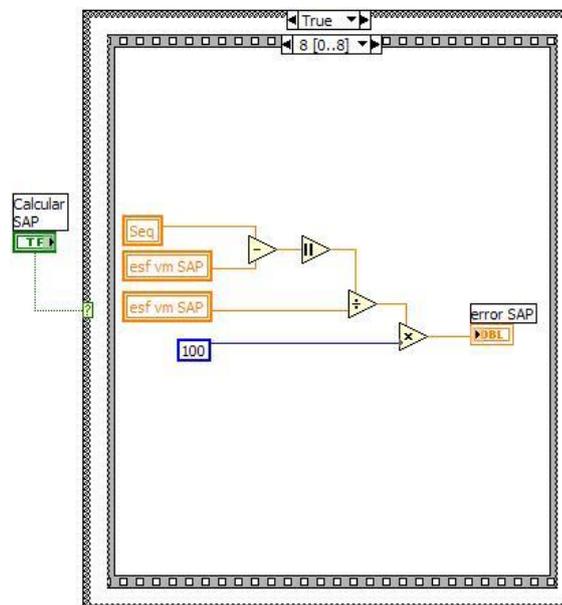


Figura 4.60 Cálculo del error porcentual

4.3.4 RESETEO DE TODAS LAS VARIABLES

En el reseteo de las variables se puede resaltar tres partes, la primera comprende la parte gráfica en cual se llena una barra indicando que el proceso se está realizando, la segunda el encendido de los arreglos importantes y finalmente todas las variables y banderas utilizadas para la programación.

Se utiliza una secuencia en la cual primero se corre una estructura tipo **For**, en la cual se llena la barra o **Slide** y se muestra la palabra “Borrando.....” en pantalla durante el proceso, para inmediatamente después borrar la barra y la palabra.

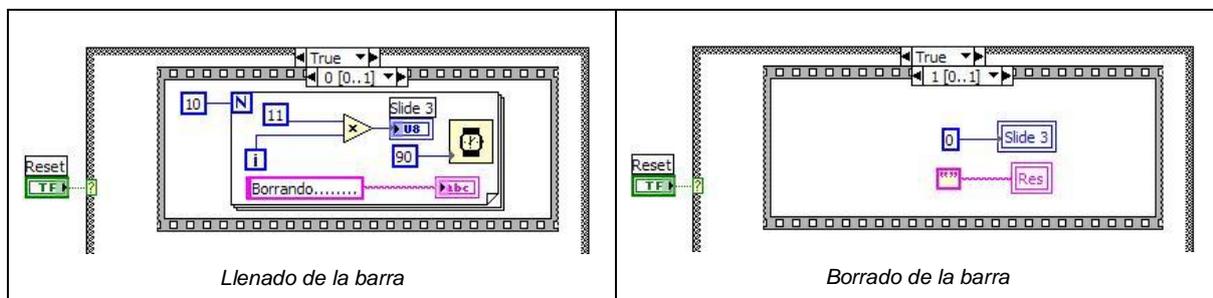


Figura 4.61 Animación del botón de Reseteo

El borrado de los arreglos de deformaciones unitarias iniciales, finales y el vector que contiene la ecuación que se exporta al **Matlab** son variables que requieren ser borradas.

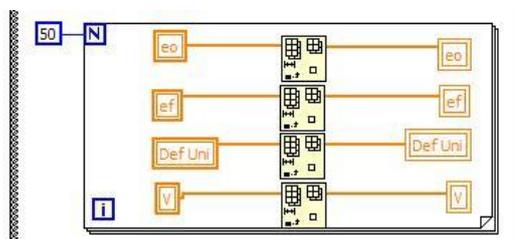


Figura 4.62 Borrado de los arreglos

Finalmente y como se puede observar en los siguientes cuatro gráficos, se encera todas las variables numéricas, de texto y banderas utilizadas en el programa.

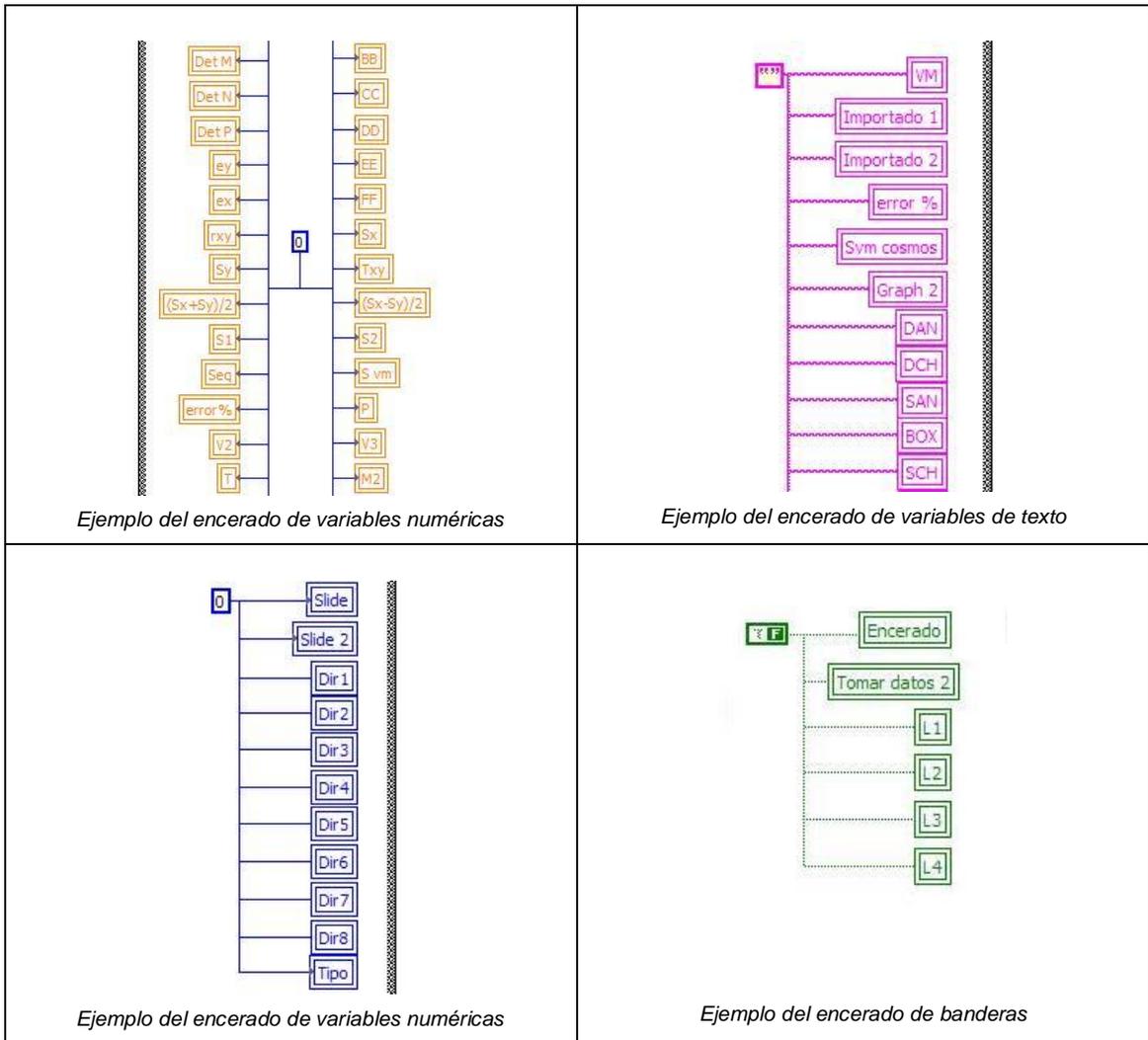


Figura 4.63 Encerado de las variables numéricas, de texto y banderas

4.3.5 GENERACIÓN DE INFORME

El software de adquisición de datos genera un informe en formato de texto el cual puede ser llevado a Excel, Word u otro software comercial en el cual se puede trabajar los resultados que este tiene o simplemente imprimir la hoja.

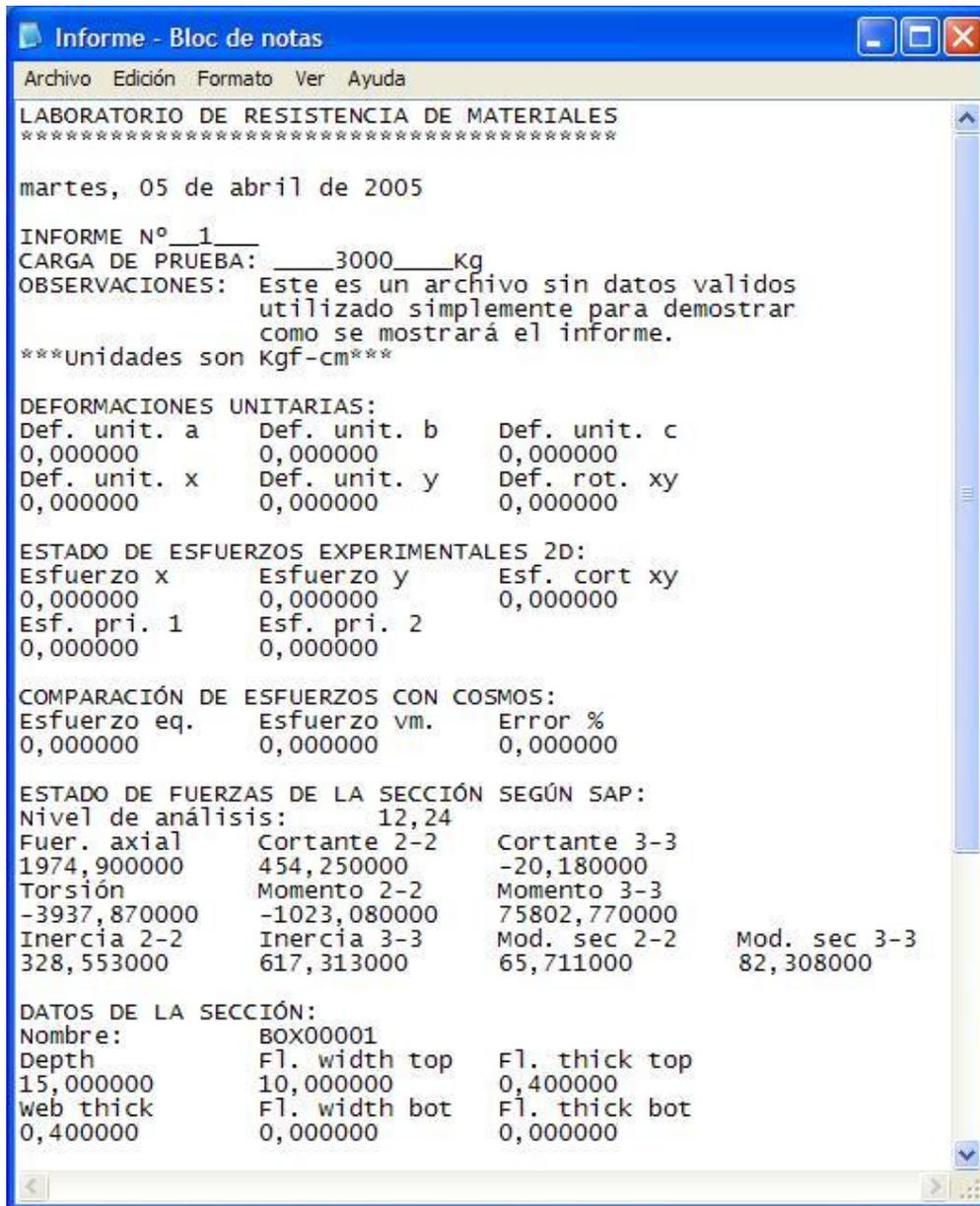


Figura 4.64 Informe presentado en el Bloc de notas

Para esto se une las variables de texto y numéricas concatenándolas gracias al comando **Concatenate Strings** en un solo conjunto con el formato deseado.

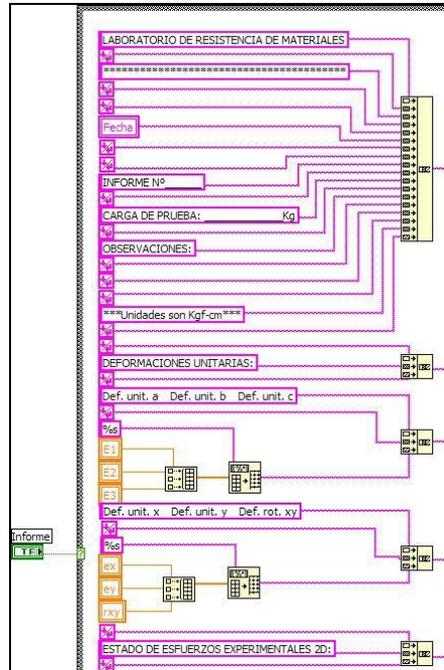


Figura 4.65 Concatenado de las variables de texto

Luego de concatenar todas las variables se utiliza el comando **Write Characters to a File.Vi** para abrir una ventana en la interfaz del usuario y permitirle guardar el archivo del informe con el nombre y ubicación que este desee.

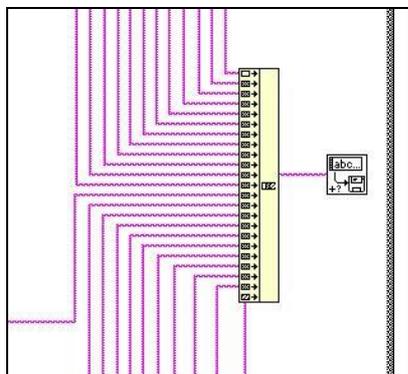


Figura 4.66 Generación del informe

CAPÍTULO 5

PRUEBAS

5.1 PLAN DE PRUEBAS

En este capítulo se procederá a realizar las prácticas para determinar el buen funcionamiento del sistema en conjunto axial como también planear las prácticas. Como primer paso se deberá realizar una pequeña prueba con el fin de comprobar que los datos correspondientes al voltaje lleguen de manera adecuada al computador, paso fundamental es por lo tanto armar el sistema de manera completa. Posteriormente se definirán las magnitudes de la carga de prueba para esto se consideraran las siguientes variables:

- La apreciación del elemento de carga.
- La velocidad de carga del vibróforo.
- El rango de utilización del conjunto pórtico-vibróforo.
- Resistencia del pórtico según el diseño.
- Sensibilidad del sistema de adquisición de datos.

Además se debe considerar que para la realización de las pruebas son indispensables algunos cálculos previos tanto en Cosmos Works como en SAP2000, por lo tanto dichos cálculos deberán ser realizados previamente.

Finalmente se procederá a encontrar la relación existente entre la variación del voltaje y la deformación unitaria en el rango propuesto para encontrar lo que se conoce como la "ecuación de transformación". Una vez determinada dicha ecuación se podrá comenzar las pruebas con los valores determinados en el rango seleccionado, finalmente se realizará un análisis de resultados debidamente sustentados.

5.1.1 DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS DE PRUEBA Y RANGO DE UTILIZACIÓN

Para la determinación de las cargas de prueba fueron definidas anteriormente algunas consideraciones a continuación se explican su significado.

La apreciación del elemento de carga esta guiado principalmente a poder determinar visualmente la carga de prueba para el caso del vibróforo la precisión es de 100Kg es decir solamente se podrán aplicar cargas múltiplos de este valor.

La velocidad de carga del vibróforo es de gran importancia puesto que si el pórtico se carga de manera muy acelerada no será posible tomar la medida de deformación para un dato de carga exacto produciéndose de esta manera un error de apreciación, por tal razón se ha determinado un valor de velocidad de carga de 8 litros por minuto, con esta velocidad eliminamos los errores de apreciación.

El rango de utilización del conjunto pórtico-vibróforo se refiere a que como se expuso en el capítulo 2, el vibróforo de baja frecuencia tiene una capacidad máxima para carga estática de 10 toneladas es decir se debe considerar este valor como valor tope para la realización de las pruebas.

En el factor referente a la resistencia según al diseño es de gran importancia puesto que como se demostró en el capítulo 3 el pórtico solamente puede trabajar hasta un valor máximo de 4 toneladas puesto que si se rebasase este valor el pórtico o los anclajes podrían fallar. Por lo antes expuesto y por trabajar con seguridad dentro del laboratorio se ha determinado una carga máxima de carga correspondiente a 3 toneladas, este será el valor máximo con lo cual se garantiza el buen funcionamiento del conjunto.

Se realizó además prácticas en una probeta cilíndrica del laboratorio de resistencia de materiales, para dicha práctica se colocó una carga de 4 kg y se

produjeron deformaciones unitarias en el rango de 40 a 70 x 10⁻⁶, se recomienda no realizar prácticas en donde se obtengan deformaciones inferiores a este valor.

En conclusión y por todo lo antes expuesto se ha determinado que las pruebas en el pórtico del vibróforo estarán en el rango comprendido entre 500 Kg. Y 3000 Kg. las variaciones de carga deberán ser múltiplos de 100Kg además la velocidad de descarga de aceite no deberá sobrepasar los 8 litros por minuto.

5.1.2 DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

La determinación de la ecuación de transformación nos permitirá relacionar las diferencias de voltaje con los valores de las deformaciones unitarias, para esto primero se tomaron algunos datos indispensables de deformación unitaria únicamente con el MDU, para luego tomar los datos de voltajes arrojados por el sistema complementado armado tal como se muestra en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Resumen de mediciones de voltaje y deformación

| | Carga (Kg) | Señal análoga (V) | | | Deformación unitaria | | |
|---------|------------|-------------------|-----------|-----------|----------------------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Probeta | 3 | 0,0031260 | 0,0033700 | 0,0035600 | 0,000047 | 0,000045 | 0,000050 |
| | 4 | 0,0064960 | 0,0064960 | 0,0065930 | 0,000065 | 0,000068 | 0,000056 |
| Pórtico | 500 | 0,0057610 | 0,0046590 | 0,0056100 | 0,000070 | 0,000070 | 0,000065 |
| | 1000 | 0,0146270 | 0,0147270 | 0,0155790 | 0,000126 | 0,000126 | 0,000123 |
| | 1500 | 0,0183340 | 0,0213390 | 0,0220410 | 0,000197 | 0,000198 | 0,000199 |
| | 2000 | 0,0254470 | 0,0276920 | 0,0249080 | 0,000255 | 0,000256 | 0,000256 |
| | 2500 | 0,0310620 | 0,0323320 | 0,0324300 | 0,000320 | 0,000315 | 0,000314 |

Luego debemos encontrar una relación entre estas dos magnitudes, para esto ajustaremos los datos y encontraremos dicha relación. En la figura 5.1 se tiene dicha relación con el origen en el punto de coordenadas (0,0); se puede observar que la primera curva de color negro representa una tendencia lineal y la segunda de color rojo una tendencia polinomial.

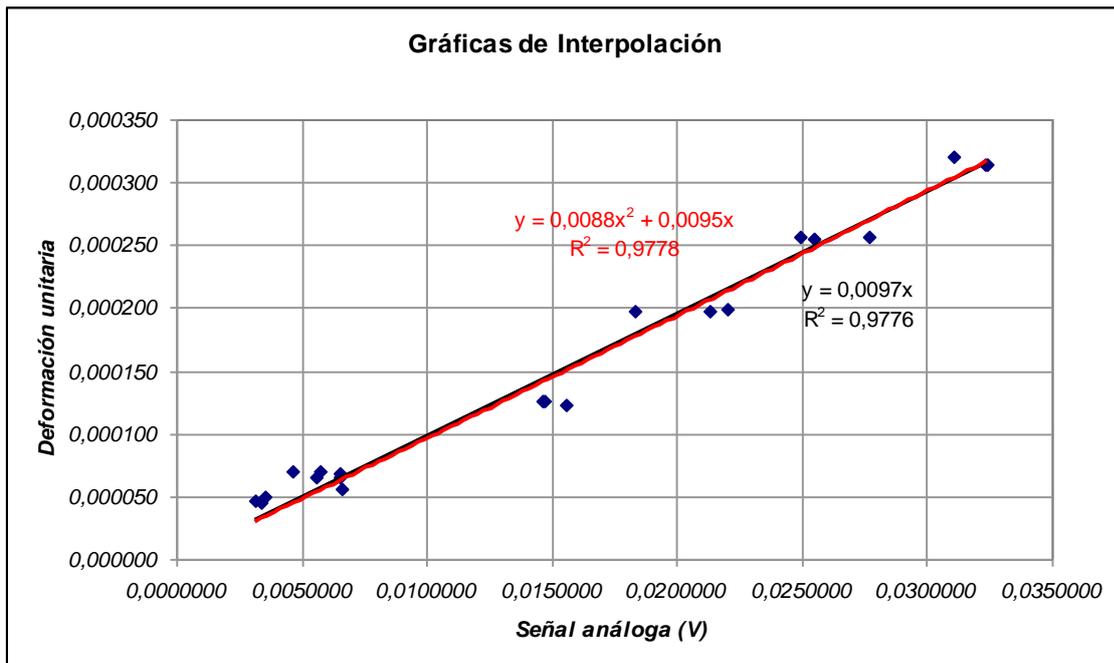


Figura 5.1 Gráficas de líneas de tendencia con cero en el origen

Se eligió la ecuación con tendencia lineal (color negro) con un factor de correlación de 0.9776 y que responde a la ecuación $y = 0.0097x$

5.1.3 CÁLCULOS PREVIOS EN SAP2000 Y COSMOS WORKS

Por la naturaleza del programa realizado en LabView (VibroSoft 2.0) es necesario introducir algunos datos en el mismo con el fin de realizar el procesamiento de los datos, dichos datos serán adquiridos tanto de Cosmos Works como de SAP200.

Los datos necesarios de Cosmos Works son el Esfuerzo de Von Misses en el punto de estudio el cual deberá ser calculado para cada uno de los valores de carga tal como se muestra en la tabla 5.2.

Los datos necesarios para el cálculo en SAP2000 son el estado de esfuerzos en el punto crítico tales datos son mostrados en los cuadros 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5; y cuyo ejemplo de cálculo para 2500Kg se detalla a continuación:

Estado de fuerzas de la sección:

$$\begin{aligned} F_{axial} &= 1645,75 \text{Kg} & T &= -3283,25 \text{Kg} - \text{cm} \\ V_{cor_{2-2}} &= 378,74 \text{Kg} & M_{2-2} &= -852,57 \text{Kg} - \text{cm} \\ V_{cor_{3-3}} &= -16,81 \text{Kg} & M_{3-3} &= 63201,54 \text{Kg} - \text{cm} \end{aligned}$$

Propiedades de la sección:

$$\begin{aligned} A &= 19,36 \text{cm}^2 & S_{2-2} &= 65,71 \text{cm}^3 \\ I_{2-2} &= 328,55 \text{cm}^4 & S_{3-3} &= 82,31 \text{cm}^3 \\ I_{3-3} &= 617,31 \text{cm}^4 & Q_{2-2} &= 49,37 \text{cm}^3 \\ A_{v_{2-2}} &= 12 \text{cm}^2 & Q_{3-3} &= 4,90 \text{cm}^3 \\ A_{v_{3-3}} &= 8 \text{cm}^2 \end{aligned}$$

Cálculo de esfuerzos normales:

$$\begin{aligned} \sigma_{axial} &= \frac{F}{A} = \frac{1645,75}{19,36} = 85,01 \text{Kg} / \text{cm}^2 \\ \sigma_{b_{2-2}} &= \frac{M_{2-2}}{S_{2-2}} = \frac{-852,57}{65,71} = -12,98 \text{Kg} / \text{cm}^2 \\ \sigma_{b_{3-3}} &= \frac{M_{3-3}}{S_{3-3}} = \frac{63201,54}{82,31} = 767,87 \text{Kg} / \text{cm}^2 \\ \sigma_z &= \sigma_{axial} + \sigma_{b_{2-2}} + \sigma_{b_{3-3}} = 839,90 \text{Kg} / \text{cm}^2 \end{aligned}$$

Cálculo de esfuerzos cortantes:

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctg\left(\frac{a/2}{l/2}\right) = \arctg\left(\frac{10/2}{15/2}\right) = 0,588 \text{rad} = 33,69^\circ \\ \tau_t &= \frac{T \cdot \rho}{J} = \frac{-3283,25 \cdot \sqrt{(15/2)^2 + (10/2)^2}}{(328,55 + 617,31)} = -31,29 \text{Kg} / \text{cm}^2 \\ \tau_{t_{2-2}} &= \tau_t \cdot \sin \alpha = -31,29 \cdot \sin(0,588) = -17,36 \text{Kg} / \text{cm}^2 \\ \tau_{t_{3-3}} &= \tau_t \cdot \cos \alpha = -31,29 \cdot \cos(0,588) = -26,03 \text{Kg} / \text{cm}^2 \\ \tau_{v_{2-2}} &= \frac{V_{2-2} \cdot Q_{2-2}}{I_{3-3} \cdot b} = \frac{378,74 \cdot 49,36}{617,31 \cdot (2 \cdot 0,4)} = 37,86 \text{Kg} / \text{cm}^2 \\ \tau_{v_{3-3}} &= \frac{V_{3-3} \cdot Q_{3-3}}{I_{2-2} \cdot b} = \frac{-16,81 \cdot 4,9}{328,55 \cdot (2 \cdot 0,4)} = -0,31 \text{Kg} / \text{cm}^2 \\ \tau_{zy} &= \tau_{t_{3-3}} + \tau_{v_{3-3}} = -26,03 - 0,31 = -26,35 \text{Kg} / \text{cm}^2 \\ \tau_{zx} &= \tau_{t_{2-2}} + \tau_{v_{2-2}} = -17,36 + 37,86 = 20,50 \text{Kg} / \text{cm}^2 \end{aligned}$$

Cuadro 5.1 Datos de esfuerzos necesarios para cálculo en SAP 500Kg

| Ensayo con 500Kg en el cilindro | | |
|--|----------------|----------------------|
| Fuerzas en la sección: | | |
| Fa= | 329,150 | <i>Kg</i> |
| V22= | 75,510 | <i>Kg</i> |
| V33= | -3,360 | <i>Kg</i> |
| T= | -654,620 | <i>Kg-cm</i> |
| M22= | -170,510 | <i>Kg-cm</i> |
| M33= | 12601,230 | <i>Kg-cm</i> |
| Esfuerzos: | | |
| Sa= | 17,002 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sb22= | -2,595 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sb33= | 153,098 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sz= | 167,505 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tv22= | 7,548 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tv33= | -0,063 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tt= | -6,238 | <i>Kg/cm2</i> |
| alfa= | 0,588 | <i>rad</i> |
| Tt22= | -3,460 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tt33= | -5,191 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tzy= | -5,253 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tzx= | 4,087 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tyx= | 0,000 | <i>Kg/cm2</i> |

Cuadro 5.2 Datos de esfuerzos necesarios para cálculo en SAP 1000Kg

| Ensayo con 1000Kg en el cilindro | | |
|---|----------------|----------------------|
| Fuerzas en la sección: | | |
| Fa= | 658,300 | <i>Kg</i> |
| V22= | 151,610 | <i>Kg</i> |
| V33= | -6,730 | <i>Kg</i> |
| T= | -1314,320 | <i>Kg-cm</i> |
| M22= | -341,030 | <i>Kg-cm</i> |
| M33= | 25300,150 | <i>Kg-cm</i> |
| Esfuerzos: | | |
| Sa= | 34,003 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sb22= | -5,190 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sb33= | 307,384 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sz= | 336,197 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tv22= | 15,155 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tv33= | -0,125 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tt= | -12,525 | <i>Kg/cm2</i> |
| alfa= | 0,588 | <i>rad</i> |
| Tt22= | -6,948 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tt33= | -10,422 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tzy= | -10,547 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tzx= | 8,207 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tyx= | 0,000 | <i>Kg/cm2</i> |

Cuadro 5.3 Datos de esfuerzos necesarios para cálculo en SAP 1500Kg

| Ensayo con 1500Kg en el cilindro | | |
|---|----------------|----------------------|
| Fuerzas en la sección: | | |
| Fa= | 987,450 | <i>Kg</i> |
| V22= | 227,130 | <i>Kg</i> |
| V33= | -10,090 | <i>Kg</i> |
| T= | -1968,940 | <i>Kg-cm</i> |
| M22= | -511,540 | <i>Kg-cm</i> |
| M33= | 37901,390 | <i>Kg-cm</i> |
| Esfuerzos: | | |
| Sa= | 51,005 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sb22= | -7,785 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sb33= | 460,482 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sz= | 503,702 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tv22= | 22,703 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tv33= | -0,188 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tt= | -18,764 | <i>Kg/cm2</i> |
| alfa= | 0,588 | <i>rad</i> |
| Tt22= | -10,408 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tt33= | -15,612 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tzy= | -15,800 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tzx= | 12,295 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tyx= | 0,000 | <i>Kg/cm2</i> |

Cuadro 5.4 Datos de esfuerzos necesarios para cálculo en SAP 2000Kg

| Ensayo con 2000Kg en el cilindro | | |
|---|----------------|----------------------|
| Fuerzas en la sección: | | |
| Fa= | 1316,600 | <i>Kg</i> |
| V22= | 303,220 | <i>Kg</i> |
| V33= | -13,450 | <i>Kg</i> |
| T= | -2628,630 | <i>Kg-cm</i> |
| M22= | -682,050 | <i>Kg-cm</i> |
| M33= | 50600,300 | <i>Kg-cm</i> |
| Esfuerzos: | | |
| Sa= | 68,006 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sb22= | -10,380 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sb33= | 614,768 | <i>Kg/cm2</i> |
| Sz= | 672,394 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tv22= | 30,309 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tv33= | -0,251 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tt= | -25,050 | <i>Kg/cm2</i> |
| alfa= | 0,588 | <i>rad</i> |
| Tt22= | -13,895 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tt33= | -20,843 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tzy= | -21,094 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tzx= | 16,414 | <i>Kg/cm2</i> |
| Tyx= | 0,000 | <i>Kg/cm2</i> |

Cuadro 5.5 Datos de esfuerzos necesarios para cálculo en SAP 2500Kg

| Ensayo con 2500Kg en el cilindro | | |
|----------------------------------|----------------|--------------------------|
| Fuerzas en la sección: | | |
| Fa= | 1645,750 | Kg |
| V22= | 378,740 | Kg |
| V33= | -16,810 | Kg |
| T= | -3283,250 | Kg-cm |
| M22= | -852,570 | Kg-cm |
| M33= | 63201,540 | Kg-cm |
| Esfuerzos: | | |
| Sa= | 85,008 | Kg/cm ² |
| Sb22= | -12,975 | Kg/cm ² |
| Sb33= | 767,866 | Kg/cm ² |
| Sz= | 839,900 | Kg/cm² |
| Tv22= | 37,858 | Kg/cm ² |
| Tv33= | -0,313 | Kg/cm ² |
| Tt= | -31,289 | Kg/cm ² |
| alfa= | 0,588 | rad |
| Tt22= | -17,356 | Kg/cm ² |
| Tt33= | -26,034 | Kg/cm ² |
| Tzy= | -26,347 | Kg/cm² |
| Tzx= | 20,502 | Kg/cm² |
| Tyx= | 0,000 | Kg/cm² |

Los esfuerzos calculados se los encuentra en la tabla 5.2 a manera de resumen.

Tabla 5.2 Resumen de esfuerzos calculados

| CARGA | COSMOS | SAP | | |
|-------------|--------|---------|---------|--------|
| | ESF eq | ESF z | TAO zy | TAO zx |
| 500 | 170,50 | 167,505 | -10,444 | 4,087 |
| 1000 | 340,90 | 336,197 | -20,969 | 8,207 |
| 1500 | 511,70 | 503,702 | -31,413 | 12,295 |
| 2000 | 681,80 | 672,394 | -41,937 | 16,414 |
| 2500 | 853,70 | 839,900 | -52,381 | 20,502 |

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez determinada la ecuación de transformación y obtenidos los datos necesarios para realizar las prácticas se procederá a realizar las mismas con cargas de 500, 1000, 1500, 2000, y 2500 Kg en el pórtico y de 4Kg en la probeta cilíndrica, siguiendo el procedimiento detallado en el manual del usuario, obteniéndose los siguientes resultados:

Cuadro 5.6 Informe 1 del ensayo con 4Kg en la probeta

| | | |
|---|--------------------|--------------------|
| INFORME N° | | 1 |
| CARGA DE PRUEBA: | | 4 Kg |
| OBSERVACIONES: Prueba realizada en la probeta del laboratorio Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| -0,000051 | 0,000063 | -0,000067 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| 0,000014 | -0,000051 | 0,00015 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| -1,875 | -103,917 | 117,541 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 75,241 | -181,033 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 228,16 | 220,25 | 3,59 |

Cuadro 5.7 Informe 2 del ensayo con 4Kg en la probeta

| | | |
|---|--------------------|--------------------|
| INFORME N° | | 2 |
| CARGA DE PRUEBA: | | 4 Kg |
| OBSERVACIONES: Prueba realizada en la probeta del laboratorio Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| -0,000064 | 0,000062 | -0,000079 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| 0,00001 | -0,000064 | 0,000162 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| -19,955 | -137,353 | 127,408 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 61,625 | -218,933 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 255,38 | 220,25 | 15,95 |

Cuadro 5.8 Informe 1 del ensayo con 500Kg en el pórtico

| | | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| INFORME N° | | 3 |
| CARGA DE PRUEBA: | | 500 Kg |
| OBSERVACIONES: | | |
| Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| 0,000059 | 0,000046 | 0,000016 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| 0,000022 | 0,000059 | 0,000035 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| 87,607 | 145,695 | 27,553 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 156,686 | 76,617 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 135,70 | 170,50 | 20,41 |
| ESTADO DE FUERZAS DE LA SECCIÓN SEGÚN SAP: | | |
| <i>Nivel de análisis</i> | 12,24 cm | |
| <i>Fuerza axial</i> | <i>Cortante 2-2</i> | <i>Cortante 3-3</i> |
| 329,150 | 75,510 | -3,360 |
| <i>Torsión</i> | <i>Momento 2-2</i> | <i>Momento 3-3</i> |
| -654,620 | -170,510 | 12601,230 |
| <i>Inercia 2-2</i> | <i>Inercia 3-3</i> | |
| 328,553 | 617,313 | |
| <i>Mod Sec 2-2</i> | <i>Mod Sec 3-3</i> | |
| 65,711 | 82,308 | |
| DATOS DE LA SECCIÓN: | | |
| <i>Nombre:</i> | BOX00001 | |
| <i>Depth</i> | <i>Fl. width top</i> | <i>Fl. thick top</i> |
| 15 | 10 | 0,4 |
| <i>Web thick</i> | <i>Fl. width bottom</i> | <i>Fl. thick bottom</i> |
| 0,4 | 0 | 0 |
| ESTADO DE ESFUERZOS SEGÚN SAP EN 3D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esfuerzo z</i> |
| 0,00 | 0,00 | 167,50 |
| <i>Cortante xy</i> | <i>Cortante zx</i> | <i>Cortante yz</i> |
| 0,00 | 4,10 | -10,40 |
| <i>Esf Principal 1</i> | <i>Esf Principal 2</i> | <i>Esf Principal 3</i> |
| 0,00 | 168,24 | -0,74 |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON SAP: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo SAP</i> | <i>Error %</i> |
| 135,70 | 168,62 | 19,52 |

Cuadro 5.9 Informe 2 del ensayo con 500Kg en el pórtico

| | | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| INFORME Nº | | 4 |
| CARGA DE PRUEBA: | | 500 Kg |
| OBSERVACIONES: | | |
| Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| 0,000058 | 0,000048 | 0,000018 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| 0,000021 | 0,000059 | 0,000032 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| 87,607 | 145,695 | 27,553 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 156,686 | 76,617 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 133,70 | 170,50 | 21,61 |
| ESTADO DE FUERZAS DE LA SECCIÓN SEGÚN SAP: | | |
| <i>Nivel de análisis</i> | 12,24 cm | |
| <i>Fuerza axial</i> | <i>Cortante 2-2</i> | <i>Cortante 3-3</i> |
| 329,150 | 75,510 | -3,360 |
| <i>Torsión</i> | <i>Momento 2-2</i> | <i>Momento 3-3</i> |
| -654,620 | -170,510 | 12601,230 |
| <i>Inercia 2-2</i> | <i>Inercia 3-3</i> | |
| 328,553 | 617,313 | |
| <i>Mod Sec 2-2</i> | <i>Mod Sec 3-3</i> | |
| 65,711 | 82,308 | |
| DATOS DE LA SECCIÓN: | | |
| <i>Nombre:</i> | BOX00001 | |
| <i>Depth</i> | <i>Fl. width top</i> | <i>Fl. thick top</i> |
| 15 | 10 | 0,4 |
| <i>Web thick</i> | <i>Fl. width bottom</i> | <i>Fl. thick bottom</i> |
| 0,4 | 0 | 0 |
| ESTADO DE ESFUERZOS SEGÚN SAP EN 3D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esfuerzo z</i> |
| 0,00 | 0,00 | 167,50 |
| <i>Cortante xy</i> | <i>Cortante zx</i> | <i>Cortante yz</i> |
| 0,00 | 4,10 | -10,40 |
| <i>Esf Principal 1</i> | <i>Esf Principal 2</i> | <i>Esf Principal 3</i> |
| 0,00 | 168,24 | -0,74 |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON SAP: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo SAP</i> | <i>Error %</i> |
| 134,43 | 168,62 | 20,52 |

Cuadro 5.10 Informe 1 del ensayo con 1000Kg en el pórtico

| | | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| INFORME N° | | 5 |
| CARGA DE PRUEBA: | | 1000 Kg |
| OBSERVACIONES: | | |
| Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| 0,000176 | 0,000047 | 0,000006 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| -0,000023 | 0,000176 | 0,000047 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| 66,579 | 378,355 | 36,612 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 382,597 | 62,338 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 355,55 | 340,90 | 4,30 |
| ESTADO DE FUERZAS DE LA SECCIÓN SEGÚN SAP: | | |
| <i>Nivel de análisis</i> | 12,24 cm | |
| <i>Fuerza axial</i> | <i>Cortante 2-2</i> | <i>Cortante 3-3</i> |
| 658,300 | 151,610 | -6,730 |
| <i>Torsión</i> | <i>Momento 2-2</i> | <i>Momento 3-3</i> |
| -1314,320 | -341,030 | 25300,150 |
| <i>Inercia 2-2</i> | <i>Inercia 3-3</i> | |
| 328,553 | 617,313 | |
| <i>Mod Sec 2-2</i> | <i>Mod Sec 3-3</i> | |
| 65,711 | 82,308 | |
| DATOS DE LA SECCIÓN: | | |
| <i>Nombre:</i> | BOX00001 | |
| <i>Depth</i> | <i>Fl. width top</i> | <i>Fl. thick top</i> |
| 15 | 10 | 0,4 |
| <i>Web thick</i> | <i>Fl. width bottom</i> | <i>Fl. thick bottom</i> |
| 0,4 | 0 | 0 |
| ESTADO DE ESFUERZOS SEGÚN SAP EN 3D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esfuerzo z</i> |
| 0,00 | 0,00 | 336,20 |
| <i>Cortante xy</i> | <i>Cortante zx</i> | <i>Cortante yz</i> |
| 0,00 | 8,20 | -20,90 |
| <i>Esf Principal 1</i> | <i>Esf Principal 2</i> | <i>Esf Principal 3</i> |
| 0,00 | 337,69 | -1,49 |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON SAP: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo SAP</i> | <i>Error %</i> |
| 355,55 | 338,44 | 5,06 |

Cuadro 5.11 Informe 2 del ensayo con 1000Kg en el pórtico

| | | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| INFORME N° | | 6 |
| CARGA DE PRUEBA: | | 1000 Kg |
| OBSERVACIONES: | | |
| Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| 0,000128 | 0,000048 | 0,000006 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| -0,000006 | 0,000128 | 0,000048 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| 71,518 | 281,453 | 37,421 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 287,924 | 65,047 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 261,54 | 340,90 | 23,28 |
| ESTADO DE FUERZAS DE LA SECCIÓN SEGÚN SAP: | | |
| <i>Nivel de análisis</i> | | 12,24 cm |
| <i>Fuerza axial</i> | <i>Cortante 2-2</i> | <i>Cortante 3-3</i> |
| 658,300 | 151,610 | -6,730 |
| <i>Torsión</i> | <i>Momento 2-2</i> | <i>Momento 3-3</i> |
| -1314,320 | -341,030 | 25300,150 |
| <i>Inercia 2-2</i> | <i>Inercia 3-3</i> | |
| 328,553 | 617,313 | |
| <i>Mod Sec 2-2</i> | <i>Mod Sec 3-3</i> | |
| 65,711 | 82,308 | |
| DATOS DE LA SECCIÓN: | | |
| <i>Nombre:</i> | | BOX00001 |
| <i>Depth</i> | <i>Fl. width top</i> | <i>Fl. thick top</i> |
| 15 | 10 | 0,4 |
| <i>Web thick</i> | <i>Fl. width bottom</i> | <i>Fl. thick bottom</i> |
| 0,4 | 0 | 0 |
| ESTADO DE ESFUERZOS SEGÚN SAP EN 3D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esfuerzo z</i> |
| 0,00 | 0,00 | 336,20 |
| <i>Cortante xy</i> | <i>Cortante zx</i> | <i>Cortante yz</i> |
| 0,00 | 8,20 | -20,90 |
| <i>Esf Principal 1</i> | <i>Esf Principal 2</i> | <i>Esf Principal 3</i> |
| 0,00 | 337,69 | -1,49 |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON SAP: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo SAP</i> | <i>Error %</i> |
| 261,54 | 338,44 | 22,72 |

Cuadro 5.12 Informe 1 del ensayo con 1500Kg en el pórtico

| | | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| INFORME N° | | 7 |
| CARGA DE PRUEBA: | | 1500 Kg |
| OBSERVACIONES: | | |
| Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| 0,00021 | 0,000064 | 0,000082 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| 0,000027 | 0,00021 | -0,000021 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| 202,688 | 489,984 | -16,517 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 490,931 | 201,742 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 427,40 | 511,70 | 16,47 |
| ESTADO DE FUERZAS DE LA SECCIÓN SEGÚN SAP: | | |
| <i>Nivel de análisis</i> de | | |
| <i>Fuerza axial</i> | <i>Cortante 2-2</i> | <i>Cortante 3-3</i> |
| 987,450 | 227,130 | -10,090 |
| <i>Torsión</i> | <i>Momento 2-2</i> | <i>Momento 3-3</i> |
| -1968,940 | -511,540 | 37901,390 |
| <i>Inercia 2-2</i> | <i>Inercia 3-3</i> | |
| 328,553 | 617,313 | |
| <i>Mod Sec 2-2</i> | <i>Mod Sec 3-3</i> | |
| 65,711 | 82,308 | |
| DATOS DE LA SECCIÓN: | | |
| <i>Nombre:</i> | BOX00001 | |
| <i>Depth</i> | <i>Fl. width top</i> | <i>Fl. thick top</i> |
| 15 | 10 | 0,4 |
| <i>Web thick</i> | <i>Fl. width bottom</i> | <i>Fl. thick bottom</i> |
| 0,4 | 0 | 0 |
| ESTADO DE ESFUERZOS SEGÚN SAP EN 3D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esfuerzo z</i> |
| 0,00 | 0,00 | 503,70 |
| <i>Cortante xy</i> | <i>Cortante zx</i> | <i>Cortante yz</i> |
| 0,00 | 12,30 | -31,40 |
| <i>Esf Principal 1</i> | <i>Esf Principal 2</i> | <i>Esf Principal 3</i> |
| 0,00 | 505,95 | -2,25 |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON SAP: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo SAP</i> | <i>Error %</i> |
| 427,40 | 507,08 | 15,71 |

Cuadro 5.13 Informe 2 del ensayo con 1500Kg en el pórtico

| | | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| INFORME Nº | | 8 |
| CARGA DE PRUEBA: | | 1500 Kg |
| OBSERVACIONES: | | |
| Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| 0,000187 | 0,000106 | 0,000024 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| 0,000025 | 0,000187 | 0,000095 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| 180,546 | 434,624 | 74,653 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 454,935 | 160,235 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 399,68 | 511,70 | 21,89 |
| ESTADO DE FUERZAS DE LA SECCIÓN SEGÚN SAP: | | |
| <i>Nivel de análisis</i> | 12,24 cm | |
| <i>Fuerza axial</i> | <i>Cortante 2-2</i> | <i>Cortante 3-3</i> |
| 987,450 | 227,130 | -10,090 |
| <i>Torsión</i> | <i>Momento 2-2</i> | <i>Momento 3-3</i> |
| -1968,940 | -511,540 | 37901,390 |
| <i>Inercia 2-2</i> | <i>Inercia 3-3</i> | |
| 328,553 | 617,313 | |
| <i>Mod Sec 2-2</i> | <i>Mod Sec 3-3</i> | |
| 65,711 | 82,308 | |
| DATOS DE LA SECCIÓN: | | |
| <i>Nombre:</i> | BOX00001 | |
| <i>Depth</i> | <i>Fl. width top</i> | <i>Fl. thick top</i> |
| 15 | 10 | 0,4 |
| <i>Web thick</i> | <i>Fl. width bottom</i> | <i>Fl. thick bottom</i> |
| 0,4 | 0 | 0 |
| ESTADO DE ESFUERZOS SEGÚN SAP EN 3D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esfuerzo z</i> |
| 0,00 | 0,00 | 503,70 |
| <i>Cortante xy</i> | <i>Cortante zx</i> | <i>Cortante yz</i> |
| 0,00 | 12,30 | -31,40 |
| <i>Esf Principal 1</i> | <i>Esf Principal 2</i> | <i>Esf Principal 3</i> |
| 0,00 | 505,95 | -2,25 |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON SAP: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo SAP</i> | <i>Error %</i> |
| 399,68 | 507,08 | 21,18 |

Cuadro 5.14 Informe 1 del ensayo con 2000Kg en el pórtico

| | | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| INFORME N° | | 9 |
| CARGA DE PRUEBA: | | 2000 Kg |
| OBSERVACIONES: | | |
| Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| 0,000265 | 0,000134 | 0,000085 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| 0,000057 | 0,000265 | 0,000057 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| 306,211 | 631,268 | 44,527 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 637,257 | 300,222 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 552,19 | 681,80 | 19,01 |
| ESTADO DE FUERZAS DE LA SECCIÓN SEGÚN SAP: | | |
| <i>Nivel de análisis</i> | 12,24 cm | |
| <i>Fuerza axial</i> | <i>Cortante 2-2</i> | <i>Cortante 3-3</i> |
| 1316,600 | 303,220 | -13,450 |
| <i>Torsión</i> | <i>Momento 2-2</i> | <i>Momento 3-3</i> |
| -2628,630 | -682,050 | 50600,300 |
| <i>Inercia 2-2</i> | <i>Inercia 3-3</i> | |
| 328,553 | 617,313 | |
| <i>Mod Sec 2-2</i> | <i>Mod Sec 3-3</i> | |
| 65,711 | 82,308 | |
| DATOS DE LA SECCIÓN: | | |
| <i>Nombre:</i> | BOX00001 | |
| <i>Depth</i> | <i>Fl. width top</i> | <i>Fl. thick top</i> |
| 15 | 10 | 0,4 |
| <i>Web thick</i> | <i>Fl. width bottom</i> | <i>Fl. thick bottom</i> |
| 0,4 | 0 | 0 |
| ESTADO DE ESFUERZOS SEGÚN SAP EN 3D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esfuerzo z</i> |
| 0,00 | 0,00 | 672,40 |
| <i>Cortante xy</i> | <i>Cortante zx</i> | <i>Cortante yz</i> |
| 0,00 | 16,41 | -41,90 |
| <i>Esf Principal 1</i> | <i>Esf Principal 2</i> | <i>Esf Principal 3</i> |
| 0,00 | 675,40 | -3,00 |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON SAP: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo SAP</i> | <i>Error %</i> |
| 552,19 | 676,90 | 18,42 |

Cuadro 5.15 Informe 2 del ensayo con 2000Kg en el pórtico

| | | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| INFORME Nº | | 10 |
| CARGA DE PRUEBA: | | 2000 Kg |
| OBSERVACIONES: | | |
| Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| 0,000281 | 0,000138 | 0,000085 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| 0,000055 | 0,000281 | 0,000061 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| 312,110 | 665,962 | 48,001 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 672,357 | 305,714 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 583,08 | 681,80 | 14,48 |
| ESTADO DE FUERZAS DE LA SECCIÓN SEGÚN SAP: | | |
| <i>Nivel de análisis</i> de | | |
| <i>Fuerza axial</i> | <i>Cortante 2-2</i> | <i>Cortante 3-3</i> |
| 1316,600 | 303,220 | -13,450 |
| <i>Torsión</i> | <i>Momento 2-2</i> | <i>Momento 3-3</i> |
| -2628,630 | -682,050 | 50600,300 |
| <i>Inercia 2-2</i> | <i>Inercia 3-3</i> | |
| 328,553 | 617,313 | |
| <i>Mod Sec 2-2</i> | <i>Mod Sec 3-3</i> | |
| 65,711 | 82,308 | |
| DATOS DE LA SECCIÓN: | | |
| <i>Nombre:</i> | BOX00001 | |
| <i>Depth</i> | <i>Fl. width top</i> | <i>Fl. thick top</i> |
| 15 | 10 | 0,4 |
| <i>Web thick</i> | <i>Fl. width bottom</i> | <i>Fl. thick bottom</i> |
| 0,4 | 0 | 0 |
| ESTADO DE ESFUERZOS SEGÚN SAP EN 3D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esfuerzo z</i> |
| 0,00 | 0,00 | 672,40 |
| <i>Cortante xy</i> | <i>Cortante zx</i> | <i>Cortante yz</i> |
| 0,00 | 16,40 | -41,90 |
| <i>Esf Principal 1</i> | <i>Esf Principal 2</i> | <i>Esf Principal 3</i> |
| 0,00 | 675,40 | -3,00 |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON SAP: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo SAP</i> | <i>Error %</i> |
| 583,08 | 676,90 | 13,86 |

Cuadro 5.16 Informe 1 del ensayo con 2500Kg en el pórtico

| | | |
|--|-------------------------|-------------------------|
| INFORME Nº | | 11 |
| CARGA DE PRUEBA: | | |
| _____ Kg | | 2500 Kg |
| OBSERVACIONES: | | |
| Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| 0,000325 | 0,000195 | 0,000107 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| 0,000093 | 0,000325 | 0,000101 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| 426,523 | 789,970 | 79,021 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 806,407 | 410,086 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 698,40 | 853,70 | 18,19 |
| ESTADO DE FUERZAS DE LA SECCIÓN SEGÚN SAP: | | |
| <i>Nivel de análisis</i> | | 12,24 cm |
| <i>Fuerza axial</i> | <i>Cortante 2-2</i> | <i>Cortante 3-3</i> |
| 1645,750 | 378,740 | -16,810 |
| <i>Torsión</i> | <i>Momento 2-2</i> | <i>Momento 3-3</i> |
| -3283,250 | -852,570 | 63201,540 |
| <i>Inercia 2-2</i> | <i>Inercia 3-3</i> | |
| 328,553 | 617,313 | |
| <i>Mod Sec 2-2</i> | <i>Mod Sec 3-3</i> | |
| 65,711 | 82,308 | |
| DATOS DE LA SECCIÓN: | | |
| <i>Nombre:</i> | | BOX00001 |
| <i>Depth</i> | <i>Fl. width top</i> | <i>Fl. thick top</i> |
| 15 | 10 | 0,4 |
| <i>Web thick</i> | <i>Fl. width bottom</i> | <i>Fl. thick bottom</i> |
| 0,4 | 0 | 0 |
| ESTADO DE ESFUERZOS SEGÚN SAP EN 3D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esfuerzo z</i> |
| 0,00 | 0,00 | 839,90 |
| <i>Cortante xy</i> | <i>Cortante zx</i> | <i>Cortante yz</i> |
| 0,00 | 20,50 | -52,40 |
| <i>Esf Principal 1</i> | <i>Esf Principal 2</i> | <i>Esf Principal 3</i> |
| 0,00 | 843,65 | -3,75 |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON SAP: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo SAP</i> | <i>Error %</i> |
| 698,40 | 845,54 | 17,40 |

Cuadro 5.17 Informe 2 del ensayo con 2500Kg en el pórtico

| | | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| INFORME Nº | | 12 |
| CARGA DE PRUEBA: | | 2500 Kg |
| OBSERVACIONES: | | |
| Unidades son Kgf-cm | | |
| DEFORMACIONES UNITARIAS: | | |
| <i>Def Unit a</i> | <i>Def Unit b</i> | <i>Def Unit c</i> |
| 0,000356 | 0,000204 | 0,000095 |
| <i>Def Unit x</i> | <i>Def Unit y</i> | <i>Def Unit z</i> |
| 0,00008 | 0,000356 | 0,000126 |
| ESTADO DE ESFUERZOS EXPERIMENTALES 2D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esf Cort xy</i> |
| 419,535 | 851,868 | 98,973 |
| <i>Esf Prin 1</i> | <i>Esf Prin 2</i> | |
| 873,449 | 397,954 | |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON COSMOS: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo VM</i> | <i>Error %</i> |
| 757,42 | 853,70 | 11,28 |
| ESTADO DE FUERZAS DE LA SECCIÓN SEGÚN SAP: | | |
| <i>Nivel de análisis</i> de | | |
| <i>Fuerza axial</i> | <i>Cortante 2-2</i> | <i>Cortante 3-3</i> |
| 1645,750 | 378,740 | -16,810 |
| <i>Torsión</i> | <i>Momento 2-2</i> | <i>Momento 3-3</i> |
| -3283,250 | -852,570 | 63201,540 |
| <i>Inercia 2-2</i> | <i>Inercia 3-3</i> | |
| 328,553 | 617,313 | |
| <i>Mod Sec 2-2</i> | <i>Mod Sec 3-3</i> | |
| 65,711 | 82,308 | |
| DATOS DE LA SECCIÓN: | | |
| <i>Nombre:</i> | BOX00001 | |
| <i>Depth</i> | <i>Fl. width top</i> | <i>Fl. thick top</i> |
| 15 | 10 | 0,4 |
| <i>Web thick</i> | <i>Fl. width bottom</i> | <i>Fl. thick bottom</i> |
| 0,4 | 0 | 0 |
| ESTADO DE ESFUERZOS SEGÚN SAP EN 3D: | | |
| <i>Esfuerzo x</i> | <i>Esfuerzo y</i> | <i>Esfuerzo z</i> |
| 0,00 | 0,00 | 839,90 |
| <i>Cortante xy</i> | <i>Cortante zx</i> | <i>Cortante yz</i> |
| 0,00 | 20,50 | -52,40 |
| <i>Esf Principal 1</i> | <i>Esf Principal 2</i> | <i>Esf Principal 3</i> |
| 0,00 | 843,65 | -3,75 |
| COMPARACIÓN DE ESFUERZOS CON SAP: | | |
| <i>Esfuerzo Eq</i> | <i>Esfuerzo SAP</i> | <i>Error %</i> |
| 757,42 | 845,54 | 10,42 |

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN A OTROS SISTEMAS

6.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

6.1.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se ha explicado ampliamente el tipo de sistema a utilizarse en el pórtico del vibróforo de baja frecuencia del LRM, en este capítulo se procederá a determinar cuales podrían ser las ventajas y desventajas de dicha utilización, se determinará cuales son las limitaciones de utilización para este sistema y se comparará dicho sistema con sistemas similares que se pueden encontrar en el mercado. Para esto primero se hace necesario determinar algunas de las condiciones bajo las cuales se ha trabajado, estas condiciones son particulares pero se las ha tratado de que dichas condiciones particulares simulen de la mejor manera un caso real.

Tomando en cuenta lo anteriormente dicho se tienen las siguientes consideraciones:

- El pórtico del vibróforo de baja frecuencia del LRM fue modificado con el fin de obtener una combinación de esfuerzos general, se notó que en la columna crítica se obtuvieron esfuerzos axiales, flectores, y cortantes, de manera general esfuerzos que son observados en la gran mayoría de elementos estructurales.
- La carga aplicada al pórtico en las pruebas fue muy alta en relación a la carga que admite el mismo, es decir se trabajó por encima del límite demanda-capacidad que generalmente se trabaja cuando se diseñan y construyen estructuras metálicas.
- Se consideraron cargas tanto vivas como muertas, cargas siempre existentes en estructuras, pero se omitieron cargas tales como viento, nieve, terremoto, etc. esto debido a que dichas cargas son particulares de cada estructura, pero dichas cargas pueden ser fácilmente

calculables mediante métodos descritos en diferentes libros, y códigos tales como el AISC-ASD89, y definidos en SAP2000 de manera muy fácil.

- El cálculo estructural del pórtico fue realizado tanto en SAP2000 como en Cosmos Works, este último nos dio el punto en donde se colocaría la roseta.
- El sistema de control que consta de un computador, el programa de comparación, los paquetes computacionales (SAP2000, Solid Works, Cosmos Works) y el sistema de adquisición de datos que fue desarrollado para un pequeño número de galgas, por lo cual su costo no fue muy elevado.
- Se posee un pistón hidráulico el cual ejerce la carga sobre el pórtico de manera controlada.
- Se simplificó el cálculo del pórtico, se omitió el peso del pistón hidráulico, se omitió la existencia de una viga rectangular en la viga que porta el pistón, se desprecia el peso de los accesorios.

Tomando en cuenta lo anteriormente descrito a continuación se presentan las ventajas y desventajas de utilizar un sistema de estas características:

6.1.2 VENTAJAS

- El diagnóstico que se realiza a la estructura es muy bueno puesto que se trabaja con datos reales obtenidos de las rosetas de deformación.
- El tiempo de toma de datos es muy pequeño gracias a que la computadora procesa la información de manera muy rápida.

- Si bien el programa realizado en LabView fue concebido para un número pequeño de galgas, este puede ser fácilmente ampliado o la medición de cada roseta de deformación puede ser realizada de manera individual.
- El costo de un sistema de esta clase es muy pequeño comparado con el costo de fabricación de las estructuras metálicas.
- Los datos calculados tienen un soporte técnico es decir se tienen patrones de comparación numéricos.
- El sistema es compacto fácil de transportar y de instalación rápida.
- La utilización de este sistema es simple, no se necesitan conocimientos avanzados para utilizarlo.
- El sistema es totalmente automático, el operario no necesita realizar ningún cálculo a mano si se usa Solid Works y Cosmos Works, todos los cálculos son realizados por una computadora, si se trabaja con SAP2000 solo se deben introducir el estado de esfuerzos en el punto a analizarse.
- No existen sistemas similares en el mercado ecuatoriano por lo cual es un sistema nuevo que provee de ventajas competitivas a las empresas que lo usan.
- Es un sistema de gran valor didáctico puesto que los estudiantes observan el trabajo de una estructura real y además son capaces de obtener datos precisos y confiables mediante paquetes computacionales conocidos por ellos.

6.1.3 DESVENTAJAS

- No es aplicable a todas las estructuras metálicas, posee un rango de utilización determinado por factores tales como tamaño y comportamiento de la estructura.
- Las licencias de los programas computacionales usados son costosas y solamente algunas empresas las tienen.
- Muchas empresas ecuatorianas no realizan pruebas de este tipo ante la falta de una normativa la cual obligue a hacerlo.
- El programa computacional esta diseñado para elementos estructurales tales como vigas o columnas, no se consideran elementos de unión tales como pernos, soldadura, remaches, etc.
- Existe un rechazo por parte de los profesionales un el campo de la construcción hacia el uso de programas computacionales de cálculo por lo que podría existir un rechazo hacia sistemas basados en ellos.
- Existe una ignorancia tecnología en el Ecuador, lo cual podría influir en una desconfianza hacia sistemas como este o similares a este.

6.2 LIMITACIONES A ESTRUCTURAS DE GRAN TAMAÑO

Como se mencionó anteriormente el sistema diseñado tiene algunas limitaciones que de manera general se las podría catalogar como limitaciones de tamaño. Estas limitaciones de tamaño aparecen debido a que generalmente estructuras de gran tamaño sugiere también estructuras con gran número de elementos.

El pórtico del vibróforo del LRM posee 3 elementos principales: una viga la cual porta al pistón hidráulico, y 2 columnas. Al momento de realizar el análisis estructural se lo realizó en 2 paquetes computacionales SAP2000 y Cosmos

Works. SAP2000 trabaja con un número grande de elementos pero la división en elementos diferenciales para cada uno de estos elementos es muy deficiente para nuestro propósito, por otro lado Cosmos Works el cual trabaja bajo la interfase Solid Works permite realizar dicha división de manera acertada pero el procesamiento de datos es lento debido a la cantidad de elementos diferenciales. Tomando en cuenta esto a mayor número de elementos mayor tiempo de procesamiento, además se crea la necesidad de la obtención de supercomputadores con procesadores más rápidos y también más costosos. Analizando las ventajas que tiene este sistema entre las cuales como ya detallamos antes son rapidez y bajo precio sería absurdo suponer la disposición de semanas y de mucho dinero para llevar a cado este estudio. Este primer factor limita el tamaño de la estructura o limita la precisión de los datos a obtenerse.

Otro factor importante esta estrechamente ligado a la función que desempeñan las estructuras metálicas puesto que algunas de ellas están principalmente diseñadas para soportar su peso propio, tal es el caso de casas, edificios, galpones, etc. en estas la función principal de la estructura es sostenerse a si misma, por otro lado existen otro tipo de estructuras las cuales soportan cargas externas que son mas importantes tal es el caso de los puentes, sistemas de movilización de cargas mas conocidos como puentes grúas, etc. en estas estructuras la carga exterior es tan grande que el peso propio se lo puede despreciar.

En el estudio que se realizó en el pórtico del vibróforo de baja frecuencia se despreció el peso propio de la estructura y las deformaciones medidas por las rosetas de deformación fueron exclusivamente provocadas por la carga ejercida por el pistón hidráulico, así pues si se quiere extender el estudio a otras estructuras se deberá tomar en cuenta este particular y solo se podrá usar este sistema en estructuras en donde el peso propio no sea influyente en el desempeño de la estructura o se deberá tomar en cuenta estas consideraciones para no obtener datos erróneos.

Se concluyó por lo tanto que la aplicación está restringida a estructuras de gran tamaño y que por ahora el sistema solamente funcionará para estructuras relativamente pequeñas dependiendo de la precisión que se necesite y del tiempo que se disponga. Las limitaciones están estrechamente ligadas a las condiciones bajo las cuales trabajó el pórtico durante la realización de este proyecto por lo tanto dicho sistema podrá ser utilizado en estructuras en las cuales se tengan las mismas condiciones o en sistemas en donde las condiciones se asemejen a las creadas para el desarrollo de este proyecto de tesis.

6.3 COMPARACIÓN CON OTROS SISTEMAS SEMEJANTES

6.3.1 INTRODUCCIÓN

Existen en la actualidad principalmente en los países desarrollados empresas enteras dedicadas al mantenimiento y estudio del comportamiento de estructuras tanto de hormigón como estructuras metálicas, dichas empresas dan asesoramiento tanto para estructuras construidas como para estructuras las cuales están en construcción, para dicho propósito estas empresas disponen de sistemas basados en tecnología de punta con lo cual aseguran a sus clientes datos reales y confiables los cuales ayudarán a emitir un diagnóstico acertado al momento de determinar el estado de una estructura.

Dichas empresas han acumulado gran experiencia en la elaboración de dichos diagnósticos y poseen a su haber gran cantidad de proyectos elaborados con resultados satisfactorios.

Existen gran cantidad de instrumentos los cuales pueden ser usados para este propósito entre ellos se tiene: acelerómetros, medidores de corrosión, medidores de humedad, transductores magnéticos para la medición de desplazamientos, galgas o bandas extensiométricas, he inclusive equipo láser especializado. Cada uno de estos equipos es utilizado para un propósito en particular gracias a esto se crean técnicas complementarias las cuales ayudan a monitorear el buen funcionamiento de un estructura de manera global.

A continuación se mencionan brevemente algunos de los sistemas semejantes al desarrollado en esta tesis para el monitoreo de estructuras metálicas:

6.3.2 SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

El **sistema de instrumentación sísmica** es principalmente usado en lugares con riesgo sísmico para el monitoreo del efecto de las cargas dinámicas en edificios, casas y estructuras en general.

La idea de desarrollar un sistema de esta naturaleza es alertar a los ocupantes del inmueble del peligro que resultaría mantenerse dentro del mismo, además de obtener un registro histórico del comportamiento del inmueble ante las cargas sísmicas y su desarrollo a lo largo del tiempo con el fin de prever o reparar daños.

Para esto se posee un sistema conformado básicamente por los siguientes elementos:

- Sensor capaz de medir aceleraciones (acelerómetro).
- Tarjeta de adquisición de datos.
- Digitalizador
- Computador

De manera general el proceso se inicia con la instalación de los sensores en la estructura, luego los datos son obtenidos y procesados por la tarjeta de adquisición de datos, estos datos son enviados al computador gracias al digitalizador y por último grabados en el computador. En el computador existe un programa especialmente diseñado para el análisis de este tipo de datos el cual los procesa y entrega la información necesaria para la interpretación.

Es importante mencionar que el sistema no funciona todo el tiempo sino es activado bajo parámetros especiales por ejemplo en ciudad de México existe implementado un sistema de estas características por la empresa Cires el cual

se activa siempre que los acelerómetros detectan un sismo mayor a 5 grados o cuando lo activa manualmente mediante una señal de radio el instituto mexicano de sismología.

De manera general se nota que este sistema trabaja de manera muy similar al propuesto en este trabajo de tesis con la diferencia que la variable a medir para este caso no es deformación. Se nota también que los componentes más importantes de este sistema son los mismos sensores, tarjeta de adquisición de datos, computador y programa computacional o software.

En la figura 6.1 se puede observar el sistema de instrumentación sísmica proporcionado por la empresa CIRES con todos sus elementos.

Se nota claramente una semejanza entre este sistema y el desarrollado en el presente proyecto de tesis puesto que mediante los dos es posible monitorear el comportamiento de una estructura bajo el efecto de una carga. Cabe mencionar que la diferencia radica en que este sistema es desarrollado para medir cargas sísmicas ya sea en estructuras de hormigón, metal, madera, mientras que en el proyecto de tesis se trabaja midiendo la deformación unitaria creada por la aplicación de una carga viva en una estructura de acero.



Figura 6.1 El sistema de instrumentación sísmica de la empresa CIRES.³⁵

³⁵ www.cires.org.mx/es_racm_main.php4, sistema de instrumentación sísmica, Español, 2002

6.3.3 SISTEMA DE MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

El **sistema de medición de la velocidad de corrosión** es usado puesto que la vida útil de muchas estructuras es afectada por la corrosión, los elementos de una estructura se corroen resultando esto en una disminución de área, y pérdida de adherencia de sus partes. Por esta razón, algunas empresas están dedicadas a la realización de ensayos para hallar la velocidad de corrosión en una estructura y de esta manera determinar si dichas estructuras tienen el recubrimiento necesario.

La medición de la velocidad de corrosión es un procedimiento cuantitativo el cual nos entrega un valor de velocidad de corrosión, este valor es el más probable aunque claro esta depende de otros factores imposibles de ponderar.

Para este objetivo son necesarios en general los siguientes elementos:

- Medidor de velocidad de corrosión (corrosímetro).
- Computadora (No indispensable).

El funcionamiento de este sistema es muy simple, las medidas de la velocidad de corrosión son directas y por lo general la señal es acondicionada en el propio corrosímetro por lo cual no es necesario una tarjeta de acondicionamiento de señal además la gran mayoría de estos instrumentos poseen la capacidad de conexión a un computador el cual solamente guardará los datos, es importante señalar que los sensores son parte del aparato, es decir posee todos los elementos necesarios y además es de bajo peso y tamaño.

En la figura 6.2 se muestra un corrosímetro utilizado por la empresa GEOCISA



Figura 6.2 Corrosímetro con su respectivo sensor.³⁶

El uso del corrosímetro es otro sistema para la verificación y monitoreo de las estructuras, este en particular tiene muy pocas semejanzas con el desarrollado en el presente proyecto ya que el sensor, y el acondicionador de señal son un mismo aparato, pero en esencia se habla de un mismo funcionamiento básico, para este caso la magnitud a medirse es la velocidad de corrosión o la intensidad de corrosión y es muy aplicable en estructuras de hormigón en las cuales la corrosión es mucho mas notable que en una estructura de acero.

6.3.4 MEDIDORES LÁSER DE DESPLAZAMIENTO Y VELOCIDAD

Los **medidores láser de desplazamiento y velocidad** son también un sistema de monitoreo del estado de una estructura de manera general son usados para la determinación del desplazamiento o la velocidad de un punto en una estructura sin necesidad de contacto físico, esta característica le da una gran ventaja sobre otros sistemas en puntos en la estructura inaccesibles. Este sistema posee los mismos elementos básicos tales como:

- Sensor (pasivo y activo).
- Sistema de adquisición de datos.
- Computador.

³⁶ www.geocisa.com/ingteyes/gecoramp_2.htm, Corrosímetro, Español, 2002

De esta manera y gracias a un programa computacional se logra determinar los desplazamientos y velocidades permisibles para los puntos seleccionados de las estructuras.

Se menciona el término de sensor activo y pasivo puesto que el sensor activo es el cual genera el haz de luz mientras que el pasivo es una lámina reflectante.

En la figura 6.3 se pueden observar el sistema láser para la medición de la velocidad utilizado por la empresa GEOCISA:



Figura 6.3 Medidor láser para velocidades y desplazamientos.³⁷

En este sistema la variable a medirse es la velocidad y el desplazamiento de los puntos pertenecientes a una estructura, de manera general posee los elementos comunes, sensores, tarjeta de adquisición de datos y los cálculos son realizados por un computador. En comparación con el sistema implementado en el laboratorio se puede decir que es muy semejante en su concepción con la gran ventaja de que este sistema permite realizar mediciones sin necesidad de contacto físico lo que representa una gran ventaja.

³⁷ www.geocisa.com/ingteyes/ensasitu_2.htm#inicio, Sistema láser para la medición de desplazamientos, Español, 2002

Existen además sistemas en los cuales son utilizadas bandas o galgas extensiométricas para la medición de deformaciones unitarias con una precisión de al menos 10^{-6} al igual que el sistema desarrollado en este proyecto la diferencia radica en el costo económico de dichas pruebas y en la precisión de los datos puesto que en la concepción los criterios son muy semejantes así como también los elementos usados para la implementación. En la figura 6.4 se muestra la medición de las deformaciones en un puente utilizando un LVTD (Transformador diferencial de voltaje lineal).



Figura 6.4 Medición en un puente por medio de LVTD's.³⁸

³⁸ http://www.geocisa.com/ingteyes/hojas/pcarga14_amp_2.htm, medidas de flecha mediante LVTD's, Español, 2002

En la tabla 6.1 se muestran las principales características de los sistemas antes expuestos en comparación con el desarrollado en el presente proyecto de tesis.

Tabla 6.1 Comparación entre los sistemas hallados y el desarrollado en el LRM.

| Sistemas de Medición y monitoreo | Costo | Disponibilidad | Manejo de Información | Aplicabilidad | Promedio |
|--|--------------|-----------------------|------------------------------|----------------------|-----------------|
| Sistema de Instrumentación sísmica | 3.00 | 3.00 | 9.00 | 7.00 | 5.50 |
| Sistemas para la medición de velocidad de corrosión | 4.00 | 6.00 | 9.00 | 9.00 | 7.00 |
| Medidor láser de desplazamiento y velocidad | 1.00 | 3.00 | 9.00 | 8.00 | 5.25 |
| Medidor de deformaciones con LVTD | 3.00 | 7.00 | 9.00 | 7.00 | 6.50 |
| Sistema implementado en el LRM | 10.00 | 10.00 | 7.00 | 7.00 | 8.50 |

En donde 1 es muy malo y 9 es muy bueno.

6.4 APLICACIÓN DEL SISTEMA A UNA NAVE INDUSTRIAL

6.4.1 INTRODUCCIÓN

La aplicación del sistema antes mencionado es la parte medular del presente proyecto de tesis puesto que el objetivo general es aplicar este sistema de verificación de estructuras a una estructura real y bajo condiciones de carga real, es por esto que se detallará la manera en la que se debe aplicar dicho sistema, para esto se utilizará el diseño de una nave industrial real, en dicha estructura se pueden encontrar gran cantidad de elementos por lo cual nuestro análisis es general y puede dar una idea acertada del método, el cual se deberá llevar a cabo con todas las particularidades. Si bien es cierto cada estructura es un caso muy particular a continuación se nombran algunas consideraciones gracias a las cuales se espera dar a entender la metodología de aplicación de este sistema, de manera general se empieza con un rediseño de la estructura, para luego realizar la debida verificación de la misma ayudándonos con nuestro sistema de verificación.

Finalmente se procederá a la creación del informe el cual será entregado al cliente, en dicho informe se detallará toda la información relacionada con las pruebas para por último elaborar un plan de cambios si fuese necesario.

6.4.2 REDISEÑO DE LA ESTRUCTURA

En una estructura ya construida es importante conocer las condiciones de diseño, puesto que el diseño de una estructura es particular de cada diseñador, por esta razón existe información que necesariamente debe ser obtenida antes de realizar cualquier proceso de verificación, primeramente es necesario conocer la geometría de la estructura la cual está dada por los planos de detalle y de construcción, luego se deberá saber si la estructura está diseñada bajo algún código o reglamento de diseño, y además se deben conocer las condiciones de diseño tales como en el caso de la AISC-ASD89 son: factores de flexión y longitud, posición y magnitud de cargas estados de combinación de cargas, restricciones de paso de fuerza, etc.

Una vez obtenida dicha información se procederá a escoger el programa computacional a usarse para la comparación, para luego introducir dicha información en este.

Para el caso particular de la nave industrial se nota claramente que se trata de una estructura muy grande con muchos pórticos tipo, con muchas secciones y con muchas consideraciones especiales, por esta razón se procedió a elegir como el programa a ser utilizado SAP2000, la información acerca del diseño fue introducida al mismo y se logró obtener un archivo en donde se sintetiza toda la información relacionada con el diseño.

En la figura 6.5 se puede notar la geometría de la estructura en estudio, los datos están introducidos en SAP2000.

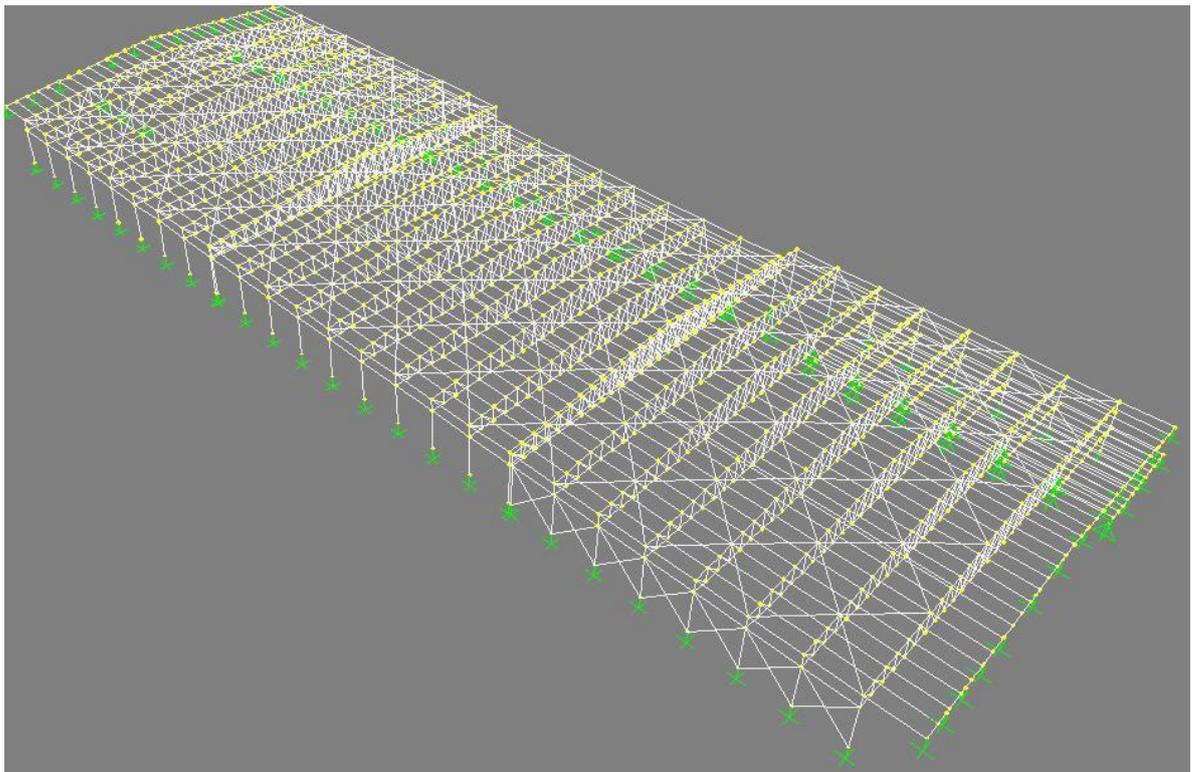


Figura 6.5 Estructura a ser verificada en SAP2000.

Además de la geometría esta estructura trabaja con ciertas cargas tales como son: peso del techo, peso propio, carga de viento, carga por lluvia etc. En la figura 6.6 muestra la posición de algunas se estas cargas en la estructura.

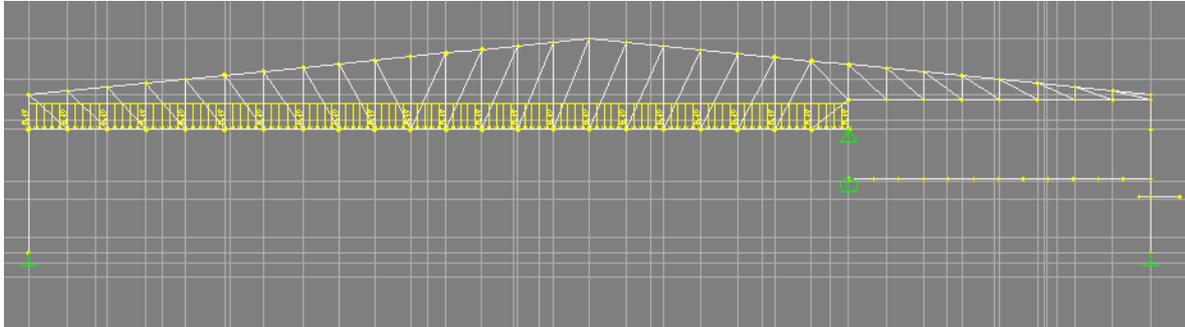
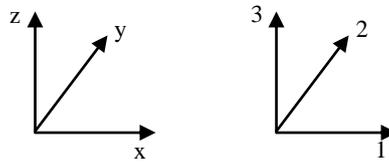


Figura 6.6 Cargas presentes en la estructura en estudio.

Además existen consideraciones especiales que se deben tomar en cuenta en esta estructura tales como:

1. Las Unidades de las cargas son Kgf-m.
2. Las reacciones son del apoyo hacia la estructura.
3. El mayor valor de reacción está indicado por la palabra “mayor” a su derecha.
4. Nomenclatura de los apoyos designada en SAP.
5. Apoyo A restringe todos los movimientos y todos los momentos, es de tipo empotrado.
6. Apoyo B restringe movimientos en Y y en Z, y rotación alrededor del eje Z (torsión o M_z).
7. Apoyo C restringe movimientos en X, Y y Z, y rotación alrededor del eje Z (torsión o M_z).
8. Apoyo D restringe todos los movimientos y todos los momentos, es de tipo empotrado.
9. Apoyo E restringe movimientos en Y y en Z.
10. A las pantallas están empotradas vigas tipo C a las que llegan todas las correas simplemente apoyadas, es decir, hay releases de fuerza en Y y en X, y de momento alrededor de los ejes X, Y y Z para las correas.

11. En el SAP el eje X se denomina 1, el Y se denomina 2 y el eje Z se denomina 3.



12. En la parte superior de la columna empotrada en A hay releases de fuerza en eje X y de momento alrededor del eje Y.

13. La columna que se apoya en D no tiene releases en su parte superior (unión a cercha).

14. Existe 6 pórticos tipo 1 en los ejes: 5-6-7-8-9 y 22.

15. Existe 3 pórticos tipo 2 en los ejes: 2-3-4.

16. Existe 8 pórticos tipo 3 en los ejes: 12-13-14-15-16-17-18-19.

17. Existe 4 pórticos tipo 4 en los ejes: 24-25-26-27.

18. Existe 2 pórticos tipo 4* en los ejes: 23-28, este tipo se diferencia del tipo 4 porque su apoyo en D se encuentra 60cm más arriba que el del tipo 4.

19. Existe 2 pórticos tipo 1J en los ejes: 10-21 de la junta.

20. Existe 2 pórticos tipo 2J en el eje: 11-20 de la junta.

21. Existe 1 pórtico tipo PA en el eje: 29, este pórtico al igual que el PB consiste en una C empotrada en la pantalla a la cual llegan todas las correas de la estructura, que están simplemente apoyadas en la C (ver nota 10).

22. Existe 1 pórtico tipo PB en el eje: 1.

23. La loza de administración se encuentra sobre el apoyo E de la columna de hormigón y empotrada a la columna de acero empotrada en D.

24. Los apoyos B, C y E están sobre columnas de concreto.

25. La estructura tiene las siguientes cargas:

- Panel 10kg/m²
- Tubería 2kg/m²
- Cubierta 5kg/m²

- Puntuales de 1000kg en la parte baja de la cercha en $X=3.1428m, 15.3014m$ y 26.9187
- El peso propio es calculado por el SAP para cada pórtico y tiene un promedio de $18.3kg/m^2$.
- La carga viva sobre la cercha (lluvia, granizo) es de $60kg/m^2$
- La carga muerta de la loza de administración es de $1750kg/m$ (Novaloza)
- La carga viva en la loza de administración es de $1250kg/m$ más una carga puntual en el centro de la viga de $1000kg$.
- La carga muerta de la visera de administración es de $2000kg/m$ (Loza aliviada)
- La carga viva en la visera de administración es de $980kg/m$
- La carga de viento es de $279.38kg/m$ a barlovento y sotavento (No se considera viento en la cubierta por su baja pendiente). Las columnas sobre el eje A no se cargan con viento puesto que la fuerza se transmite directamente a la cercha (Debido al diseño).
- La carga sobre los pórticos que se encuentran en las juntas de los ejes 10-11-20-21 son el 50% de las demás pues su área colaborante es la mitad de las otras.

En la figura 6.7 se detallan además los diferentes tipos de pórticos existentes en esta estructura.

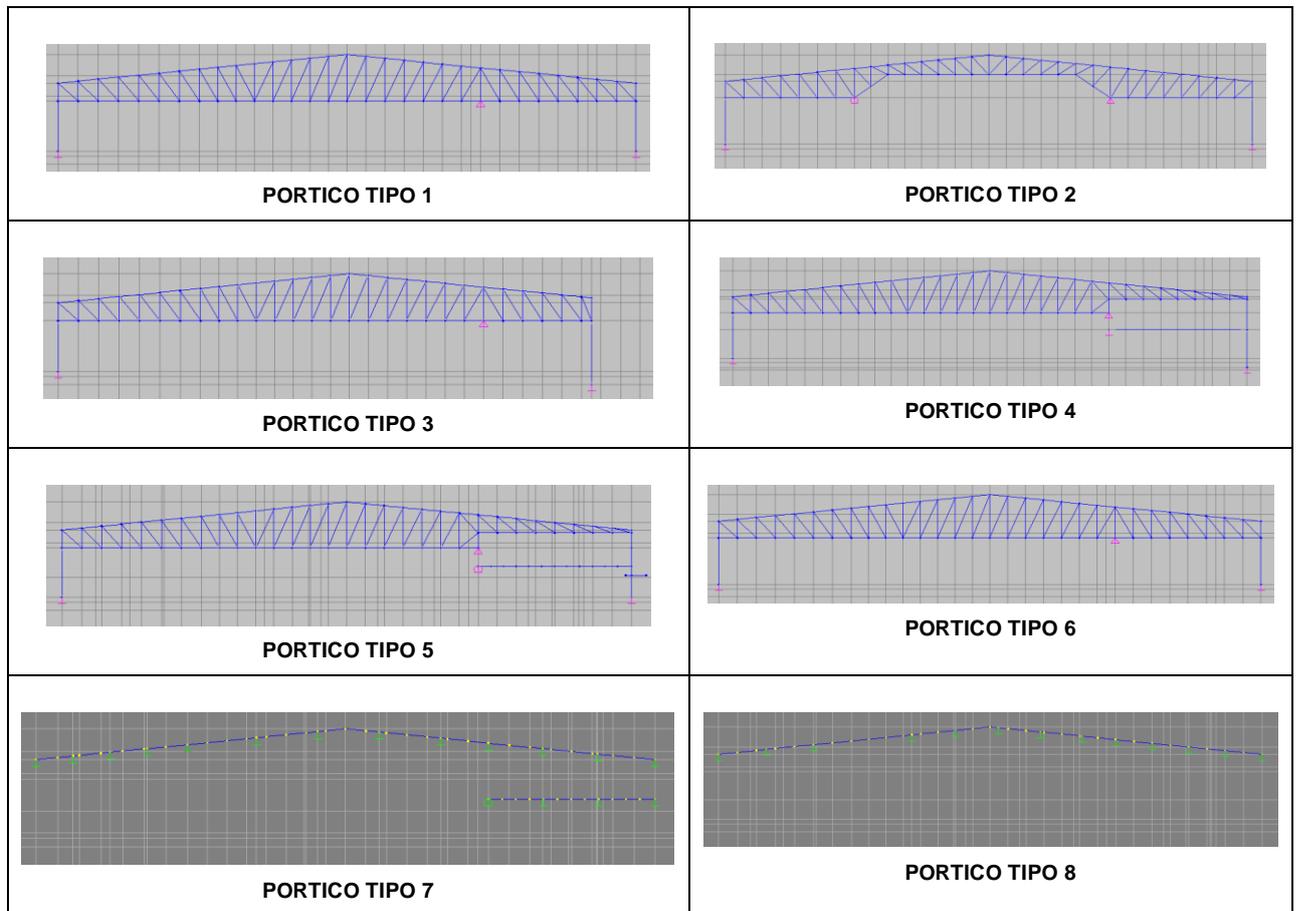


Figura 6.7 Detalle de las cargas presentes en la estructura en estudio.

Además de esto es necesario el detalle de todos los factores de diseño, en la figura 6.8 y 6.9 se puede observar algunos de dichos factores así como ciertas restricciones de paso de fuerza a manera de ejemplo para un grupo de elementos de dicha estructura.

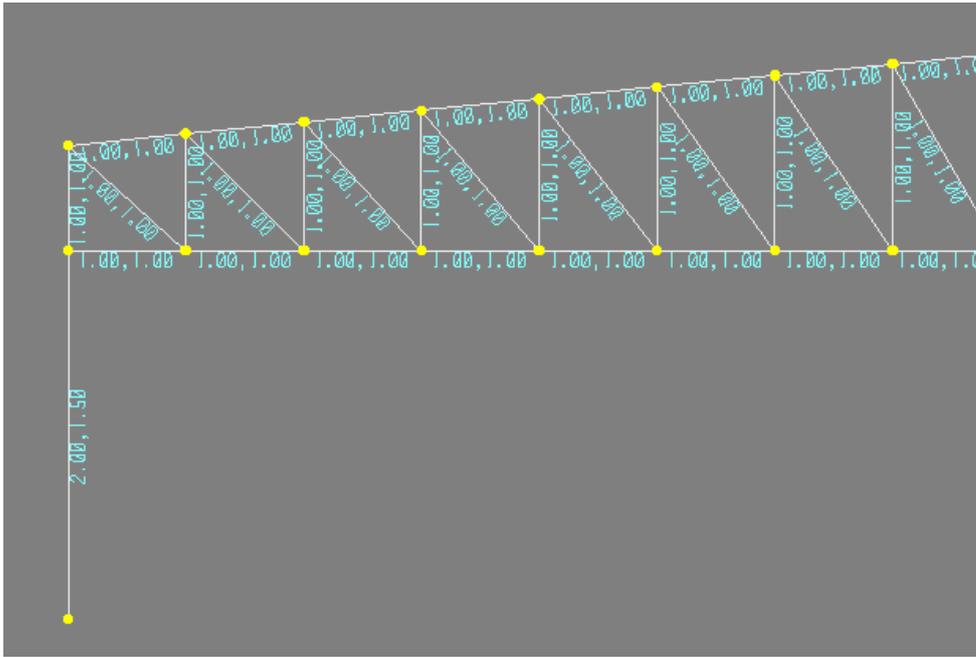


Figura 6.8 Factores de longitud para una parte de la estructura en estudio.

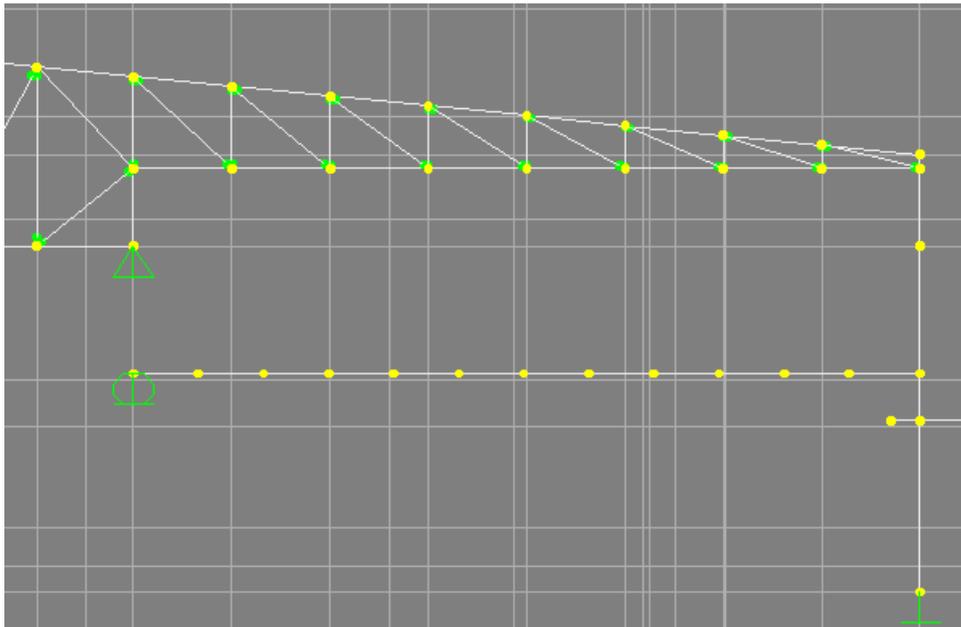


Figura 6.9 Restricciones para el paso de fuerzas.

En conclusión se obtuvo toda la información que fue necesaria para el diseño, y se la introdujo en el programa computacional a usarse en este caso SAP2000, luego es necesario realizar una corrida en SAP2000 y comprobar que los factores demanda-capacidad no excedan la unidad, esto como un método de seguridad, paso previo antes de continuar con la verificación.

Se ha llamado a esta etapa de rediseño porque es posible que en alguna estructura no se posean las memorias de cálculo y por lo tanto será necesario realizar un nuevo diseño y trabajar en base a este, claro está que en dicho diseño se tomarán en cuenta los elementos utilizados y demás consideraciones geométricas y estructurales, además las condiciones de carga deberán ser redefinidas.

Luego de la corrida realizada en SAP2000 se obtuvieron elementos críticos, se los llamará de esta manera puesto que fueron en los cuales se obtuvo el valor de demanda-capacidad más alto. Gracias a este estudio se determinó que existen 8 tipos de pórticos y se debería realizar un análisis independiente de cada uno de ellos siguiendo este criterio del elemento crítico, es decir observar y escoger en cada uno de los pórticos tipo el elemento crítico y analizarlo.

6.4.3 VERIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Para la verificación de la estructura será necesario definir una carga de prueba la cual será colocada en puntos estratégicos de la estructura, gracias a esto se obtendrán deformaciones en los elementos de la estructura, dichas deformaciones podrán ser medidas por las rosetas de deformación y de esta manera se podrá realizar una comparación entre los datos reales y los datos teóricos.

Como ya se menciona antes se trabajará bajo el criterio del elemento crítico es decir se colocarán rosetas de deformación en cada uno de los elementos críticos de cada uno de los pórticos tipo luego se colocarán las cargas de prueba para de esta manera obtener el valor de la deformación.

Para el caso particular en estudio se eligió uno de los pórticos tipo en la estructura para usarlo a manera de ejemplo. La carga de prueba se la determinó como una carga puntual de 300 Kg. esta carga se la aplicará de manera vertical, para esto se colgarán barriles de aproximadamente 60cm de

diámetro y con una altura de 1 metro los cuales luego de ser colgados ya sea por cadenas o cuerdas se los llenará de agua ayudándonos con una manguera. Se los colgará en todos los nudos de la estructura a aproximadamente 1.5 m con lo cual se logrará tener una carga distribuida a lo largo del pórtico.

Es importante señalar que antes de aplicar las cargas de prueba debemos estar seguros que la combinación de la carga de prueba y las otras cargas muertas en la estructura no deforman permanentemente a la misma, para evitar esto primeramente se deberá incluir el valor de esta carga de prueba en el análisis realizado en SAP2000 como se ve en la figura 6.10 y 6.11 en donde se nota la posición de dichas cargas dentro del pórtico seleccionado siendo como ya se dijo antes cargas con un valor de 300 Kg.

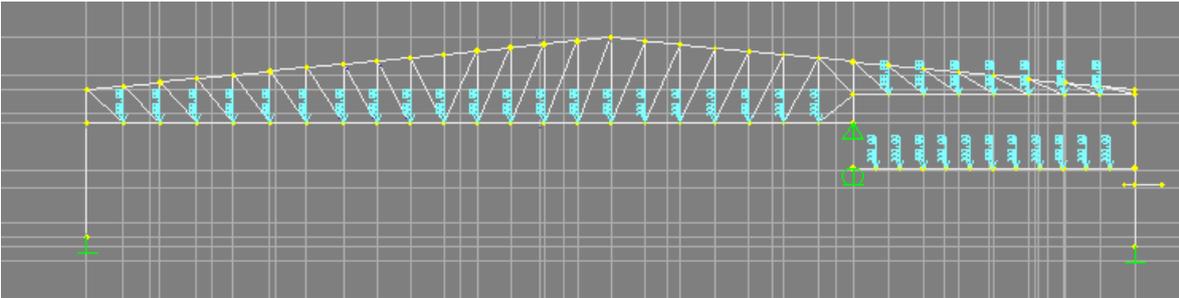


Figura 6.10 Posición de las cargas de prueba en la estructura metálica.

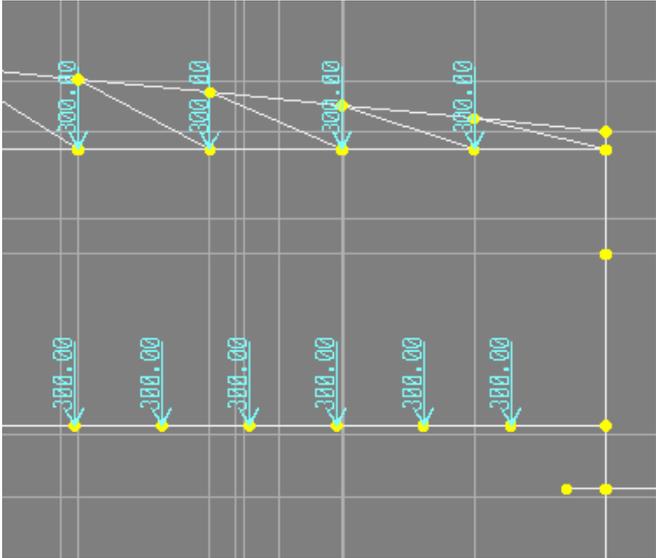


Figura 6.11 Magnitud de las cargas de prueba en la estructura metálica.

A continuación se procede a realizar una corrida en SAP2000 únicamente con el valor de la carga de prueba y se elige el elemento crítico en el cual se pegará la roseta de deformación para nuestro caso el elemento crítico es mostrado en la figura 6.14.

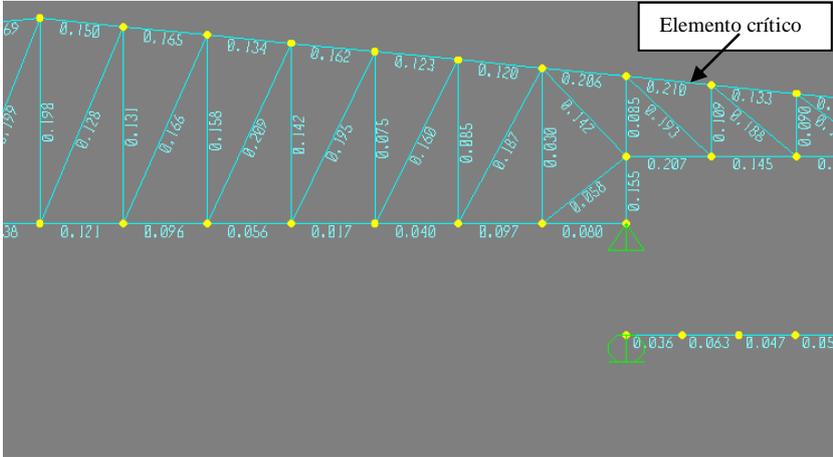


Figura 6.14 Ubicación del elemento crítico luego de aplicar la carga de prueba.

El elemento crítico muestra un valor de demanda-capacidad de 0.21 producido por la carga de prueba, este es el valor más alto dentro del pórtico. En la figura 6.15 se muestra la deformación que se producirá en la estructura y en el elemento crítico, esto nos da una idea de la manera de deformarse de dicha estructura.

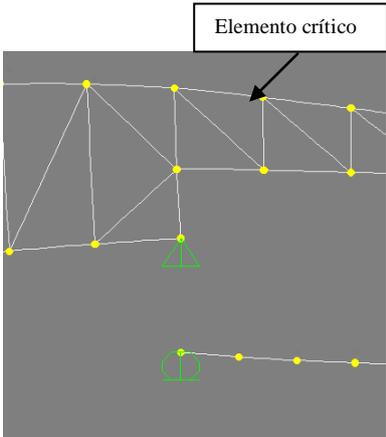


Figura 6.15 Deformación en el elemento crítico producida por la aplicación de la carga de prueba.

Se debe aumentar el número de divisiones en el elemento crítico se sugiere realizarlas cada 15 cm. con el fin de minimizar el error tal como se muestra en la figura 6.16 en donde se dividió al elemento crítico en 15 divisiones. Y mediante un proceso de interacción se elegirá el nivel de pegado de la galga así como el número de elementos finitos en el elemento crítico.

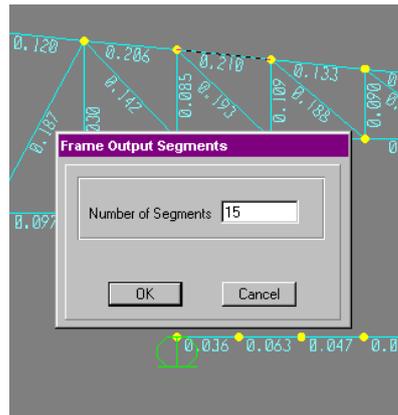


Figura 6.16 División del elemento crítico en varios segmentos.

Una vez que gracias a SAP2000 se ha obtenido la ubicación del elemento crítico se procederá a realizar un análisis de ingeniería para determinar la posición en donde se deberá pegar la roseta de deformación. Posteriormente se pega la roseta en el nivel antes definido, finalmente se deben realizar algunos cambios para que el programa codificado en LabView pueda comparar los datos reales y teóricos.

| Steel Stress Check Information | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------|-----------------|---------------------|-----------------------|------------------|------------------|--|
| Frame ID | 1 | | | | | | |
| Section ID | SCH00001 | | | | | | |
| COMBO ID | STATION LOC | ---MOMENT RATIO | INTERACTION CHECK = | AXL + B-MAJ + B-MIN | ---MAJ-SHR RATIO | ---MIN-SHR RATIO | |
| PRUEBA | 0,00 | 0,210 (T) | = | 0,139 + 0,000 + 0,071 | 0,000 | 0,002 | |
| PRUEBA | 10,13 | 0,205 (T) | = | 0,139 + 0,000 + 0,066 | 0,000 | 0,002 | |
| PRUEBA | 20,25 | 0,200 (T) | = | 0,139 + 0,000 + 0,061 | 0,000 | 0,002 | |
| PRUEBA | 30,38 | 0,195 (T) | = | 0,139 + 0,000 + 0,056 | 0,000 | 0,002 | |
| PRUEBA | 40,50 | 0,190 (T) | = | 0,139 + 0,000 + 0,051 | 0,000 | 0,002 | |

Figura 6.17 División en elementos finitos con su respectivo valor demanda-capacidad.

El elemento crítico debe tener el nombre del elemento (label) "1" esto con el fin de que pueda ser reconocido por el programa realizado en LabView, dicho cambio se lo realiza tal como se muestra en la figura 6.18

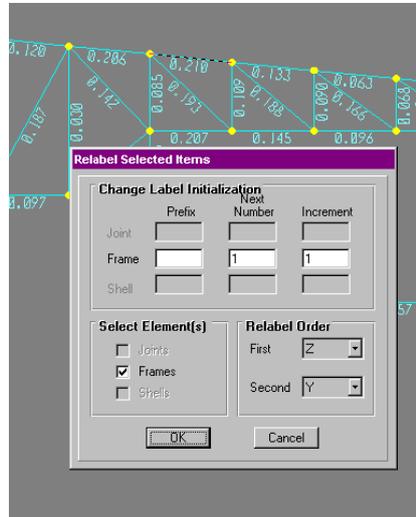


Figura 6.18 Cambio del nombre del elemento (label) crítico.

Por último se debe cambiar el nombre a la sección del elemento crítico de acuerdo con el formato mostrado en la tabla 6.2, este proceso es mostrado en las figuras 6.19 y 6.20.

Tabla 6.2 Tabla de codificación de las secciones.

| Tipo de Sección | Formato del código |
|--------------------|--------------------|
| Doble ángulo | DAN00001 |
| Doble Canal | DCH00001 |
| Ángulo simple | SAN00001 |
| Cajón (hueco) | BOX00001 |
| Canal Simple | SCH00001 |
| Tubo | TUB00001 |
| Sección alma llena | REC00001 |
| Sección en "T" | TEE00001 |
| Varilla | VAR00001 |
| Sección tipo "I" | IPN00001 |

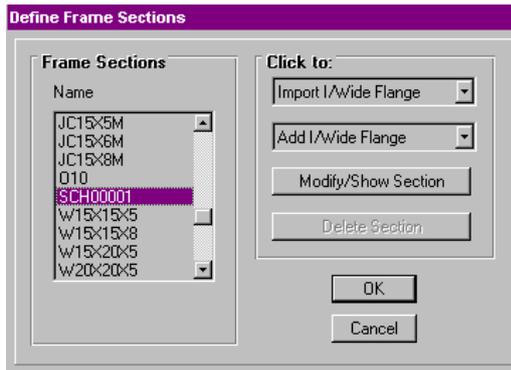


Figura 6.19 Cambio del nombre de la sección 1.

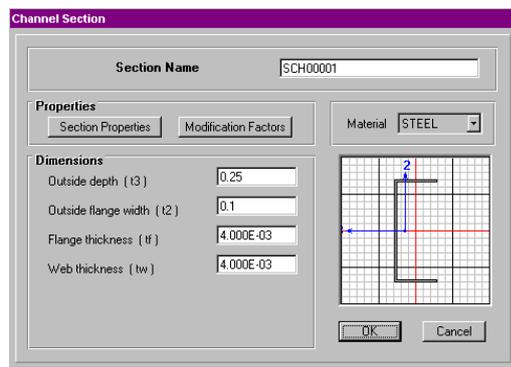


Figura 6.20 Cambio del nombre de la sección 2

Por ultimo se debe correr una vez más en SAP2000 para generar un archivo definitivo y posteriormente se debe generar los archivos tipo texto necesario para realizar la comparación tal como se muestra en la figura 6.20 y 6.21.

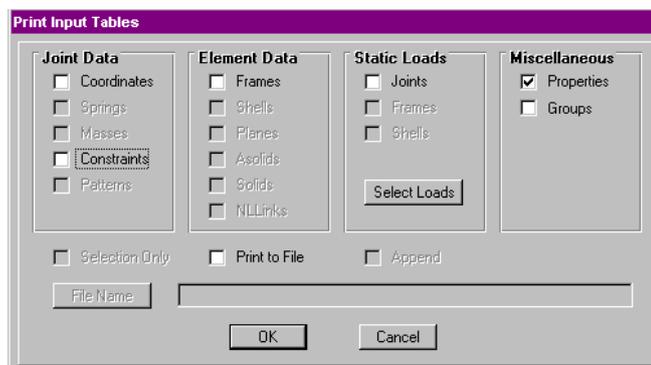


Figura 6.20 Creación del documento de propiedades.

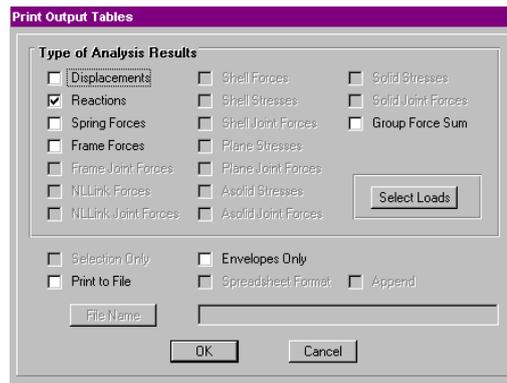


Figura 6.21 Creación del documento de reacciones.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

7.1 ANÁLISIS ECONOMICO

En este capítulo se realizará un detalle de todos los rubros que intervinieron para la realización del presente proyecto de grado, todos estos valores están debidamente detallados.

7.1.1 DISEÑO Y ADMINISTRACIÓN

Dentro de este rubro se tomará en cuenta a las personas encargadas del planeamiento y diseño del proyecto así como también todos los enseres de oficina necesarios, para la presentación de avances, planos, copias, etc.

7.1.1.1 Personal

La realización del diseño y plantación fue ejecutada por los ejecutores del presente proyecto los valores correspondientes por el trabajo realizado son detallados a continuación en la tabla 7.1.

Tabla 7.1 Costo del personal por diseño y plantación

| Cantidad | Posición | Horas-H | USD | USD |
|------------------|--------------|---------|-----------|----------------|
| | | | Valor H-H | Valor Total |
| 2 | Proyectistas | 480 | 5.00 | 4800.00 |
| | | | | |
| TOTAL 1.1 | | | | 4800.00 |

Debido a la naturaleza de este proyecto este costo fue asumido por los ejecutores del presente proyecto de tesis.

El total de los costos debido al diseño y la administración se detallan en la tabla 7.4.

Tabla 7.4 Costos totales de diseño y administración.

| Total diseño y administración | |
|--------------------------------------|----------------|
| Total 1.1 | 4800.00 |
| Total 1.2 | 788.00 |
| Total 7.1.1 | 5588.00 |

7.1.2 COSTOS DIRECTOS

En esta sección se detallan los valores de la mano de obra directa, materia prima y de los servicios profesionales prestados tanto por el director como por el codirector del proyecto.

7.1.2.1 Honorarios profesionales

Tabla 7.5 Honorarios Profesionales.

| Cant. | Posición | Horas-H | USD | USD |
|--------------|-----------------|----------------|------------------|--------------------|
| | | | Valor H-H | Valor Total |
| 1 | Director | 48 | 15.00 | 720.00 |
| 1 | Codirector | 48 | 15.00 | 720.00 |
| | | | | |
| | | | TOTAL 2.1 | 1440.00 |

7.1.2.2 Honorarios a no profesionales

La cual se encargó de la transformación de la materia prima en producto terminado realizando labores metalmecánicas tales como corte de placas, soldadura, pintura, etc. En dichos rubros se incluyó por parte del contratista lo referente al uso de la maquinaria.

Tabla 7.6 Honorarios de No Profesionales.

| | | | USD | USD |
|------------------|----------|---------|-----------|---------------|
| Cant. | Posición | Horas-H | Valor H-H | Valor Total |
| 1 | Técnico | 6 | 12.00 | 72.00 |
| 1 | Ayudante | 6 | 5.00 | 30.00 |
| TOTAL 2.2 | | | | 102.00 |

7.1.2.3 Materia prima y adquisición de equipos

Son todos los suministros necesarios para la consecución del proyecto.

Tabla 7.7 Materia prima y equipos adquiridos.

| | | USD | USD |
|--|----------|----------------|----------------|
| Descripción | Cantidad | Valor unitario | Total |
| Arandela plana SAE (1/2 Plg.) | 20 | 0,05 | 1,00 |
| Gasas | 1 | 1,50 | 1,50 |
| Pernos M7 X 1.5 | 4 | 0,95 | 3,80 |
| Perfil "L" (30 X 30 X 3 mm) L=6 m | 1/2 | 7,88 | 3,94 |
| Pega la brujita (Liquida) | 1 | 3,99 | 3,99 |
| Tuerca Acero SAE 5 (1/2 Plg) | 15 | 1,00 | 15,00 |
| Electrodo 6010 (Kilogramos) | 2 | 2,00 | 4,00 |
| Cables | 6 | 0,50 | 3,00 |
| Pintura | 3 | 2,80 | 8,40 |
| Otros | 1 | 20,00 | 20,00 |
| Perno Espárrago ASTM A-193 B-7 (1/2 X 144) | 1 | 28,80 | 28,80 |
| Roseta de deformación | 1 | 30,00 | 30,00 |
| Plancha de acero A-36 (122 X 244 e=6 mm) | 1/2 | 130,00 | 65,00 |
| Tarjeta de relés y armado | 1 | 200,00 | 200,00 |
| Conectores eléctricos | 10 | 0,60 | 6,00 |
| Caja para proyectos | 1 | 10,20 | 10,20 |
| Cable paralelo | 2 | 2,50 | 5,00 |
| Cable coaxial + banana + BNC | 1 | 1,50 | 1,50 |
| Pernos M20X60 | 4 | 1,10 | 4,40 |
| Pernos M7X 90 | 1 | 0,35 | 0,35 |
| Pernos M7 X 25 | 4 | 0,15 | 0,60 |
| Tarjeta de Adquisición de datos | 1 | 120,00 | 120,00 |
| Arrendamiento de equipos LRM | 1 | 500,00 | 500,00 |
| TOTAL 2.3 | | | 1036,48 |

De donde se obtiene los siguientes valores totales para los costos directos (tabla 7.8):

Tabla 7.8 Costos directos totales.

| Total costos directos USD | |
|----------------------------------|----------------|
| Total 2.1 | 1440,00 |
| Total 2.2 | 102,00 |
| Total 2.3 | 1036,48 |
| TOTAL 7.1.2 | 2578,48 |

La suma del literal 7.1.1 y 7.1.2 se obtiene el valor total el cual es detallado a continuación en la tabla 7.9:

Tabla 7.9 Costos totales.

| Costo total del proyecto USD | |
|-------------------------------------|----------------|
| Total 7.1.1 | 5588,00 |
| Total 7.1.2 | 2578,48 |
| Total General | 8166,48 |

7.1.3 FINANCIAMIENTO

En la tabla que se tiene a continuación se muestra el porcentaje de recursos tanto propios como externos utilizados para el proyecto de tesis (tabla 7.10), los denominados recursos propios son pertenecientes a los ejecutores del proyecto. En la tabla 7.11 se detallan todos los organismos o personas los cuales cooperaron y el porcentaje en el cual lo hicieron.

Tabla 7.10 Recursos de financiamiento.

| RUBROS | PRESUP. | RECURSOS PROPIOS | % | RECURSOS EXTERNOS | % |
|-----------------------------|----------------|-------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| Ingeniería y Administración | 5588,00 | 5588,00 | 100,00 | 0,00 | 0,00 |
| Costos directos | 2578,48 | 1105,48 | 42,87 | 1473,00 | 57,13 |
| TOTAL GENERAL | 8166,48 | 6693,48 | 75,10 | 2490,00 | 24,90 |

Tabla 7.11 Personas y entidades de financiamiento.

| ENTIDADES O PERSONAS | MONTO USD | % |
|---|------------------|---------------|
| 1. Escuela Politécnica del Ejercito (LRM) | 533,00 | 6,53 |
| 2. Ing. José Pérez (Director) | 720,00 | 8,82 |
| 3. Ing. Luis Echeverría (Codirector) | 720,00 | 8,82 |
| 4. Recursos Propios | 6193,48 | 75,84 |
| | | |
| TOTAL | 8166,48 | 100,00 |

7.2 ANÁLISIS FINANCIERO

Para el análisis financiero se comenzará por realizar un balance general del proyecto a lo largo del tiempo al cual se lo ha dividido en meses según lo que se muestra en la tabla 7.12

Tabla 7.12 Balance general del proyecto.

| RUBROS | mes 1 | mes 2 | mes 3 | mes 4 | mes 5 | mes 6 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| INGRESOS | | | | | | |
| Saldo mes anterior | | 5.445,83 | 4.294,67 | 3.143,50 | 1.992,33 | 991,17 |
| Escuela Politecnica del Ejercito (LRM) | 88,83 | 88,83 | 88,83 | 88,83 | 88,83 | 88,83 |
| Ing. José Pérez (Director) | 720,00 | | | | | |
| Ing. Luis Echeverría (Codirector) | 720,00 | | | | | |
| Recursos Propios | 6.193,48 | | | | | |
| TOTAL INGRESOS | 7.722,31 | 5.534,67 | 4.383,50 | 3.232,33 | 2.081,17 | 1.080,00 |
| | | | | | | |
| EGRESOS | | | | | | |
| Honorarios a profecionales | 240,00 | 240,00 | 240,00 | 240,00 | 240,00 | 240,00 |
| Honorarios a no profesionales | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 | 17,00 |
| Proyectistas | 800,00 | 800,00 | 800,00 | 800,00 | 800,00 | 800,00 |
| Materiales maquinaria etc... | 1.036,48 | | | | | |
| Misceláneos | 183,00 | 183,00 | 183,00 | 183,00 | 33,00 | 23,00 |
| | | | | | | |
| TOTAL EGRESOS | 2.276,48 | 1.240,00 | 1.240,00 | 1.240,00 | 1.090,00 | 1.080,00 |
| | | | | | | |
| FLUJO NETO | 5.445,83 | 4.294,67 | 3.143,50 | 1.992,33 | 991,17 | 0,00 |
| | | | | | | |

Ahora se procederá al cálculo del VAN considerando un TIR igual a 5% anual correspondiente a la tasa referencial pasiva en el Ecuador.

$$TIR = \frac{5\% \text{ anual}}{12 \text{ meses}}$$

$$TIR = \frac{0.05}{12} = 0.0042 \text{ mensual}$$

En la tabla 7.13 se detalla el cálculo del VAN:

Tabla 7.13 Cálculo del valor interno de retorno.

| CÁLCULO DEL VAN | | | | | |
|----------------------------|----------|-----------|---------|------------|-------------------------------------|
| MES | INGRESOS | INVERSIÓN | EGRESOS | FLUJO NETO | VAN |
| n | I | INV. | E | R | $VAN=R/(1+0,0042)^n$ TIR=5%anual |
| 1 | 2276,48 | 328,83 | 0,00 | 1947,65 | 1899,28 |
| 2 | 1240,00 | 328,83 | 0,00 | 911,17 | 888,54 |
| 3 | 1240,00 | 328,83 | 0,00 | 911,17 | 888,54 |
| 4 | 1240,00 | 328,83 | 0,00 | 911,17 | 888,54 |
| 5 | 1090,00 | 328,83 | 0,00 | 761,17 | 742,26 |
| 6 | 1080,00 | 328,83 | 0,00 | 751,17 | 732,51 |
| SUMATORIA TOTAL VAN | | | | | 6039,67 |

Con lo que se demuestra que el proyecto es rentable para la ESPE.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

1. El ángulo en el que se ejerce la carga se lo determinó como de 15°, además se desplazó el pistón sobre la viga que lo porta una distancia de 20cm. La reubicación de la carga que ejercía el pistón hidráulico dentro del pórtico varió ostensiblemente el comportamiento del pórtico en si, reduciendo el valor de carga admisible de 20 Ton a 4 toneladas, además proporcionó un estado general de cargas lo cual permitió realizar un análisis mas completo y real.
2. Se determinó que la utilización del programa computacional Cosmos Works es aplicable a elementos mecánicos pequeños, para la aplicación en pórticos o estructuras complejas se recomienda utilizar SAP2000, puesto que Cosmos realiza una división en demasiados elementos diferenciales traduciéndose esto en lentitud en el procesamiento de los datos.
3. La ubicación que debe tener la roseta de deformación dentro de la estructura o elemento puede ser determinada tanto por Cosmos Works como por SAP2000 pero Cosmos Works nos muestra directamente el punto exacto, mientras que SAP2000 nos entrega el estado de cargas en un nivel seleccionado, para luego, con un análisis de ingeniería, se pueda determinar el punto exacto de pegado de galgas.
4. El análisis estructural del pórtico, una vez realizados los cambios correspondientes fue satisfactorio bajo la codificación AICS-ASD89, se determino por lo tanto que el pórtico puede trabajar hasta con una carga de 4Ton.

5. El resultado de esfuerzos de Von Mises en el accesorio 1 indica que el valor máximo es de 1115.1Kg/cm² en un punto de una de los rigidizadores interiores en el cual la sección se hace mínima, no produciéndose la falla.
6. El resultado de esfuerzos de Von Mises en el accesorio 2 indica que el valor máximo es de 130.1Kg/cm² alrededor de los agujeros de las placas superiores frontales, no produciéndose la falla.
7. El resultado de esfuerzos de Von Mises en el accesorio 3 indica que el valor máximo es de 813.5Kg/cm² en un punto en el que el perno ejerce fuerza sobre la plancha, no produciéndose la falla.
8. El resultado de esfuerzos de Von Mises en el accesorio 4 indica que el valor máximo es de 496.0Kg/cm² en la unión de los ángulos, pero también es importante observar que sobre los elementos que resisten directamente los 5000Kg (valor para el cual se diseñaron los accesorios) el esfuerzo de Von Mises es de 496.1Kg/cm², es decir están trabajando con un factor de seguridad de 5.
9. Se determinó que la mejor opción para la adquisición y tratamiento de los datos era usar el medidor de deformaciones unitarias DMD 20 A y la tarjeta de adquisición de datos PMD-1208LS de manera conjunta.
10. Se concluyó que para obtener resultados fiables debe existir tierra común para todo el circuito, este incluye: el medidor de deformaciones unitarias, la tarjeta de adquisición de datos y el circuito de los relés.
11. Se determinó que es necesario eliminar los 100 primeros datos de voltajes que se obtienen el arreglo por cada galga, debido a que los relés producen gran inestabilidad al momento del encendido.

12. Se estableció que la ecuación de transformación es de tipo lineal y obedece a la siguiente relación: $\varepsilon = 0,0097 * V$ con un factor de correlación de 0,9776 y que esta debe pasar por el origen de coordenadas.
13. Se determinó que el rango de utilización del vibróforo para la carga con el cilindro a 15° está entre 500Kg y 3000Kg, debido a que con valores menores a 500Kg el error porcentual en la medida aumenta demasiado y que con valores mayores a 3000Kg ya es muy difícil la apreciación de la carga en el indicador del vibróforo.
14. Se observó que cálculos con gran dificultad pueden ser simplificados con la aplicación de MatLab Scripts para la simplificación de la programación en LabView.

8.2 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda tener extremo cuidado si se desarma el sistema o se modifica el ángulo de funcionamiento, puesto que el pistón hidráulico posee gran peso y es difícil de manejar debido al espacio y las condiciones físicas del laboratorio de resistencia de materiales.
2. Para la utilización de los paquetes computacionales Solid Works y Cosmos Works se sugiere utilizar computadoras con procesadores poderosos y rápidos para evitar eventualidades en el proceso de cálculo.
3. Una vez determinado el punto de pegado de las rosetas de deformación es recomendable manipular estas con extremo cuidado siguiendo los pasos detallados en esta tesis puesto que las rosetas son muy delicadas y podrían sufrir un daño permanente.
4. Para un cálculo estructural exitoso se recomienda un buen conocimiento del código a utilizarse así como también las condiciones detalladas en cada una de las normativas.

5. Se recomienda realizar planos de corte cuando se trabaja con planchas de acero con el fin de minimizar pérdidas de material.
6. Es importante que la soldadura en las piezas de acero sea realizado por personal calificado para que los cordones de soldadura no se conviertan en concentradores de esfuerzos.
7. El cálculo del esfuerzo de Von Mises genera resultados muy cercanos a la realidad por lo que se puede aplicar esta teoría con resultados satisfactorios.
8. Se recomienda realizar diseños con alto grado de seguridad para elementos de vital importancia con el fin de disminuir la posibilidad de accidente o perjuicios a seres humanos.
9. Se aconseja que en el diseño, selección y construcción de elementos electrónicos se evite el exceso de cableado, puesto que esto puede producir gran cantidad de ruido, interferencias, confusión y errores indetectables a simple vista.
10. Se propone no utilizar en la construcción de las carcasas de los dispositivos electrónicos materiales metálicos, debido a que pudieran producirse corto circuitos en el sistema.
11. El filtrado de los datos es de gran importancia se aconseja utilizar filtros mecánicos o programas que filtren la señal para disminuir los errores.
12. Las ecuaciones de transformación tienen siempre una forma lineal, es importante no utilizar factores de correlación demasiado bajos se sugiere utilizar un valor mayor a 0.9

13. Se recomienda cargar dos veces seguidas el sistema óleo-hidráulico hasta 1000Kg antes de realizar las prácticas de toma de datos con el dispositivo de adquisición de datos y selección de galga.

14. Se recomienda detectar las interferencias entre los elementos en Cosmos Works siempre que se importe archivos desde AutoCad antes de correr el estudio, debido a que estas no permiten que el estudio finalice.

REFERENCIAS

1. BIBLIOGRÁFICAS

NORRIS, C. BENSON, J. y UTKU, S. Análisis Elemental de Estructuras. 2^{da} ed. Barcelona. McGraw-Hill. 1982. 30 p.

COMPANY M. Cálculos de Construcción. 9^{na} ed. S.L. G. Pili. 1983. pp. 126-138.

SHIGLEY J.E. y MISCHKE C.R. Diseño en Ingeniería Mecánica. 4^{ta} ed. México. McGraw-Hill. 1993. p. 386.

BENTLEY J.P. Principles of Measurement Systems. 3^{ra} ed. Londres. Addison Wesley Longman. 1995. 20 p.

2. TESIS

MONTALVO, F. y ALVARADO, C. Implementación del vibróforo de baja frecuencia marca AMSLER. Tesis Ing. Mec. Escuela Politécnica del Ejército. Facultad de Ingeniería Mecánica. 1998. 40 p.

ÁLVAREZ, E. y CONTRERAS, R. Estudio y Diseño para la habilitación de un banco de pruebas ASMLER electro hidráulico para ensayos estáticos y dinámicos a baja frecuencia de elementos y sistemas reales. Tesis Ing. Mec. Escuela Politécnica del Ejército. Facultad de Ingeniería Mecánica. 1989. p. 113.

3. PUBLICACIONES NO PERIÓDICAS

AMERICAN INSTITUTION OF STEEL CONSTRUCTION. Manual of Steel Construction Allowable Stress Design AISC-ASD 89. 9^{na} ed. S.L. s.e. 1993. 30 p.

HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH. Manual of Strain Gauges. S.E. Munich. s.e. s.f. 10 p.

HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH. User's Guide. S.E. Munich. s.e. s.f. 25 p.

MEASUREMENT COMPUTING. User's Guide PMD-1208LS. 5^{ta} ed. Massachusetts. s.e. 2004. 50 p.

NATIONAL INSTRUMENTS. The Measurement and Automation Catalog. S.E. S.L. s.e. 2002. 30 p.

4. DIRECCIONES INTERNET

www.construaprende.com, Estructuras Metálicas, Español, 2004.

www.construaprende.com, Cargas, Español, 2004.

www.ni.com, Sensores, Inglés, 2002.

www.ni.com, Compensación por longitud y temperatura, Inglés, 2003.

http://hgr.tripod.com/adquisicion_datos.html, Adquisición de datos, Inglés, 2001.

<http://studies.ac.upc.es/ETSETB/ARISO/Treballs/Tardor2002/EquipoA/TARJETAS%20DE%20ADQUISICION%20DE%20DATOS.htm>, Resolución y muestreo, Español, 1999.

www.cires.org.mx/es_racm_main.php4, sistema de instrumentación sísmica, Español, 2002.

www.geocisa.com/ingteyes/gecoramp_2.htm, Corrosímetro, Español, 2002.

www.geocisa.com/ingteyes/ensasitu_2.htm#inicio, Sistema láser para la medición de desplazamientos, Español, 2002.

http://www.geocisa.com/ingteyes/hojas/pcarga14_amp_2.htm, medidas de flecha mediante LVTD's, Español, 2002.