

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

Tema: ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSH OVER) DE LOS TALLERES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA Y DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL, CON AISLADORES SÍSMICOS, UBICADAS EN EL CAMPUS HUACHI DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

Trabajo de titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magíster en Ingeniería Civil con Mención Estructuras Metálicas

Modalidad de titulación: Trabajo de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

Autor: Ing. Byron Leonardo López Sánchez

Directora: Ing. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre, MSc.

Ambato – Ecuador

2022

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

El Tribunal receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación presidido por Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg., e integrado por los señores: Ing. Alex Gustavo López Arboleda, Mg., e Ing. Alex Xavier Frías Torres, Mg., designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: “ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSH OVER) DE LOS TALLERES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA Y DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL, CON AISLADORES SÍSMICOS, UBICADAS EN EL CAMPUS HUACHI DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”, elaborado y presentado por el Ing. Byron Leonardo López Sánchez, para optar por el Grado Académico de Magíster en Ingeniería Civil con Mención en Estructuras Metálicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Wilson Santiago Medina Robalino, Mg.
Presidente y Miembro del Tribunal de Defensa

Ing. Alex Gustavo Lopez Arboleda, Mg.
Miembro del Tribunal de Defensa

Ing. Alex Xavier Frías Torres, Mg.
Miembro del Tribunal de Defensa

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSH OVER) DE LOS TALLERES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA Y DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL, CON AISLADORES SÍSMICOS, UBICADAS EN EL CAMPUS HUACHI DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”, le corresponde exclusivamente a: Ing. Byron Leonardo López Sánchez, Autor bajo la Dirección de la Ing. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre Mg., Directora del Trabajo de Investigación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Byron Leonardo López Sánchez

AUTOR

Ing. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre, MSc.

DIRECTORA

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Byron Leonardo López Sánchez

C.C. 1804088159

ÍNDICE GENERAL

Contenido

| | |
|--|-------|
| PORTADA..... | i |
| APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | ii |
| AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN | iii |
| DERECHOS DE AUTOR | iv |
| ÍNDICE GENERAL | v |
| AGRADECIMIENTO | xviii |
| DEDICATORIA | xix |
| RESUMEN EJECUTIVO..... | xx |
| EXECUTIVE SUMMARY | xxii |
| CAPÍTULO I | 1 |
| EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN | 1 |
| 1.1. Introducción..... | 1 |
| 1.2. Justificación..... | 2 |
| 1.3. Objetivos | 4 |
| CAPÍTULO II | 5 |
| ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS | 5 |
| 2.1. Marco Teórico..... | 5 |
| 2.1.1 Descripción general de los procedimientos inelásticos..... | 5 |
| 2.1.2 Análisis Estático No Lineal (PUSH OVER)..... | 7 |
| 2.1.2.1 Modelos constitutivos del comportamiento de los materiales | 8 |
| 2.1.2.2 Mecanismo de colapso en un Marco de momento | 8 |
| 2.1.2.3 Capacidad | 10 |
| 2.1.2.3.1 Curva de Capacidad | 10 |
| 2.1.2.3.2 Representación bilineal de la curva de capacidad..... | 11 |
| 2.1.2.4 Demanda | 12 |

| | |
|--|----|
| 2.1.2.4.1 Caracterización del movimiento sísmico del suelo..... | 12 |
| 2.1.2.4.2 Zonificación sísmica y curvas de peligro sísmico | 13 |
| 2.1.2.4.3 Niveles de amenaza sísmica..... | 14 |
| 2.1.2.5 Desempeño | 15 |
| 2.1.2.5.1 Niveles de desempeño..... | 15 |
| 2.1.2.6 Punto de desempeño..... | 17 |
| 2.1.2.6.1 Estimación de desempeño sísmico de estructuras..... | 17 |
| 2.1.2.6.2 Métodos de análisis no lineales de espectro capacidad..... | 17 |
| 2.1.2.6.3 Método de espectro de capacidad ATC 40 | 18 |
| 2.1.2.6.4 Método de espectro capacidad FEMA 440 (Linealización Equivalente) | 19 |
| 2.1.2.6.5 Sectorización de la curva de capacidad..... | 20 |
| 2.1.3 Aislamiento sísmico | 20 |
| 2.1.3.1 Tipos de aisladores sísmicos: | 21 |
| 2.1.3.1.1. Aisladores Elastoméricos | 22 |
| 2.1.3.1.2. Aisladores Deslizantes | 24 |
| 2.1.3.2 Ventajas y desventajas del uso de aisladores | 26 |
| 2.2 Ensayos no destructivos para la evaluación de uniones soldadas..... | 27 |
| 2.2.1 Criterios para la selección del ensayo adecuado..... | 27 |
| 2.2.2 Inspección visual (VT)..... | 27 |
| 2.2.3 Inspección por tintas penetrantes (PT)..... | 30 |
| 2.2.4 Inspección por ultrasonido industrial (UT)..... | 32 |
| CAPÍTULO III..... | 35 |
| MARCO METODOLÓGICO..... | 35 |
| 3.3. Tipo de investigación | 38 |
| 3.4. Prueba de hipótesis..... | 38 |
| 3.5. Población y muestra | 38 |

| | |
|---|----|
| 3.5.1 Población..... | 38 |
| 3.5.2 Muestra | 39 |
| 3.6. Recolección de información..... | 40 |
| 3.7. Procesamiento de información y análisis estadístico | 40 |
| 3.8. Variables respuesta o resultados alcanzados..... | 40 |
| 3.9 Recolección de Datos | 41 |
| 3.9.1 Planos Arquitectónicos..... | 41 |
| 3.9.2 Características y configuración estructural..... | 38 |
| 3.9.3 Resistencia a la compresión del hormigón..... | 39 |
| 3.9.4 Medición de espesores | 46 |
| 3.9.5 Inspección y medición de los cordones de soldadura (VT) | 50 |
| 3.9.6 Tintas Penetrantes (PT)..... | 55 |
| 3.9.7 Ensayo de ultrasonido (UT) | 58 |
| 3.9.8 Resistencia a la fluencia del acero | 61 |
| 3.9.9 Clasificación y tipo de suelo | 61 |
| 3.9.9.1 Clasificación de suelo según la SUCS | 62 |
| 3.9.9.2 Velocidad de onda de corte Vs | 64 |
| 3.9.10 Cargas gravitacionales | 64 |
| 3.9.11 Irregularidad en planta y elevación..... | 67 |
| 3.9.12 Cargas Sísmicas | 68 |
| 3.10 Análisis Lineal de la Estructura Actual..... | 71 |
| 3.10.1 Definición de Materiales | 71 |
| 3.10.2 Definición de Secciones..... | 72 |
| CAPITULO IV..... | 74 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 74 |
| 4.1 Resultados de la estructura analizada con base fija | 74 |

| | |
|---|-----|
| 4.1.1 Análisis lineal de la estructura en estado actual..... | 74 |
| 4.1.1.1 Período fundamental de vibración | 74 |
| 4.1.1.2 Participación de la masa modal..... | 75 |
| 4.1.1.3 Acumulación de la masa modal | 75 |
| 4.1.1.4 Validación del Análisis Dinámico | 76 |
| 4.1.1.5 Derivas de Piso..... | 76 |
| 4.1.2 Análisis Estático no Lineal..... | 79 |
| 4.1.2.1 Asignación de Rotulas plásticas..... | 79 |
| 4.1.2.2 Niveles de Amenaza sísmica..... | 82 |
| 4.1.2.3 Resultados de análisis estático no lineal - Pushover | 83 |
| 4.1.2.3.1 Curva de capacidad | 83 |
| 4.1.2.3.2 Representación bilineal de la curva de capacidad..... | 84 |
| 4.1.2.3.4 Evaluación del desempeño sísmico..... | 87 |
| 4.1.2.3.4.1 Punto de desempeño..... | 87 |
| 4.1.2.3.4.2 Validación de los puntos de desempeño | 93 |
| 4.2 Resultados de la estructura analizada con aisladores sísmicos | 95 |
| 4.2.1 Diseño de aislador | 95 |
| 4.2.1.1 Propiedades Geométricas | 96 |
| 4.2.1.2 Propiedades de los materiales | 98 |
| 4.2.1.3 Resumen característico físicas y mecánicas de aislador calculado .. | 98 |
| 4.2.2. Detalle del modelamiento | 105 |
| 4.2.3. Definición de sismo de diseño: Sismo de Diseño (DBE) y Sismo Máximo Considerado (MCE) | 106 |
| 4.2.4. Modelación ETABS | 107 |
| 4.2.5. Resultados del Análisis Estructural..... | 108 |
| 4.2.5.1. Periodo de Vibración Fundamental de la Estructura Aislada | 108 |
| 4.2.5.2. Comparación de resultados | 109 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.5.3. Periodo de vibración | 109 |
| 4.2.5.4. Comparación de Derivas Inelásticas | 110 |
| 4.2.5.5. Comparación de los desplazamientos máximos..... | 113 |
| 4.2.5.6. Comparación de Corte Basal..... | 117 |
| 4.3. Análisis de las juntas soldadas de las conexiones precalificadas | 121 |
| CAPÍTULO V | 127 |
| 5.1. CONCLUSIONES | 127 |
| 5.2. RECOMENDACIONES..... | 129 |
| 5.3. BIBLIOGRAFÍA | 130 |
| 5.4. ANEXOS | 133 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada | 14 |
| Tabla 2: Niveles de amenaza sísmica..... | 15 |
| Tabla 3: Niveles de Desempeño de un Edificio | 16 |
| Tabla 4: Criterio de aceptación de inspección visual | 29 |
| Tabla 5: Criterio de aceptación y rechazo por ultrasonido..... | 34 |
| Tabla 6: Especificaciones técnicas de los equipos | 36 |
| Tabla 7: Coordenadas de la zona de análisis..... | 39 |
| Tabla 8: Descripción de usos y áreas – Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica | 41 |
| Tabla 9: Descripción de alturas y usos – Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria | 42 |
| Tabla 10: Valores de Índice de Rebote y $f'c$ del ensayo esclerométrico de los plintos para el Taller FICM..... | 40 |
| Tabla 11: Valores de Índice de Rebote y $f'c$ del ensayo esclerométrico del piso y muro para el Taller FICM..... | 40 |
| Tabla 12: Valores de Índice de Rebote y $f'c$ del ensayo esclerométrico de la losa para el Taller FICM..... | 41 |
| Tabla 13: Validación de la resistencia a la compresión del concreto del plinto A1 para el Taller FICM..... | 43 |
| Tabla 14: Valores de Índice de Rebote y $f'c$ para el Taller FISEI | 45 |
| Tabla 15: Elementos donde se realiza las mediciones – Taller FICM | 46 |
| Tabla 16: Medidas de los espesores de los planos estructurales | 48 |
| Tabla 17: Elementos donde se realizaron las mediciones – Taller FISEI | 49 |
| Tabla 18: Medición de espesores – Taller FICM | 49 |
| Tabla 19: Medición de espesores – Taller FISEI | 50 |
| Tabla 20: Medición de alturas - Taller FICM | 52 |
| Tabla 21: Medición de alturas - Taller FISEI..... | 52 |
| Tabla 22: Resultados de las discontinuidades - Taller FICM | 56 |
| Tabla 23: Resultados de las discontinuidades - Taller FISEI..... | 58 |
| Tabla 24: Resultados obtenidos - Taller FICM..... | 59 |
| Tabla 25: Resultados obtenidos - Taller FISEI | 60 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 26: Ensayo de Penetración Estándar | 61 |
| Tabla 27: Clasificación de los suelos SUCS | 63 |
| Tabla 28: Velocidad de Onda de Corte en cada cota | 64 |
| Tabla 29: Cuantificación del peso de la losa Steel Deck. | 65 |
| Tabla 30: Peso propio de paredes..... | 66 |
| Tabla 31: Sobrecargas mínimas uniformemente distribuidas | 66 |
| Tabla 32: Coeficiente de regularidad en elevación - Taller FICM | 67 |
| Tabla 33: Coeficientes de regularidad en planta - Taller FICM..... | 67 |
| Tabla 34: Coeficiente de regularidad en elevación - Taller FISEI..... | 68 |
| Tabla 35: Coeficientes de regularidad en planta - Taller FISEI..... | 68 |
| Tabla 36: Factores de carga sísmica y de configuración estructural – Taller FICM . | 69 |
| Tabla 37: Factores de carga sísmica y de configuración estructural – Taller FISEI.. | 70 |
| Tabla 38: Secciones de Vigas – Taller FISEI y Taller FICM | 72 |
| Tabla 39: Secciones de Columnas Taller FISEI y Taller FICM | 72 |
| Tabla 40: Período Fundamental Método 2..... | 74 |
| Tabla 41: Verificación del periodo fundamental..... | 74 |
| Tabla 42: Factores de Participación de Masa Modal y % de Torsión | 75 |
| Tabla 43: Acumulación de la Masa Modal | 75 |
| Tabla 44: Validación del Análisis Dinámico NEC 2015 | 76 |
| Tabla 45: Niveles de amenaza sísmica..... | 82 |
| Tabla 46: Puntos de desempeño en la dirección X – Taller FICM | 87 |
| Tabla 47: Puntos de desempeño en la dirección Y – Taller FICM | 89 |
| Tabla 48: Niveles de desempeño calculados y esperados para el Taller FICM..... | 94 |
| Tabla 49: Niveles de desempeño calculados y esperados para el Taller FISEI | 95 |
| Tabla 50: Propiedades geométricas del aislador | 96 |
| Tabla 51: Propiedades, Desplazamiento y Carga axial en función del diámetro del aislador (PRE-DISEÑO) | 97 |
| Tabla 52: Dimensiones del aislador y placas de montaje..... | 97 |
| Tabla 53: Datos para diseño del Aislador | 98 |
| Tabla 54: Propiedades de los materiales | 98 |
| Tabla 55: Datos generales del aislador..... | 98 |
| Tabla 56: Coeficiente de amortiguamiento B_M | 99 |
| Tabla 57: Cálculo del desplazamiento máximo total para los dos talleres..... | 101 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 58: Carga axial ultima | 101 |
| Tabla 59: Cálculo de la rigidez vertical..... | 104 |
| Tabla 60: Resumen característico físicas y mecánicas de aislador calculado | 105 |
| Tabla 61: Modos de vibración y participación de masas del Taller FICM con aisladores | 108 |
| Tabla 62: Modos de vibración y participación de masas del Taller FISEI con aisladores | 109 |
| Tabla 63: Periodo para los diferentes sistemas estructurales | 109 |
| Tabla 64: Desplazamiento de la estructura (X) y porcentaje de reducción con sistema de aislación..... | 113 |
| Tabla 65: Desplazamiento de la estructura (Y) y porcentaje de reducción con sistema de aislación..... | 114 |
| Tabla 66: Desplazamiento de la estructura (X) y porcentaje de reducción con sistema de aislación..... | 115 |
| Tabla 67: Desplazamiento de la estructura (Y) y porcentaje de reducción con sistema de aislación..... | 116 |
| Tabla 68: Cortante basal de la estructura (X) y porcentaje de reducción con sistema de aislación..... | 117 |
| Tabla 69: Cortante basal de la estructura (Y) y porcentaje de reducción con sistema de aislación..... | 118 |
| Tabla 70: Cortante basal de la estructura (X) y porcentaje de reducción con sistema de aislación..... | 119 |
| Tabla 71: Cortante basal de la estructura (Y) y porcentaje de reducción con sistema de aislación..... | 119 |
| Tabla 72: Comparación de las dos estructuras con y sin aisladores sísmicos - Taller FICM..... | 120 |
| Tabla 73: Comparación de las dos estructuras con y sin aisladores sísmicos - Taller FISEI | 120 |
| Tabla 74: Datos del análisis de la junta a traslape..... | 122 |
| Tabla 75: Datos del análisis de la junta en T con doble filete:..... | 124 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Representación esquemática del uso de procedimientos de análisis inelásticos | 5 |
| Figura 2: Fractura en una placa de base de columna y fractura de la soldadura de penetración | 7 |
| Figura 3: Secuencia del proceso de análisis pushover | 7 |
| Figura 4: Modelo constitutivo para acero | 8 |
| Figura 5: Comportamiento Inelástico de Marcos con Rótulas Plásticas en Vigas | 9 |
| Figura 6: Ubicación de la Formación de Rótulas Plásticas | 10 |
| Figura 7: Comportamiento estructural - Curva de Capacidad | 11 |
| Figura 8: Representación bilineal de la curva de capacidad | 11 |
| Figura 9: Espectro sísmico elástico de aceleraciones sismo de diseño | 12 |
| Figura 10: Ecuador, zonas sísmicas y valor del factor de zona Z | 13 |
| Figura 11: Curvas de peligro sísmico, Ambato | 14 |
| Figura 12: Relación entre amenaza sísmica y niveles de desempeño, según VISION 2000 | 17 |
| Figura 13: Representación gráfica de la linealización equivalente en el método del espectro de capacidad según el ATC 40 | 19 |
| Figura 14: Espectro de respuesta aceleración-desplazamiento (ADRS) | 19 |
| Figura 15: Sectorización de la Curva Capacidad | 20 |
| Figura 16: Aislador sísmico de goma | 21 |
| Figura 17: Disminución de la aceleración espectral por incorporación del aislador sísmico. | 21 |
| Figura 18: Aislador tipo LDRB | 22 |
| Figura 19: Aislador tipo LRB | 23 |
| Figura 20: Aislador de Base de caucho de alto amortiguamiento | 23 |
| Figura 21: Apoyo deslizante plano | 24 |
| Figura 22: Combinación de apoyo deslizante y aislador elastomérico. | 25 |
| Figura 23: Péndulo friccional | 25 |
| Figura 24: Aplicación del método de inspecciones visual | 28 |
| Figura 25: Operaciones básicas para la inspección con líquidos penetrantes | 30 |
| Figura 26: Indicaciones sobre un Cordón de Soldadura | 32 |

| | |
|--|----|
| Figura 27: Inspección por ultrasonido industrial..... | 32 |
| Figura 28: Ubicación de los talleres de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial..... | 38 |
| Figura 29: Planta Baja - Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica | 34 |
| Figura 30: Fachada Posterior - Eje 1 - Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica | 34 |
| Figura 31: Fachada Frontal - Eje 3 - Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica | 35 |
| Figura 32: Fachada lateral derecha eje A y Fachada lateral izquierda eje 1 - Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica..... | 35 |
| Figura 33: Planta Baja - Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria..... | 36 |
| Figura 34: Fachada Posterior - Eje 1 - Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria..... | 36 |
| Figura 35: Fachada Frontal - Eje 3 - Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria..... | 37 |
| Figura 36: Fachada lateral derecha eje A y Fachada lateral izquierda eje 1 - Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria..... | 37 |
| Figura 37: Render del modelo - Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica | 38 |
| Figura 38: Render del modelo - Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial | 38 |
| Figura 39: Ejecución del ensayo esclerómetro – Taller FICM | 39 |
| Figura 40: Ubicación de los elementos ensayados - Taller FICM | 39 |
| Figura 41: Curva de regresión para estimar $f'c$ (MPa) Proceq / Vertical hacia abajo | 42 |
| Figura 42: Curva de regresión para estimar $f'c$ (MPa) Proceq / Horizontal | 42 |
| Figura 43: Ejecución del ensayo esclerómetro - Taller FISEI | 44 |
| Figura 44: Ubicación de los elementos ensayados - Taller FISEI | 45 |
| Figura 45: Ubicación de los elementos ensayados- Taller FICM | 46 |
| Figura 46: Medición de espesores mediante el medidor de espesores ultrasónico | 47 |
| Figura 47: Ubicación de los elementos ensayados- Taller FISEI | 48 |
| Figura 48: Ubicación de los elementos ensayados - Taller FICM | 50 |
| Figura 49: Ubicación de los elementos ensayados - Taller FISEI | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 50: Medición del cordón de soldadura..... | 51 |
| Figura 51: Esquema de soldadura - placa base y columna (Junta en T) | 53 |
| Figura 52: Esquema de soldadura - Columna (Junta a tope)..... | 53 |
| Figura 53: Esquema de soldadura - Placa de unión y Columna (Junta en T con doble filete) | 54 |
| Figura 54: Esquema de soldadura - Placa de unión y tubo (Junta en T) | 54 |
| Figura 55: Ejecución del ensayo de Tintas Penetrantes | 55 |
| Figura 56: Ubicación del elemento ensayado - Taller FICM..... | 56 |
| Figura 57: Resultados del ensayo e inspección visual de las discontinuidades - Taller FICM..... | 56 |
| Figura 58: Ubicación del elemento ensayado - Taller FISEI | 57 |
| Figura 59: Resultados del ensayo e inspección visual de las discontinuidades - Taller FISEI | 57 |
| Figura 60: Ubicación de los elementos ensayados - Taller FICM | 58 |
| Figura 61: Aplicación en campo en la columna..... | 59 |
| Figura 62: Ubicación de los elementos ensayados - Taller FISEI | 60 |
| Figura 63: Detalle de losa con placa colaborante..... | 65 |
| Figura 64: Tipos de Paredes | 65 |
| Figura 65: Espectros de Respuesta – Taller FICM | 70 |
| Figura 66: Espectros de Respuesta – Taller FISEI..... | 71 |
| Figura 67: Derivas Inelásticas por cortante estático – Taller FICM | 77 |
| Figura 68: Derivas Inelásticas por cortante estático – Taller FISEI | 78 |
| Figura 69: Derivas Inelásticas por cortante dinámico – Taller FICM..... | 78 |
| Figura 70: Derivas Inelásticas por cortante dinámico – Taller FISEI..... | 79 |
| Figura 71: Asignación de rotulas plásticas en vigas | 80 |
| Figura 72: Asignación de rotulas plásticas en columnas..... | 81 |
| Figura 73: Asignación de rotulas plásticas en riostras | 82 |
| Figura 74: Espectros elásticos correspondientes a los niveles de amenaza sísmica .. | 83 |
| Figura 75: Curva de capacidad - Taller FICM | 83 |
| Figura 76: Curva de capacidad - Taller FISEI | 84 |
| Figura 77: Representación bilineal de la curva de capacidad | 85 |
| Figura 78: Representación bilineal de la curva de capacidad en la dirección X – Taller FICM..... | 85 |

| | |
|--|-----|
| Figura 79: Representación bilineal de la curva de capacidad en la dirección Y – Taller FICM..... | 86 |
| Figura 80: Representación bilineal de la curva de capacidad en la dirección X – Taller FISEI | 86 |
| Figura 81: Representación bilineal de la curva de capacidad en la dirección Y – Taller FISEI | 87 |
| Figura 82: Punto de Desempeño – Sismo Raro. Dirección X..... | 87 |
| Figura 83: Punto de Desempeño - Sismo Muy Raro. Dirección X..... | 88 |
| Figura 84: Punto de Desempeño – Sismo Raro. Dirección Y | 89 |
| Figura 85: Punto de Desempeño – Sismo Muy Raro. Dirección Y | 89 |
| Figura 86: Puntos de desempeño en la dirección X – Taller FISEI | 90 |
| Figura 87: Punto de Desempeño – Sismo Raro. Dirección X..... | 90 |
| Figura 88: Punto de Desempeño – Sismo Muy Raro. Dirección X | 91 |
| Figura 89: Puntos de desempeño en la dirección Y – Taller FISEI | 91 |
| Figura 90: Punto de Desempeño – Sismo Raro. Dirección Y | 92 |
| Figura 91: Punto de Desempeño – Sismo Muy Raro. Dirección Y | 92 |
| Figura 92: Desempeño Sísmico en dirección X – Taller FICM..... | 93 |
| Figura 93: Desempeño Sísmico en dirección Y – Taller FICM..... | 93 |
| Figura 94: Desempeño Sísmico en dirección X – Taller FISEI..... | 94 |
| Figura 95: Desempeño Sísmico en dirección Y – Taller FISEI..... | 95 |
| Figura 96: Aproximación bilineal de un comportamiento histerético del LRB | 96 |
| Figura 97: Geometría del aislador | 97 |
| Figura 98: Esquema de dimensiones para las direcciones de análisis..... | 100 |
| Figura 99: Asignación de aisladores tipo LRB | 106 |
| Figura 100: Asignación de Parámetros U1, U2 y U3 LRB | 106 |
| Figura 101: Espectro de Sismo de Diseño (DBE) y Sismo Máximo Considerado (MCE) | 107 |
| Figura 102: Modelación Taller FICM - Base aislada..... | 107 |
| Figura 103: Modelación Taller FISEI - Base aislada..... | 107 |
| Figura 104: Derivas inelásticas Taller FICM convencional y aislado en dirección X | 110 |
| Figura 105: Derivas inelásticas Taller FICM convencional y aislado en dirección Y | 111 |

| | |
|--|-----|
| Figura 106: Derivas inelásticas Taller FISEI convencional y aislado en dirección X | 112 |
| Figura 107: Derivas inelásticas Taller FISEI convencional y aislado en dirección Y | 113 |
| Figura 108: Desplazamiento de las estructuras respecto a la base – Dirección X ... | 114 |
| Figura 109: Desplazamiento de las estructuras respecto a la base – Dirección Y ... | 114 |
| Figura 110: Desplazamiento de las estructuras respecto a la base – Dirección X ... | 115 |
| Figura 111: Desplazamiento de las estructuras respecto a la base – Dirección Y ... | 116 |
| Figura 112: Cortante máximo (X) - Taller FICM | 117 |
| Figura 113: Cortante máximo (Y) - Taller FICM | 118 |
| Figura 114: Cortante máximo (X) - Taller FISEI..... | 119 |
| Figura 115: Cortante máximo (Y) - Taller FISEI..... | 120 |
| Figura 116: Conexión de patín sodado sin refuerzo y alma soldada (WUF-W) | 121 |
| Figura 117: Dimensiones de soldadura | 122 |
| Figura 118: Detalle de la junta | 123 |
| Figura 119: Detalle de la junta | 125 |

AGRADECIMIENTO

Agradezco a DIOS por ser mi guía, brindándome sabiduría e inteligencia para poder ir alcanzando cada una de mis metas planteadas.

A mis padres Narcisa Sánchez y Héctor López (+), por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por la paciencia y amor con la que me instruyeron, por enseñarme a ser un hombre de bien, con principios y valores fundamentados y darme todo lo que estuvo al alcance de sus manos. Gracias, su apoyo fue de vital importancia para cumplir cada una de las metas que me he propuesto, por enseñarme que nada en esta vida es fácil, que hay que luchar y dar más del 100% para conseguir todo lo que se propone, que nada llega por arte de magia, sino por el esfuerzo, amor y dedicación que se le pone a cada cosa que realizamos.

A mi esposa Evelyn Cortez por hacer que este pesado camino se hiciera ligero, por su apoyo, su amistad sincera y sus ocurrencias, por estar en los buenos y malos momentos.

A la Ingeniera MSc. Maritza Ureña, tutora del trabajo de titulación por sus conocimientos, asesoría y por todo el tiempo brindado para poder desarrollar el presente trabajo de titulación.

A la Universidad Técnica de Ambato por abrirme las puertas para poder seguir con mis estudios y convertirme en un excelente profesional.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de titulación a mi viejito Héctor Polivio López (+), a pesar de que no estés junto a mí, fuiste el mayor sustento y ejemplo de vida, siempre me apoyaste en mi superación personal y profesional, tus consejos de cada día me permitieron seguir adelante cosechando los objetivos propuestos. No entiendo a la vida porque te perdí, a pesar que fuiste un excelente padre, amigo y esposo, todavía se me hace duro asimilar que no estás conmigo para abrazarte y decirte que me perdones, pero a la vez muy feliz porque ya descansas junto al todopoderoso en el cielo, de seguro ya te encontraste con mi abuelita, como bien sabemos que solo te adelantaste para ser la luz que me brillará todos los días, y cuando nos encontremos te podre conversar todas las cosas que sigo pasando y más las metas que de seguro seguiré consiguiendo con esfuerzo y dedicación como tú me decías.

Como no acordarme cuando me corregías por las cosas malas que cometía, pero gracias a ello soy una gran persona de muchos valores y virtudes, siempre tus consejos han servido para salir victorioso de todos los obstáculos que la vida me presenta. De seguro te sentirás orgulloso y feliz al verme conseguir un título de cuarto nivel y más en la Universidad Técnica de Ambato donde fue tu segunda casa.

PAPI TETO, serás ese ángel que siempre cuidara mis pasos que doy diariamente y prometo seguir adelante.

TE AMO PAPI TETO

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS METÁLICAS

Tema: “ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSH OVER) DE LOS TALLERES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA Y DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL, CON AISLADORES SÍSMICOS, UBICADAS EN EL CAMPUS HUACHI DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”.

AUTOR: Ing. Byron Leonardo López Sánchez

DIRECTORA: Ing. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre, MSc.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Trabajo de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

FECHA: Marzo 28, 2022

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo de investigación presenta un análisis comparativo del comportamiento estructural de una estructura convencional y otra con la implementación de aisladores sísmicos, los cuales son dispositivos que permiten al edificio deformarse elásticamente y disipar la energía durante la ocurrencia de sismos de magnitudes considerables.

Las estructuras analizadas fueron los talleres de las facultades de: Ingeniería Civil y Mecánica e Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial y se clasifican como especiales de acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015), y presentan un sistema estructural de pórticos especiales sismos resistentes de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadores, además son utilizadas como laboratorios para el área de producción y como centro de educación superior.

Como primer estudio se realizó el análisis lineal de las estructuras para verificar su estado actual analizando su periodo de vibración, desplazamientos y derivas

permisibles, luego se realizó el análisis estático no lineal con el fin de determinar su desempeño sísmico, para luego pasar a predimensionar el sistema de aislación. Se diseñó tomando como prioridad la norma ASCE/SEI 7-10, las cargas muertas del edificio más un 30 por ciento de la carga viva que se encuentra por encima del sistema de aislamiento y en base a la información que proporciona el fabricante. Se debe tomar en cuenta que existe una gran cantidad de opciones de dispositivos anti sísmicos para el mejoramiento del desempeño y el comportamiento de una estructura, en este caso de estudio se optó por el aislador elastomérico de núcleo de plomo (LRB). Posteriormente se verificaron todos los límites establecidos como son las derivas, cortantes y desplazamientos tomando en cuenta las disposiciones de la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Para el taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica con base aislada las derivas de piso se redujeron en un 64 por ciento a comparación de la estructura sin aislamiento, para el cortante basal y desplazamientos horizontales una reducción del 73 y 51 por ciento respectivamente, de la misma forma para el taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial las derivas de piso, el cortante y el desplazamiento se redujeron en un 69, 74 y 63 por ciento respectivamente.

Descriptorios: Análisis sísmico, aisladores sísmicos, comportamiento estructural, cortante basal, desempeño sísmico, derivas de piso, espectro de diseño, riesgo sísmico, sismo máximo, vulnerabilidad sísmica.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS
METÁLICAS**

THEME:

NONLINEAR STATIC ANALYSIS (PUSH OVER) OF THE WORKSHOPS OF THE FACULTY OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING AND THE FACULTY OF ELECTRONIC AND INDUSTRIAL SYSTEMS ENGINEERING, WITH SEISMIC ISOLATORS, LOCATED IN THE HUACHI CAMPUS OF THE TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO.

AUTHOR: Ing. Byron Leonardo López Sánchez

DIRECTED BY: Ing. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre, MSc.

LINE OF RESEARCH: Degree work with applied research and/or development components

DATE: March 28, 2022

EXECUTIVE SUMMARY

This research work presents a comparative analysis of the structural behavior of a conventional structure and another with the implementation of seismic isolators, which are devices that allow the building to deform elastically and dissipate energy during the occurrence of earthquakes of considerable magnitude.

The structures analyzed were the workshops of the faculties of: Civil and Mechanical Engineering and Systems, Electronics and Industrial Engineering and they are classified as special according to the Ecuadorian Construction Standard (NEC 2015), and present a structural system of special earthquake resistant gantries made of hot rolled steel with stiffening diagonals, they are also used as laboratories for the production area and as a higher education center.

As a first study, a linear analysis of the structures was performed to verify their current state by analyzing their vibration period, displacements and permissible drifts, then a non-linear static analysis was performed to determine their seismic performance, and then the isolation system was pre-dimensioned. It was designed taking as a priority the ASCE/SEI 7-10 standard, the dead loads of the building plus 30 percent of the live load above the isolation system and based on the information provided by the manufacturer. It should be taken into account that there are a large number of options of anti-seismic devices to improve the performance and behavior of a structure; in this case study, the lead core elastomeric isolator (LRB) was chosen. Subsequently, all the established limits such as drifts, shear and displacements were verified, taking into account the provisions of the Ecuadorian Construction Standard.

For the workshop of the Faculty of Civil and Mechanical Engineering with isolated base, the floor drifts were reduced by 64 percent compared to the structure without isolation, for the basal shear and horizontal displacements a reduction of 73 and 51 percent respectively, likewise for the workshop of the Faculty of Systems, Electronics and Industrial Engineering the floor drifts, shear and displacement were reduced by 69, 74 and 63 percent respectively.

Keywords: Seismic analysis, seismic isolators, structural behavior, basal shear, seismic performance, floor drifts, design spectrum, seismic risk, maximum earthquake, seismic vulnerability.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

En la actualidad, la realización de una evaluación estructural es primordial por ello, se realizó un análisis estático no lineal empleando un software de elementos finitos (ETABS). Adicionalmente, se revisó cada aspecto relacionado con el diseño y estado actual de los talleres de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, cumpliendo la norma ecuatoriana NEC 2015 y normas internacionales como son la AISC 360, FEMA 440 y la AISC 358.

Esto se hace necesario debido a que el Ecuador es un país de alta peligrosidad sísmica debido a su ubicación cercana al borde de subducción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, además cuenta con diversas fallas geológicas de tipo local que han llegado a originar terremotos de gran magnitud a lo largo de la historia sísmica del país resumida en registros existentes de 460 años de destrucción con altos índices de mortalidad.

Artículos científicos relacionados al tema fueron también la base de este estudio. Por otro lado, se cotejó los planos estructurales con las estructuras in situ y se realizó ensayos no destructivos como es la inspección y medición de los cordones de soldadura donde consiste comprobar que la calidad de los cordones y que se ajusten a los detalles estructurales, tintas penetrantes para detectar discontinuidades expuestas a la superficie, ensayo ultrasonido permite inspeccionar componentes soldados hasta monitorizar la corrosión, ensayo con el martillo esclerométrico para determinar la resistencia a la compresión del hormigón, y el ensayo del SPT para obtener el tipo de suelo; lo que permitió comprobar el estado actual de los talleres para realizar una evaluación estructural adecuada y verificar los requerimientos que la norma exige.

El aislador sísmico empleado para llevar a cabo esta simulación fue el aislador elastomérico de núcleo de plomo (LRB) son aisladores con capas intercaladas de neopreno y placas de acero que tienen en su centro un núcleo cilíndrico de plomo, las placas de acero aportan rigidez vertical para resistir las cargas verticales y el núcleo de plomo proporciona rigidez horizontal para impedir el movimiento durante cargas

de servicio y disipar energía en forma de calor al deformarse de manera plástica durante acciones.

Mediante la información recolectada se simuló las estructuras mediante ETABS 2018, y se analizó las juntas soldadas de las conexiones precalificadas construidas en los talleres (conexión de patín sodado sin refuerzo y alma soldada (WUF-W)), en función a la norma ANSI/AISC 358-16.

Finalmente, se pudo comparar el comportamiento estructural de los talleres de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial actualmente construidos bajo un sistema de pórticos especiales sísmos resistentes de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadores y conexiones precalificadas (conexión de patín sodado sin refuerzo y alma soldada (WUF-W)) con el comportamiento de las mismas estructuras pero con la inclusión de aisladores elastoméricos de núcleo de plomo (LRB)

1.2. Justificación

El Ecuador se localiza en una zona geográfica donde existe alto riesgo de actividad sísmica y volcánica, ocasionando que las edificaciones y los habitantes que residen en el sean vulnerables a estos sucesos. El 16 de abril del 2016 ocurrió un sismo de magnitud 7.8 causando grandes daños en las provincias de Manabí y Esmeraldas. Ocasiono una gran cantidad de víctimas y una extensa destrucción en la Costa norte y centro de Ecuador, se contabilizaron alrededor de 700 personas fallecidas, más de 7000 heridos, 22000 personas refugiadas, millares de edificaciones destruidas o inhabitables y pérdidas económicas del alrededor de tres mil millones de dólares [1]. Esto es la razón por lo que se debe buscar alternativas que se puedan aplicar a los modelos y diseños estructurales que disminuyan el daño en las estructuras a causa de un viento sísmico, una alternativa es la utilización de aisladores sísmicos en nuestras estructuras los cuales consiguen desacoplar la estructura del terreno colocándose estratégicamente en partes específicas de la estructura, los cuales, en un evento sísmico, proveen a la estructura la suficiente flexibilidad para diferenciar la mayor cantidad posible el periodo natural de la estructura con el periodo natural del sismo, evitando que se

produzca resonancia, lo cual podría provocar daños severos o el colapso de la estructura.

En la ciudad capital existen estructuras con aisladores sísmicos las mismas que se hallan ubicadas en el Campus del Valle de los Chillos, Cantón Rumiñahui, Provincia de Pichincha. Se planificó la construcción de 23338 metros cuadrados, en 8 Bloques Arquitectónicos, de ellos 6 tienen aisladores sísmicos de triple péndulo de fricción FPT, la investigación realizada por Aguiar espera que estas experiencias sean de utilidad para los Proyectistas Estructurales y así haber aportado al desarrollo de la Ingeniería Sismo Indiferente por la presencia de los aisladores sísmicos de diferentes tipos. [2]

Es fundamental tener y aplicar criterios necesarios que conlleven al análisis estático no lineal de los talleres de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, con aisladores sísmicos, mediante un software especializados de elementos finitos (ETABS), basado normativas de construcción vigente, debido a la carencia de estudios y evaluaciones del momento de ocurrencia de una actividad sísmica. Se implementa un análisis estático no lineal, que permite comprender de una manera aproximada la forma que trabajan las estructuras cuando se ven sometidas a movimientos sísmicos y sobrepasan su capacidad elástica.

Es relevante saber que en el país los talleres industriales no cumplen a cabalidad con las normas mínimas de la construcción vigente, con los resultados obtenidos del análisis se pretende comparar los talleres sin aisladores sísmicos y con aisladores para determinar el desempeño estructural y recomendar a los ingenieros estructurales que es de suma importancia el uso de aisladores de base, debido a que vivimos en una zona altamente sísmica y pertenecemos al cinturón del fuego del pacífico.

Finalmente, este trabajo de investigación resultará útil debido al desempeño de los talleres ante eventos telúricos del suelo en nuestro país, es necesario realizar un buen diseño resistente cumpliendo con los parámetros requeridos por la normativa vigente y además la importancia que resulta utilizar aisladores sísmicos en las edificaciones de acero puesto que mejora el comportamiento de la estructura y así podemos salvaguardar la vida de todas las personas que trabajan en los talleres industriales.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Evaluar la capacidad estructural de los talleres de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial con aisladores sísmicos, mediante análisis modal estático no lineal (Pushover).

1.3.2. Específicos

- Identificar la configuración de los elementos estructurales para establecer sus secciones y propiedades.
- Analizar con un software especializado los talleres sin aisladores y con aisladores sísmicos.
- Analizar mediante PUSHOVER (análisis estático lineal y no lineal) el comportamiento de los talleres para encontrar los esfuerzos, desplazamientos y derivas máximas permisibles.

CAPÍTULO II

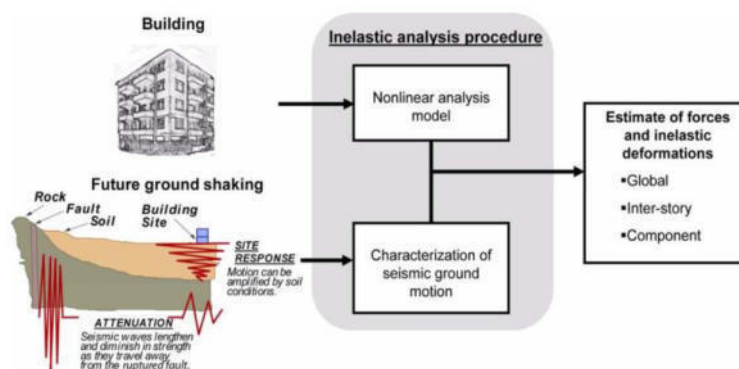
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

2.1. Marco Teórico

2.1.1 Descripción general de los procedimientos inelásticos

Para la evaluación sísmica y el diseño de adecuaciones de edificaciones existentes, además para el diseño de nuevas construcciones se utiliza procedimientos de análisis inelásticos con el objetivo de predecir el comportamiento que se espera de la estructura bajo efectos sísmicos, identificar principalmente en términos de daño que se producir en los componentes estructurales y no estructurales. Los procedimientos de diseño y análisis tradicionales que se basan en técnicas elásticas lineales pueden predecir el rendimiento de una manera implícita. Por lo contrario los procedimientos de análisis inelásticos estiman directamente la magnitud de las distorsiones inelásticas y las deformaciones. [3]

Figura 1: Representación esquemática del uso de procedimientos de análisis inelásticos



Fuente: FEMA 440

Efectos No lineales

El comportamiento real de las estructuras es afectado por diferentes tipos de fenómenos físicos que introducen efectos no lineales. Los aspectos de estos efectos se dividen en tres principales:

- **No linealidad debido al material:** se basa en el resultado del comportamiento no lineal de los materiales estructurales incluyendo los efectos de fluencia del acero, la fluencia lenta (creep), retracción o contracción por fraguado, degradación y fisuración del hormigón, etc. A partir de un nivel de deformaciones todos los materiales de menos a mayor medida presentan un comportamiento no lineal. [4]

- **No linealidad geométrica:** se presenta cuando los desplazamientos de la estructura son necesariamente grandes para alterar las ecuaciones de equilibrio y de compatibilidad. Por lo que las ecuaciones de desplazamiento y fuerzas deben establecerse cuando la estructura presenta la posición deformada resultando no lineales las relaciones de compatibilidad entre el desplazamiento y deformaciones. [4]
- **No linealidad de contacto o de contorno:** efectos producidos por el contacto entre sólidos deformables o rígidos que interactúan entre sí. Como ejemplo se puede mencionar una estructura formada por un pórtico de acero con relleno o también cuya fundación se levanta parcialmente del suelo. Además, se puede incluir efectos no lineales por impacto cuando dos estructuras que se encuentran muy próximas vibran por efectos del viento o sismo chocan entre sí. [4]

Comportamiento sísmico de las estructuras de acero

Las investigaciones realizadas en los últimos años han demostrado para obtener un comportamiento dúctil de las estructuras es de gran importancia integrar adecuadamente ductilidad no solo a nivel del material, sino en los miembros que constituyen el sistema de columnas, riostras, vigas y conexiones. Para cual se debe conocer e identificar las condiciones que pueden producir mecanismos de falla frágil para proponer estrategias de diseño para que la estructura presente un comportamiento con una respuesta estable y con una mejor capacidad de disipación de energía. Las especificaciones de diseño integran especificaciones en aquellas zonas donde se produzcan deformaciones plásticas como son las rotulas plásticas en vigas, zonas de fluencia por corte o tracción. [4]

Los daños afectan a distintos tipos de estructuras de acero, pero se presenta problemas más sorprendentes en los pórticos resistentes a momento sin arriostramientos, en el cual presenta un inadecuado comportamiento de las conexiones principalmente en la unión de viga – columna con la presencia de diferentes tipos de falla por fractura de placas y de soldaduras.

Figura 2: Fractura en una placa de base de columna y fractura de la soldadura de penetración

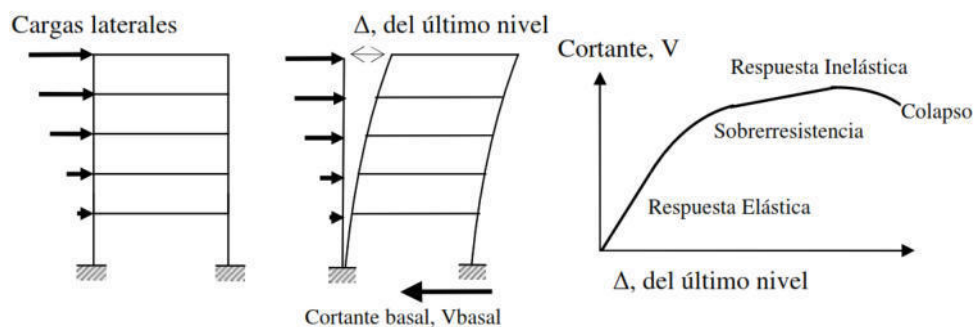


Fuente: Crisafulli (2018), Diseño sismorresistente de construcciones de acero.

2.1.2 Análisis Estático No Lineal (PUSH OVER)

En el documento FEMA 440 (Federal Emergency Management Agency) se describe el procedimiento de análisis estático no lineal como un aproximado del estado no lineal de la respuesta de una estructura bajo efectos de carga sísmica. El procedimiento consiste en destinar una fuerza lateral al modelo previamente integrando las no linealidades de una estructura, dicha fuerza se le aplica de una forma progresiva aumentando hasta obtener el desplazamiento objetivo o hasta que la estructura llegue al colapso bajo la combinación de las cargas y los efectos P-delta. Del análisis se obtiene el gráfico del cortante basal versus el desplazamiento en el último nivel. [5] Este análisis se utiliza con diversos fines las cuales se menciona: muestra las formas indeseables de formación de mecanismos inelásticos, evaluar la capacidad máxima que tiene la estructura para deformarse, permitir evaluar el daño producido por el aumento de deformaciones y permitir una correcta estimación de las deformaciones máximas con distintos niveles de sismos. [5]

Figura 3: Secuencia del proceso de análisis pushover



Fuente: S. Arango, Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño estructural

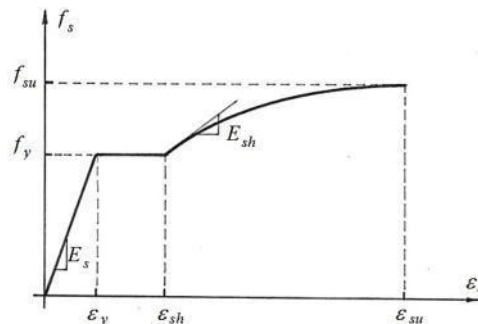
2.1.2.1 Modelos constitutivos del comportamiento de los materiales

Para la simulación del comportamiento físico de los materiales es de gran importancia tener modelos que relaciona el esfuerzo y la deformación que integra las propiedades del material. Los modelos constitutivos se definen como expresiones matemáticas que representan la relación esfuerzo de formación de un material. [6]

Modelos constitutivos del Acero

Para considerar el comportamiento mecánico del acero se lo realiza mediante el modelo propuesto por Park (1988), donde presenta tres zonas: la primera con el comportamiento lineal representado como el módulo de elasticidad del material “Es”, la segunda zona que representa la meseta de fluencia donde la deformación se incrementa a tensión constante y la tercera zona inicia cuando el material aumenta las tensiones a consecuencia de la reorganización de la estructura interna, las tres zonas se presenta en la siguiente figura: [7]

Figura 4: Modelo constitutivo para acero



Fuente: D. Bakaleiko, Técnicas de simulación numérico para estructuras.

2.1.2.2 Mecanismo de colapso en un Marco de momento

En el diseño por Capacidad considera un diseño donde el ingeniero estructural espera que se presenta eventualmente la falla en zonas específicas sin que se afecte a todo el sistema estructural. La cual implica que todo sistema estructural presenta dos tipos de elementos estructurales: [8]

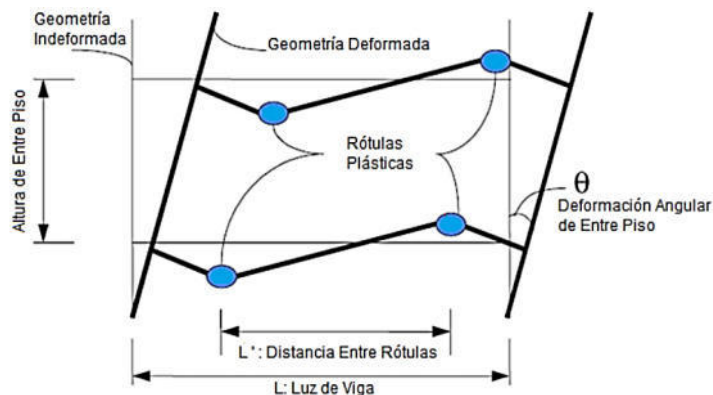
- **Elementos Fusibles:** son los elementos que representan las zonas más débiles escogidas y diseñadas para que primera instancia alcancen la falla. Para la selección del elemento se lo realiza con la finalidad de presentar la falla de tipo

dúctil y no comprometa la estabilidad global de la estructura, de tal forma es en estas zonas donde se disipa de una forma controlada la energía ocasiona por eventos sísmicos. [8]

- **Elementos Elásticos:** corresponde a los demás elementos que integra el sistema estructural, los que no se espera que se plastifiquen si se elige y dimensiona adecuadamente el mecanismo de colapso.

En la siguiente figura se presenta un entrepiso de un marco donde la deformación inelástica se presenta en las vigas con la formación de rotulas plásticas, la cual es una zona ubicada cerca de la cara de la columna. Para que se presente este comportamiento se necesita controlar resistencia y rigideces de vigas, columnas y unión de esta, de forma que se garantiza que la falla se presente en las zonas anteriormente establecidas en las vigas. [8]

Figura 5: Comportamiento Inelástico de Marcos con Rótulas Plásticas en Vigas

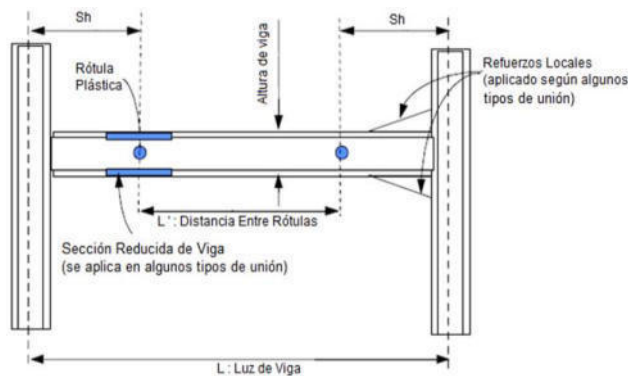


Fuente: C. Aguirre, Diseño de edificios de acero estructurados en base a marcos rígidos especiales.

La demanda de deformación no lineal de corte y de flexión en las estructuras de marco pueden llegarse a alcanzar valores altos que intensifiquen el desarrollo de rotulas plásticas. En el caso que se llegue a formar una gran cantidad de rotulas plásticas en el marco, se genera un mecanismo de deformación lateralmente produciendo finalmente un estado de colapso inicial. Este comportamiento presenta una significativa disipación de energía y severos daños potenciales en las zonas más demandadas de los elementos. Un modo de falla que no se desea es la formación de rotulas plásticas en columnas ya que puede ocurrir un mecanismo de piso además de ser un mecanismo de una baja capacidad de disipación de energía. [8]

Viga Débil – Columna Fuerte: se establece con la finalidad de prevenir la rotulación de las columnas antes que se presente la rotulación en las vigas y prevenir de esta forma la formación de mecanismos de colapso de piso. Las rotulas platicas en vigas de acero poseen una longitud definida, generalmente del orden de la mitad de la altura de la viga, por lo tanto, se ubican por lo menos a una distancia igual a dicho largo de rotula plástica desde la cara de la columna. La siguiente figura presenta la ubicación, la distancia “Sh” identifica la ubicación de la rótula plástica respecto al eje de la columna. [8]

Figura 6: Ubicación de la Formación de Rótulas Plásticas.



Fuente: C. Aguirre, Diseño de edificios de acero estructurados en base a marcos rígidos especiales.

2.1.2.3 Capacidad

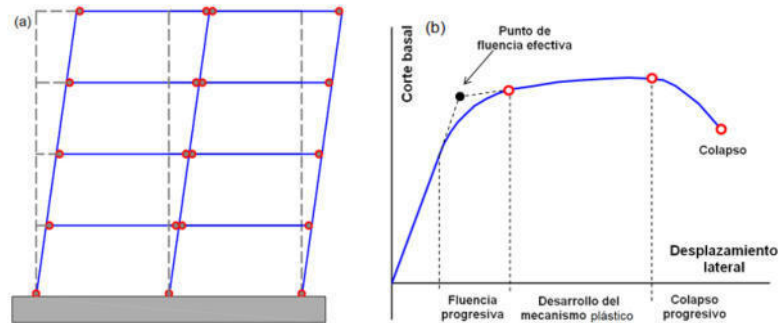
La capacidad de una estructura es representada por la resistencia y la capacidad que tiene para deformarse cada uno de los componentes estructurales individualmente. Para la determinación de las capacidades después del límite elástico se utilizan procedimientos mediante un análisis no lineal. El cual logra una aproximación a un diagrama fuerza desplazamiento, el análisis toma en cuenta la resistencia reducida por los elementos en proceso de fallar, este procedimiento incrementa progresivamente la fuerza hasta que la estructura se inestabilice y alcance un límite predeterminado llegando al colapso. [9]

2.1.2.3.1 Curva de Capacidad

La curva de capacidad de una estructura se representa por la curva pushover (análisis estático no lineal). Se la grafica con el cortante basal y el desplazamiento en el nivel más alto del edificio. Para determinar series de iteraciones del análisis estático y

obtener la curva de capacidad se emplea procesos computacionales [10]. En la siguiente figura se presenta la curva de capacidad donde en el eje de las ordenadas se representa el cortante basal y el eje de abscisas se representa el desplazamiento lateral en el último nivel de la estructura.

Figura 7: Comportamiento estructural - Curva de Capacidad

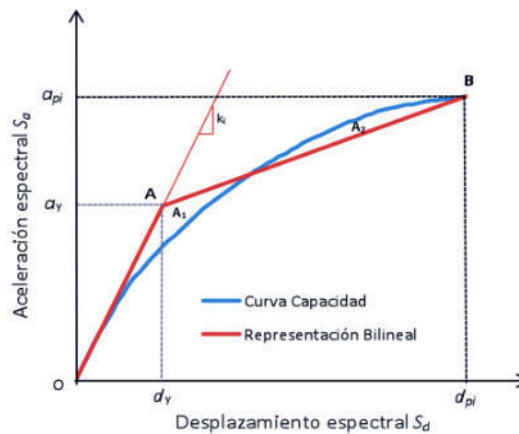


Fuente: Crisafulli (2018), Diseño sismorresistente de construcciones de acero.

2.1.2.3.2 Representación bilineal de la curva de capacidad

La representación bilineal de la curva de capacidad se utiliza con la finalidad de estimar el espectro de demanda reducido denominado también espectro inelástico. Para esta representación se necesita establecer el punto de cedencia y el punto de agotamiento de la capacidad o el desempeño de la edificación. [11]

Figura 8: Representación bilineal de la curva de capacidad



Fuente: Medina, R. y Music, J. (2018). Determinación del nivel de desempeño de un edificio habitacional.

2.1.2.4 Demanda

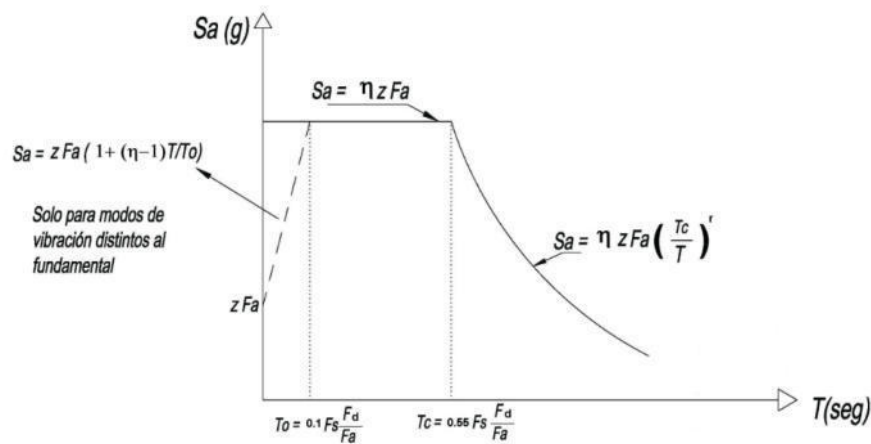
La demanda es el movimiento del suelo durante un sismo. Para el análisis no lineal es más sencillo y directo usar un grupo de desplazamientos laterales para el diseño. Para una estructura establecida la demanda de desplazamiento es representada como la respuesta máxima que se espera de una estructura durante el movimiento de suelo. De las normativas se obtiene el espectro de diseño que relaciona la aceleración de respuesta y el periodo fundamental de la estructura. [10]

2.1.2.4.1 Caracterización del movimiento sísmico del suelo

Espectro elástico horizontal de diseño en aceleraciones

En el país la normativa vigente es la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC - 2015 en el capítulo de peligro sísmico diseño sismo resistente proporciona el espectro de respuesta elástico de aceleraciones S_a , el cual representa la fracción de la aceleración de la gravedad en función del nivel de sismo de diseño. Para obtener el espectro se toma en cuenta los siguientes parámetros: el factor de zona sísmica Z , el tipo de suelo del sitio de emplazamiento de la estructura, la consideración de los valores de los coeficientes de amplificación de suelo F_a , F_d , F_s . [12]

Figura 9: Espectro sísmico elástico de aceleraciones sismo de diseño



Fuente: NEC-SE-DS, 2015 - Peligro sísmico

Donde:

η : Razón entre la aceleración espectral S_a ($T=0.1s$) y el PGA para el periodo de retorno seleccionado. Depende de la región:

η : 1.80 Provincias de la Costa (excepto Esmeraldas)

η : 2.48 Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos

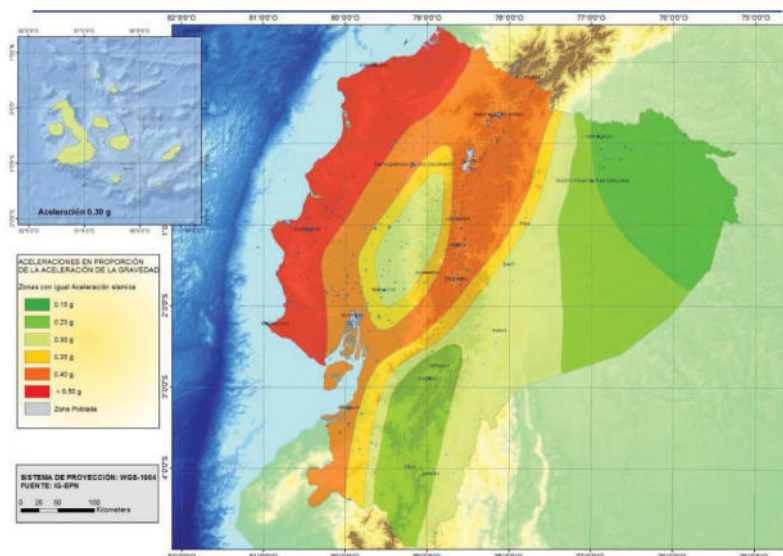
η : 2.60 Provincias del Oriente

- Fa: Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto.
- Fd: Coeficiente de amplificación del suelo de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca.
- Fs: Coeficiente de amplificación del suelo, considerando el comportamiento no lineal del suelo y la degradación del periodo del sitio.
- Sa: Espectro de respuesta elástico de aceleraciones dependientes de periodo o modo de vibración de la estructura.
- T: Periodo fundamental de vibración de la estructura.
- To: Periodo de vibración límite inferior en el espectro sísmico elástico de aceleraciones.
- Tc: Periodo de vibración límite superior en el espectro sísmico elástico de aceleraciones.
- Z: Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración.
- r: Fator usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores depende de la ubicación geográfica del proyecto.
- r: 1 para todos los suelos, con excepción del suelo tipo E
- r: 1.5 Para tipo de suelo E.

2.1.2.4.2 Zonificación sísmica y curvas de peligro sísmico

La Norma Ecuatoriana de la Construcción establece seis zonas sísmicas del Ecuador, que se caracteriza por el valor del factor de zona Z, que se representa en un mapa de zonificación sísmica para diseño que es el resultado del estudio sísmico para un 10% de excedencia en 50 años, incluyendo una saturación de 0.50 g de los valores de aceleración sísmica en roca en el litoral ecuatoriano que se ubica en la zona VI. [12]

Figura 10: Ecuador, zonas sísmicas y valor del factor de zona Z



Fuente: NEC-SE-DS, 2015 - Peligro sísmico

Tabla 1: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

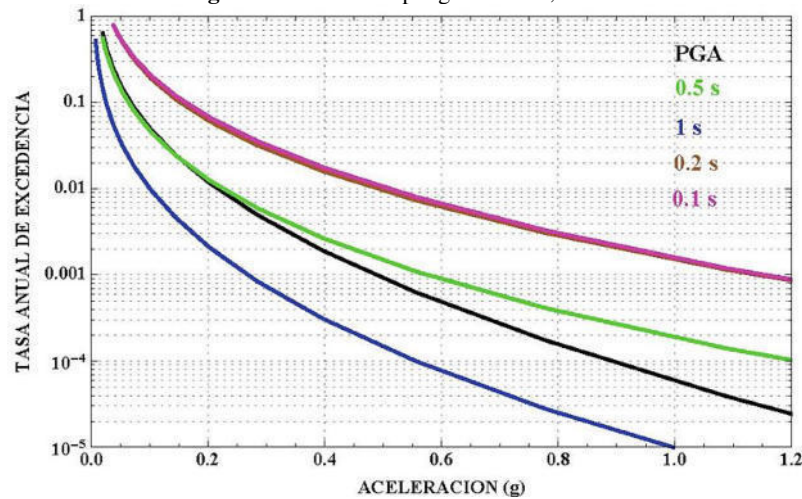
| Zona sísmica | I | II | III | IV | V | VI |
|-------------------------------------|------------|------|------|------|------|----------|
| Valor factor Z | 0.15 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | ≥ 0.50 |
| Caracterización del peligro sísmico | Intermedia | Alta | Alta | Alta | Alta | Muy alta |

Fuente: NEC-SE-DS, 2015 - Peligro sísmico

Curva de peligro sísmico

Es importante utilizar diversos niveles de peligro sísmico para el diseño de estructuras de ocupación especial, estructuras esenciales y otras estructuras diferentes a las de edificación, con la finalidad de verificar el cumplimiento de los diferentes niveles de desempeño. Para la definición de los diversos niveles de aceleración sísmica que se espera en roca se presenta en las curvas de peligro sísmico probabilista para cada capital de provincia. [12]

Figura 11: Curvas de peligro sísmico, Ambato.



Fuente: NEC-SE-DS, 2015 - Peligro sísmico

2.1.2.4.3 Niveles de amenaza sísmica

Tener conocimiento correcto de la amenaza sísmica presente, ayuda definir como la acción con la cual se debe considerarse en el diseño de nuevas estructuras como también el lugar donde se va a construir, de tal manera que las especificaciones de los emplazamientos sean adecuados, alejados de las fallas, evitando la presencia de rellenos, las zonas con presencia de asentamientos o deslizamientos y con altos niveles de licuefacción. La Norma Ecuatoriana de la Construcción para la verificación de

desempeño estable los niveles de amenaza sísmica, presenta 4 niveles las cuales se clasifican los sismos según los niveles de peligro y periodo de retorno medio como se presenta en la siguiente tabla: [12]

Tabla 2: Niveles de amenaza sísmica

| Nivel de sismo | Sismo | Probabilidad de excedencia en 50 años | Período de retorno T_r (años) | Tasa anual de excedencia ($1/T_r$) |
|----------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Frecuente (menor) | 50% | 72 | 0.01389 |
| 2 | Ocasional (moderado) | 20% | 225 | 0.00444 |
| 3 | Raro (severo) | 10% | 475 | 0.00211 |
| 4 | Muy raro* (extremo) | 2% | 2 500 | 0.00040 |

Fuente: NEC-SE-DS, 2015 - Peligro sísmico

Se verificará el correcto desempeño sísmico en el rango inelástico para:

- Estructuras de ocupación especial: nivel de prevención de colapso (No colapso) ante un sismo muy raro con un periodo de retorno de 2500 años (probabilidad anual de excedencia 0.0004). [12]
- Estructuras esenciales: debe cumplir un nivel de seguridad de vida (limitación de daño) para un sismo raro (severo) con un periodo de retorno de 475 años (probabilidad anual de excedencia 0.00211); y un nivel de prevención de colapso (No colapso) para un sismo muy raro (extremo) con un periodo de retorno de 2500 años (probabilidad anual de excedencia 0.0004). [12]

2.1.2.5 Desempeño

Todas estructuras poseen la capacidad de deformación después del rango elástico, la capacidad de deformarse inelásticamente depende del sistema estructural que se analice, una estructura de acero aporticada con conexiones rígidas poseen más capacidad de deformación que una con un sistema con elementos de albañilería. Independientemente del sistema estructural se presenta ciertos niveles de desempeño que se relacionan con el daño que tiene una estructura durante un evento sísmico. [13]

2.1.2.5.1 Niveles de desempeño

El documento VISION 2000 define cuatro objetivos de desempeño que corresponde con diferentes niveles de daño en las estructuras. Estos objetivos se definen en forma cualitativa:

- **Totalmente operativo (TO):** las estructuras siguen en servicio continuo, sin presencia de daño en elementos estructurales y no estructurales. Presenta una respuesta prácticamente elástica. [4]
- **Operativo (O):** presencia de daño ligero. La mayor parte de servicios y actividades siguen en funcionamiento luego del evento sísmico. En algunos elementos estructurales presentan fluencia o fisuración menor.
- **Seguridad de vidas (SV):** presencia de daño moderado. Existe una reducción de la rigidez y resistencia, pero la estructura se mantiene estable. La edificación puede quedarse fuera de servicio y se procede a su evacuación. Es posible ejecutar trabajos de reparación, pero con costo altos. [4]
- **Prevención de colapso:** presencia de daño severo, llegando a evitar el colapso. Los elementos no estructurales pueden llegar a caer o fallar. Presencia de deformaciones remanentes apreciables. [4]

Tabla 3: Niveles de Desempeño de un Edificio

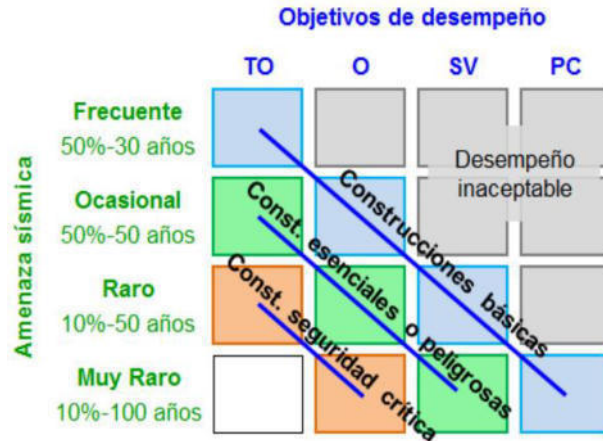
| Elementos no estructurales | Elementos estructurales | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------|
| | SP-1 Ocupación Inmediata | SP-2 Control de Daño | SP-3 Seguridad de Vida | SP-4 Seguridad Limitada | SP-5 Estabilidad Estructural | SP-6 No Considerado |
| NP-A Operacional | 1-A Operacional | 2-A | NR | NR | NR | NR |
| NP-B Ocupación Inmediata | 1-B Ocupación Inmediata | 2-B | 3-B | NR | NR | NR |
| NP-C Seguridad | 1-C | 2-C | 3-C Seguridad de Vida | 4-C | 5-C | 6-C |
| NP-D Amenaza Reducida | NR | 2-D | 3-D | 4-D | 5-D | 6-D |
| NP-E No considerado | NR | NR | 3-E | 4-E | 5-E Estabilidad estructural | No Aplicable |

Fuente: ATC- 40, Evaluación sísmica y rehabilitación de edificios de hormigón.

Los niveles de amenaza sísmica representados en forma probabilista, para un mejor análisis se correlaciona por medio de una matriz con el daño estructural y el desempeño, definido determinísticamente y de forma cualitativa. En la siguiente figura se muestra la matriz que considera tres tipos de construcciones clasificando según la importancia o funcionalidad, por ejemplo, para las construcciones básicas o usuales se

espera que ante un sismo frecuente la cual se mantenga totalmente operativa, mientras para un sismo muy raro se busca evitar el colapso. [4]

Figura 12: Relación entre amenaza sísmica y niveles de desempeño, según VISION 2000



Fuente: Crisafulli (2018), Diseño sismorresistente de construcciones de acero.

2.1.2.6 Punto de desempeño

El punto de desempeño sísmico de la edificación de calcula cuando la capacidad es similar a la condición de la demanda sísmica a la que se expone. Se lo realiza gráficamente cuando el punto de intersección entre las curvas de capacidad estructural y la demanda sísmica. El cálculo para la determinación del punto de desempeño es un proceso iterativo hasta poder encontrar las condiciones de superposición de los espectros de capacidad y demanda. [14]

2.1.2.6.1 Estimación de desempeño sísmico de estructuras

Para la evaluación del desempeño sísmico no se establece de manera explícita en la Norma Ecuatoriana de la Construcción por lo que debe utilizar los métodos que establecen las normas internacionales para la verificación del nivel de desempeño de estructuras. [15]

2.1.2.6.2 Métodos de análisis no lineales de espectro capacidad

Para la mejor estimación de la respuesta de toda la estructura en general en su rango inelástico y de la demanda de sus elementos estructurales se la obtiene con los métodos de análisis no lineales. Uno de los métodos que utiliza es el método de espectro capacidad propuesto por el ATC 40 (1996) y el método de linealización equivalente propuesto por la FEMA 440 (2005). [15]

2.1.2.6.3 Método de espectro de capacidad ATC 40

Este método permite determinar de manera gráfica el desempeño sísmico de la edificación a través de la intersección del espectro de demanda con el espectro de capacidad. El procedimiento que se utiliza se detalla a continuación:

1. Con la curva de capacidad obtenida del análisis no lineal se la transforma en un nuevo formato “ADRS” (Acceleration Displacement Response Spectra), la cual se denomina espectro de capacidad donde se representa la aceleración espectral (S_a) con el desplazamiento espectral (S_d).

Para convertir cada punto (V_{oi} , Δn_i) de la curva de capacidad, al cual corresponde un punto (S_{ai} , S_{di}) de espectro de capacidad se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$S_{d_i} = \frac{\Delta n_i}{(\beta_1 \times \phi_{1,n})} \qquad S_{a_i} = \frac{V_{o_i}}{\alpha_1}$$

Donde:

α_1 : Masa modal relacionada al modo fundamental o al primer modo de vibración.

β_1 : Factor de partición asociado al modo fundamental.

$\phi_{1,n}$: Amplitud en el nivel n, de la forma de vibración del modo fundamental.

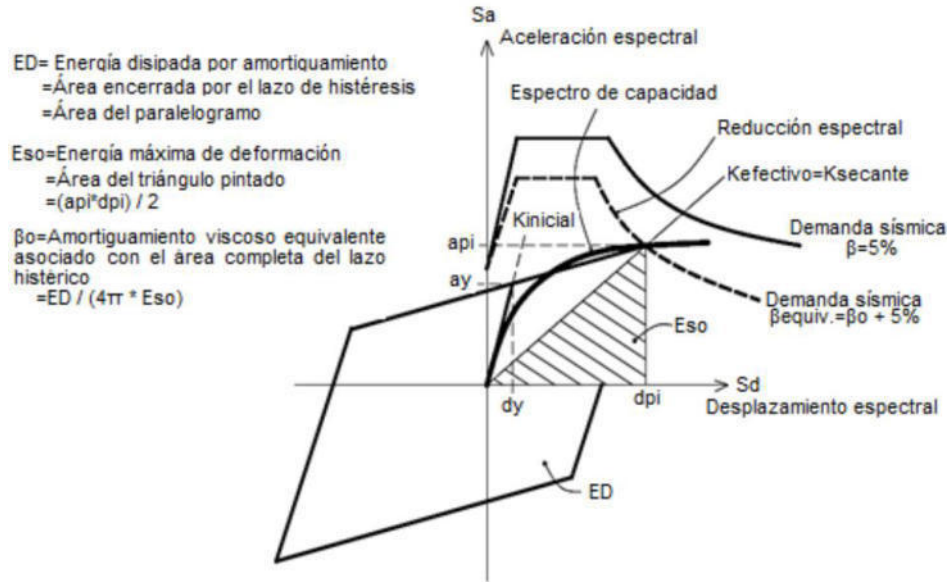
2. El espectro de respuesta se debe transformar a un formato “ADRS” el cual se conoce como espectro de demanda de la misma manera que el paso anterior, donde el amortiguamiento debe ajustarse en función de la capacidad que tiene la estructura para disipar la energía.

Para esta transformación cada punto (S_{ai} , T_i) del espectro de respuesta en el cual T_i es el periodo de vibración en segundos, que corresponde un punto (S_{ai} , S_{di}) del espectro de demanda mediante la siguiente ecuación:

$$S_{d_i} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{a_i} \times g$$

3. Para el cálculo se debe superponer los espectros de capacidad con el espectro de demanda, el punto de intersección de las curvas se le denomina punto de desempeño, correspondiente al modo fundamental de vibración en términos de pseudo - aceleración y pseudo – desplazamiento. [15]

Figura 13: Representación gráfica de la linealización equivalente en el método del espectro de capacidad según el ATC 40

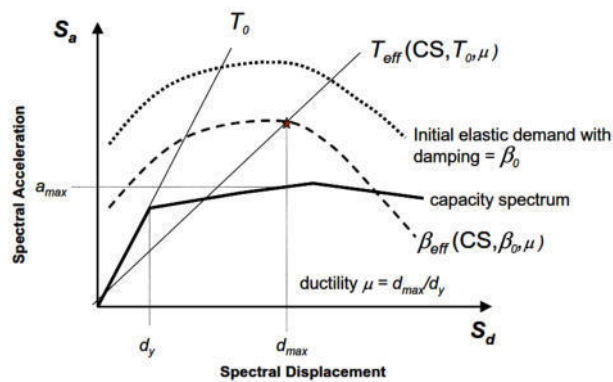


Fuente: FEMA 440, 2005

2.1.2.6.4 Método de espectro capacidad FEMA 440 (Linealización Equivalente)

Este método es equivalente mejorado al método ATC 40, conocido como linealización equivalente como parte del análisis estático no lineal que modela la respuesta inelástica de la edificación. Tiene como objetivo realizar la estimación de la respuesta del desplazamiento del sistema no lineal. La curva de capacidad es la relación fuerza deformación global que se muestra en la siguiente figura se encuentra en formato de espectro de respuesta de aceleración – desplazamiento (ADRS). [15]

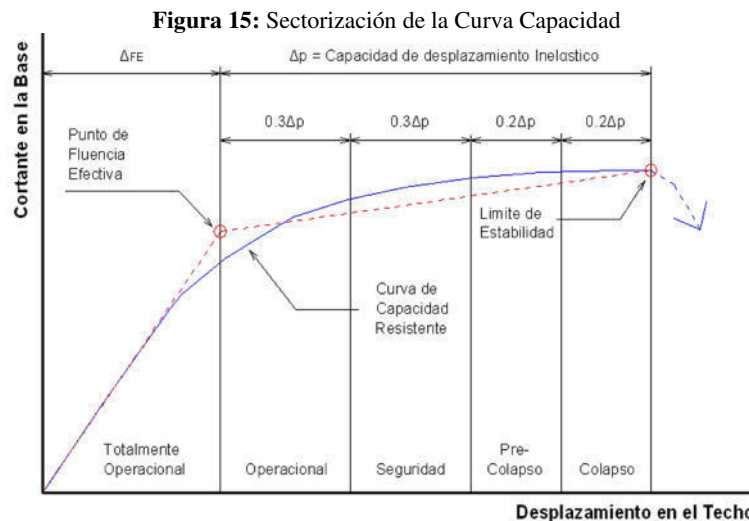
Figura 14: Espectro de respuesta aceleración-desplazamiento (ADRS)



Fuente: FEMA 440, 2005

2.1.2.6.5 Sectorización de la curva de capacidad

El comité VISION 2000 desde un punto de vista estructural establece la división de la curva de capacidad en sectores relacionados con los niveles de desempeño, con el objetivo de simplificar la curva de capacidad en la representación bilineal definiendo el punto de fluencia efectiva. Comportamiento inelástico de la edificación corresponde al segundo tramo del modelo bilineal, el cual está dividido en cuatro sectores con un 30% operacional, el 30% seguridad de vida, 20% pre-colapso y el 20% colapso. [13]



Fuente: Navarro, C. (2006), Desempeño sísmico de un edificio aporticado de seis pisos.

2.1.3 Aislamiento sísmico

Se define como aislador sísmico como un elemento muy flexible que se ubica entre la cimentación y la edificación, con la finalidad de transferir la menor cantidad de movimiento a la estructura, cuando se genera un evento sísmico. En el caso que no exista un aislamiento la planta de fundación transmitirá mayor cantidad de vibraciones a la edificación, al utilizar aislador disminuye las vibraciones. [16]

Los aisladores sísmicos son utilizados e instalados para que los movimientos horizontales de la planta de cimentación producidos por eventos sísmicos no sean transferidos a la estructura. Por lo general los aisladores no se diseñan para aislar los movimientos verticales debido que las vibraciones verticales son generalmente menores que las horizontales y además que las estructuras deben resistir cargas gravitacionales, se diseñan con gran resistencia y rigidez a cargas verticales. [16]

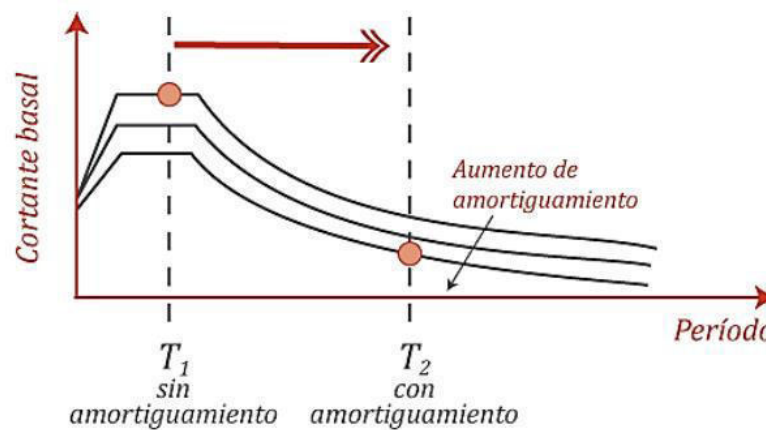
Figura 16: Aislador sísmico de goma



Fuente: Genatios C. (2016), Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras

En la siguiente figura se presenta de una forma esquemática, el cambio de la acción espectral en una edificación con una planta de cimentación fija y con aislamiento. Para la estructura sin aislamiento el periodo de vibración se indica como T_1 , al incorporar el aislador en la estructura, el primer periodo de vibración del sistema incrementa a T_2 , lo que supone una carga sísmica menor, además los espectros de fuerzas disminuyen por el efecto del amortiguamiento inducido por el aislador.

Figura 17: Disminución de la aceleración espectral por incorporación del aislador sísmico.



Fuente: Genatios C. (2016), Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras

2.1.3.1 Tipos de aisladores sísmicos:

La aislación sísmica de base es el método de mayor eficiencia para la protección sísmica de estructuras relativamente rígidas o bajas. Los más utilizados y desarrollados en la actualidad son los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento con o sin núcleo de plomo y los deslizantes o friccionales, se detalla a continuación las características de los diferentes sistemas de aislación sísmica: [17]

2.1.3.1.1. Aisladores Elastoméricos

Los aisladores elastoméricos se conforman por un grupo de láminas planas de elastómeros interpuestas con capas de acero. Dichas láminas se vulcanizan a las capas de acero presentándose secciones circulares o cuadradas. Por medio de esta configuración se alcanza la flexibilidad lateral requerida para permitir el desplazamiento horizontal relativo entre el edificio con aisladores y el suelo. El comportamiento de los aisladores está en función de la amplitud de la deformación, la temperatura, el envejecimiento y la frecuencia del movimiento. [17]

- **Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB)**

Los aisladores tipo LDRB poseen un bajo amortiguamiento entre el 2-5% como máximo, son generalmente utilizados en conjunto con disipadores de energía que proveen amortiguamiento adicional al sistema. Son dispositivos fáciles de fabricar. En la siguiente figura se presenta una vista de un corte de un aislador elastomérico tipo LDRB.

Figura 18: Aislador tipo LDRB



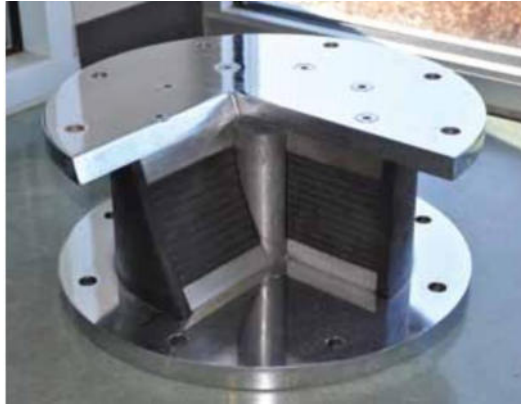
Fuente: Corporación de desarrollo Tecnológico – Cámara Chilena de la Construcción

- **Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)**

Los aisladores con núcleo de plomo (LRB) son aisladores similares a los LDRB con la diferencia que poseen un núcleo de plomo, que se integra en el centro del aislador, el cual aumenta el nivel de amortiguamiento del sistema con niveles próximos al 25-30%. El núcleo de plomo fluye al deformarse lateralmente el aislador durante un evento sísmico, llegando a las deformaciones plásticas, permitiendo disipar la energía

en forma de calor. Cuando termina el evento sísmico la goma del aislador regresa por lo que la estructura retorna a su posición original mientras el núcleo de plomo recristaliza. De esta forma el sistema puede resistir un nuevo evento sísmico. En la siguiente figura se muestra los componentes de un aislador elastomérico tipo LRB. [17]

Figura 19: Aislador tipo LRB



Fuente: Corporación de desarrollo Tecnológico – Cámara Chilena de la Construcción

- **Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB)**

Los HDRB son aisladores elastoméricos cuyas láminas de elastómeros se elaboran integrando elementos como resinas, carbón y aceites, con la finalidad de proporcionar mayor amortiguamiento a la goma niveles cercanos al 10-15%. Este tipo de aislador presenta mayor rigidez para los primeros ciclos de carga. Además, combinan la flexibilidad y disipación de energía en un solo elemento, tiene la característica de ser fácil de fabricar. [17]

Figura 20: Aislador de Base de caucho de alto amortiguamiento



Fuente: Meza R. (2010), Guía de diseño sísmico de aisladores.

2.1.3.1.2. Aisladores Deslizantes

Llamados deslizadores friccionales se componen de una superficie de deslizamiento generalmente de acero inoxidable, donde una placa de acero revestida de politetra fluoro etileno (PTFE) se desliza sobre la que se soporta la estructura. Esta superficie deslizante permite que la estructura se mueva de forma horizontal independiente del suelo. Este dispositivo permite disipar energía mediante la fuerza de rozamiento que produce un evento sísmico. El coeficiente de fricción depende principalmente de variables como la presión de contacto, la temperatura de trabajo, el estado de la superficie de contacto, el envejecimiento y la velocidad de movimiento. Además, estos aisladores requieren mayor cuidado debido a que cualquier modificación en las superficies pueden generar coeficientes de fricción diferente al de diseño. [17]

Figura 21: Apoyo deslizante plano.



Fuente: Universidad Católica del Maule (Chile)

- **Apoyos deslizantes**

Los apoyos deslizantes planos consisten en dos superficies, una que se integra a la estructura y la otra a la fundación, que permite los movimientos de forma horizontal y resistir las cargas verticales de la estructura. Estos dispositivos poseen una capa de material elastomérico con la finalidad de facilitar el movimiento del deslizador durante un evento sísmico. Las superficies deslizantes están fabricadas de acero inoxidable y de un material polimérico de baja fricción. Este tipo de aisladores requieren de disipadores de energía adicionales con el fin de prevenir deformaciones residuales después de un evento sísmico, se integran sistemas típicamente aisladores elastoméricos o con núcleo de plomo. En la siguiente figura se presenta la combinación de un apoyo deslizante con un aislador elastomérico.

Figura 22: Combinación de apoyo deslizante y aislador elastomérico.



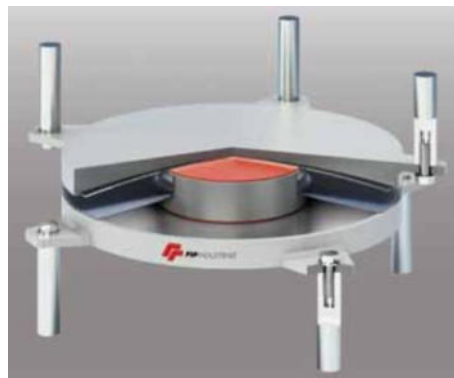
Fuente: BERRY STREET PROJECT (EEUU)

- **Péndulos friccionales (FPS, Friction Pendulum System)**

Los péndulos friccionales cuentan con un deslizador articulado que se ubica sobre una superficie cóncava. A diferencia de los apoyos deslizantes planos estos dispositivos cuentan con la característica y ventaja de ser autocentrantes. Posterior a un evento sísmico la edificación regresa a su posición inicial mediante la geometría de la superficie y a la fuerza inducida por la gravedad. [17]

El péndulo de fricción tiene un deslizador que se articula sobre una superficie de acero inoxidable. La parte del apoyo articulado que se encuentra en contacto con la superficie esférica se rodea de una película de material compuesto de baja fricción, mientras que la otra parte del apoyo articulado es de acero inoxidable. En la siguiente imagen se presenta el esquema de péndulo friccional. [18]

Figura 23: Péndulo friccional.



Fuente: Corporación de desarrollo Tecnológico – Cámara Chilena de la Construcción

2.1.3.2 Ventajas y desventajas del uso de aisladores

Los sistemas de aislamiento sísmico presentan un conjunto de ventajas:

- Procedimientos de análisis simplificados, por la incorporación de elementos flexibles de aislamiento, la estructura pasa a comportarse como un cuerpo rígido.
- La mayor parte de estructuras se analizan como sistemas de tres grados de libertad.
- Al aumentar el periodo fundamental de la estructura presenta reducciones en las aceleraciones espectrales, por lo que también se reduce las fuerzas a las cuales se someten el conjunto estructura-aisladores.[16]
- La presencia de los aisladores en la base genera pequeños desplazamientos entre pisos, esta reducción de los desplazamientos relativos entre los pisos tiene como consecuencia la reducción de las solicitaciones sobre los elementos no estructurales, lo que permite una reducción significativa de los daños en los elementos estructurales y los elementos no estructurales. [16]
- Los miembros estructurales debido a la reducción de las solicitaciones se puede disminuir sus dimensiones siendo una ventaja desde un punto de vista arquitectónico. [16]
- Una de las mayores ventajas es que la operatividad de las estructuras puede recuperarse inmediatamente después de la ocurrir un evento sísmico.

Por lo lado, el uso de los aisladores presenta las siguientes desventajas:

- La presencia de grandes desplazamientos introduce consideraciones especiales como son la de incorporar un piso adicional.
- Los grandes desplazamientos podrían afectar a edificaciones vecinas. Estos daños en estructuras vecinas producen la caída de residuos que podrían introducirse en los espacios necesarios para que la estructura aislada pueda moverse. [16]
- Entre las limitaciones se considera en el espacio alrededor de la edificación que permite el libre movimiento de esta. Dicho espacio debe facilitar el sencillo acceso para la comprobación del estado de los aisladores y su sustitución cuando se presente daño. [16]

- La presencia de aisladores impone un plan de mantenimiento para la estructura, donde debe incluir la verificación del estado de la zona que permite los desplazamientos alrededor de la estructura.[16]

2.2 Ensayos no destructivos para la evaluación de uniones soldadas

Los ensayos no destructivos son métodos que se aplican en la inspección de productos acabados y semiacabados con la finalidad de detectar las heterogeneidades internas y superficiales mediante principios físicos, sin que afecten el funcionamiento de los productos inspeccionados. [19]

Para el control de calidad de las soldaduras debido a la exigencia de la normativa, se describen tres tipos de ensayos no destructivos que puedan evaluar la calidad de la soldadura de elementos estructurales de acero como son la inspección visual, líquidos penetrantes y ultrasonido industrial. [20]

2.2.1 Criterios para la selección del ensayo adecuado

Para seleccionar el método de ensayo no destructivo se debe tener presente que los métodos se pueden complementar uno con otro y que diversas pruebas normalmente deben ser aplicadas en una misma pieza de ensayo. [19]

La selección del método se basa en los siguientes criterios:

- Tipo y origen de discontinuidad a ser detectada
- Proceso de fabricación y tipo de material
- Accesibilidad a la región de ensayo
- Nivel de aceptación deseada
- Disponibilidad de equipos
- Costos.

2.2.2 Inspección visual (VT)

Es uno de los métodos más ampliamente utilizados, por su facilidad de aplicación, dando resultados rápidos y normalmente con un bajo costo. Generalmente, una pieza antes de ser sometida a otros tipos de ensayo no destructivos debe ser inspeccionada visualmente. Los resultados de la inspección visual sirven de apoyo para la posterior aplicación de otras pruebas no destructivas. [19]

La inspección visual consiste en la revisión de la calidad de las superficies, durante y después del proceso de fabricación de las piezas, detectando las discontinuidades en uniones como soldadura. Los instrumentos que se utilizan son galgas de medición, iluminación artificial, flexómetro, lentes de aumento. [20]

Figura 24: Aplicación del método de inspecciones visual



Fuente: Control & Inspección (2015). Jornada técnica equipos de precisión

Características generales

Se menciona las siguientes ventajas para este tipo de investigación:

- Es totalmente portátil
- Se puede usar en combinación con otros métodos
- Método de bajo costo
- Resultados inmediatos
- Se requiere poco tiempo en la mayoría de los casos

Las limitaciones que generalmente presenta este método son:

- Solo se puede detectar defectos superficiales
- La superficie de inspección debe estar completamente limpia
- Debe haber acceso visual
- La iluminación debe ser consistente con el método de inspección
- Tienen una probabilidad de detección muy pequeña que disminuye con el tamaño de defecto. [21]

Evaluación

Toda inspección será evaluada según los términos de los criterios de aceptación de la sección del código AWS D1.1. 2015, con una lista de chequeo de la inspección se debe realizar y verificar que dicha inspección fue realizada con los mínimos requerimientos, los criterios de aceptación y rechazo que se establece en la normativa la cual se presenta a continuación:

Tabla 4: Criterio de aceptación de inspección visual

| Categoría de discontinuidad y criterio de inspección | Uniones no tubulares cargadas estáticamente | Uniones no tubulares cargadas cíclicamente | Uniones tubulares (Todas las cargas) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|--------------------------------------|---|-------|-------|---|---|---|-----|---|---|---|---|---|
| (1) Prohibición de fisuras La soldadura no debe tener fisuras. | X | X | X | | | | | | | | | | | | |
| (2) Fusión de soldadura / Metal base Debe existir fusión a través de los cordones adyacentes de metal de soldadura y entre el metal de soldadura y el metal base. | X | X | X | | | | | | | | | | | | |
| (3) Cráter en la sección transversal Todos los cráteres deben ser llenados, excepto para los extremos de soldadura de filete discontinuos fuera de su largo efectivo. | X | X | X | | | | | | | | | | | | |
| (4) Perfiles de soldadura Los perfiles de soldadura deben estar conformes al artículo 5.24. | X | X | X | | | | | | | | | | | | |
| (5) Tiempo de Inspección La inspección visual de soldaduras en todos los aceros puede empezar inmediatamente después que la soldadura terminada se haya enfriado hasta temperatura ambiente. El criterio de aceptación para aceros de alta resistencia (del tipo ASTM A514, A517, y A709 Grado 100 y 100W) debe estar basado en una inspección visual realizada no menos de 48 horas luego de la terminación de la soldadura. | X | X | X | | | | | | | | | | | | |
| (6) Soldaduras subdimensionadas El tamaño de filete de soldadura en cualquier soldadura continua puede ser menor que el especificado (<i>L</i>) sin necesitar corrección, para los siguientes valores (<i>U</i>): <table style="margin-left: 40px; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>L</i></td> <td style="text-align: center;"><i>U</i></td> </tr> <tr> <td>Tamaño de soldadura nominal</td> <td>Diferencia admisible respecto de <i>L</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">en mm</td> <td style="text-align: center;">en mm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">2,5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">8</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> </table> En todos los casos la disminución del tamaño de soldadura será $\leq 10\%$ del largo de la soldadura. En las soldaduras alma con ala en vigas, no se permite subdimensionamiento en los extremos para un largo igual a dos veces el ancho del ala. | <i>L</i> | <i>U</i> | Tamaño de soldadura nominal | Diferencia admisible respecto de <i>L</i> | en mm | en mm | 5 | 2 | 6 | 2,5 | 8 | 3 | X | X | X |
| <i>L</i> | <i>U</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| Tamaño de soldadura nominal | Diferencia admisible respecto de <i>L</i> | | | | | | | | | | | | | | |
| en mm | en mm | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 2 | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 2,5 | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 3 | | | | | | | | | | | | | | |
| (7) Socavación (A) Para materiales de espesores menores que 25 mm, la socavación será ≤ 1 mm, excepción: se permitirá una socavación máxima de 2 mm en un largo acumulado de 50 mm en cualquier tramo de 300 mm. Para materiales de espesores ≥ 25 mm, la socavación deberá ser ≤ 2 mm para cualquier largo de soldadura. | X | | | | | | | | | | | | | | |
| (B) En miembros principales, la socavación será ≤ 0.25 mm de profundidad cuando la soldadura es transversal a esfuerzos de tracción bajo cualquier condición de cargas de diseño. La socavación deberá ser ≤ 1 mm de profundidad para los otros casos. | | X | X | | | | | | | | | | | | |
| (8) Porosidad (A) Las soldaduras a tope con <i>JPC</i> , transversales a la dirección de los esfuerzos de tracción computados no deberán tener ninguna porosidad vermicular visible. Para todas las otras soldaduras con bisel o soldaduras de filete, la suma de la porosidad vermicular visible ≥ 1 mm en diámetro, será ≤ 10 mm en cualquier tramo lineal de 25 mm de soldadura y ≤ 20 mm en cualquier tramo de 300 mm de largo de la soldadura. | X | | | | | | | | | | | | | | |
| (B) La frecuencia de porosidad vermicular en soldadura de filete será menor o igual que una cada 100 mm de la largo de la soldadura y el diámetro máximo será $\leq 2,5$ mm. Excepción: las soldaduras de filete que unen los rigidizadores a la viga, la suma de los diámetros de la porosidad vermicular deberá ser ≤ 10 mm en cualquier tramo lineal de 25 mm de soldadura y ≤ 20 mm en cualquier tramo de 300 mm de largo de la soldadura. | | | | | | | | | | | | | | | |
| (C) Las soldaduras a tope con <i>JPC</i> , transversales a la dirección de los esfuerzos de tracción calculados no deberán tener ninguna porosidad vermicular visible. Para todas las otras soldaduras con bisel, la frecuencia de porosidad vermicular en soldadura de filete será menor o igual que una cada 100 mm de la largo de la soldadura y el diámetro máximo será $\leq 2,5$ mm. | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1. Una "X" indica aplicabilidad para el tipo de unión; el área sombreada indica no aplicabilidad. | | | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Reglamento CIRSOC 304

2.2.3 Inspección por tintas penetrantes (PT)

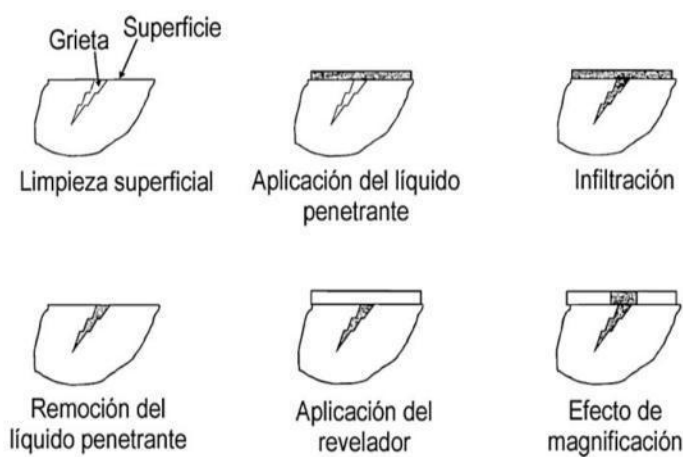
La inspección por líquidos penetrantes (PT) es una técnica simple de aplicar para una gran cantidad de materiales y diseños con la finalidad de detectar defectos o grietas superficiales. Este ensayo se basa en los principios básicos de la acción capilar, y la capacidad de humectación de un líquido de baja viscosidad, tales propiedades hacen que penetre por hendiduras o grietas imperceptibles a la vista para resaltarlas y evidenciarlas. [21]

Los líquidos penetrantes revelan una discontinuidad en una gran extensión haciendo que la inspección depende menos del inspector, por lo que este método es más adaptado a un sistema de producción, por lo que aumenta su credibilidad en la rapidez de inspección. Muchas discontinuidades reveladas por el método de líquidos penetrantes no se podrían detectarse mediante la inspección visual realizada por un inspector experimentado.[19]

Procedimiento general de inspección con PT

En términos generales es un proceso de seis pasos como se presenta en la siguiente figura. Con el objetivo de utilizar un líquido de alta capacidad de humectación que penetre y resalte a simple vista grietas, defectos superficiales que al inicio que no son visibles.[21]

Figura 25: Operaciones básicas para la inspección con líquidos penetrantes



Fuente: Carrión F. (2003), la evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes.

Una vez finalizado la inspección con líquidos penetrantes, se recomienda limpiar la superficie ya que estos retienen la humedad, incrementando el riesgo de corrosión afectando el funcionamiento posterior de la pieza. [21]

Ventajas y limitaciones de los líquidos penetrantes

Entre las ventajas más importante de este método son las siguientes:

- Se utilizan para una gran cantidad de materiales
- Su forma de aplicación es relativamente fácil
- Son de bajo costo
- La disposición geométrica de las piezas no representa un problema
- Se puede emplear en laboratorio y en campo
- Se aplican varios tipos y métodos
- Permite cubrir un área muy grande en poco tiempo

Entre las limitaciones se mencionan la siguientes:

- Grandes limitaciones en materiales porosos
- Es aplicable solo para defectos superficiales
- La superficie debe estar limpia antes y después de la inspección
- En superficies rugosas se pueden obtener mediciones falsas
- Haber compatibilidad química entre los líquidos y el material
- Requiere de un área de trabajo bien ventilada [21]

Criterios de aceptación y rechazo

Para evaluar las indicaciones, se utiliza los siguientes criterios de aceptación o rechazo, estos criterios están establecidos en las normas de referencia:

- Para tanques, API 650 envía a ASME Sección VIII Apéndice 8
- Para tuberías de proceso, ASME B31.3 Tabla 341.3.2
- Para estructuras metálicas soldadas, AWS D1.1 Sección 6, parte C, 6.10, tabla 6.1. En este trabajo se presenta en la tabla 4.

La norma de referencia será seleccionada, de acuerdo con la aplicación que va a tener la soldadura. Para determinar los tamaños de las indicaciones, se debe medir lo que muestra la tinta, aunque sea evidente que el tamaño propio de la discontinuidad sea menor. [22]

Figura 26: Indicaciones sobre un Cordón de Soldadura



Fuente: (Met-L-Check, 2009)

En la figura 26 se observa que las discontinuidades tienen un tamaño menor que la indicación en la que están contenidas, lo cual se observa comparando el tamaño de las manchas rojas con la longitud de las líneas oscuras en su interior.[22]

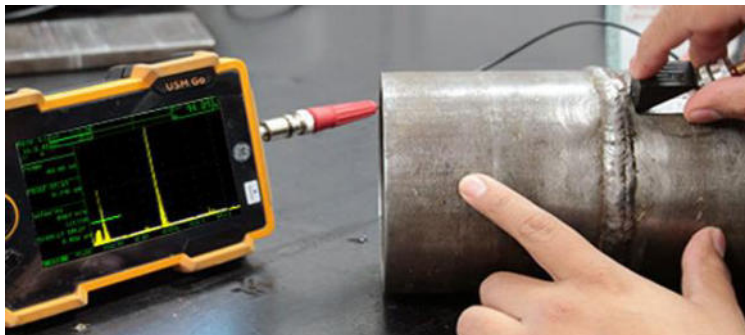
2.2.4 Inspección por ultrasonido industrial (UT)

La inspección ultrasónica es un método de ensayo no destructivo utilizado para detectar defectos superficiales e internos mediante ondas de alta frecuencia introducidas en el material inspeccionado. El ensayo se basa en el hecho de la presencia de una discontinuidad o un cambio en la densidad de material actuara como si fuese reflector de propagaciones de alta frecuencia en ese punto.[19]

Aplicación

Este método es ampliamente difundido en la evaluación de materiales metálicos y no metálicos. Es frecuente su empleo para la medición de espesores, detección de zonas de corrosión, detección de defectos en piezas que han sido fundidas y forjadas, laminadas o soldadas. [23]

Figura 27: Inspección por ultrasonido industrial



Fuente: Arco Weld - Servicios de Inspección

Ventajas

- Aplicable en una gran variedad de materiales.
- Permite detectar discontinuidades tanto superficiales, subsuperficiales e internas.
- Equipos son portátiles y adaptables a un gran número de condiciones
- Alta sensibilidad, permitiendo la detección de fallas extremadamente pequeñas.
- La operación es electrónica, lo que proporciona indicaciones casi instantáneas de las fallas.

Limitaciones

- El equipo y los accesorios son costosos.
- El personal destinado a realizar los ensayos debe poseer una amplia experiencia y calificación en el manejo de la técnica y los equipos.
- Acopladores se requieren usualmente para proporcionar la transferencia de la energía de onda ultrasónica entre los transductores y las partes que se inspeccionan.
- Se necesitan estándares de referencia física, tanto para el equipo para calibrar como para definir las fallas. [23]

Criterios de aceptación y rechazo

Toda inspección será evaluada según los términos de los criterios de aceptación de la sección del código AWS D1.1. 2015, los criterios de aceptación y rechazo que se establece en la normativa la cual se presenta a continuación:

Tabla 5: Criterio de aceptación y rechazo por ultrasonido

| Clase de severidad de la discontinuidad | Espesor de la soldadura (*) en mm y ángulo del palpador | | | | | | | | | | |
|---|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | ≥ 8 | | > 38 | | | > 65 | | | >100 | | |
| | ≤ 19 | ≤ 38 | 70° | 60° | 45° | 70° | 60° | 45° | 70° | 60° | 45° |
| Clase A | +5 y menor | +2 y menor | -2 y menor | +1 y menor | +3 y menor | -5 y menor | -2 y menor | 0 y menor | -7 y menor | -4 y menor | -1 y menor |
| Clase B | +6 | +3 | -1 | +2 | +4 | -4 | -1 | +1 | -6 | -3 | 0 |
| Clase C | +7 | +4 | +1 | +4 | +6 | -2 a +2 | +1 | +3 | -4 a +2 | -1 a +2 | +2 |
| Clase D | +8 y mayor | +5 y mayor | +3 y mayor | +6 y mayor | +8 y mayor | +3 y mayor | +3 y mayor | +5 y mayor | +3 y mayor | +3 y mayor | +4 y mayor |

Notas:

- Las discontinuidades de Clase **B** deben estar separadas al menos por **2L**, siendo **L** el largo de la mayor discontinuidad, excepto que cuando dos o más de tales discontinuidades no están separadas por al menos **2L**, pero el largo combinado de las discontinuidades y su separación es igual o menor que el largo máximo admisible bajo las disposiciones de las Clases **B** o **C**, la discontinuidad debe considerarse como una única discontinuidad aceptable.
- Las discontinuidades de Clase **B** y **C** no deben comenzar a una distancia menor que **2L** desde los finales de las soldaduras que soportan esfuerzos de tracción principales, siendo **L** el largo de la discontinuidad.
- Las discontinuidades detectadas en el área de la cara de la raíz en una soldadura con **JPC** con bisel doble, deben ser evaluadas usando una clasificación de la indicación **4 dB** más sensible, que la descrita en 6.6.11.13, cuando tales soldaduras son indicadas como "soldadura bajo tracción" en los planos (restar **4 dB** para el nivel de referencia "**b**")
- Soldaduras por electro escoria o electrogases: en las discontinuidades que exceden los **51 mm** se debe sospechar que son porosidad vermicular y deberá ser examinada adicionalmente mediante radiografía.
- Para indicaciones que se mantienen en el monitor, cuando el palpador se mueve, referirse a 6.3.8.1.

(*) El espesor de la soldadura se debe definir como el espesor nominal del elemento estructural de menor espesor a ser unido.

| <p>Clase A (discontinuidades grandes) Cualquier indicación en esta categoría debe ser rechazada (sin tener en cuenta el largo)</p> <p>Clase B (discontinuidades medias) Cualquier indicación en esta categoría que tenga un largo mayor que 20 mm debe ser rechazada</p> <p>Clase C (discontinuidades pequeñas) Cualquier indicación en esta categoría que tenga un largo mayor que 50 mm debe ser rechazada</p> <p>Clase D (discontinuidades menores) Cualquier indicación en esta categoría debe ser aceptada sin tener en cuenta el largo o ubicación en la soldadura.</p> | <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Niveles de barrido o exploración</th> </tr> <tr> <th>Trayectoria (***) en mm</th> <th>Referencia por encima de cero, dB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>≤ 65</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>> 65 ≤ 125</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>> 125 ≤ 250</td> <td>29</td> </tr> <tr> <td>> 250 ≤ 380</td> <td>39</td> </tr> </tbody> </table> <p>(***) Esta columna se refiere a la distancia recorrida por el haz, NO al espesor del material.</p> | Niveles de barrido o exploración | | Trayectoria (***) en mm | Referencia por encima de cero, dB | ≤ 65 | 14 | > 65 ≤ 125 | 19 | > 125 ≤ 250 | 29 | > 250 ≤ 380 | 39 |
|---|---|----------------------------------|--|-------------------------|-----------------------------------|------|----|------------|----|-------------|----|-------------|----|
| Niveles de barrido o exploración | | | | | | | | | | | | | |
| Trayectoria (***) en mm | Referencia por encima de cero, dB | | | | | | | | | | | | |
| ≤ 65 | 14 | | | | | | | | | | | | |
| > 65 ≤ 125 | 19 | | | | | | | | | | | | |
| > 125 ≤ 250 | 29 | | | | | | | | | | | | |
| > 250 ≤ 380 | 39 | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Reglamento CIRSOC 304

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.2. Equipos y materiales

Para la evaluación de los talleres se utilizará equipos tales como:

Determinación de espesores y longitudes

- Pie de rey
- Equipo de medición
- Flexómetro
- Cinta métrica

Inspección y medición de los cordones de soldadura

- Galga de soldadura
- Código de soldadura estructural

Tintas Penetrantes (PT)

- Galga de soldadura
- Flexómetro
- Calibrador Píe de Rey
- Kit de Tintas
- Cepillo de alambre
- Lima
- Guaípe

Ensayo de ultrasonido (UT)

- Equipo de ultrasonido MFR 800B
- Bloque de calibración
- Calibrador Píe de Rey
- Acoplante
- Transductores
- Guaípe
- Cable transmisor

Determinación de resistencia del hormigón

- Esclerómetro



- Brocha
- Piedra abrasiva

Propiedades del suelo

- Equipo SPT
- Horno para secado de muestras
- Tamizadora eléctrica

Tabla 6: Especificaciones técnicas de los equipos

| Nombre del Equipo | Especificaciones |
|---|---|
| <p>Martillo esclerométrico</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Modelo PROCEQ • El martillo de Shimidt – esclerómetro digital, presenta los valores automáticamente de rebote y de la resistencia a compresión en su pantalla gráfica. • Energía de impacto estándar. Espesor mínimo del objeto de ensayo: 100 mm (3.9”) y debería estar fijado firmemente en la estructura. |
| <p>Trípode de ensamble</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Trípode de SPT • Patas integradas con dos secciones fabricadas de aluminio. • Incorpora motor a gasolina con acoples de sujeción en cualquiera de las patas del trípode. |
| <p>Medidor de Espesores Ultrasonico MEU-01</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Medidor de espesor ultrasónico • Intervalo: 1.2 – 225 mm (acero) • Exactitud: $\pm 0.5\% L + 0.04\text{mm}$, L es el espesor en mm • Permite hacer mediciones del espesor total de diferentes materiales aprovechando la tecnología de la inducción por ondas ultrasónicas. • Permite hacer mediciones no destructivas de una manera rápida y confiable. |
| <p>Galga de soldadura</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Utilizado para evaluar imperfecciones en unión soldadas, se fabricado en acero inoxidable. |

| | |
|---|---|
|  | <ul style="list-style-type: none"> • Permite la medición de longitudes de lado de las soldaduras en ángulo, espesores de garganta y sobreespesores de las soldaduras a tope. • Altura del cordón: 0÷25mm / Graduación: 1mm/ Precisión: ±0,5 mm. • Rango de soldadura de filete: 0 ÷ 25 mm / Graduación: 1 mm / Precisión: ±0,5 mm. |
| <p>Equipo de Ultrasonido MFD 800B</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Dispositivo utilizado para la detección de discontinuidades. • Integrado por una pantalla LCD con distintos colores y varios parámetros que satisfacen en su totalidad el proceso de inspección de juntas soldadas. • Incorpora dentro de sus funciones frecuencias de 15 MHz que permite hacer uso del equipo con materiales con espesores delgados. |
| <p>Calibrador Pie de Rey</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Utilizado para medir diámetros exteriores e interiores, profundidades y escala. • Medidas de 0 mm a 200 mm de rango. • Pinza y corredera de acero endurecido libre de corrosión. • Cumple con los estándares DIN862. |
| <p>Tintas Penetrantes</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • Utilizado para el ensayo no destructivo para superficies metálicas y no metálicas no porosas. • Es ideal para la detección de grietas, fisuras, errores de soldadura y otros errores en piezas de fundición, forja, soldadura. • Contiene revelador, limpiador en base solvente, liquido penetrante rojo y removedor. |

Fuente: Ing. Byron López

3.3. Tipo de investigación

Se empleará un tipo de investigación aplicada y descriptiva, debido a que utilizará herramientas computacionales para realizar los diagnósticos estructurales ante una excitación sísmica de los talleres

3.4. Prueba de hipótesis

3.4.1. Hipótesis

El comportamiento de los talleres de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, con la inclusión de aisladores sísmicos mediante análisis estático no lineal (PUSH OVER), será mejor en comparación al comportamiento de esas mismas estructuras sin la inclusión de aisladores sísmicos”

3.5. Población y muestra

3.5.1 Población

El estudio y los ensayos correspondientes se realiza en los talleres de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, ubicados en los predios de la Universidad Técnica de Ambato, Campus Huachi.

Figura 28: Ubicación de los talleres de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial.



Fuente: Google Earth

En la siguiente tabla se muestran las coordenadas georreferenciadas de la ubicación de los dos talleres:

Tabla 7: Coordenadas de la zona de análisis

| Punto | | Coordenadas (WGS 84 Zona 17S) | |
|-------|---|-------------------------------|------------|
| | | Este | Norte |
| FICM | 1 | 764378.98 | 9859847.27 |
| | 2 | 764420.83 | 9859862.13 |
| FISEI | 3 | 764427.32 | 9859850.60 |
| | 4 | 764440.39 | 9859809.29 |

Fuente: Google Earth

3.5.2 Muestra

Para el cálculo de la población infinita cuando se desconoce el total de unidades de observación que la integran o la población es mayor a 10,000 aplicando la siguiente ecuación:

$$N = \frac{(Z\alpha)^2(p)(q)}{\delta^2}$$

Donde:

N = Tamaño de la muestra infinita.

Z α = Distancia de la medida del valor de significación propuesto. Se determina mediante las tablas de distribución normal de probabilidad y habitacional en este caso se utiliza un valor de $\alpha = 0.05$, al que le corresponde el valor de $Z = 1.96$.

δ = Precisión o magnitud del error que estamos dispuestos aceptar.

p = Proporción aproximada del fenómeno en estudio en la población de referencia (cuando se desconoce la proporción se utiliza $p=0.5$)

q = Proporción de la población de referencia que no presenta el fenómeno en estudio (1- q). La suma de p y q siempre debe ser 1.

Desarrollo:

$N = ?$

$Z\alpha = 1.96$

$\delta = 30\%$

$p = 0.5$

$q = 1 - 0.5 = 0.5$

$$N = \frac{(1.96)^2(0.5)(0.5)}{0.30^2}$$

$$N = 10.67$$

Para determinar el número mínimo de ensayos se considera un tamaño pequeño de muestras (2-10), mientras más ensayos los valores de la desviación estándar tendrán mayor precisión.

$$n = \frac{N (Z\alpha)^2(p)(q)}{E^2(N - 1) + (Z\alpha)^2(p)(q)}$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra finita

N = Población

E = Error de muestra

$$n = \frac{(10.67) (1.96)^2(30)(70)}{30^2(10.67 - 1) + (1.96)^2(30)(70)}$$
$$n = 5$$

El número mínimo muestras para cada ensayo es de cinco.

3.6. Recolección de información

Se realizó un trabajo de campo donde se recolectó la mayor parte de datos y dimensiones de sus elementos estructurales in situ, contrarrestándolas con las de los planos estructurales, además se realizaron ensayos no destructivos en las juntas soldadas para evaluar los diferentes tipos y discontinuidades del cordón de soldadura. Además, se revisó investigación bibliográfica, artículos científicos y normativas que ayudaron en interpretación de los resultados obtenidos.

3.7. Procesamiento de información y análisis estadístico

Los talleres fueron simulados mediante un análisis PUSH OVER en ETABS con y sin la inclusión de aisladores sísmicos para determinar el estado actual de la estructura y ver la implicación de la inclusión de aisladores sísmicos en las mismas.

3.8. Variables respuesta o resultados alcanzados

La investigación servirá para la obtención de resultados del análisis donde se pretende determinar el nivel de riesgo estructural que presenta, así como evitar cualquier especulación sobre el estado actual y posible comportamiento a futuro de los talleres

3.9 Recolección de Datos

3.9.1 Planos Arquitectónicos

Se obtuvo los respectivos planos arquitectónicos y planos estructurales de los talleres de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial con la finalidad de visualizar de una mejor manera la distribución los respectivos espacios. Los planos fueron proporcionados por la Dirección de Infraestructura Física de la Universidad Técnica de Ambato. En las siguientes figuras se presenta las fachadas y las plantas del taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica siendo similar al taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria.

Se presenta para el taller de Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica la distribución de sus áreas y usos, con un área total del 851.52 m².

Tabla 8: Descripción de usos y áreas – Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

| Planta baja Nv+ 0.00 | | Planta alta Nv+ 3.42 | |
|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| Uso | Área (m²) | Uso | Área (m²) |
| Horno | 30.00 | Sala de reuniones | 24.54 |
| Pintura | 32.86 | Aula | 32.06 |
| Soldadura | 29.65 | Bodega | 13.16 |
| Arranque de viruta | 43.07 | Administrador | 12.74 |
| Corte | 64.93 | Baños | 38.14 |
| Conformado | 45.27 | Cubículos para proyectos tecnológicos | 37.29 |
| Limpieza y ajustes finales | 43.22 | | |
| Limpieza y preparación | 16.94 | | |
| Cubículos para proyectos tecnológicos | 71.21 | | |
| Herramientas | 21.17 | | |
| Cubículos para materiales | 25.15 | | |
| Baños | 37.23 | | |
| Cuarto eléctrico | 11.95 | | |
| ÁREA TOTAL | | 851.52 m² | |

Fuente: Ing. Byron López

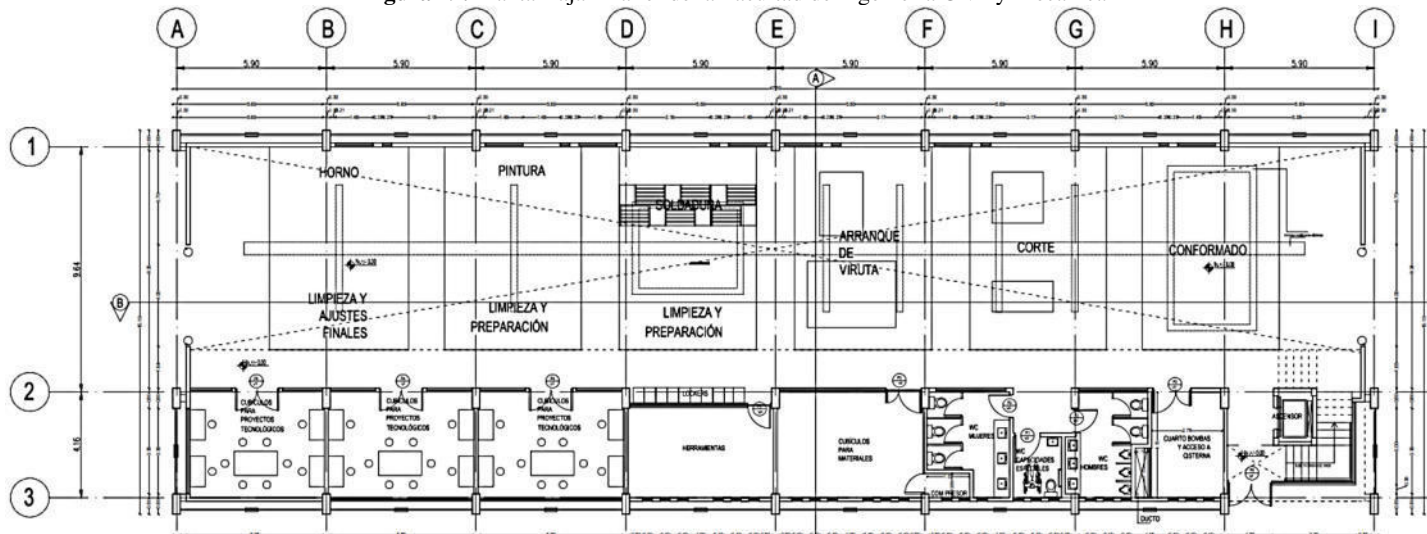
En la siguiente tabla se presenta la distribución en planta de las áreas con sus usos del taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria, con área total de 905.97 m².

Tabla 9: Descripción de alturas y usos – Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria

| Planta baja Nv+ 0.00 | | Planta alta Nv+ 3.42 | |
|---|-----------------------------|--|-----------------------------|
| Uso | Área (m²) | Uso | Área (m²) |
| Robótica | 82.33 | Sala de reuniones | 31.98 |
| Construcción | 70.24 | Aula | 46.09 |
| Pruebas | 57.49 | Bodega | 11.01 |
| Cubículos para diseño de proyectos tecnológicos | 71.82 | Cubículos para profesores de investigación | 22.86 |
| Herramientas | 20.51 | Administrador | 11.08 |
| Cubículos para materiales | 22.70 | Cubículos para proyectos tecnológicos | 37.29 |
| Baños | 36.50 | Data center | 10.49 |
| Tablero de distribución eléctrica | 11.96 | Baños | 34.800 |
| ÁREA TOTAL | | 905.97 m² | |

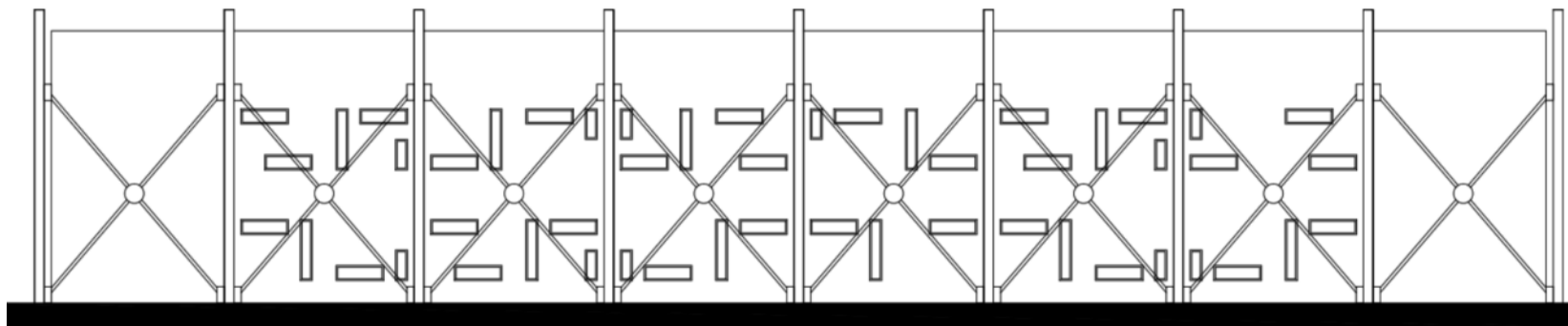
Fuente: Ing. Byron López

Figura 29: Planta Baja - Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica



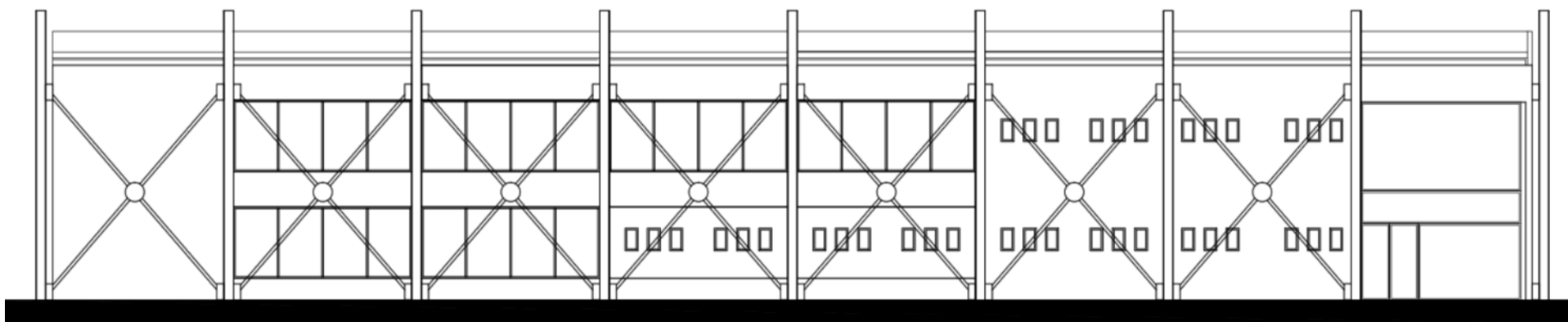
Fuente: DIRINF, Universidad Técnica de Ambato

Figura 30: Fachada Posterior - Eje 1 - Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica



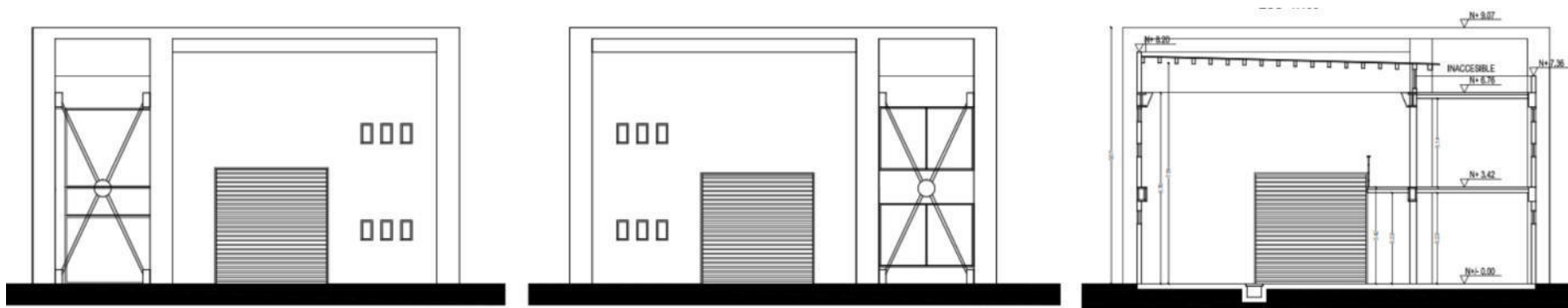
Fuente: DIRINF, Universidad Técnica de Ambato

Figura 31: Fachada Frontal - Eje 3 - Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica



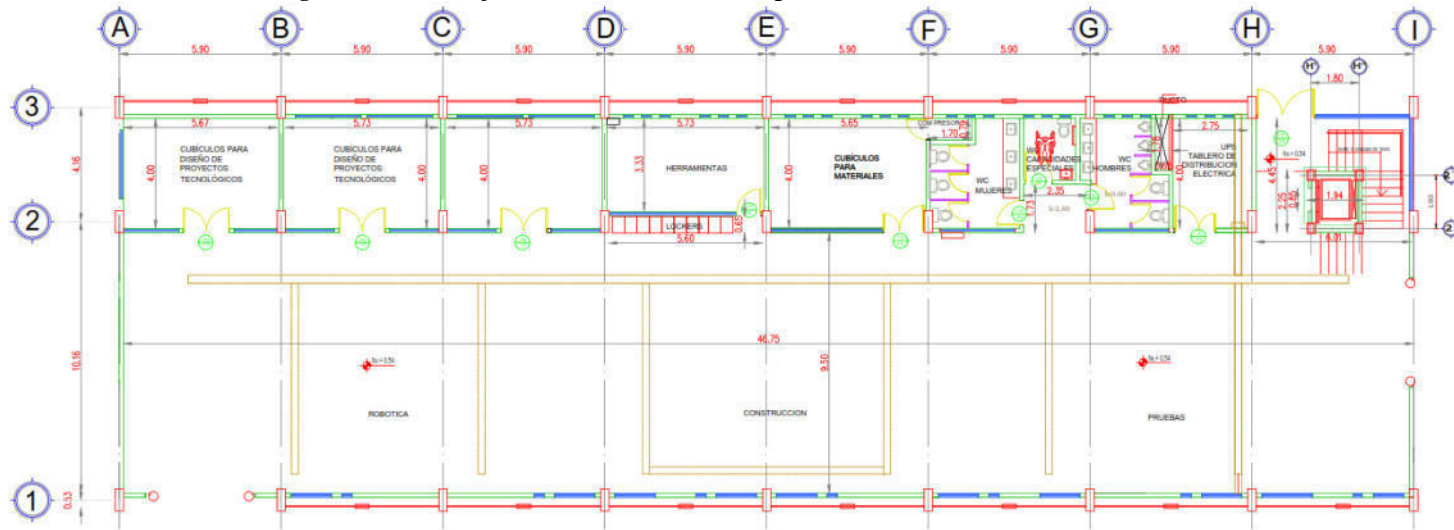
Fuente: DIRINF, Universidad Técnica de Ambato

Figura 32: Fachada lateral derecha eje A y Fachada lateral izquierda eje 1 - Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica



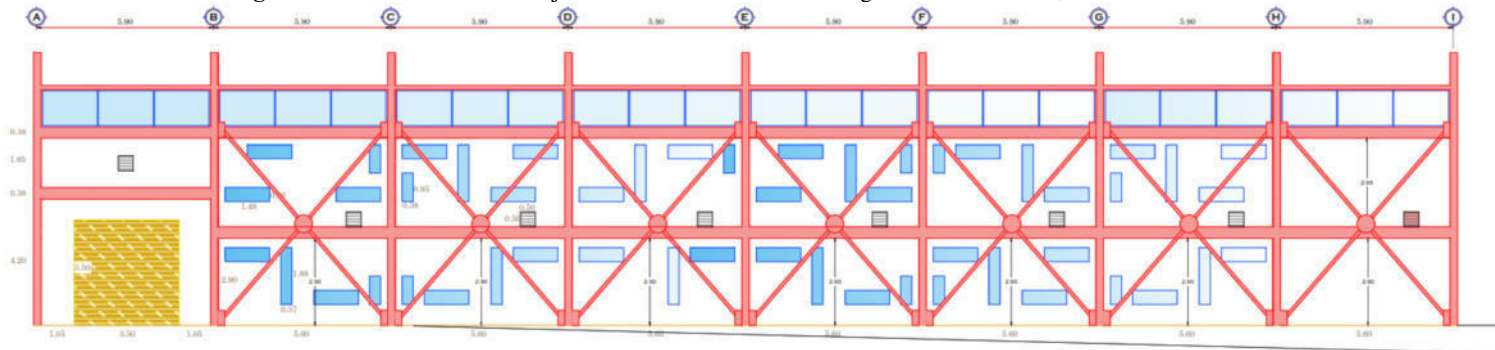
Fuente: DIRINF, Universidad Técnica de Ambato

Figura 33: Planta Baja - Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria



Fuente: DIRINF, Universidad Técnica de Ambato

Figura 34: Fachada Posterior - Eje 1 - Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria



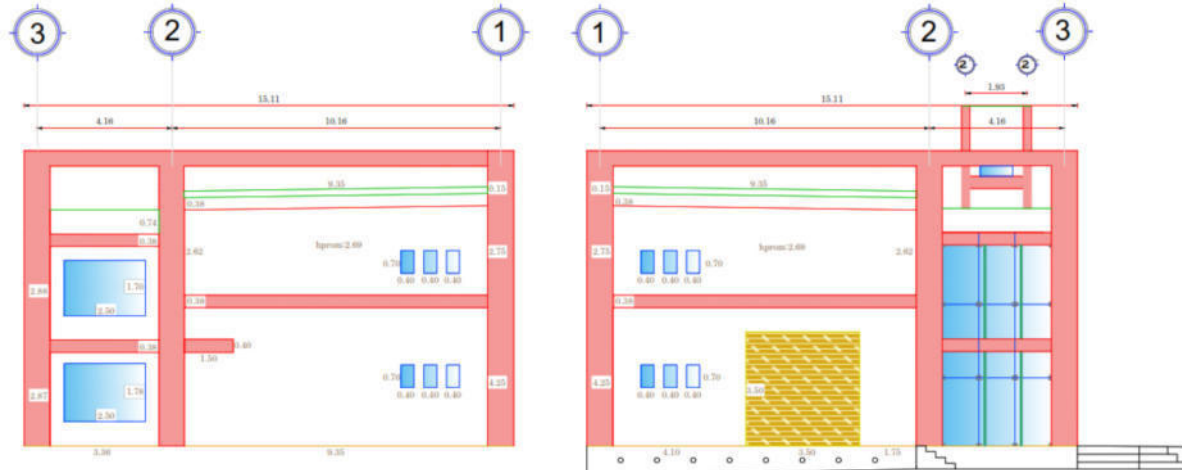
Fuente: DIRINF, Universidad Técnica de Ambato

Figura 35: Fachada Frontal - Eje 3 - Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria



Fuente: DIRINF, Universidad Técnica de Ambato

Figura 36: Fachada lateral derecha eje A y Fachada lateral izquierda eje 1 - Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industria



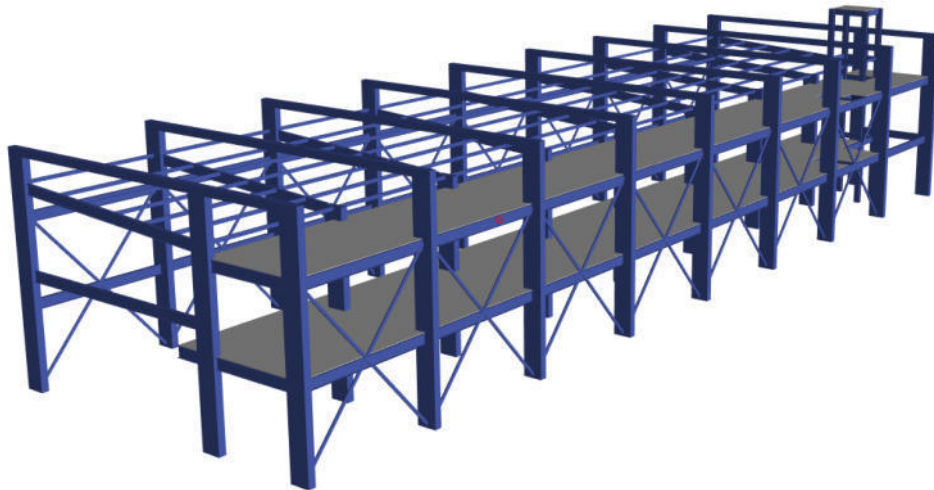
Fuente: DIRINF, Universidad Técnica de Ambato

3.9.2 Características y configuración estructural

Los talleres de las dos facultades tienen 2 niveles, presentan un sistema estructural de pórticos especiales sismos resistentes de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadores.

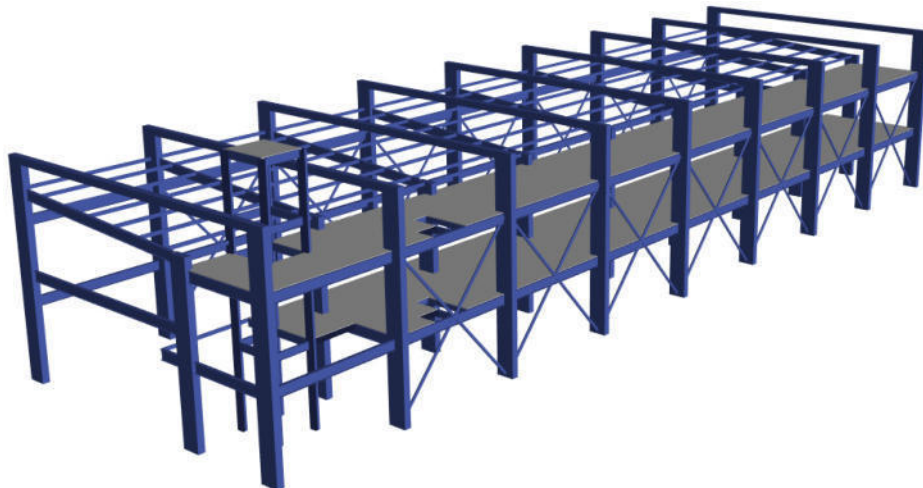
La edificación es utilizada como laboratorios para el área de producción y como centro de educación superior.

Figura 37: Render del modelo - Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica



Fuente: ETABS 2018

Figura 38: Render del modelo - Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial



Fuente: ETABS 2018

3.9.3 Resistencia a la compresión del hormigón

Para determinar la resistencia a compresión del hormigón se realizó el ensayo no destructivo mediante el martillo esclerométrico sobre la superficie descubierta de los elementos estructurales que son accesibles en la edificación.

El ensayo se realizó las consideraciones especificadas en la norma ASTM C805.

El martillo esclerométrico digital que se utiliza en el ensayo muestra directamente la resistencia a compresión del conjunto de las 10 lecturas que se realiza a cada elemento estructural.

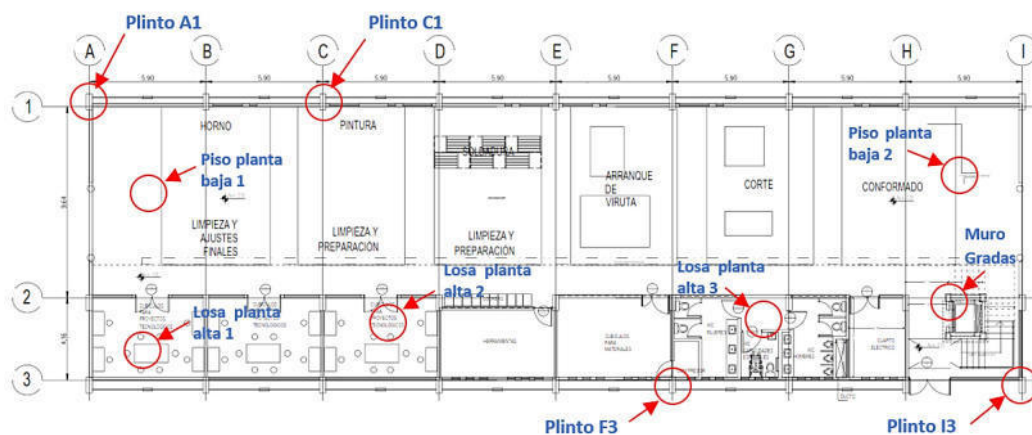
Figura 39: Ejecución del ensayo esclerómetro – Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

En la siguiente figura se presenta el plano en planta del Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica donde está la ubicación exacta de los 10 elementos que se ensayaron:

Figura 40: Ubicación de los elementos ensayados - Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

En la siguiente tabla se presenta los valores de índice de rebote para cada elemento estructural ensayado:

Tabla 10: Valores de Índice de Rebote y $f'c$ del ensayo esclerométrico de los plintos para el Taller FICM

| Índice de Rebote (Q) | | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
| N° | Plinto A1 | Plinto C1 | Plinto F3 | Plinto I3 |
| 1 | 35 | 29 | 31 | 29 |
| 2 | 32 | 34 | 39 | 28 |
| 3 | 28 | 36 | 36 | 33 |
| 4 | 33 | 31 | 34 | 37 |
| 5 | 34 | 32 | 40 | 30 |
| 6 | 29 | 36 | 32 | 33 |
| 7 | 30 | 38 | 33 | 36 |
| 8 | 31 | 39 | 41 | 31 |
| 9 | 33 | 34 | 38 | 37 |
| 10 | 35 | 31 | 39 | 36 |
| Media Q | 32 | 34 | 36 | 33 |
| $f'c$ (kg/cm²) | 233 | 255 | 284 | 245 |

Fuente: Ing. Byron López

Tabla 11: Valores de Índice de Rebote y $f'c$ del ensayo esclerométrico del piso y muro para el Taller FICM

| Índice de Rebote (Q) | | | |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|
| N° | Piso planta baja 1 | Piso planta baja 2 | Muro gradas |
| 1 | 40 | 26 | 35 |
| 2 | 38 | 35 | 37 |
| 3 | 35 | 33 | 38 |
| 4 | 39 | 35 | 29 |
| 5 | 33 | 34 | 31 |
| 6 | 30 | 27 | 31 |
| 7 | 31 | 26 | 34 |
| 8 | 36 | 29 | 36 |
| 9 | 38 | 31 | 29 |

| | | | |
|--------------------------------|-----|-----|-----|
| 10 | 30 | 34 | 30 |
| Media Q | 35 | 31 | 33 |
| f'c (kg/cm²) | 275 | 255 | 206 |

Fuente: Ing. Byron López

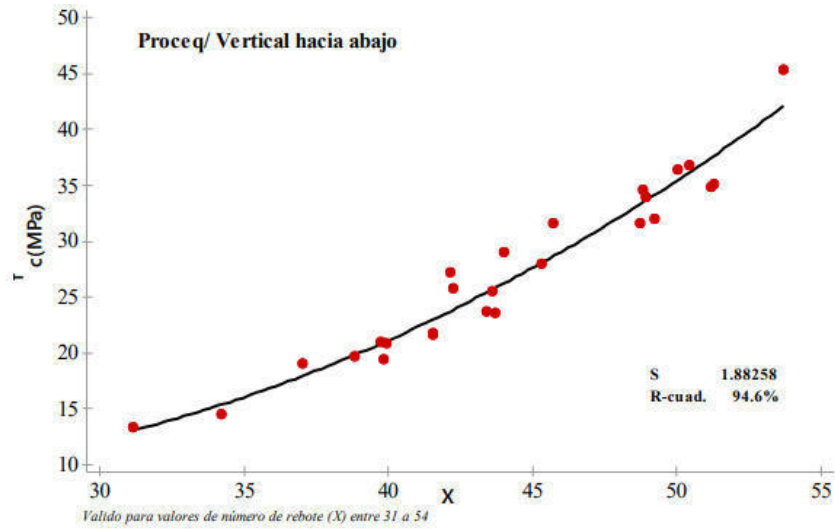
Tabla 12: Valores de Índice de Rebote y f'c del ensayo esclerométrico de la losa para el Taller FICM

| Índice de Rebote (Q) | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| N° | Losa planta alta 1 | Losa planta alta 2 | Losa planta alta 3 |
| 1 | 28 | 28 | 22 |
| 2 | 35 | 35 | 30 |
| 3 | 34 | 34 | 29 |
| 4 | 36 | 26 | 27 |
| 5 | 29 | 28 | 31 |
| 6 | 31 | 30 | 28 |
| 7 | 33 | 34 | 31 |
| 8 | 36 | 31 | 24 |
| 9 | 30 | 36 | 26 |
| 10 | 28 | 28 | 22 |
| Media Q | 32 | 31 | 27 |
| f'c (kg/cm²) | 275 | 216 | 206 |

Fuente: Ing. Byron López

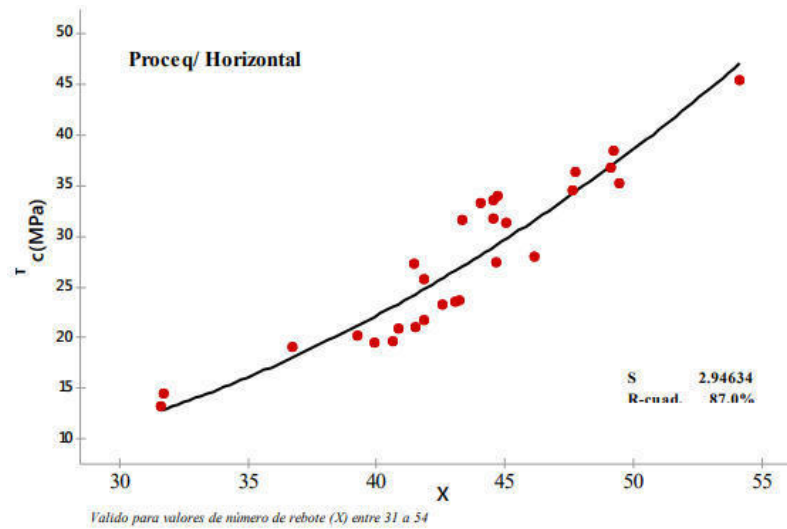
En las siguientes figuras, presenta la curva de regresión para la estimación de la resistencia a compresión mediante el número de rebote del ensayo esclerométrico, esta figura se la obtuvo del estudio de Neira Iveth y Palacios Rubén (2018) con el tema: “Obtención de correlaciones para determinar la Resistencia a la compresión y Módulo de rotura del hormigón mediante Ensayos Esclerométricos”.

Figura 41: Curva de regresión para estimar $f'c$ (MPa) Proceq / Vertical hacia abajo



Fuente: NEIRA Nathalie & PALACIOS Rubén, (2018).

Figura 42: Curva de regresión para estimar $f'c$ (MPa) Proceq / Horizontal



Fuente: NEIRA Nathalie & PALACIOS Rubén, (2018).

Para determinar si los datos obtenidos del equipo son válidos para la muestra, se determina la media de los 10 golpes, el valor máximo y mínimo de los mismos, posteriormente se calcula la diferencia o error entre estos valores máximo y mínimo con la media, si los dos valores son mayores a 6 unidades la muestra no es válida y deberá realizar un nuevo ensayo.

$$\text{Media Q} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{N}^\circ \text{ de golpes } i)}{n}$$

$$\text{Media Q} = \frac{35 + 32 + 28 + 33 + 34 + 29 + 30 + 31 + 33 + 35}{10}$$

$$\text{Media Q} = 32$$

Cálculo del error:

Para el cálculo para la validación del índice de rebote, se utilizará los datos del plinto A1 de la tabla 10, el procedimiento es el mismo para los demás datos.

$$E+ = V_{\max} - \text{Media Q}$$

$$E- = V_{\min} - \text{Media Q}$$

Valor máximo = 35

$$E+ = 35 - 32$$

$$E+ = 3.00$$

Valor mínimo = 28

$$E- = 28 - 32$$

$$E- = 4.00$$

Tal como se observa en las expresiones se puede verificar que el error por encima de la media (E+) y por debajo de la media (E-), es menor a 6 unidades, por tanto, los valores obtenidos en el ensayo esclerométrico son válidos.

Tabla 13: Validación de la resistencia a la compresión del concreto del plinto A1 para el Taller FICM

| Nº | Índice de rebote (Q) | Promedio P | Error (P-Q) |
|----|----------------------|------------|-------------|
| 1 | 35 | 32 | 3.00 |
| 2 | 32 | | 0.00 |
| 3 | 28 | | 4.00 |
| 4 | 33 | | 1.00 |
| 5 | 34 | | 2.00 |
| 6 | 29 | | 3.00 |
| 7 | 30 | | 2.00 |
| 8 | 31 | | 1.00 |

| | | | |
|-----------|----|--|------|
| 9 | 33 | | 1.00 |
| 10 | 35 | | 3.00 |

Fuente: Ing. Byron López

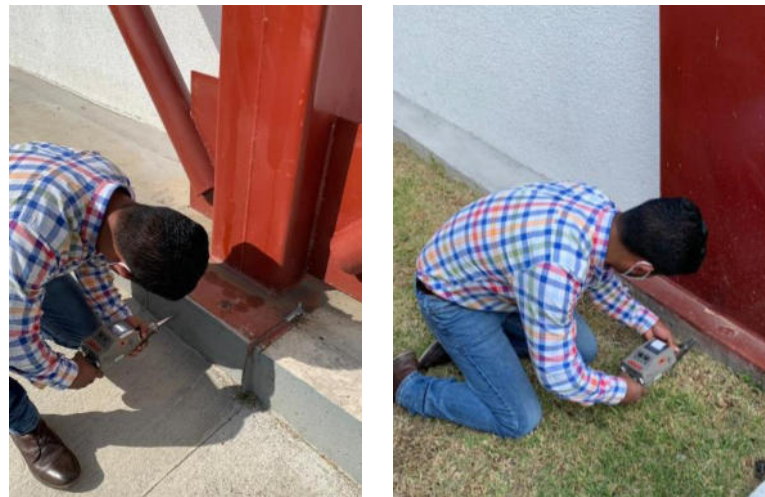
Para determinar el dato de la resistencia a la compresión del hormigón ($f'c$) de todos los valores obtenidos de cada ensayo se lo realiza mediante métodos estadísticos, para este caso se utiliza la media aritmética para obtener el valor promedio de la resistencia.

$$f'c = \frac{233 + 250 + 275 + 275 + 216 + 206 + 284 + 245 + 255 + 206}{10}$$

$$f'c = 245 \text{ kg/cm}^2$$

El valor promedio obtenido es de 245 kg/cm^2 , para el análisis y modelado se toma en cuenta una resistencia de 240 kg/cm^2 .

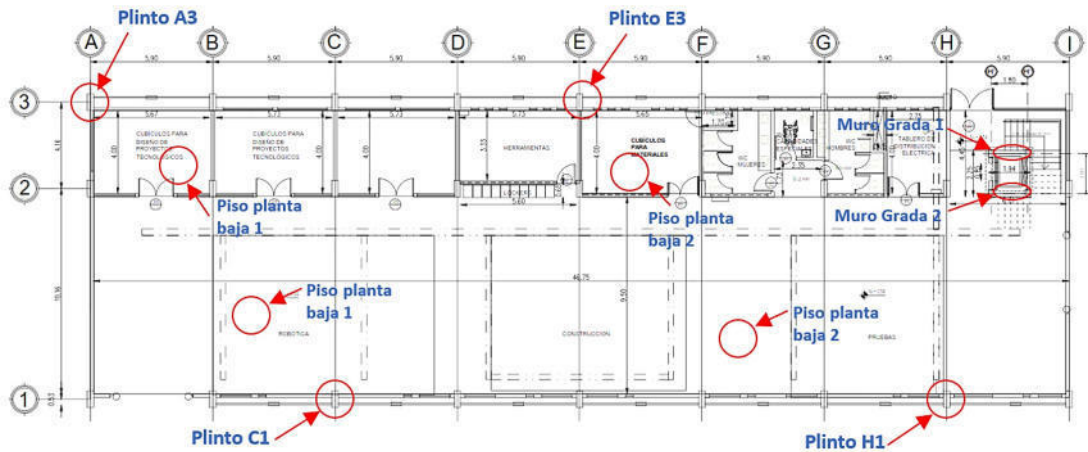
Figura 43: Ejecución del ensayo esclerómetro - Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

En la siguiente figura se presenta el plano en planta del Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial donde está la ubicación exacta de los 10 elementos que se ensayaron:

Figura 44: Ubicación de los elementos ensayados - Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

A continuación, se presenta los resultados obtenidos después de realizar la validación de valores mediante métodos estadísticos:

Tabla 14: Valores de Índice de Rebote y $f'c$ para el Taller FISEI

| Punto | Característica | Altura m. | Inclinación | Numero de la dureza promedio (Q) | Resistencia Promedio (kg/cm ²) |
|-------|--------------------|-----------|--------------|----------------------------------|--|
| | | | Esclerómetro | | |
| 1 | Plinto A3 | 0,10 | 0° | 36 | 284 |
| 2 | Plinto E3 | 0,15 | 0° | 34 | 255 |
| 3 | Plinto C1 | 0,50 | 0° | 35 | 275 |
| 4 | Plinto H1 | 0,10 | 0° | 31 | 216 |
| 5 | Muro grada 1 | 1,50 | 0° | 33 | 245 |
| 6 | Muro grada 1 | 1,60 | 0° | 32 | 233 |
| 7 | Losa planta alta 1 | 7,00 | -90° | 30 | 245 |
| 8 | Losa planta alta 2 | 7,00 | -90° | 29 | 233 |
| 9 | Piso planta baja 1 | 0,00 | -90° | 32 | 275 |
| 10 | Piso planta baja 2 | 0,00 | -90° | 28 | 216 |

Fuente: Ing. Byron López

$$f'c = \frac{284 + 255 + 275 + 216 + 245 + 233 + 245 + 233 + 275 + 216}{10}$$

$$f'c = 247.7 \text{ kg/cm}^2$$

El valor promedio obtenido es de 247.7 kg/cm², para el análisis y modelado se toma en cuenta una resistencia de 240 kg/cm².

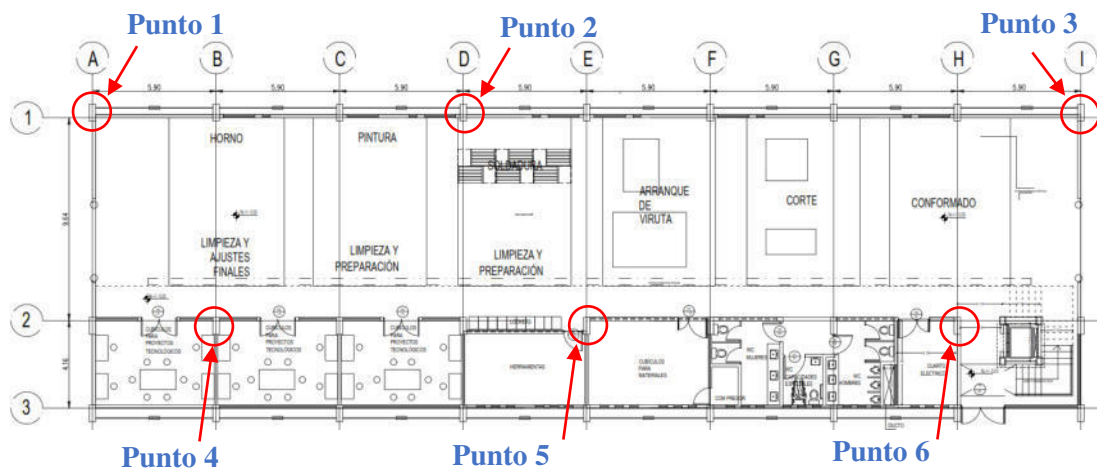
3.9.4 Medición de espesores

Se realizó la medición de los componentes mediante el medidor de espesores ultrasónico, con la finalidad de realizar la comparación entre los resultados del ensayo con los espesores que encuentran en los planos estructurales.

En las siguientes figuras se observa en donde se realizó el ensayo en los puntos del taller la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Se ensayaron la columna, placa base, placa de unión y el tubo de las riostras de arriostramiento para cada punto.

En la siguiente figura se presenta la ubicación de los elementos ensayados:

Figura 45: Ubicación de los elementos ensayados- Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

Tabla 15: Elementos donde se realiza las mediciones – Taller FICM

| PUNTOS A TOMAR LAS MEDICIONES | | |
|---|---|---|
| Punto 1 | Punto 2 | Punto 3 |
|  |  |  |
| Punto 4 | Punto 5 | Punto 6 |



Fuente: Ing. Byron López

Proceso general:

- Preparación de la superficie de la pieza a inspeccionar, con el propósito de garantizar un acople perfecto entre el palpador y la pieza.
- Limpiar con guaípe la superficie donde se realizará la medición del espesor.
- Determinar 5 puntos para la medición en diferentes sitios del espesor.
- Encerar el medidor de espesores ultrasónico MEU-01 mediante su placa de calibración.
- Aplicación del acoplante sobre la superficie a inspeccionar.
- Preceder a medir los espesores. Se realizarán 5 mediciones.
- Recopilar los datos y promediar los espesores.

Figura 46: Medición de espesores mediante el medidor de espesores ultrasónico



Fuente: Ing. Byron López

En la siguiente tabla describe las medidas de los espesores que se encuentran en los planos estructurales para cada elemento que se ensayó y así realizar una comparación con los espesores obtenidos para cada taller.

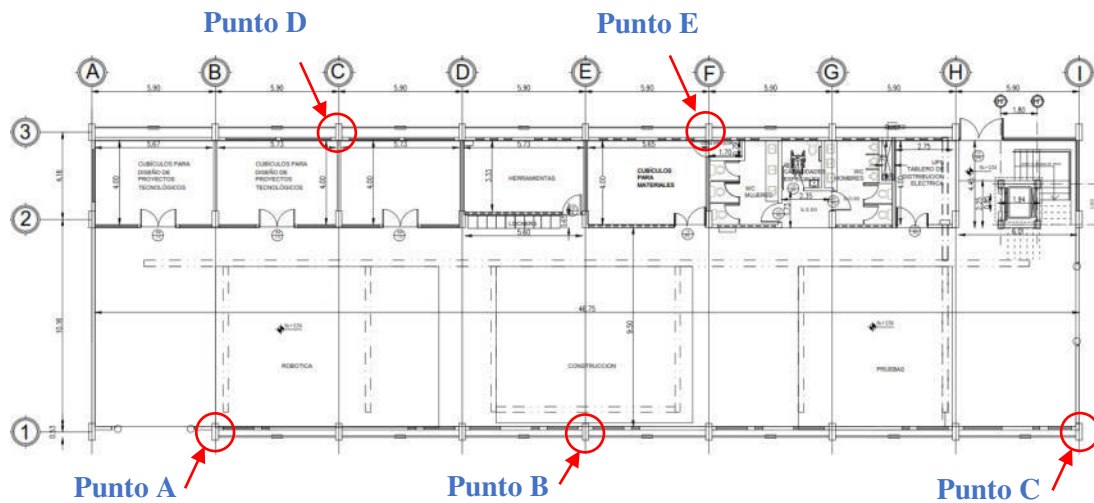
Tabla 16: Medidas de los espesores de los planos estructurales

| Componente | Valor (mm) |
|-------------------|------------|
| Placa base | 20 |
| Columna | 8 |
| Tubo | 5 |
| Placa de refuerzo | 6 |

Fuente: Ing. Byron López

De la misma manera se presenta la ubicación de los elementos que se ensayaron para el Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial.

Figura 47: Ubicación de los elementos ensayados- Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

Tabla 17: Elementos donde se realizaron las mediciones – Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

Se presenta los resultados obtenidos para cada taller de análisis:

Tabla 18: Medición de espesores – Taller FICM

| Puntos | Placa base (mm) | Columna (mm) | Tubo (mm) | Placa de unión (mm) |
|---------------|------------------------|---------------------|------------------|----------------------------|
| 1 | 19.94 | 8.04 | 4.92 | 5.96 |
| 2 | 19.76 | 7.88 | 4.9 | 5.74 |
| 3 | 19.8 | 7.98 | 4.92 | 5.88 |
| 4 | 20.1 | 8.08 | x | x |
| 5 | 19.94 | 8.06 | x | x |
| 6 | 20.02 | 8.14 | x | x |

Fuente: Ing. Byron López

Tabla 19: Medición de espesores – Taller FISEI

| Puntos | Columna (mm) | Placa de unión (mm) | Tubo (mm) | Placa base (mm) |
|--------|--------------|---------------------|-----------|-----------------|
| A | 7.76 | 5.7 | 3.98 | x |
| B | 7.66 | 5.72 | 3.9 | x |
| C | 7.74 | 5.72 | 3.92 | x |
| D | 7.84 | 5.74 | 4.08 | 19.12 |
| E | 7.68 | 5.72 | 4.16 | 19.14 |

Fuente: Ing. Byron López

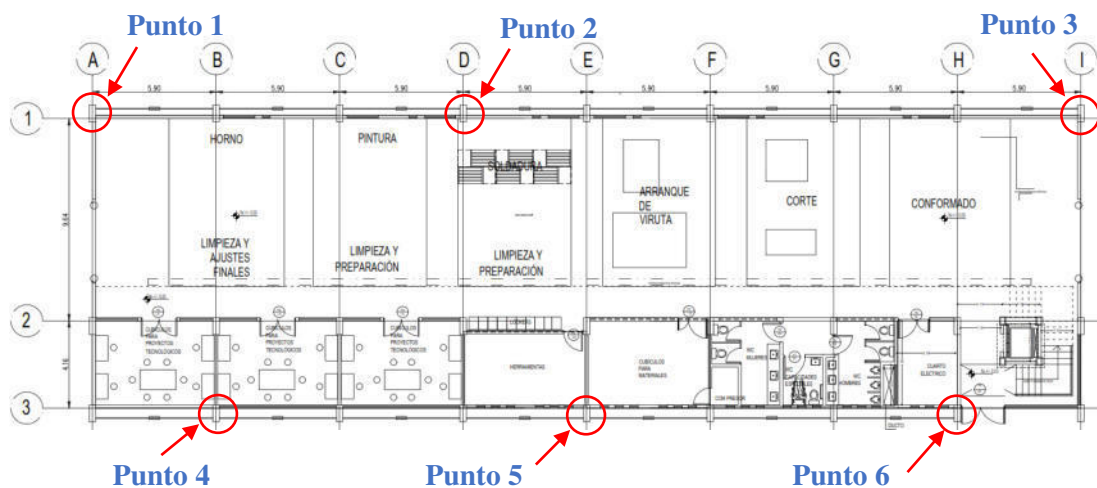
De acuerdo con la calibración del Medidor de espesores de placa, el rango tolerable de error debe ser menor al 5% y conforme a las mediciones realizadas de los espesores para cada componente en comparación con los valores detallados en la tabla 14, los resultados se encuentran dentro de la tolerancia de error y son aceptables.

3.9.5 Inspección y medición de los cordones de soldadura (VT)

Se realiza la medición mediante una galga la altura del cordón de soldadura en los componentes de la estructura de los Talleres de análisis bajo el código: ANSI/AWS D1.1: 2015.

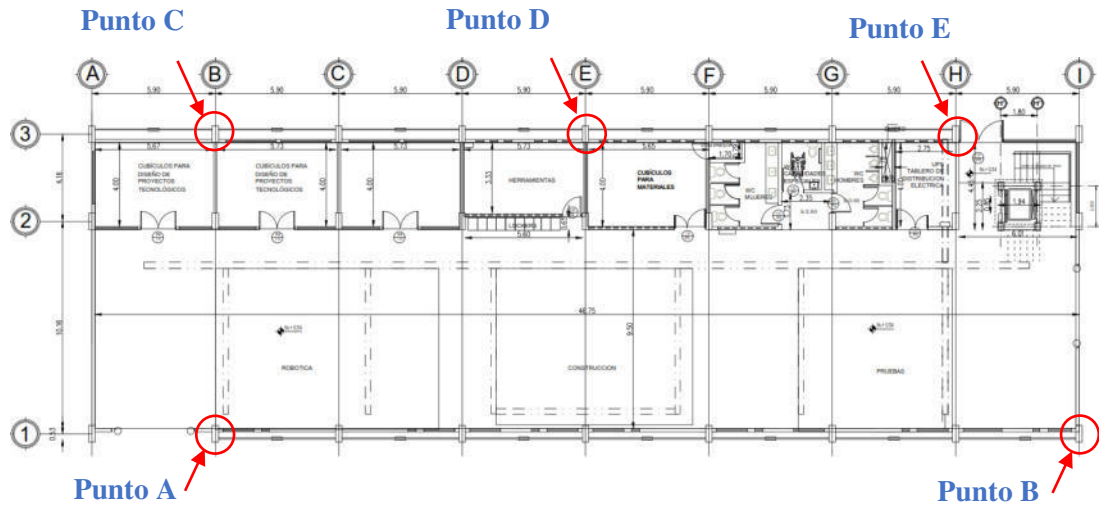
En los siguientes planos se presenta la ubicación de los puntos que se realizó el ensayo para los dos talleres de análisis:

Figura 48: Ubicación de los elementos ensayados - Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

Figura 49: Ubicación de los elementos ensayados - Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

Proceso general:

- Colocar la base de la galga de soldadura de forma paralela a la superficie de las placas.
- Medir la altura del exceso en el cordón de soldadura en una junta a tope.
- Medir la garganta del cordón de soldadura en una junta en a tope en V o a 90°.

Figura 50: Medición del cordón de soldadura



Fuente: Ing. Byron López

Tabla 20: Medición de alturas - Taller FICM

| Puntos | Placa base -Columna (mm) | Columna (mm) | Placa de unión -Columna (mm) | Placa de unión - tubo (mm) |
|--------|--------------------------|--------------|------------------------------|----------------------------|
| 1 | 9.18 | 2.14 | 4.14 | 3.74 |
| 2 | 8.08 | 2.3 | 4.24 | 4.54 |
| 3 | 9.6 | 3.1 | 4.0 | 5.1 |
| 4 | 9.14 | 2.7 | x | x |
| 5 | 9.16 | 2.36 | x | x |
| 6 | 9.56 | 1.08 | x | x |

Fuente: Ing. Byron López

Tabla 21: Medición de alturas - Taller FISEI

| Puntos | Columna (mm) | Placa de unión y Columna | Placa de unión y tubo (mm) | Placa base y columna (mm) |
|--------|--------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| A | 1.2 | 4.1 | 5.0 | x |
| B | 1.5 | 4.7 | 4.1 | x |
| C | 1.1 | 4.0 | 4.1 | x |
| D | 1.6 | 5.0 | 4.7 | 8.1 |
| E | 1.5 | 3.6 | 3.8 | 9.9 |

Fuente: Ing. Byron López

La altura del cordón de soldadura para la junta en T entre la placa base de 20 mm de espesor y la columna de 8 mm de espesor posee un tamaño mínimo de 7 mm que de acuerdo con la tabla 3.5 del código AWS D1.1 2015 para espesores entre 6 a 12 mm debe poseer un cordón de soldadura mínimo de 5 mm de acuerdo con las mediciones realizadas el tamaño mínimo promedio de la soldadura fue de 8.10 mm. Para la junta a tope de la columna de 8 mm el tamaño mínimo debe estar entre 1 y 3 mm, de acuerdo con los resultados se obtuvo un valor mínimo de 1.1 mm. Para la placa de unión de 6 mm y la columna de 8 mm el tamaño mínimo debe estar en torno a 3 mm, el valor mínimo obtenido fue de 4.0 mm y, para la placa de unión y el tubo el tamaño mínimo es de 3 mm, conforme a las mediciones el tamaño mínimo de la soldadura es esta junta es de 3.74mm. todos los valores obtenidos son aceptables dentro de la inspección. En las siguientes figuras se presenta los esquemas de los cordones de soldadura con los valores mínimos encontrados:

- **Placa base y columna (Junta en T)**

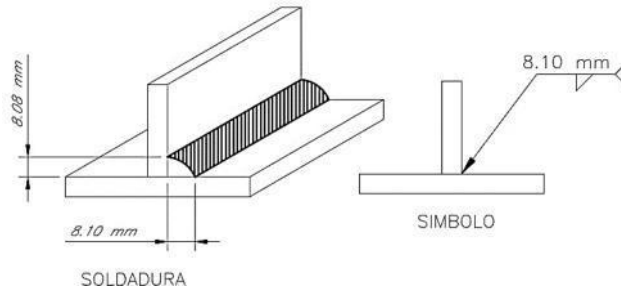
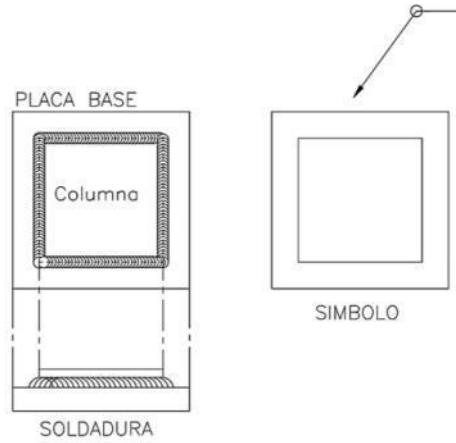


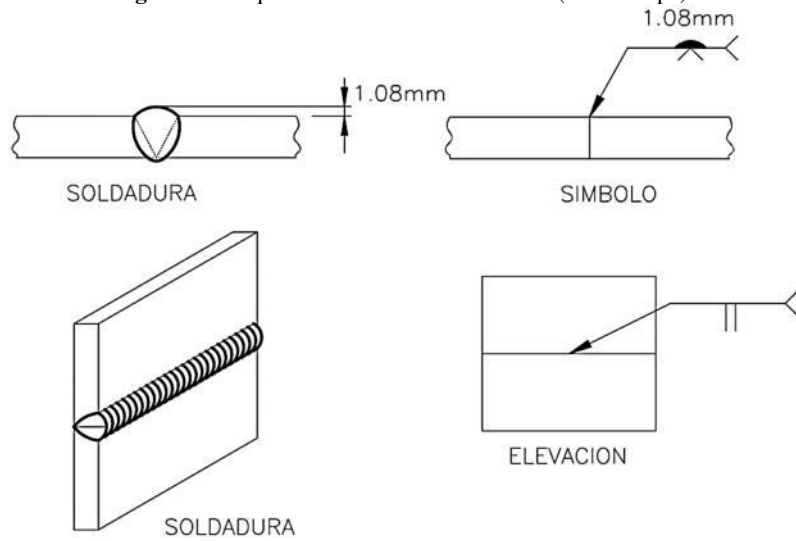
Figura 51: Esquema de soldadura - placa base y columna (Junta en T)



Fuente: Ing. Byron López

- **Columna (Junta a tope)**

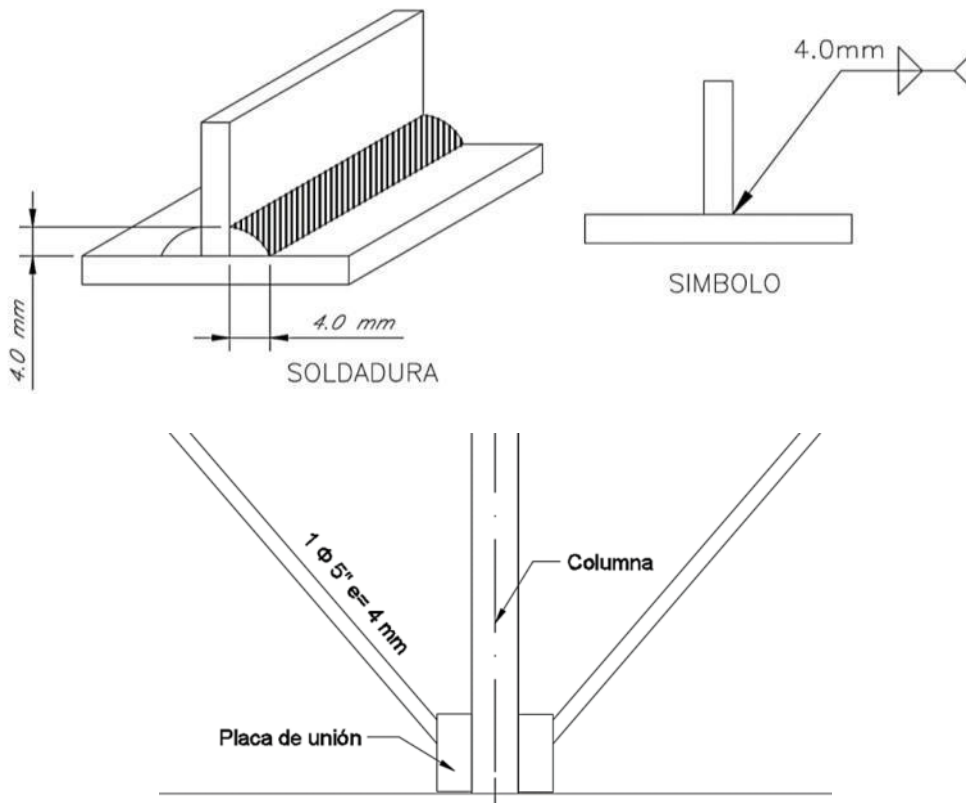
Figura 52: Esquema de soldadura - Columna (Junta a tope)



Fuente: Ing. Byron López

- **Placa de unión y Columna (Junta en T con doble filete)**

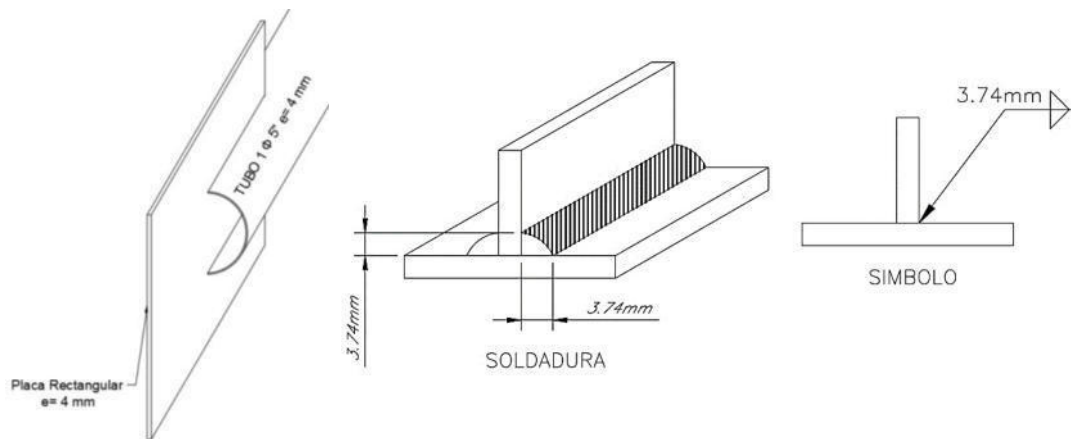
Figura 53: Esquema de soldadura - Placa de unión y Columna (Junta en T con doble filete)



Fuente: Ing. Byron López

- **Placa de unión y tubo (Junta en T)**

Figura 54: Esquema de soldadura - Placa de unión y tubo (Junta en T)



Fuente: Ing. Byron López

3.9.6 Tintas Penetrantes (PT)

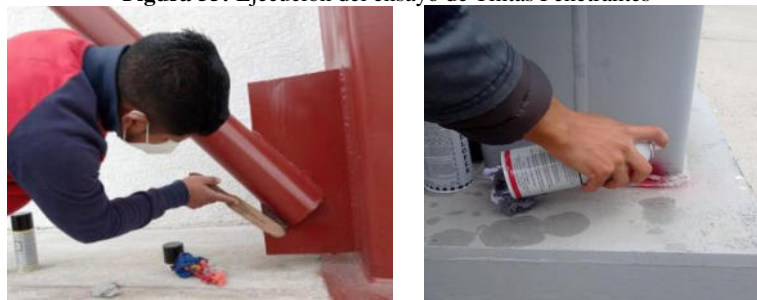
Este ensayo tiene como objetivo evaluar por medio de tintas penetrantes los diferentes tipos de defectos y discontinuidades del cordón de soldadura que se encuentran en la junta usando normativa ASTM E-165 y el código AWS D1.1.

La inspección por tintas penetrantes es una de las pruebas no destructivas más utilizadas en varias ramas industriales y es de suma importancia el conocer el principio físico por el cual operan para así interpretar de una forma correcta los resultados.

Proceso general:

- Se procede a limpiar la superficie de la soldadura, con cepillo metálico para retirar cualquier resto de escoria, pintura, suciedad u óxido.
- Limpiar con solvente el cordón de soldadura, para eliminar rastros de grasa y suciedad con guaipe.
- Medir una longitud de 10 cm del tramo de la columna a inspeccionar.
- Limpiar con la lata de cleaner el cordón de soldadura en la columna.
- Limpiar con guaipe en una sola dirección el cordón de soldadura en la columna, con la intención de que la junta no se contamine de restos extraídos.
- Colocar el penetrante por el cordón de soldadura con un ángulo de 180° a 30° con respecto a la horizontal.
- Esperar 15 minutos para que el penetrante entre en las discontinuidades, una vez hecho esto limpiar el exceso de revelador con guaipe en una sola dirección.
- Aplicar el revelador con el mismo ángulo indicado anteriormente, esperar 5 minutos para que este realice su efecto.
- Observar y detallar los resultados obtenidos en una ficha de recolección de datos, ya que se cuenta con un tiempo determinado para realizar esta operación.

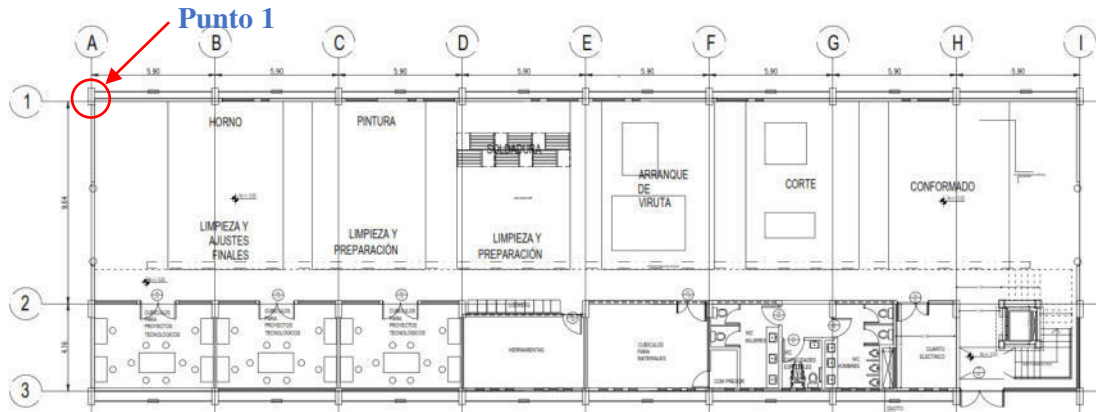
Figura 55: Ejecución del ensayo de Tintas Penetrantes



Fuente: Ing. Byron López

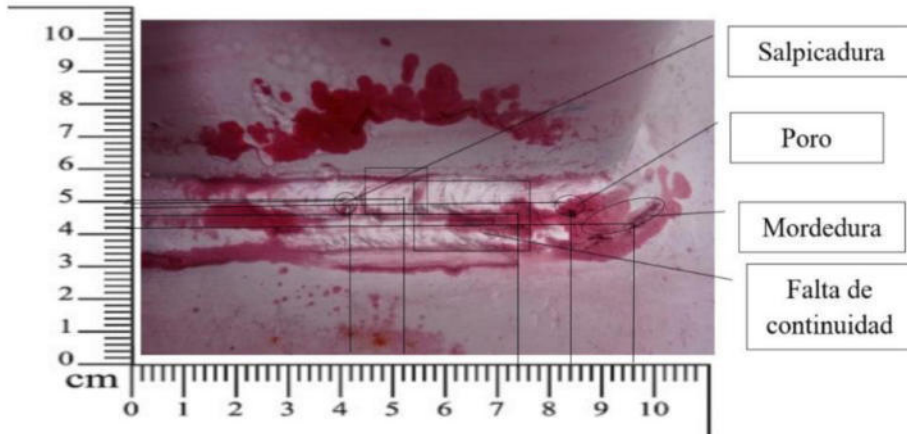
Para el Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica se realizó el ensayo en el cordón de soldadura de la unión entre placa base con la columna, en la siguiente figura se presenta la ubicación exacta del elemento a ensayar.

Figura 56: Ubicación del elemento ensayado - Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

Figura 57: Resultados del ensayo e inspección visual de las discontinuidades - Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

Tabla 22: Resultados de las discontinuidades - Taller FICM

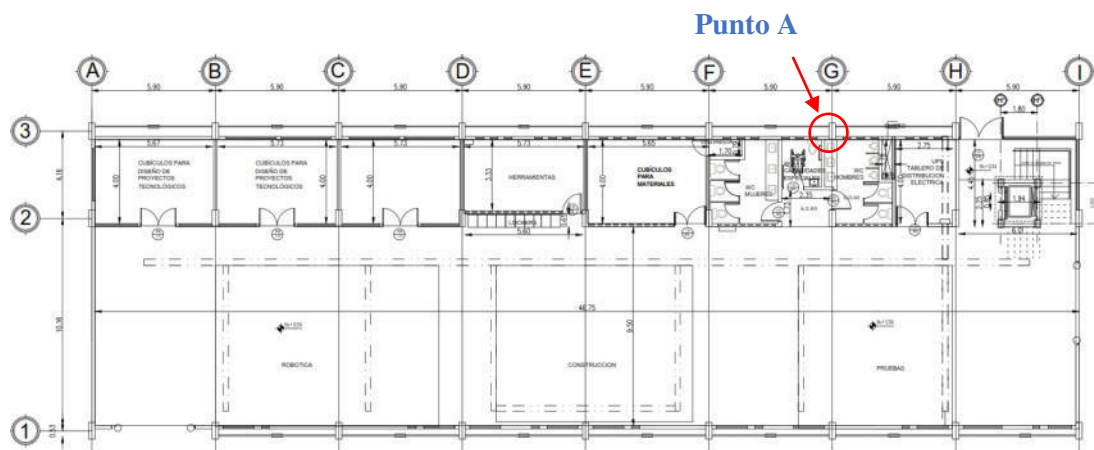
| Discontinuidad | Coordenadas de ubicación | | Longitud [mm] | Diámetro [mm] | Resultados | |
|----------------------|--------------------------|-----|---------------|---------------|------------|-----------|
| | X | Y | | | Aceptada | Rechazada |
| Falta de continuidad | 5.2 | 4.8 | 14 | 10 | | x |
| Poro | 8.4 | 4.4 | 3 | 3 | x | |
| Mordedura | 7.4 | 4.2 | 16 | 8 | x | |
| Mordedura | 9.6 | 3.8 | 16 | 8 | | x |
| Salpicadura | 4.2 | 4.6 | 4 | 4 | x | |

Fuente: Ing. Byron López

De acuerdo con los criterios de aceptación de inspección visual del código de soldadura estructural ANSI/AWS D1.1 2015 en la tabla 6.1. la junta de soldadura de la columna anteriormente ensayada es aceptada. Cabe recalcar que las discontinuidades halladas en el ensayo pueden ser reparadas y nuevamente ensayadas.

Para el Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial se realizó el ensayo en el cordón de soldadura de la placa de refuerzo con el tubo de la riostra, en la siguiente figura se presenta la ubicación exacta del elemento a ensayar.

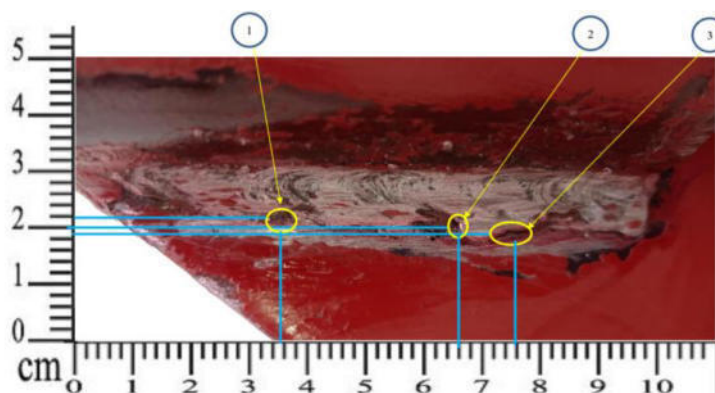
Figura 58: Ubicación del elemento ensayado - Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

En la siguiente figura se observa los resultados de las discontinuidades encontradas:

Figura 59: Resultados del ensayo e inspección visual de las discontinuidades - Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

En la siguiente tabla se presenta la ubicación y medida exacta de las discontinuidades:

Tabla 23: Resultados de las discontinuidades - Taller FISEI

| N | Discontinuidad | Coordenadas de ubicación | | Longitud [mm] | Diámetro [mm] | Resultados | |
|---|-----------------|--------------------------|------|---------------|---------------|------------|-----------|
| | | X | Y | | | Aceptada | Rechazada |
| 1 | Nido de Poros | 3.26 | 2.1 | 2 | - | x | |
| 2 | Poros | 6.3 | 2.0 | - | 1 | x | |
| 3 | Falta de fusión | 7.3 | 1.95 | 3 | - | | x |

Fuente: Ing. Byron López

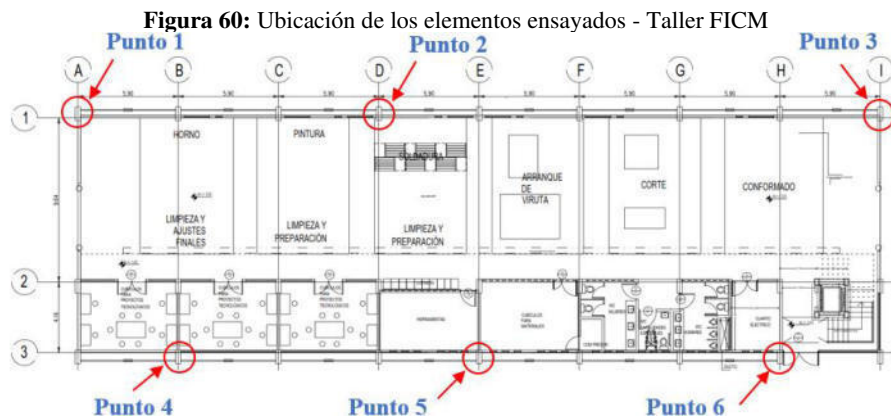
De acuerdo con la norma ASTM sección V artículo 5 la junta anteriormente ensayada se acepta.

3.9.7 Ensayo de ultrasonido (UT)

El ensayo de ultrasonido determina las discontinuidades en los componentes que conforman los dos talleres analizados. El equipo de ultrasonido es comúnmente utilizado para la inspección de discontinuidades y medición de espesores sobre una determinada superficie luego de haberse calibrado en función de las dimensiones y características del componente a inspeccionar.

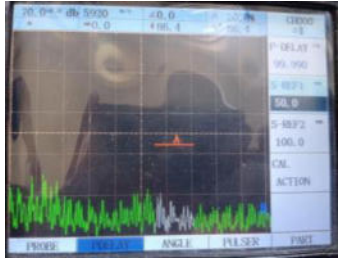
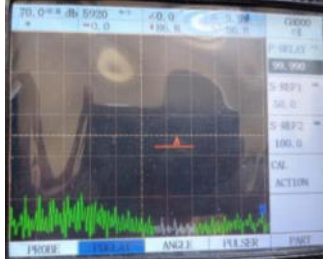
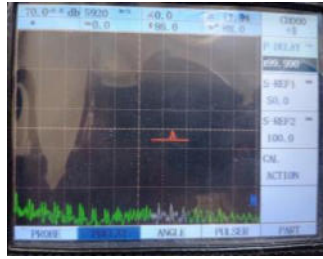
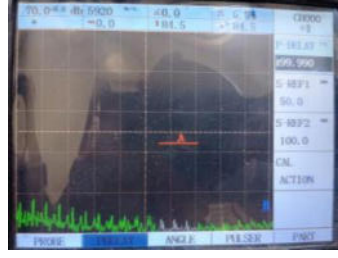
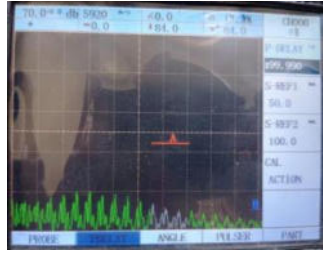
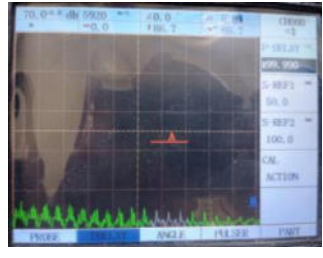
El procedimiento consiste en calibrar el equipo de ultrasonido mediante la norma DIN 54120 y la norma ASME sección V artículo V, luego colocar el transductor en el componente a inspeccionar, en este caso en las columnas de la estructura de los dos talleres y luego se visualiza el comportamiento de las ondas en el equipo para la interpretación de los resultados.

En la siguiente figura se presenta la ubicación exacta del elemento a ensayar para el Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.



Fuente: Ing. Byron López

Tabla 24: Resultados obtenidos - Taller FICM

| Medidas de ultrasonido en las columnas del exterior | | |
|--|---|--|
| Seccion 1 | Seccion 2 | Seccion 3 |
|  |  |  |
| Medidas de ultrasonido en las columnas del interior | | |
| Seccion 4 | Seccion 5 | Seccion 6 |
|  |  |  |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 61: Aplicación en campo en la columna

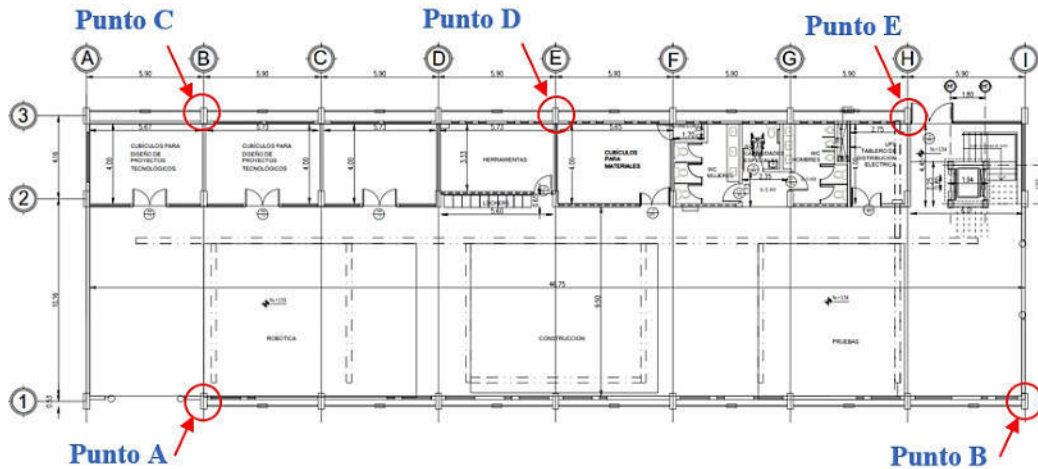


Fuente: Ing. Byron López

Las gráficas que se generan en el equipo tomadas en cada punto de análisis indican que no presentan discontinuidades en el cordón de soldadura ni en los espesores de las placas de acero ASTM A36 usadas en las columnas y en las placas base.

Para el Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial se realizó el ensayo en columna y placa base, en la siguiente figura se presenta la ubicación exacta del elemento a ensayar.

Figura 62: Ubicación de los elementos ensayados - Taller FISEI

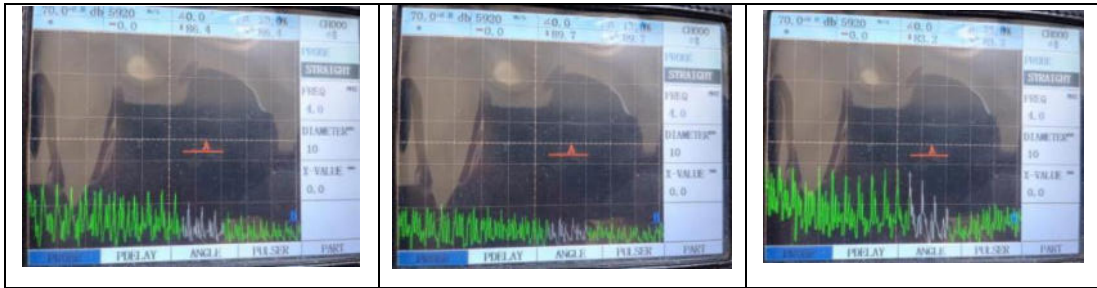


Fuente: Ing. Byron López

En la siguiente tabla se presenta las fotografías tomado del equipo de ultrasonido:

Tabla 25: Resultados obtenidos - Taller FISEI

| Columna - Punto A | Placa base - Punto A | Columna - Punto B |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | |
| Placa base - Punto B | Columna - Punto C | Placa base - Punto C |
| | | |
| Columna - Punto D | Placa base - Punto D | Columna - Punto E |
| | | |



Fuente: Ing. Byron López

3.9.8 Resistencia a la fluencia del acero

El valor de la resistencia a la fluencia de acero para hormigón armado de las estructuras como se especifica en los planos estructurales es de f_y : 4200 kg/cm², para el acero estructural se considera el ASTM A-36 con una resistencia a la fluencia de f_y : 2530 kg/cm².

3.9.9 Clasificación y tipo de suelo

En la siguiente tabla se presenta los resultados del ensayo del SPT:

Tabla 26: Ensayo de Penetración Estándar

| Cota | Profundidad (Cm) | N SPT (Parcial) | N SPT (Total) | N SPT (Medio) | Tipo De Perfil |
|-------|------------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|
| -0.55 | 55 | Limpieza | 19 | 44 | D |
| -0.70 | 70 | 2 | | | |
| -0.85 | 85 | 8 | | | |
| -1.00 | 100 | 11 | 32 | | |
| -1.05 | 105 | Limpieza | | | |
| -1.20 | 120 | 12 | | | |
| -1.35 | 135 | 14 | 45 | | |
| -1.50 | 150 | 18 | | | |
| -1.70 | 170 | 15 | | | |
| -1.85 | 185 | 21 | 44 | | |
| -2.00 | 200 | 24 | | | |
| -2.20 | 220 | 12 | | | |
| -2.35 | 235 | 19 | 52 | | |
| -2.50 | 250 | 25 | | | |
| -2.70 | 270 | 16 | | | |
| -2.85 | 285 | 24 | 57 | | |
| -3.00 | 300 | 28 | | | |
| -3.20 | 320 | 18 | | | |

| | | | | | |
|-------|-----|----|----|--|--|
| -3.35 | 335 | 28 | 61 | | |
| -3.50 | 350 | 29 | | | |
| -3.70 | 370 | 12 | | | |
| -3.85 | 385 | 30 | | | |
| -4.00 | 400 | 31 | | | |

Fuente: Ing. Byron López

La clasificación y el tipo de suelo según la se lo realizó mediante el ensayo de penetración estándar (SPT), el cual consiste en obtener el número de golpes requeridos para poder introducir una determinada profundidad un tomamuestras y así determinar el tipo de suelo en base a los numero de golpes (N).

Para la identificación del perfil del suelo se efectuó una perforación alrededor del lugar de emplazamiento de la estructura donde se procedió a instalar el equipo requerido para el ensayo, se considera las especificaciones establecidas en la norma ASTM D-1586. Las especificaciones tomadas en cuanta por la Norma Ecuatoriana para la definición del tipo de perfil de suelo se consideran los siguientes:

- La velocidad media de onda de corte, (V_s 30 m/s).
- El número medio de golpes del ensayo de penetración estantalar (SPT).
- El índice de plasticidad (IP).
- El contenido de agua, w (%).

Según las especificaciones de la norma ecuatoriana NEC-2015 en su sección 3.2.1 de los tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico, con el valor medio del número de golpes que se encuentra entre el intervalo $50 > N \geq 15$, clasificando el suelo del lugar de análisis como tipo D.

3.9.9.1 Clasificación de suelo según la SUCS

Con las muestras obtenidas del ensayo SPT se determinó la clasificación con las especificaciones del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como se presenta en la siguiente tabla. Para lo cual se realiza los ensayos de granulometría y los ensayos de límite de Atterberg datos necesarios para su clasificación.

Los resultados utilizados para la clasificación de los ensayos de granulometría y limistes de Atterberg se presentan en los anexos, según estos resultados se determina que el tipo de suelo **SM**, una arena limosa.

Tabla 27: Clasificación de los suelos SUCS

| | | Sub-Tipos | Identificación | | Símbolo de Grupo | | |
|--------------------------------------|--|---|--|---|---|---|----|
| Suelos (Partículas menores a 7.5 cm) | SUELOS GRUESOS Más de la mitad del material se retiene en la malla N° 200 (0.075 mm) | GRAVA Más de la mitad de la fracción gruesa se retiene en la malla N°4 | GRAVA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas) | Grava bien graduada; mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. Debe tener un coeficiente de uniformidad (Cu) mayor de 4 y un coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3. | Menos del 5% en masa pasa la malla N° 200 | Gw | |
| | | | | Grava mal graduada; mezcla de grava y arena con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para GW. | Menos del 5% en masa pasa la malla N° 200 | GP | |
| | | | GRAVA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas) | Grava limosa; mezcla de grava, arena y limo. | Más del 12% en masa pasa la malla N° 200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como ML o MH | GM | |
| | | | | Grava arcillosa; mezclas de grava, arena y arcilla. | Más del 12% en masa pasa la malla N° 200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como CL o CH. | GC | |
| | | | ARENA Más de la mitad de la fracción gruesa pasa la malla N°4 | ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas) | Arena bien graduada; mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. Debe tener un coeficiente de uniformidad (Cu) mayor de 6 y un coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 y 3. | Menos de 5% en masa pasa la malla N° 200. | SW |
| | | | | | Arena mal graduada; mezcla de arena y grava con poco o nada de finos. No satisface los requisitos de graduación para SW. | Menos de 5% en masa pasa la malla N° 200. | SP |
| | | ARENAS CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas) | | Arena limosa; mezcla de arena grava y limo. | Más de 12% en masa pasa la malla N° 200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como ML o MH | SM | |
| | | | | Arena arcillosa; mezcla de arena, grava y arcilla. | Más de 12% en masa pasa la malla N° 200 y las pruebas de límites de consistencia clasifican a la fracción fina como CL o CH | SC | |
| | | SUELOS FINOS Más de la mitad del material pasa la malla N°200 | LIMO Y ARCILLA Límite Líquido | Menor de 50% | Limo de baja compresibilidad; mezcla de limo de baja plasticidad, arena y grava; polvo de roca. Se localiza dentro de la Zona I de la carta de plasticidad. | ML | |
| | | | | | Arcilla de baja compresibilidad; mezcla de arcilla de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la Zona II de la carta de plasticidad. | CL | |
| | Limo orgánico de baja compresibilidad; mezcla de limo orgánico de baja plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la Zona I de la carta de plasticidad. | | | | OL | | |
| | Mayor de 50% | | | Limo de alta compresibilidad; mezcla de limo de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la Zona III de la carta de plasticidad. | MH | | |
| | | | | Arcilla de alta compresibilidad; mezcla de arcilla de alta plasticidad, arena y grava. Se localiza dentro de la Zona IV de la carta de plasticidad. | CH | | |
| | | | | Limo orgánico de alta compresibilidad; mezcla de limo orgánico de alta compresibilidad, arena y grava. Se localiza dentro de la Zona III de la carta de plasticidad. | OH | | |
| | | | | ALTAMENTE ORGÁNICO | Turba, fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa frecuentemente por su textura fibrosa. | Pt | |

Fuente: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

3.9.9.2 Velocidad de onda de corte V_s

Para determinar la velocidad de onda de corte se utiliza la correlación establecida por Kirar (2016) por su correcto ajuste que tiene con respecto al número de golpes del ensayo SPT y la velocidad de onda de corte establecido en la NEC 2015.

A continuación, se presenta las fórmulas según Kirar:

Para todo tipo de suelo:

$$V_s = 99.5 * N^{0.345} \text{ (m/s)}$$

Para el suelo arenoso:

$$V_s = 100.3 * N^{0.338} \text{ (m/s)}$$

Para suelo arcilloso:

$$V_s = 94.4 * N^{0.379} \text{ (m/s)}$$

Como se clasifico anteriormente el tipo de suelo como una arena limosa, se utilizó la fórmula para un suelo arenoso, en la siguiente tabla se presenta los valores obtenidos y el promedio de la velocidad de onda de corte.

Tabla 28: Velocidad de Onda de Corte en cada cota

| COTA (m) | N° Golpes (30cm) | V_s m/sg | V_s (m/s) PROM. |
|---------------------|-----------------------------|----------------------------------|---|
| -1.0 | 19 | 271.34 | 356.53 |
| -1.5 | 32 | 323.62 | |
| -2.0 | 45 | 363.15 | |
| -2.5 | 44 | 360.40 | |
| -3.0 | 52 | 381.34 | |
| -3.5 | 57 | 393.36 | |
| -4.0 | 61 | 402.48 | |

Fuente: Ing. Byron López

Con lo especificado en la Normativa Ecuatoriana NEC 2015 sobre la velocidad de onda de corte el cual se encuentra en el rango $360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$; se clasifica el suelo del lugar como tipo **D**.

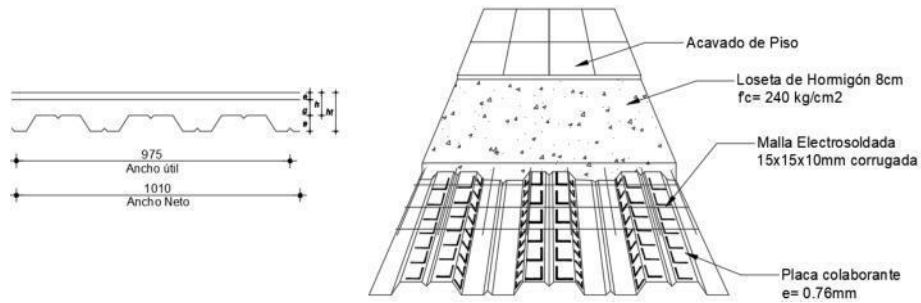
3.9.10 Cargas gravitacionales

Como cargas gravitacionales se consideran a las solicitaciones que tiene como origen el peso propio de los materiales utilizados para su construcción, sus ocupantes y el mobiliario de la estructura que son actuados en sentido de la gravedad. Entre estas cargas tenemos las cargas muertas que son permanentes ya que no cambian a través del tiempo y las cargas vivas que son variables dependiendo de la ocupación.

- **Carga Muerta**

Para la carga muerta se deben considerar el peso propio de la edificación, el peso de las paredes que son usados como divisiones de los ambientes arquitecticos y el peso de los acabados. En las siguientes tablas se presenta los valores de carga muerta que se utilizara para el modelado de la estructura.

Figura 63: Detalle de losa con placa colaborante



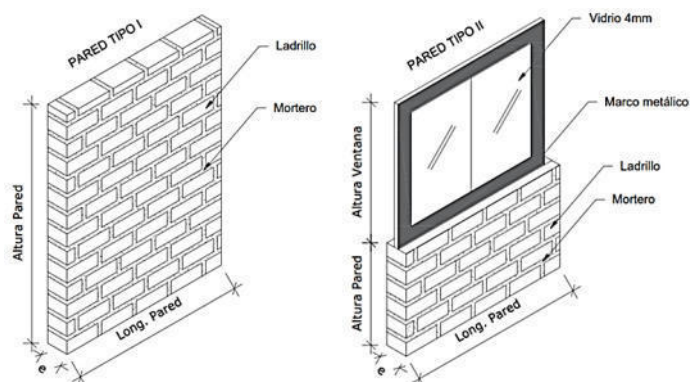
Fuente: Ing. Byron López

Tabla 29: Cuantificación del peso de la losa Steel Deck.

| Elementos | Dimensiones (m) | | | Peso Específico | Peso Total |
|--|-----------------|----------|---------|-------------------|-------------------|
| | Altura | Longitud | Espesor | Kg/m ³ | Kg/m ² |
| Enlucido sup. | 1 | 1 | 0.02 | 1900 | 38.00 |
| Acabado | 1 | 1 | 0.015 | 1600 | 24.00 |
| Cielo raso con elementos modulares de yeso montado sobre elementos metálicos o de madera | | | | | 20.00 |
| | | | | Total = | 82.00 |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 64: Tipos de Paredes



Fuente: Fernando Guerrero, Análisis sísmico y posible reforzamiento del bloque de la Unidad Educativa Santo Domingo de Guzmán

Tabla 30: Peso propio de paredes

| Tipo | Elementos | Dimensiones (m) | | Peso Específico | Peso Total | | Longitud | Total |
|----------------------------------|-----------|-----------------|---------|-------------------|------------|--------|----------|----------------|
| | | Altura | Espesor | Kg/m ³ | Kg/m | | m | Kg |
| 1 | Pared | 3.00 | 0.15 | 1600 | 720.00 | | 8.54 | 6148.8 |
| 2 | Pared | 1.20 | 0.15 | 1600 | 288.00 | 304.64 | 1.5 | 456.96 |
| | Vidrio | 1.60 | 0.004 | 2600 | 16.64 | | | |
| Total (kg) | | | | | | | | 6605.76 |
| Área losa (m²) | | | | | | | | 23.31 |
| CM (kg/m²) | | | | | | | | 283.39 |

Fuente: Ing. Byron López

- **Carga Viva**

La carga viva se toma lo establecido en la NEC SE CG (Cargas no sísmicas) en su literal 4.2.1 se presenta los valores de cargas (uniforme y concentrada) de acuerdo con la ocupación o los usos. En la siguiente tabla se presenta los valores de carga viva que utilizaran para el modelado:

Tabla 31: Sobrecargas mínimas uniformemente distribuidas

| Ocupación o uso | Carga uniforme (kg/m ²) |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Aulas | 200 |
| Corredor segundo piso y superior | 400 |
| Corredor primer piso | 480 |
| Cubierta planas | 100 |
| Fabricas/ Industrias/ Manufactura | 600 |

Fuente: Ing. Byron López

Para la carga viva de techo, corresponde al peso del personal que realiza el montaje de la estructura y/o mantenimiento de la misma:

$$\text{Peso de carga viva de techo } CV = 100 \text{ kg/m}^2$$

Cargas que actúan en el puente grúa

- **Carga viva**

La carga viva es debido al mobiliario del sistema, por lo que esta será la carga máxima que podrá elevar el puente grúa por condición del taller es:

$$CV = 5 \text{ Tn} = 5000 \text{ kg (carga máxima)}$$

- **Carga de Seguridad**

El factor de seguridad para el diseño de estructuras se considera entre 25%-30% de la carga de soportar. La carga de seguridad está dada por la siguiente ecuación:

$$C_s = (f_s) \times C_v$$

$$C_s = 0.3 \times 5000 \text{ kg}$$

$$C_s = 1500 \text{ kg}$$

- **Carga muerta**

La carga muerta es debido al peso propio de los elementos y los efectos permanentes de la estructura por lo que, para la carga muerta, se supone las dimensiones de la sección del perfil de la viga, el programa de análisis ya toma en cuenta esta carga.

3.9.11 Irregularidad en planta y elevación

Las irregularidades se evalúan según la sección 5.3.3 de la NEC-SE-DS, donde establece las irregularidades en elevación y en planta. Cuando existe la presencia de algún tipo de irregularidad se la penaliza con un valor de coeficiente de configuración estructural con la finalidad de tomar en cuenta esta deficiencia que puede ser responsable un comportamiento deficiente durante un sismo.

\emptyset_E = Coeficiente de regularidad en elevación

Tabla 32: Coeficiente de regularidad en elevación - Taller FICM

| Tipo de Irregularidad | Posee | \emptyset_E |
|---|-------|---------------|
| Piso Flexible | X | 1 |
| Distribución de masa | X | 1 |
| Irregularidad geométrica | X | 1 |
| Coeficiente de regularidad en elevación | | 1 |

Fuente: Ing. Byron López

\emptyset_P = Coeficiente de regularidad en planta

Tabla 33: Coeficientes de regularidad en planta - Taller FICM

| Tipo de Irregularidad | Posee | \emptyset_P |
|--------------------------------------|-------|---------------|
| Irregularidad Torsional | X | 1 |
| Retrocesos excesivos en las esquinas | X | 1 |

| | | |
|--|----|-----|
| Discontinuidades en el sistema de piso | SI | 0.9 |
| Ejes estructurales no paralelos | X | 1 |
| Coeficiente de regularidad en planta | | 0.9 |

Fuente: Ing. Byron López

Tabla 34: Coeficiente de regularidad en elevación - Taller FISEI

| Tipo de Irregularidad | Posee | \emptyset_E |
|---|-------|---------------|
| Piso Flexible | X | 1 |
| Distribución de masa | X | 1 |
| Irregularidad geométrica | X | 1 |
| Coeficiente de regularidad en elevación | | 1 |

Fuente: Ing. Byron López

Tabla 35: Coeficientes de regularidad en planta - Taller FISEI

| Tipo de Irregularidad | Posee | \emptyset_P |
|--|-------|---------------|
| Irregularidad Torsional | X | 1 |
| Retrocesos excesivos en las esquinas | X | 1 |
| Discontinuidades en el sistema de piso | SI | 0.9 |
| Ejes estructurales no paralelos | X | 1 |
| Coeficiente de regularidad en planta | | 0.9 |

Fuente: Ing. Byron López

3.9.12 Cargas Sísmicas

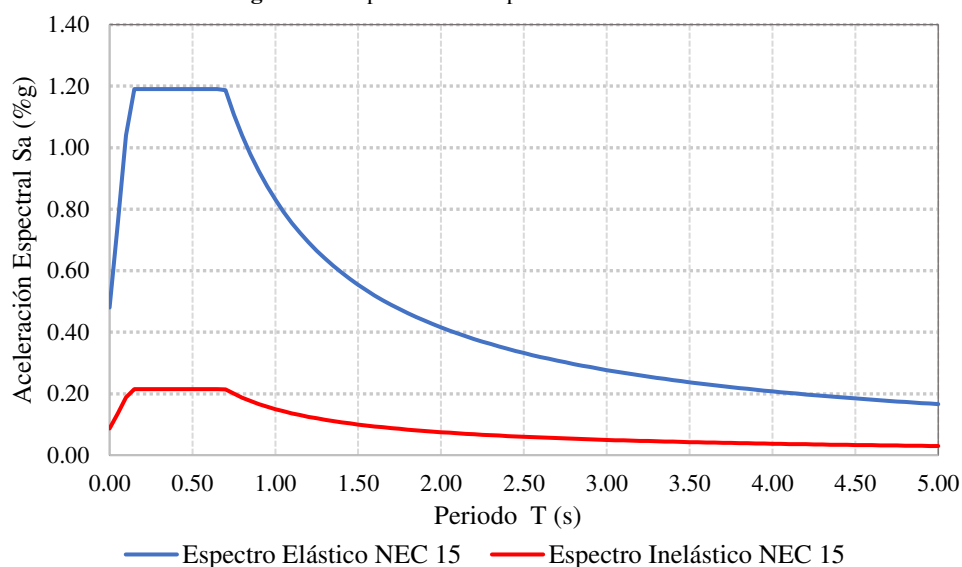
Para la consideración de la carga sísmica se utiliza los parámetros que se especifica en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS). La edificación se ubica en la ciudad de Ambato, el suelo donde se encuentra emplazada es de tipo D, en función del mapa de zonificación sísmica se encuentra dentro de la zona sísmica V, dentro de la categoría de una estructura de ocupación especial, los valores utilizados se indican en la siguiente tabla permitiendo determinar el cortante basal y el espectro de respuesta sísmica.

Tabla 36: Factores de carga sísmica y de configuración estructural – Taller FICM

| SITIO | Ambato | TIPO DE SUELO | D |
|--|---|----------------------|---|
| S. ESTRUCTURAL | Pórticos especiales sísmo resistentes de acero laminado en caliente, con diagonales rigidizadores | | |
| USO | Taller | | |
| DATOS PARA EL ESPECTRO ELÁSTICO | | | |
| PARÁMETROS | VALOR | NEC-SE-DS | Observaciones |
| Z (%g) | 0.40 | 3.1.1 | Factor de zona sísmica |
| η | 2.48 | 3.3.1 | Valor ETA de ubicación |
| fa | 1.20 | 3.2. 2.a | Amplificación de las ordenadas de aceleración |
| fd | 1.19 | 3.2.2. b | Amplificación de las ordenadas de desplazamientos |
| fs | 1.28 | 3.2.2.c | Comportamiento no lineal de los suelos |
| r | 1.00 | 3.3.1 | |
| DATOS PARA EL ESPECTRO REDUCIDO | | | |
| R | 8.00 | 6.3.4. b. | Factor de reducción de resistencia sísmica |
| I | 1.30 | 4.1 Tabla 6 | Estructura especial |
| Φ_p | 0.90 | 5.2.3. Tabla 13 | Coefficiente de irregularidad en elevación |
| Φ_e | 1.00 | 5.2.3. Tabla 14 | Coefficiente de irregularidad en planta |
| hn (m) | 9.07 | 6.3.3 | Altura total de la edificación |
| Ct | 0.073 | 6.3. 3.a | Factor de dependencia del sistema estructural |
| α | 0.75 | 6.3. 3.a | Factor de dependencia del sistema estructural |
| CÁLCULOS | | | |
| Ta (s) | 0.3950 | | Periodo de Vibración |
| To (s) | 0.1269 | | Inicio de la meseta del espectro NEC 2015 |
| Tc(s) | 0.6981 | | Final de la meseta del espectro NEC 2015 |
| Sa(%g) | 1.1904 | | Aceleración elástica (sin reducir) |
| C (%g) | 0.2149 | | Aceleración reducida |
| k | 1.000 | 6.3.5. | Factor de distribución de fuerzas |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 65: Espectros de Respuesta – Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

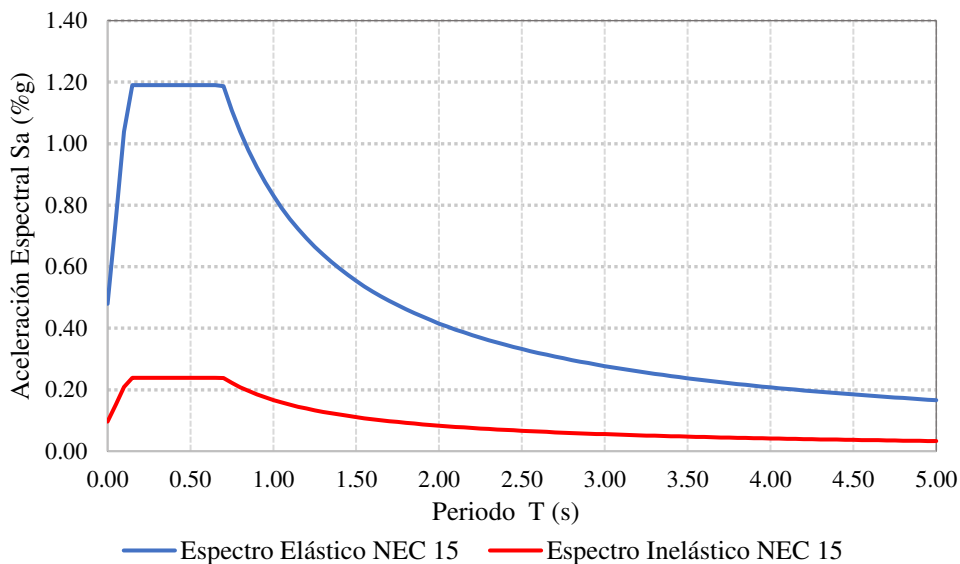
Tabla 37: Factores de carga sísmica y de configuración estructural – Taller FISEI

| SITIO | Ambato | TIPO DE SUELO | D |
|--|---|----------------------|---|
| S. ESTRUCTURAL | Pórticos especiales sísmo resistentes de acero laminado en caliente, con diagonales rigidizadores | | |
| USO | Taller | | |
| DATOS PARA EL ESPECTRO ELÁSTICO | | | |
| PARAMETROS | VALOR | NEC-SE-DS | Observaciones |
| Z (%g) | 0.40 | 3.1.1 | Factor de zona sísmica |
| η | 2.48 | 3.3.1 | Valor ETA de ubicación |
| fa | 1.20 | 3.2. 2.a | Amplificación de las ordenadas de aceleración |
| fd | 1.19 | 3.2.2. b | Amplificación de las ordenadas de desplazamientos |
| fs | 1.28 | 3.2.2.c | Comportamiento no lineal de los suelos |
| r | 1.00 | 3.3.1 | |
| DATOS PARA EL ESPECTRO REDUCIDO | | | |
| R | 8.00 | 6.3.4. b. | Factor de reducción de resistencia sísmica |
| I | 1.30 | 4.1 Tabla 6 | Estructura especial |
| Φ_p | 0.90 | 5.2.3. Tabla 13 | Coefficiente de irregularidad en elevación |
| Φ_e | 1.00 | 5.2.3. Tabla 14 | Coefficiente de irregularidad en planta |
| hn (m) | 9.07 | 6.3.3 | Altura total de la edificación |
| Ct | 0.073 | 6.3. 3.a | Factor de dependencia del sistema estructural |
| α | 0.75 | 6.3. 3.a | Factor de dependencia del sistema estructural |
| CÁLCULOS | | | |
| Ta (s) | 0.3815 | Periodo de Vibración | |

| | | | |
|--------|---------------|--------|---|
| To (s) | 0.1269 | | Inicio de la meseta del espectro NEC 2015 |
| Tc(s) | 0.6981 | | Final de la meseta del espectro NEC 2015 |
| Sa(%g) | 1.1904 | | Aceleración elástica (sin reducir) |
| C (%g) | 0.2149 | | Aceleración reducida |
| k | 1.000 | 6.3.5. | Factor de distribución de fuerzas |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 66: Espectros de Respuesta – Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

3.10 Análisis Lineal de la Estructura Actual

Para el análisis lineal de las edificaciones se utilizará el programa ETABS 2018, para la verificación de su aceptación se analizará con los criterios establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015, para establecer el modelo actual se ingresa los parámetros antes descritos.

3.10.1 Definición de Materiales

Para la construcción de los dos talleres se emplea acero estructural A36, que se especifica en los planos estructurales con un esfuerzo de fluencia $f_y = 36$ KSI, las demás propiedades son tomadas de las especificaciones técnicas del ASTM A36, las cuales se mencionan a continuación:

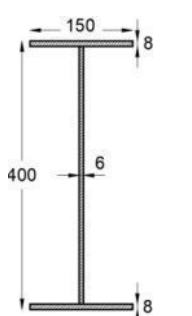
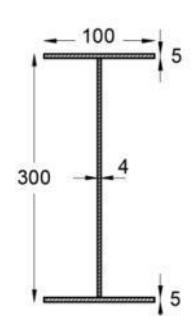
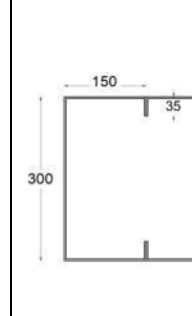
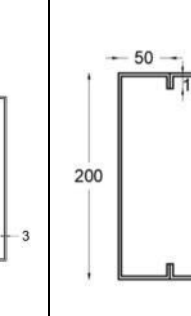
- Módulo de elasticidad (E): 29000 Ksi
- Módulo de cortante (G): 11200 Ksi

- Relación de Poison: 0.30
- Esfuerzo de fluencia (Fy): 36 Ksi \approx 2530 kg/cm²
- Resistencia a la tensión (Fu): 58 Ksi \approx 4077 kg/cm²

3.10.2 Definición de Secciones

Las secciones de columnas y vigas de acero con las que construyeron los talleres y se utilizan para el modelado de las estructuras en ETABS se detallan en las siguientes tablas con sus respectivamente secciones:

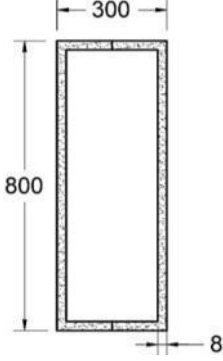
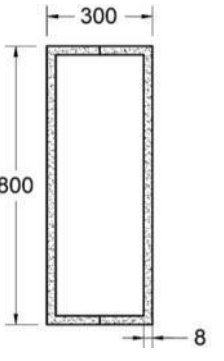
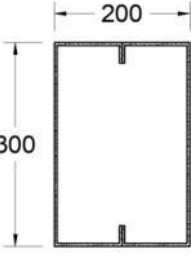
Tabla 38: Secciones de Vigas – Taller FISEI y Taller FICM

| | | | | |
|------------------|---|---|--|---|
| Nivel | Nv +3.42 Nv +6.76 Nv +7.19 | Nv +3.42 Nv +6.76 Nv +10.42 | Nv +9.07 | Nv +3.42 Nv +6.76 |
| Sección | Viga Principal VK 400X150X6X8 | Viga Secundaria VK 300X100X4X5 | Viga Principal 2G 300X150X35X3 | Viga Secundaria 2G 200X50X15X3 |
| Dimensión | Altura: 400 mm Base: 150 mm Espesor ala: 8 mm Espesor alma: 6 mm | Altura: 300 mm Base: 100 mm Espesor ala: 5 mm Espesor alma: 4 mm | Altura: 300 mm Base: 300 mm Espesor: 3 mm | Altura: 100 mm Base: 200 mm Espesor: 3 mm |
| Esquema |  |  |  |  |

Fuente: Ing. Byron López

Tabla 39: Secciones de Columnas Taller FISEI y Taller FICM

| | | | |
|-----------------------|--|-------------------------------|------------------------|
| Ubicación Ejes | A1, A2, A3, B1, B3, C1, C3, D1, D3, E1, E3, F1, F3, G1, G3, H1, H3, I1, I2, I3 | B2, C2, D2, E2, F2, G2, H2 | H'2, H''2, H'2', H''2' |
| N° | 20 | 7 | 4 |
| Sección | 2U 800X150X8 | 2U 800X150X8 | 2G 300X100X30X4 |
| Nivel | Nv +0.00 al Nv + 8.77 | Nv +0.00 al Nv +7.19 | Nv +0.00 al Nv +10.42 |

| | | | |
|----------------|---|--|---|
| Esquema |  |  |  |
|----------------|---|--|---|

Fuente: Ing. Byron López

Cabe mencionar que las secciones tanto en columnas y vigas son las mismas para los dos talleres debido a que son de medidas iguales.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de la estructura analizada con base fija

4.1.1 Análisis lineal de la estructura en estad actual

Mediante el software ETABS 2018, se realizó el modelado de los dos talleres con la información recopilada en la sección anterior, el análisis lineal se efectúa mediante los criterios establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Para verificar la aceptación de las estructuras con un diseño optimo se recomienda que cumpla con las siguientes verificaciones.

4.1.1.1 Período fundamental de vibración

Para la verificación del período de vibración (T), se debe comprobar que el valor de T que se obtiene por el método 2 mediante el análisis lineal como se presenta en la siguiente tabla, no debe superar en un 30% al valor de Ta obtenido del método 1 que se obtiene de forma estimada con la expresión establecido en la sección 3.9.7.

Tabla 40: Período Fundamental Método 2

| TALLER FICM | | TALLER FISEI | |
|--------------------|------------------|---------------------|------------------|
| Modo | Período (seg) | Modo | Período (seg) |
| 1 | 0.317 | 1 | 0.292 |
| 2 | 0.232 | 2 | 0.256 |
| 3 | 0.208 | 3 | 0.231 |
| 4 | 0.157 | 4 | 0.166 |
| 5 | 0.152 | 5 | 0.158 |
| 6 | 0.116 | 6 | 0.116 |
| 7 | 0.106 | 7 | 0.108 |
| 8 | 0.106 | 8 | 0.106 |
| 9 | 0.106 | 9 | 0.106 |

Fuente: Ing. Byron López

Tabla 41: Verificación del periodo fundamental

| | TALLER FICM | TALLER FISEI |
|----------------------|--------------------|---------------------|
| Método 1 (Ta) | 0.3815 | 0.3815 |
| Método 2 (Ta) | 0.317 | 0.292 |
| 1.3*Ta1 | 0.496 | 0.496 |
| Condición | $Ta2 \leq 1.3Ta1$ | |
| Observación | CUMPLE | CUMPLE |

Fuente: Ing. Byron López

Como se presenta en la tabla 26 los dos talleres cumplen con este chequeo debido que el valor del periodo es menor que el 30% del periodo obtenido por el método 1.

4.1.1.2 Participación de la masa modal.

Para que la estructura presente un buen comportamiento es necesario comprobar que los dos primeros modos de vibración tengan un movimiento traslacional y en el tercer modo se espera que sea totalmente torsional. Para lo cual se calcula el porcentaje de torsión que produce cada modo con la siguiente formula:

$$\%Torsión = \frac{R_z}{\max(U_x; U_y)} * 100$$

$$\%Torsión \leq 30\% (Traslacional)$$

Tabla 42: Factores de Participación de Masa Modal y % de Torsión

| TALLER - FICM | | | | | |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------------------|
| Modo | Ux | Uy | Rz | %Torsión | Comportamiento |
| 1 | 0.0395 | 0.0000 | 0.0077 | 19.49 | Traslacional |
| 2 | 0.0000 | 0.7925 | 0.0025 | 0.32 | Traslacional |
| 3 | 0.0469 | 0.0028 | 0.6968 | 1485.71 | Torsional |
| TALLER – FISEI | | | | | |
| 1 | 0.0463 | 0.0000 | 0.0120 | 25.92 | Traslacional |
| 2 | 0.0000 | 0.8509 | 0.0016 | 0.19 | Traslacional |
| 3 | 0.0452 | 0.0020 | 0.7292 | 1613.27 | Torsional |

Fuente: Ing. Byron López

Las dos estructuras presentan un comportamiento traslacional en los dos primeros modos de vibración y en el tercer modo presenta un comportamiento torsional cumpliendo con este chequeo, por lo que no presentan problemas de torsión.

4.1.1.3 Acumulación de la masa modal

La Norma Ecuatoriana menciona que todos los modos de vibración especificados que se involucran en la participación de la masa modal deben acumularse el 90% de la masa total de la edificación en cada una de las direcciones horizontales.

Tabla 43: Acumulación de la Masa Modal

| Modo | TALLER - FICM | | TALLER – FISEI | |
|-------------|----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| | Sum UX | Sum UY | Sum UX | Sum UY |
| 1 | 0.040 | 0.000 | 0.0463 | 0.0000 |
| 2 | 0.040 | 0.793 | 0.0463 | 0.8509 |
| 3 | 0.086 | 0.795 | 0.0915 | 0.8529 |
| 4 | 0.272 | 0.814 | 0.1933 | 0.8673 |

| | | | | |
|----|-------|-------|--------|--------|
| 5 | 0.842 | 0.818 | 0.8763 | 0.8689 |
| 6 | 0.859 | 0.818 | 0.8814 | 0.8697 |
| 7 | 0.870 | 0.818 | 0.8918 | 0.8699 |
| 8 | 0.871 | 0.818 | 0.8919 | 0.8716 |
| 9 | 0.888 | 0.818 | 0.8919 | 0.8718 |
| 10 | 0.896 | 0.850 | 0.9102 | 0.8724 |
| 11 | 0.914 | 0.942 | 0.911 | 0.9633 |
| 12 | 0.961 | 0.953 | 0.9218 | 0.9650 |

Fuente: Ing. Byron López

En la tabla anterior se muestra que la acumulación del 90% de masa para el taller FICM se da en el onceavo modo de vibración para las dos direcciones en X e Y. Para taller FISEI se da la acumulación en el décimo para la dirección X y en el onceavo modo para la dirección Y. Para ambos casos cumplen ya que se encuentran en los modos establecidos para el análisis.

4.1.1.4 Validación del Análisis Dinámico

En la sección 6.2.2 de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS especifica cuando se realiza un análisis dinámico el valor para el cortante dinámico total que se aplica en la base de las estructuras no debe superar el 80% para estructuras regulares o el 85% para irregulares del cortante obtenido por el método estático, cuando no supere se realiza un reajuste del cortante para cumplir con el porcentaje.

Tabla 44: Validación del Análisis Dinámico NEC 2015

| | Cortante (Ton) | | % | Observación |
|---------------------|----------------|----------|-------|-------------|
| | Estático | Dinámico | | |
| TALLER FICM | | | | |
| Dirección X | 35.572 | 30.399 | 85.46 | Cumple |
| Dirección Y | 57.226 | 49.072 | 85.75 | Cumple |
| TALLER FISEI | | | | |
| Dirección X | 36.028 | 30.693 | 85.19 | Cumple |
| Dirección Y | 57.459 | 49.314 | 85.82 | Cumple |

Fuente: Ing. Byron López

Como se presenta en la tabla anterior, el cortante basal dinámico en dirección X & Y supera el 85% del cortante estático para estructuras irregulares validando el análisis dinámico.

4.1.1.5 Derivas de Piso

La Norma Ecuatoriana de la Construcción en su sección 4.2.2 especifica para tener un control de deformaciones de la estructura se debe calcular la deriva máxima para cada

piso no debe superar los límites de la deriva inelástica. Para estructuras metálicas la deriva máxima inelástica debe ser menor al 2.00%. Para el cálculo de la deriva máxima inelástica Δ_M de cada piso se utiliza la siguiente expresión:

$$\Delta_M = 0.75 * R * \Delta_E$$

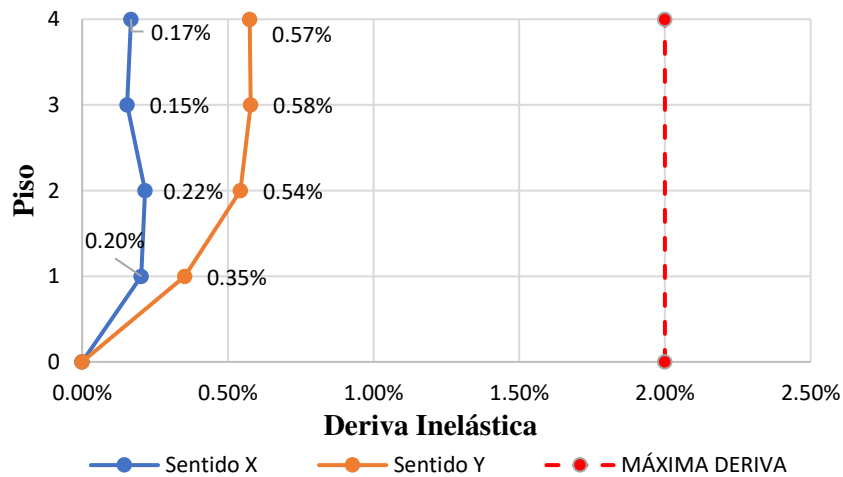
Donde:

- Δ_M : Deriva máxima inelástica.
- Δ_E : Desplazamiento obtenido en aplicación de las fuerzas laterales de diseño reducidas.
- **R**: Factor de reducción de resistencia.

▪ **Derivas causadas por el cortante estático**

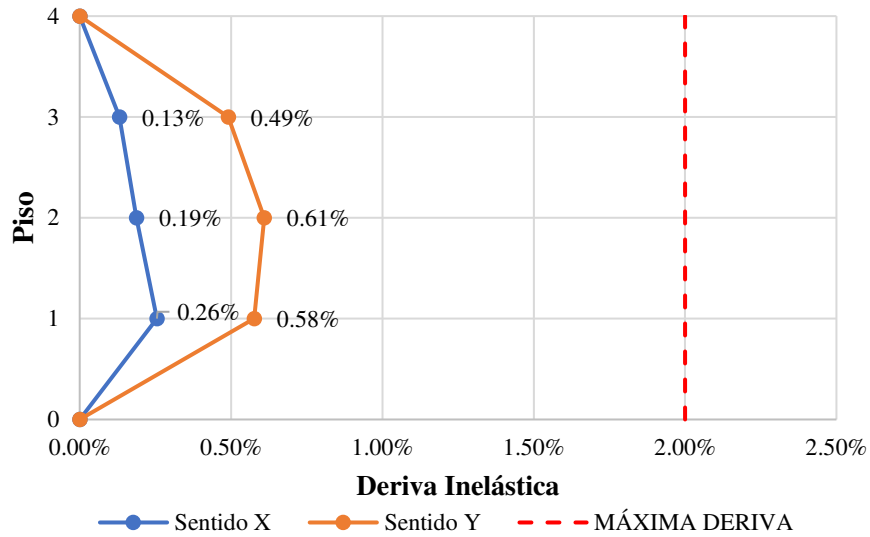
Como se presenta en la figura 41 y 42 las derivas inelásticas generadas por el cortante estático las cuales no supera el límite máximo del 2%, presentando un valor máximo de 0.58% en la dirección Y para el Taller FICM y un valor máximo de 0.61% en la dirección Y para el taller FISEI.

Figura 67: Derivas Inelásticas por cortante estático – Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

Figura 68: Derivas Inelásticas por cortante estático – Taller FISEI

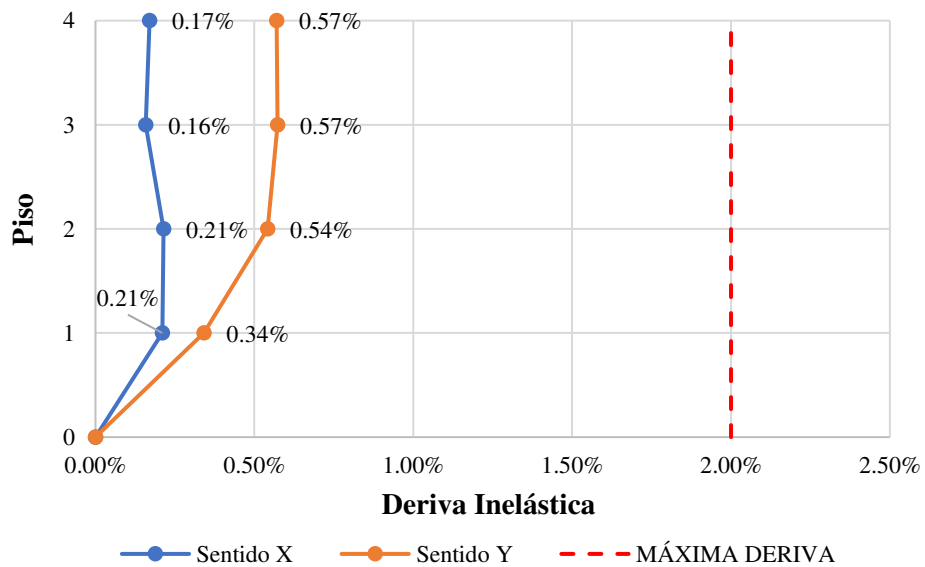


Fuente: Ing. Byron López

▪ **Derivas causadas por el cortante dinámico**

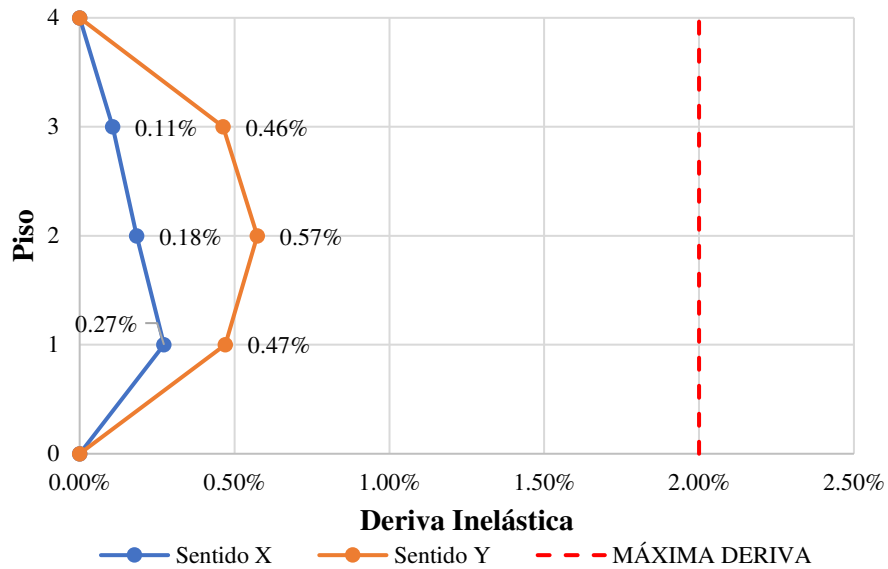
Como se presenta en la figura 43 y 44 las derivas inelásticas generadas por el cortante dinámico las cuales no supera el límite máximo del 2%, presentando un valor máximo de 0.57% en la dirección Y para el Taller FICM y un valor máximo de 0.57% en la dirección Y para el taller FISEI.

Figura 69: Derivas Inelásticas por cortante dinámico – Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

Figura 70: Derivas Inelásticas por cortante dinámico – Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

4.1.2 Análisis Estático no Lineal

Para determinar el desempeño sísmico de las dos estructuras analizadas se precede a realizar un análisis estático no lineal con el objetivo de determinar la curva de capacidad y obtener el punto de desempeño para los niveles de amenaza sísmica indicados en la norma Ecuatoriana de la Construcción, para lo cual se realiza aplicando la metodología de la linealización equivalente establecida en la norma FEMA 440.

4.1.2.1 Asignación de Rotulas plásticas

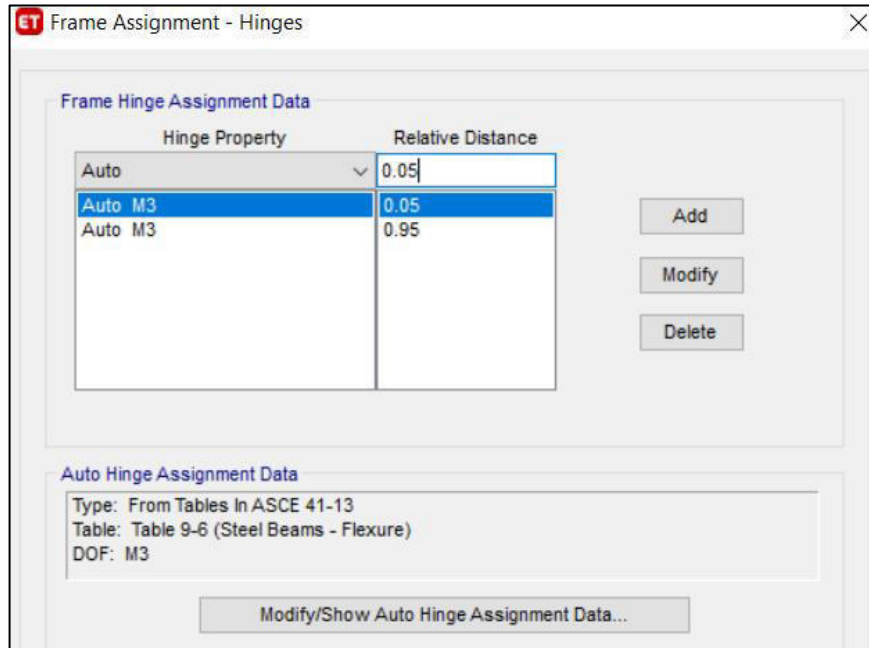
Las rotulas plásticas se asignan para cada elemento que resiste las cargas laterales como son vigas, columnas y riostras, se las ubica en los extremos de cada una, que representa zona donde se espera fluencia de la sección que permite definir la capacidad individual de cada sección que integra la estructura. De acuerdo con FEMA 356 se ubica a un 5% y aun 95%.

- **Rotulas plásticas para Vigas**

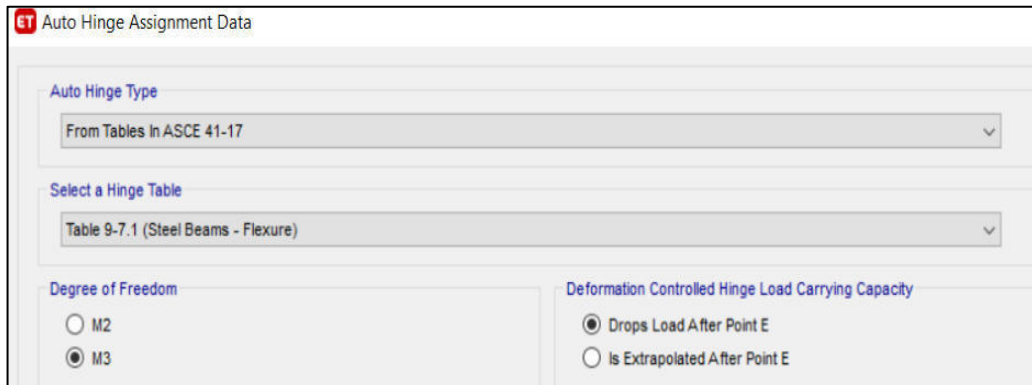
Para la asignación de rotulas plásticas en vigas se toma las condiciones presentadas en la norma ASCE 41-13 en la tabla 9-6: Parámetros de modelado y criterios de aceptación para procedimientos no lineales: componentes de acero estructural, tomando en cuenta que estos elementos tienen un comportamiento a flexión. En las siguientes figuras se presenta la asignación en el programa de análisis:

Figura 71: Asignación de rotulas plásticas en vigas

(a) Longitudes relativas



(b) Propiedades de la rotula



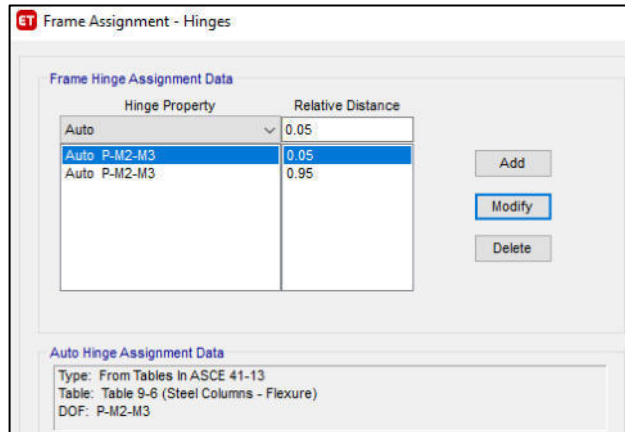
Fuente: ETABS 2018

- **Rotulas plásticas para Columnas**

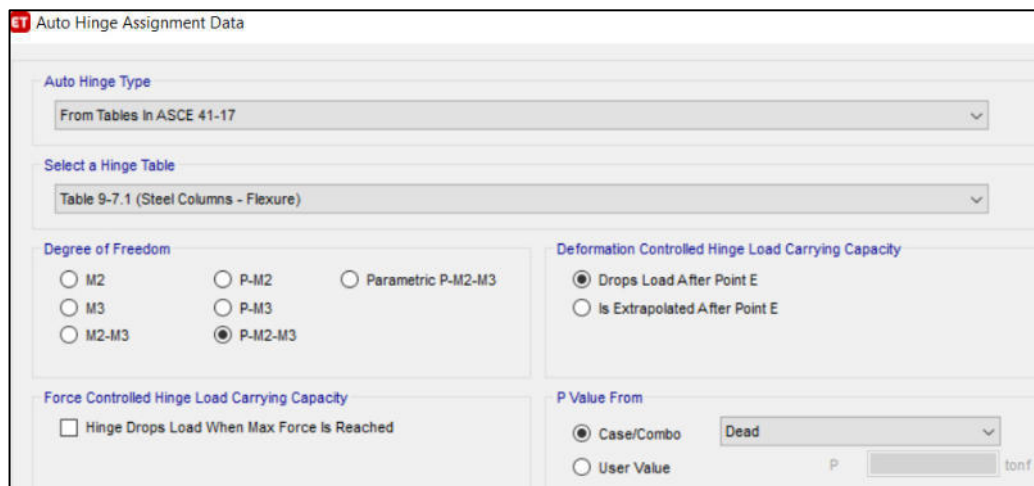
De la misma forma se utiliza las especificaciones de la normativa ASCE 41-13 con las condiciones de la tabla 9.6 para columnas, se toma en cuenta que estas secciones se comportan a flexo-compresión.

Figura 72: Asignación de rotulas plásticas en columnas

(a) Longitudes relativas



(b) Propiedades de la rotula



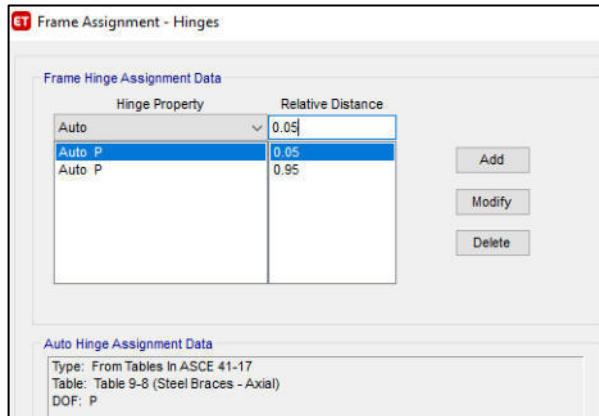
Fuente: ETABS 2018

- **Rotulas plásticas para Riostras**

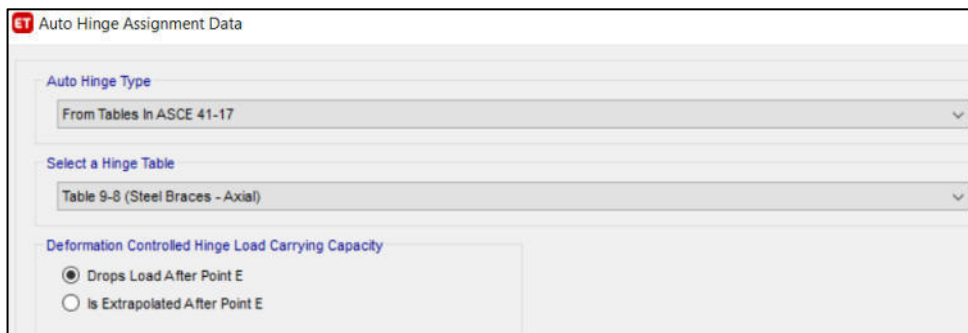
Para las riostras también se utiliza la especificación de la norma ASCE 41-13 con las condiciones de la tabla 9-7: Parámetros de modelado y criterios de aceptación para procedimientos no lineales - Componentes de acero estructural - Acciones axiales, donde las riostras presentan un comportamiento a tracción y compresión.

Figura 73: Asignación de rotulas plásticas en riostras

(a) Longitudes relativas



(b) Propiedades de la rotula



Fuente: ETABS 2018

4.1.2.2 Niveles de Amenaza sísmica

Para la demanda sísmica y determinar el desempeño de la edificación se establece dos niveles de amenaza sísmica que se representan con espectros de la normativa Ecuatoriana NEC 2015, en la siguiente tabla se presenta los niveles de sismo con su periodo de retorno:

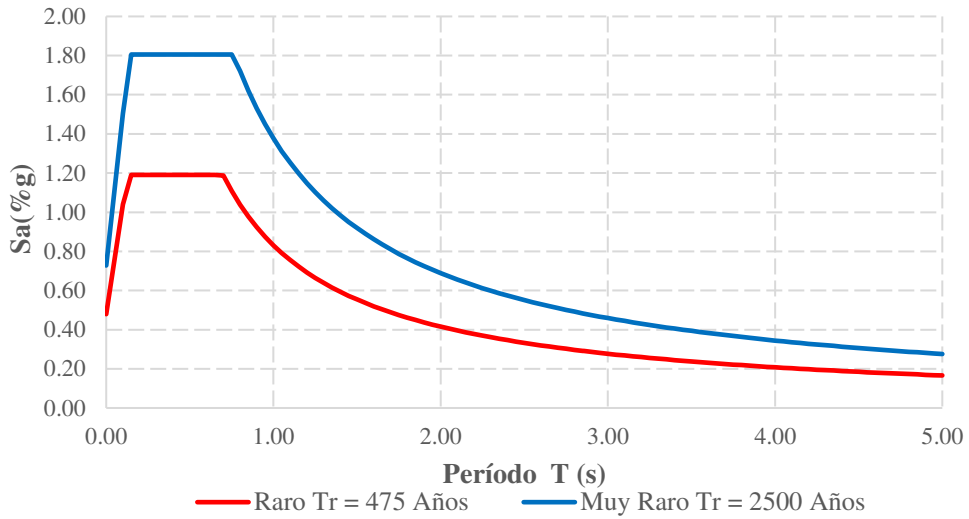
Tabla 45: Niveles de amenaza sísmica

| Nivel de sismo | Probabilidad de excedencia en 50 años | Periodo de retorno Tr (Años) | Tasa de excedencia (1/Tr) | PGA Rock AMBATO |
|-----------------------|--|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Raro | 10% | 475 | 0.002105 | 0.40 |
| Muy Raro | 2% | 2500 | 0.000400 | 0.65 |

Fuente: NEC-SE-DS 2015

En la siguiente figura se indica los espectros de demanda que se utiliza para el análisis y determinación del desempeño sísmico.

Figura 74: Espectros elásticos correspondientes a los niveles de amenaza sísmica



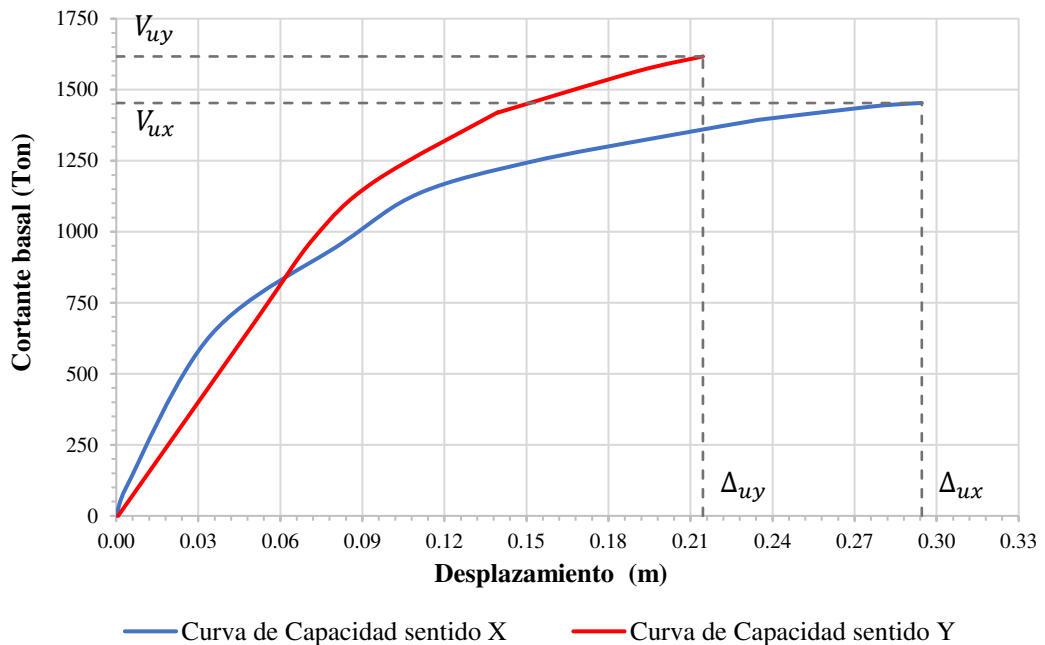
Fuente: Ing. Byron López

4.1.2.3 Resultados de análisis estático no lineal - Pushover

4.1.2.3.1 Curva de capacidad

Como resultado de análisis no lineal se determina la curva de capacidad para las dos direcciones de análisis para cada estructura, dicha curva representa la relación del cortante total en la base con su respectivo desplazamiento del último piso hasta que la edificación llegue al colapso.

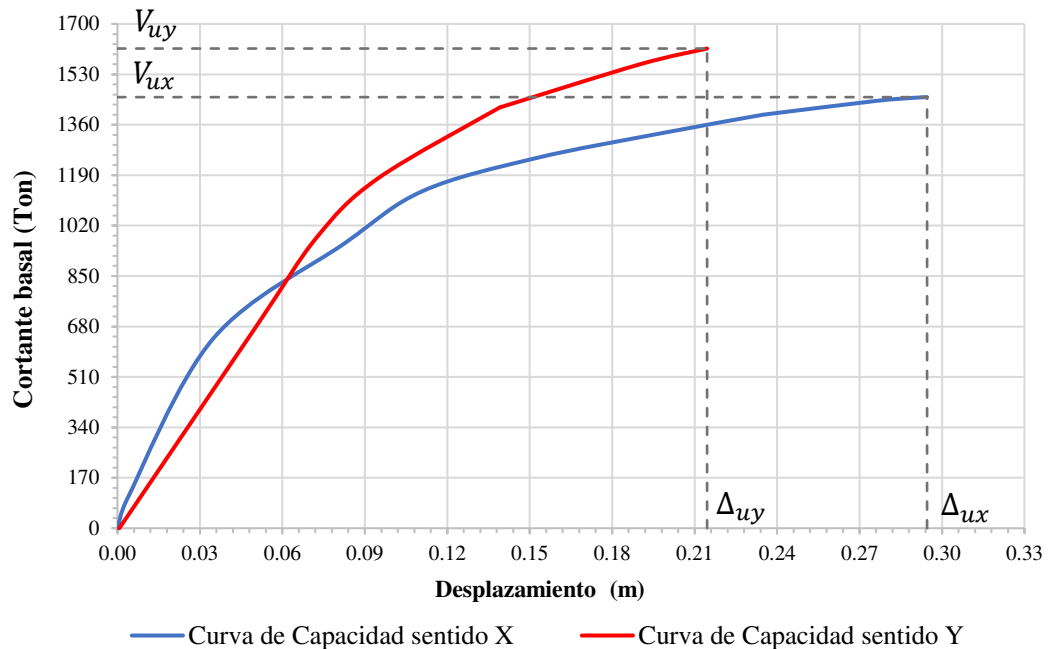
Figura 75: Curva de capacidad - Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

La figura 49 representa la curva de capacidad para el Taller FICM, donde la curva en la dirección X se obtiene un cortante basal último de 1453.144 ton con un desplazamiento de 29.46 cm y para la dirección Y el cortante basal último es de 1617.01 ton con un desplazamiento último de 21.45 cm. Los valores representan la capacidad máxima de la estructura una vez que pase este límite producirá el colapso de la misma.

Figura 76: Curva de capacidad - Taller FISEI



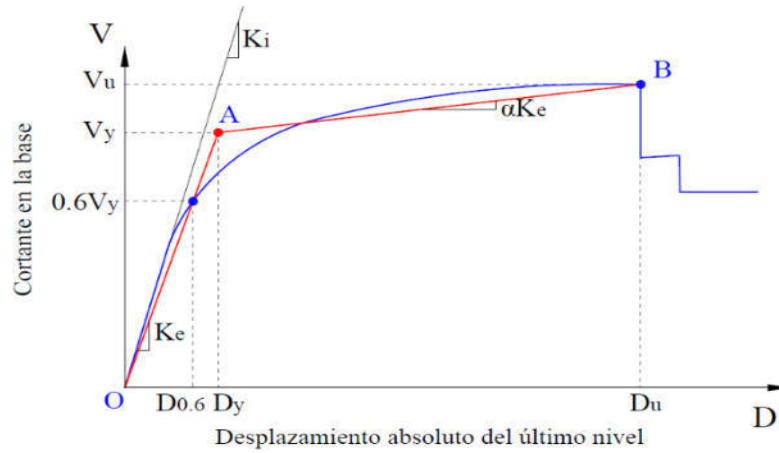
Fuente: Ing. Byron López

La figura 74 representa la curva de capacidad para el Taller FISEI, donde la curva en la dirección X se obtiene un cortante basal último de 1413.52 ton con un desplazamiento de 25.0 cm y para la dirección Y el cortante basal último es de 1608.75 ton con un desplazamiento último de 16.76 cm. Los valores representan la capacidad máxima de la estructura una vez que pase este límite producirá el colapso de la misma.

4.1.2.3.2 Representación bilineal de la curva de capacidad

Para la representación bilineal se realiza mediante la metodología de la normativa FEMA 356 con la finalidad de tener un mejor análisis y simplificar el comportamiento no lineal de la estructura.

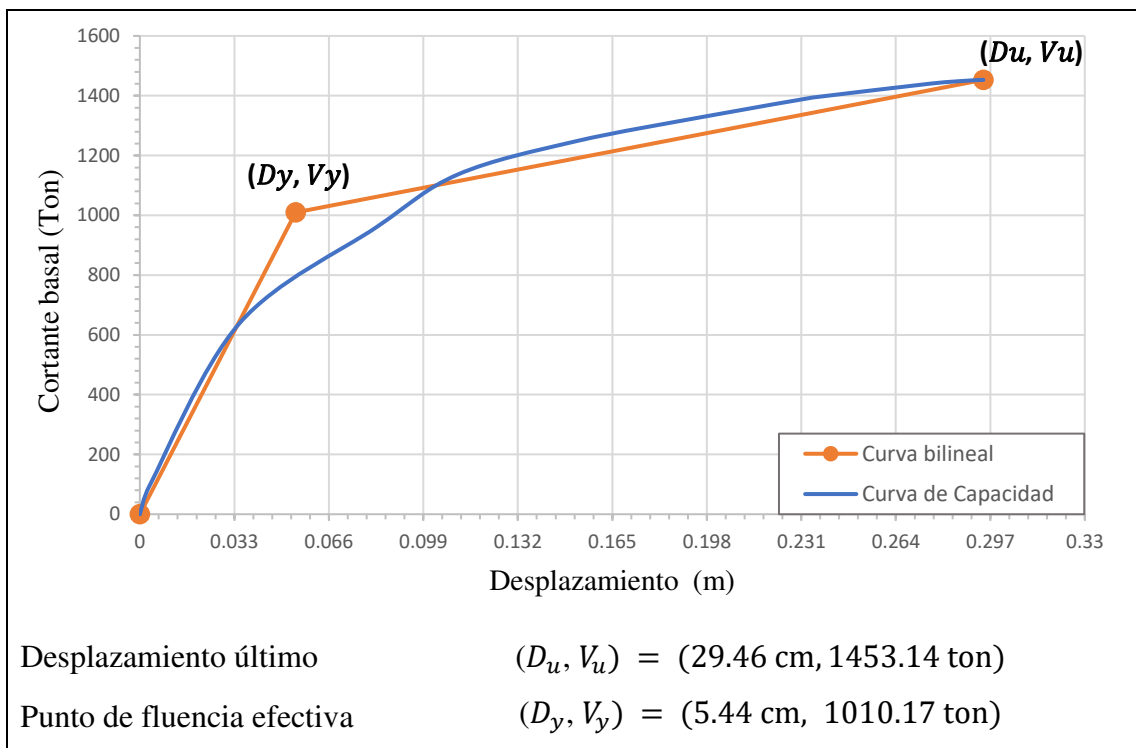
Figura 77: Representación bilineal de la curva de capacidad



Fuente: Ing. Byron López

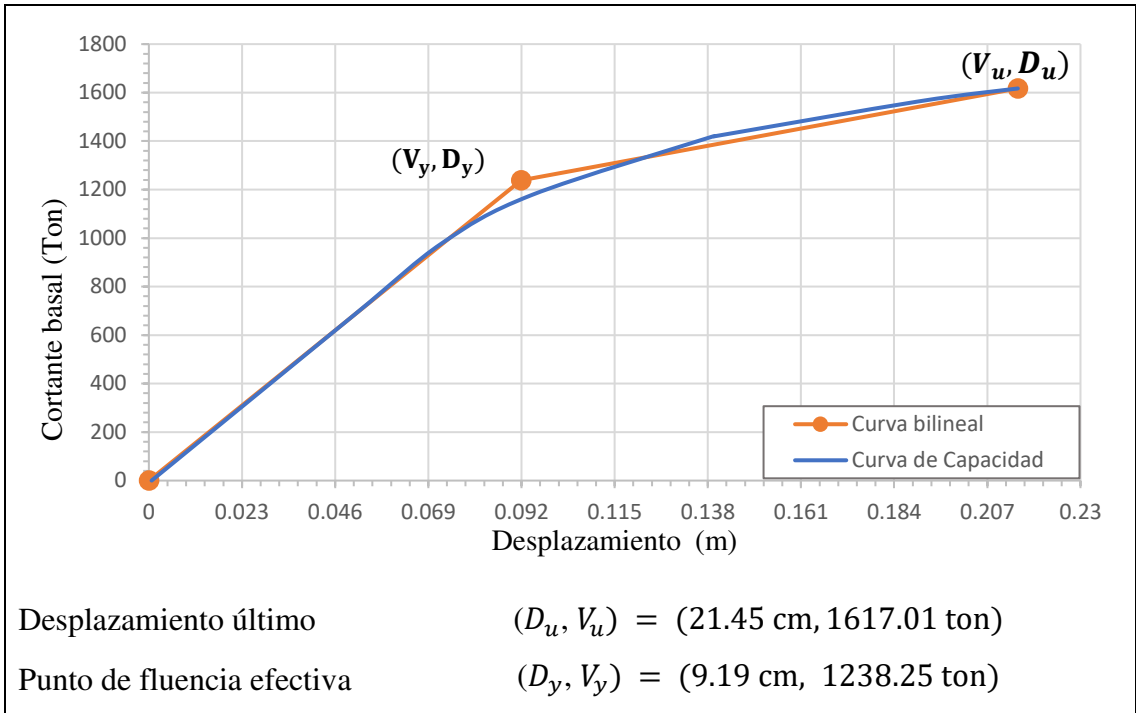
- **Representación bilineal – Taller FICM**

Figura 78: Representación bilineal de la curva de capacidad en la dirección X – Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

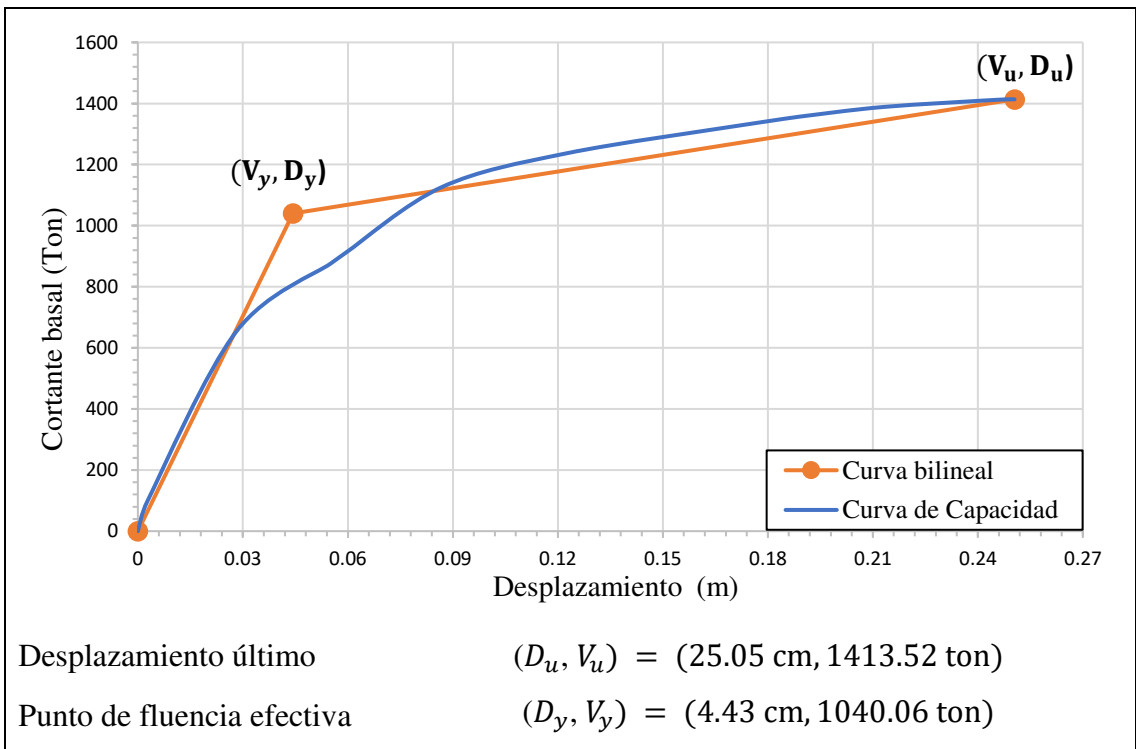
Figura 79: Representación bilineal de la curva de capacidad en la dirección Y – Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

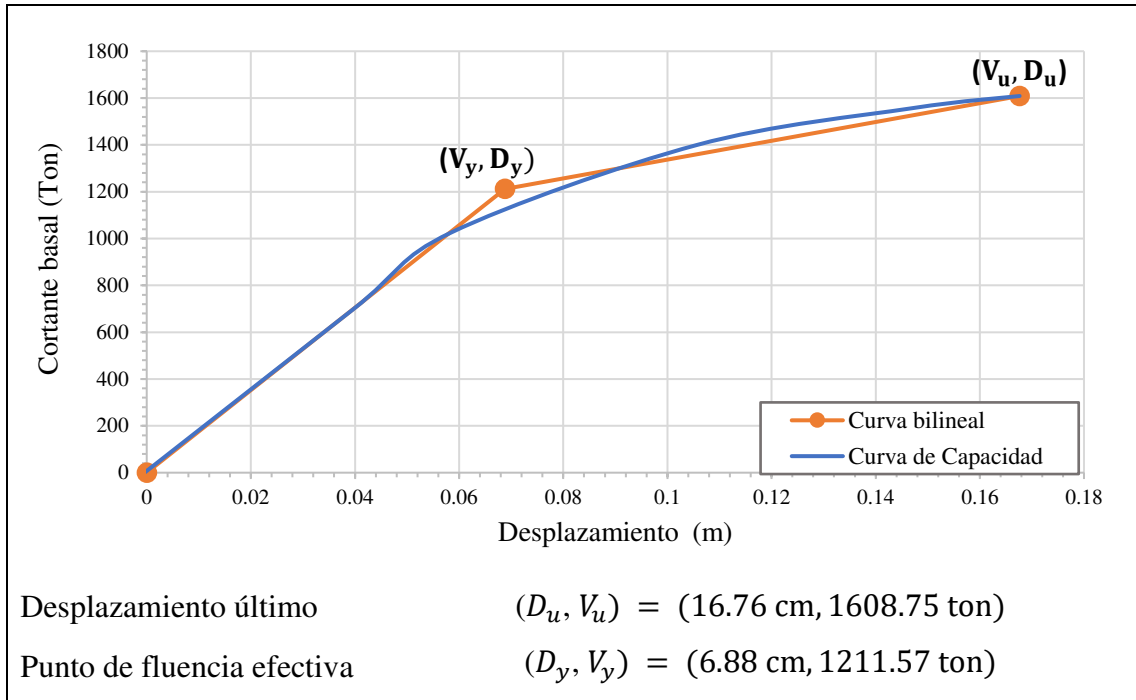
• **Representación bilineal – Taller FISEI**

Figura 80: Representación bilineal de la curva de capacidad en la dirección X – Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

Figura 81: Representación bilineal de la curva de capacidad en la dirección Y – Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

4.1.2.3.4 Evaluación del desempeño sísmico

4.1.2.3.4.1 Punto de desempeño

Mediante el método de la linealización equivalente propuesto por FEMA 440 (2005) se determina los puntos de desempeño. El cual consiste en un procedimiento gráfico, compara la capacidad de la estructura para resistir fuerzas laterales con la demanda sísmica. Los valores de desplazamiento y fuerza de corte de cada punto de desempeño se obtuvieron del software ETABS 2018.

➤ Puntos de desempeño – Taller FICM

Dirección X

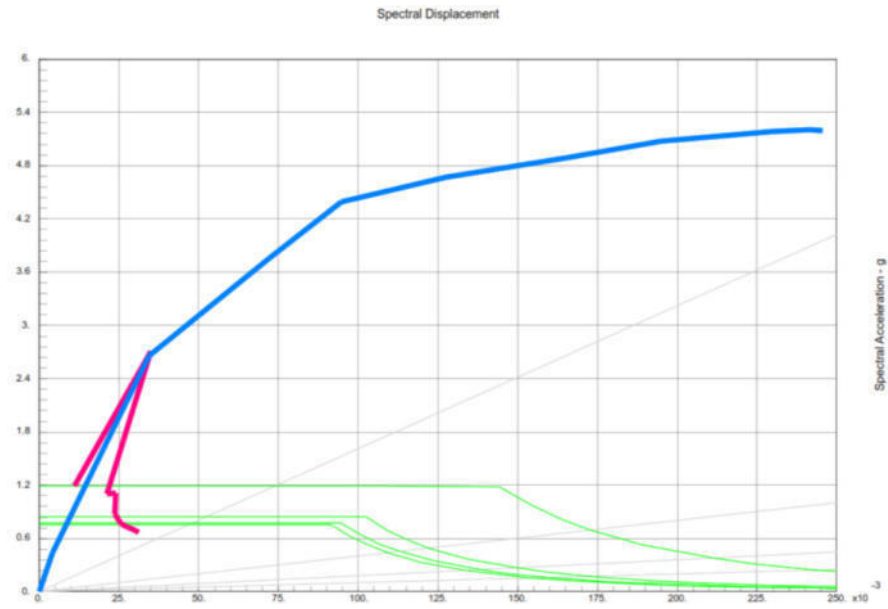
En la siguiente tabla se presenta los valores de cada punto de desempeño para la dirección X, con su valor de fuerza de corte y desplazamiento que corresponde a cada nivel de amenaza sísmica.

Tabla 46: Puntos de desempeño en la dirección X – Taller FICM

| Dirección | Nivel de sismo | Dp (m) | V (ton) |
|-----------|----------------|--------|---------|
| X-X | Raro | 0.035 | 643.449 |
| | Muy Raro | 0.050 | 742.208 |

Fuente: Ing. Byron López

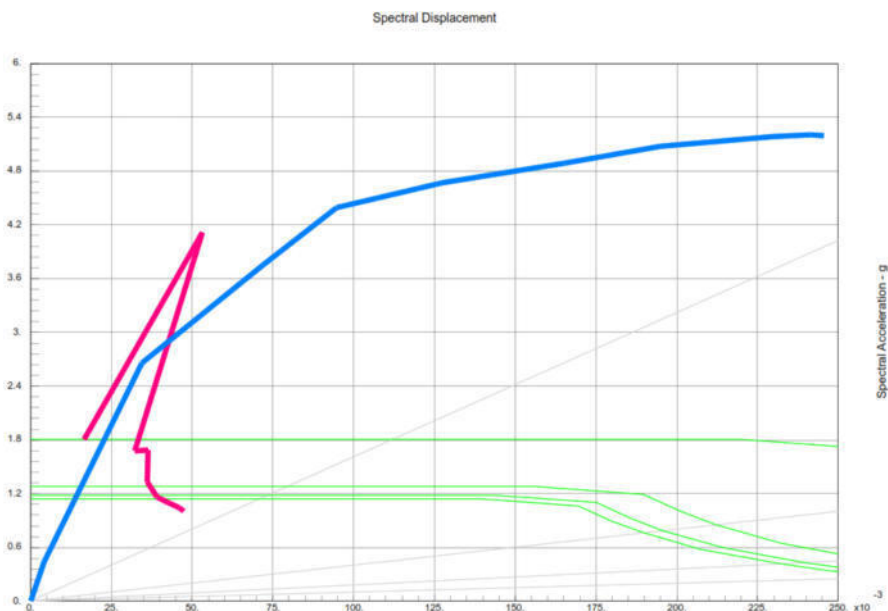
Figura 82: Punto de Desempeño – Sismo Raro. Dirección X.



Fuente: ETABS 2018

Como se presenta en la figura anterior la intersección del espectro de demanda de un nivel de sismo Raro (Tr 475 años) con la curva de capacidad obteniendo los valores de desplazamiento de 3.5 cm con una fuerza cortante de 643.45 ton.

Figura 83: Punto de Desempeño - Sismo Muy Raro. Dirección X



Fuente: ETABS 2018

Para un nivel de amenaza de sismo Muy raro (Tr 2500 años), los valores obtenidos de la intersección son de 5.00 cm de desplazamiento y 742.21 ton de fuerza cortante, mientras se incrementa la demanda también aumenta los valores del punto de desempeño.

Dirección Y

En la siguiente tabla se presenta los puntos de desempeño para la dirección Y correspondientes a cada nivel de amenaza sísmica, con sus respectivas desplazamientos y valores de fuerza de corte.

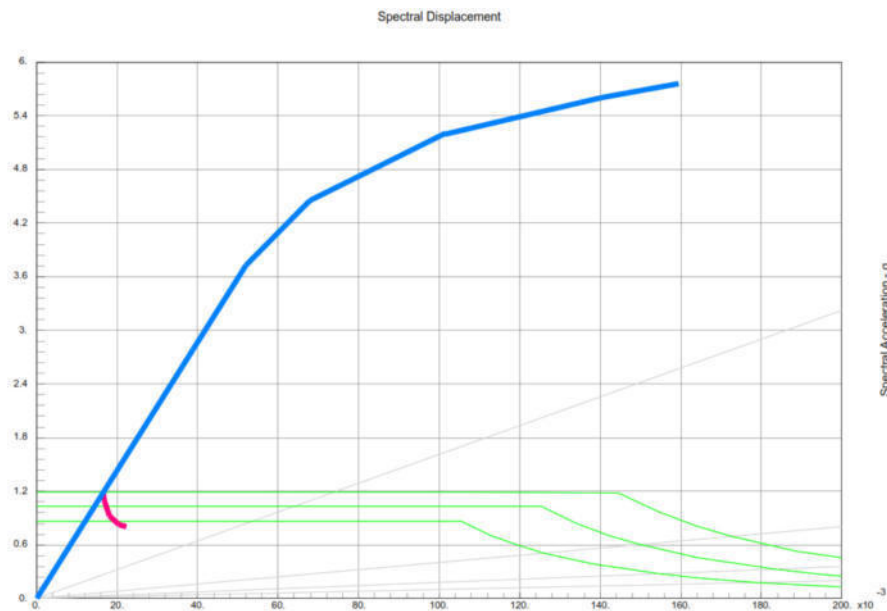
Tabla 47: Puntos de desempeño en la dirección Y – Taller FICM

| Dirección | Nivel de sismo | Dp (m) | V (ton) |
|-----------|----------------|--------|---------|
| Y-Y | Raro | 0.024 | 312.111 |
| | Muy Raro | 0.035 | 473.368 |

Fuente: Ing. Byron López

Como se presenta en la figura siguiente la intersección del espectro de demanda para un nivel de sismo raro (Tr 475 años) con la curva de capacidad obteniendo los valores de desplazamiento de 2.4 cm con una fuerza cortante de 312.111 ton.

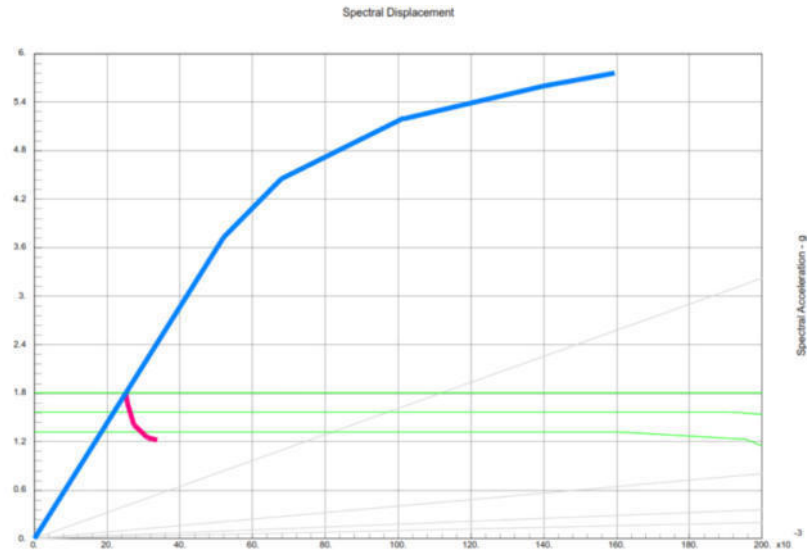
Figura 84: Punto de Desempeño – Sismo Raro. Dirección Y



Fuente: ETABS 2018

Para un nivel de amenaza de sismo Muy Raro (Tr 2500 años), los valores obtenidos de la intersección son de 3.5 cm de desplazamiento y 473.368 ton de fuerza cortante, mientras se incrementa la demanda también aumenta los valores del punto de desempeño.

Figura 85: Punto de Desempeño – Sismo Muy Raro. Dirección Y



Fuente: ETABS 2018

➤ **Puntos de desempeño – Taller FISEI**

Dirección X

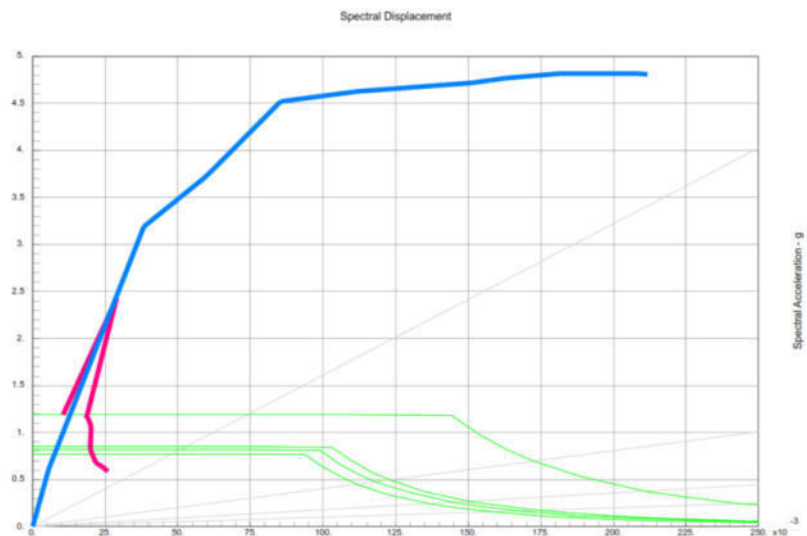
De la misma forma se presenta los valores de los puntos de desempeño obtenidos para la dirección X del Taller FISEI.

Figura 86: Puntos de desempeño en la dirección X – Taller FISEI

| Dirección | Nivel de sismo | Dp (m) | V (ton) |
|-----------|----------------|--------|---------|
| X-X | Raro | 0.012 | 298.909 |
| | Muy Raro | 0.032 | 689.675 |

Fuente: Ing. Byron López

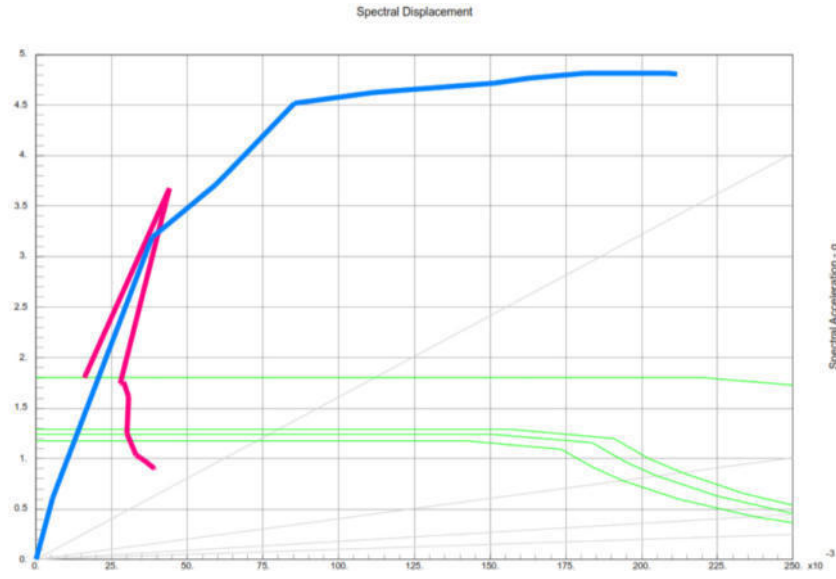
Figura 87: Punto de Desempeño – Sismo Raro. Dirección X



Fuente: ETABS 2018

Como se presenta en la figura anterior la intersección del espectro de demanda de un nivel de sismo Raro (Tr 475 años) con la curva de capacidad obteniendo los valores de desplazamiento de 1.2 cm con una fuerza cortante de 298.909 ton.

Figura 88: Punto de Desempeño – Sismo Muy Raro. Dirección X



Fuente: ETABS 2018

Para un nivel de amenaza de sismo Muy raro (Tr 2500 años), los valores obtenidos de la intersección son de 3.2 cm de desplazamiento y 689.675 ton de fuerza cortante, mientras se incrementa la demanda también aumenta los valores del punto de desempeño.

Dirección Y

En la siguiente tabla se presenta los puntos de desempeño para la dirección Y:

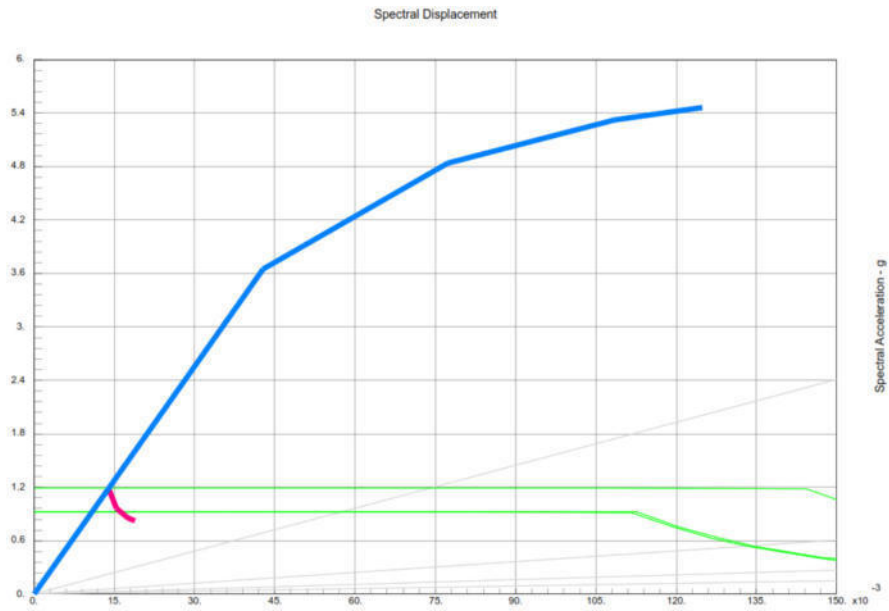
Figura 89: Puntos de desempeño en la dirección Y – Taller FISEI

| Dirección | Nivel de sismo | Dp (m) | V (ton) |
|-----------|----------------|--------|---------|
| Y-Y | Raro | 0.019 | 334.951 |
| | Muy Raro | 0.029 | 508.009 |

Fuente: Ing. Byron López

Como se presenta en la figura siguiente la intersección del espectro de demanda para un nivel de sismo raro (Tr 475 años) con la curva de capacidad obteniendo los valores de desplazamiento de 1.9 cm con una fuerza cortante de 334.951 ton.

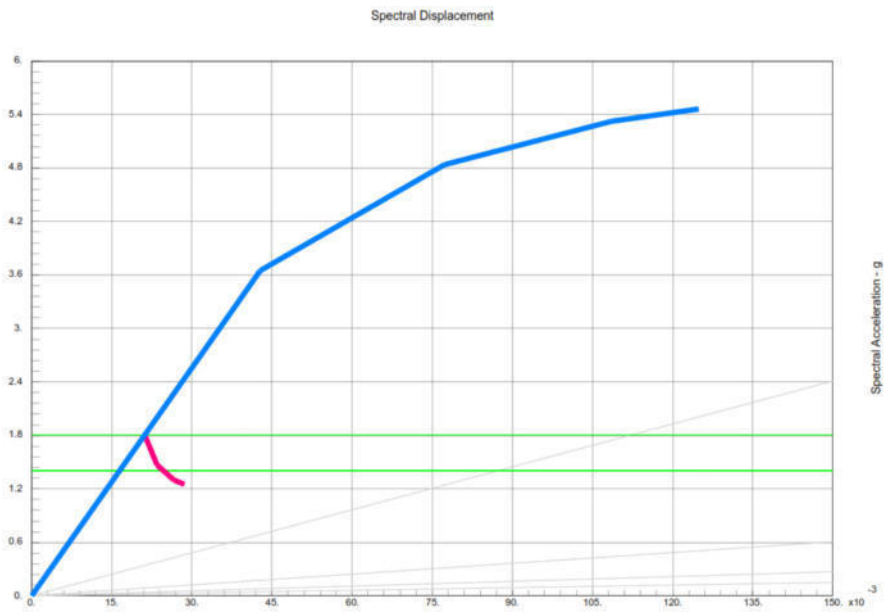
Figura 90: Punto de Desempeño – Sismo Raro. Dirección Y



Fuente: ETABS 2018

Para un nivel de amenaza de sismo Muy Raro (Tr 2500 años), los valores obtenidos de la intersección son de 2.9 cm de desplazamiento y 508.009 ton de fuerza cortante, mientras se incrementa la demanda también aumenta los valores del punto de desempeño.

Figura 91: Punto de Desempeño – Sismo Muy Raro. Dirección Y



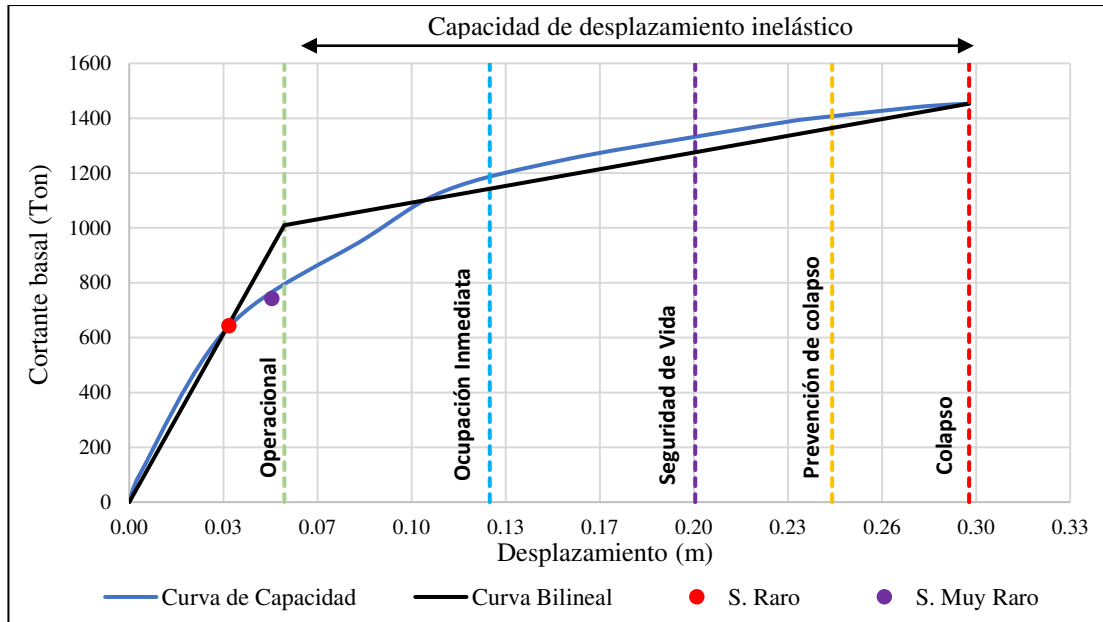
Fuente: ETABS 2018

4.1.2.3.4.2 Validación de los puntos de desempeño

Para obtener la respuesta de las dos estructuras analizadas bajo los dos niveles de amenaza asignadas se precede a relacionar cada punto de desempeño de cada nivel de demanda con los niveles de desempeño de la edificación.

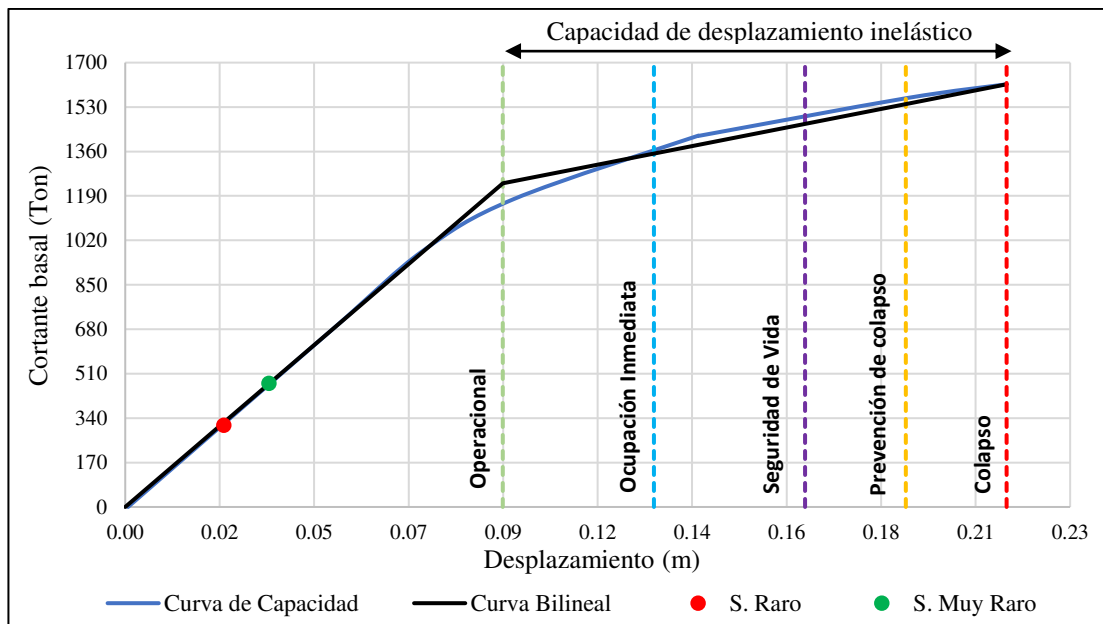
- **Desempeño sísmico – Taller FICM**

Figura 92: Desempeño Sísmico en dirección X – Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

Figura 93: Desempeño Sísmico en dirección Y – Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

Tabla 48: Niveles de desempeño calculados y esperados para el Taller FICM

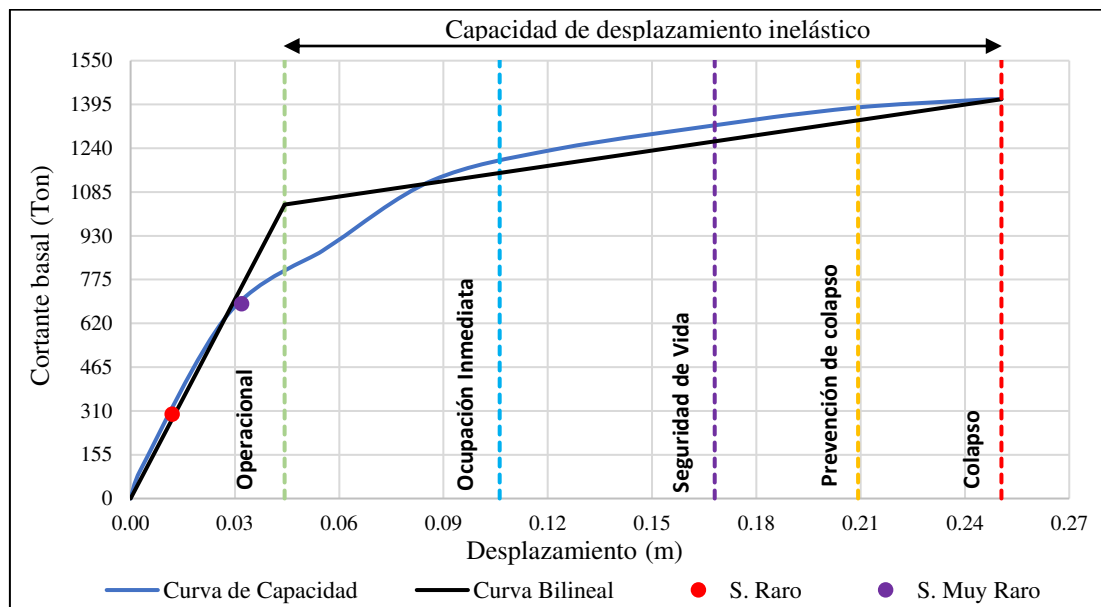
| Niveles de Amenaza | Niveles de desempeño | | | | |
|--------------------|---|---------------------|-------------------|-----------------------|---------|
| | Operacional | Ocupación Inmediata | Seguridad de Vida | Prevención al colapso | Colapso |
| Dirección X | | | | | |
| Raro | | | X | | |
| Muy Raro | | | | X | |
| Dirección Y | | | | | |
| Raro | | | X | | |
| Muy Raro | | | | X | |
| X | Nivel esperado para edificios de ocupación especial | | | | |
| | Nivel existe del edificio de análisis | | | | |

Fuente: Ing. Byron López

El Taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica se considera un edificio especial de acuerdo con la NEC 2015, los edificios dentro de esta categoría deben garantizar un nivel de desempeño de seguridad de vida ante un sismo raro de un período de retorno de 475 años y además también que garantice un nivel de prevención de colapso ante un sismo muy raro de un período de retorno de 2500 años. Con los resultados de la tabla 45, se determina que la estructura cumple con los objetivos de desempeño para los dos sentidos de análisis, ya que para el sismo raro y muy raro llegan a un nivel operacional.

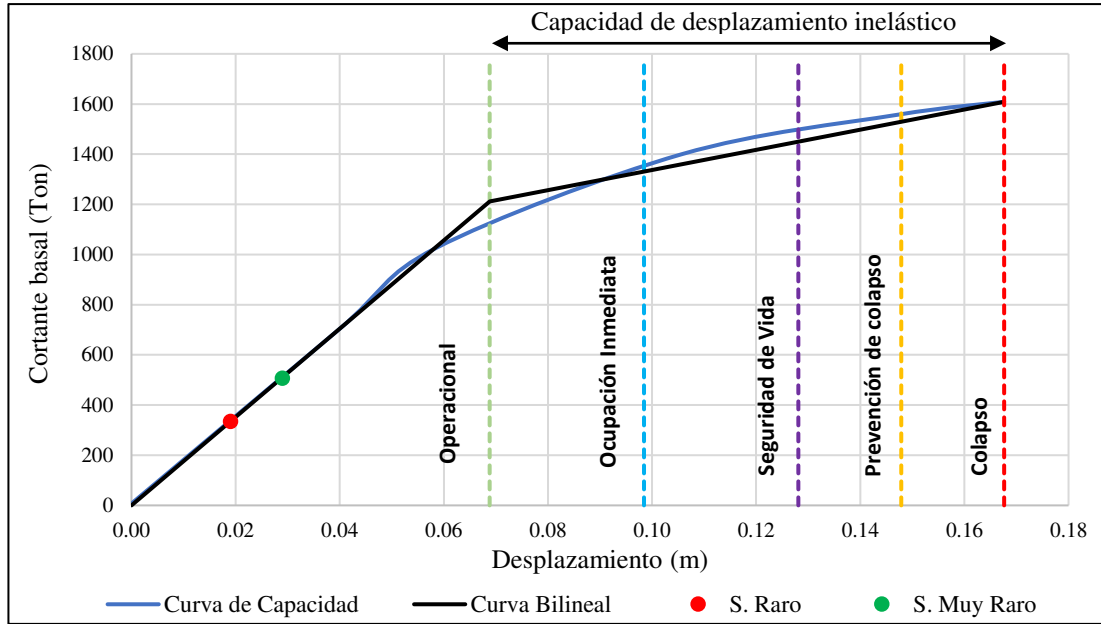
- **Desempeño sísmico – Taller FISEI**

Figura 94: Desempeño Sísmico en dirección X – Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

Figura 95: Desempeño Sísmico en dirección Y – Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

Tabla 49: Niveles de desempeño calculados y esperados para el Taller FISEI

| Niveles de Amenaza | Niveles de desempeño | | | | |
|--------------------|---|---------------------|-------------------|-----------------------|---------|
| | Operacional | Ocupación Inmediata | Seguridad de Vida | Prevención al colapso | Colapso |
| Dirección X | | | | | |
| Raro | | | X | | |
| Muy Raro | | | | X | |
| Dirección Y | | | | | |
| Raro | | | X | | |
| Muy Raro | | | | X | |
| X | Nivel esperado para edificios de ocupación especial | | | | |
| | Nivel existe del edificio de análisis | | | | |

Fuente: Ing. Byron López

El Taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónico se considera un edificio especial de acuerdo con la NEC 2015. Con los resultados de la tabla 46, se determina que la estructura cumple con los objetivos de desempeño para los dos sentidos de análisis, ya que para el sismo raro y muy raro llegan a un nivel operacional.

4.2 Resultados de la estructura analizada con aisladores sísmicos

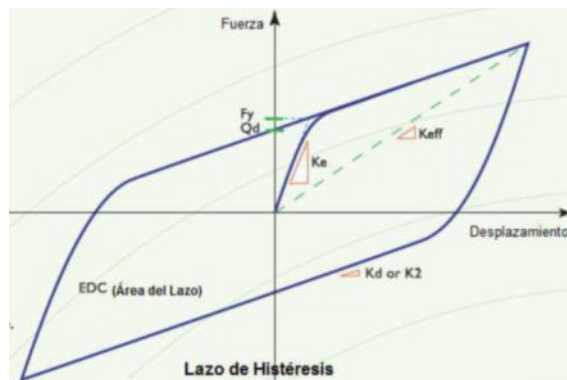
4.2.1 Diseño de aislador

Los aisladores sísmicos son elementos elastomericos que se ubican en la base de la estructura con el fin de reducir los daños por sismo. Su elastómero esta reforzado

interiormente con láminas de acero que evitan el aplastamiento del aislador por el peso de la estructura.

El uso del elastómero de centro de plomo proporciona al mecanismo un aporte de histerético importante. Este comportamiento histerético se traza en la aproximación bilineal. A siguiente grafica muestra el ciclo fuerza desplazamiento donde está relacionado las características del sistema de aisladores con núcleo de plomo, presentando el comportamiento no lineal de la fuerza con la deformación, con parámetros de gran importancia como la rigidez efectiva (K_{eff}), la rigidez inicial (K_e), la rigidez secundaria (K_d) y el desplazamiento máximo (D).

Figura 96: Aproximación bilineal de un comportamiento histerético del LRB



Fuente: Catalogo de proveedor Dynamic Isolation Systems

Para el diseño de los aisladores se considera las especificaciones de la norma ASCE 7-16, para su dimensionamiento se usa el sismo máximo esperado (MCE) con una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años con un periodo de retorno de 2500 años.

4.2.1.1 Propiedades Geométricas

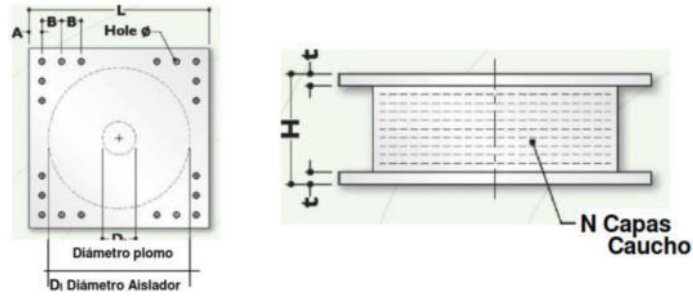
Para el análisis sísmico se va a utilizar el aislador de tipo elastomérico con núcleo de plomo, sus dimensiones se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 50: Propiedades geométricas del aislador

| Descripción | Símbolo | Valor |
|------------------------------|---------|--------|
| Diámetro de la goma | D_o | 520 mm |
| Diámetro del núcleo de plomo | D_i | 90 mm |
| Espesor total de la goma | H | 120 mm |
| Espesor de cada capa de goma | tr | 5 mm |

Fuente: Catalogo de proveedor Dynamic Isolation Systems

Figura 97: Geometría del aislador



Fuente: Catalogo de proveedor Dynamic Isolation Systems

La carga última que va a soportar cada aislador permite determinar las dimensiones con las que se trabajara, las cuales están basadas en las especificaciones del fabricante que se encuentra en los catálogos.

Tabla 51: Propiedades, Desplazamiento y Carga axial en función del diámetro del aislador (PRE-DISEÑO)

| Diámetro aislador Di (mm) | Propiedades del aislador | | | Desplazamiento Máximo qmax (mm) | Carga Axial Pmax (kg) |
|---------------------------------|--------------------------|-----------|--------------|---------------------------------------|--------------------------|
| | Kd (Tn/m) | Qd (kg) | Kv (Tn/m) | | |
| 305 | 20 - 40 | 0 - 6500 | > 5000 | 150 | 45000 |
| 355 | 20 - 40 | 0 - 6500 | > 10000 | 150 | 70000 |
| 405 | 30 - 50 | 0 - 11000 | > 10000 | 200 | 90000 |
| 455 | 30 - 70 | 0 - 11000 | > 10000 | 250 | 115000 |
| 520 | 40 - 70 | 0 - 18000 | > 20000 | 300 | 135000 |

Fuente: Catalogo de proveedor Dynamic Isolation Systems

Tabla 52: Dimensiones del aislador y placas de montaje

| Tamaño del aislador | | | | Dimensiones de las placas de montaje | | | | | |
|---------------------|-----------|-----------------------------|------------|--------------------------------------|-----------|----------------|---------------------------|-----------|-----------|
| Do (mm) | H (mm) | # de Capas de goma | Di (mm) | L (mm) | t (mm) | # orificios | Ø del orificio (mm) | A (mm) | B (mm) |
| 305 | 125 - 280 | 4 - 14 | 0 - 100 | 355 | 25 | 4 | 27 | 50 | - |
| 355 | 150 - 305 | 5 - 16 | 0 - 100 | 405 | 25 | 4 | 27 | 50 | - |
| 405 | 175 - 330 | 6 - 20 | 0 - 125 | 455 | 25 | 4 | 27 | 50 | - |
| 455 | 175 - 355 | 6 - 20 | 0 - 125 | 510 | 25 | 4 | 27 | 50 | - |
| 520 | 205 - 380 | 8 - 24 | 0 - 180 | 570 | 25 | 8 | 27 | 50 | 50 |

Fuente: Catalogo de proveedor Dynamic Isolation Systems

Cabe mencionar que las dimensiones anteriores pueden ser modificadas según los resultados que se obtengan, debido que se debe verificar para diferentes

procedimientos y controles. Los datos para el diseño inicial se presentan en la siguiente tabla para los dos talleres analizados:

Tabla 53: Datos para diseño del Aislador

| Descripción | Símbolo | Valor | |
|--|---------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | Taller FICM | Taller FISEI |
| Peso de estructura | W | 516.173 Ton | 526.416 Ton |
| Número de apoyos | N | 27 | 27 |
| Peso máximo en columna | W_{max} | 35.55 Ton | 39.29 Ton |
| Peso mínimo en columna | W_{min} | 14.03 Ton | 13.96 Ton |
| Ajuste por clase de sitio en periodos largos | S_{M1} | 1.247 s | 1.247 s |
| Ajuste a nivel de diseño en periodos largos | S_{D1} | 0.831 s | 0.831 s |
| Periodo efectivo | T_D | 2.5 s | 2.5 s |
| Amortiguamiento Efectivo | $\beta_D = \beta_M$ | 15 % | 15 % |
| Deformación de corte | γ | 1.35 | 1.35 |
| Módulo de Elasticidad | K | 203943.24 Ton/m ² | 203943.24 Ton/m ² |

Fuente: Ing. Byron López

4.2.1.2 Propiedades de los materiales

En la siguiente tabla se presenta las propiedades de los materiales para su diseño tanto el límite inferior como su límite superior:

Tabla 54: Propiedades de los materiales

| Descripción | Límite inferior | Límite superior | Unidades |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Módulo de corte efectivo de goma G | 5.95 | 8.05 | Kg/cm ² |
| Módulo volumétrico de goma K | 2000 | 2000 | Mpa |
| Módulo de corte del plomo GP | 127.5 | 172.5 | Mpa |
| Esfuerzo de corte del plomo TPY | 85 | 115 | Kg/cm ² |

Fuente: Catalogo de proveedor Dynamic Isolation Systems

4.2.1.3 Resumen característico físicas y mecánicas de aislador calculado

Tabla 55: Datos generales del aislador

| DATOS GENERALES | | | | |
|---|---|-----|-----|---------------------------|
|  | Aislador elastomérico con núcleo de plomo | | | |
| | Do | 305 | mm | Diámetro del aislador |
| | Di | 100 | mm | Diámetro del plomo |
| | C. | 14 | und | N° de capas de caucho |
| | Tr | 8 | mm | Espesor de capa de caucho |
| | Ts | 2 | mm | Espesor de capa de acero |
| | N | 4 | und | Numero de pernos |
| | Ø | 27 | mm | Diámetro de pernos |
| | E | 240 | mm | Espesor total de caucho |
| | H | 280 | mm | Altura del aislador |

Fuente: Ing. Byron López

4.2.1.4 Procedimiento de cálculo aislador elastomérico con núcleo de plomo – Taller FICM.

- **Niveles de sismo**

Para diseñar la estructura encima de los aisladores se considera el sismo de diseño (DBE) o sismo de 10% de probabilidad de excedencia en 50 años.

$$Z = 0.40 \text{ g (Factor de zonificación)}$$

$$Z_{DBE} = 0.40 \text{ g}$$

Para dimensionar los aisladores se considera el sismo máximo (MCE) o sismo que tiene el 2% de probabilidad de excedencia en 50 años.

$$Z_{MCE} = 1.5 Z_{DBE}$$

$$Z_{DBE} = 0.6 \text{ g}$$

- **Consideraciones iniciales**

Se asume inicialmente que el periodo efectivo de la estructura aislada para un máximo desplazamiento igual a:

$$T_M = 2.5 \text{ seg o } 3 * T \text{ (estructura fija a la base)}$$

$$T_M = 2.5 \text{ seg}$$

Se considera un amortiguamiento efectivo inicial para el máximo desplazamiento igual a:

$$\beta_M = 15.00 \% \quad B_M = 1.35 \text{ (factor)}$$

El factor B_M se lo obtiene de la siguiente tabla de la normativa ASCE 7 – 10:

Tabla 56: Coeficiente de amortiguamiento B_M

| Amortiguamiento efectivo, β_M | Factor B_M |
|-------------------------------------|--------------|
| ≤ 2 | 0.8 |
| 5 | 1.0 |
| 10 | 1.2 |
| 15 | 1.35 |
| 20 | 1.5 |
| 30 | 1.7 |

Fuente: ASCE 7-10 (2010)

- **Procedimiento**

- 1) **Cálculo del desplazamiento máximo lateral**

El sistema de aislación es diseñado y construido para resistir los desplazamientos máximos laterales D_M , que actúan en la dirección de cada uno de los ejes horizontales principales de las estructuras utilizando la siguiente ecuación:

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M}$$

Donde:

S_{M1} = Aceleración máxima espectral para $T=1$ seg y 5% de amortiguamiento

$$SM1 = 1.2466 \text{ g}$$

$$D_M = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * 1.246 \text{ s} * 2.5 \text{ s}}{4\pi^2 * 1.35}$$

$$D_M = 0.5736 \text{ m}$$

$$D_M = 573.64 \text{ mm}$$

2) Cálculo del desplazamiento máximo total

El desplazamiento máximo total de los elementos de un sistema de aislación con distribución espacial uniforme de rigidez lateral no debe tomarse menores a los prescrito por la ecuación:

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$$

Donde:

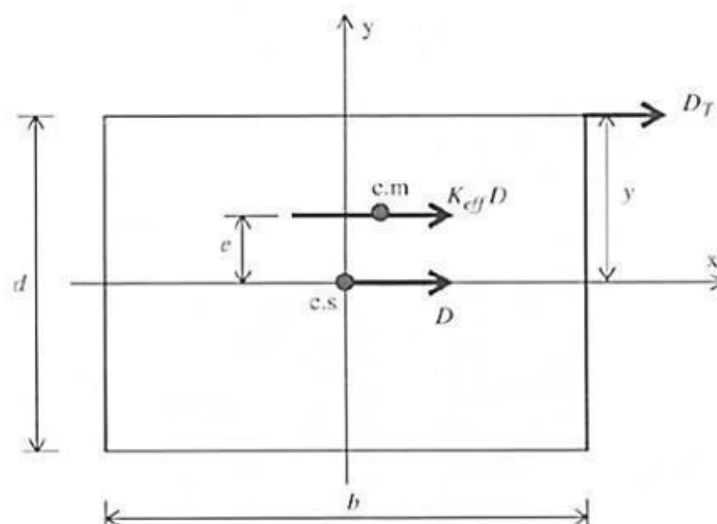
y: distancia entre el CR del sistema de aisladores y el elemento de interés (aislador más alejado) medido perpendicularmente a la dirección del sismo considerado.

b: dimensión corta en planta de la estructura.

d: dimensión larga en planta de la estructura.

e: excentricidad actual más accidental.

Figura 98: Esquema de dimensiones para las direcciones de análisis



Fuente: ASCE 7-10 (2010)

Tabla 57: Cálculo del desplazamiento máximo total para los dos talleres

| Dirección X | | | Dirección Y | | |
|-------------------|--------|----|-------------------|--------|----|
| y= | 23.60 | m | y= | 6.90 | m |
| e= | 2.36 | m | e= | 0.69 | m |
| b= | 13.80 | m | b= | 13.80 | m |
| d= | 47.20 | m | d= | 47.20 | m |
| D _{TM} = | 0.73 | m | D _{TM} = | 0.59 | m |
| D _{TM} = | 732.18 | mm | D _{TM} = | 587.19 | mm |

Fuente: Ing. Byron López

Se toma el menor valor de los dos, pero no menos que el 1.1 veces de D_M:

$$D_{TM} = 0.5872 \text{ m}$$

$$D_{TM} \leq 1.1 D_M$$

$$0.5872 \text{ m} \leq 1.1 * 0.5736 \text{ m}$$

$$0.5872 \text{ m} \leq 0.631 \text{ m } \mathbf{OK}$$

Este cálculo se utiliza para los dos talleres debido a que presenta la misma dimensión corta y largo en planta.

3) Cálculo de la carga axial ultima

La carga axila ultima se obtuvo de del análisis lineal con la siguiente combinación de carga:

$$P_{u \max} = 1.25CM + 1.25CV + SISMO$$

Tabla 58: Carga axial ultima

| Taller FICM | | |
|---------------------|--------------|-----|
| P _{umax} = | 35.55 | Ton |
| Taller FISEI | | |
| P _{umax} = | 39.29 | Ton |

Fuente: Ing. Byron López

4) Cálculo del diámetro del aislador

El diámetro se calcula teniendo en cuenta el desplazamiento máximo lateral y la carga axial ultima, se calcula con la siguiente ecuación:

$$D_I = \sqrt{\frac{4 * P_{umax}}{\pi * \sigma_{max \text{ perm}}}}$$

Se trabaja con el esfuerzo axial permisible de 8 MPa (815.77 T/m²)

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Taller FICM} \\
 D_I &= \sqrt{\frac{4 * 35.55 \text{ Ton}}{\pi * 815.77 \text{ Ton/m}^2}} \\
 D_I &= 0.2355 \text{ m} \\
 D_I &= 235.55 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Taller FISEI} \\
 D_I &= \sqrt{\frac{4 * 39.29 \text{ Ton}}{\pi * 815.77 \text{ Ton/m}^2}} \\
 D_I &= 0.2476 \text{ m} \\
 D_I &= 247.62 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

5) Cálculo de la capacidad de carga del aislador (Qd)

Este parámetro es utilizado para controlar la amortiguación y la rigidez efectiva del sistema de aislamiento. Para estimarlo, se obtiene la carga vertical (w) que recibe cada aislador según la masa participativa (CM+0.25CV); y luego con la relación Q_d/W cuyo valor se encuentra en el rango establecido de 3 a 10%, se calcula la carga Q_d.

Para este caso de estudio se supone que la relación Q_d/W es igual a 6%, ya que es un valor conservador y aproximadamente está en la media de los posibles valores.

$$\frac{Q_d}{W} = (3\% - 10\%)$$

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Taller FICM} \\
 Q_d &= 21.01 \text{ Ton} * 6\% \\
 Q_d &= 1.260 \text{ Ton}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Taller FISEI} \\
 Q_d &= 22.66 \text{ Ton} * 6\% \\
 Q_d &= 1.359 \text{ Ton}
 \end{aligned}$$

6) Cálculo del diámetro de núcleo de plomo

El diámetro del núcleo de plomo se calcula con la siguiente ecuación:

$$D_L = \sqrt{\frac{4 * 1.10 * Q_d}{\pi * \sigma_y}}$$

Se considera que:

- El esfuerzo axial permisible en el núcleo de plomo (σ_y) es de 10 MPa (1019.71 Ton/m²).
- La fuerza de fluencia (F_y) es el 10% de la capacidad de carga (Q_d).

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Taller FICM} \\
 D_L &= \sqrt{\frac{4 * 1.10 * 1.260 \text{ Ton}}{\pi * 1019.71 \text{ Ton/m}^2}} \\
 D_L &= 0.0416 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Taller FISEI} \\
 D_L &= \sqrt{\frac{4 * 1.10 * 1.359 \text{ Ton}}{\pi * 1019.71 \text{ Ton/m}^2}} \\
 D_L &= 0.0432 \text{ m}
 \end{aligned}$$

7) Cálculo de la altura del aislador

sin planchas

Se determina a partir de la deformación de corte, cuyo limite debe ser de 250% y el máximo desplazamiento total, DTM.

$$H_I = D_{TM}/2.50$$

$$H_I = 0.5872 \text{ m}/2.50$$

$$H_I = 0.2349 \text{ m}$$

$$H_I = 234.88 \text{ mm}$$

Para los talleres es el mismo valor y que tienen el mismo valor del máximo desplazamiento.

8) Cálculo de la rigidez secundaria del aislador (Kd)

$$K_d = \frac{\pi}{4} * \frac{(D_I^2 - D_L^2) * G}{H_I}$$

Se estima el valor del módulo de corte (G), se trabaja con 40.78 Ton/m².

Taller FISEI

$$K_d = \frac{\pi}{4} * \frac{(0.2476^2 - 0.0432^2) * 40.78 \text{ Ton/m}^2}{0.2349 \text{ m}}$$

$$K_d = 8.11 \text{ Ton/m}$$

Taller FICM

$$K_d = \frac{\pi}{4} * \frac{(0.2355^2 - 0.0416^2) * 40.78 \text{ Ton/m}^2}{0.2349 \text{ m}}$$

$$K_d = 7.33 \text{ Ton/m}$$

9) Cálculo de la rigidez y el amortiguamiento efectivos (K_{eff} , β_{eff})

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Taller FICM} \\
 K_{eff} &= \frac{1.260 \text{ Ton}}{0.5872 \text{ m}} + 7.33 \text{ Ton/m} \\
 K_{eff} &= 9.48 \text{ Ton/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \textbf{Taller FISEI} \\
 K_{eff} &= \frac{1.260 \text{ Ton}}{0.5872 \text{ m}} + 8.11 \text{ Ton/m} \\
 K_{eff} &= 10.42 \text{ Ton/m}
 \end{aligned}$$

$$K_{eff} = \frac{Q_d}{D_{TM}} + K_d$$

$$\beta_{eff} = \frac{4Q_d(D_{TM} - F_y/10K_d)}{2\pi * K_{eff\ max} D_{TM}^2}$$

Taller FISEI

$$\beta_{eff} = \frac{4 * 1.359 (0.587 - 1.495/10 * 8.11)}{2\pi * 10.42 * 0.587^2}$$

$$\beta_{eff} = 13.70 \%$$

Taller FICM

$$\beta_{eff} = \frac{4 * 1.260 (0.587 - 1.386/10 * 8.11)}{2\pi * 9.48 * 0.587^2}$$

$$\beta_{eff} = 13.95 \%$$

10) Cálculo de la rigidez vertical (Kv)

$$K_v = \frac{E_c * A}{H_l}$$

Donde:

Ec = Módulo de elasticidad del conjunto de las láminas de caucho y acero

A = Área transversal del aislador

Ec se calcula usando la siguiente expresión:

$$E_c = \frac{6 G S^2 K}{6 G S^2 + K}$$

Donde:

G = Módulo de corte del caucho, valor que se encuentra entre 0.38 MPa a 0.70 MPa. Se trabaja con 50.985 Ton/m².

S = Factor de forma que resulta de dividir el diámetro del aislador D entre cuatro veces el espesor de una lámina de caucho t.

K = Modulo de compresibilidad del caucho, el cual se considera igual a 2000 MPa.

Se trabaja con 203943.24 Ton/m².

Tabla 59: Cálculo de la rigidez vertical

| Descripción | Taller FICM | Taller FISEI | Unidad |
|-------------|-------------|--------------|--------|
| t | 8.00 | 8.00 | mm |
| S | 7.36 | 7.74 | |

| | | | |
|-----------|----------|----------|------------------|
| Ec | 16163.89 | 17715.92 | T/m ² |
| A | 0.044 | 0.048 | m ² |
| Kv | 2998.88 | 3632.45 | T/m |

Fuente: Ing. Byron López

11) Cálculo de la rigidez elástica (Ke)

$$K_v = 10Kd$$

$$\text{Taller FISEI} = K_v = 10 * 8.11 = 81.1 \text{ Ton/m}$$

$$\text{Taller FICM} = K_v = 10 * 7.33 = 73.3 \text{ Ton/m}$$

En la siguiente tabla se presenta los valores finales para los dos talleres, además se presenta las propiedades dinámicas que se utilizarán en la modelación en el software ETABS 2018:

Tabla 60: Resumen característico físicas y mecánicas de aislador calculado

| Descripción | Valores | | Unidades |
|--|-------------|--------------|----------|
| | Taller FICM | Taller FISEI | |
| Diámetro de aislador (DI) | 235.55 | 247.62 | mm |
| Altura del aislador sin planchas (HI) | 234.88 | 234.88 | mm |
| Rigidez efectiva (Keff) | 9.48 | 10.42 | T/m |
| Amortiguamiento efectivo (Beff) | 0.1395 | 0.1370 | |
| Rigidez elástica (Ke) | 73.30 | 81.07 | T/m |
| Fuerza de fluencia (Fy) | 1.386 | 1.496 | T |
| Radio de rigidez post fluencia (Kd/Ke) | 0.10 | 0.10 | |
| Carga axial ultima (Pumax) | 35.55 | 39.29 | T |
| Rigidez efectiva lineal (Kv) | 2998.88 | 3632.45 | T/m |

Fuente: Ing. Byron López

4.2.2. Detalle del modelamiento

Para la comprobación de los resultados con la implantación de los aisladores se realiza la modelación en el software ETABS 2018, para lo cual se coloca los aisladores en la estructura a través de un Link/ Support properties,

Con los datos de la tabla 57, se procede a definir el aislador LRB en el software como se presenta en las siguientes figuras:

Figura 99: Asignación de aisladores tipo LRB

The screenshot shows the 'Link Property Data' dialog box with the following settings:

- General:** Link Property Name: LRB CENTRA; Link Type: Rubber Isolator.
- Total Mass and Weight:** Mass: 0 tonf-s²/m; Weight: 0 tonf; Rotational Inertia 1, 2, and 3: 0 tonf-m-s².
- Directional Properties:**

| Direction | Fixed | NonLinear | Properties | Direction | Fixed | NonLinear | Properties |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| U1 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Modify/Show for U1... | R1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Modify/Show for R1 |
| U2 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Modify/Show for U2... | R2 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Modify/Show for R2 |
| U3 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Modify/Show for U3... | R3 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Modify/Show for R3 |

Fuente: ETABS 2018

Figura 100: Asignación de Parámetros U1, U2 y U3 LRB

The two screenshots show the 'Link/Support Directional Properties' dialog box for different directions:

- Left Screenshot (U1):**
 - Identification: Property Name: LRB CENTRA; Direction: U1; Type: Rubber Isolator; NonLinear: No.
 - Linear Properties: Effective Stiffness: 2998.88 tonf/m; Effective Damping: 0.15 tonf-s/m.
- Right Screenshot (U2):**
 - Identification: Property Name: LRB CENTRA; Direction: U2; Type: Rubber Isolator; NonLinear: Yes.
 - Linear Properties: Effective Stiffness: 9.48 tonf/m; Effective Damping: 0.15 tonf-s/m.
 - Shear Deformation Location: Distance from End-J: 0 m.
 - Nonlinear Properties: Stiffness: 73.3 tonf/m; Yield Strength: 1.39 tonf; Post Yield Stiffness Ratio: 0.1.

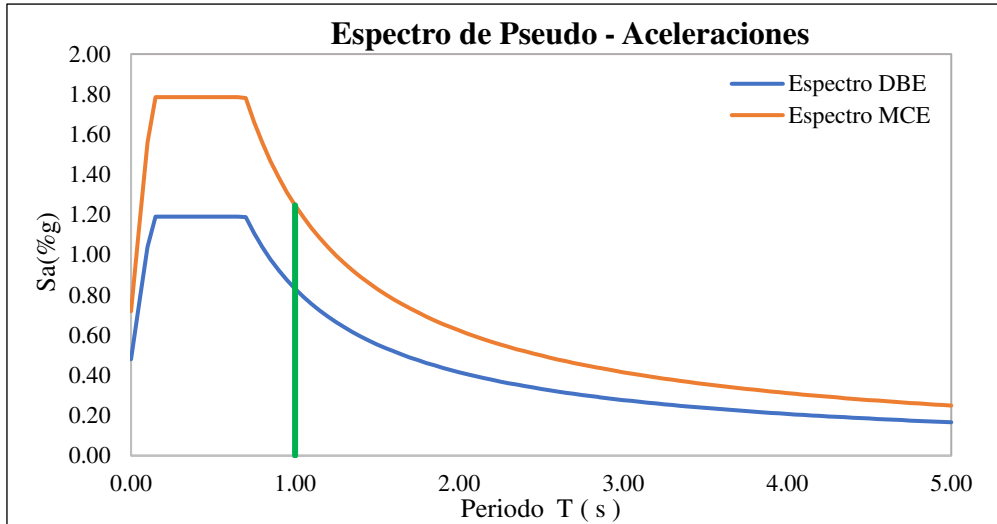
Fuente: ETABS 2018

4.2.3. Definición de sismo de diseño: Sismo de Diseño (DBE) y Sismo Máximo Considerado (MCE)

Para realizar el diseño sísmico y normas similares al mismo código ASCE 2016 recomienda bajar la probabilidad de excedencia por lo menos a un 2% en 50 años con un periodo de retorno de 475 años, por lo cual se utilizan espectros con aceleración muchos mayores que se denominan Sismo Máximo Considerado (MCE).

Con el MCE se determina los resultados de desplazamiento, aceleraciones, derivas y fuerzas en los aisladores, mientras que con el DBE se diseña los elementos que conforman la estructura.

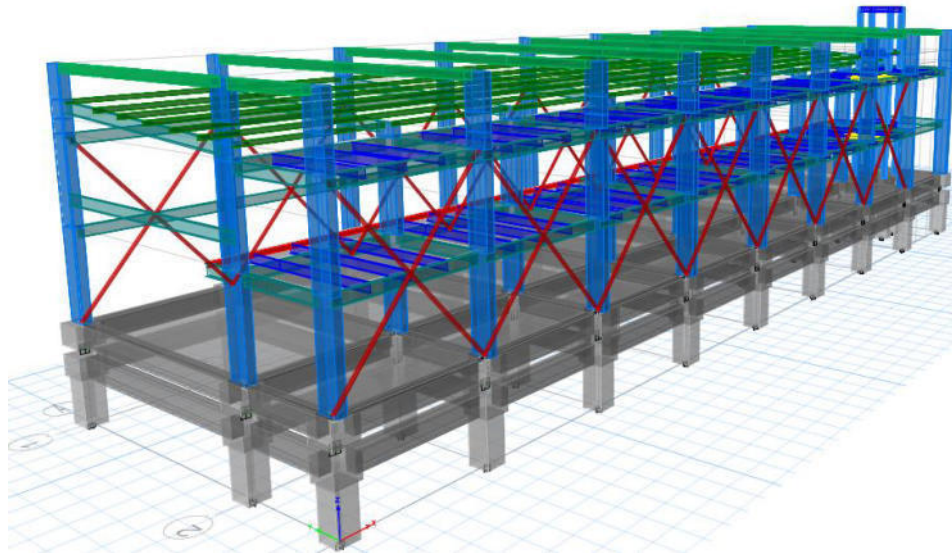
Figura 101: Espectro de Sismo de Diseño (DBE) y Sismo Máximo Considerado (MCE)



Fuente: Ing. Byron López

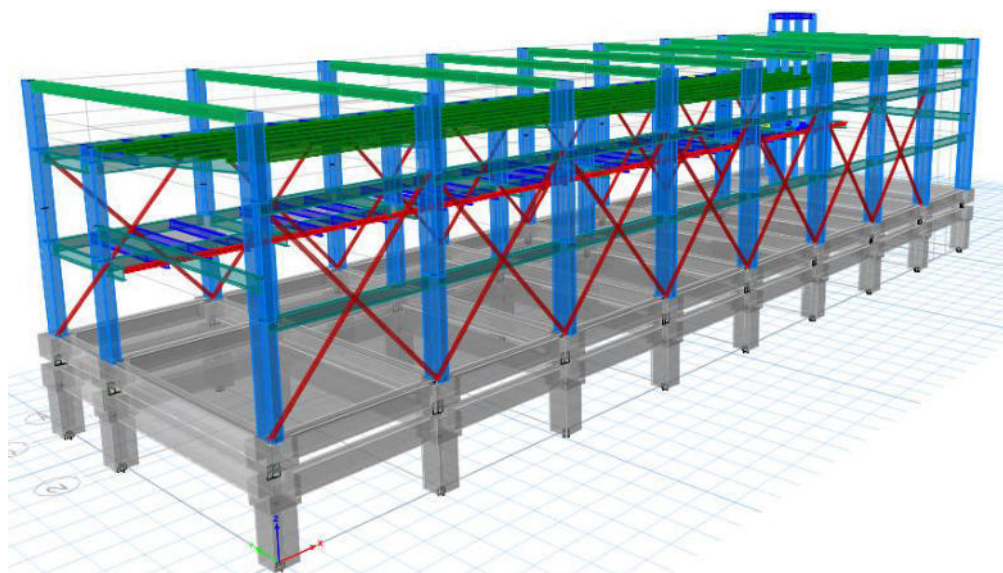
4.2.4. Modelación ETABS

Figura 102: Modelación Taller FICM - Base aislada



Fuente: ETABS 2018

Figura 103: Modelación Taller FISEI - Base aislada



Fuente: ETABS 2018

4.2.5. Resultados del Análisis Estructural

4.2.5.1. Periodo de Vibración Fundamental de la Estructura Aislada

En las siguientes tablas se presentan los periodos obtenidos, presentando periodos altos debido al uso de aisladores de base, las masas participativas en los modos de traslacionales deben cumplir por lo menos el 90% de su participación, en el caso de llegarse a cumplir se debe realizar una nueva distribución de sus rigideces.

Como se puede observar en la tabla 58 para el taller FICM, se obtiene un movimiento traslacional en los dos primeros modos y también presenta una participación mayor al 90% en el segundo modo para la dirección X y dirección Y. Además, el periodo de este análisis es de $T = 2.824$ s

Tabla 61: Modos de vibración y participación de masas del Taller FICM con aisladores

| Modo | Periodo | UX | UY | UZ | Sum UX | Sum UY | Sum UZ |
|------|---------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | sec | | | | | | |
| 1 | 2.824 | 0.003 | 0.637 | 0.000 | 0.00 | 0.83 | 0.00 |
| 2 | 2.697 | 0.765 | 0.004 | 0.000 | 1.00 | 0.92 | 0.00 |
| 3 | 2.270 | 0.001 | 0.128 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 4 | 0.316 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 5 | 0.257 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 6 | 0.239 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 7 | 0.174 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 8 | 0.130 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 9 | 0.115 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 10 | 0.106 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |

Fuente: Ing. Byron López

Como se puede observar en la tabla 59 para el taller FISEI, se obtiene un movimiento traslacional en los dos primeros modos y también presenta una participación mayor al 90% en el segundo modo para la dirección X y en tercer modo para la dirección Y. Además, el periodo de este análisis es de $T = 2.798$ s

Tabla 62: Modos de vibración y participación de masas del Taller FISEI con aisladores

| Modo | Periodo | UX | UY | UZ | Sum UX | Sum UY | Sum UZ |
|------|---------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | sec | | | | | | |
| 1 | 2.798 | 0.004 | 0.640 | 0.000 | 0.00 | 0.81 | 0.00 |
| 2 | 2.671 | 0.769 | 0.005 | 0.000 | 1.00 | 0.82 | 0.00 |
| 3 | 2.247 | 0.001 | 0.129 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 4 | 0.290 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 5 | 0.252 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 6 | 0.235 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 7 | 0.171 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 8 | 0.125 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 9 | 0.116 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 10 | 0.108 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |

Fuente: Ing. Byron López

4.2.5.2. Comparación de resultados

Para un mejor análisis se realiza la comparación de resultados tanto como la estructura con base empotrada y como para la estructura con aislamiento elastomericos con núcleo de plomo:

4.2.5.3. Periodo de vibración

En la siguiente tabla se encuentra los resultados del periodo de vibración de los dos talleres, para cada sistema estructural:

Tabla 63: Periodo para los diferentes sistemas estructurales

| PERÍODO (seg.) | | | | | |
|----------------|-----------|---------|--------------|-----------|---------|
| TALLER FICM | | | TALLER FISEI | | |
| Modo | Empotrado | Aislado | Modo | Empotrado | Aislado |
| 1 | 0.317 | 2.824 | 1 | 0.292 | 2.798 |
| 2 | 0.232 | 2.697 | 2 | 0.256 | 2.671 |
| 3 | 0.208 | 2.27 | 3 | 0.231 | 2.247 |
| 4 | 0.157 | 0.316 | 4 | 0.166 | 0.290 |
| 5 | 0.152 | 0.257 | 5 | 0.158 | 0.252 |
| 6 | 0.116 | 0.239 | 6 | 0.116 | 0.235 |
| 7 | 0.106 | 0.174 | 7 | 0.108 | 0.171 |

| | | | | | |
|----|-------|-------|----|-------|-------|
| 8 | 0.106 | 0.13 | 8 | 0.106 | 0.125 |
| 9 | 0.106 | 0.115 | 9 | 0.106 | 0.116 |
| 10 | 0.106 | 0.106 | 10 | 0.106 | 0.108 |

Fuente: Ing. Byron López

Como se puede observar en la tabla anterior se genera un incremento en los periodos de vibración de los dos Talleres con los aisladores, ya que este análisis considera la flexibilidad en el nivel donde se ubicó el aislador formando un modelo de acoplamiento uniforme entre la base y el nivel del aislador. Esto produce un modelo más flexible con relación con los talleres de base fija.

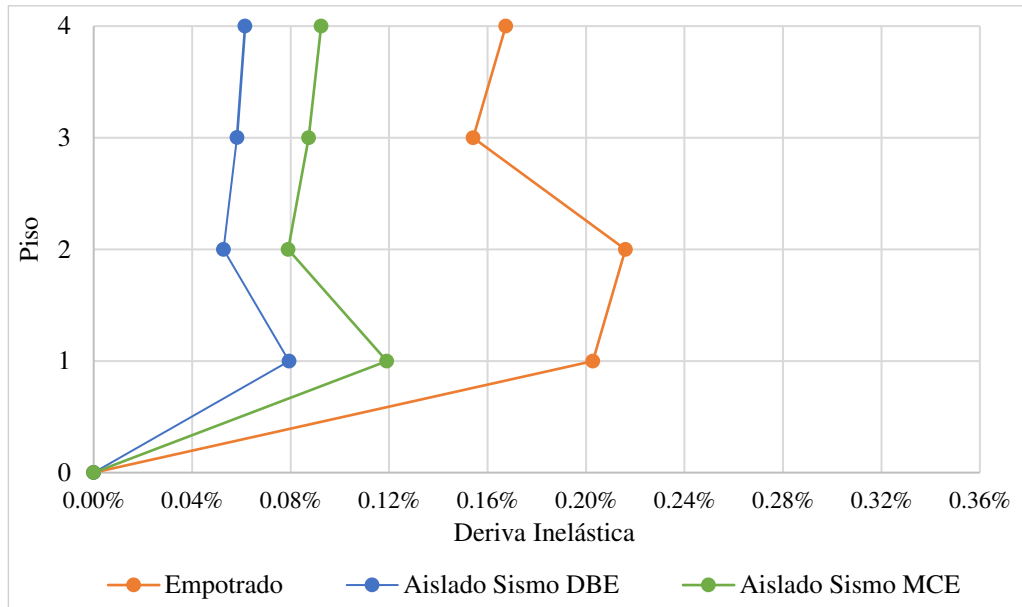
4.2.5.4. Comparación de Derivas Inelásticas

Las derivas de piso es un parámetro muy importante para la comparación de los dos sistemas analizados la estructura empotrada en su base con la estructura aislada. En las siguientes figuras se presenta las máximas derivas de piso, que se determinaron por el espectro sismo de diseño (DBE) y sismo Máximo Considerado (MCE) para las dos direcciones de análisis, al hacer la comparación con las derivas de piso del sistema empotrado se puede determinar que presenta una reducción en las derivas con relación al sistema aislado.

- **Derivas Inelásticas – Taller FICM**

En la siguiente figura se presenta las derivas en dirección X para el taller FICM, donde se observa para la estructura empotrada tiene un valor máximo de deriva de 0.22% en el segundo piso, con la implementación de los aisladores se observa una reducción del 64% para un sismo de diseño con un valor máximo de 0.08%, mientras que para un sismo máximo considerado se reduce un 45% con un valor de 0.12%, a comparación de una estructura empotrada, todos estos resultados cumplen con los valores especificados en la NEC-15.

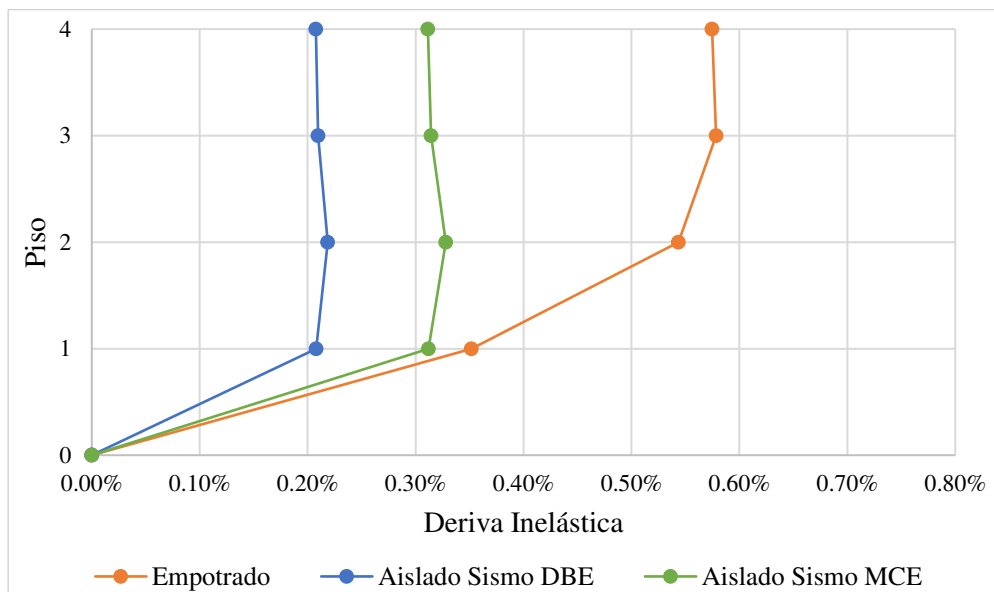
Figura 104: Derivas inelásticas Taller FICM convencional y aislado en dirección X



Fuente: Ing. Byron López

De la misma forma se hace el análisis para la dirección de Y donde se observa para la estructura empotrada presenta un valor máximo de deriva de 0.58% en el tercer piso, con la implementación de los aisladores se observa una reducción del 62% para un sismo de diseño con un valor máximo de 0.22%, mientras que para un sismo máximo considerado se reduce un 43% con un valor de 0.33%, a comparación de una estructura empotrada, todos estos resultados cumplen con los valores especificados en la NEC-15.

Figura 105: Derivas inelásticas Taller FICM convencional y aislado en dirección Y

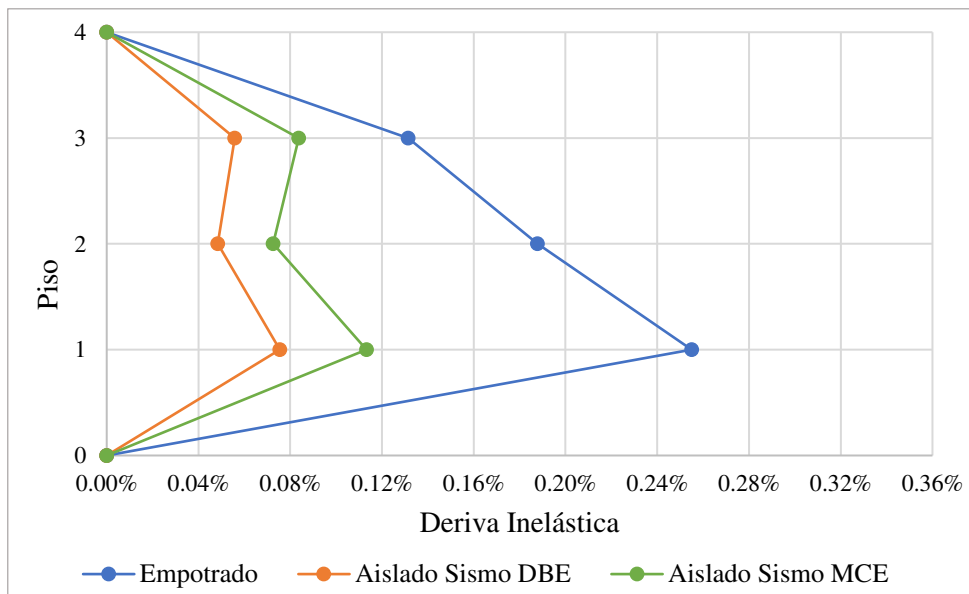


Fuente: Ing. Byron López

- **Derivas Inelásticas – Taller FISEI**

En la siguiente figura se presenta las derivas en dirección X para el taller FISEI, donde se observa para la estructura empotrada tiene un valor máximo de deriva de 0.26% en el primer piso, con la implementación de los aisladores se reduce un 69% para un sismo de diseño con un valor máximo de 0.08%, mientras que para un sismo máximo considerado se reduce un 58% con un valor de 0.11%, todos estos resultados cumplen con los valores especificados en la NEC-15.

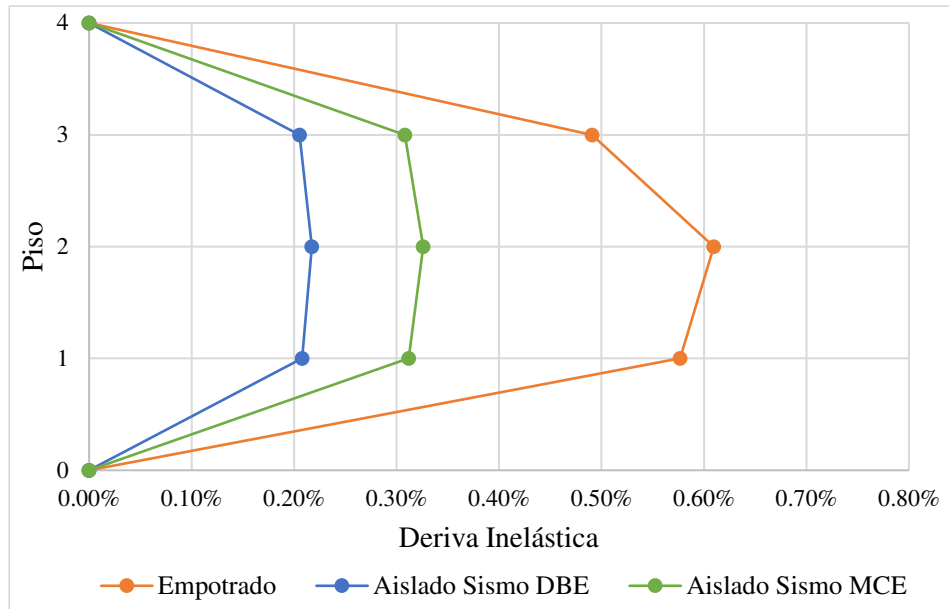
Figura 106: Derivas inelásticas Taller FISEI convencional y aislado en dirección X



Fuente: Ing. Byron López

De la misma forma se hace el análisis para la dirección de Y donde se observa para la estructura empotrada presenta un valor máximo de deriva de 0.61% en el segundo piso, con la implementación de los aisladores presenta una reducción del 64% para un sismo de diseño con un valor máximo de 0.22%, mientras que para un sismo máximo considerado se reduce un 46% con un valor de 0.33%, todos estos resultados cumplen con los valores especificados en la NEC-15.

Figura 107: Derivas inelásticas Taller FISEI convencional y aislado en dirección Y



Fuente: Ing. Byron López

4.2.5.5. Comparación de los desplazamientos máximos

Se determina los desplazamientos máximos obtenidos por efecto del sismo en dirección X e Y, los dos resultados son comparados con respecto a la estructura con base empotrada considerando que el edificio se moverá, aunque el mismo se encuentre aislada.

En las siguientes figuras se puede observar que los desplazamientos en la estructura empotrada en la base son aproximadamente el doble a comparación con la estructura con aislación, tanto con el sismo de diseño como también para el sismo máximo considerado; permitiendo obtener una mejor idea del comportamiento de la estructura frente a un sismo.

- **Desplazamiento – Taller FICM**

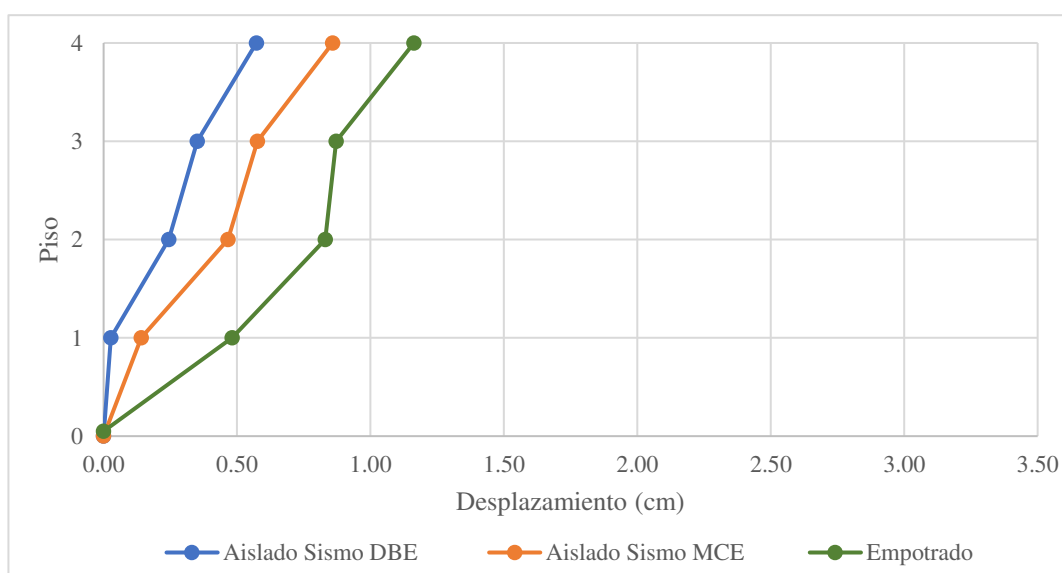
En la siguiente tabla se presenta los desplazamientos para los dos sistemas analizados además los porcentajes de reducción al comparar los desplazamientos de la estructura empotrada y con aislamiento para los dos sismos propuestos, lo que permite analizar los porcentajes de reducción de los desplazamientos en una estructura sismo resistente. Para la dirección X del taller FICM con un sismo de diseño se obtiene un desplazamiento máximo de 0.572 cm reduciendo un 50.76% a comparación de una estructura empotrada y para un sismo máximo considerado un valor máximo de 0.858 con una reducción del 26.15%.

Tabla 64: Desplazamiento de la estructura (X) y porcentaje de reducción con sistema de aislación

| Nivel | Empotrado (cm) | Sismo DBE | | Sismo MCE | |
|-------|----------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|
| | | Desplazamiento (cm) | % Reducción | Desplazamiento (cm) | % Reducción |
| 4 | 1.162 | 0.572 | 50.76 | 0.858 | 26.15 |
| 3 | 0.872 | 0.351 | 59.75 | 0.576 | 33.90 |
| 2 | 0.831 | 0.244 | 70.59 | 0.467 | 43.86 |
| 1 | 0.481 | 0.028 | 94.26 | 0.141 | 70.62 |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.000 | 0.000 |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 108: Desplazamiento de las estructuras respecto a la base – Dirección X



Fuente: Ing. Byron López

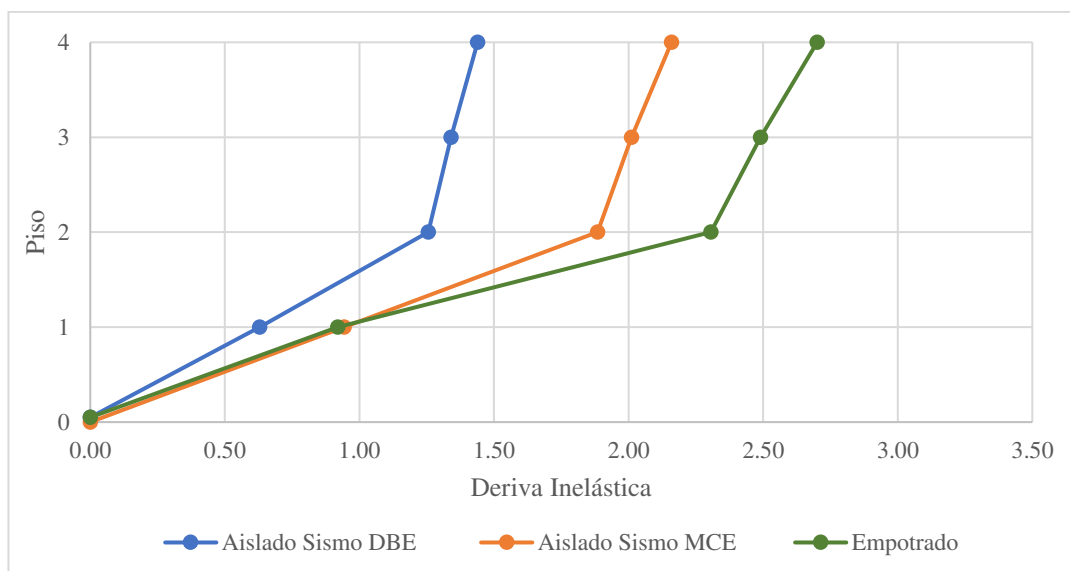
Para la dirección Y del taller FICM con un sismo de diseño se obtiene un desplazamiento máximo de 1.440 cm reduciendo un 46.70 % a comparación de una estructura empotrada y para un sismo máximo considerado un valor máximo de 2.159 cm con una reducción del 20.05 %.

Tabla 65: Desplazamiento de la estructura (Y) y porcentaje de reducción con sistema de aislación

| Nivel | Empotrado (cm) | Sismo DBE | | Sismo MCE | |
|-------|----------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|
| | | Desplazamiento (cm) | % Reducción | Desplazamiento (cm) | % Reducción |
| 4 | 2.701 | 1.440 | 46.70 | 2.159 | 20.05 |
| 3 | 2.490 | 1.340 | 46.17 | 2.011 | 19.26 |
| 2 | 2.306 | 1.256 | 45.52 | 1.885 | 18.28 |
| 1 | 0.919 | 0.629 | 31.56 | 0.903 | 1.70 |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.000 | 0.000 |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 109: Desplazamiento de las estructuras respecto a la base – Dirección Y



Fuente: Ing. Byron López

- **Desplazamiento – Taller FISEI**

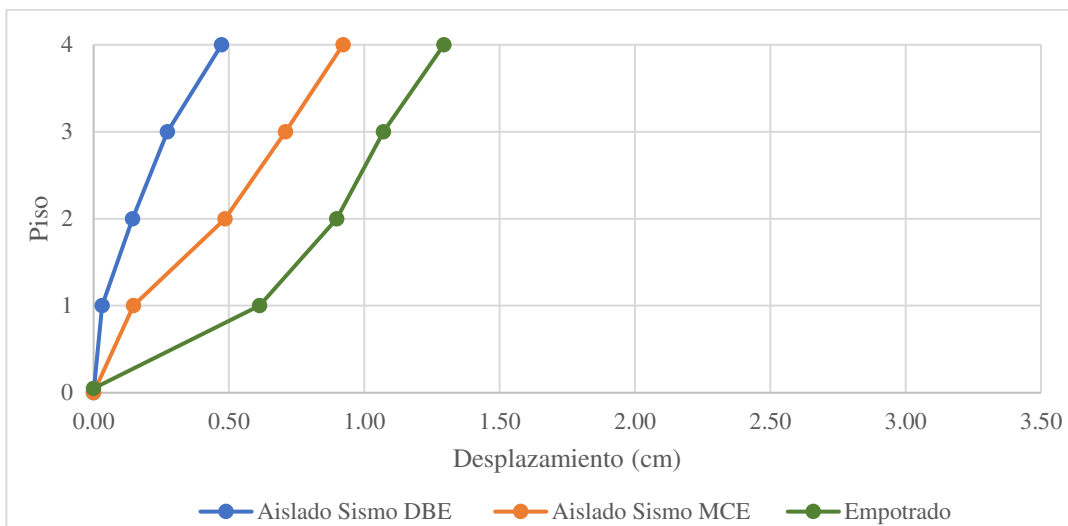
En la siguiente tabla se puede observar que para la dirección X del taller FISEI con un sismo de diseño se obtiene un desplazamiento máximo de 0.473 cm reduciendo un 63.49% a comparación de una estructura empotrada y para un sismo máximo considerado un valor máximo de 0.921 cm con una reducción del 28.82 %.

Tabla 66: Desplazamiento de la estructura (X) y porcentaje de reducción con sistema de aislación

| Nivel | Empotrado (cm) | Sismo DBE | | Sismo MCE | |
|-------|----------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|
| | | Desplazamiento (cm) | % Reducción | Desplazamiento (cm) | % Reducción |
| 4 | 1.294 | 0.473 | 63.49 | 0.921 | 28.82 |
| 3 | 1.071 | 0.273 | 74.55 | 0.709 | 33.80 |
| 2 | 0.898 | 0.143 | 84.04 | 0.485 | 45.99 |
| 1 | 0.613 | 0.031 | 94.92 | 0.147 | 76.06 |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.000 | 0.000 |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 110: Desplazamiento de las estructuras respecto a la base – Dirección X



Fuente: Ing. Byron López

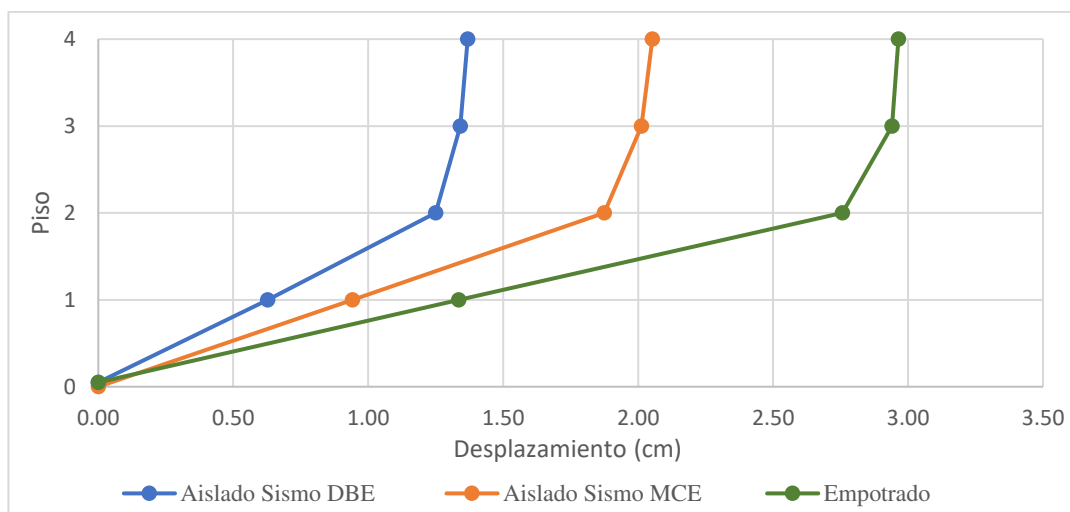
Para la dirección Y del taller FISEI con un sismo de diseño se obtiene un desplazamiento máximo de 1.368 cm reduciendo un 53.85 % a comparación de una estructura empotrada y para un sismo máximo considerado un valor máximo de 2.052 cm con una reducción del 30.78 %.

Tabla 67: Desplazamiento de la estructura (Y) y porcentaje de reducción con sistema de aislación

| Nivel | Empotrado (cm) | Sismo DBE | | Sismo MCE | |
|-------|----------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|
| | | Desplazamiento (cm) | % Reducción | Desplazamiento (cm) | % Reducción |
| 4 | 2.965 | 1.368 | 53.85 | 2.052 | 30.78 |
| 3 | 2.941 | 1.341 | 54.39 | 2.012 | 31.58 |
| 2 | 2.757 | 1.250 | 54.66 | 1.875 | 31.99 |
| 1 | 1.336 | 0.628 | 52.98 | 0.942 | 29.46 |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.000 | 0.000 |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 111: Desplazamiento de las estructuras respecto a la base – Dirección Y



Fuente: Ing. Byron López

4.2.5.6. Comparación de Corte Basal

- **Cortante Basal – Taller FICM**

En las siguientes tablas y figuras se realiza la comparación entre la estructura empotrada en la base y la aislada, con el objetivo de verificar la eficiencia de la implementación de los aisladores mediante los valores del cortante basal, por lo que representa el nivel de esfuerzo al que se somete la estructura. Observando una reducción en las fuerzas que actúan en la edificación.

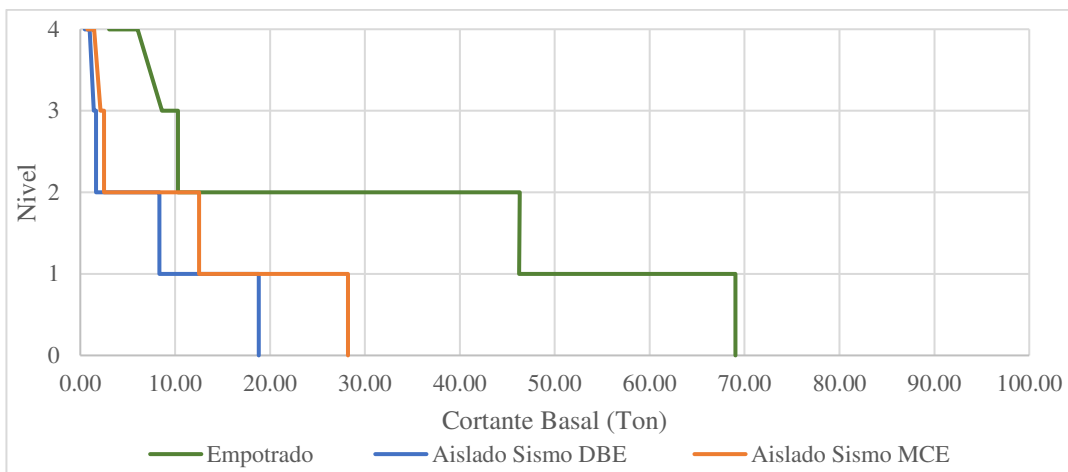
Se puede observar en la siguiente tabla para el taller FICM en la dirección X con un sismo de diseño presenta un valor de cortante máximo de 18.805 Ton con un porcentaje de reducción del 72.76% con la relación a la estructura empotrada y con un sismo máximo considerado un valor máximo de 28.205 Ton con un porcentaje de reducción del 59.14%.

Tabla 68: Cortante basal de la estructura (X) y porcentaje de reducción con sistema de aislación

| Nivel | Empotrado (Ton) | Sismo DBE | | Sismo MCE | |
|-------|-----------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
| | | Cortante Basal (Ton) | % Reducción | Cortante Basal (Ton) | % Reducción |
| 4 | 6.047 | 0.979 | 83.81 | 2.144 | 64.55 |
| 3 | 10.285 | 1.661 | 83.85 | 2.491 | 75.78 |
| 2 | 46.257 | 8.341 | 81.97 | 12.511 | 72.95 |
| 1 | 69.036 | 18.805 | 72.76 | 28.208 | 59.14 |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 112: Cortante máximo (X) - Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

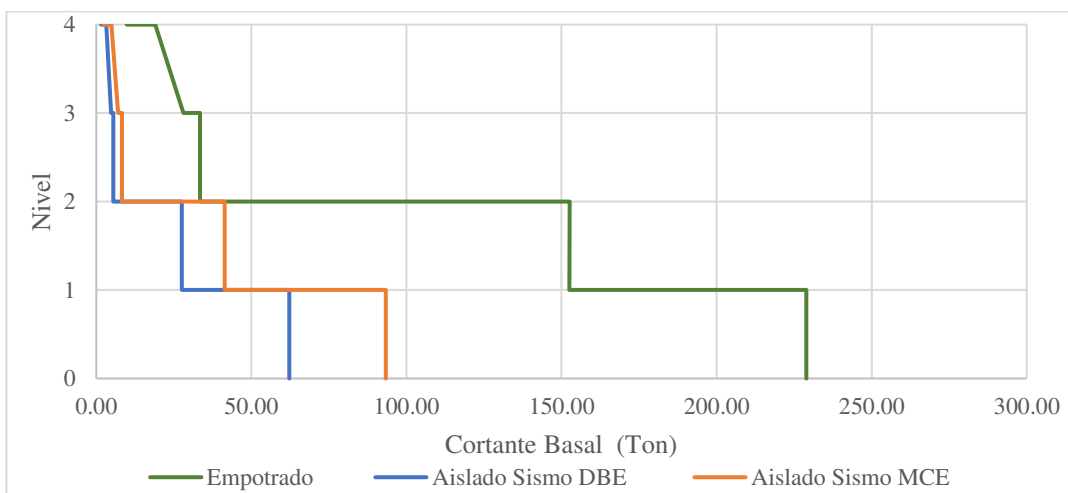
Para la dirección Y del taller FICM con un sismo de diseño se obtiene un cortante basal máximo de 62.227 Ton con un porcentaje de reducción de 72.8% a comparación de una estructura empotrada y para un sismo máximo considerado un valor máximo de 93.340 Ton con una reducción del 59.23%

Tabla 69: Cortante basal de la estructura (Y) y porcentaje de reducción con sistema de aislación

| Nivel | Empotrado (Ton) | Sismo DBE | | Sismo MCE | |
|-------|-----------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
| | | Cortante Basal (Ton) | % Reducción | Cortante Basal (Ton) | % Reducción |
| 4 | 19.006 | 3.223 | 83.04 | 4.834 | 74.56 |
| 3 | 33.422 | 5.494 | 83.56 | 8.241 | 75.34 |
| 2 | 152.484 | 27.588 | 81.91 | 41.382 | 72.86 |
| 1 | 228.942 | 62.227 | 72.82 | 93.340 | 59.23 |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 113: Cortante máximo (Y) - Taller FICM



Fuente: Ing. Byron López

- **Cortante Basal – Taller FISEI**

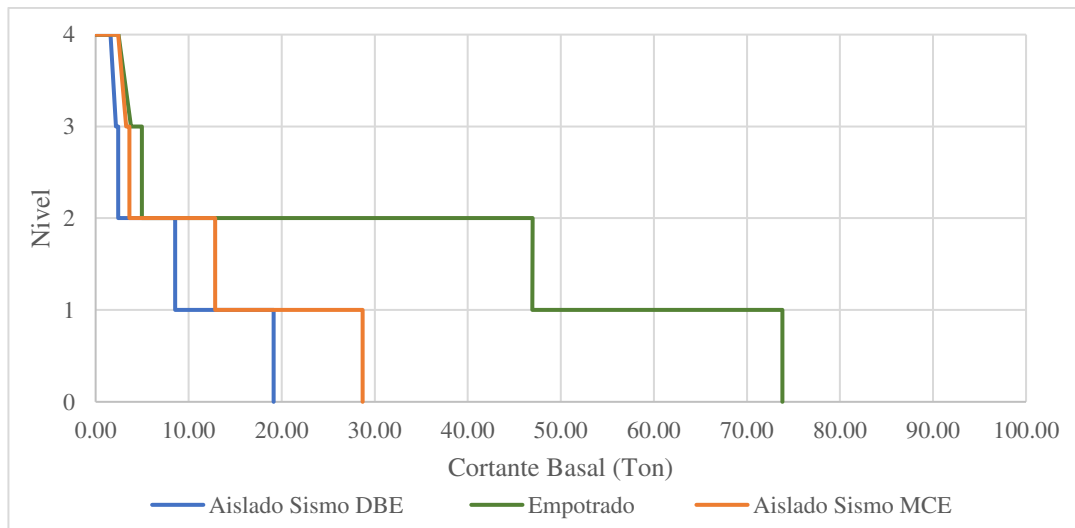
En la siguiente tabla se puede observar que para la dirección X del taller FISEI con un sismo de diseño se obtiene un cortante basal máximo de 19.131 Ton con un porcentaje reducción de 74.08 % a comparación de una estructura empotrada y para un sismo máximo considerado un valor máximo de 28.696 Ton con una reducción del 61.12%.

Tabla 70: Cortante basal de la estructura (X) y porcentaje de reducción con sistema de aislación

| Nivel | Empotrado (Ton) | Sismo DBE | | Sismo MCE | |
|-------|-----------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
| | | Cortante Basal (Ton) | % Reducción | Cortante Basal (Ton) | % Reducción |
| 4 | 2.471 | 1.605 | 35.03 | 2.408 | 2.55 |
| 3 | 4.963 | 2.427 | 51.09 | 3.641 | 26.64 |
| 2 | 46.933 | 8.556 | 81.77 | 12.834 | 72.65 |
| 1 | 73.814 | 19.131 | 74.08 | 28.696 | 61.12 |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 114: Cortante máximo (X) - Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

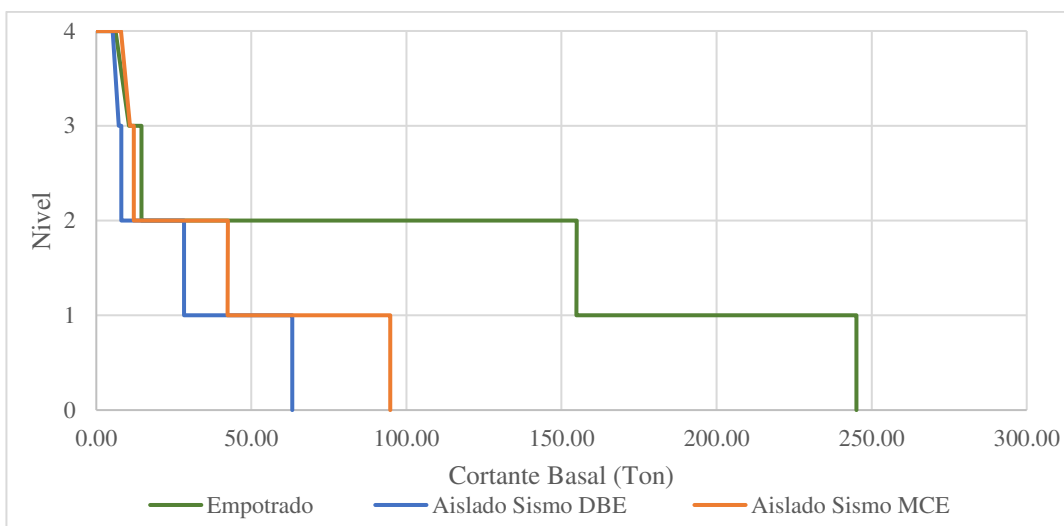
Para la dirección Y del taller FISEI con un sismo de diseño se obtiene un cortante basal máximo de 63.188 Ton con un porcentaje de reducción de 74.22% a comparación de una estructura empotrada y para un sismo máximo considerado un valor máximo de 94.781 Ton con una reducción del 61.33%

Tabla 71: Cortante basal de la estructura (Y) y porcentaje de reducción con sistema de aislación

| Nivel | Empotrado (Ton) | Sismo DBE | | Sismo MCE | |
|-------|-----------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------|
| | | Cortante Basal (Ton) | % Reducción | Cortante Basal (Ton) | % Reducción |
| 4 | 10.564 | 5.294 | 49.89 | 7.940 | 24.83 |
| 3 | 14.526 | 8.029 | 44.73 | 12.043 | 17.09 |
| 2 | 154.812 | 28.246 | 81.75 | 42.369 | 72.63 |
| 1 | 245.097 | 63.188 | 74.22 | 94.781 | 61.33 |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 115: Cortante máximo (Y) - Taller FISEI



Fuente: Ing. Byron López

En las siguientes tablas se presenta la comparación de los principales aspectos del análisis entre las dos estructuras con y sin aisladores sísmicos:

Tabla 72: Comparación de las dos estructuras con y sin aisladores sísmicos - Taller FICM

| Descripción | Dirección | Empotrada | Aisladores sísmicos | % de Reducción |
|----------------------|-----------|------------|---------------------|----------------|
| Periodo de vibración | - | 0.317 | 2.824 | - |
| Derivas Inelásticas | X | 0.22 % | 0.12 % | 45 |
| | Y | 0.58 % | 0.33 % | 43 |
| Desplazamiento | X | 1.16 cm | 0.858 cm | 26 |
| | Y | 2.70 cm | 2.16 | 20 |
| Cortante Basal | X | 69.04 Ton | 28.21 Ton | 59 |
| | Y | 228.94 Ton | 93.34 Ton | 59 |

Fuente: Ing. Byron López

Tabla 73: Comparación de las dos estructuras con y sin aisladores sísmicos - Taller FISEI

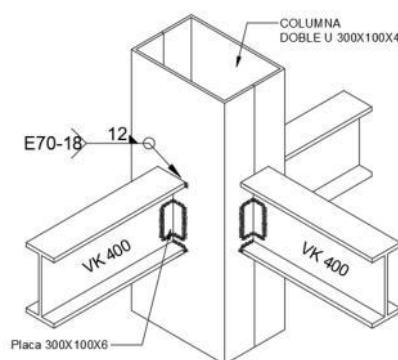
| Descripción | Dirección | Empotrado | Aisladores sísmicos | % de Reducción |
|----------------------|-----------|------------|---------------------|----------------|
| Periodo de vibración | - | 0.292 | 2.798 | - |
| Derivas Inelásticas | X | 0.26 % | 0.11 % | 58 |
| | Y | 0.61 % | 0.33 % | 46 |
| Desplazamiento | X | 1.29 cm | 0.92 cm | 29 |
| | Y | 2.97 cm | 2.05 cm | 31 |
| Cortante Basal | X | 73.81 Ton | 28.70 Ton | 61 |
| | Y | 245.10 Ton | 94.78 Ton | 61 |

Fuente: Ing. Byron López

4.3. Análisis de las juntas soldadas de las conexiones precalificadas

Se analizará las juntas soldadas de la siguiente conexión, se analiza dos conexiones para los dos talleres debido a que tienen la misma configuración:

Figura 116: Conexión de patín sodado sin refuerzo y alma soldada (WUF-W)



Fuente: Ing. Byron López

- **Diseño de soldadura a Filete**

La soldadura es diseñada a cortante, el esfuerzo se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

- **Filosofía de diseño**

$$\sigma_{REAL} \leq \sigma_{RESISTENTE}$$

$$F_{REAL} \leq F_{RESISTENTE} \text{ (Electrodo)}$$

- **Dimensionamiento**

$$\sigma_{REST} = \frac{F_{REAL}}{G.T * \ell}$$

$$F_{REAL} \leq \sigma_{REST} * G.T * \ell$$

σ_{REST} : Depende de la resistencia del electrodo (E60 - E70 - E80 – E90)

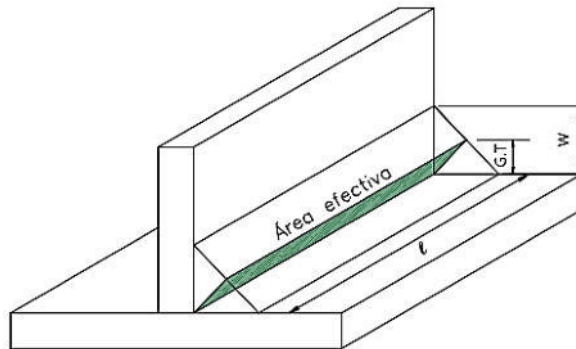
Cálculo de la Garganta Teórica

$$G.T = \frac{F_{REAL}}{\sigma_{REAL} * \ell}$$

Cálculo de la longitud del cordón

$$\ell = \frac{F_{REAL}}{\sigma_{REAL} * G.T}$$

Figura 117: Dimensiones de soldadura



Fuente: Ing. Byron López

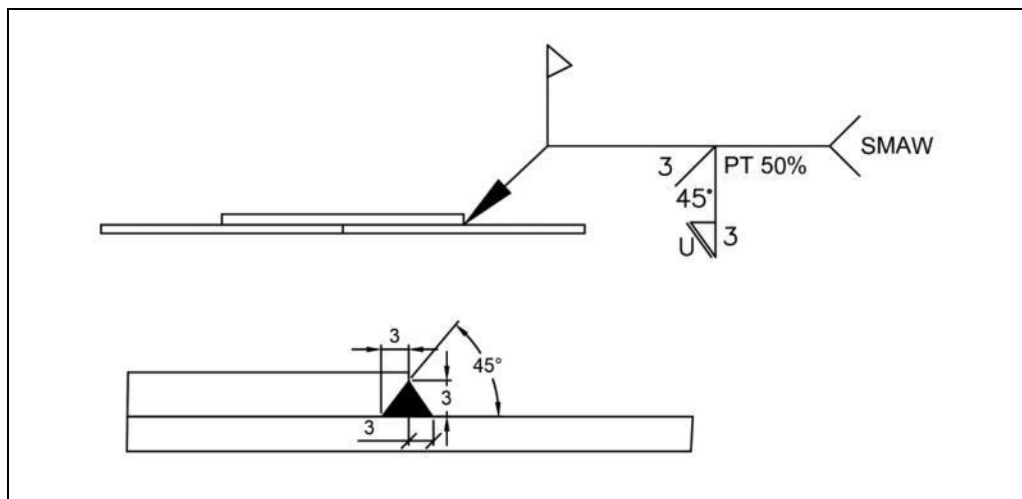
$$G.T = 0.7071 * W$$

$$W = \frac{G.T}{0.7071}$$

- **Calculo**

En la siguiente tabla se presenta los datos para el análisis de la junta a traslape

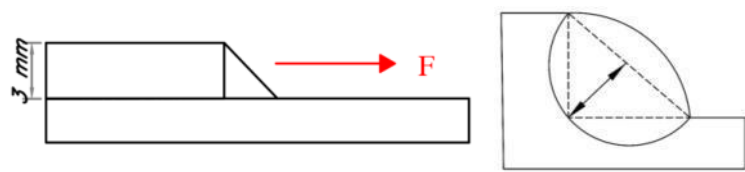
Tabla 74: Datos del análisis de la junta a traslape



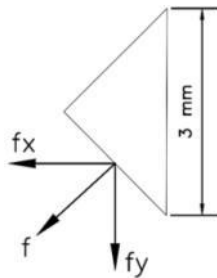
| | |
|-----------------------|--------------------------|
| Garganta | 3 mm |
| Tamaño de soldadura | 3mm |
| Área Efectiva | 450 mm ² |
| Longitud de Soldadura | 150 mm |
| Fy Material | 50 Klb/pulg ² |
| Fu Material | 65 Klb/pulg ² |
| Ensayo No destructivo | Tintas Penetrantes |

Fuente: Ing. Byron López

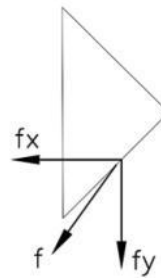
Figura 118: Detalle de la junta



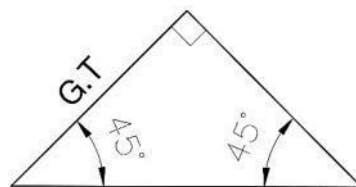
Fuente: Ing. Byron López



$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 \\ -f_x - f_x + F &= 0 \\ -2f_x + F &= 0 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 \\ -f_y - f_y &= 0 \\ -2f_y &= 0 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{sen } 45^\circ &= \frac{\epsilon}{S} \\ \epsilon &= \text{sen } 45^\circ * S \end{aligned}$$

$$f^2 = f_x^2 * f_y^2$$

$$f = f_x$$

$$F - 2f_x = 0$$

$$F = f_{utm} * Ta * \ell = 0 \qquad f = 0.75 * f_{utm} * \epsilon * \ell$$

$$f_{utm} * Ta * \ell - 2(0.75) * f_{utm} * \epsilon * \ell = 0$$

$$f_{utm} * Ta - 2(0.75) * f_{utm} * \epsilon = 0$$

$$65000 * 0.1181 - \left(\frac{3}{2}\right) * 70000 * (0.7071 * S) = 0$$

$$7676.5 - 105000 * (0.7071 * S) = 0$$

$$7676.5 - 7424.5 * S = 0$$

$$S = \frac{7676.5}{7424.5}$$

$$S = 0.1034 \text{ pulg} = 2.626 \text{ mm}$$

$$F = f_{utm} * Ta * \ell$$

$$F = 65000 * 0.1181 * 5.91$$

$$F = 45368.115 \text{ Kg}$$

$$\epsilon = \text{sen } 45^\circ * S$$

$$\epsilon = 0.7071 * 3$$

$$\epsilon = 2.12 \text{ mm}$$

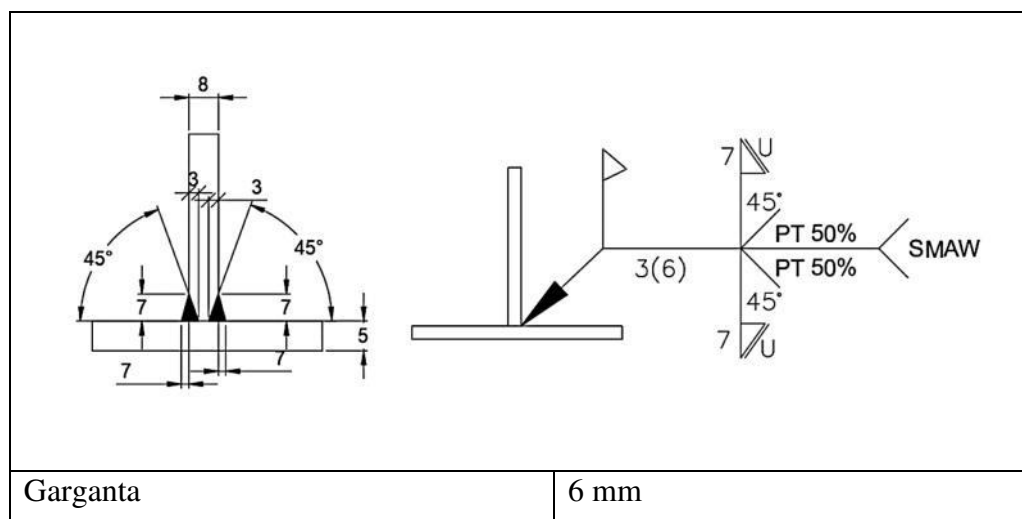
$$F_{REAL} \leq F_{RESISTENTE}$$

$$7.868 \text{ kg} \leq 45368.115 \text{ kg}$$

Cumple

En la siguiente tabla se presenta los datos para el análisis de la junta en T con doble filete:

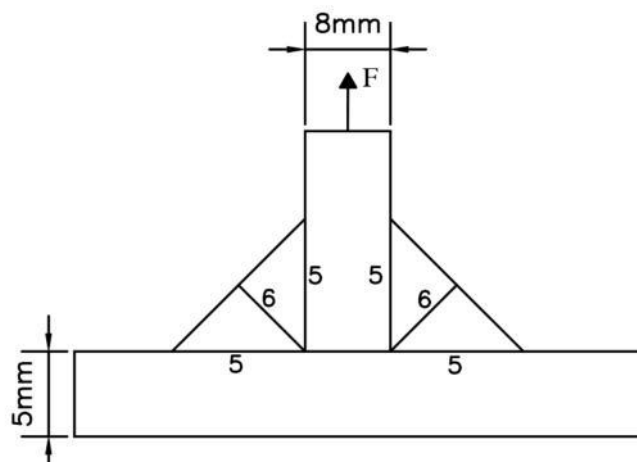
Tabla 75: Datos del análisis de la junta en T con doble filete:



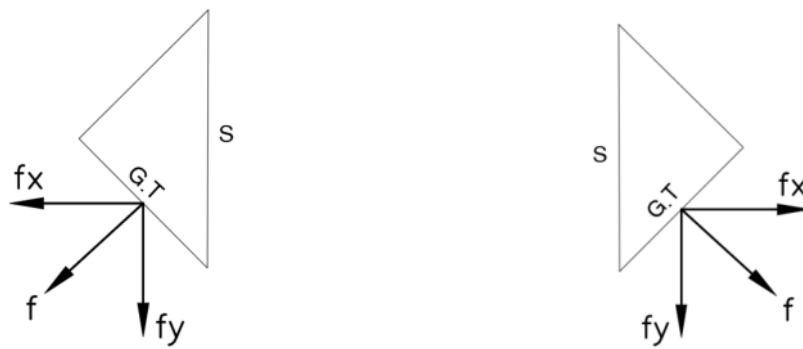
| | |
|-----------------------|--------------------------|
| Tamaño de soldadura | 7 mm |
| Área Efectiva | 632 mm ² |
| Longitud de Soldadura | 72 mm |
| Fy Material | 50 Klb/pulg ² |
| Fu Material | 65 Klb/pulg ² |
| Ensayo No destructivo | Tintas Penetrantes |

Fuente: Ing. Byron López

Figura 119: Detalle de la junta



Fuente: Ing. Byron López

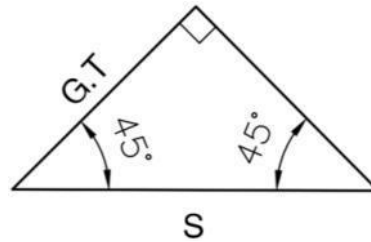


$$\Sigma F_x = 0$$

$$-fx - fx = 0$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$-fy - fy + F = 0$$



$$\text{Sen } 45^\circ = \frac{G.T}{S}$$

$$G.T = \text{Sen } 45^\circ * S$$

$$F = f_{u.material} * Ta * \ell$$

$$fy = 0.75 * f_{u.consumible} * G.T * \ell$$

$$-2fy + F = 0$$

$$-2(0.75)(70000)(0.7071 * S) + (65000)(0.315) = 0$$

$$-74245.5 * S = -20475$$

$$-74245.5 * S = -20475$$

$$S = 0.2758 \text{ pulg} = 7 \text{ mm}$$

$$F = (65000) (0.315) (72 \text{ mm a pulg})$$

$$F = (65000) (0.315) (2.83)$$

$$F = 58039.37 \text{ kg}$$

$$\epsilon = \text{sen } 45^\circ * S$$

$$\epsilon = 0.7071 * 7 \text{ mm}$$

$$\epsilon = 4.95 \text{ mm}$$

$$F_{REAL} \leq F_{RESISTENTE}$$

$$7.868 \text{ kg} \leq 58039.37 \text{ kg}$$

Cumple

Las dos juntas soldadas análisis cumplen con su diseño ya que la carga ultima es menor a la carga que resiste la junta.

CAPÍTULO V

5.1. CONCLUSIONES

- De acuerdo con la calibración del Medidor de espesores de placa, el rango tolerable de error debe ser menor al 5% y conforme a las mediciones realizadas de los espesores para cada componente en comparación con los valores reales de espesor, los resultados se encuentran dentro de la tolerancia de error y son aceptables.
- De acuerdo con los criterios de aceptación de inspección visual del código de soldadura estructural ANSI/AWS D1.1 2015 en la tabla 6.1. la junta de soldadura de las columnas ensayadas es aceptable. Cabe recalcar que las discontinuidades halladas en el ensayo pueden ser reparadas y nuevamente ensayadas.
- Los resultados del ensayo de ultrasonido mediante las gráficas que se generan en el equipo tomadas en cada punto de análisis indican que no presentan discontinuidades en el cordón de soldadura ni en los espesores de las placas de acero ASTM A36 usadas en las columnas y en las placas base.
- Los tipos de defectos que se encontraron una vez realizado los ensayos de tintas penetrantes son mínimos, en el taller FICM existe falta de continuidad y mordedura por lo que es necesario reparar para cumplir los criterios de aceptación de inspección visual del código de soldadura estructural ANSI/AWS D1.1 2015 en la tabla 6.1, mientras que en el taller FISEI existe falta de fusión, pero según la norma ASTM sección V artículo 5 acepta la conexión ensayada.
- De los ensayos realizados en campo: se determina la resistencia a la compresión de hormigón mediante el martillo esclerométrico con un valor de 245 kg/cm^2 para el taller FICM y 247.7 kg/cm^2 para el taller FISEI, se determinó el tipo de suelo mediante el ensayo de penetración estándar (SPT) con un valor de número de golpes en el rango de $50 > N \geq 15$, y una velocidad de onda de corte promedio de 356.53 m/s encontrándose en el rango de $360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$, clasificando según la norma ecuatoriana NEC 2015 como tipo D, además según la SUCS (Sistema unificado de clasificación de suelos) se clasifica como un suelo SM (Arena limosa mal graduada).
- Del análisis lineal para el taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica (FICM), se concluye que la estructura cumple con los chequeos establecidos por la normativa Ecuatoriana NEC1-5, su periodo fundamental de vibración es de

0.317 seg siendo menor que el 30% del periodo obtenido por el método 1, en el chequeo de torsión la estructura presenta un buen comportamiento traslacional en los dos primeros modos de vibración siendo menor al 30% de la participación rotacional permitida y finalmente las derivas inelásticas son menores al 2% en la mayoría de pisos con un valor máximo de 0.58% en la dirección Y.

- Del análisis lineal para el taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial (FISEI), se concluye que la estructura cumple con los chequeos establecidos por la normativa Ecuatoriana NEC1-5, su periodo fundamental de vibración es de 0.292 seg siendo menor que el 30% del periodo obtenido por el método 1, en el chequeo de torsión la estructura presenta un buen comportamiento traslacional en los dos primeros modos de vibración siendo menor al 30% de la participación rotacional permitida y finalmente las derivas inelásticas son menores al 2% en la mayoría de pisos con un valor máximo de 0.61 % en la dirección Y.
- Del análisis estático no lineal para los talleres de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica (FICM) y de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial (FISEI), se obtuvo la curva de capacidad para las dos direcciones de análisis y el punto de desempeño, concluyendo que los dos talleres cumplen con los niveles de amenaza según el Comité Visión 2000, ya que para el sismo raro y muy raro llegan a un nivel de desempeño operacional.
- Se determino el dimensionamiento del aislador elastomérico con núcleo de plomo LRB con las especificaciones de la noma ASCE 7-16 obteniendo las propiedades del aislador del catálogo del proveedor Dynamic Isolation Systems con las siguientes dimensiones diámetro de la goma de 520 mm, diámetro del núcleo de plomo de 90 mm, espesor de la goma de 120 mm y el espesor de cada capa de goma de 5 mm.
- La estructura con aislador LRB (Elastomérico con núcleo de plomo) se incrementó el periodo a comparación de la estructura empotrada, para el Taller FICM con un periodo aislado de 2.824 seg y el Taller FISEI con un valor de 2.798 seg, por lo que los aisladores son capaces de disminuir la demanda sísmica, con cual es posible diseñar estructuras elásticas que ya no requieren incursionar en el rango inelástico.
- Se verifica las derivas de piso de las dos estructuras, concluyendo que para el Taller FICM con un sismo de diseño se redujo un 64% a comparación de la estructura empotrada y para un sismo máximo considerado se redujo un 45%, mientras para

el Taller FISEI se obtuvo una reducción del 69% para un sismo de diseño y un 58% para un sismo máximo.

- Con la incorporación de aisladores sísmicos se obtuvo menores desplazamientos horizontales de entrepiso, concluyendo que las estructuras tienen mayor capacidad de disipación de energía. Para el Taller FICM, la estructura empotrada presentaba un desplazamiento máximo para un sismo de diseño de 1.162 cm, para la estructura con base fija se redujo un 50.76% con un desplazamiento de 0.572 cm. Mientras que para el taller FISEI presenta para la estructura empotrada un valor de 1.294 cm, y con la implantación de aisladores se reduce un 63.49% con un valor de 0.473 cm.
- Los valores de cortante basal para un sismo de diseño de la estructura con aislación LRB para el Taller FICM se obtuvo un valor de 62.23 Ton con un porcentaje de reducción del 72.82% con respecto a la estructura empotrada que dio valor de 228.942 Ton. Mientras que para el Taller FISEI, la estructura aislada dio un valor de 63.188 Ton con una reducción del 74.22% a comparación de la estructura empotrada con un valor de 245.10; generando una menor demanda de elementos estructurales, manteniéndose dentro del rango elástico.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda para estructuras esenciales con zonas de alta sismicidad realizar un diseño que después de un sismo mantengan su funcionalidad y operatividad debido a la importancia de la misma.
- Para el diseño de una estructura con aisladores sísmicos, tomar en cuenta el diseño arquitectónico el cual debe considerar la idea de aisladores en la base con sus características geométricas en planta y elevación, con el objetivo de tener una mejor distribución de ambientes y columnas que sirvan de apoyo para los aisladores.
- Realizar investigaciones debido a la importancia de los elementos antisísmico que permiten que las estructuras presenten un mejor desempeño sísmico, obteniendo mayores opciones de diseño y construcción.
- Se recomienda tener muy en cuenta los datos que se ingresa a los programas ya que un error puede generar mucha diferencia con los resultados que se espera.

- Se recomienda hacer un estudio de costo beneficio de la inclusión de aisladores sísmicos en proyectos futuros debido al costo que implica diseñar con aisladores o cualquier tipo de elemento sismo resistente ya que en el país no se desarrolla este campo de construcción.

5.3. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Instituto Geofísico - EPN, “Cuatro años después del terremoto de Pedernales: un testimonio sobre el peligro sísmico en el Ecuador,” Apr. 16, 2020. <https://www.igepn.edu.ec/interactuamos-con-usted/1810-cuatro-anos-despues-del-terremoto-de-pedernales-un-testimonio-sobre-el-peligro-sismico-en-el-ecuador> (accessed Feb. 21, 2022).
- [2] R. Aguiar and E. Pazmiño, “Detalles constructivos debido a los aisladores sísmicos en las construcciones de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, en Ecuador,” *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, vol. 21, pp. 217–256, 2016.
- [3] Federal Emergency Management Agency, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440 FEMA nehrp*. 2005.
- [4] F. J. Crisafulli, *Diseño sismorresistente de construcciones de Acero*, Quinta. Mendoza: Asociación Latinoamericana del Acero, 2018.
- [5] S. Arango and M. Duque, “Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño estructural de una estantería metálica,” *Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquia*, no. 1794–1237, pp. 139–154, Dec. 2009, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/41816267>
- [6] O. González-Cueto and M. Herrera Suárez, “Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos,” *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 22, no. 3, pp. 75–80, Sep. 2013.
- [7] M. Bakaleiko, F. Detke, J. Duarte, and R. Hugo Orlando, “Técnicas de simulación numérica para estructuras de hormigón armado,” *Investigación Desarrollo Tecnológico*, [Online]. Available: www.fio.unam.edu.ar.
- [8] C. Aguirre and J. Carvajal Parra, “Diseño de edificios de acero estructurados en base a marcos rígidos especiales,” *Departamento de Obras Civiles*.
- [9] Applied Technology Council, *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, vol. 1. California: Seismic Safety Commission, 1996.

- [10] R. Aguiar and D. Mora, “Análisis sísmico de gradas con tres modelos mediante los métodos: espectral y del espectro de capacidad, que sirve de acceso a una estructura con aisladores sísmicos,” *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 32, no. 3, pp. 113–130, Sep. 2017.
- [11] R. Bonett and L. Pujades, “Vulnerabilidad y riesgo sísmico de Edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada,” Barcelona, 2003.
- [12] Norma Ecuatoriana de la Construcción, *Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente*. 2014.
- [13] C. Navarro and J. Fernández, “Desempeño sísmico de un edificio aporticado de seis pisos diseñado con las normas peruanas de edificaciones,” Lima, 2006.
- [14] H. Bonilla, “Determinación del desempeño sísmico para edificios en pórticos de concreto reforzado diseñados bajo la norma de diseño sísmo resistente,” Santiago de Cali, 2017.
- [15] G. A. Orellana Román and J. L. Parra Mora, “Evaluación de desempeño sísmico de un edificio esencial aporticado de hormigón armado según la norma Ecuatoriana de Contrucción (NEC-SE-RE, 2015),” Cuenca, 2017.
- [16] C. Genatios and M. Lafuente, *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. Caracas, 2016.
- [17] Corporación de Desarrollo Tecnológico - Cámara Chilena de la Construcción, *Protección Sísmica de Estructuras. Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía*, 29th ed., vol. 29. Santiago de Chile, 2011. [Online]. Available: www.cdt.cl
- [18] R. Meza and E. Sánchez, “Guía de diseño sísmico de aisladores elastoméricos y de fricción para la republica de Nicaragua,” 2010.
- [19] R. López and C. Trujillo, “Aplicación y selección de ensayos no destructivos para la evaluación de uniones soldadas,” *Scientia et Technica Año XVI*, vol. 48, Aug. 2011.
- [20] A. Canga and C. Beltrán, “Control de Calidad en la Soldadura de la Estructura Metálica del Terminal de Transporte Terrestre del Cantón Gualaceo de la Provincia del Azuay,” Cuenca, 2019.

- [21] F. Carrión, M. Lomelí, J. Quintana, and M. Martínez, “La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes,” Sanfandila: Publicación Técnica No. 231, 2003.
- [22] D. Castro, “Diseño de procedimientos radiográfico y tintas penetrantes para control de calidad de las soldaduras en las construcciones de estaciones de bombeo de petróleo,” Quito, 2015.
- [23] B. Cerón, “Control de calidad de soldaduras industriales mediante ensayos no destructivos (END),” Ayacucho, 2019.