

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

## **ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE CORTE DE PLACAS DE ACERO RIGIDIZADAS ANTE CARGAS CÍCLICAS**

**TRABAJO TECNICO-EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS**

**CARLOS LUIS GALLEGOS FLORES**

**carlosgf\_68@outlook.es**

**DIRECTOR: ING. DR. LUIS TINERFE HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ**

**luis.hernandezr@epn.edu.ec**

**Quito, Noviembre 2022**

## **DECLARACIÓN**

Yo, **Carlos Luis Gallegos Flores**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



**Carlos Luis Gallegos Flores**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Carlos Luis Gallegos Flores, bajo mi supervisión.



---

**Ing. Dr. Luis Tinerfe Hernández Rodríguez**  
**Director del Proyecto**

## AGRADECIMIENTO

Antes de poder comenzar con mi expresión de agradecimiento a cada uno de los que fueron parte de este enorme logro, quiero justificar la razón por la cual lo estoy haciendo, ya que, en cada paso ejecutado durante el desarrollo de mi vida profesional, todo detalle que fue brindado de parte de quienes me ayudaron a caminar fue suficiente y necesario para poder cumplir con este reto.

He de indicar que fue un gran sentimiento de prestigio el momento de haber ingresado a esta gran institución que es la ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, nunca he de olvidar como fue sentirme adentro del campus observando cada instalación y comenzado, desde luego, por el teatro politécnico, donde se recibió a los nuevos estudiantes de donde yo formaba parte; también de aquel reto que fue estudiar en el curso de nivelación donde tuve la oportunidad de conocer a parte de quienes fueron mis compañeros de carrera y de sentir en carne propia la gran capacidad que reflejaban aquellos que fueron mis profesores en cada una de las materias impartidas. Desde luego, todo esto continuó cuando ingresé a la facultad para matricularme y comenzar con el primer nivel de estudio en donde compartí algunas materias con la carrera de ingeniería ambiental debido a los cupos, desde allí empecé a sentir la presión que conlleva estar al tanto de cada función y de saber prepararse para evitar cualquier inconveniente dentro de lo que representa avanzar no sólo en lo académico, sino también en lo profesional.

Cada nivel dentro de la carrera fue como encontrarse dentro de un torneo, donde cada uno de ellos representaba una dificultad mayor referente al anterior, no sólo en los conocimientos, sino también en lo social ya que los amigos vienen y van, y nunca se puede estar seguro de quienes verdaderamente te acompañarán, además de la ardua tarea de afrontar todos y cada uno de los requerimientos que cada ingeniero, en su exigencia académica, solicitaban cada vez con mayor rigurosidad el cumplimiento de demostrar que la materia impartida era asimilada por nosotros como estudiantes. Fue difícil en todos los aspectos, pues estar concentrado en los conocimientos impartidos depende mucho de nuestra capacidad mental para no dejarnos arrastrar por cualquier situación personal que pueda venir de quienes están compartiendo con nosotros la oportunidad de aprender estos conocimientos de gran responsabilidad, pues ataques y situaciones sociales siempre las vamos a tener en todo lugar, sin importar el motivo por el cual se haya realizado el encuentro social, pero jamás me quejaré de haber recibido esta gran experiencia de vida, pues la lucha sólo acaba de comenzar.

Es por esto que, en primer lugar le agradezco a Dios de Abraham que siempre me acompañó en cada uno de los momentos más difíciles que afronté en la entrega de todo mi potencial, para responder de manera satisfactoria todas las tareas que me ha presentado no sólo la carrera, sino también la vida pues siempre fueron evidentes sus milagros y su mano con todos los que él puso a mi lado en cada tarea que tenía que entregar; a raíz de esto puedo sentirme seguro de agradecer en segundo lugar a mi madre Carmen Amelia Flores Arias, pues siempre fue la fuente de mi energía ya que en todo momento me repetía que nunca debo decir que “no



puedo”, sino decir “si puedo” y siempre buscar una solución a todo aquello que parece imposible de solventar, además de haber sido mi sustento a lo largo de todo mi desarrollo como persona, de ser la persona que me sanaba en mis enfermedades, de haber buscado la manera de conseguir fondos para el hogar del que provengo, y de nunca haberme abandonado a pesar de mis bajones en cada situación; y en tercer lugar a mi padre Jorge Marcelo Gallegos Llerena, pues aunque tuvo sus defectos en mi desarrollo, estuvo presente y me apoyó en no rendirme de dejar a un lado mi deseo de practicar el arte de manipular herramientas y de tener la técnica de saber cómo utilizar cada una de ellas interviniendo, como vulgarmente se dice: “metiendo mano” en cada desperfecto que se presentaba en cualquier objeto sea en la casa, en la moto, en el carro, etc., pues gracias a él de manera indirecta aprendí la importancia de relacionar la teoría con la práctica y de no tener miedo de hacerlo.

Les agradezco rotundamente a mis abuelos José Miguel Flores Pazmiño y María Esther Arias Aldás, pues ellos ocuparon un lugar muy importante en mi vida al no abandonar a mi madre en sus momentos difíciles y al no abandonarme como hijo y a mis hermanos por igual cuando tuvimos que pedir una ayuda por cuestiones académicas y de hogar, además de haber inculcado en mis hermanos y en mí la conciencia de saber de dónde provenimos y de convivir con la naturaleza, pues fueron quienes nos enseñaron a trabajar en la tierra para obtener el alimento de todos los días.

A mis tíos José Gonzalo Flores, Julio Vinicio Flores, Juan Guillermo Flores y Manuel Antonio Flores, y hermanos María Magdalena Gallegos, Pablo Miguel Gallegos, José Paúl Flores y Víctor David Flores quienes compartieron conmigo muchos de sus conocimientos en todo, pues cada uno reflejó sus preferencias y deseos de lograr algo en la vida trabajando en lo que más les gusta: luchar ante cualquier dificultad que se presenta en la vida y aplicar sus conocimientos en cada ámbito que necesita de sus fortalezas; gracias a ellos pude conocer un poco de todo como la mecánica, la computación, etc.

También les agradezco a aquellos que ya dejaron este mundo no antes sin haber dejado en mi bastante de su ayuda y moral: a mi bisabuela “Mamá Lola” quien nunca dejó de ser humilde, caritativa y de buen corazón para ayudar al más necesitado, y a mi tío Pablo Flores quien no dudó en decirle a mi madre que me deje cometer errores para aprender de ellos, pues sólo así estamos practicando lo que queremos hacer.

De todo corazón les agradezco al ingeniero M.Sc. Jorge Ricardo Vintimilla Jaramillo, pues fue quien vio de alguna manera en mí todo lo mencionado anteriormente, me propuso el desarrollar este tema puntualizando y creyendo que soy capaz de lograr algo muy grande, fue un gran profesor en cada materia que supo compartir con mis compañeros y conmigo durante la carrera y no cabe duda de ser un gran maestro, pues todo lo que a continuación vendrá en el desarrollo de éste tema fue posible gracias a su capacidad de visión y de entender a gran precisión lo que iba a suceder con los materiales utilizados en los modelos

propuestos en el estudio; y al ingeniero Dr. Luis Tinerfe Hernández Rodríguez quien continuó con la labor de guiarme en el avance de éste tema durante la ejecución de los ensayos, sus conocimientos complementaron fuertemente lo expresado por el ingeniero Jorge Vintimilla y me permitió tener plenitud y estar cubierto con los modelos practicados en el laboratorio.

Un agradecimiento muy fuerte al Centro de Investigación de la Vivienda recordando a sus integrantes: El Dr. Luis Hernández, los ingenieros Michael Gómez, Raúl Baquero y Roberto Dibujes pues me acompañaron en cada uno de los procesos de montaje de los modelos y me mantuvieron las puertas abiertas para continuar con los ensayos pertinentes al estudio.

Especial agradecimiento a los maestros Patricio Tipan y Gonzalo Maila, pues no dudaron en brindarme su mano de obra en la construcción de los modelos y poder convertir en una realidad éste estudio; sin su ayuda no habría podido ser posible el avance y logro de este documento que lo único que espera es ser un aporte más para el mundo de la ciencia y desarrollo tecnológico.

Agradecimiento y recordando a aquellas instituciones que estuvieron en mi crecimiento como persona: el Jardín Manuela Cañizares (Santa Isabel-Amaguaña), Escuela 31 de Mayo (Sangolquí) y Colegio Juan de Salinas (Sangolquí), instituciones donde aprendí gran parte de esa parte técnica que comienza de algo muy básico y hermoso: las maualidades.

Un gran agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional recordando a algunos de sus integrantes como lo fueron el Ing. Raúl Marcelo Gallegos, Ing. Edgar Haro, Ing. Alejandro Camacho, Ing. Mirtha Morales, Glenda Viñamagua, Ing. Cesar Terán, Ing. Carlos León Calvache, Ing. Daza Washington, Ing. Jeiny Abad, Ing. Jenry Córdova, Ing. Vanessa Fierro, Ing. Carla Zuleta, Ing. Patricia Haro quienes fueron grandes referentes de mi desarrollo académico durante la carrera y nivelación, además de aquellos que fueron parte de este estudio.

*Carlos Gallegos*

## DEDICATORIA

De todo corazón, esta dedicatoria va dirigida a aquellos que ocuparon un lugar muy especial en cada momento de mi vida, pues a pesar de cualquier circunstancia que fuese lo suficiente como para “tirar la toalla” y dejar de creer en cada una de las ideas que salieran de mi pensamiento, no cedieron ante la tentación y siguieron formando parte de una robusta cimentación de la cual hoy me siento orgulloso de reflejar en la siguiente lista:

A Dios quien nunca nos abandona a pesar de cada instante en el que cometemos algún acto de ataque y traición hacia su integridad, recordando siempre en primer lugar su infinita misericordia hacia nuestra existencia.

A mi madre Carmen Amelia Flores por haberme dado fuerzas en cada momento de dificultad durante mi ardua lucha en este mundo lleno de incertidumbres, y por haber sido la fuente de mi criterio personal en todo lo que significa tener valores como: la dedicación, el respeto, la firmeza y fidelidad, la ayuda hacia nuestros semejantes, etc.

A mis abuelos José Miguel Flores y María Esther Arias quienes fueron mis segundos padres en cada momento de necesidad durante mi niñez, pues siempre velaron por fortalecerme mentalmente y prepararme para el mundo al que siempre nos enfrentamos una vez dejada “la casa”.

A mi hermano Pablo Miguel Gallegos por su buen corazón y ser fiel a cada una de las ideologías que mi madre inculcaba en nuestro aprendizaje personal, pues nunca negó la mano a quien lo necesitó en su momento.

A mi hermana María Magdalena Gallegos por haber sido quien me dio la guía para adentrarme en este mundo tan maravilloso de la construcción y por haber sido mi apoyo para adentrarme en la carrera cubriendo satisfactoriamente mis estudios de nivelación.

A mis hermanos José Paúl Flores y Víctor David Flores por su gran fuerza de carácter que supieron reflejar en cada momento de mi vida, no dejaron de ser ese ejemplo a seguir, pues siempre buscaban soluciones para salir adelante a pesar de todas las dificultades que nos presenta la vida.

A mi sobrino David Sebastián Armas por ser un muchacho de gran integridad y dedicación en su desarrollo intelectual y como persona, pues es capaz de demostrar responsabilidad y entrega en todo el apoyo que recibe de sus padres María Gallegos y Edwin Armas.

A mi cuñado Edwin Armas por ser un hombre ejemplar para su esposa, mi hermana María gallegos, y también por saber ser un gran apoyo ante cualquier circunstancia que han afrontado los dos a lo largo de su desarrollo como hogar.

A mi padre Jorge Marcelo Gallegos por permitirme practicar la técnica de la intervención profesional desde mi infancia en todo lo que corresponde reparaciones y montajes.

A mi tío Julio Vinicio Flores por haber sido mi inspiración y guía de aquella vocación que me fue revelada cuando era un niño, gracias a él pude encontrar y definir aquello que me gusta y deseaba ser de grande.

A mi difunta bisabuela “Mamá Lola” por haberme recibido incontables veces de mi niñez en su casa gustosa de darnos de comer a mis abuelos y a mi madre en cada visita a su hogar de Urcuquí.

A mi difunto tío Pablo Flores porque su mensaje siempre se mantuvo en mi cabeza y gracias a eso dejé de tener miedo en intentar aprender del mundo que nos rodea.

Al Ingeniero M.Sc. Jorge Ricardo Vintimilla por haberme recibido con los brazos abiertos y haber creído en mi capacidad para cumplir con este reto tan grande.

A los maestros Patricio Tipán y Gonzalo Maila por su gran demostración de coordinación, dedicación y solvencia ante las tareas involucradas dentro del trabajo que desempeñan.

A las instituciones Jardín Manuela Cañizares, Escuela 31 de Mayo y Colegio Juan de Salinas por haber estado en mi crecimiento no sólo personal y vital, sino también en lo profesional.

A la Escuela Politécnica Nacional por su gran capacidad intelectual y profesional de la cual me ha permitido ser parte durante mi vida estudiantil en la carrera de Ingeniería Civil, pues ahora tengo el gusto de haber adquirido el conocimiento de esta rama tan importante en el desarrollo de la humanidad.

*Carlos Gallegos*

# CONTENIDO

<b>DECLARACIÓN</b> .....	<b>I</b>
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>II</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>III</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>VI</b>
<b>CONTENIDO</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>XXV</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XXX</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XXXII</b>
<b>PRESENTACIÓN</b> .....	<b>XXXIV</b>
<b>CAPITULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3. OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	11
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
<b>1.4. ALCANCE</b> .....	<b>11</b>
<b>1.5. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>13</b>
1.5.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA .....	13
1.5.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA .....	13
1.5.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA .....	13
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>15</b>
<b>FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>

<b>2.1. LOS EDIFICIOS Y SUS ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....</b>	<b>15</b>
2.1.1. PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES: DEFINICIONES.....	18
2.1.2. LOS MUROS DE CORTE Y SU IMPORTANCIA EN LA CONSTRUCCIÓN.....	19
<b>2.2. EL ACERO EN LA CONSTRUCCIÓN.....</b>	<b>21</b>
2.2.1. LOS PERFILES DE ACERO.....	23
2.2.2. LAS PLACAS DE ACERO Y SU TEORÍA.....	26
2.2.3. LA ESBELTEZ: PROBLEMAS CON EL ACERO (CONTINUACIÓN A LA TEORÍA DE PLACAS).....	29
<b>2.3. MUROS DE CORTE DE PLACAS DE ACERO (SPSW).....</b>	<b>33</b>
2.3.1. DEFINICIÓN DE MUROS SPSW.....	35
2.3.2. MODELOS DE MUROS SPSW.....	36
<b>2.4. CONECCIONES ENTRE ELEMENTOS DE ACERO.....</b>	<b>38</b>
2.4.1. CONEXIONES EMPERNADAS.....	39
2.4.2. CONEXIONES SOLDADAS.....	41
<b>2.5. LA SUELDA EN EL ACERO.....</b>	<b>42</b>
2.5.1. TÉCNICAS DE SOLDADO.....	43
2.5.2. NORMAS PARA LA SOLDADURA EN ACERO.....	46
2.5.3. PROPIEDADES DE LA SUELDA EMPLEADA.....	49
2.5.3.1. Características del Electrodo.....	49
2.5.3.2. Equipo de Suelta.....	51
<b>2.6. LOS SISMOS Y ENSAYOS DE CARGA CÍCLICA.....</b>	<b>52</b>
2.6.1. DEFINICIÓN DE SISMO.....	53
2.6.2. LOS ENSAYOS DE CARGA CÍCLICA.....	54
2.6.3. CURVAS FUERZA-DEFORMACIÓN.....	55
2.6.4. CURVAS DE HISTÉRESIS.....	57
2.6.5. NORMAS PARA EL ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS.....	59
 <b>CAPITULO III.....</b>	 <b>63</b>
 <b>METODOLOGÍA.....</b>	 <b>63</b>
 <b>3.1. ELEMENTOS DEL MURO: PROPIEDADES QUÍMICAS, GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS.....</b>	 <b>63</b>
3.1.1. ATIESADORES.....	65
3.1.2. PLACA.....	66
3.1.3. ELEMENTOS DE BORDE.....	70
3.1.3.1. Vigas (Horizontal Beam Elements HBE).....	70
3.1.3.2. Columnas (Vertical Beam Elements VBE).....	72
<b>3.2. DISEÑO DEL MURO DE CORTE SPSW MODELO.....</b>	<b>75</b>
3.2.1. NORMAS AISC 341-16 Y 358-16.....	75
3.2.2. APORTES A LAS ECUACIONES POR LAS CONDICIONES DE APOYO Y OTROS.....	80
3.2.3. CÁLCULO DEL MURO SPSW RIGIDIZADO.....	99

3.2.3.1. Inicio.....	101
3.2.3.2. Datos.....	101
3.2.3.3. Cálculo de la resistencia al corte de la placa .....	101
3.2.3.4. Cálculo de columnas.....	102
3.2.3.5. Análisis de la placa .....	104
3.2.3.6. Diseño y análisis de la placa con atiesadores.....	105
3.2.3.7. Cálculo del aporte de los rigidizadores al cortante.....	107
3.2.3.8. Algoritmo “Factkplaca.m” .....	107
3.2.4. CÁLCULO DE LAS DEFORMACIONES DEL MURO SPSW RIGIDIZADO.....	111
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>116</b>
<b>MUROS SPSW RIGIDIZADOS: MONTAJE DE MODELOS FÍSICOS Y ENSAYO .....</b>	<b>116</b>
<b>4.1. CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS SPSW.....</b>	<b>116</b>
4.1.1. ARMADO DE LOS MÓDULOS.....	117
4.1.2. PREPARACIÓN DE LA CIMENTACIÓN.....	121
4.1.3. MONTAJE DE LOS MUROS EN LA ZONA DE ENSAYO .....	125
<b>4.2. EXTRACCIÓN DE PROBETAS DE MATERIALES PRINCIPALES .....</b>	<b>129</b>
<b>4.3. ENSAYO DE LOS MUROS SPSW RIGIDIZADOS .....</b>	<b>130</b>
<b>4.4. ENSAYO DEL PÓRTICO Y MURO SPSW NO RIGIDIZADO .....</b>	<b>140</b>
<b>4.5. ENSAYO DE PROBETAS DE ACERO .....</b>	<b>145</b>
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>148</b>
<b>ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE RESULTADOS.....</b>	<b>148</b>
<b>5.1. DISEÑO PRELIMINAR DEL MURO SPSW RIGIDIZADO .....</b>	<b>148</b>
5.1.1. CÁLCULO EN MATLAB .....	148
5.1.2. MODELAMIENTO EN ANSYS .....	153
<b>5.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EJECUTADOS.....</b>	<b>156</b>
5.2.1. TABULACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES.....	156
5.2.1.1. Ensayo de muros .....	157
5.2.1.2. Ensayo de probetas de acero.....	169
5.2.2. DESARROLLO DE GRÁFICAS.....	171
5.2.2.1. Ensayo de muros .....	172
5.2.2.2. Ensayo de probetas de acero.....	180
<b>5.3. COMPORTAMIENTO DE LOS MUROS EN EL ENSAYO .....</b>	<b>183</b>
5.3.1. MUROS SPSW RIGIDIZADOS .....	183
5.3.2. PÓRTICO .....	187
5.3.3. MURO SPSW BASE.....	188

<b>5.4. CORRECCIÓN DEL MODELO ANTE LOS ENSAYOS .....</b>	<b>190</b>
5.4.1. CÁLCULO EN MATLAB .....	190
5.4.2. MODELAMIENTO EN ANSYS .....	193
<b>5.5. COMPARACIONES .....</b>	<b>200</b>
5.5.1. MURO SPSW RIGIDIZADO: EVALUACIÓN ENTRE MUESTRAS .....	200
5.5.2. MODELO PRELIMINAR VS MODELO CORREGIDO.....	206
5.5.3. MURO RIGIDIZADO VS MURO BASE VS PÓRTICO.....	208
5.5.4. MODELOS FÍSICOS VS MODELOS MATEMÁTICOS .....	215
5.5.5. MURO SPSW RIGIDIZADO (POPUESTO) VS OTRAS ALTERNATIVAS .....	220
 <b>CAPÍTULO VI.....</b>	 <b>231</b>
 <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	 <b>231</b>
 6.1. CONCLUSIONES.....	 231
6.2. RECOMENDACIONES .....	234
 BIBLIOGRAFÍA .....	 237
 ANEXOS .....	 242
 ANEXO 1.....	 243
 INFORMES DE LOS MATERIALES ENSAYADOS .....	 243
 ANEXO 2.....	 250
 TABLAS DE DATOS DE LAS MUESTRAS DE ACERO .....	 250
 ANEXO 3.....	 256
 CURVAS DE LOS MUROS Y EL PÓRTICO (EN TONELADAS Y CENTÍMETROS).....	 256
 ANEXO 4.....	 266
 FOTOS DE LABORATORIO DE LOS MUROS Y EL PÓRTICO.....	 266
 ANEXO 5.....	 280
 DEFINICIÓN DE VARIABLES Y SIGLAS .....	 280



**ANEXO 6..... 287**

**PLANOS DEL MURO SPSW RIGIDIZADO ..... 287**

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> CURVA DE HISTÉRESIS (CARGA-DEFORMACIÓN) DEL MURO SPSW2. FUENTE: (LUBELL, PRION, VENTURA, & REZAI, 2000).	3
<b>FIGURA 2.</b> PATRÓN DE DEFORMACIÓN Y FLUENCIA DEL MURO SPSW2 LUEGO DE UN DESPLAZAMIENTO DE $6X\Delta Y$ . FUENTE: (LUBELL, PRION, VENTURA, & REZAI, 2000).	3
<b>FIGURA 3.</b> RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANALÍTICOS DE LOS MUROS (A) P, (B) CR Y (C) S2. FUENTE: (VIAN, BRUNEAU, TSAI, & LIN, SPECIAL PERFORATED STEEL PLATE SHEAR WALLS WITH REDUCED BEAM SECTION ANCHOR BEAMS. II: ANALYSIS AND DESIGN RECOMMENDATIONS, 2009).	5
<b>FIGURA 4.</b> IMÁGENES DE ESPECÍMENES: (A) P AL 3% DE DERIVA, (B) CR AL 4% DE DERIVA Y (C) S2 AL 3% DE DERIVA. FUENTE: (VIAN, BRUNEAU, TSAI, & LIN, SPECIAL PERFORATED STEEL PLATE SHEAR WALLS WITH REDUCED BEAM SECTION ANCHOR BEAMS. I: EXPERIMENTAL INVESTIGATION, 2009)	5
<b>FIGURA 5.</b> CURVAS DE HISTÉRESIS DE LOS DIFERENTES ESPECÍMENES ENSAYADOS. FUENTE: (ALAVI & NATEGHI, 2013).	6
<b>FIGURA 6.</b> ENERGÍA ACUMULADA, DISIPADA POR LOS ESPECÍMENES DURANTE LOS CICLOS DE ENSAYO. FUENTE: (ALAVI & NATEGHI, 2013).	7
<b>FIGURA 7.</b> (A) SPSW S1 AL 4,7% DE DERIVA, (B) SPSW S2 AL 2,0% DE DERIVA, (C) SPSW S3 AL 3,5% DE DERIVA, (D) SPSW2 AL 4,56% DE DERIVA. FUENTE: (ALAVI & NATEGHI, 2013).	7
<b>FIGURA 8.</b> MUROS DE ACERO-CONCRETO: (A) EDIFICIO DE DEPARTAMENTOS Y (B) EDIFICIO CORPORATIVO. FUENTE: (BENÍTEZ GUACHALÁ & VITAR SEMANATE, 2022).	9
<b>FIGURA 9.</b> EDIFICIO DE 15 PISOS CON: (A) MUROS SPSW Y (B) ARRIOSTRAMIENTOS DIAGONALES. FUENTE: (SALAZAR GUERRERO, 2015).	10

<b>FIGURA 10.</b> (A) "SALA DE TOROS", PERIGORD (FRANCIA). (B) "STONEHENGE" SALISBURY (REINO UNIDO). FUENTE: (EL HERALDO SLP, 2019), (GANTLEY, 2021).....	15
<b>FIGURA 11.</b> (A) PIRÁMIDES DE GUIZA (EGIPTO). (B) "ETEMENANKI" BABIL (IRAK). (C) PANTEÓN DE AGRIPA, ROMA (ITALIA). (D) PABELLÓN DE PORTUGAL, LISBOA (PORTUGAL). (E) BURJ KHALIFA, DUBÁI (EMIRATES ÁRABES UNIDOS). FUENTE: (LANGDON, CLÁSICOS DE ARQUITECTURA: PABELLÓN DE PORTUGAL EXPO'98 / ÁLVARO SIZA, 2015).....	16
<b>FIGURA 12.</b> "OBRA GRIS" DE UN EDIFICIO DE HORMIGÓN ARMADO EN CONSTRUCCIÓN. FUENTE: (MÚNERA, 2018).....	17
<b>FIGURA 13.</b> (A) MURO DE LADRILLO LUEGO DE UN SISMO. (B) MURO SPSW LUEGO DE UN ENSAYO CÍCLICO. FUENTE: (CICEPAC, 2022), (LUBELL, PRION, VENTURA, & REZAI, 2000). .....	20
<b>FIGURA 14.</b> (A) BIÓSFERA DE MONTREAL (CANADÁ). (B) CENTRO GEORGES POMPIDOU (FRANCIA). (C) CATEDRAL DE CRISTAL (ESTADOS UNIDOS). (D) TORRE BANCO DE CHINA (CHINA). (E) TORRE WILLIS (ESTADOS UNIDOS). FUENTE: (LANGDON, 2014). .....	22
<b>FIGURA 15.</b> PERFILES LAMINADOS DE ACERO. FUENTE: (MCCORMAC & CSERNAK, 2012). .....	24
<b>FIGURA 16.</b> PERFILES DE ACERO Y SU PROCEDENCIA. FUENTE: (ARANCIBIA, 2006).....	25
<b>FIGURA 17.</b> PERFIL TIPO TUBO RECTANGULAR DE ACERO FORMADO POR DOS PERFILES TIPO C CON ALAS RIGIDIZADAS, TAMBIÉN CONOCIDOS COMO "CORREAS". FUENTE: (DEL RÍO & BUSNELLI, 2022).....	26
<b>FIGURA 18.</b> CONDICIÓN GENERAL DE CARGA DE UNA PLACA TIPO "ALMA DE VIGA". FUENTE: (DE BUEN LÓPEZ DE HEREDIA, 2000).....	27
<b>FIGURA 19.</b> CURVA DE ENSAYO DEL ACERO. FUENTE (TIMOSHENKO, 1957). .....	28
<b>FIGURA 20.</b> CURVA DE ESFUERZOS VS LA RELACIÓN DE ESBELTEZ DE UNA COLUMNA. FUENTE: (BLEICH, 1952).....	32

<b>FIGURA 21.</b> (A) PLACA RIGIDIZADA. (B) COMPORTAMIENTO DE LA PLACA SIN RIGIDIZADOR (O DEFECTUOSO). (C) COMPORTAMIENTO DE LA PLACA CON UN RIGIDIZADOR ADECUADO. FUENTE: (DE BUEN LÓPEZ DE HEREDIA, 2000).....	33
<b>FIGURA 22.</b> FALLO DE UN EDIFICIO POR PISO BLANDO (DERIVAS EXCESIVAS EN LA PLANTA BAJA). FUENTE: (BONETT DÍAZ, 2003).....	34
<b>FIGURA 23.</b> EJEMPLO DE MUROS SPSW EN UN EDIFICIO EN CONSTRUCCIÓN. FUENTE: (CRISAFULLI, 2018).....	36
<b>FIGURA 24.</b> MUROS SPSW: (A) PLACA NORMAL, (B) PLACA PERFORADA, (C) PLACA CON RIGIDIZADORES DIAGONALES Y (D) PLACA CON RIGIDIZADOERES EN CUADRÍCULA. FUENTE: (VIAN, BRUNEAU, TSAI, & LIN, 2009), (ALAVI & NATEGHI, 2013).....	38
<b>FIGURA 25.</b> CONEXIONES: (A) EMPERNADAS Y (B) SOLDADAS. FUENTE: (KUANG, 2018).....	39
<b>FIGURA 26.</b> DISTINTAS CONFIGURACIONES DE CONEXIONES EMPERNADAS. FUENTE: (MCCORMAC & CSERNAK, 2012). .....	40
<b>FIGURA 27.</b> DISTINTAS CONFIGURACIONES DE CONEXIONES SOLDADAS. FUENTE: (MCCORMAC & CSERNAK, 2012). .....	42
<b>FIGURA 28.</b> SUELDA POR LÁSER (MUY UTILIZADO EN EL SECTOR AUTOMOTRIZ). FUENTE: (LÁSER COMERCIAL, 2020).....	43
<b>FIGURA 29.</b> SUELDA TIPO: (A) SMAW, (B) GTAW O TIG, Y (C) GMAW O MIG. FUENTE: (INDURA, 2022). .....	45
<b>FIGURA 30.</b> ENSAYO PARA SUELDA DE FILETE. FUENTE: (AMERICAN WELDING SOCIETY AWS, 1998).....	47
<b>FIGURA 31.</b> EQUIPO DE SEGURIDAD PARA EL SOLDADOR. FUENTE: (INDURA, 2007). .....	48
<b>FIGURA 32.</b> MÁQUINA SOLDADORA TIPO TRANSFORMADOR RECTIFICADOR. FUENTE: (INDURA, 2022).....	48
<b>FIGURA 33.</b> MAQUINA SOLDADORA CENTURY 230AMP 110-110. FUENTE: (PURPULE WAVE, 2011). .....	52
<b>FIGURA 34.</b> ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA. FUENTE: (SPIKERMANN, 2010). .....	53

<b>FIGURA 35.</b> MAPA DE ZONAS SÍSMICAS DEL ECUADOR, CON VALORES DE ACELERACIONES EN FUNCIÓN DE LA GRAVEDAD. FUENTE: (NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC, 2014).....	54
<b>FIGURA 36.</b> CURVAS DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA EN CONCRETO Y ACERO. FUENTE: (NILSON, 1999).....	56
<b>FIGURA 37.</b> EJEMPLOS DE CURVAS DE HISTÉRESIS CON SUS ENVOLVENTES PARA LOS MÉTODOS: (A) A, (B) B Y (C) C. FUENTE: (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM, 2019). ....	58
<b>FIGURA 38.</b> ESQUEMA DE LA INSTRUMENTACIÓN PARA ENSAYOS CUASI-ESTÁTICOS Y MONITOREO. FUENTE: (FEMA, 2007). ....	59
<b>FIGURA 39.</b> GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL ÁNGULO DE LADOS IGUALES. FUENTE: (IMPORTACEROS, 2022).....	66
<b>FIGURA 40.</b> PROBETA PARA ENSAYO DE TENSIÓN: PLACA DE ACERO DE 1,4MM DE ESPESOR. FUENTE: (BENÍTEZ GUACHALÁ & VITAR SEMANATE, 2022).....	69
<b>FIGURA 41.</b> CORTE TRANSVERSAL DE UNA SECCIÓN TIPO IPE. FUENTE: (IMPORTACEROS, 2022).....	71
<b>FIGURA 42.</b> SECCIÓN DE VIGA REDUCIDA (RBS) PARA EL PERFIL TIPO IPE 140, DEFINIDO PARA EL MURO MODELO SPSW RIGIDIZADO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	72
<b>FIGURA 43.</b> SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN TUBO ESTRUCTURAL TIPO RECTANGULAR. FUENTE: (IMPORTACEROS, 2022). ....	74
<b>FIGURA 44.</b> ESQUEMA DE LA SECCIÓN REDUCIDA DE UNA VIGA (RBS) EN LA CONEXIÓN. FUENTE: (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION AISC, 2016) .....	78
<b>FIGURA 45.</b> NOMOGRAMA PARA DETERMINAR K EN COLUMNAS CON LADEO IMPEDIDO. FUENTE: (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION AISC, 2016). ....	84
<b>FIGURA 46.</b> NOMOGRAMA PARA DETERMINAR K EN COLUMNAS CON LADEO NO IMPEDIDO. FUENTE:	

(AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION AISC, 2016).....	85
<b>FIGURA 47.</b> RESUMEN DE VALORES DEL FACTOR DE PLACA “ $K_p$ ”. FUENTE: (DE BUEN LÓPEZ DE HEREDIA, 2000).....	90
<b>FIGURA 48.</b> ESQUEMA DE UN "RIGIDIZADOR DOBLE". FUENTE (DE BUEN LÓPEZ DE HEREDIA, 2000). ....	93
<b>FIGURA 49.</b> VIGA TIPO "I" DE ALMA RIGIDIZADA, SOMETIDA A UNA CARGA PUNTUAL EN SU EXTREMO LIBRE. FUENTE: (DE BUEN LÓPEZ DE HEREDIA, 2000). ....	95
<b>FIGURA 50.</b> DISTRIBUCIÓN DEL ESFUERZO DE TENSIÓN EN LOS ESPACIOS MARCADOS POR LOS RIGIDIZADORES. FUENTE: (DE BUEN LÓPEZ DE HEREDIA, 2000).....	96
<b>FIGURA 51.</b> MURO SPSW DE ALMA RIGIDIZADA, CON LAS FAJAS TRAZADAS PARA EL CÁLCULO DEL APORTE AL CORTANTE DEL MURO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS .....	98
<b>FIGURA 52.</b> GEOMETRÍA DESARROLLADA EN EL PROGRAMA ANSYS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	112
<b>FIGURA 53.</b> MODELO DEL MURO SPSW RIGIDIZADO EN ANSYS CON SUS CONDICIONES DE BORDE. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	113
<b>FIGURA 54.</b> MODELO DEL MURO SPSW RIGIDIZADO EN ANSYS CON LA MALLA DEFINIDA. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	114
<b>FIGURA 55.</b> ANÁLISIS DESARROLLADOS EN EL MODELO DEL MURO SPSW RIGIDIZADO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	114
<b>FIGURA 56.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO: DISEÑO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	116
<b>FIGURA 57.</b> MOLDEADO DE LAS SECCIONES RBS EN LAS VIGAS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	117
<b>FIGURA 58.</b> COLUMNAS DE LOS MUROS Y SUS RESPECTIVAS BASES. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	118

<b>FIGURA 59.</b> MONTAJE DE UNO DE LOS PÓRTICOS PARA LOS MUROS SPSW RIGIDIZADOS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	118
<b>FIGURA 60.</b> DISTRIBUCIÓN DE RIGIDIZADORES HORIZONTALES DE 1,20M DE LARGO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	119
<b>FIGURA 61.</b> DISTRIBUCIÓN DE RIGIDIZADORES VERTICALES DE 60CM CADA PIEZA. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	119
<b>FIGURA 62.</b> PANEL DE RIGIDIZADORES TERMINADO EN UNA CARA DEL MURO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	119
<b>FIGURA 63.</b> RÉPLICAS DEL MURO SPSW RIGIDIZADO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	120
<b>FIGURA 64.</b> PLACA BASE PARA LA CONEXIÓN DEL GATO HIDRÁULICO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	120
<b>FIGURA 65.</b> LOSA DE CIMENTACIÓN CON LOS APOYOS INSTALADOS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	121
<b>FIGURA 66.</b> POSICIONAMIENTO DE LA RÓTULA MECÁNICA. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	122
<b>FIGURA 67.</b> UBICACIÓN DE LOS AGUJEROS PARA LA INSTALACIÓN DE PERNOS DE ANCLAJE EN LA LOSA DE CIMENTACIÓN. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	122
<b>FIGURA 68.</b> PERFORADO DE LOS AGUJEROS PARA LA COLOCACIÓN DE LOS PERNOS DE ANCLAJE. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	122
<b>FIGURA 69.</b> PERNO DE ANCLAJE EXPANSIVO Y EPÓXICO UTILIZADOS EN LA CIMENTACIÓN. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	123
<b>FIGURA 70.</b> RÓTULA MECÁNICA SUJETADA CON LOS PERNOS DE ANCLAJE. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	123
<b>FIGURA 71.</b> CORTADO DE RESTOS ENCONTRADOS EN UN EMPOTRAMIENTO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	123

<b>FIGURA 72.</b> COLOCADO DE LA RÓTULA EN EL EMPOTRAMIENTO PREPARADO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	124
<b>FIGURA 73.</b> FIJACIÓN DEL APOYO EN EL EMPOTRAMIENTO MODIFICADO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	124
<b>FIGURA 74.</b> MURO COLOCADO EN LA CIMENTACIÓN. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	125
<b>FIGURA 75.</b> COMPROBACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DEL EMBOLO EN EL GATO HIDRÁULICO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	126
<b>FIGURA 76.</b> ACOPLÉ INSTALADO ENTRE LA CELDA DE CARGA DEL GATO HIDRÁULICO Y LA PLACA BASE PREVIAMENTE FIJADA EN LA COLUMNA. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	126
<b>FIGURA 77.</b> NIVELACIÓN DEL GATO HIDRÁULICO. FUENTE: (BENÍTEZ GUACHALÁ & VITAR SEMANATE, 2022).....	127
<b>FIGURA 78.</b> PREPARACIÓN DEL SOPORTE PARA LVDT'S. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	127
<b>FIGURA 79.</b> INSTALACIÓN TERMINADA DE UN MURO SPSW RIGIDIZADO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	128
<b>FIGURA 80.</b> TIRA SOBRENTE DE LA PLANCHA DE ACERO DE 1,4MM LUEGO DE LA EXTRACCIÓN DE LAS PROBETAS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	129
<b>FIGURA 81.</b> ALMA DE LA VIGA IPE 140 LUEGO DE LA EXTRACCIÓN DE LAS MUESTRAS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	129
<b>FIGURA 82.</b> PROBETA DE ACERO EXTRAÍDA DE LA SEPARACIÓN DE UNA DE LAS ALAS DEL ÁNGULO UTILIZADO COMO RIGIDIZADOR. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	130
<b>FIGURA 83.</b> MUESTRAS DE ACERO EXTRAÍDAS DEL ÁNGULO RIGIDIZADOR. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	130



<b>FIGURA 84.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO NÚMERO 1: ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS POR EL MÉTODO "C". FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	131
<b>FIGURA 85.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO NÚMERO 1 DURANTE EL ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	132
<b>FIGURA 86.</b> GRÁFICA DESARROLLADA POR EL EQUIPO DE ENSAYO DURANTE LA APLICACIÓN DE LAS CARGAS CÍCLICAS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	133
<b>FIGURA 87.</b> TABLA DE RECOLECCIÓN DE DATOS CORRESPONDIENTE AL ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS POR EL MÉTODO "C" FUENTE: (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM, 2019) .....	133
<b>FIGURA 88.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO NÚMERO 2: ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS POR EL MÉTODO "C". FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	134
<b>FIGURA 89.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO NÚMERO 2 DURANTE EL ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	135
<b>FIGURA 90.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO NÚMERO 3: ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS POR EL MÉTODO "C". FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	136
<b>FIGURA 91.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO NÚMERO 3 DURANTE EL ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	137
<b>FIGURA 92.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO NÚMERO 4: ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS POR EL MÉTODO "C". FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	138
<b>FIGURA 93.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO NÚMERO 4 DURANTE EL ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	139
<b>FIGURA 94.</b> REPRESENTACIÓN DE LAS DEFORMACIONES PRODUCIDAS POR EL ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS EN UN MURO DE CORTE. FUENTE: (VIAN, BRUNEAU, TSAI, & LIN, 2009). ....	140
<b>FIGURA 95.</b> MUESTRA NÚMERO 5 (PÓRTICO): ENSAYO MONOTÓNICO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	141

<b>FIGURA 96.</b> MUESTRA NÚMERO 5 (PÓRTICO) DURANTE EL ENSAYO MONOTÓNICO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	142
<b>FIGURA 97.</b> MUESTRA NÚMERO 6 (MURO SPSW): ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS POR EL MÉTODO "C". FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	143
<b>FIGURA 98.</b> MUESTRA NÚMERO 6 (MURO SPSW) DURANTE EL ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	144
<b>FIGURA 99.</b> PROBETAS DE ACERO ENTREGADAS AL LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	145
<b>FIGURA 100.</b> ESQUEMA DE ENSAYO A TRACCIÓN DE MUESTRAS DE ACERO. FUENTE: (TALLER INDUSTRIAL ALTEDA, 2022).....	146
<b>FIGURA 101.</b> RESTOS DE PROBETAS ENSAYADAS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	146
<b>FIGURA 102.</b> GRÁFICA DE LAS ECUACIONES PLANTEADAS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE PLACA. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	151
<b>FIGURA 103.</b> DEFORMACIONES DESARROLLADAS EN EL MURO POR EL ACERO REGISTRADO EN ANSYS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	154
<b>FIGURA 104.</b> PANDEO POR CORTE DE LA PLACA DE ACERO DEL MURO SPSW RIGIDIZADO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	155
<b>FIGURA 105.</b> MURO 1: CURVA DE HISTÉRESIS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	172
<b>FIGURA 106.</b> MURO 2: CURVA DE HISTÉRESIS FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	173
<b>FIGURA 107.</b> MURO 3: CURVA DE HISTÉRESIS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS ....	173
<b>FIGURA 108.</b> MURO 4: CURVA DE HISTÉRESIS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	174
<b>FIGURA 109.</b> MURO 6: CURVA DE HISTÉRESIS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	174
<b>FIGURA 110.</b> MURO 1: CURVA ENVOLVENTE. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	176

<b>FIGURA 111.</b> MURO 2: CURVA ENVOLVENTE. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	176
<b>FIGURA 112.</b> MURO 3: CURVA ENVOLVENTE. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	177
<b>FIGURA 113.</b> MURO 4: CURVA ENVOLVENTE. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	177
<b>FIGURA 114.</b> MURO 6: CURVA ENVOLVENTE. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	178
<b>FIGURA 115.</b> CURVA ENVOLVENTE PROMEDIO: MURO SPSW RIGIDIZADO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	178
<b>FIGURA 116.</b> PÓRTICO: CURVA CARGA-DESPLAZAMIENTO (MUESTRA 5). FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	179
<b>FIGURA 117.</b> MUESTRA 1: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	180
<b>FIGURA 118.</b> MUESTRA 2: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	180
<b>FIGURA 119.</b> MUESTRA 3: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	181
<b>FIGURA 120.</b> MUESTRA 4: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	181
<b>FIGURA 121.</b> MUESTRA 5: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	181
<b>FIGURA 122.</b> MUESTRA 6: CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	182
<b>FIGURA 123.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO LUEGO DEL ENSAYO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	184
<b>FIGURA 124.</b> PLACA SOMETIDA A ESFUERZOS CORTANTES EN SU PERÍMETRO. FUENTE: (DE BUEN LÓPEZ DE HEREDIA, 2000). ....	185

<b>FIGURA 125.</b> FALLA DE LA SOLDADURA EN EL MURO 3. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	186
<b>FIGURA 126.</b> ACABADO DE SUELDA EN EL MURO 3. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	186
<b>FIGURA 127.</b> MURO SPSW LUEGO DEL ENSAYO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	189
<b>FIGURA 128.</b> PANDEO DE LA PLACA DE ACERO LUEGO DEL ENSAYO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	189
<b>FIGURA 129.</b> FUERZA CORREGIDA EN EL MODELO DE ANSYS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	197
<b>FIGURA 130.</b> DEFORMACIONES CORREGIDAS EN ANSYS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	198
<b>FIGURA 131.</b> PANDEO CORREGIDO EN ANSYS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	199
<b>FIGURA 132.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO: COMPARACIÓN DE ENVOLVENTES ENTRE MUESTRAS. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS. ....	201
<b>FIGURA 133.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO: COMPARACIÓN DE ENVOLVENTES ENTRE EL MURO 3 VS PROMEDIO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	202
<b>FIGURA 134.</b> MURO SPSW RIGIDIZADO: COMPARACIÓN DE ENVOLVENTES ENTRE MUROS REPRESENTATIVOS VS PROMEDIO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	202
<b>FIGURA 135.</b> COMPARACIÓN DE ENVOLVENTES ENTRE LOS MUROS RIGIDIZADOS CON EL MURO NO RIGIDIZADO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	209
<b>FIGURA 136.</b> COMPARACIÓN DE ENVOLVENTES ENTRE MUROS DE REFERENCIA: MURO 3 VS MURO 6 VS PROMEDIO. FUENTE: ELABORADO POR CARLOS GALLEGOS.....	211
<b>FIGURA 137.</b> (A) FALLA LONGITUDINAL DEL ESPÉCIMEN CR. (B) FALLA DEL ESPÉCIMEN S2 EN LA SECCIÓN REDUCIDA DE LA VIGA INFERIOR. FUENTE: (VIAN, BRUNEAU, TSAI, & LIN, 2009). ....	221

<b>FIGURA 138.</b> MODELO MATEMÁTICO EN ANSYS DEL ESPÉCIMEN S2. FUENTE: (VIAN, BRUNEAU, TSAI, & LIN, 2009).....	222
<b>FIGURA 139.</b> PROPUESTA DE MURO COMPUESTO DE ACERO-CONCRETO. FUENTE: (BENÍTEZ GUACHALÁ & VITAR SEMANATE, 2022). .....	224
<b>FIGURA 140.</b> FALLAS PRESENTADAS EN LOS ELEMENTOS DE BORDE DEL MURO COMPUESTO 1. FUENTE: (BENÍTEZ GUACHALÁ & VITAR SEMANATE, 2022).....	225
<b>FIGURA 141.</b> FALLA DE LA COLUMNA EN LOS EMPOTRAMIENTOS DE LOS MUROS COMPUESTOS: (A) 2, (B) 3 Y (C) 4. FUENTE: (BENÍTEZ GUACHALÁ & VITAR SEMANATE, 2022).....	225
<b>FIGURA 142.</b> DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN EL MURO COMPUESTO: MODELO DE ANSYS. FUENTE: (BENÍTEZ GUACHALÁ & VITAR SEMANATE, 2022).....	226
<b>FIGURA 143.</b> FALLAS PRESENTADAS EN EL ALMA DE LOS MUROS COMPUESTOS. FUENTE: (BENÍTEZ GUACHALÁ & VITAR SEMANATE, 2022). .....	227
<b>FIGURA 144.</b> CURVA DE HISTÉRESIS DEL MURO COMPUESTO NÚMERO 3. FUENTE: (BENÍTEZ GUACHALÁ & VITAR SEMANATE, 2022). .....	228

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1</b> CLASIFICACIÓN DE ELECTRODOS (AMERICAN WELDING SOCIETY AWS, 1998).....	46
<b>TABLA 2</b> REQUERIMIENTOS DE TENSIÓN QUE DEBE PRESENTAR EL CORDÓN DE SUELDA TERMINADO (AMERICAN WELDING SOCIETY AWS, 1998).....	50
<b>TABLA 3</b> REQUERIMIENTOS DE IMPACTO PARA EL PÉNDULO DE CHARPY (AMERICAN WELDING SOCIETY AWS, 1998) .....	50
<b>TABLA 4</b> CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA SOLDADORA.....	51
<b>TABLA 5</b> MÉTODO DE ENSAYO A: AMPLITUDES DE CICLOS INICIALES (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM, 2019).....	60
<b>TABLA 6</b> MÉTODO DE ENSAYO B: AMPLITUDES DE LOS CICLOS INVERSOS (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM, 2019).....	61
<b>TABLA 7</b> MÉTODO DE ENSAYO C: AMPLITUD DE LOS CICLOS PRIMARIOS (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM, 2019).....	61
<b>TABLA 8</b> REQUISITOS QUÍMICOS (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM, 2019). .....	63
<b>TABLA 9</b> LÍMITE DE FLUENCIA Y RESISTENCIA A LA TENSIÓN DEL ACERO A36 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM, 2019).....	64
<b>TABLA 10</b> ESPECIFICACIONES DE MATERIALES AUXILIARES (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM, 2019). .....	64
<b>TABLA 11</b> COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AL CARBÓN NO RESULFURIZADO (SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS SAE, 2001) .....	65
<b>TABLA 12</b> CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL RIGIDIZADOR (IMPORTACEROS, 2022).....	66
<b>TABLA 13</b> COMPOSICIÓN QUÍMICA DE PLANCHAS DE ACERO SEGÚN SU GRADO DE SERVICIO (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD JIS, 2011). .....	67

<b>TABLA 14</b> ESFUERZO DE FLUENCIA, RESISTENCIA A LA TENSIÓN Y DEFORMACIÓN SEGÚN EL GRADO DE LA PLACA (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD JIS, 2011).....	68
<b>TABLA 15</b> DUREZA DE PLACAS "SIN TEMPLAR" Y "TEMPLADO ESTÁNDAR" SEGÚN: (A) ROCKWELL Y (B) VICKERS (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD JIS, 2011).....	68
<b>TABLA 16</b> RESISTENCIA A LA TENSIÓN Y DEFORMACIÓN DE PLACAS DE MATERIAL DURO (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD JIS, 2011). ....	69
<b>TABLA 17</b> DIMENSIONES ESTÁNDAR PARA LA PREPARACIÓN DE PROBETAS DE PLACAS DE ACERO (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM, 2021).....	69
<b>TABLA 18</b> PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE DISTINTOS PERFILES IPE (IMPORTACEROS, 2022). ....	71
<b>TABLA 19</b> COMPOSICIÓN QUÍMICA: REQUERIMIENTOS (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM, 2021).....	73
<b>TABLA 20</b> REQUERIMIENTOS DE TENSIÓN (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM, 2021).....	73
<b>TABLA 21</b> PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE ALGUNOS TUBOS RECTANGULARES (IMPORTACEROS, 2022). ....	74
<b>TABLA 22</b> RELACIÓN ANCHO-ESPELOR: ELEMENTOS EN COMPRESIÓN DE MIEMBROS SUJETOS A COMPRESIÓN AXIAL (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION AISC, 2016). ....	81
<b>TABLA 23</b> RELACIÓN ANCHO-ESPELOR: ELEMENTOS EN COMPRESIÓN DE MIEMBROS SUJETOS A FLEXIÓN (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION AISC, 2016). ....	82
<b>TABLA 24</b> MÁXIMAS RELACIONES ANCHO-ESPELOR PARA ELEMENTOS A COMPRESIÓN (NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN NEC, 2014). ....	83
<b>TABLA 25</b> LONGITUDES EFECTIVAS DE COLUMNAS (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION AISC, 2016). ....	84
<b>TABLA 26</b> VALORES MÍNIMOS DEL FACTOR DE PLACA "K <sub>P</sub> " (DE BUEN LÓPEZ DE HEREDIA, 2000). ....	89

<b>TABLA 27</b> DATOS INGRESADOS PARA EL DISEÑO DEL MURO SPSW RIGIDIZADO. ....	100
<b>TABLA 28</b> RELACIÓN DE VARIABLES CON CÓDIGOS INGRESADOS EN EL ALGORITMO DE CÁLCULO. ....	108
<b>TABLA 29</b> DATOS DEL ACERO INGRESADOS EN ANSYS .....	153
<b>TABLA 30</b> EJEMPLO DE DATOS RECOLECTADOS DURANTE EL ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS: MURO 1 (29/4/2022 12:19 - DATASOIL - CH1: 2019AFB006 CH2: LTD 500MM CH3: LTD 500MM CH4: LTD 500MM).....	158
<b>TABLA 31</b> MURO 1: FUERZAS PICO DE CADA CICLO DE ENSAYO.....	159
<b>TABLA 32</b> MURO 1: DEFORMACIONES PICO DE CADA CICLO DE ENSAYO.....	160
<b>TABLA 33</b> MURO 2: FUERZA PICO DE CADA CICLO DE ENSAYO.....	160
<b>TABLA 34</b> MURO 2: DEFORMACIONES PICO DE CADA CICLO DE ENSAYO.....	161
<b>TABLA 35</b> MURO 3: FUERZAS PICO DE CADA CICLO DE ENSAYO.....	161
<b>TABLA 36</b> MURO 3: DEFORMACIONES PICO DE CADA CICLO DE ENSAYO.....	162
<b>TABLA 37</b> MURO 4: FUERZAS PICO DE CADA CICLO DE ENSAYO.....	162
<b>TABLA 38</b> MURO 4: DEFORMACIONES PICO DE CADA CICLO DE ENSAYO.....	163
<b>TABLA 39</b> MURO 6: FUERZAS PICO DE CADA CICLO DE ENSAYO.....	163
<b>TABLA 40</b> MURO 6: DEFORMACIONES PICO DE CADA CICLO DE ENSAYO.....	164
<b>TABLA 41</b> ENVOLVENTES REPRESENTATIVAS DE LOS MUROS SPSW.....	165
<b>TABLA 42</b> CAPACIDAD DE ENERGÍA DE LOS MUROS SPSW. ....	166
<b>TABLA 43</b> ENVOLVENTE PROMEDIO DEL MURO SPSW RIGIDIZADO.....	167
<b>TABLA 44</b> CAPACIDAD DE ENERGÍA PROMEDIO DEL MURO SPSW RIGIDIZADO .....	167
<b>TABLA 45</b> EJEMPLO DE LECTURAS RECOGIDAS DE LA MUESTRA NÚMERO 5: PÓRTICO (3/5/2022 15:07 -	



DATASOIL - CH1: 2019AFB006 CH2: LTD 500MM CH3: LTD 500MM CH4: LTD 500MM).....	168
<b>TABLA 46</b> EJEMPLO DE VALORES OBTENIDOS DEL ENSAYO A TRACCIÓN.....	170
<b>TABLA 47</b> RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS DE ACERO ENSAYADAS .....	171
<b>TABLA 48</b> MATERIALES INGRESADOS PARA EL MODELO DE MURO SPSW RIGIDIZADO.....	194
<b>TABLA 49</b> PROPIEDADES DEL ACERO "STRUCTURAL STEEL" .....	195
<b>TABLA 50</b> PROPIEDADES DEL ACERO "STRUCTURAL STEEL 2" .....	195
<b>TABLA 51</b> PROPIEDADES DEL ACERO "STRUCTURAL STEEL 3" .....	196
<b>TABLA 52</b> PROPIEDADES DEL ACERO "STRUCTURAL STEEL 4" .....	196
<b>TABLA 53</b> COMPARACIÓN DE ENERGÍA ABSORBIDA ENTRE LOS MUROS 1, 2 Y 4 FRENTE AL MURO 3.....	203
<b>TABLA 54</b> COMPARACIÓN DE ENERGÍA ABSORBIDA ENTRE LOS MUROS 1, 2 Y 4 FRENTE AL PROMEDIO. ....	203
<b>TABLA 55</b> COMPARACIÓN DE ENERGÍA ABSORBIDA ENTRE LOS MUROS 2 Y 4 FRENTE AL MURO 1.....	204
<b>TABLA 56</b> COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS: MUROS 1, 2 Y 4 VS MURO 3.....	205
<b>TABLA 57</b> COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS: MUROS 1, 2 Y 4 VS PROMEDIO.....	205
<b>TABLA 58</b> COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS: MUROS 2 Y 4 VS MURO 1.....	205
<b>TABLA 59</b> COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS ENTRE RESULTADOS PRELIMINARES VS CORREGIDOS. ....	206
<b>TABLA 60</b> COMPARACIÓN DE DEFORMACIONES ENTRE RESULTADOS PRELIMINARES VS CORREGIDOS. ....	206
<b>TABLA 61</b> RESULTADO DE COLUMNAS: CÁLCULO PRELIMINAR VS CORREGIDO.....	207
<b>TABLA 62</b> COMPARACIÓN DE ENERGÍA DISIPADA POR CADA MURO RIGIDIZADO FRENTE AL MURO NO RIGIDIZADO.....	209
<b>TABLA 63</b> COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS: MUROS 1, 2 Y 4 VS MURO 6.....	210

<b>TABLA 64</b> COMPARACIÓN DE CAPACIDAD DE ENERGÍA ENTRE MUROS DE REFERENCIA. ....	212
<b>TABLA 65</b> COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS ENTRE MUROS DE REFERENCIA. ....	212
<b>TABLA 66</b> COMPARACIÓN DE ENERGÍA: MUROS REFERENCIA VS PÓRTICO. ....	214
<b>TABLA 67</b> COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS: MUROS REFERENCIA VS PÓRTICO. ....	214
<b>TABLA 68</b> COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS ENTRE VALORES PRELIMINARES VS ENSAYOS EJECUTADOS.....	216
<b>TABLA 69</b> COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS: RESULTADOS PRELIMINARES VS ENSAYOS EJECUTADOS.....	217
<b>TABLA 70</b> COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS ENTRE VALORE CORREGIDOS VS ENSAYOS EJECUTADOS. ....	218
<b>TABLA 71</b> COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS: RESULTADOS CORREGIDOS VS ENSAYOS EJECUTADOS.....	219
<b>TABLA 72</b> INDICADORES DE PRODUCTIVIDAD PARA LA SUELDA SMAW VS GMAW (MAZUERA ROBLEDO, SUAREZ GÓMEZ, & GIRALDO BARRADA, 2011).....	220
<b>TABLA 73</b> RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS MUROS SPSW DE PLACA PERFORADA. FUENTE: (VIAN, BRUNEAU, TSAI, & LIN, 2009). ....	222

## RESUMEN

El presente trabajo trata de los muros de corte de placa de acero más conocidos por sus siglas en inglés como muros SPSW, los cuales fueron desarrollados con el fin de generar una alternativa estructural de aporte sismorresistente al cálculo, diseño y construcción de edificios no sólo de configuración en acero, sino también de construcciones en hormigón armado.

Por el momento sólo se han estudiado muros de placa de acero sin el uso de rigidizadores en su interior, con reducciones en las esquinas de la placa, con perforaciones en el alma o con rigidizadores diagonales al pórtico, es así que el propósito de este estudio es el de evaluar el uso de rigidizadores en la placa de acero, con el fin de averiguar el aporte que entregan tanto en resistencia como en absorción de energía sísmica en referencia al muro de placa vacía, tomando en cuenta el aspecto económico de los elementos correspondientes.

Para este propósito se ha desarrollado un modelo tipo pórtico o marco, el cual lleva en el centro una placa de acero de 1,20m de base, 2,40m de alto y 1,4mm de espesor, donde se le ha añadido rigidizadores tipo ángulo L de 20X2mm repartidos en tres tiras tanto en vertical cada 60cm como en horizontal cada 30cm; las columnas son tubos rectangulares de 200X100X6mm y las vigas son perfiles IPE 140, a las cuales se les ha aplicado una reducción de sección (RBS). Este modelo ha sido replicado en cuatro módulos para la obtención de valores aproximados que puedan ratificar la certeza de los ensayos, adicionalmente se ha construido un marco sin placa para probar la respuesta de los elementos vigas y columnas, y un módulo sólo con placa para poder observar el aporte de los rigidizadores en la resistencia del modelo propuesto.

Previo al montaje, se probó la calidad de la suelda con electrodos de distinta numeración y regulación de la máquina de soldado por arco, comprobando en restos de placa los distintos amperajes para obtener un adecuado acabado que permita soportar las sollicitaciones de los ensayos, luego de esto se cortaron y prepararon los elementos a la medida para proceder a soldarlos entre ellos, procurando cumplir con requerimientos de geometría.

Los elementos utilizados en el muro son fabricados en acero A36 con sus respectivas variantes, se empleó una máquina de soldado por arco con alimentación de 110V-220V ajustada con bajos amperajes para los elementos delgados (grosos bajos) como la placa y los ángulos, y amperajes altos para los elementos gruesos como los tubos rectangulares y las vigas IPE, adicionalmente se usaron electrodos E6011 de 3/32" de grosor para los elementos delgados y electrodos E6013 de 1/8" de grosor para los elementos gruesos y soldaduras de alta sollicitación.

Para los ensayos, se utilizó el protocolo descrito en las normativas ASTM y FEMA (aplicación de cargas cíclicas, método C), donde se pudo obtener una gran cantidad de información gracias al uso de ensayos netamente cíclicos en las cuatro réplicas

del modelo, así mismo se ejecutó un ensayo cíclico en el muro sólo con placa y un ensayo monotónico para el marco de columnas y vigas.

Los resultados permitieron obtener una gran cantidad de información, puesto que tres de las cuatro muestras respondieron de una forma muy similar, se obtuvo un caso atípico donde fue notable la poca resistencia debido a una falla prematura por soldadura en la placa y los modelos alternos corroboraron el aporte del marco y de la placa por sí sola. Todo esto se pudo observar gracias a los valores entregados por los equipos de lectura que registran en las tablas correspondientes al método de ensayo.

Producto del ensayo, se obtuvieron las curvas de histéresis que demuestran el rango lineal, no lineal, la energía del modelo y la degradación de la rigidez de las muestras, donde al comparar las curvas obtenidas, se observa gran aporte del uso de rigidizadores en la placa del muro; también se puede observar la importancia de verificar la calidad del acabado de suelda, pues ocupa un papel muy importante en la transmisión de los esfuerzos desde el marco hacia la placa y los ángulos atiesadores, esto puede llevar a fallas prematuras en los elementos.

## ABSTRACT

The present studio is about steel plate shear walls better known by its acronym as "SPSW" walls, which were developed in order to generate a structural alternative of earthquake resistant contribution to the calculation, design and assembly of buildings not only in steel configurations, but also in reinforced concrete constructions.

By the moment only steel plate shear walls have been studied without stiffeners on wall's soul, with reductions in the corners of the plate, with perforations on it or with diagonal stiffeners to the frame, so the purpose of this study is to evaluate the use of stiffeners on the steel plate in order to find out the contribution they deliver both in resistance and in absorption of seismic energy in reference to the SPSW base form, taking into account the economic appearance of the corresponding elements.

For this, a frame type model has been developed, which has in the center a steel plate of 1.20m base, 2.40m high and 1.4mm thick as the wall's soul, where it has welded L-angle stiffeners of 20x2mm distributed in three strips both vertically every 60cm and horizontally every 30cm; columns are rectangular tubes of 200x100x6mm, and beams are IPE 140 profiles to which a reduced beam section (RBS) has been applied. This model has been replicated in four modules to obtain approximate values that can ratify the certainty of the test, additionally a frame without a steel plate has been built to test the response of the beams and columns elements, and a SPSW base form module to observe the contribution of the stiffeners in the resistance of the proposed model.

Prior to assembly, weld quality was tested with electrodes of different numbering and adjustment of the arc welding machine, checking in plate remains the different amperages to obtain an adequate finish that allows to withstand the stresses of the test, after this the elements were cut and prepared to weld them, respecting the dimensions of the developed design to meet wall geometry requirements.

The wall elements are made of A36 steel with their variants; an arc welding machine with 110V-220V power supply was adjusted with low amperages for thin elements (low thickness of steel) such as the steel plate and angles, and high amperages for thick elements such as rectangular tubes an IPE beams, additionally 3/32" thick E6011 electrodes were used for the thin elements and 1/8" thick E6013 electrodes for the thick elements and high-demand welds.

For the tests, the protocol described in the ASTM and FEMA regulations (application of cyclic loads, method C) was applied, where a large amount of information could be obtained due to the use of purely cyclic tests in the four replicas of the model, as well as a cyclic test was executed on the wall only with plate and a monotonic test for the frame of columns and beams.

The results allowed to obtain a large amount of information, since three of the four samples responded in a very similar way, an atypical case was obtained where low resistance was remarkable due to a premature failure by welding in the plate and

the other models corroborated the contribution of the frame and the plate alone. All this could be observed thanks to the values delivered by the reading equipment that are recorded in tables corresponding to the test method.

As a result of the test, the hysteresis curves were obtained that demonstrate the linear and non-linear range, the model energy and the degradation of the samples rigidity, where when comparing the curves obtained, a great contribution due to the use of stiffeners in the wall plate is observed; the importance of verifying the quality of the weld finish can also be observed, as it occupies a very important role in the transmission of stresses from the frame to the steel plate and the stiffening angles, this can lead to premature failures in the elements.

# PRESENTACIÓN

El contenido de este documento está enfocado en describir los muros de corte de placas de acero SPSW y sus distintas variantes, su desarrollo a lo largo de la historia, el estado del arte respecto a los estudios encontrados, definiciones y conceptos básicos de materiales, ecuaciones, normativas, etc., tablas y gráficas representativas, explicación de la metodología empleada en el desarrollo de los modelos, descripción del desarrollo de los ensayos para obtención de resultados y presentación de las conclusiones obtenidas referentes a los resultados de las pruebas de laboratorio; para esto, cada capítulo que viene a continuación consta de la siguiente información:

**Capítulo 1 (Generalidades):** Contiene las generalidades del presente estudio, tales como una breve introducción, antecedentes del tema, los objetivos de desarrollarlo, el alcance que se desea obtener y la justificación de ejecutar este aporte.

**Capítulo 2 (Fundamento Teórico):** Trata de algunas definiciones y conceptos básicos e importantes como los muros de corte SPSW, los elementos estructurales en una edificación, el acero como un material de construcción, las conexiones entre elementos constitutivos, la suelda, el uso de secciones reducidas RBS en vigas, los sismos y las cargas cíclicas.

**Capítulo 3 (Metodología y Montaje):** Se explica el procedimiento efectuado para el cálculo y diseño del modelo, las propiedades físicas y mecánicas de los materiales empleados, las pruebas para la elección y preparación del trabajo de suelda, el montaje de los modelos y preparación de los equipos para la ejecución de los ensayos.

**Capítulo 4 (Ejecución de Ensayos):** Se describe el procedimiento realizado para la ejecución de los ensayos pertinentes, el montaje y desmontaje de los muros, la toma de valores a través de las tablas y gráficas presentadas por el equipo de lectura, y las fallas presentadas ante el sometimiento de los muros a las cargas de las máquinas.

**Capítulo 5 (Análisis de Resultados):** Se habla del tratamiento de los resultados obtenidos en los ensayos, se analiza las curvas de histéresis y esfuerzo-deformación en el caso del monotónico, se comparan los modelos en base a los análisis realizados, se trata de las diferencias encontradas en los modelos y de los muros rigidizados en base a su comportamiento.

**Capítulo 6 (Conclusiones y Recomendaciones):** Contempla todo lo que son las conclusiones de los ensayos ejecutados en concordancia a los objetivos que se deseaban conseguir; adicionalmente se incluyen aquellas que complementan ciertos aspectos observados en el estudio.

# CAPITULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Los Muros de Corte de Placa de Acero SPSW son elementos estructurales desarrollados con el fin de crear una alternativa de aporte a la resistencia de edificios, de los cuales existen varios modelos dependiendo de la manera en que se desee absorber energía proveniente de los fenómenos naturales y de la capacidad económica de la entidad responsable del proyecto, además del servicio al que se destine el funcionamiento de la obra terminada.

Este tipo de muros llevan algunos años de desarrollo, donde se ha evaluado la calidad y aporte que genera colocar una placa de acero en vez de paredes de bloque o arriostramientos diagonales en la configuración aporticada de columnas y vigas (Bruneau, 2012), encontrándose primero en edificaciones construidas en acero debido a la relación directa por el material involucrado, pero con el avance de los años se ha ido extendiendo su uso a edificios levantados en hormigón armado, para lo cual existen redacciones donde se explica cómo se puede implementar este elemento estructural con columnas y vigas fundidas en hormigón (Totter, Torrisi, & Crisafulli, 2017).

En la actualidad, los modelos de muros más conocidos y estudiados han sido los de placa o panel de acero completo, con placas perforadas en las esquinas, con perforaciones en la placa y muros compuestos de acero-concreto, donde la placa va embebida en el muro de concreto, además de otras alternativas de reforzamiento estructural (Bruneau, 2012), pero con el desarrollo de la teoría de placas, se ha logrado evaluar el soporte del acero ante solicitaciones de compresión uniforme, no uniforme y solicitaciones de cortante, definiendo y teorizando la falla de las placas por pandeo que es un fenómeno muy recurrente en todo tipo de elemento estructural de acero, por la configuración geométrica de los distintos tipos de perfiles existentes en el mundo (De Buen López De Heredia, 2000).

Es bien conocido que todo elemento estructural de acero se puede descomponer en un arreglo de placas, ya que ninguno se constituye como un elemento completamente sólido, puesto que también no es necesario utilizar una configuración de elemento completamente macizo y esto gracias a las grandes ventajas que representan las propiedades del acero frente a otros materiales como es el hormigón, donde es necesario que los elementos se conviertan en piezas completamente macizas (McCormac & Csernak, 2012). El problema de este arreglo es que, luego de solicitarse la pieza por presencia de una fuerza externa, los perfiles suelen desarrollar fallas prematuras por pandeo en su composición geométrica (McCormac & Csernak, 2012), lo cual ha llevado a que sea necesario evaluar los lados de los perfiles considerándolos como placas individuales; es así que el estudio ha permitido implementar en la teoría el uso de rigidizadores que reducen la tendencia del pandeo de un lateral en cualquier tipo de elemento estructural, el



caso más común de este problema es el perfil tipo I, que suele presentar fallas por pandeo tanto en las alas como en el alma (De Buen López De Heredia, 2000).

Hasta el momento los estudios han abarcado el uso de rigidizadores en el alma de vigas y columnas tipo I por ser de uso común, pero gracias a que la teoría de placas ha sido desarrollada como un estudio general bidimensional (plano), es posible llevar tranquilamente esta teoría al uso de rigidizadores en las placas utilizadas de los muros SPSW, ya que es común esta falla o deformaciones de pandeo cuando las vigas y columnas transmiten la carga a la placa o panel interno (De Buen López De Heredia, 2000).

Debido a las evaluaciones y estudios realizados en muros modelados sólo con el uso de una placa, con placas perforadas y con compuestos de acero-concreto (placa de acero embebida en el concreto), los cuales han presentado grandes resultados dentro del propósito de mejorar la resistencia de una estructura, el uso de rigidizadores en la placa de acero de un muro SPSW es un tema que ha permanecido dormido dentro de la investigación estructural (Crisafulli, 2018).

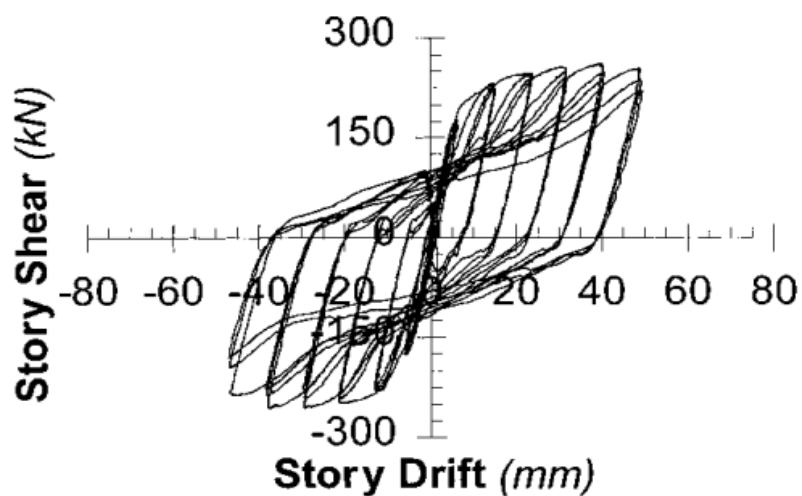
Por tal motivo, el presente estudio ha sido desarrollado con el fin de evaluar el aporte de resistencia y absorción de energía que brinda el implementar rigidizadores en placas de acero destinadas a funcionar como muros SPSW, teniendo en cuenta todas las diferencias presentes entre los distintos modelos como ventajas, desventajas, procesos de armado e impacto económico, características que permiten al experto tener alternativas de diseño ante cualquier tentativa de proyecto.

## **1.2. ANTECEDENTES**

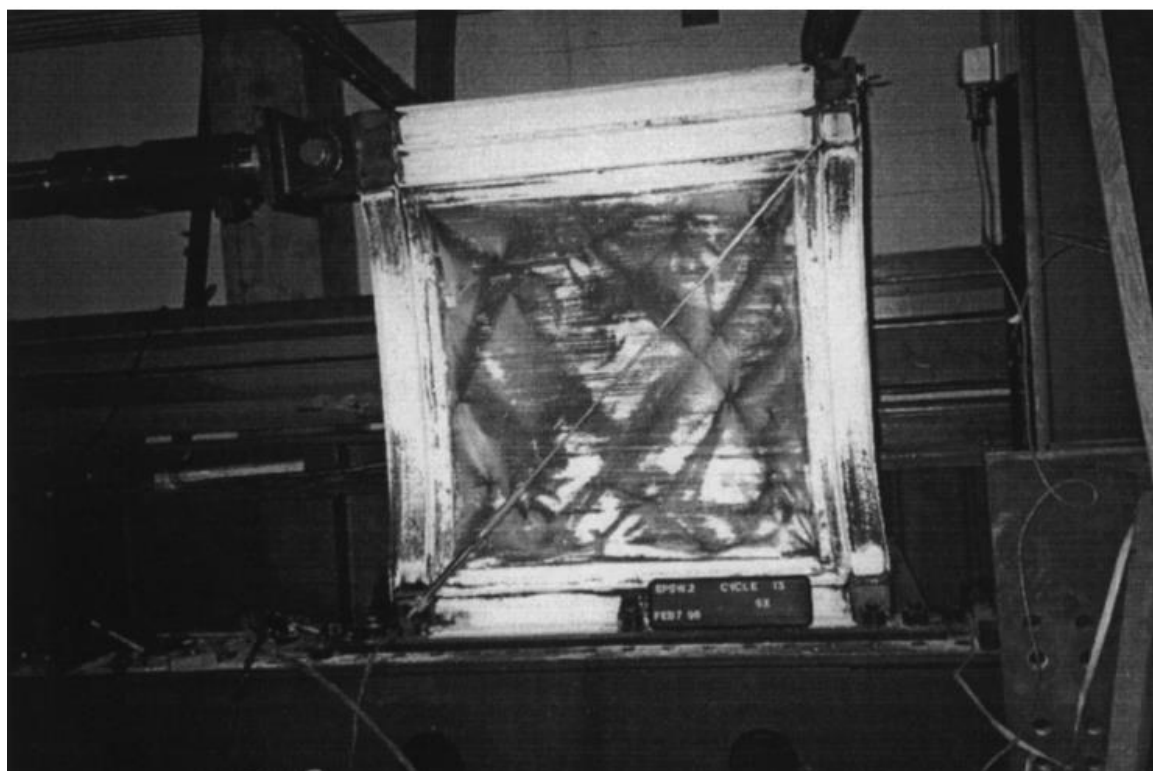
Actualmente los Muros de Corte de Placa de Acero SPSW se encuentran en constante desarrollo debido a sus increíbles y grandes ventajas como elementos de aporte a la resistencia de estructuras en edificios, donde el incremento de documentos que respaldan y registran los comportamientos de cada modelo presentado por diferentes estudios es notable, y su popularidad a nivel mundial se ha ido extendiendo con gran intensidad, encontrándose una amplia gama de artículos científicos y libros que los definen y describen tanto en propiedades como en procedimiento de cálculo para el diseño, además del notable crecimiento de edificios levantados con la nueva tecnología de construcción en acero con inclusión de estos muros.

Dentro de las redacciones más destacadas que ha permitido entender el funcionamiento de estos elementos estructurales, encontramos artículos científicos como el de Adam Lubell y su grupo, quienes evaluaron el comportamiento del modelo principal de muros SPSW simplemente colocando la placa de acero sin reforzamientos ni perforaciones en la configuración vigas-columnas, también llamadas en la literatura como HBE Y VBE, sometiendo el modelo a un ensayo cuasi-estático de cargas cíclicas, del cual se obtuvieron importantes resultados como son las curvas de histéresis que demuestran la capacidad de absorción de energía de estos paneles, además de la resistencia a la carga aplicada (Lubell,

Prion, Ventura, & Rezai, 2000); en la figura 1 se muestra la curva de histéresis de la muestra 2 de este estudio, y en la figura 2 se encuentra el muro 2 luego de haberlo sometido a un ensayo de  $6x\delta_y$ .



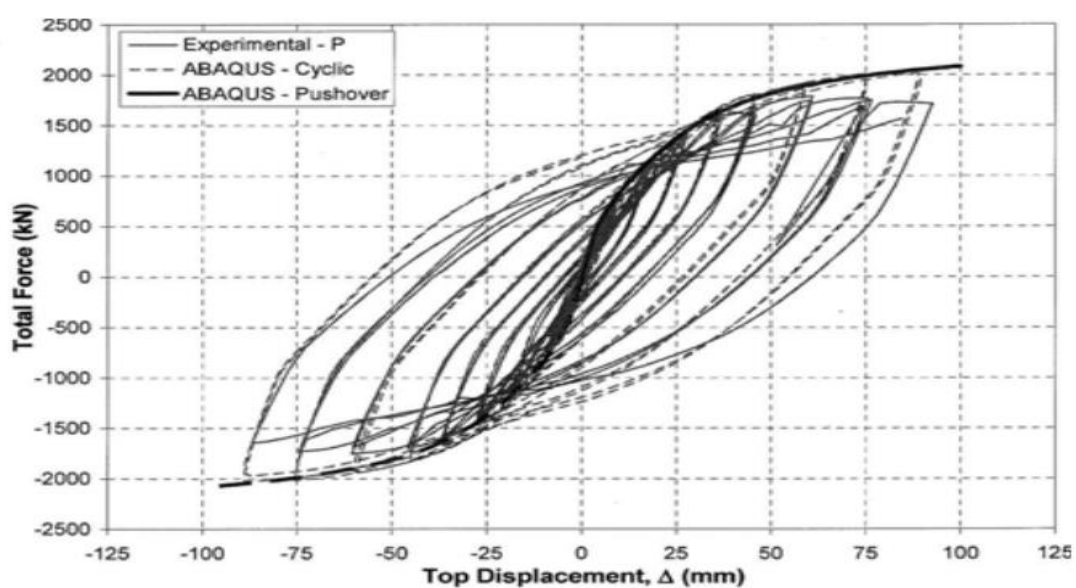
**Figura 1.** Curva de histéresis (carga-deformación) del muro SPSW2.  
Fuente: (Lubell, Prion, Ventura, & Rezai, 2000).



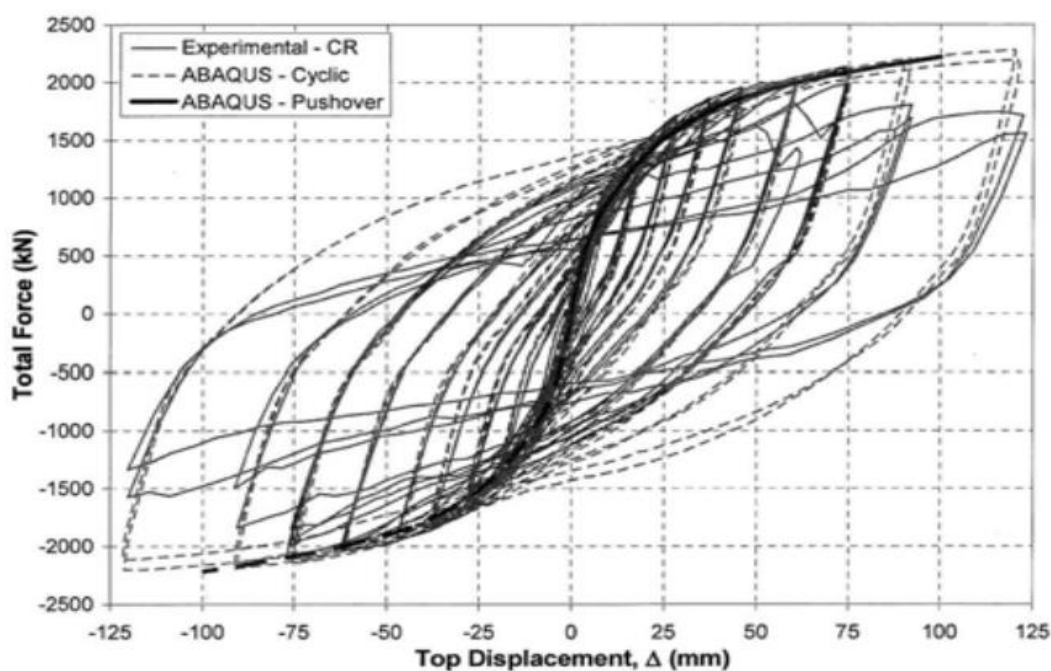
**Figura 2.** Patrón de deformación y fluencia del muro SPSW2 luego de un desplazamiento de  $6X\delta_y$ .  
Fuente: (Lubell, Prion, Ventura, & Rezai, 2000).

Otro de estos estudios es el de Michel Bruneau y su grupo, quienes analizaron el comportamiento de muros SPSW usando secciones reducidas de vigas (RBS) y placas perforadas, los cuales compararon con el modelo básico de muros SPSW

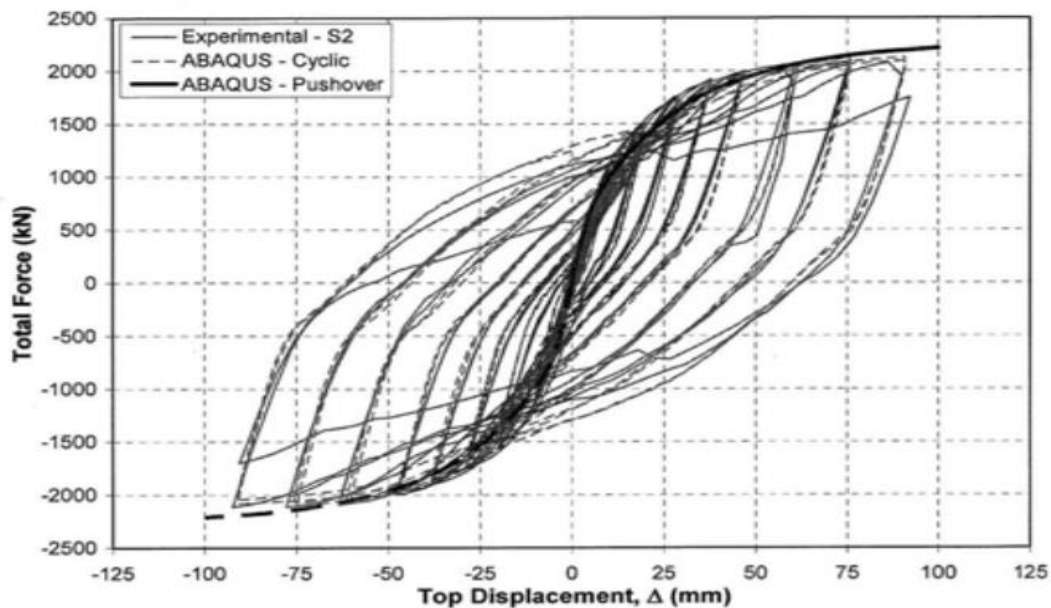
de placa entera para observar las diferencias con el primer modelo tanto en resistencia, deformaciones, absorción de energía, entre otros (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. I: Experimental Investigation, 2009). Para llevar a cabo este estudio, desarrollaron tres modelos de muros: uno de placa perforada (muro P), uno de placa con esquinas reducidas (muro CR) y uno de placa entera (muro S2). En la figura 3 se muestra las curvas de histéresis de cada uno de los especímenes del estudio, donde se observa la resistencia alcanzada por cada uno y su capacidad de energía absorbida durante el ensayo; y en la figura 4 se presenta los especímenes luego de haber sido ensayados en el laboratorio (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. II: Analysis and Design Recommendations, 2009).



(a)

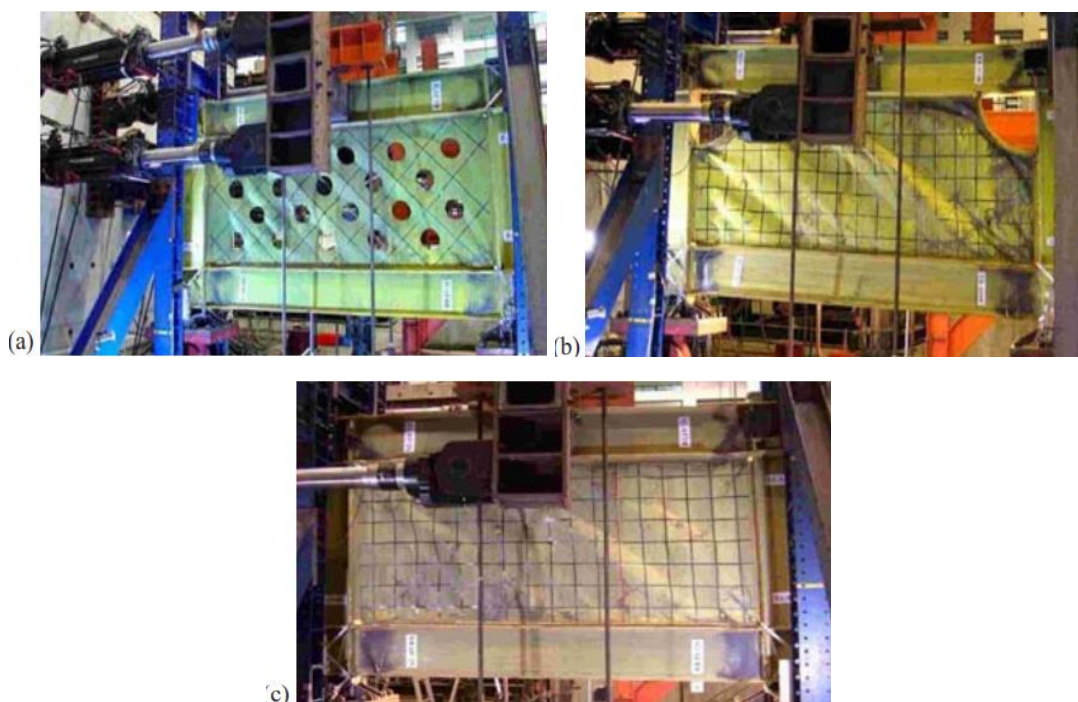


(b)



(c)

**Figura 3.** Resultados experimentales y analíticos de los muros (a) P, (b) CR y (c) S2. Fuente: (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, *Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. II: Analysis and Design Recommendations*, 2009).

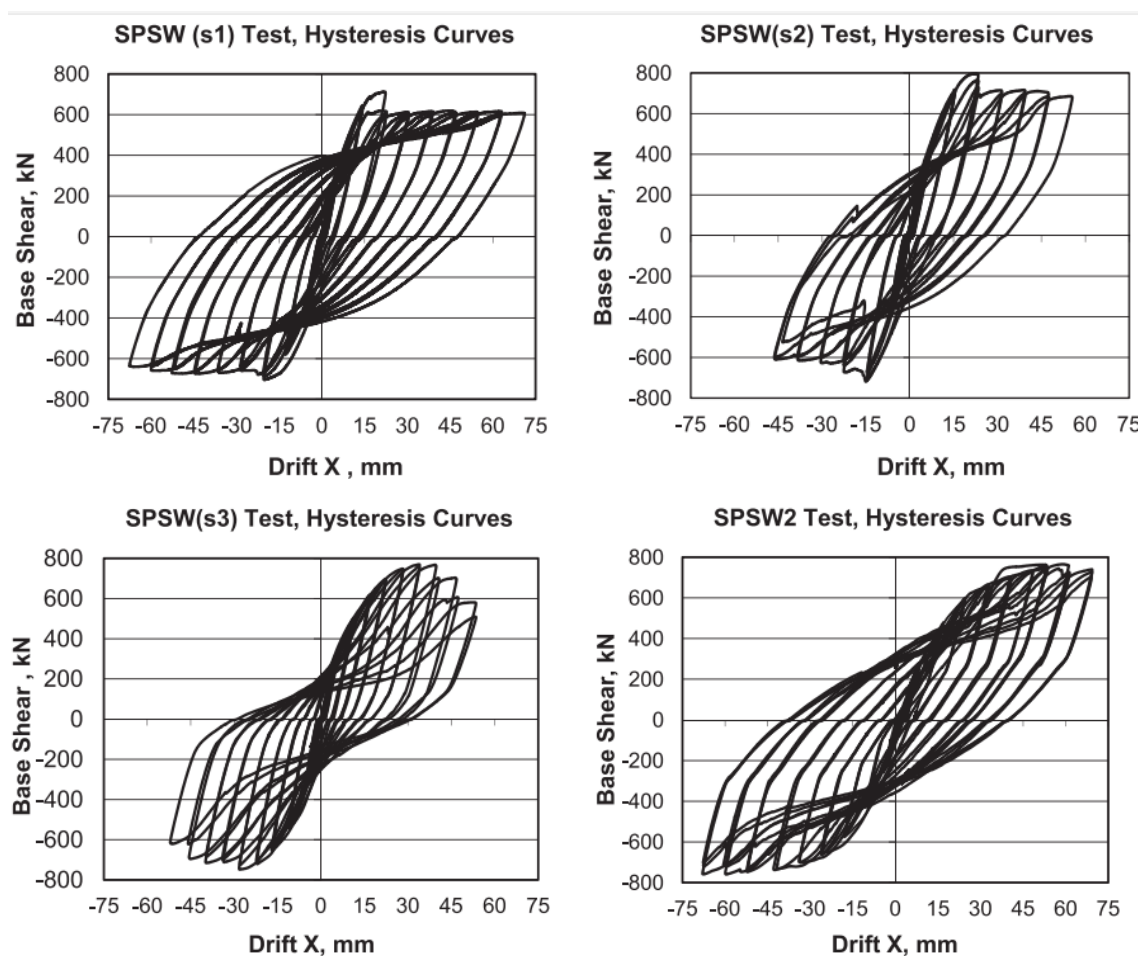


**Figura 4.** Imágenes de especímenes: (a) P al 3% de deriva, (b) CR al 4% de deriva y (c) S2 al 3% de deriva. Fuente: (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, *Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. I: Experimental Investigation*, 2009)

También se ha desarrollado un modelo de muro SPSW con reforzamiento en las diagonales del muro, donde se estima se producen los esfuerzos de compresión y tensión correspondientes al efecto de carga cortante que se desarrolla entre las

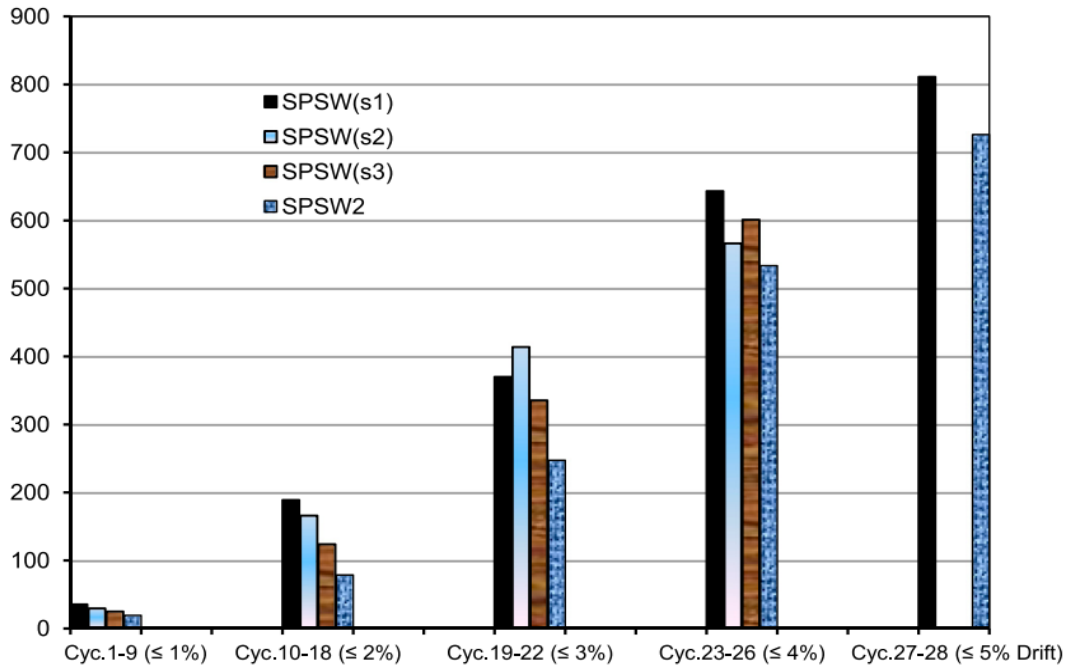
columnas y las vigas cuando una edificación es sometida al servicio de los fenómenos naturales, siendo el de los sismos el más recurrente. Esta alternativa, al igual que las demás, fue propuesta con el fin de proveer un aumento a la resistencia de edificios ante la sollicitación de fuerzas laterales como los sismos, disminuyendo a su vez la deformación total de la construcción que utilice estos elementos estructurales. Este estudio fue desarrollado por Erfan Alavi y Fariborz Nateghi, los cuales ejecutaron tres especímenes del modelo propuesto y un espécimen del muro SPSW convencional, de igual manera con el fin de comparar el comportamiento de la propuesta generada frente al muro básico (Alavi & Nateghi, 2013).

En la figura 5 se puede observar las diferentes curvas de histéresis de los especímenes ensayados, donde así mismo se tiene una buena referencia de cómo varía la capacidad de los muros con el implemento de estos rigidizantes, y de cómo éstos se comportaron ante la aplicación de las cargas cíclicas; la figura 6 representa una gráfica de barras que permite observar cuanta energía disiparon cada uno de los módulos, y la figura 7 representa los módulos luego de haber sido probados en el laboratorio.

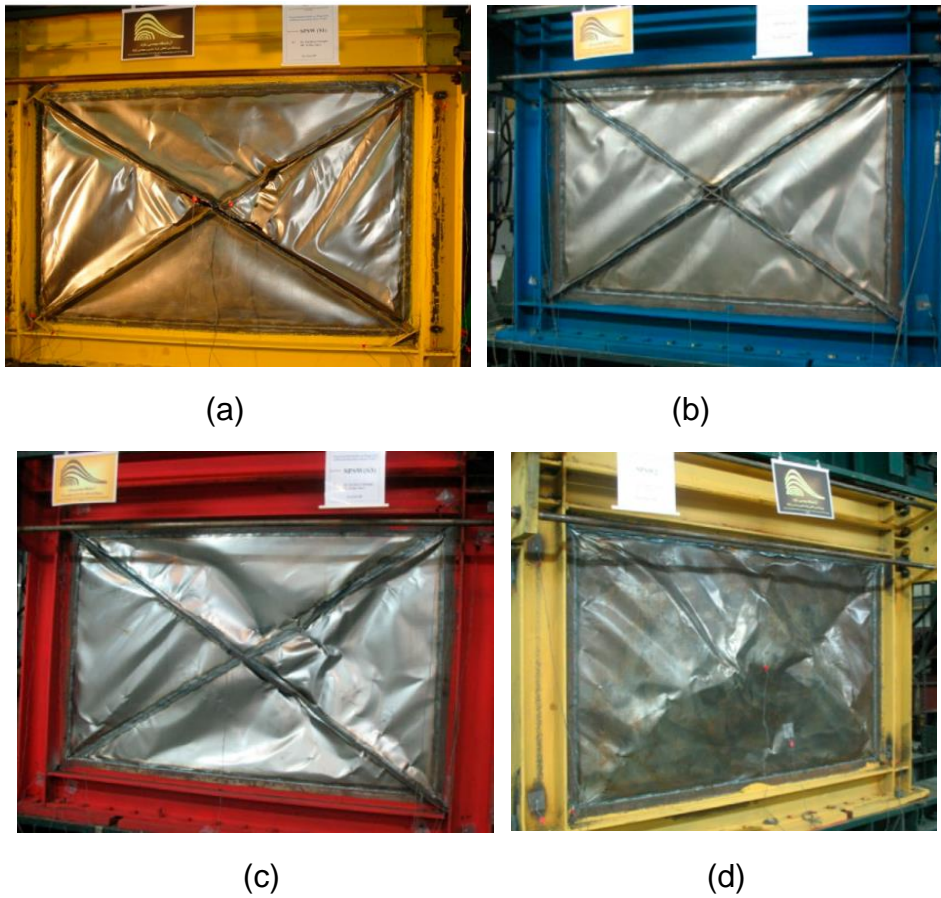


**Figura 5.** Curvas de histéresis de los diferentes especímenes ensayados.  
Fuente: (Alavi & Nateghi, 2013).





**Figura 6.** Energía acumulada, disipada por los especímenes durante los ciclos de ensayo.  
Fuente: (Alavi & Nateghi, 2013).



**Figura 7.** (a) SPSW S1 al 4,7% de deriva, (b) SPSW S2 al 2,0% de deriva, (c) SPSW S3 al 3,5% de deriva, (d) SPSW2 al 4,56% de deriva.  
Fuente: (Alavi & Nateghi, 2013).

Por el momento, estos han sido los modelos más representativos de los muros SPSW que se han desarrollado con el fin de proporcionar una ayuda estructural a edificios que se levantan en zonas cuyo riesgo sísmico es altísimo, todavía existen algunas alternativas que no han sido probadas y todo depende del ingenio de aquellos compañeros que, durante su desarrollo profesional, buscan ser una porte a la sociedad con ideas innovadoras que se siguen sumando al aporte tecnológico del sector constructivo. Una idea que todavía no ha sido probada es la de muros rigidizados con atiesadores trazados en forma de malla en el panel o placa de acero, respondiendo a la teoría de rigidización de placas desarrollada por el momento para la colocación de atiesadores en el alma de vigas tipo I, pues la teoría posee un apartado de cálculo para el caso de placas sometidas a esfuerzos cortantes ya que la placa, dentro de estos conceptos, puede ser analizada como una especie de alma mural (De Buen López De Heredia, 2000).

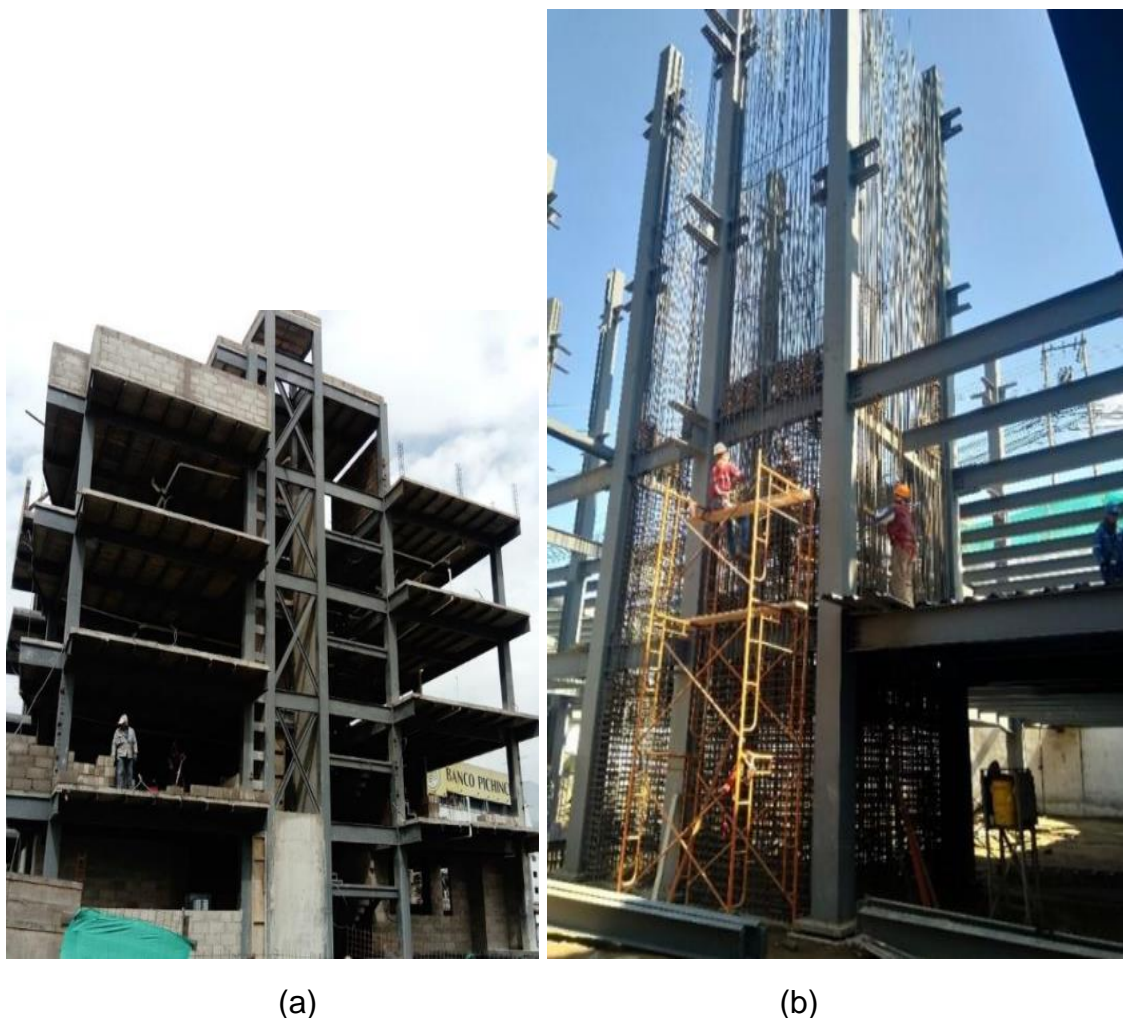
Como se ha mencionado anteriormente, el tema de muros rigidizados ha permanecido dormido de manera temporal, debido a la alta preocupación de la comunidad constructora por la influencia económica en la que puede incurrir el utilizar este modelo de muro SPSW, pero a su vez se tiene una gran esperanza que al implementar estos elementos en la placa, permitan un aumento considerable de la resistencia de los muros y pueda generar mayor seguridad de un edificio frente a los fenómenos naturales, por esta razón el tema todavía se lo ha mantenido en mención (Crisafulli, 2018), siendo el caso de los muros con rigidizadores en las diagonales del pórtico la primera tentativa de este concepto (Alavi & Nateghi, 2013).

Otros conceptos de aumento a la resistencia de edificios son el uso de arriostramientos diagonales (TEBFs), pórticos tubulares rellenos de hormigón (CFST), fusibles estructurales (SF), marcos oscilantes (RF), muros SPSW autocentrantes (SCSPSW) y muros compuestos de acero-concreto (RC), los cuales se mantienen como alternativas vigentes hasta que sea posible el desarrollo de otras adicionales (Bruneau, 2012).

En el Ecuador, la construcción de edificios en acero se ha ido popularizando gracias a las ventajas que ha presentado este material como una alternativa sismorresistente, frente a la antigua construcción de hormigón armado, pues las ventajas que se tiene al usar acero son mayores que las obtenidas por combinar el hormigón con el reforzamiento de varilla en su interior, tales ventajas son: mayor resistencia ante los fenómenos naturales, estructuras más livianas, mejor proyección de espacio en el diseño arquitectónico, estructuras más artísticas, etc. (McCormac & Csernak, 2012); por otro lado las estructuras levantadas en hormigón armado son relativamente más económicas que las de acero, pero esto dependerá claramente del desarrollo de la construcción, pues el hormigón armado presenta más valores agregados por la mano de obra.

Es así que también se ha popularizado en el medio el uso de muros compuestos de acero-concreto, por su facilidad constructiva y acercamiento ante la experiencia de construcción en el país, además de buscar una manera de evitar que los muros convencionales de bloque se desprendan del acero, pues no existe ninguna

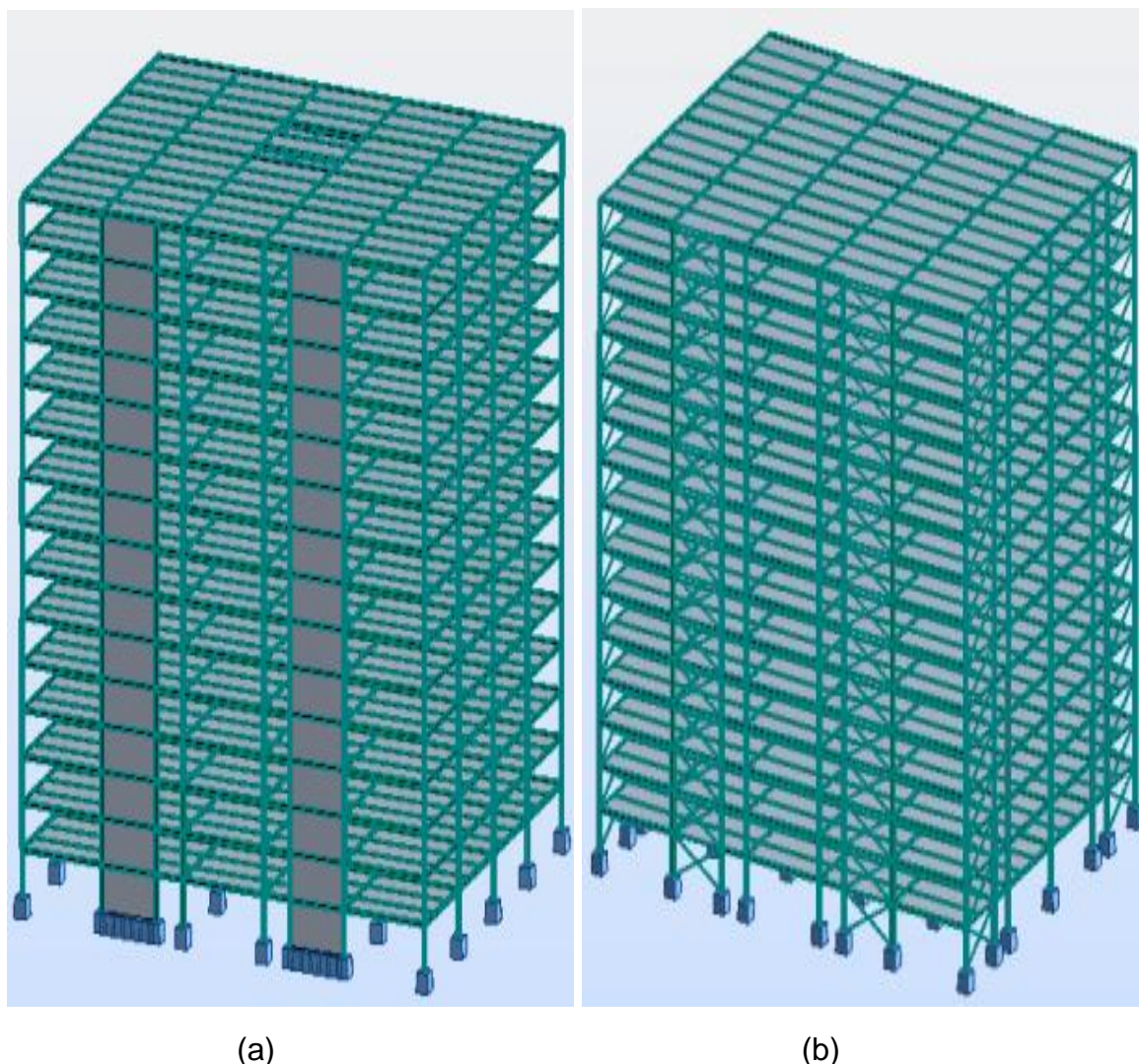
conexión real entre estos dos materiales que garantice la firmeza del muro ante la sollicitación de los sismos, pues el Ecuador es un país altamente activo en terremotos (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022). La figura 8 hace referencia a dos edificios construidos en el país, donde se evidencia el uso de acero como centro del muro y el hormigón luego de ser colocado en los dos laterales del muro.



**Figura 8.** Muros de Acero-Concreto: (a) Edificio de Departamentos y (b) Edificio Corporativo. Fuente: (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022).

Sin embargo, los Muros de Corte de Placa de Acero SPSW todavía no han sido muy utilizados en el medio, pero si se han realizado estudios buscando la manera de implementarlos en la construcción del Ecuador, pues tal es el caso del estudio realizado por Daniel Salazar quien evalúa el comportamiento de edificios diseñados con muros SPSW, frente a los mismos modelos pero utilizando arriostramientos diagonales en lugar de las placas de acero, con el fin de obtener las diferencias de usar ambas alternativas en el reforzamiento estructural dentro de lo que es: peso, costos, respuesta sísmica, etc. (Salazar Guerrero, 2015). En la figura 9 se presenta un edificio de 15 pisos modelado tanto con muros SPSW, como con arriostramientos diagonales en los pórticos representativos del modelo, desarrollado para la comparación de las dos alternativas de reforzamiento.





**Figura 9.** Edificio de 15 pisos con: (a) muros SPSW Y (b) arriostramientos diagonales.  
Fuente: (Salazar Guerrero, 2015).

En el presente estudio, se compara el uso de rigidizadores diseñados mediante la temática de placas de acero sometidas a cargas cortantes, donde la distribución de los atiesadores crean una especie de malla colocada a escuadra con los elementos de borde del muro SPSW, de este modo se busca una distribución más uniforme de los esfuerzos dentro de la placa, aprovechando de mejor manera las propiedades de la misma; con el modelo básico de muro SPSW, donde las dimensiones representativas del cálculo para la resistencia de la placa depende enormemente de la distribución de los atiesadores, pues el caso principal del estudio es el muro sin rigidizadores, donde las dimensiones del pórtico ingresan directamente en el análisis de la resistencia de la placa.

Para la comparación práctica, se tiene el modelo de cuatro pórticos con placas de acero rigidizadas, un pórtico con placa de acero sin rigidizar y uno sin placa interna, donde se evalúa la resistencia sólo del pórtico por los elementos de borde, teniendo en cuenta las secciones reducidas en las alas de las vigas.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar el funcionamiento de los muros de corte de placa de acero rigidizadas comparando su comportamiento ante cargas cíclicas con el de muros de corte de placas de acero no rigidizadas con el fin de obtener una nueva variante de muros de corte de placas de acero.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el comportamiento físico de las placas de acero usadas como muros de corte mediante la revisión de documentos relacionados al tema para el armado del arreglo de los rigidizadores colocados en la placa del muro.
- Determinar el comportamiento físico de las placas de acero rigidizadas en los muros de corte a través del ensayo de cargas cíclicas con el fin de establecer las diferencias en daños que pueden sufrir los muros con y sin el uso de rigidizadores.
- Determinar la capacidad en resistencia, deformación y disipación de energía de los muros de corte de placas de acero rigidizadas a través del análisis de las curvas de histéresis y de esfuerzo-deformación unitaria obtenidas en el desarrollo del ensayo para establecer la viabilidad del uso de los rigidizadores en las placas.

## **1.4. ALCANCE**

Con el propósito de cumplir con cada uno de los objetivos planteados en el presente estudio, se ha diseñado un prototipo de muro SPSW rigidizado conforme a las ecuaciones descritas en la teoría de placas y diseño de los elementos de borde (HBE y VBE), del cual se levantaron cuatro módulos réplica, un pórtico sin placa y un muro SPSW sin rigidizadores, además de recurrir al uso de apoyos fijos tipo bisagra en la base de las muestras, para proceder con el ensayo de cada una de las muestras según el protocolo para ensayos de carga cíclica, realizando también análisis de los materiales involucrados más relevantes de los muros.

Para el diseño del prototipo de muro SPSW rigidizado, se ha utilizado como referencia el estudio realizado por Michel Bruneau y equipo, donde se explica el procedimiento de cálculo que se ha utilizado para considerar algunos aspectos que afectan la resistencia del muro, además de incluirse las ecuaciones necesarias para el modelamiento de cada detalle como la altura de la columna entre los apoyos y la viga inferior, la reducción de la sección de viga, entre otros (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. I: Experimental Investigation, 2009). Para complementar el diseño, se verificaron las ecuaciones del diseño de los elementos de borde y del panel interno a través de libros que poseen el desarrollo de la teoría de muros SPSW (Crisafulli,

2018), y se revisaron las ecuaciones de diseño de los rigidizadores según la teoría de placas, para repartirlos de manera efectiva tanto en horizontal como en vertical, cumpliendo con las respectivas comprobaciones de los esfuerzos soportados por la placa antes y después del uso de rigidizadores, y del análisis de la inercia de los atezadores que deben ser las necesarias para cumplir con el aumento de resistencia del muro (De Buen López De Heredia, 2000).

El montaje de los muros se lo realizó teniendo en cuenta todas las dimensiones y comprobaciones geométricas, de armado y soldadura (INEN, 2018), para obtener muestras lo más semejantes entre ellas y que sean capaz de responder de manera satisfactoria los ensayos, reduciendo al máximo la posible generación de inconvenientes; para lo cual se construyeron cuatro muros réplica del modelo SPSW rigidizado, además del montaje de dos muestras tipo “cero”, como son un pórtico sin placa de acero y un muro SPSW con placa sin rigidizar, con el fin de poder evaluar el aporte de colocar rigidizadores y verificar el soporte de los elementos de borde.

Como el diseño de los muros se lo realizó usando como guía el estudio de muros SPSW con placa de acero perforada (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. I: Experimental Investigation, 2009), se recurrió al uso de apoyos fijos en la base de las columnas para cada pórtico, con lo cual se implementó el uso de placas de montaje en el inferior de las columnas de los muros, con perforaciones para juntar los muros con los apoyos mediante un arreglo de pernos y, de esta manera, poder reemplazar los muros aprovechando los mismos apoyos en todas las muestras, además de colocar una placa en cada muro para la colocación del gato de ensayo respecto al eje de la viga superior.

Para los ensayos de los materiales involucrados, se ha separado una muestra de la placa de acero usada en el marco del muro, de los ángulos utilizados como rigidizadores y dos residuos de los elementos vigas, puesto que estos son los más relevantes dentro del cálculo de la resistencia de los muros, y esto gracias a las dimensiones de las columnas que sobrepasan la resistencia de los otros elementos, y para el estudio de los muros se ha considerado el método C de ensayo mediante cargas cíclicas (FEMA, 2007).

Teniendo en cuenta cada uno de los parámetros involucrados en el desarrollo práctico del presente estudio, el propósito es de cumplir con todas las expectativas que puedan surgir de la implementación del modelo de muro SPSW rigidizado, pues el campo de la construcción requiere de la existencia de alternativas estructurales que puedan responder de manera satisfactoria al servicio de la edificación terminada, evitando las incomodidades que puedan aparecer durante el ejercicio de los fenómenos naturales.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN**

### **1.5.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

El presente estudio técnico experimental está enfocado al análisis del comportamiento de los muros de corte de placa de acero utilizando rigidizadores, la cual es una aplicación de los muros que todavía no ha sido experimentada, teniéndose un vacío de información pues la propuesta de los muros de corte con placas de acero fue planteada y definida desde los años 90; incluso se ha comprobado que este tipo de elementos se usaban antes del planteamiento de requisitos que permitan desarrollar de manera más efectiva un diseño de muros desde una perspectiva científica-matemática. Actualmente, este tipo de muros ha conseguido un alto índice de aplicabilidad debido al interés tecnológico por desarrollar construcciones con materiales de mejores propiedades y los últimos estudios han determinado el comportamiento de muros de acero incluyendo una variante de placas con perforaciones.

### **1.5.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA**

En el estudio de los muros de corte de placas de acero, se han presentado trabajos experimentales que demuestran la incapacidad de comparar resultados puesto que estos dependen en gran medida de las dimensiones que se establezcan para el armado de los especímenes, es así que se ha propuesto la ejecución de un espécimen sin atiesadores y un pórtico sin placa de acero que puedan ser utilizados como referencia para la obtención de resultados concretos referentes al uso de los atiesadores en las placas, además de la necesidad de obtener valores confiables extraídos del ensayo de los especímenes, donde es necesario el uso de cuatro réplicas del modelo de muro con atiesadores, por errores que puedan presentarse durante los ensayos; todo esto se encuentra detallado en los protocolos de ensayo de las normas ASTM y FEMA. Otra fuente de errores que se puede generar en el ensayo tiene que ver con la soldadura, por ende, se debe buscar la manera de conectar los elementos evitando el desarrollo de cortes o fisuras producto de variaciones bruscas de temperatura o perforaciones por la fuerza del arco en el soldado.

### **1.5.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA**

El propósito del presente estudio es el de añadir una nueva variante de los muros de corte de placas de acero que pueda competir con las otras. En la actualidad, sólo existe un estudio referente al uso de rigidizadores aplicados de forma diagonal respecto al marco del muro, el cual sólo permite entender cómo el uso de atiesadores puede afectar el funcionamiento en el aumento de resistencia de las placas de acero usadas en los muros de corte, pero la información brindada por los otros tipos de muros permite tener una base del pandeo que se presenta fácilmente en elementos que tienen configuraciones esbeltas. El acero es un material de buena resistencia, ductilidad y capacidad para disipar energía, pero muchas veces esta capacidad se ve afectada por el desarrollo de pandeo cuando los elementos no son diseñados adecuadamente (esbeltos), provocando que las cargas tengan

que ser soportadas por los elementos complementarios de la estructura. Al añadir rigidizadores en las placas, se espera aumentar la capacidad de los muros frente al efecto de pandeo por corte que sufren las placas durante la sollicitación de cargas, permitiendo reducir la participación de otros elementos con una mejor distribución de fuerzas y obtener una mayor gama de posibilidades en el diseño de estructuras de acero en edificios.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1. LOS EDIFICIOS Y SUS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Dentro del desarrollo de la humanidad, el hombre siempre ha buscado la manera de velar por su integridad vital, buscando protegerse del medio ambiente cuando éste responde de manera violenta o perjudicial con factores que pueden dañar su salud, tanto corporal como laboral, pues su evolución consecuente de su curiosidad lo ha llevado a experimentar y transformar la naturaleza en beneficio de sus necesidades, siendo una de estas el refugio y aislamiento de cualquier condición natural.

Es así como el hombre primitivo comienza en las cavernas, ya que ciertos ambientes le permitían protegerse de la lluvia y del ataque de los depredadores, pudiendo producir con más tranquilidad factores y objetos como: el fuego, las prendas de vestir, las armas y herramientas, etc., pero la poca existencia de estos espacios frente al crecimiento de la población obligó al hombre a buscar maneras de replicar estos espacios. Es entonces que el hombre empieza a extraer materiales de la naturaleza para recrear espacios que cumplan con el objetivo de ser suficientes en el albergue de una cantidad específica de personas y de actividades que estos requieran, construyendo primeramente viviendas de madera, de piedra o barro (Gallegos, 1991).



(a)



(b)

**Figura 10.** (a) "Sala de Toros", Perigord (Francia). (b) "Stonehenge" Salisbury (Reino Unido).  
Fuente: (*El Herald SLP*, 2019), (*Gantley*, 2021).

Con el pasar del tiempo y el avance científico, la humanidad ha ido encontrando otros materiales con los cuales ha dejado unos en desuso para reemplazarlos con otros que han presentado mayores ventajas, dependiendo también de la facilidad de conseguir el material, es así que en respuesta a la piedra (Egipto) y el barro, aparece también el ladrillo y los morteros de betún y alquitrán (Babilonia), y el manejo de piedra caliza, travertino, tufa volcánica y pocos extractos egipcios con los morteros de arena y cal (Roma). Esta primera tentativa de material cementante fue muy investigada en la antigua Roma, quienes vieron grandes ventajas y comodidades al reemplazar el uso de piedras de grandes dimensiones y pesadas,



por el uso del cemento que, mientras se mantenga fresco, puede ser colocado con mayor facilidad para el moldeado de piezas estructurales que presenten resultados similares al uso de rocas. Luego se implementa el acero en los materiales cementantes para crearse el hormigón armado o reforzado, el cual presentaba aún más ventajas por combinar la ductilidad y alta resistencia a la tensión del acero, con la alta resistencia a la compresión que siempre tuvieron la piedra y, el cemento (Gallegos, 1991). En las últimas épocas ha ido incrementando el uso del acero y disminuyendo los materiales cementantes, pues el acero es capaz de soportar por sí solo altas demandas de compresión y tensión con el requerimiento de pocas cantidades de acero, aumentando la posibilidad de crear más espacio y disminuyendo en gran medida el peso de las edificaciones (McCormac & Csernak, 2012).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 11.** (a) Pirámides de Guiza (Egipto). (b) "Etemenanki" Babil (Irak). (c) Panteón de Agripa, Roma (Italia). (d) Pabellón de Portugal, Lisboa (Portugal). (e) Burj Khalifa, Dubái (Emiratos Árabes Unidos).

Fuente: (Langdon, *Clásicos de Arquitectura: Pabellón de Portugal Expo'98 / Álvaro Siza, 2015*).

Una alternativa a la necesidad de alojamiento son los edificios, que son construcciones estructurales ejecutadas por el hombre para la creación de espacios de albergue no sólo de personas, sino también de sus actividades (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento VIVIENDA; Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción SENCICO, 2006) como: la alimentación, convivencia, descanso, protección de variantes climáticas, creación de objetos y tecnología para el desarrollo humano, administración de actividades y formalidades humanas, etc., pues efectivamente su uso se ha popularizado en base al crecimiento ya no sólo poblacional, sino también económico-empresarial dentro de esta formalidad de representar todas las necesidades humanas en un solo material que es la moneda.

Para su construcción, los edificios se componen de ciertos elementos estructurales donde cada uno cumple con una función que depende de dónde estos se ubiquen, pues la transferencia de fuerzas provenientes del propio peso de la estructura, del peso de objetos colocados en los interiores, de la caminata de las personas en el interior y de fenómenos naturales es distinta según la configuración espacial del elemento, de su geometría, de su conexión y dependencia con otros elementos. Los elementos principales son: techos, losas, vigas, columnas, muros y cimientos (de Solminihac & Thenoux, 1997).



**Figura 12.** "Obra gris" de un edificio de hormigón armado en construcción.  
Fuente: (Múnera, 2018).

Hoy en día, la tecnología de la construcción de edificios se ha inclinado en gran medida al uso del acero como material principal, especialmente en los países desarrollados, pues la demanda de grandes construcciones que cubran todas las necesidades de las grandes empresas y de alojamiento de la actual población



mundial ha crecido de la mano con el desarrollo tecnológico dentro de todos los campos científicos, pues el mundo globalizado no deja de crecer.

### 2.1.1. PRINCIPALES ELEMENTOS ESTRUCTURALES: DEFINICIONES

En base al desarrollo evolutivo de las edificaciones, se ha visto que una manera de recrear efectivamente un espacio de protección y alojamiento es el de utilizar soportes laterales que puedan mantener en la parte superior una cubierta que funcione de aislamiento frente a las lluvias, complementando dichos laterales con muros que puedan servir de protección de agentes externos como: depredadores, fuertes vientos, cambios climáticos, etc., a la par de dotar de un agarre con el suelo al conjunto de elementos antes mencionados, para evitar el derrumbamiento o desarme de todo el montaje frente a cualquier evento externo. Todos estos miembros han sufrido mejoramientos a la par del avance científico que ha implementado modelos muy aproximados a la realidad, para obtener piezas completamente eficientes ante la solicitud de funcionalidad, lo cual ha permitido aprovechar y crear más elementos que puedan crear edificios levantados no sólo en plano, sino también en elevación, generando a su vez un aprovechamiento más eficiente del espacio provisto en un terreno. En vista de todo lo considerado, se tienen las siguientes definiciones:

- **Estructura.** – Es un arreglo de elementos o piezas estructurales, armado con el fin de cumplir la función de soportar cualquier situación de servicio que involucre cargas o fuerzas como: puentes, edificios, galpones, carrocerías, etc. Este concepto se aplica para cualquier rama que involucre el estudio de “Estática” (Meriam, 1978).
- **Elemento Estructural.** – Es un elemento o pieza que, conectada con otras, forman una estructura, la cual, dependiendo de su diseño, tiene la función de transmitir una configuración específica de cargas o fuerzas provenientes del exterior y/o de otros elementos estructurales. También se conoce como miembro o pieza estructural (Fundación Laboral de la Construcción, 2022).
- **Cimentación.** – Es el elemento estructural encargado de recoger las cargas entregadas por las columnas y los muros, para luego transmitir las al suelo añadiendo su peso propio. Dependiendo de la configuración estructural y del suelo en el que se va a asentar la construcción, existen varios tipos como: zapatas aisladas, corridas, combinadas, vigas de cimentación, losas de cimentación y pilotes (Harmsen, 2002).
- **Columna.** – Es un miembro estructural, que en edificios es colocado de forma vertical para encargarse de soportar cargas de compresión provenientes del propio peso de la estructura y de factores externos, para luego transmitir las a la cimentación (Rodas Andrade, 2014).
- **Cadena.** – Es un elemento estructural utilizado para conectar las columnas en el nivel del suelo, con el fin de reducir los esfuerzos transmitidos a la cimentación (Rodas Andrade, 2014).

- **Viga.** – Elemento estructural colocado horizontalmente en edificios, el cual se encarga de recoger cargas perpendiculares a su eje sometándose a esfuerzos de flexión, para luego transmitir estas cargas a las columnas y a cualquier elemento adicional al que se encuentre conectado (Rodas Andrade, 2014).
- **Losa.** – Miembro estructural que se encarga de recoger todas las cargas perpendiculares a su plano provenientes del servicio del “piso” como: caminata de personas, muebles, peso propio, etc., las cuales luego son transmitidas a las vigas que rodean la losa (Rodas Andrade, 2014).

Existen otros elementos estructurales, los cuales son utilizados dependiendo de los requerimientos funcionales, del diseño estructural, de la facilidad de conseguir materiales y de la capacidad económica de la entidad encargada del desarrollo de la edificación, pues estos son considerados como alternativas para el aumento de resistencia y su uso es más frecuente en situaciones de diseño de zonas tratadas como “sísmicas o de alto riesgo”.

### **2.1.2. LOS MUROS DE CORTE Y SU IMPORTANCIA EN LA CONSTRUCCIÓN**

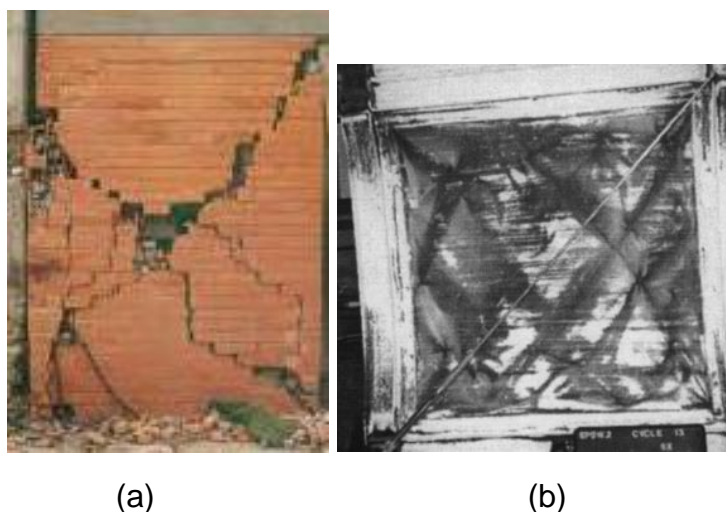
Dentro del desarrollo de una estructura, existen muchas variables que deben ser cubiertas para conseguir la mejor eficiencia de un proyecto, y de ello depende el arreglo de elementos que los diseñadores invierten para cumplir con la demanda de servicio y economía pues, a más de la distribución necesaria de los miembros estructurales principales, ciertos proyectos requieren de reforzamientos para mejorar la respuesta estructural y evitar un diseño con piezas de dimensiones y costos irracionales.

En los edificios, es muy común intervenir en el aumento de su resistencia colocando miembros estructurales en el dintel de ciertos “pórticos”, generando una disminución considerable de deformaciones y un aumento de la capacidad de absorción de energía que proviene de los fenómenos naturales, además de solucionar los síntomas que puede presentar la edificación si se sometiera la estructura sin la aplicación de estos elementos. El diseño arquitectónico es muy susceptible de generar deficiencias estructurales pues la respuesta “vibratoria” de un edificio ante las cargas aplicadas por la presencia de un fenómeno depende en gran medida de la geometría detrás del modelo, siendo la falla más crítica la producida por presencia de torsión (Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, 2014).

Ante la presencia de estas fallas, se ha introducido una amplia gama de elementos estructurales a los que se puede recurrir en caso de ser necesario complementar la resistencia de una construcción. Entre los elementos de incorporación en el dintel de un pórtico tenemos los muros portantes, no portantes, arriostramientos excéntricos y muros de corte (también llamados diafragmas), donde los muros de corte se subdividen en: muros confinados, muros reforzados o de acero-concreto, muros de placa de acero SPSW, muros de placa perforada P-SPSW, muros de placa reforzada R-SPSW y muros de placa autocentrante SCSPSW. Otros

elementos intervienen directamente en la red estructural, y estos son: tubos de acero rellenos de hormigón, fusibles estructurales y marcos oscilantes (Bruneau, 2012).

Hablando de los muros de corte, se sabe que son elementos estructurales armados verticalmente en el espacio o dintel de un pórtico con el fin no sólo de separar y cerrar espacios, sino también de ser capaces de soportar cargas horizontales transmitidas como fuerzas de corte por los elementos de borde (vigas y columnas) (Harmsen, 2002). Este fenómeno de corte es muy común como falla en los edificios que han sido sometidos al esfuerzo de un sismo, el cual genera un efecto de compresión en una diagonal del marco, mientras que la otra responde con un efecto de tensión, intercambiándose estas acciones en cada ciclo del movimiento telúrico; como evidencia, los muros que han fallado por la carga presentan fisuras en dichas diagonales si son de concreto, mientras que en el acero se presentan ondulaciones por pandeo.



**Figura 13.** (a) Muro de ladrillo luego de un sismo.  
 (b) Muro SPSW luego de un ensayo cíclico.  
 Fuente: (CICEPAC, 2022), (Lubell, Prion, Ventura,  
 & Rezai, 2000).

Dependiendo del material, cada tipo de muro tiene su procedimiento de diseño, sin embargo, tanto en los muros de hormigón como en los de acero existe la configuración simple y la reforzada. En los muros de corte de hormigón existe: los muros confinados que son muros donde para ser concebidos como estructurales, se debe levantar primero el muro con el bloque o ladrillo calculado, para luego confinarlo con la fundición de la columna conjuntamente con el muro, creándose una conexión sólida entre el muro y la pared; y el muro reforzado donde se incluye una importante cuantía de varilla tejida mientras se levantan las filas de bloque o ladrillo (Harmsen, 2002). Por otro lado, los muros de corte de placa de acero SPSW se pueden construir luego de ensamblar los elementos de borde, pues poseen una gran ventaja de armado gracias al trabajo de soldadura, sin embargo debe realizarlo una persona preparada en este tema, pues la adherencia de los elementos depende completamente de la preparación de la suelda con los equipos y

materiales adecuados; así mismo se dividen en muros SPSW simples, muros SPSW perforados y muros SPSW reforzados, donde cada modelo depende del procedimiento de diseño y del acabado en el montaje con los correspondientes materiales y perfiles de acero (Crisafulli, 2018).

El uso de estos muros en edificios es muy importante pues la gran mayoría, además de presentar ciertas tendencias a desarrollar un modo de vibración por torsión en el cálculo, al ser construcciones de grandes dimensiones se busca una manera de disminuir el aporte de las columnas con una distribución y absorción más uniforme de esfuerzos en el panel de estas paredes, pues una de las causas de muertes por caída de edificios tiene que ver con el desarrollo de un plano de falla horizontal, producido por el corte de columnas a una determinada altura (Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, 2014).

Debido al desarrollo científico, esta alternativa ha sido muy utilizada en la construcción de edificios, pues ha presentado grandes resultados en aquellas construcciones donde se ha implementado estos elementos, impidiendo que se produzca una falla de columnas que pueda vulnerar la vida de muchas personas que pueden encontrarse desalojando el espacio, pues el profesional debe estar capacitado de garantizar un tiempo de desalojo ante un evento de riesgo como los sismos.

## **2.2. EL ACERO EN LA CONSTRUCCIÓN**

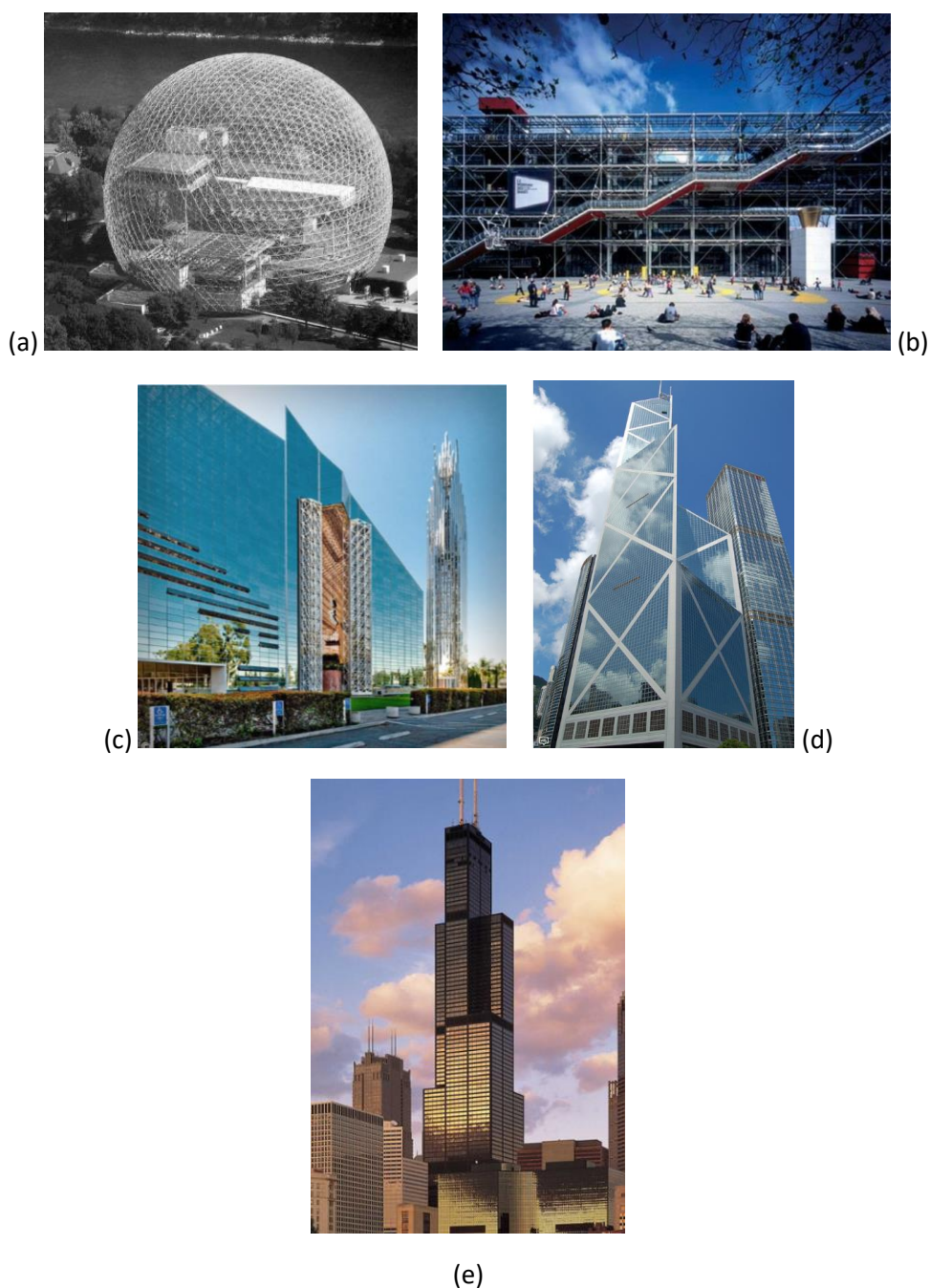
El avance tecnológico ha permitido que cada una de las creaciones del hombre siga perfeccionándose, tanto es así que el descubrimiento de materiales y sus aplicaciones sigue en aumento, y el acero con sus raíces en el hierro no es la excepción, pues es un material tan antiguo que acompaña a la evolución del hombre desde los imperios, pues su uso era muy común en armas de guerra, armaduras, utensilios, etc.; sin embargo, debido a su facilidad de corrosión, el origen del hierro aún es incierto.

Las primeras aplicaciones del hierro en la construcción se dan en el siglo XIX, donde el ingeniero británico Brunel propone en 1813 la colocación de refuerzos de acero en una chimenea en construcción, y luego en 1825 aplica lo que se conoce como “albañilería reforzada” en la construcción del túnel bajo el Támesis (Gallegos, 1991); mientras que en Estados Unidos, el acero se comercializó con precios bajos por primera vez a finales del mismo siglo y, luego, en 1908 se laminaron las primeras vigas de patín ancho (McCormac & Csernak, 2012).

A pesar de este tardío descubrimiento, la popularidad del acero se disparó en el levantamiento de cualquier construcción, pues las ventajas tanto en resistencia como en peso y montaje cada vez se volvían más evidentes conforme crecía el número de estructuras desarrolladas con éste material, es así que hoy en día Estados Unidos posee una cantidad muy importante de construcciones en acero como: puentes, edificios, torres, casas, entre otras (McCormac & Csernak, 2012).

Desde luego, no sólo Estados Unidos posee estructuras en acero, también podemos encontrar grandes referentes a la innovación de este material en

importantes construcciones turísticas de otros países y continentes que aprovecharon la iniciativa de incursionar en este modelo no sólo de negocios o mercado, sino también de demostración de la capacidad humana por crear mejores condiciones de vida y funcionalidad laboral, a la par de ser otra forma más de expresión artística mediante la cual la humanidad plasma aquello a lo que se refiere “belleza”. En la figura 14 podemos observar algunas de estas representaciones estructurales (Walsh, 2020):



**Figura 14.** (a) Biósfera de Montreal (Canadá). (b) Centro Georges Pompidou (Francia). (c) Catedral de Cristal (Estados Unidos). (d) Torre Banco de China (China). (e) Torre Willis (Estados Unidos). Fuente: (Langdon, 2014).

Gracias a esta importante cantidad de construcciones en acero, ha sido posible experimentar de buena manera todas sus características como material ante el sometimiento de esfuerzos generados por cualquier factor externo como: vientos, sismos, incendios, peso, impacto, etc.; así como ver la diferencia de lograr una estructura en hormigón y una en acero, pues inclusive en términos de capacidad y servicio, se ha percibido el nivel de satisfacción de aquellos usuarios que han evaluado un determinado proyecto desde la perspectiva del hormigón y la del acero. Dentro de las ventajas que ha presentado el acero, se ha visto que tiene: alta resistencia a la tensión y compresión, uniformidad, elasticidad, durabilidad, ductilidad, tenacidad, alta capacidad para el desarrollo de espacios, alta reducción de peso estructural, facilidad de intervención ante un proyecto de ampliación, facilidad y rapidez de montaje, apertura ante cualquier tipo de conexión entre elementos, apertura al desarrollo de piezas prefabricadas, facilidad de moldeado y laminado, es un material altamente reutilizable y reciclable por excelencia, y puede ser revendido tanto como elementos de segunda mano o como chatarra generando una cierta recuperación de la inversión; como desventajas se tiene: corrosión, altos costos de protección contra el fuego, es susceptible al pandeo, fatiga y desarrollo de fracturas frágiles (McCormac & Csernak, 2012).

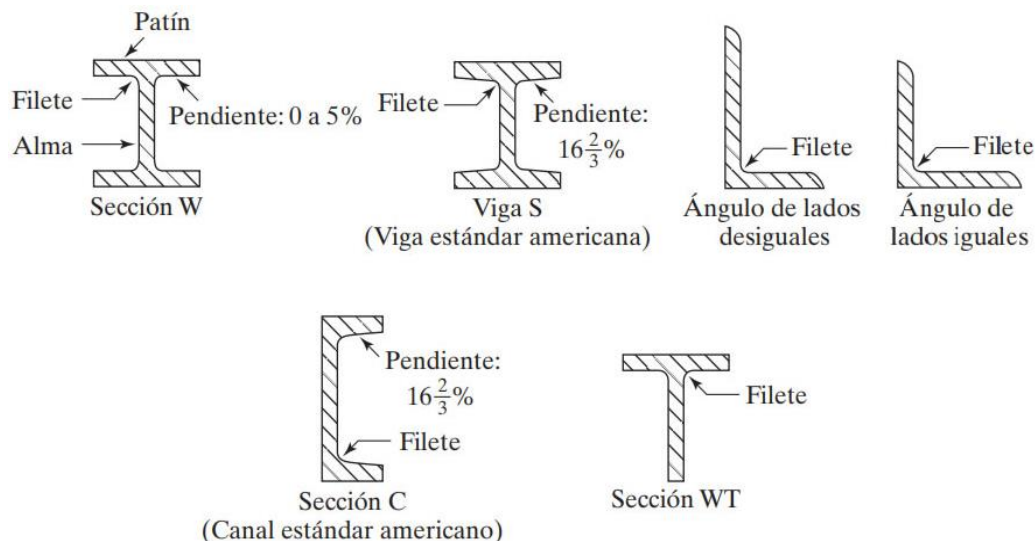
Entendiéndose esta gran cantidad de ventajas frente a las pocas desventajas que posee el acero, la humanidad ha desarrollado con justa razón y de manera acelerada su implementación como tecnología constructiva, llegando a encontrarse fácilmente empresas que han apostado con toda tranquilidad a la venta de perfiles y placas que cubran la demanda de este material, además de la teoría científica que ha abarcado la gran mayoría de requisitos que deben ser analizados y afrontados en el estudio y diseño que requiera presentar el especialista.

### **2.2.1. LOS PERFILES DE ACERO**

Es evidente que el acero posee características superiores a otros materiales que se han utilizado en el sector de la construcción hasta estos tiempos, pues las más referenciadas han sido: el peso, alta resistencia y facilidad de moldeado. En base a estudios, se han desarrollado distintas geometrías para “secciones transversales” con las que se fabrican los elementos estructurales, que han permitido aprovechar de manera eficiente esta combinación principal de ventajas, disminuyendo al máximo la necesidad de utilizar una sección “maciza” como las obtenidas en fundiciones de elementos de hormigón armado.

Dentro del mercado de acero estructural, encontramos distintas geometrías que muestran cómo se presenta una configuración del acero correspondiente a los esfuerzos que se desarrollan dentro del elemento solicitado, y es evidente que con pocas cantidades de este material se logra justificar la respuesta del elemento a fuerzas que pueden dañarlo, generándose perfiles cuya sección transversal se compone de trazos definidos con “láminas o placas” de espesores conocidos, dejándose bien sea el centro o los lados del elemento de forma hueca. En otras palabras, si realizamos un corte transversal a uno de estos elementos, encontramos que su forma parece la de una letra o figura conocida, y es así como se los presenta

dentro de la literatura del acero y de catálogos de los productos que se venden en el mercado, con letras y descripciones que representen lo más certero posible la forma de la sección del elemento, esto porque a pesar de ciertas secciones que son una forma conocida, tiene variantes en los moldes. Un ejemplo es el perfil tipo “I”, pues descomponiendo su estructura geométrica en “alas o patines” y “alma”, se puede observar que las vigas estándar americanas (S) y las vigas de patín ancho (W) tienen formas que influyen en el comportamiento del elemento (McCormac & Csernak, 2012).



**Figura 15.** Perfiles laminados de acero.  
Fuente: (McCormac & Csernak, 2012).

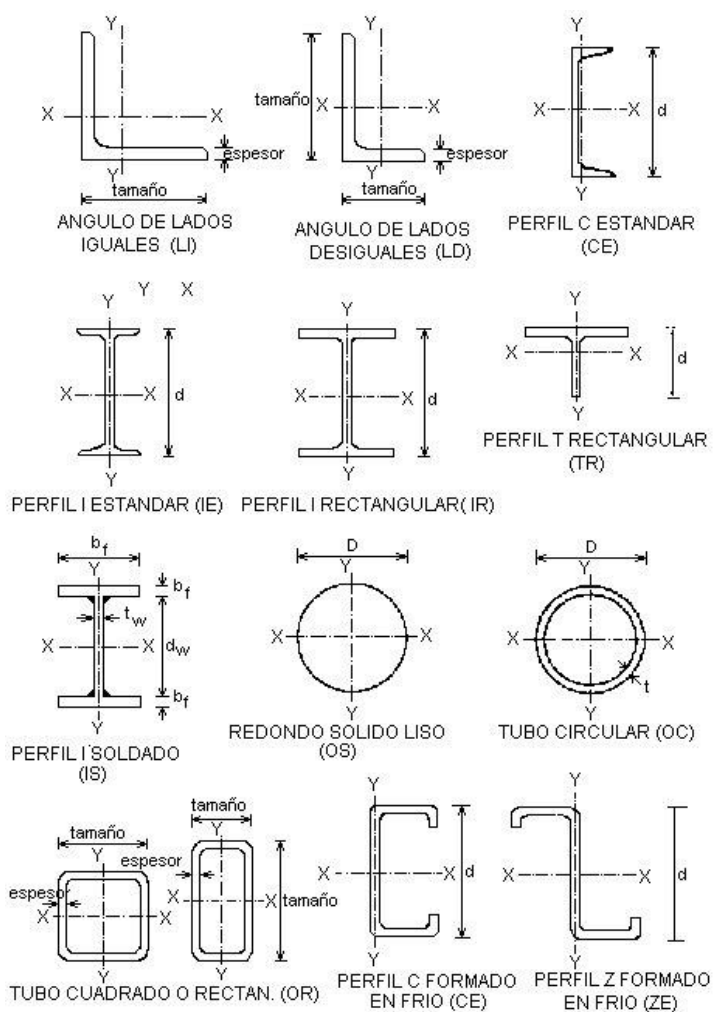
Cada empresa, conforme seguía creciendo el mercado, implementaba sus perfiles con un catálogo donde presentaban al público sus modelos y su nomenclatura, pero debido a una fuerte variación de perfiles con calidades de acero y dimensiones muy pronunciadas entre fabricantes, en el año 1896 aparece la Asociación Estadounidense de Fabricantes de Acero, ahora llamada AISI (Instituto Americano del Hierro y el Acero) quienes hicieron los primeros esfuerzos en estandarizar los perfiles; hoy en día, el estándar ha permitido reducir considerablemente esas variantes entre perfiles del mismo tipo y medida, controlando también las dimensiones con las cuales pueden contar los distintos productores (McCormac & Csernak, 2012).

Durante las primeras producciones de elementos estructurales, el control de las medidas y de la geometría de la sección fue una tarea muy complicada de realizar, pues la tecnología todavía no alcanzaba el nivel suficiente de precisión para lograr las medidas requeridas, y esto debido a que las primeras fábricas contaban con maquinaria manual y mecánica, cuya “calibración” debía de realizarse con personal especializado en el tema, además de la inexistencia de computadoras y sistemas electrónicos capaces de almacenar información y de comunicarse con dichas máquinas a través de sensores de precisión. La única manera de representar los tipos de perfiles era a través de la “tipografía” lograda en las máquinas de escribir, que luego debía de ser interpretada por el personal para proceder con los ajustes.



Con el desarrollo de las computadoras, este proceso se automatizó dentro de la "Informática", siendo necesario crear un lenguaje alfanumérico capaz de ser reconocible por el sistema, para que las máquinas sean más fáciles de programar y se ajusten a las medidas de manera automática, lo cual ayudó a implementar más estándares en la producción de las máquinas de moldeado y de la nomenclatura que hace referencia a los perfiles y sus medidas (McCormac & Csernak, 2012).

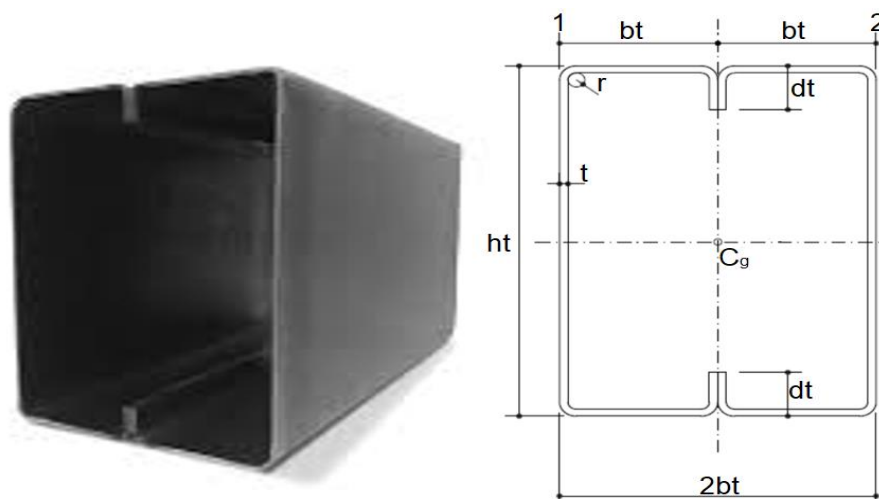
Como se ha mencionado, el acero tiene la gran ventaja de ser moldeable y esto se cumple no sólo ante la presencia de calor ni por el método para formarlo. Gracias a esta gran ventaja y a la forma que presentan ciertas geometrías en los perfiles, existen tres maneras de conseguirlos: laminados en caliente, doblados en frío y contruidos. Dependiendo del método con el que se logre obtener un perfil, varía considerablemente las características del elemento tanto en: resistencia, dimensiones y costo; lo cual, a su vez, ha permitido tener una gran cantidad de posibilidades que puede utilizar el diseñador dependiendo de las variables consideradas en un proyecto (Salmon, Johnson, & Malhas, 2009). A continuación, se muestran algunos perfiles y el método con el cual pueden ser fabricados:



**Figura 16.** Perfiles de acero y su procedencia.  
Fuente: (Arancibia, 2006).



Muchas estructuras suelen presentar diseños que requieren de elementos cuyas dimensiones no existen a la venta o sobrepasan de las existentes, pero al existir las placas de acero, el encargado de la obra suele recurrir a la adquisición de placas cortadas a la medida, con las cuales construye los perfiles contemplados en el diseño. Otra causa de utilizar perfiles contruidos es la ventaja de obtener elementos de igual o mayor resistencia a menor precio, y en esta tendencia se utiliza bastante los perfiles laminados al frío como los canales tipo C y variantes para formar perfiles tipo I o tubos rectangulares, y los laminados en caliente como los tipos I para formar perfiles T, ángulos para formar un tipo T o doble ángulo, y los mismos perfiles estándar tipo C para construir perfiles tipo I o tubos rectangulares. La intención principal de fabricar este tipo de perfiles es el de dar solución ante cualquier inconveniente que pueda presentarse debido al "stock" de material que los fabricantes presentan en el mercado, acorde a los estándares vigentes, pues es de suma importancia visualizar el criterio ingenieril que el profesional invierte en el desarrollo de la alternativa, luego de haber cubierto todas las exigencias presentes en el proyecto (McCormac & Csernak, 2012).



**Figura 17.** Perfil tipo tubo rectangular de acero formado por dos perfiles tipo C con alas rigidizadas, también conocidos como "correas".  
Fuente: (del Río & Busnelli, 2022).

Todo este "menú" de perfiles de acero sólo existe debido a la gran cantidad de aplicaciones que se le puede encontrar en la vida cotidiana, pues recordando todas sus ventajas como material, el mundo tecnológico conformado por sus ramas técnicas, ha creado un mercado fortalecido de la alta demanda expresada por la gente que lo utiliza en su diario vivir, ya sea por un galpón, por un edificio, por un cajón de camión, por una carrocera, entre otros, convirtiéndose en un material excelente para el montaje de cualquier objeto.

### 2.2.2. LAS PLACAS DE ACERO Y SU TEORÍA

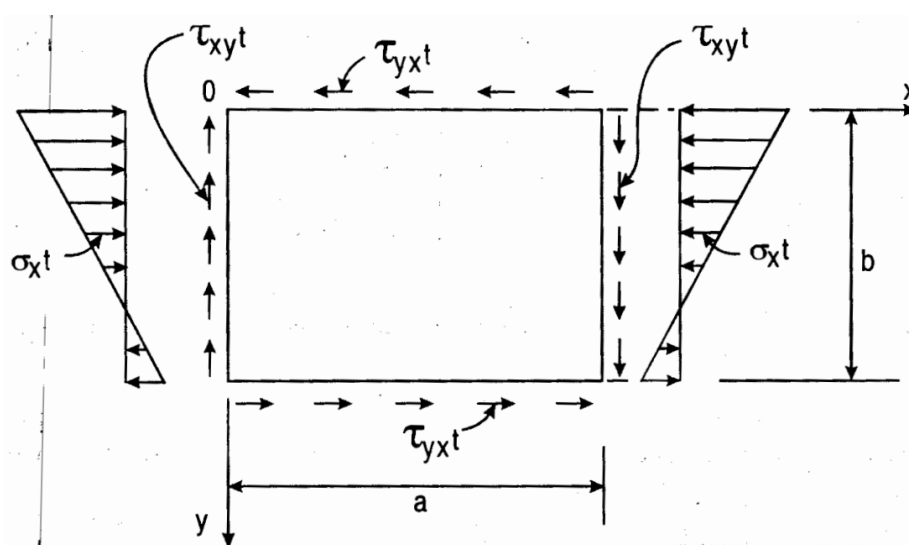
Dentro de esta gran cantidad de aplicaciones del acero, existe una más referente a las placas de acero, pues de igual manera se utilizan bastante en el montaje de estructuras metálicas o, inclusive, en el moldeado de ciertos perfiles donde las empresas recurren a procesos como: el doblado en frío y la construcción de perfiles.

Esta versatilidad ha permitido que sea un elemento muy comercializado en el mercado y es por su configuración geométrica de forma plana, siendo fácil recurrir a procesos como: cortes, dobleces, impresión de piezas, etc.

Las Placas o Planchas de Acero son elementos fabricados en forma plana (superficie), con distintos espesores que influyen en su resistencia y facilidad de trabajo, cuyo propósito es el de cubrir cualquier necesidad utilizándolos como placa estructural o cómo materia prima para el moldeado de otras piezas (Fiorella Representaciones S.A.C., 2022).

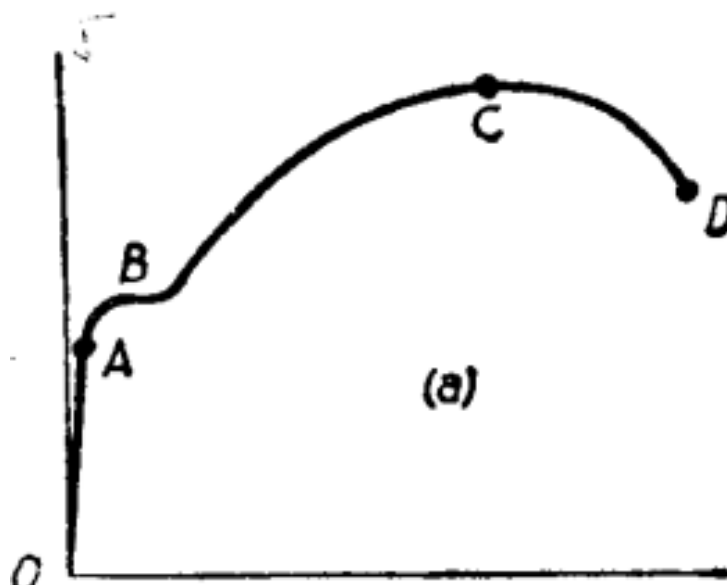
En realidad, todo perfil estructural, aunque haya sido fabricado mediante laminado en caliente para obtener una sola pieza de acero uniforme, puede descomponerse teóricamente en un arreglo de elementos planos o "placas de acero" unidas entre ellas a lo largo de sus bordes, donde la transmisión de los esfuerzos resultantes de la aplicación de cargas externas se efectúa a través de estas conexiones. Es así como, dependiendo de la carga externa, ciertas placas del perfil se encontrarán a tensión, otras a compresión y otras a un efecto combinado de "esfuerzos no uniformes" (De Buen López De Heredia, 2000).

De hecho, el motivo mediante el cual se ha creado las geometrías de los elementos presentados anteriormente responde a la búsqueda de crear una distribución bastante aproximada de cargas paralelas al plano de una placa de acero aplicadas en sus bordes, donde se busca absorber toda la energía de las fuerzas externa a través de la resistencia de cada una de las placas cuyo espesor influye en esa capacidad de absorción. La siguiente imagen (figura 18) muestra el alma de una viga representada como una placa de acero de base  $a$ , altura  $b$  y espesor  $t$  soportada en los cuatro lados, la cual se encuentra sometida al caso más general de fuerzas que se puede encontrar por combinación de una fuerza cortante (la cual se ha idealizado como uniforme) y una fuerza normal considerada como "flexión" en ambos lados de la placa (idealizada como lineal) (De Buen López De Heredia, 2000):



**Figura 18.** Condición general de carga de una placa tipo "alma de viga".  
Fuente: (De Buen López De Heredia, 2000).

Como se puede ver en la figura 18, estos esfuerzos recibidos por la placa se transforman en un arreglo de tensiones y compresiones internas que buscan la manera de alterar la composición espacial y molecular de la placa, tratando de que ésta ceda con deformaciones importantes, sometiendo los rangos definidos de la resistencia del acero que son: el elástico, de fluencia y elasto-plástico (en este último se encuentra el límite de rotura). La figura 19 trata de la curva de ensayo del acero, donde el eje X representa la deformación, sea métrica o unitaria, y el eje Y la fuerza o esfuerzo dependiendo de si se considera o no las dimensiones de la muestra (Timoshenko, 1957):



**Figura 19.** Curva de ensayo del acero.  
Fuente (Timoshenko, 1957).

En esta curva se pueden visualizar algunos puntos marcados. La curva OABCD es la relación entre la fuerza o esfuerzo que se está aplicando al acero con la deformación que sufre en respuesta al incremento de la fuerza externa. En el tramo O-A se puede observar una relación lineal entre la fuerza y la deformación la cual responde a la "Ley de Hooke", definiéndose así este rango como "elástico". Una vez pasado este rango, la relación lineal se pierde aumentando considerablemente las deformaciones, esto sin necesidad de aumentar la fuerza externa; el punto B representa el "límite de fluencia" del acero. Se puede decir que cualquier fuerza que se mantenga alrededor de B generará deformaciones permanentes en el elemento de acero, pero una vez llegada a una deformación límite, el acero recupera parte de su resistencia siendo necesario aumentar la fuerza externa para deformarlo aún más. La curva que se obtiene superado el rango de fluencia del acero responde de una manera no lineal, puesto que no se puede establecer una constante de elasticidad según la Ley de Hooke, es así que el tramo B-C-D se puede considerar como rango elasto-plástico, pues poco a poco va disminuyendo la necesidad de incrementar la fuerza para producir deformaciones en el elemento, llegándose al punto C conocido como "límite de rotura". luego de este punto, el elemento se parte creando un alivio al equipo de medición que sigue desgarrando en dos la pieza de

acero. El área cubierta por toda la curva se considera como la energía absorbida por el acero durante el ensayo (Timoshenko, 1957).

Este comportamiento del acero se refleja cada vez que el material recibe fuerzas naturales del exterior, tratando de transmitir las al suelo a través de las conexiones entre elementos, donde aquellos miembros más importantes comienzan a trabajar absorbiendo la energía del fenómeno natural, lo cual genera deformaciones importantes en éstos. Cuando la edificación es revisada por un grupo de especialistas, comienzan a evaluar la respuesta de la estructura en búsqueda de estas deformaciones y posibles fracturas que pudieron aparecer debido a esfuerzos que superaron los límites de algunos elementos.

### **2.2.3. LA ESBELTEZ: PROBLEMAS CON EL ACERO (CONTINUACIÓN A LA TEORÍA DE PLACAS)**

Hasta el momento se ha visto que las placas absorben la fuerza externa transformándola en una combinación de tensiones y compresiones internas, tratando de que estos esfuerzos sean paralelos al plano de la placa para aprovechar todo el acero introducido en su volumen, dando principal importancia al espesor de la misma, pero esto ha generado una debilidad del elemento frente a una de estas dos configuraciones de carga: la compresión.

El acero, aunque tenga un comportamiento de abarcar lo más uniforme posible aquellos espacios donde se lo coloque en estado líquido, debido al llenado, cambio de temperatura, aplicación imperfecta de moldeo, entre otros, se crean pequeñas imperfecciones y tensiones internas en el material, haciéndolo susceptible a tendencias de deformación cuando se lo somete a fuerzas externas, además el acero como cualquier otro material, busca la manera de acomodarse aunque se encuentre en estado sólido cuando se aplican fuerzas de compresión. En esta tendencia, cuando se aplican estas fuerzas paralelamente al plano de la placa en su perímetro, quedan libres las caras de la placa, dejando la posibilidad de que el acero se expanda en la dirección normal a su plano, claro que también podría deberse a una tendencia de flexión producida por la mezcla entre la compresión aplicada en el espesor de la placa con las tensiones internas producto de la fabricación del elemento, esto sin olvidar que en realidad existen otras combinaciones de carga en las que también interviene una tensión externa que acompaña a la compresión (De Buen López De Heredia, 2000).

Este comportamiento es un estado inestable del material que, evidentemente, también tiene que ver con las dimensiones y espesor de la placa que generan un volumen de acero el cual, mientras más tratado haya sido para ocupar dicho volumen, más influirá en su calidad dentro de su resistencia; por otro lado, aunque el espesor sea una dimensión casi insignificante frente a las medidas laterales de la placa, se crea una cara casi rectangular entre el espesor y los laterales, que es justamente donde se distribuye la carga en forma de esfuerzos hacia el material. Si se trata de recurrir al cálculo de la inercia de dichas caras respecto al eje paralelo al plano de la placa, es un cálculo que refleja una "incapacidad" de presentar resistencia geométrica por el espesor, porque la fórmula entrega un valor tendiente

a cero. Frente a esta imposibilidad de describir de manera precisa la respuesta de la placa a través de la inercia, aparece esta relación entre el espesor y el largo o el ancho ( $t/a$  o  $t/b$  dependiendo del cálculo), que permite introducir el concepto de “Esbeltez del Elemento” en términos de cuan robusto se presenta el acero (De Buen López De Heredia, 2000).

Es muy importante entender este concepto de esbeltez, porque todo lo descrito anteriormente se expresa a través de otro término que define la falla detrás de las placas de acero: el “Pandeo de Placas”. Esta falla es muy perjudicial debido a que genera un daño muy prematuro de elementos de acero cuando sus secciones transversales se distorsionan considerablemente por el pandeo local de sus placas internas, reduciendo abismalmente la capacidad de absorción de energía del elemento estructural (De Buen López De Heredia, 2000).

Para poder estimar la capacidad de una placa ante la falla por pandeo, se ha desarrollado una ecuación que permite calcular el esfuerzo ante el cual su estabilidad se vuelve crítica, la cual involucra características importantes de la placa como: el módulo de elasticidad (Módulo de Young en el rango elástico) del acero ( $E$ ), el coeficiente de Poisson del acero ( $\mu$ ), la relación espesor/(ancho o largo) ( $t/b$  o  $t/a$ ) y el “Factor de Placa” ( $k_p$ ) que depende de la “Relación de Aspecto” ( $\alpha_p=a/b$ ). La forma general de la ecuación relacionada a la figura 18 es la siguiente (De Buen López De Heredia, 2000):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 k_p \quad (1)$$

Esta ecuación 1 debe aplicarse analizando estrictamente la configuración de cargas y de soportes ante la cual se encuentra esforzada la placa, pues dependiendo del caso más aproximado según la literatura, la expresión presenta distintas variantes, además de ser necesario la comprobación del rango en que se desarrolla el pandeo del elemento, definiéndose dos formas de éste que son: el “Pandeo Elástico” y el “Pandeo Inelástico”. Para el segundo caso, la forma de la ecuación es la siguiente (De Buen López De Heredia, 2000):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \sqrt{\eta}}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 k_p \quad (2)$$

Donde:

$$E_t = E \cdot \sqrt{\eta}$$

Este último término representa una forma efectiva del Módulo de Young en el rango inelástico llamado Módulo de Young tangencial o instantáneo  $E_t$ , el cual depende de la pendiente de la recta tangente en un punto de la curva de resistencia de cualquier material. La ecuación permite relacionar al módulo tangencial con el módulo elástico mediante un factor  $\eta$  cuyo rango de valores es entre 0 y 1, donde si  $\eta=1$ ,  $E_t=E$  y la ecuación regresa al estado de pandeo elástico. Sin embargo, esta es una leve aproximación, pues existen otras formas de representar esta relación con el fin de acercarse lo mejor posible a la realidad del rango inelástico del acero,

lo cual también incurre en un problema de cálculo, pues el proceso se vuelve muy complejo por la necesidad de buscar el valor correcto de  $\eta$  que permita estimar de una manera muy aproximada ese límite crítico de esfuerzos, siendo necesario inclusive en recurrir a métodos iterativos (Bleich, 1952).

Existen otras formas de calcular el esfuerzo crítico si el pandeo se inicia en el rango inelástico, pero esto dependerá así mismo de la condición de cargas mediante las cuales se está evaluando la capacidad de la placa, pues dependiendo del caso, existen ecuaciones simplificadas que permiten corregir el esfuerzo crítico a valores muy cercanos de la realidad; estas ecuaciones las podemos encontrar en las normas de diseño de estructuras metálicas, donde se especifican los casos de cargas más relevantes (De Buen López De Heredia, 2000).

Regresando a la esbeltez, es muy importante tener una medida que permita evaluar al elemento según sus dimensiones para poder determinar qué tan esbelto es. En las placas se observa una gran intervención de las medidas de la lámina para poder determinar el esfuerzo crítico que representa su límite de resistencia, a través de factores de aspecto, de relaciones entre el espesor con las dimensiones de la lámina y factor de la placa, pero en las columnas o “elementos”, todos estos factores se resumen en la “Relación de Esbeltez”, donde intervienen otras variables relacionadas a las dimensiones de los perfiles y su longitud, siendo posible entender cómo influye que un elemento sea o no sea esbelto con relación a la resistencia que entrega por esta condición. La fórmula anterior del esfuerzo crítico enfocada a las placas no es sino una expresión derivada de la siguiente ecuación conocida como la “Ecuación de Euler” (Bleich, 1952):

$$P_E = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l^2} \quad (3)$$

A la cual, si se aplica de la misma manera un factor de corrección para obtener el módulo de Young tangencial en el rango inelástico, y se procesa la inercia (I) para conseguir el término de la relación de esbeltez y pasar de cargas a esfuerzos, se obtiene la siguiente ecuación del esfuerzo crítico de Euler de una columna sometida a compresión:

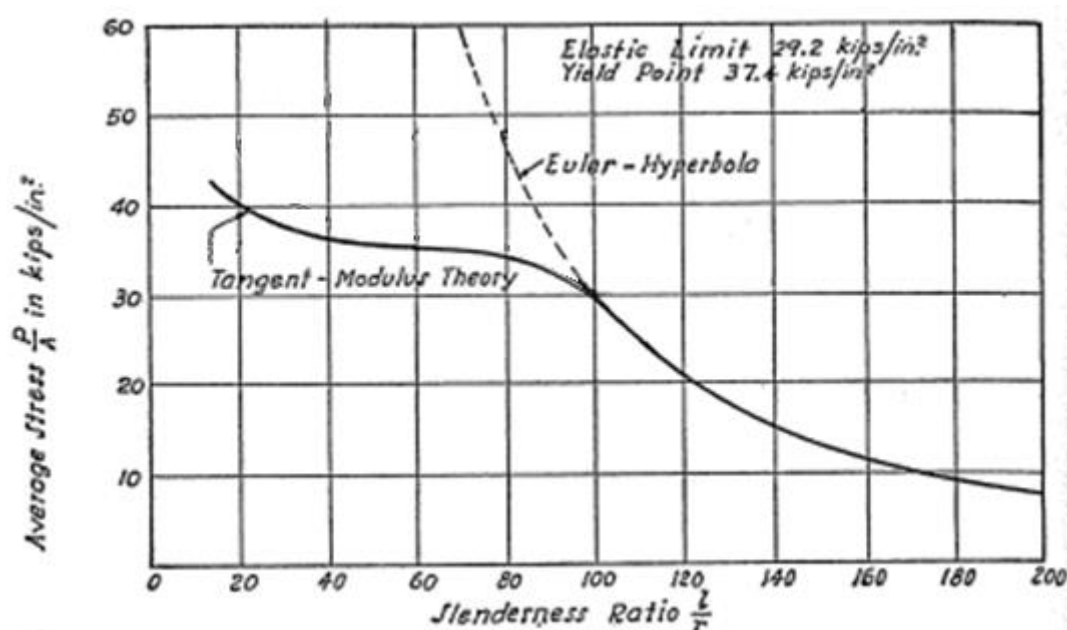
$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \eta}{\left(k l/r\right)^2} \quad (4)$$

Donde:

$$E_t = E \cdot \eta$$

De la ecuación 4, así mismo  $\eta$  toma valores entre 0 a 1,  $k$  es la longitud efectiva del elemento que depende de las condiciones de apoyo y  $l/r$  es la relación de esbeltez de la columna. Aquí se puede observar que existe una relación más lineal entre el módulo tangencial y el módulo elástico, donde si  $\eta=1$ ,  $E_t=E$  (rango elástico); esta relación recordando a la asumida en la ecuación 2 difiere en el método de aproximación a la tendencia inelástica con la cual varía este módulo. Graficando la

ecuación del esfuerzo crítico de Euler vs la relación de esbeltez, se obtiene la siguiente curva (Bleich, 1952):

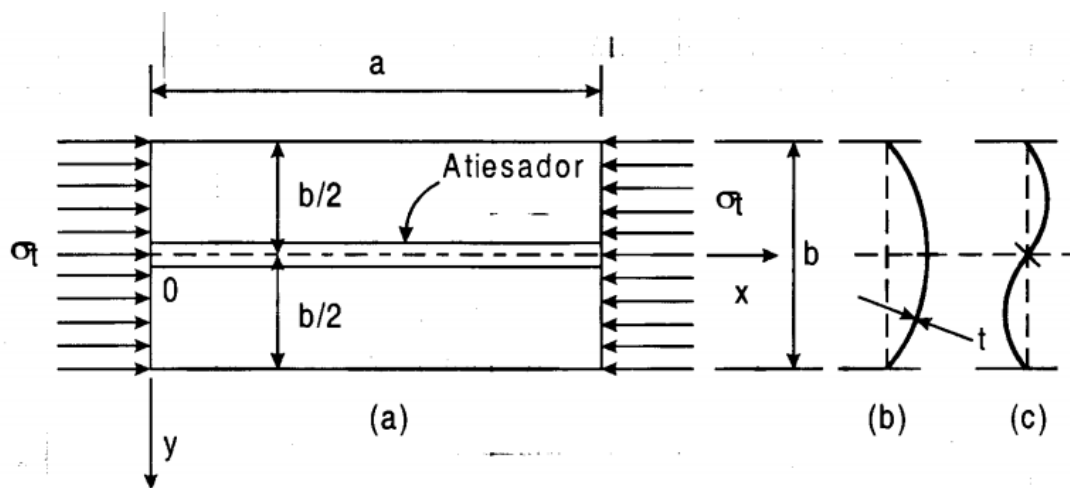


**Figura 20.** Curva de esfuerzos vs la relación de esbeltez de una columna.  
Fuente: (Bleich, 1952).

De la curva es claro que mientras mayor sea la relación de esbeltez, más esbelto será el elemento y, por ende, su esfuerzo resistente disminuye siendo más vulnerable al pandeo, pero debido al límite elástico del acero que es donde justamente termina la constancia del módulo de elasticidad, en valores bajos de la relación de esbeltez (entre 30 y 90) el esfuerzo se vuelve estable en un valor que puede definirse, pues es necesario que el módulo de Young comience a variar; esto en la curva de cierto modo nos da a entender que independientemente del valor de la relación de esbeltez entre el rango de 30 a 90, aproximadamente se obtiene la misma resistencia si se comparan varios elementos que, debido a su sección transversal y longitud, entregan relaciones de esbeltez entre estos valores, si los elementos responden a la misma calidad de acero. Cabe recalcar que la curva mostrada es para un acero cuyo límite elástico es de 29,2 kips/in<sup>2</sup> (2060 Kg/cm<sup>2</sup>) (Bleich, 1952).

En base a esta curva, podría decirse que en una placa de acero el comportamiento sería muy similar, donde la esbeltez queda más representada por las dimensiones de la placa. De igual manera, si la placa es muy esbelta la resistencia se vería muy afectada disminuyendo considerablemente, además de ser muy susceptible al pandeo, pero mientras menor sea su esbeltez, la resistencia aumenta hasta un cierto límite donde aun cuando se siga disminuyendo la esbeltez, la resistencia llegaría a un valor casi estable. Para lograr obtener esta mejora en la esbeltez de la placa, se procede a utilizar rigidizadores, disminuyendo como una especie de discretización el espacio de la placa en la cual se analiza su límite crítico; en otras palabras, se reducen las dimensiones a y b que intervienen en la ecuación 1. A la

par de esta consideración, se debe comprobar que la resistencia de los rigidizadores tanto en inercia como en pandeo sea superior a la de la placa para asegurar que la placa pandee o falle primero antes que los rigidizadores (De Buen López De Heredia, 2000).



**Figura 21.** (a) Placa rigidizada. (b) Comportamiento de la placa sin rigidizador (o defectuoso). (c) Comportamiento de la placa con un rigidizador adecuado.  
Fuente: (De Buen López De Heredia, 2000).

El procedimiento de cálculo para la resistencia de la placa es el mismo, considerando el nuevo ancho o largo dependiendo del arreglo de los rigidizadores y siguiendo la misma regla de verificar las condiciones de borde para trabajar con la ecuación 1. La única diferencia es la comprobación obligatoria de la resistencia de los atiesadores para garantizar que el comportamiento de la placa sea el representado en la figura 21 (c) (De Buen López De Heredia, 2000).

En base a toda esta teoría, se puede decir que el objetivo detrás de este desarrollo es el de mejorar la respuesta de las estructuras metálicas ante cualquier fenómeno externo, evitando que se produzcan pérdidas humanas por un fallo de cálculo o criterio que puede darse inclusive por la ausencia de un profesional preparado, pues ya se ha visto que el pandeo es un problema muy grave si no se lo considera en el diseño de la estructura debido a la reducción enorme de resistencia y de absorción de energía provocando que los elementos fallen prematuramente.

### 2.3. MUROS DE CORTE DE PLACAS DE ACERO (SPSW)

Recordando lo tratado acerca de los muros de corte, se ha visto que estos muros están diseñados para responder ante sollicitaciones de corte, donde la falla del panel interno es característico de una configuración tensión-compresión en la que se transforma el esfuerzo repartido en sus bordes, pues al encontrarse envuelto del pórtico a través de las columnas y vigas, si la condición de cargas más grave ante la cual toca diseñar una edificación, es un sismo, el edificio se ve sollicitado horizontalmente, donde las cargas se transmiten de la misma manera hacia las vigas, creándose una respuesta de corte en el suelo.



El estudio y diseño de una edificación ante solicitaciones de cargas por sismos se lo realiza idealizando que la única forma en la que se presentan es horizontal, las cuales se representan como una carga repartida en la altura del edificio desde el nivel del suelo, creando una respuesta por empotramiento en el suelo llamada corte basal (Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, 2014). La interacción entre la acción sísmica que se obtiene como producto de la aceleración del suelo y de la masa del edificio, con la reacción del suelo que es el corte basal, se distribuye a través de todos los elementos estructurales sometiéndolos a acciones de: tensión, compresión, flexión, flexo-compresión, corte, etc. Todas estas acciones deforman los pórticos de tal manera que se pierde su configuración rectangular, desviando vigas y columnas provocando una reducción de una de las diagonales y un alargamiento de la diagonal contraria en el espacio del pórtico, creándose una evidente configuración de corte que puede ser intervenida con la colocación de un muro para absorber esa acción (Bonett Díaz, 2003).



**Figura 22.** Fallo de un edificio por piso blando (derivadas excesivas en la planta baja).  
Fuente: (Bonett Díaz, 2003).

Dentro del diseño de estructuras, se ha abarcado este tema con el fin de perfeccionar a la máxima eficiencia la estimación de cargas presentes en el corte, además de involucrar comprobaciones y procedimientos de cálculo para generar el mejor diseño sismorresistente de los muros. En las construcciones de hormigón armado, estos criterios de diseño se han desarrollado de manera más profunda por los años de incursión con este material, llegando a cubrirse la mayoría de las posibilidades de carga que puede llegar a afectar el muro (American Concrete

Institute ACI, 2019). Por otro lado, respecto al acero todavía se tiene muchos campos por descubrir, aunque su avance y estudio ha logrado solventar de igual manera la mayoría de los casos que pueden presentarse y todo gracias al interés invertido por parte de la comunidad científica correspondiente al sector de la construcción (Crisafulli, 2018).

Hoy en día, dentro de la literatura de las estructuras en acero, existe el desarrollo de diseño de muros de corte de placas de acero “SPSW”, donde ya no es necesario combinar una estructura de acero en vigas y columnas con paredes de hormigón, pues una diferencia clara entre usar muros de hormigón y muros de placa de acero es el grosor que influye considerablemente en el aprovechamiento del espacio (Crisafulli, 2018).

El acero es un material que poco a poco va ganando campo en las estructuras civiles, pues la humanidad ha encontrado mejores condiciones de servicio y comodidad como: el espacio, la arquitectura, la resistencia, el montaje; y su popularidad se vuelve cada vez más evidente, donde de la misma manera las normas que controlan la correcta intervención de diseño siguen en aumento.

### **2.3.1. DEFINICIÓN DE MUROS SPSW**

Los muros de acero han comenzado a ganar espacio dentro del montaje de estructuras metálicas reforzadas, donde el acero como material va sustituyendo al concreto con gran velocidad, pues la evidencia de las ventajas cada vez sale más a flote con el levantamiento de muchos edificios que han decidido apostar por el acero, a la vez de reemplazar el uso de mampostería de concreto en las paredes con placas de acero.

Los Muros de Corte de Placa de Acero conocidos por sus siglas en inglés como SPSW (Steel Plate Shear Walls) son muros encargados de absorber o soportar cargas transmitidas por los elementos de borde (vigas “HBE” y columnas “VBE”) que conforman los pórticos de la estructura, las cuales se distribuyen como esfuerzos cortantes a lo largo de los bordes de la placa de acero que constituye el alma del muro, sometiéndola a trabajar ante el caso de “Pandeo por Corte en Placas” y reduciendo la necesidad de solicitar a las vigas y columnas para que trabajen únicamente dentro de su rango elástico (Crisafulli, 2018).

Este sistema de muros se diseña bajo la consigna de exigir que la placa de acero trabaje primero, comprobando que la resistencia de los elementos de borde sea mayor a la de la placa, con lo que se garantiza que las vigas y las columnas se mantendrán en su rango elástico mientras la placa se encuentra absorbiendo energía en su rango de fluencia. Todo esto lleva a que, una vez obtenidas las dimensiones de la placa, se haga referencia a una lámina “esbelta”; la única y máxima condición a la que se admite intervenir a los elementos de borde es a la formación de las “Rótulas Plásticas” en las vigas (Crisafulli, 2018).



*Figura 23.* Ejemplo de muros SPSW en un edificio en construcción.  
Fuente: (Crisafulli, 2018).

El criterio de diseño de los muros de placa de acero contempla esta máxima alternativa de intervención de las vigas, pues muchas veces es muy difícil garantizar que en un perfil de acero con su sección completa desarrolle rótulas plásticas en la posición adecuada con respecto a su longitud; para esto se incluye el diseño de “Secciones Reducidas de la Viga” (RBS) que es reducir la longitud de los patines en un perfil tipo “I”, el cual es el más común para el uso en vigas (Crisafulli, 2018).

Como se ha explicado anteriormente, estos muros vienen en desarrollo desde hace muchos años, donde la necesidad de levantar el edificio aprovechando al máximo el espacio desarrollado y otras exigencias, ha promovido una investigación acelerada con el fin de cubrir la demanda de diseños normados en acero, a la par de innovar con nuevas variantes de este tipo de muro.

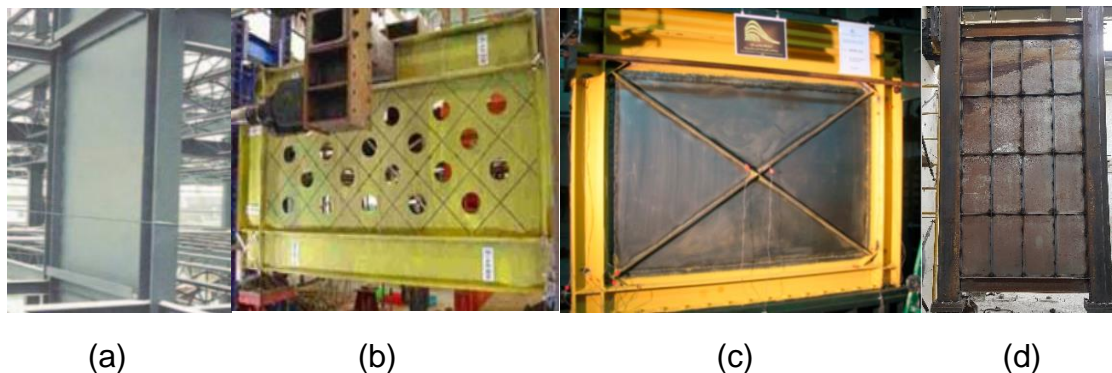
### **2.3.2. MODELOS DE MUROS SPSW**

El crecimiento acelerado de edificios levantados en acero y de investigaciones del comportamiento de este elemento estructural, lo ha llevado a impactar en la comunidad constructora, donde el desarrollo de innovadoras ideas con variantes del modelo base, se han hecho presentes en las últimas generaciones; es así que hasta el día de hoy se cuenta con cuatro modelos de muros SPSW: muros de placa sin rigidizar, muros con placa perforada, muros de placa con rigidizadores diagonales y muros de placa con rigidizadores en cuadrícula.

Cada uno de estos muros ha sido desarrollado con el fin de representar un aporte a la resistencia total de la estructura metálica, buscando la manera de aliviar el trabajo de los elementos columnas y vigas para reducir el riesgo de un fallo de la edificación completa, siendo un caso extremadamente peligroso por las vidas que puede vulnerar (Crisafulli, 2018). Dentro de los modelos desarrollados, se tienen los siguientes:

- **Muro SPSW de placa sin rigidizar (modelo base).** – Este modelo de muro es el primero contemplado en la historia como la idea inicial de los muros SPSW, pues en base a un montaje tan simple de colocar una placa en el espacio del pórtico conformado por columnas y vigas, se ha desarrollado importantes redacciones que describen el comportamiento de la placa colocada en este sitio de la estructura (Lubell, Prion, Ventura, & Rezai, 2000).
- **Muro SPSW de placa perforada.** – Es el segundo modelo presentado de muros SPSW, donde la idea de esta innovación fue la de incluir importantes detalles de diseño de los muros SPSW, evaluando el comportamiento de la placa al generar perforaciones en su plano. El investigador detrás de esta idea fue Michel Bruneau, quien también incluyó el desarrollo de secciones reducidas en las vigas del muro (RBS) y la alternativa de colocar la placa recortando las esquinas (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. I: Experimental Investigation, 2009).
- **Muro SPSW con rigidizadores diagonales.** – Debido a la necesidad de mejorar el aporte de la placa en la reducción de solicitar la resistencia de los elementos de borde, se presenta esta alternativa que acompaña un poco al concepto de arriostramientos diagonales, entendiéndose que, en el desarrollo del cortante en el panel interno del muro, las diagonales internas trabajan según la dirección del corte, sometiendo a una de estas a esfuerzos de compresión mientras que la otra diagonal trabaja en tensión. La idea rompe un poco los esquemas de anteriores investigaciones donde se habla del incremento en los costos por el uso de rigidizadores en la placa, pues dependiendo de la zona territorial, los sismos representan una amenaza de alto riesgo (Alavi & Nateghi, 2013).
- **Muros SPSW con rigidizadores en cuadrícula.** – Estudios anteriores donde se implementaron grandes evidencias del comportamiento de los muros SPSW, hicieron referencia a este modelo de muro donde consideraron seriamente el aporte de resistencia a la placa de acero frente a los costos que representa utilizar esta idea, pues la teoría desarrollada para el cálculo de la resistencia de una placa de acero ya existía en aquellas épocas, donde también se explica cómo implementar rigidizadores a las placas de los perfiles estructurales para evitar la falla prematura de estos elementos por el pandeo local, que tiene que ver con la esbeltez relacionada al espesor de los componentes de un perfil (De Buen López De Heredia, 2000). Es por esta razón que los muros de corte de placa de acero (SPSW) se implementaron para reducir la sollicitación de los elementos de borde, pues, según la teoría de placas, los perfiles pueden descomponerse en placas de acero para analizar su resistencia y evitar el apareamiento del pandeo que es una falla muy grave en el acero. Este problema evidentemente se encuentra presente en el panel de acero que se coloca en el alma del muro, siendo aún más posible el desarrollo de este

modelo de muro que responde al “Pandeo de Placas por Esfuerzos Cortantes”, pero nuevamente la iniciativa permanecía dormida debido a la respuesta de los modelos anteriores y de una comparación teórica en el impacto económico que representa el uso y armado de los rigidizadores (Crisafulli, 2018).



**Figura 24.** Muros SPSW: (a) placa normal, (b) placa perforada, (c) placa con rigidizadores diagonales y (d) placa con rigidizadores en cuadrícula.  
Fuente: (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, 2009), (Alavi & Nateghi, 2013).

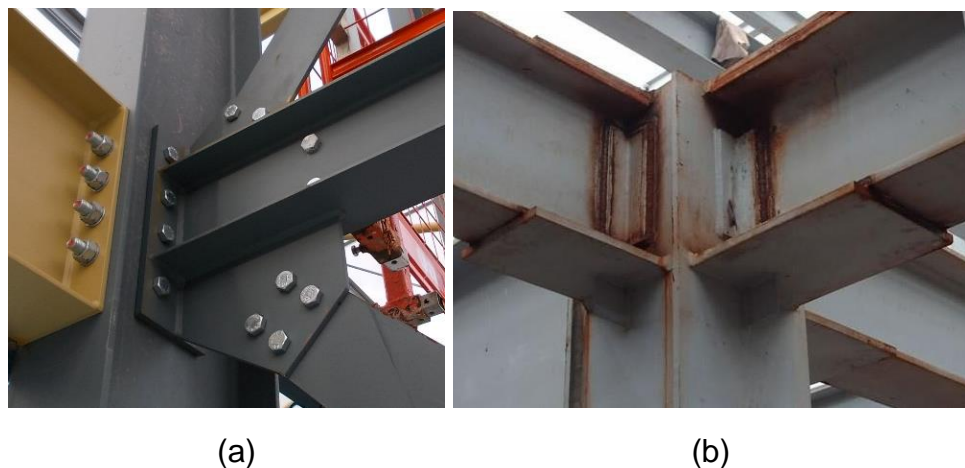
Todo este desarrollo ha sido con el fin de continuar implementando sistemas que respondan de manera más eficiente a la exigencia de servicio de la humanidad, frente a sus labores diarias, sus comodidades, diferentes perspectivas de espacio y seguridad de vida ante la aparición de cualquier fenómeno natural, donde una vez más se evidencia que los sismos representan una de las fuerzas más destructivas que aparece con más frecuencia.

## 2.4. CONECCIONES ENTRE ELEMENTOS DE ACERO

La mayoría de los inventos realizados por el hombre responde a una configuración de tipo “rompecabezas”, los cuales se componen de partes prefabricadas que deben ser montadas mediante la configuración prevista en el diseño y a través de un procedimiento técnico, para obtener el objeto terminado y listo para funcionar.

El acero es un material que se apega bastante a este concepto, donde la estructura del edificio se monta con el uso de piezas creadas de perfiles moldeados a la medida, respetando el diseño concebido por el ingeniero encargado quien, en el estudio previo del proyecto, realiza una cotización de productos disponibles con los cuales va dando forma al esqueleto de la edificación, acompañando aquel diseño arquitectónico que responde a las necesidades de servicio presentadas por el proyectista. Cada pieza se adquiere de las dimensiones y secciones adecuadas, y se moldea acorde a la función que va a cumplir en la estructura, adecuándola a la longitud y, de ser necesario, preparando sus extremos dependiendo de cómo se las va a conectar entre ellas, porque para lograr el montaje de todo el cuerpo de manera que la estructura quede completamente firme y la distribución de cargas sea efectiva, deben existir conexiones entre los elementos para que todo se convierta en un solo objeto; es así que las conexiones definidas para estos montajes son: las emperradas y las soldadas (McCormac & Csernak, 2012).





**Figura 25.** Conexiones: (a) empernadas y (b) soldadas.  
Fuente: (Kuang, 2018).

Como cualquier otro paso en el proceso del diseño, las juntas o conexiones entre elementos se diseñan dependiendo de la exigencia de la obra, de la disponibilidad de equipos y materiales, del personal calificado, de la facilidad de montaje y del costo de implementación, además de verificar cuál de las opciones garantiza una mejor conexión entre las piezas sin que estas fallen ante las condiciones de carga (McCormac & Csernak, 2012).

Antes de seleccionar el tipo de conexión que se utilizará en el armado, se debe estar completamente seguro de que las secciones tienen suficiente espacio como para colocar los implementos de la junta y de dónde se van a desarrollar, pues como cualquier montaje, las piezas deben de encajar a la perfección, sin generar ningún esfuerzo residual muy grave ni afectaciones al elemento que luego incurran en efectos contraproducentes de la estructura.

#### **2.4.1. CONEXIONES EMPERNADAS**

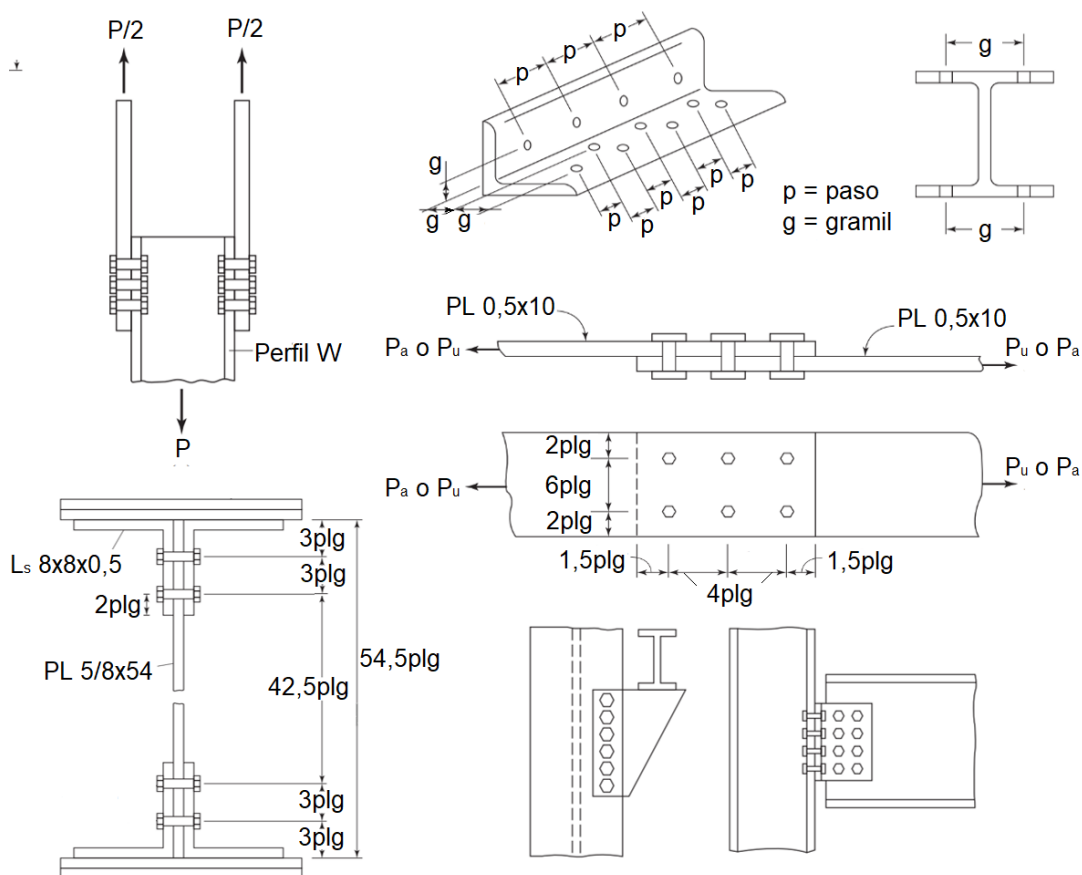
Muchas construcciones levantadas en acero han recurrido a este método de conectar elementos estructurales por su gran cantidad de ventajas de armado, pues hay ciertas estructuras que incluso requieren de un montaje casi instantáneo y seguro debido a la necesidad de cubrir una demanda poblacional, y un ejemplo muy claro son las guerras, donde la necesidad de trasladarse ha obligado el montaje de puentes tipo cercha con juntas empennadas, con el fin de llegar y preparar lo más pronto un ataque o contrataque.

Los pernos son elementos cilíndricos y macizos de acero que vienen acompañados de una tuerca y “rodela o arandelas”, los cuales permiten crear un sujetador que une dos piezas o miembros preparados con orificios ubicados adecuadamente, para la colocación del perno y su conjunto sin que genere esfuerzos adicionales ni quedando demasiado holgado, que luego del ajuste de la tuerca, crea una tensión que permite fijar dos superficies planas (McCormac & Csernak, 2012).

Una junta empennada es un arreglo de pernos distribuidos adecuadamente sobre una sección conocida, diseñada con el fin de fijar dos elementos estructurales

sometidos a cargas de análisis mediante las cuales se prevé su funcionamiento. Estas cargas de análisis se las obtiene mediante un estudio realizado de la estructura total aplicándole cargas según la zona, donde el especialista debe entender los fenómenos ante los cuales se va a enfrentar para la concepción del proyecto. Con el estudio, se debe obtener la repartición de cargas acorde a la configuración de elementos para saber ante qué esfuerzos se someterán las juntas; una vez conocida esta naturaleza, se diseña una superficie con pernos repartidos lo más correspondientes a la carga y se procede a realizar las evaluaciones pertinentes a los casos más comunes como son: tensión de pernos, corte por deslizamiento en los pernos, corte por cargas excéntricas al arreglo, desgarre de la placa, aplastamiento de los pernos y/o placa base (McCormac & Csernak, 2012).

Como los pernos sólo se ajustan una vez que crean contacto entre las secciones conectadas, la manera en que se distribuye las cargas a través de los pernos es trabajando a tensión, a la par que esto permite aumentar el rozamiento entre los elementos, ayudando a eliminar cualquier asentamiento indebido o derivas por elementos “flojos” que pueden comprometer la resistencia del perno por quedar completamente vulnerable a corte puro; esto también ayuda a que, en caso de transmitirse esfuerzos por compresión, puedan repartirse de manera uniforme a través del contacto entre las superficies, dejando el trabajo de tensión y parte del cortante a los pernos (McCormac & Csernak, 2012).



**Figura 26.** Distintas configuraciones de conexiones emperradas.  
Fuente: (McCormac & Csernak, 2012).

Esto nos refleja un pequeño comportamiento similar al hormigón armado en las juntas entre elementos, pues el concreto es un material altamente resistente a la compresión pero que necesita del apoyo de las varillas de acero para poder complementar su deficiente resistencia a la tensión, donde cada varilla recoge una parte de la tensión generada en el elemento, y lo mismo sucede en los pernos, donde cada uno recoge una parte de la tensión recibida por el sistema estructural, para luego llevarla al elemento continuo.

#### **2.4.2. CONEXIONES SOLDADAS**

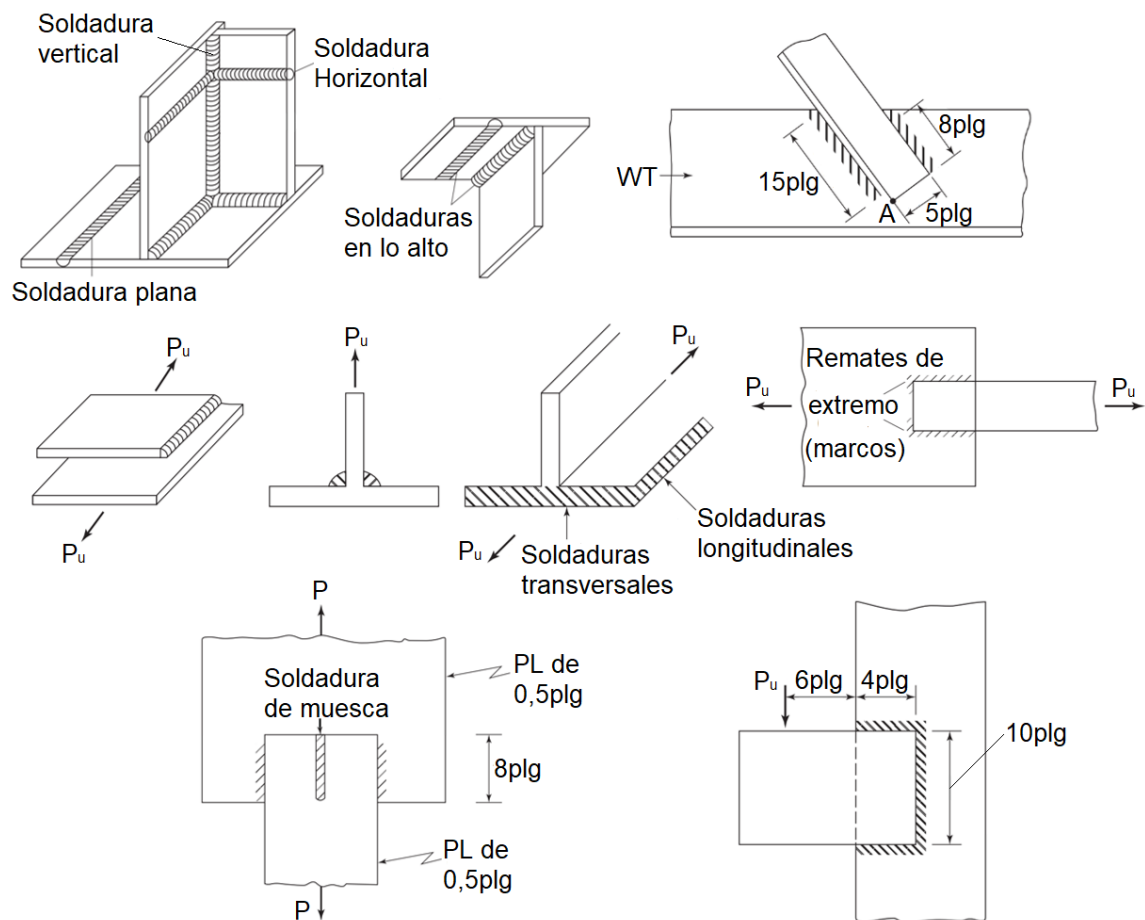
Otra alternativa para unir elementos estructurales es adhiriéndolos de tal manera que quedan como si hubieran sido fundidos en un solo cuerpo, cuidando de cada uno de los detalles respecto a las longitudes de los perfiles y sus secciones, tal cual como se realizan aquellas impresiones en 3D a escala con el uso de plástico fundido, creando una mejor distribución de cargas entre elementos.

Las conexiones soldadas, a diferencia de las anteriores, se utilizan para conectar elementos de manera más directa y fija, pues su procedimiento requiere de equipos de suelda con el respectivo material fundible y capacidad técnica del soldador, que adhiere las secciones entre ellas a través de un cordón de acero fundido conjuntamente con parte del acero de los extremos conectados de los perfiles, creando una junta de material más uniforme donde los esfuerzos se transmiten de manera más pura entre elementos (McCormac & Csernak, 2012).

Como se ha dicho, el cordón de suelda se vuelve un solo cuerpo con los elementos de acero, permitiendo transferir cargas de tensión y compresión de manera más distribuida y, de ser posible, más parecida a la configuración que llega de los elementos estructurales, pues depende mucho de cómo se ejecute el proceso de soldado tanto en lo que es implementar pequeñas placas adicionales para mejorar la suelda, de cómo se desarrolle el cordón y dónde se lo ejecute. Es por esta razón que tiene mayor ventaja que la conexión empernada, pues trabaja bastante apegado del concepto de “distribución” y no de “puntualización”, es una conexión más rígida, más ordenada, limpia, con menos ruido de montaje, menos peso por aumento de piezas de armado y fácil de corregir ante cualquier imprevisto; por otro lado, es más compleja de realizar porque requiere de mayor preparación profesional (McCormac & Csernak, 2012).

Así mismo, para diseñar la junta soldada, se procede con un cálculo tipo “integración” de esfuerzos repartidos a lo largo de la suelda, cuyas ecuaciones ya se encuentran establecidas, que de manera parecida a los pernos, antes de calcular la longitud de la suelda, se debe analizar las cargas ante las cuales va a trabajar la junta, para luego establecer un cordón aprovechando la geometría de las secciones o añadiendo pequeñas piezas para aumentar la longitud de suelda, esto con el fin de responder a la configuración de cargas aplicadas, luego se calcula los esfuerzos soportados en los cordones establecidos donde influye bastante la longitud asumida; para el caso de esfuerzos de corte y torsión, existe dos métodos de cálculo que son: el elástico y de resistencia última. Las suposiciones, factores, ecuaciones y procesos varían según el método (McCormac & Csernak, 2012).





**Figura 27.** Distintas configuraciones de conexiones soldadas.  
Fuente: (McCormac & Csernak, 2012).

Estas configuraciones y muchas más han ayudado a que la conexión sea muy eficiente cubriéndose de manera satisfactoria cualquier variante de diseño estructural, donde debido a la integridad con la cual el material se funde, las conexiones trabajan como una sola pieza donde los esfuerzos se transmiten de manera igualitaria, diferencia clara con la conexión emperrada donde cada parte trabaja de manera puntualizada.

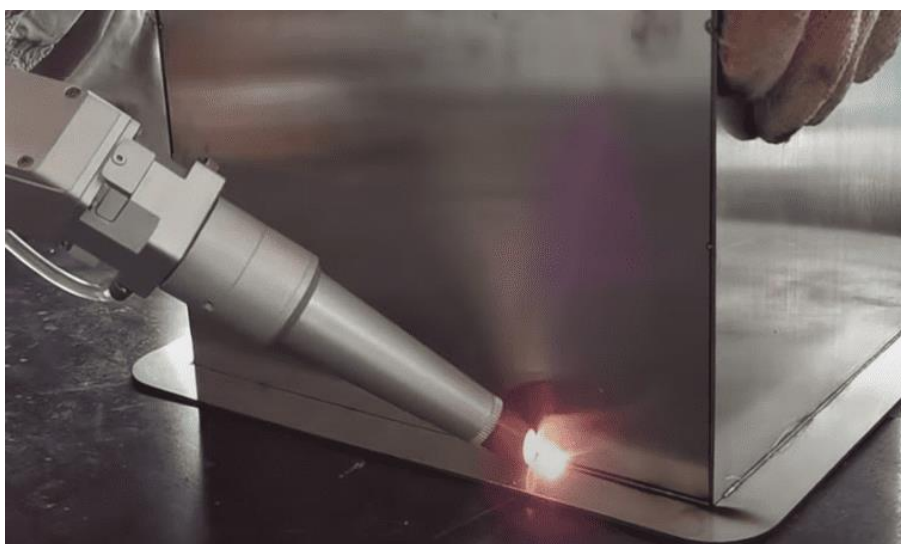
## 2.5. LA SUELDA EN EL ACERO

Como ya se ha visto, una manera de conectar piezas de acero es a través de la soldadura la cual ha ido evolucionando en los últimos tiempos con nuevas alternativas y formas de concebirla, con lo cual se ha logrado crear cordones más limpios, capacidad de soldado en aceros de otras resistencias y calidades, suelda en otro tipo de materiales, etc.

La suelda se la puede definir como la técnica de unir dos o más piezas metálicas de distinta forma mediante un hilo resistente, fundido mecánicamente del mismo material (Rodríguez, 2001), el cual posee varios tipos o métodos que se pueden utilizar dependiendo de: la comodidad, economía, calidad de acabado, exigencia de conocimiento y disponibilidad de los equipos y materiales, pues cada uno difiere del otro en términos conceptuales de manejo de: fuentes de energía (electricidad,

rozamiento, combustibles) y materiales para el soldado (gases o químicos aislantes y metal para el fundido), además que, dependiendo de estas variables, el equipo puede ser móvil o fijo donde ciertos métodos se utilizan exclusivamente en talleres o laboratorios (Salmon, Johnson, & Malhas, 2009).

Estos métodos de soldado también difieren en la rapidez con la que se logra el montaje de los elementos, a la par de obtener una calidad que cumpla con la necesidad de responder a las fuerzas que van a aplicarse en las piezas, y de cierta uniformidad presentada en la distribución del cordón que genera una agradable apreciación visual de la unión. Tal es el caso que existen maneras de soldar piezas sin necesidad de utilizar una fuente de acero en materiales como: el alambre de solda y el electrodo; ni ningún protector como el recubrimiento de los electrodos o tanques de gas. Según el avance tecnológico, estos procesos se vuelven cada vez más eficientes, con menos o nulo consumo de materiales, mejores acabados, aumento de otros métodos, reducción en el tamaño de los equipos, haciéndolos más fáciles de trasladar, y un sinnúmero de nuevas aplicaciones que la ciencia va implementando en la industria (Niebles Nuñez, 2011).



**Figura 28.** Suelda por láser (muy utilizado en el sector automotriz).  
Fuente: (*Láser Comercial*, 2020).

El sector industrial, dentro de todas las actividades que ha abarcado para resolver la vida laboral, ha permitido a la par responder las necesidades empresariales en el campo de la libre competencia, innovando con maquinaria mejorada, computarizada, más eficiente, menos voluminosa, más accesible y manipulable, permitiendo que cada vez sea más posible el desarrollo y reproducción en masa de “mega construcciones”.

### **2.5.1. TÉCNICAS DE SOLDADO**

Para poder concebir cualquier creación humana dentro de las construcciones y maquinaria de acero, la suelda ha tomado gran relevancia para hacer posible cualquier objeto que permite resolver cualquier necesidad laboral-empresarial, pues la gran mayoría de funciones requieren de objetos resistentes, protectores,

preparados para transportar o para mantener en una zona sin que los factores externos dañen a personas u objetos, o para mover materiales, etc., y para ello se necesita que la estructura se encuentre debidamente “acabada” para que no sufra alteraciones graves con el uso.

Es así como, dependiendo de las necesidades técnicas, se crearon equipos de suelda que responden a un proceso de soldado, los cuales entregan distintas calidades de trabajo y tiempo de entrega que, acompañado de la mano de obra, generan una libre competencia de mercado entre el personal que debe estar calificado a las exigencias industriales del mundo globalizado que se actualiza constantemente. Para responder a estas variables, existen algunas técnicas de soldado, de entre las cuales las más importantes son:

- **Soldadura por arco eléctrico (SMAW).** – Es el más antiguo de todos los métodos y el más básico, el cual se produce cuando se aplica una cantidad intensa de calor producida por el arco eléctrico, sometiendo al acero de las dos piezas a fundirse entre sí; máximo se añade un poco de acero entregado por el “electrodo”. El resultado del proceso es un “punto” o “cordón” en la unión, donde el acero resultante entrega una resistencia similar o mayor a la del material de las piezas. El electrodo utilizado puede ser consumible o no; en caso de no serlo, el proceso se lo realiza con una varilla adicional, pero en caso de ser electrodos aportantes (SMAW [Shielded Metal Arc Welding] que por lo general son revestidos), se debe verificar la numeración que representa el tipo de metal con el cual se está ejecutando la suelda. Para proceder con la suelda tipo SMAW, se utiliza únicamente un transformador que regula el calor del arco a través del amperaje de la corriente entregada, el cual incluye los cables y una pinza donde se coloca el electrodo revestido (Rodríguez, 2001).
- **Soldadura TIG o GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).** –Es otra técnica de suelda por arco eléctrico cuyo proceso es similar al anterior (SMAW), con la diferencia de que el electrodo es una punta de tungsteno no consumible y el revestimiento de la suelda se produce con la emanación de gas helio que proviene de un tanque conectado a la pistola o soplete de suelda. El conjunto se completa con un transformador que permite regular el calor generado con la variación del amperaje, pero si el equipo lo requiere, algunos también incluyen un alimentador de agua (Rodríguez, 2001).
- **Soldadura MIG o GMAW (Gas Metal Arc Welding).** – De igual manera, es una suelda que se realiza mediante arco eléctrico, donde el equipo consta de una pistola o soplete cuya punta o electrodo es un alambre consumible que debe ser recargado o cambiado según el metal a ser soldado o en caso de terminarse el material, de un tanque de gas inerte (CO<sub>2</sub>) y de un transformador de amperaje regulable (Rodríguez, 2001).

Estas técnicas de soldado, al producirse mediante el arco eléctrico, requieren obligadamente de un transformador-rectificador, el cual, a más del regulador de

amperaje, son configurables para cambiar de voltaje y poder trabajar con cualquier fuente de corriente alterna AC (120V-110V, 240V-220V, 360v, 480V, etc.) y, además, las “soldadoras” dependiendo del modelo incluyen entrega de corriente tipo alterna AC o continua DC para el arco (Rodríguez, 2001).



(a)



(b)



(c)

**Figura 29.** Suelda tipo: (a) SMAW, (b) GTAW o TIG, y (c) GMAW o MIG.  
Fuente: (INDURA, 2022).

Además de estas técnicas, existen otras que varían dependiendo de los equipos que se utilicen, cuyos métodos para fundir el metal ya no son sólo a través de la corriente, como la suelda autógena, la cual funciona con dos tanques (uno de oxígeno y otro de acetileno) que mezcla los gases en un soplete al cual se lo enciende para crear una punta de llama que derrite el metal; por otro lado existe la suelda por “rozamiento”, que se utiliza creando fricción entre las superficies de los elementos a ser soldados, produciéndose la suficiente cantidad de calor para fundir dichas superficies; o inclusive la suelda por láser muy utilizada en el sector automotriz (Niebles Nuñez, 2011).

La suelda es un proceso que requiere de calor controlado para poder fundir el área a ser conectada, por esta razón, cada técnica que va apareciendo utiliza una fuente de energía para producirlo y, conforme la tecnología sigue creciendo, también la manera de conseguirla o de perfeccionarla, pues la corriente sigue siendo la fuente más utilizada para crear calor en la soldadura.

## 2.5.2. NORMAS PARA LA SOLDADURA EN ACERO

Con el fin de perfeccionar el trabajo de suelda, existen normas que controlan la calidad de producción de los electrodos, guías para el procedimiento adecuado de suelda con las debidas protecciones, normas para el diseño y montaje de equipos de suelda, normas para el correcto diseño de la junta soldada, pues en realidad toda manufactura es controlada con el fin de crear soluciones a la realidad.

Dentro de las normas para proceder correctamente con el trabajo y diseño de la conexión soldada, se tiene en primer lugar las que controlan la calidad de los electrodos fabricados, para que el metal que viene en estos contenga exactamente el detallado según su numeración. La norma que controla la calidad de los electrodos viene dada por la American Welding Society (AWS), donde una de sus normas es la ANSI/AWS 5.1-91 (American National Standards Institute) que es la especificación para electrodos de acero al carbón usados en la suelda SMAW; la tabla 1 es un extracto de esta norma, donde se especifica la clasificación de los electrodos (American Welding Society AWS, 1998):

**Tabla 1**

Clasificación de electrodos (American Welding Society AWS, 1998).

AWS Classification	Type of Covering	Welding Position <sup>a</sup>	Type of Current <sup>b</sup>
E6010	High cellulose sodium	F,V,OH,H	dcep
E6011	High cellulose potassium	F,V,OH,H	ac or dcep
E6012	High titania sodium	F,V,OH,H	ac or dcen
E6013	High titania potassium	F,V,OH,H	ac, dcep or dcen
E6019	Iron oxide titania potassium	F,V,OH,H,	ac, dcep or dcen
E6020	High iron oxide	{ H-fillets F	ac or dcen ac, dcep or dcen
E6022 <sup>c</sup>	High iron oxide	F,H	ac or dcen
E6027	High iron oxide, iron powder	{ H-fillets F	ac or dcen ac, dcep or dcen
E7014	Iron powder, titania	F,V,OH,H	ac, dcep or dcen
E7015 <sup>d</sup>	Low hydrogen sodium	F,V,OH,H	dcep
E7016 <sup>d</sup>	Low hydrogen potassium	F,V,OH,H	ac or dcep
E7018 <sup>d</sup>	Low hydrogen potassium, iron powder	F,V,OH,H	ac or dcep
E7018M	Low hydrogen iron powder	F,V,OH,H	dcep
E7024 <sup>d</sup>	Iron powder, titania	H-fillets,F	ac, dcep or dcen
E7027	High iron oxide, iron powder	{ H-fillets F	ac or dcen ac, dcep or dcen
E7028 <sup>d</sup>	Low hydrogen potassium, iron powder	H-fillets,F	ac or dcep
E7048 <sup>d</sup>	Low hydrogen potassium, iron powder	F,OH,H,V-down	ac or dcep

**Notes:**

a. The abbreviations indicate the welding positions as follows:

F = Flat

H = Horizontal

H-fillets = Horizontal fillets

V-down = Vertical with downward progression

V = Vertical

OH = Overhead

{ For electrodes 3/16 in. (4.8mm) and under, except 5/32 in. (4.0mm)

and under for classifications E7014, E7015, E7016, E7018, and E7018M.

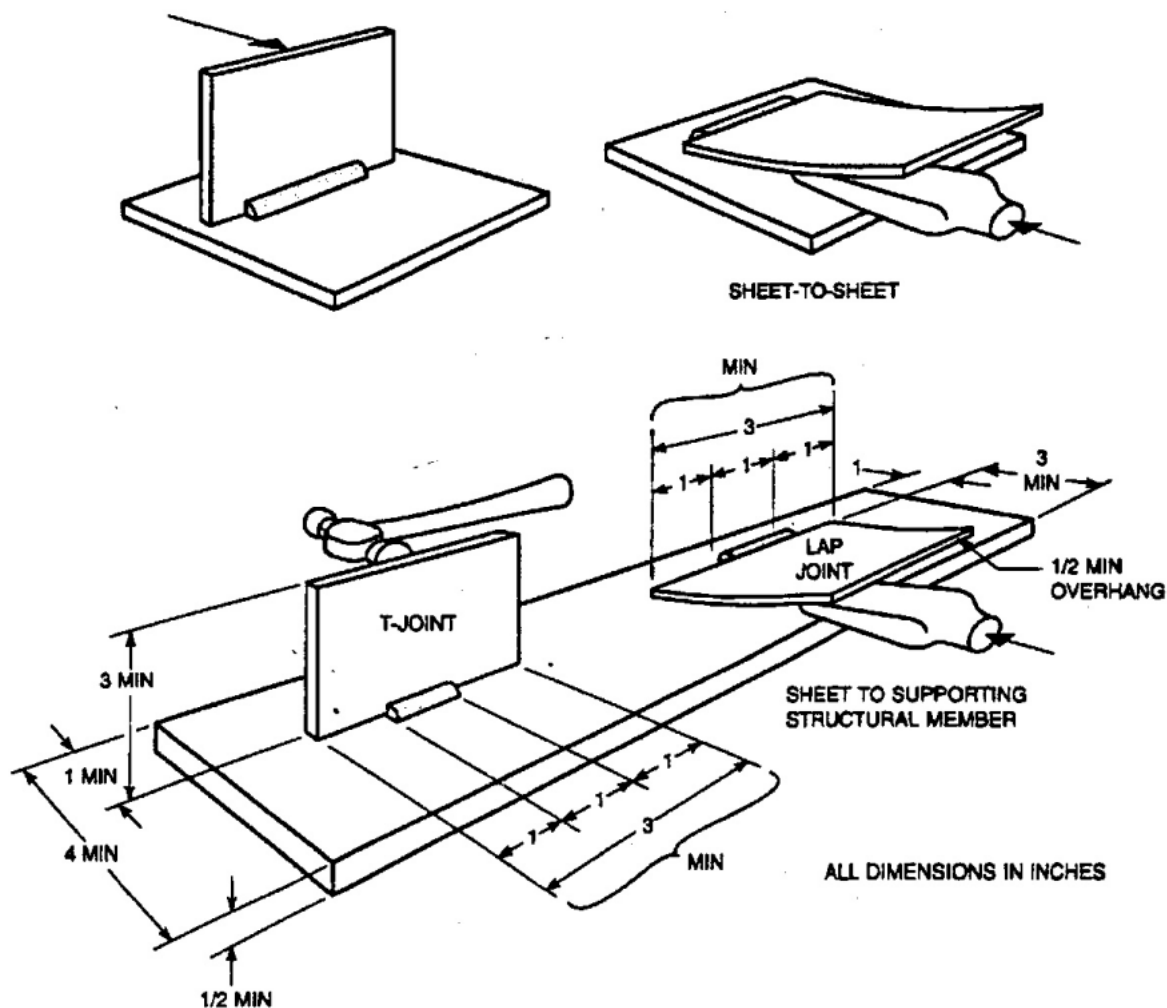
b. The term "dcep" refers to direct current electrode positive (dc, reverse polarity). The term "dcen" refers to direct current electrode negative (dc, straight polarity).

c. Electrodes of the E6022 classification are intended for single-pass welds only.

d. Electrodes with supplemental elongation, notch toughness, absorbed moisture, and diffusible hydrogen requirements may be further identified as shown in Tables 2, 3, 10, and 11.



Otros de los factores controlados para un correcto acabado de la suelda son el diseño (grosor, acabado, etc.) y el proceso, para el cual existen guías donde se especifica el procedimiento que se debe seguir para que el terminado sea el correcto. Se tiene por ejemplo la norma ANSI/AWS D1.3-98, la cual contiene fórmulas para el cálculo y comprobación de la resistencia, medidas del grosor del cordón, tipos de acabados según la posición de las placas, guías para especificar la conexión de suelda (símbolos, medidas, planos, etc.), especificaciones para el control y calificación del "soldador", etc. En la figura 30 se muestra el ensayo para calificar suelda de filete (American Welding Society AWS, 1998):



*Figura 30.* Ensayo para suelda de filete.  
Fuente: (American Welding Society AWS, 1998).

Así mismo, para proceder de manera segura, se especifica todos los implementos de seguridad que debe tener el técnico soldador, los cuales siempre deben de acompañarlo pues es un proceso de alto riesgo al manejar grandes cantidades y altas intensidades de corriente generada por la máquina soldadora. Estos implementos son: máscara con cristal protector para suelda, guantes de cuero, delantal de cuero, polainas y casaca de cuero, zapatos de seguridad y gorro; la figura 31 presenta la indumentaria de seguridad que debe usar el soldador y normas chilenas que especifican cada uno de los implementos (INDURA, 2007):

**IMPORTANTE:**

Evite tener en los bolsillos todo material inflamable como fósforos, encendedores o papel celofán. No use ropa de material sintético, use ropa de algodón.

Para mayor información ver:

**NCh 2928 of. 2005**

Prevención de Riesgos-Seguridad en trabajos de soldadura, corte y procesos afines-Especificaciones

**NCh 1562 of. 1979**

Protección Personal-Pantalla para soldadores-Requisitos

**NCh 1563 of. 1979**

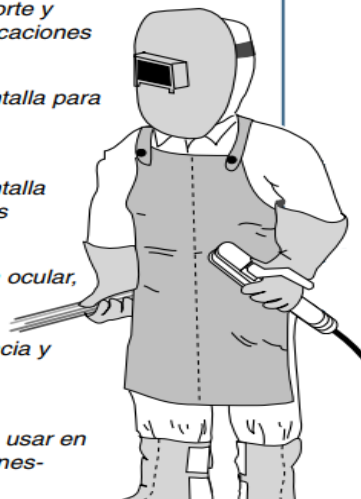
Protección Personal-Pantalla para soldadores-Ensayos

**NCh 2914 of. 2005**

Elementos de protección ocular, filtros para soldadura y técnicas relacionadas-Requisitos de transmitancia y uso recomendado

**NCh 1805 of. 2004**

Ropa de protección para usar en soldadura y procesos afines-Requisitos generales



**Figura 31.** Equipo de seguridad para el soldador.

Fuente: (INDURA, 2007).

Desde luego, no hay que olvidar que los equipos también son diseñados y fabricados bajo normas estrictas que certifican la calidad y capacidad de las máquinas para estar seguro de su manipulación en el área de trabajo, pues la suelta requiere de ciertas cantidades de calor que sólo el equipo preparado puede solventar. Existen muchas marcas de equipos para suelta, donde cada una presenta al mercado sus modelos dependiendo de la magnitud que pueden cubrir, tanto en cantidad de trabajo como en grosor de material, los cuales se identifican con un código presentado por el fabricante en su catálogo de productos, además de especificarse sus características técnicas en el mismo (INDURA, 2022).



**Figura 32.** Máquina soldadora tipo transformador rectificador.

Fuente: (INDURA, 2022).

Existe una gran cantidad de normativas a las cuales se puede recurrir para cubrir cualquier situación industrial-laboral, donde cada nación registra sus normas en base a su sector empresarial, teniendo en cuenta también aquellas normas de orden general creadas por asociaciones internacionales que han incursionado en el desarrollo técnico-científico con el cual el mundo sigue evolucionando.

### **2.5.3. PROPIEDADES DE LA SUELDA EMPLEADA**

Dentro del desarrollo para el armado de los módulos o muestras físicas de los muros de corte de placa de acero rigidizada, se tiene que la suelda ha sido prevista a través del método SMAW, el cual hace referencia al proceso a través de equipos de trabajo por arco eléctrico con electrodos revestidos (shielded metal arc welding), de los cuales existe una gran variedad de productos con calidades referentes a su composición química normada que trata de ser cubierta por distintas marcas, así como también de existir un mercado fortalecido de equipos transformadores que en ciertos casos también son rectificadores.

Recordando las definiciones presentadas en la sección 2.5.2, se tiene que la suelda por arco eléctrico con electrodo revestido presenta ya bastante tiempo dentro del mercado, esto gracias a que es un método muy sencillo de utilizar pues no requiere de muchos implementos para concebir el cordón de suelda, solo requiere del conocimiento básico para el debido ajuste de los equipos para conseguir un trabajo de calidad.

Como es necesario tener en cuenta de qué trata este tipo de suelda y de cómo influye en el acabado durante el montaje, se debe considerar las propiedades de los electrodos y de los equipos de suelda con el fin de conseguir observaciones en base a los resultados y comportamientos que presenten las muestras físicas del muro SPSW, pues se requiere que, aunque se presente alguna falla, ésta se encuentre dentro del control de cálculo para el diseño de los muros.

#### **2.5.3.1. Características del Electrodo**

Los electrodos son materiales de montaje para el trabajo de suelda tipo SMAW, donde no se requiere de otros materiales para crear las condiciones de suelda óptimas como lo requieren las sueldas tipo MIG o TIG, pues este elemento está conformado de un núcleo consumible metálico y de un revestimiento que, luego de generar el calor a través del arco eléctrico, provoca el desprendimiento de un gas inerte que evita la producción excesiva de escoria.

La tabla 1 presenta la composición química del núcleo metálico del electrodo, correspondiente a la clasificación a través de un código que hace referencia a las características que va a obtener el cordón de suelda. Es necesario tener en cuenta dicho código pues, a través de él, se puede estimar la resistencia que debe alcanzar una vez concebida la suelda entre los elementos presentados; a continuación, se muestra la resistencia que debe alcanzar el cordón de suelda correspondiente al código del electrodo (American Welding Society AWS, 1998):



**Tabla 2**

Requerimientos de tensión que debe presentar el cordón de suelda terminado (*American Welding Society AWS, 1998*).

AWS Classification	Tensile Strength		Yield Strength at 0.2% Offset		Elongation in 2 in. (50.8 mm) Percent
	ksi	MPa	ksi	MPa	
E6010	60	414	48	331	22
E6011	60	414	48	331	22
E6012	60	414	48	331	17
E6013	60	414	48	331	17
E6019	60	414	48	331	22
E6020	60	414	48	331	22
E6022 <sup>d</sup>	60	414			
E6027	60	414	48	331	22
E7014	70	482	58	399	17
E7015	70	482	58	399	22
E7016	70	482	58	399	22
E7018	70	482	58	399	22
E7024	70	482	58	399	17 <sup>e</sup>
E7027	70	482	58	399	22
E7028	70	482	58	399	22
E7048	70	482	58	399	22
E7018M	note g	482	53-72 <sup>f</sup>	365-496 <sup>f</sup>	24

Notes:

a. See Table 4 for sizes to be tested.

b. Requirements are in the as-welded condition with aging as specified in 11.3.

c. Single values are minimum.

d. A transverse tension test, as specified in 11.2 and Figure 9 and a longitudinal guided bend test, as specified in Section 12, Bend Test, and Figure 10, are required.

e. Weld metal from electrodes identified as E7024-1 shall have elongation of 22 % minimum.

f. For 3/32 in. (2.4mm) electrodes, the maximum for the yield strength shall be 77 ksi (531 MPa).

g. Tensile strength of this weld metal is a nominal 70 ksi (482 MPa).

Recurriendo a la norma ANSI/AWS 5.1-91, también se tiene los requerimientos del acabado de suelda frente al ensayo de impacto mediante el péndulo de Charpy, con lo cual se tiene una amplia información de las características del trabajo de suelda dependiendo del electrodo que se esté utilizando para el armado de la estructura, esta información es la siguiente (*American Welding Society AWS, 1998*):

**Tabla 3**

Requerimientos de impacto para el péndulo de Charpy (*American Welding Society AWS, 1998*)

AWS Classification	Limits for 3 out of 5 Specimens <sup>a</sup>	
	Average, Min.	Single Value, Min.
E6010, E6011, E6027, E7015, E7016 <sup>b</sup> , E7018 <sup>b</sup> , E7027, E7048	20 ft-lb at -20°F (27 J at -29°C)	15 ft-lb at -20°F (20 J at -29°C)
E6019 E7028	20 ft-lb at 0°F (27 J at -18°C)	15 ft-lb at 0°F (20 J at -18°C)
E6012, E6013, E6020, E6022, E7014, E7024 <sup>b</sup>	Not Specified	Not Specified
	Limits for 5 out of 5 Specimens <sup>c</sup>	
	Average, Min.	Single Value, Min.
E7018M	50 ft-lb at -20°F (67 J at -29°C)	40 ft-lb at -20°F (54 J at -29°C)

Notes:

a. Both the highest and lowest test values obtained shall be disregarded in computing the average. Two of these remaining three values shall equal or exceed 20 ft-lb (27 J).

b. Electrodes with the following optional supplemental designations shall meet the lower temperature impact requirements specified below:

AWS Classification	Electrode Designation	Charpy V-Notch Impact Requirements, Limits for 3 out of 5 specimens (Refer to Note a above)	
		Average, Min.	Single Value, Min.
E7016	E7016-1	20 ft-lb at -50°F (27 J at -46°C)	15 ft-lb at -50°F (20 J at -46°C)
E7018	E7018-1		
E7024	E7024-1	20 ft-lb at 0°F (27 J at -18°C)	15 ft-lb at 0°F (20 J at -18°C)

c. All five values obtained shall be used in computing the average. Four of the five values shall equal, or exceed, 50 ft-lb (67 J).

Para efectos del presente estudio, los electrodos utilizados en el montaje de la estructura son los correspondientes a la numeración E6011 y E6013, los cuales se tienen en presentaciones de grosor en 3/32" (2.4mm) y 1/8" (3.2mm) que influye en el consumo del material y acabado de suelda; adicionalmente, se presentan en marcas como: SOLDEXA, AGA, ESAB, etc.

### 2.5.3.2. Equipo de Suelda

Como el trabajo de suelda viene dado por el uso de electrodos, la máquina utilizada es de tipo transformador con regulación de amperaje y capacidad de configuración en caso de necesitar el reemplazo de fuente de corriente entre los valores de 110V o 220V que son los voltajes comercializados en el Ecuador, el cual también incluye el par de cables, donde uno es para la polarización de la estructura y el otro contiene la pinza para el electrodo.

Dentro de las características del equipo, se puede hacer referencia a través de su marca y modelo; se trata de una soldadora americana Century AC Welder de 230AMP modelo 110-110, la cual trabaja bajo una frecuencia de 60Hz con fuentes de corriente entre 110V y 220V, también posee dos conectores de amperaje rápido para carga baja y carga alta de corriente con su correspondiente polo para conexión de tierra hacia la estructura. Todas estas características y otras adicionales se presentan a continuación:

**Tabla 4**

Características de la máquina soldadora.

AC Welder Century 230AMP model 110-110	Características
	pri volts: 230
	pri amps: 48
	Frequency (cycles): 60
	Single phase
	Arc volts: 25
	Sec. amps: 230 max
	O.C. volts: 72
	temp rise: 115°C



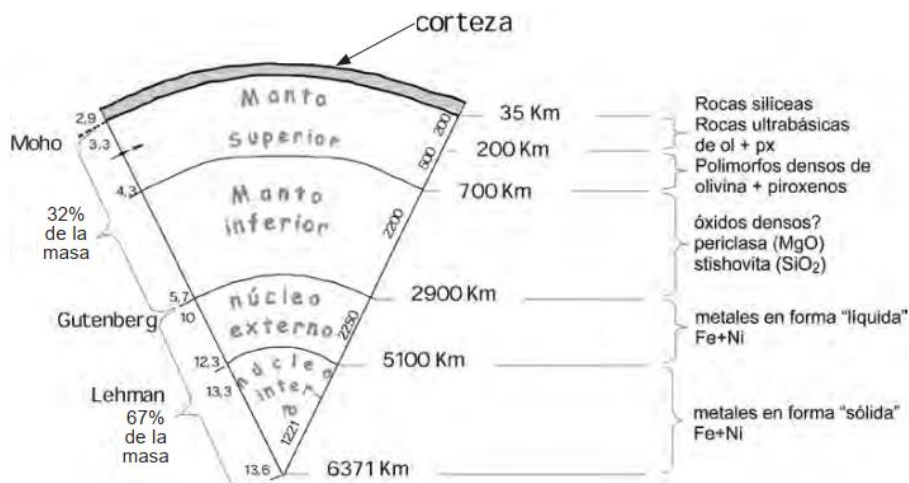
*Figura 33.* Máquina soldadora  
Century 230AMP 110-110.  
Fuente: (Purpule Wave, 2011).

Esta máquina ha sido definida para la suelda de los elementos estructurales, de la plancha de acero y de los ángulos rigidizadores, la cual debe ser calibrada según los requerimientos que dependen del grosor del material, con el fin de lograr la conexión entre cada pieza y de evitar posibles daños ocasionados por perforación del metal o, por el contrario, de producir un cordón deficiente en el trabajo.

## 2.6. LOS SISMOS Y ENSAYOS DE CARGA CÍCLICA

Una de las fuerzas más destructivas y recurrentes dentro de los fenómenos naturales es el sismo, cuya incidencia genera grandes pérdidas vitales y materiales debido a la aceleración con la cual llega, producto de una liberación de energía elástica recogida por la fricción desarrollada en el suelo, pues el planeta, aunque no lo parezca, se encuentra en constante movimiento.

Existen zonas ubicadas en lo que se conoce como “fallas tectónicas”, donde, según la teoría que soporta este concepto, define que la tierra se compone de placas de suelo llamadas “Placas Tectónicas”, las cuales en conjunto conforman la corteza terrestre, que es la solidificación del material fundido del centro del planeta en la superficie terrestre. Esto también deriva en el concepto de “Ciclo del Suelo”, pues las placas al encontrarse en movimiento por los flujos internos del material en estado líquido, mueve las placas sometiéndolas por un costado a seguirse formando en las zonas volcánicas, lo cual impulsa la placa a seguirse moviendo a otro costado donde, al chocar con otra placa, la primera se ve obligada a ingresar nuevamente al centro del planeta, deslizándose por debajo de la segunda, lo cual vuelve a fundir el suelo de la placa tectónica cumpliéndose de esta manera el ciclo. El deslizamiento que se genera entre placas provoca que existan vibraciones en el suelo por tratarse de un material no uniforme, pues las superficies que se encuentran en contacto son rugosas creándose fricción en el deslizamiento (Spikermann, 2010).



**Figura 34.** Estructura interna de la tierra.

Fuente: (Spikermann, 2010).

Todo lo relacionado al funcionamiento de planeta se lo puede describir a través de la "Física", que permite entender que este fenómeno natural dentro de la Tierra no es sino una representación de energía que se encuentra en constante cambio, por la interacción de todas sus partes que reaccionan entre ellas a través de fuerzas (empuje, elasticidad, rozamiento, etc.), produciendo cambios de movimiento o estado (aceleraciones).

### 2.6.1. DEFINICIÓN DE SISMO

Las placas tectónicas que conforman la corteza terrestre se encuentran en constante interacción, deslizándose, empujándose e incluso desgastándose entre ellas, pues como cualquier otro material, poseen imperfecciones superficiales que crean rozamiento entre ellas, siendo capaz de frenar momentáneamente el deslizamiento, pero nuevamente al ser un material, sólo se crea un estado de acumulación de energía pues no se detienen y el empuje continúa.

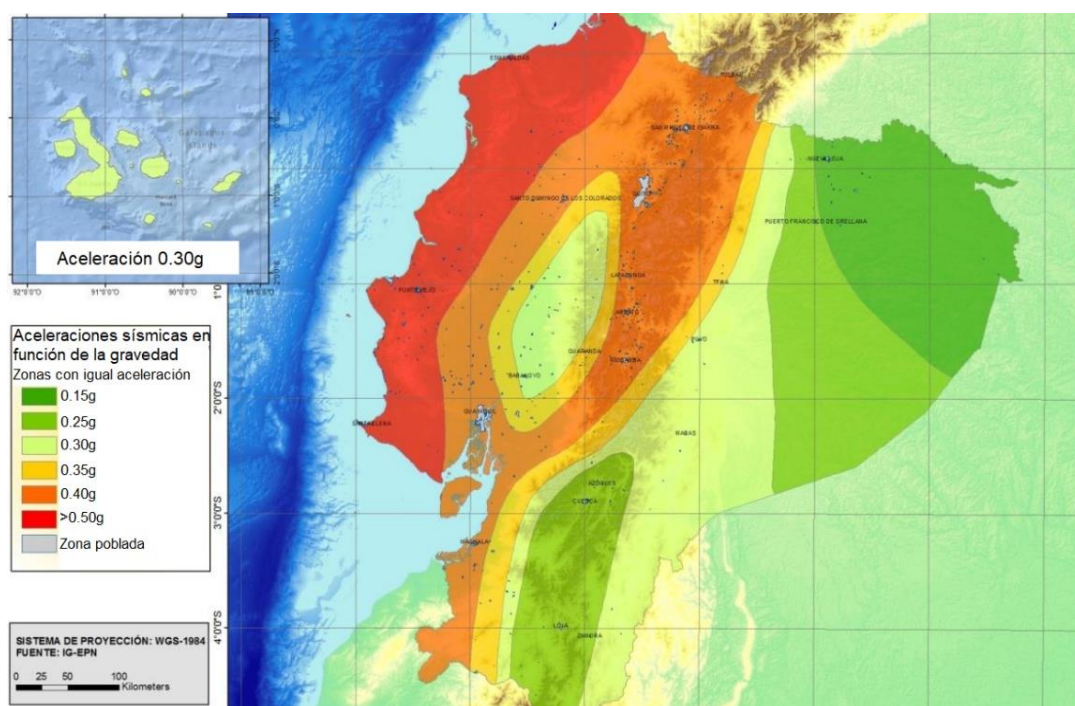
El sismo es el efecto o consecuencia de la liberación de la energía elástica acumulada por el empuje entre placas que provoca deformaciones en el suelo dentro de su rango elástico, llegando a fracturar el volumen de suelo involucrado en la resistencia al deslizamiento de las placas; producto de esta ruptura, la energía se transforma en un movimiento telúrico de tipo "ondulatorio", que se transmite a través del suelo hasta disiparse (Spikermann, 2010). Este fenómeno se produce aproximadamente en lo que podría considerarse como el plano de contacto entre las placas, donde la falla al encontrarse por debajo del nivel del suelo, se lo llama "foco" o "hipocentro, y su proyección en la superficie se conoce como "epicentro" (Spikermann, 2010).

Gracias a la existencia de la sismología, se ha podido estudiar el comportamiento de los terremotos, logrando conseguir información del interior del planeta que cada vez es más clara, pero también se ha desarrollado métodos para definir magnitudes con las cuales pueden presentarse los sismos, traduciéndolas en aceleraciones del suelo que son de gran importancia para el cálculo de construcciones civiles a través



de una representación de la fuerza sísmica. Cabe aclarar que, en la aparición de un terremoto, este se presenta con tres tipos de ondas conocidas: las primarias, secundarias y superficiales; además de que el movimiento se produce espacialmente, generando vibraciones en sentido norte-sur, este-oeste y verticales (Spikermann, 2010).

En la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, se definen procedimientos para estimar un valor de aceleración promedio que represente el riesgo sísmico que puede presentarse en determinadas zonas, pues debido a los estudios realizados en el país, se han definido sectores donde el riesgo varía según su posición geográfica, llegando a considerarse a la Costa ecuatoriana como la zona de mayor riesgo y a la Amazonía como la de menor riesgo (Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, 2014).



**Figura 35.** Mapa de Zonas Sísmicas del Ecuador, con valores de aceleraciones en función de la gravedad. Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, 2014).

Es importante que los estudios de sismología sigan creciendo, pues gracias a estos desarrollos, se puede entender con gran claridad el nivel de diseño que se debe incluir cuando se calcula una construcción o proyecto, buscando la manera de predecir lo más exacto posible la fuerza con la cual se puede presentar un terremoto para generar una estructura de gran calidad, que pueda generar seguridad en los usuarios.

## 2.6.2. LOS ENSAYOS DE CARGA CÍCLICA

Dentro de la búsqueda por mejorar la calidad de las construcciones, se realizan ensayos a modelos estructurales para obtener buenas referencias de la resistencia

que pueden entregar estos modelos ante la aplicación de cargas o fuerzas externas, donde un método para simular la acción de un sismo que actúa sobre cualquier construcción, fatigándolo con el movimiento ondulatorio del terreno, es la aplicación de cargas cíclicas controladas.

Un ensayo de carga cíclica es un método cuasi-estático de evaluación de modelos estructurales, donde se procede a aplicar fuerzas en muestras de cualquier estructura previamente diseñada a velocidades relativamente bajas (tienden a cero), sometiéndolas a presentar deformaciones ante el desgaste provocado por la “carga y descarga” que fatiga el componente estructural, comprometiendo de esta manera su resistencia para poder conocer su comportamiento y capacidades mediante el monitoreo del proceso (Carrillo, Porras, & Sánchez, 2016).

Este método de ensayo se utiliza bastante para tratar de obtener información respecto al comportamiento de componentes estructurales puntuales o pequeñas estructuras ante la presencia de cargas cíclicas, para lo cual es muy importante considerar las limitantes del proceso que tiene que ver en cómo se desarrollan las cargas en comparación a un sismo, pues ambos comportamientos difieren bastante ya que las ondas sísmicas poseen una velocidad de propagación en el suelo, algo completamente contrario al concepto del ensayo (Carrillo, Porras, & Sánchez, 2016). Por otro lado, una vez que se formaliza la fuerza sísmica en la estructura completa, comienzan a distribuirse cargas de comportamiento cíclico a lo largo de los componentes estructurales, ganando bastante aproximación al método de ensayo cuyo propósito es el de generar un desgaste de fatiga en la estructura. Aun así, siempre se debe considerar la diferencia de ambas naturalezas, pues el proceso artificial posee un tiempo de desarrollo, mientras que un sismo es repentino, con cambios bruscos de carga y descarga, generando la evidente presencia de una velocidad (energía cinética) (Spikermann, 2010).

Sin embargo, es un método de donde se extrae importante información como: la resistencia del componente, su capacidad de absorción de energía cíclica, la degradación de rigidez, aporte de resistencia y rigidez mediante la comparación de resultados entre muestras de distintos modelos, definición de rangos lineal y no lineal, derivas máximas, etc. Dependiendo de la información presentada en el diseño, existen protocolos para el procedimiento adecuado del ensayo, donde de ser posible también se aplica un ensayo “Monotónico” (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019).

Es importante tener muy en cuenta que todo proceso debe ser desarrollado con “criterio” pues, aunque la obtención de resultados permita estimar comportamientos aproximados de los diseños desarrollados por la humanidad, para responder necesidades frente al contacto con el ambiente, es este ambiente el que siempre actúa de manera repentina.

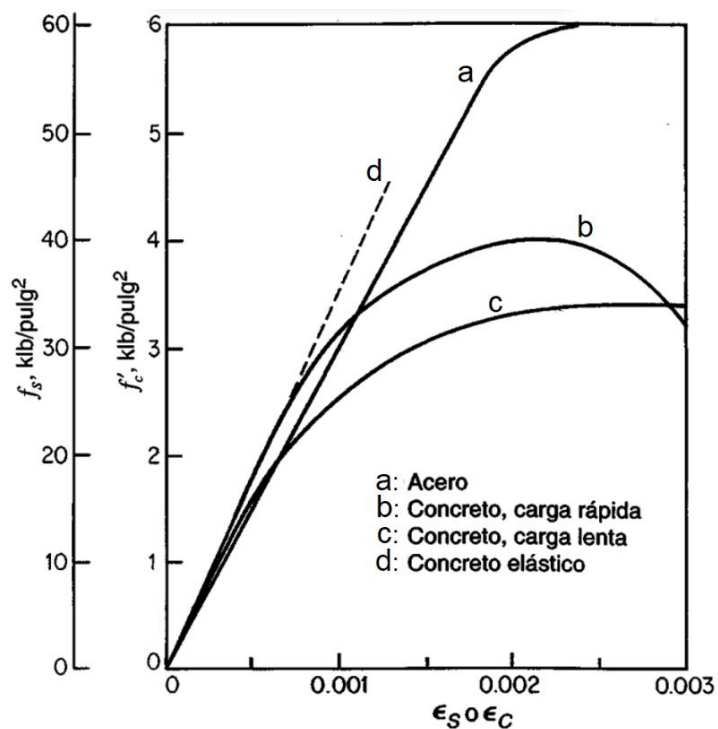
### **2.6.3. CURVAS FUERZA-DEFORMACIÓN**

En los estudios y evaluaciones desarrolladas para entender la resistencia de los materiales y de estructuras montadas a través de su uso, se procede a registrar los

valores entregados en el proceso de medir la fuerza que se aplica a un elemento de muestra y de las deformaciones que sufre el elemento, con los cuales se traza una curva que permita representar la respuesta del material.

La curva fuerza-deformación, cuya variante es la curva esfuerzo-deformación unitaria, es aquella que se obtiene al graficar los resultados de un ensayo monotónico, donde el eje de las abscisas corresponde a la deformación de la muestra de material o elemento analizado, mientras que en el eje de las ordenadas se registra la fuerza aplicada para provocar la deformación (Timoshenko, 1957). Esta curva viene desarrollada con el fin de obtener información de los materiales a través de la aplicación de conceptos de física como: la Ley de Hooke, trabajo y energía, leyes de Newton, etc. Las dos variantes tratadas de esta curva se diferencian en el tratamiento de las dimensiones consideradas, donde la de fuerza-deformación se aplica para un elemento o una estructura particular (la curva incluye las medidas de la muestra), mientras que la de esfuerzo-deformación unitaria se aplica para generalizar al material (no incluye las medidas de la muestra).

La curva del acero presentada en la figura 19 es una de estas curvas, pues sea en elemento o en material, el comportamiento es el mismo, con diferencias en los valores que dependen de las medidas y configuración de la muestra ensayada, con claras variaciones en la carga soportada pues, dependiendo de la complejidad, se obtiene la curva de fuerza-deformación de la muestra en particular. La figura 35 es una curva esfuerzo-deformación unitaria que representa al hormigón vs el acero en compresión (Nilson, 1999):



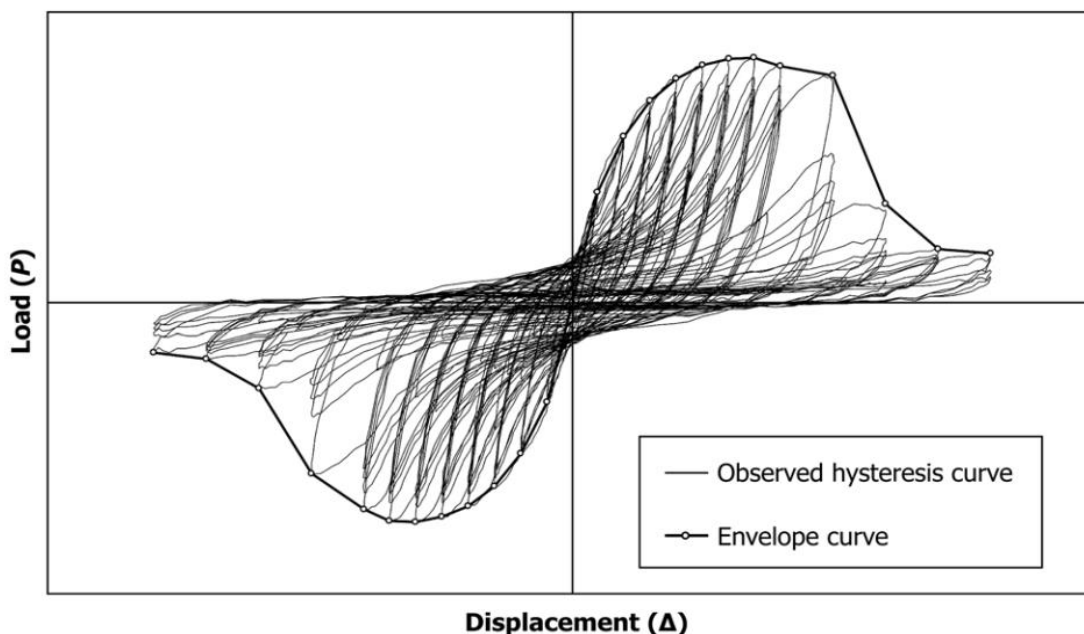
**Figura 36.** Curvas de esfuerzo-deformación unitaria en concreto y acero.  
Fuente: (Nilson, 1999).

Dentro de la producción, siempre es necesario tener una pequeña referencia de los procesos que se llevan a cabo, por eso es muy importante tomar muestras tanto de materiales como del objeto terminado para evaluar el modelo, por eso, aunque ya se encuentren definidas las curvas, siempre se siguen ejecutando ensayos para saber si cumple con la resistencia del material en el mercado y de la estructura para comprobar los resultados teóricos o, en tal caso, evaluar lo sucedido.

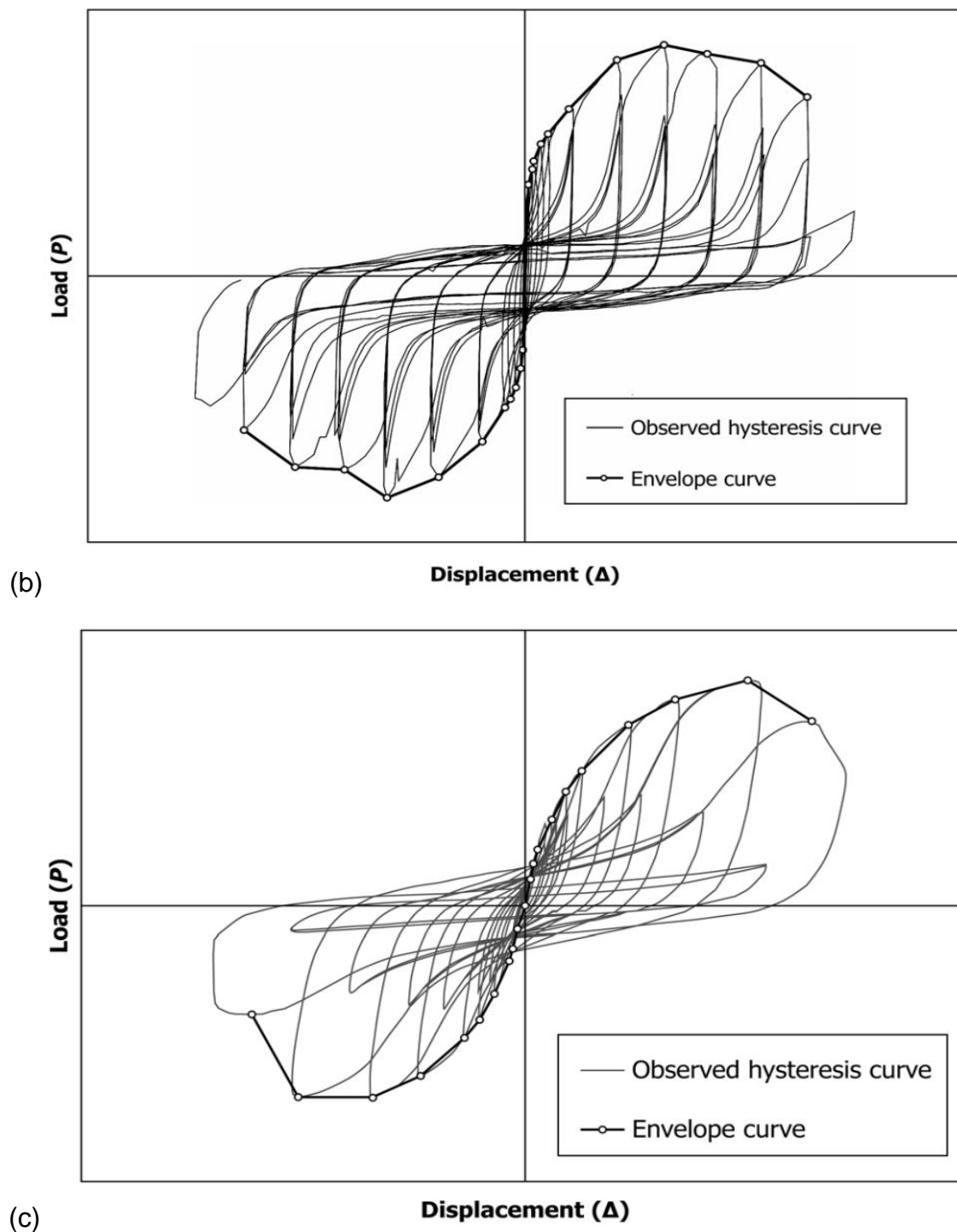
#### 2.6.4. CURVAS DE HISTÉRESIS

Los ensayos son una manera de observar las propiedades de un material u objeto, y dependiendo de estos, también se presentan distintas variantes de gráficas o curvas con los valores representados del ensayo, es así que el ensayo de cargas cíclicas presenta una forma más amplia de la curva fuerza-deformación utilizando los mismos parámetros, que es la curva de histéresis.

Las curvas de histéresis son la representación del comportamiento de cualquier estructura sometida al ensayo de cargas cíclicas, respetando las mismas variables que se manejan en las curvas fuerza-deformación, donde la información presentada tiene otro tratamiento más complejo para evaluar las propiedades de la muestra sometida al ensayo. Parte de la información que se puede obtener de estas curvas es similar a las curvas fuerza-deformación como la resistencia y energía absorbida, pero también presenta información acerca del rango lineal, no lineal, la degradación de la rigidez en cada ciclo, la “envolvente de la curva” y la resistencia aportada por la estructura en cada ciclo (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019).







**Figura 37.** Ejemplos de curvas de histéresis con sus envolventes para los métodos: (a) A, (b) B y (c) C. Fuente: (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019).

En la figura 36 se puede apreciar ejemplos de curvas de histéresis obtenidas para cada uno de los métodos de ensayo según la norma ASTM E2126-11 para el ensayo de elementos verticales a corte, cuyos procedimientos dependen en gran medida de los resultados en resistencia y derivas obtenidas en el diseño del modelo

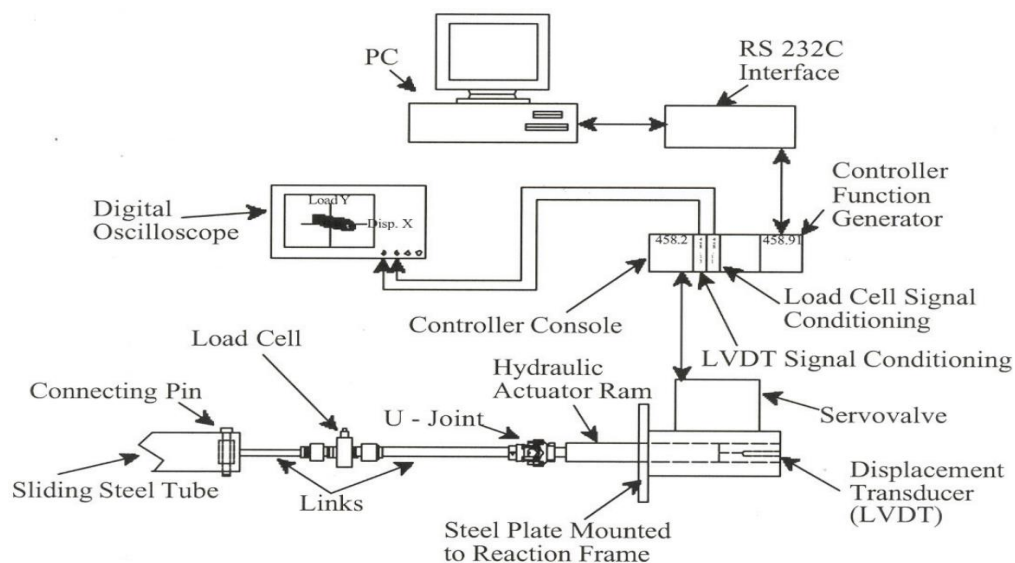
para poder “calibrar” los equipos de tal manera que los ciclos sean los más eficientes (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019).

De este modo, se puede apreciar que la elección de los ensayos y el método a desarrollarse influye en el tratamiento de los resultados y en la obtención de la respectiva información, donde la definición de la curva y su envolvente se ven afectadas según el desarrollo de los ciclos de carga, que se definen en base al procedimiento según la descripción del método y también la cantidad de ciclos necesarios para el ensayo.

### 2.6.5. NORMAS PARA EL ENSAYO DE CARGAS CÍCLICAS

Como cualquier otro proceso laboral, es necesario que los ensayos de carga cíclica se encuentren normados para ejecutarlos de manera controlada, con el fin de obtener resultados satisfactorios que representen el objetivo del estudio sin que se presenten imprevistos durante la aplicación de las cargas mediante los equipos de ensayo.

Para la ejecución de los ensayos de carga cíclica, existen dos normas que describen el procedimiento con los equipos, medidas y protocolos en base al modelo que va a ser probado; el primero que es la norma FEMA 461 explica los procedimientos provisionales para determinar las características de rendimiento aproximadas a un sismo de cualquier componente sea estructural o no estructural, dividiéndose en dos protocolos de ensayo generales que son: el método cuasi-estático cuyos procedimientos son el monotónico y cíclico, y el método de mesa vibratoria; la diferencia entre ambos métodos es la velocidad de ensayo y la dimensión del modelo que va a ser probado, además del enfoque de los resultados, pues ciertos ensayos se enfocan al comportamiento de un componente en particular, mientras que otros se enfocan al comportamiento de los componentes y el conjunto estructural en general. La siguiente figura 37 muestra el esquema del equipo para ensayos cuasi-estáticos (FEMA, 2007):



**Figura 38.** Esquema de la instrumentación para ensayos cuasi-estáticos y monitoreo.  
Fuente: (FEMA, 2007).

Consecuente a la norma FEMA, se tiene la norma ASTM E2126-11, que define protocolos particulares para el ensayo de elementos verticales, sometidos a cargas cíclicas de corte para la obtención de las correspondientes curvas de histéresis, donde también incluye un ensayo monotónico para complementar la información con una prueba que registre la resistencia de cualquier muestra del modelo planteado (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019).

Esta norma contiene tres distintos métodos de ensayo ante cargas cíclicas, donde cada protocolo difiere del otro en la cantidad de ciclos, en el progreso del ensayo aumentándolos o disminuyéndolos, en el aporte del ensayo monotónico, en la necesidad de tener una deriva de partida, etc. Cabe recalcar que las cantidades presentadas en los protocolos sugieren una cantidad de ciclos aproximados, estos pueden variarse dependiendo de la respuesta de los modelos durante los ensayos, además de evitarse el ensayo monotónico convirtiendo el procedimiento en un ensayo netamente cíclico en caso de requerirse. Estos métodos son: el A, B y C; cada uno cumple con una distribución de ciclos para la obtención de las correspondientes curvas de histéresis como se puede ver en la figura 36. Las siguientes tablas registran el número de ciclos en base al método (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019):

**Tabla 5**

Método de ensayo A: amplitudes de ciclos iniciales (*American Society for Testing and Materials ASTM, 2019*).

Pattern	Step	Minimum Number of Cycles <sup>A</sup>	Amplitude of Initial Cycle % FME
1	1	3	25
	2	3	50
	3	3	75
2	4	7	100
	5	7	125
	6	7	150
	7	7	175
	8	7	200
	9	7	250
	10	7	300
	11	7	350
	12		Additional increments of 50 (until specimen failure)

<sup>A</sup> See 8.3.1 for details.

**Tabla 6**

Método de ensayo B: amplitudes de los ciclos inversos (*American Society for Testing and Materials ASTM, 2019*)

Pattern	Step	Minimum Number of Cycles	Amplitude, % $\Delta_m$
1	1	1	1.25
	2	1	2.5
	3	1	5
	4	1	7.5
	5	1	10
2	6	3	20
	7	3	40
	8	3	60
	9	3	80
	10	3	100
	11	3	Additional increments of 20 (until specimen failure)

**Tabla 7**

Método de ensayo C: amplitud de los ciclos primarios (*American Society for Testing and Materials ASTM, 2019*).

Pattern	Step	Minimum Number of Cycles	Amplitude of Primary Cycle, % $\Delta$
1	1	6	5
2	2	7	7.5
	3	7	10
3	4	4	20
	5	4	30
4	6	3	40
	7	3	70
	8	3	100
	9	3	$100 + 100\alpha^A$
	10	3	Additional increments of $100\alpha$ (until specimen failure)

<sup>A</sup>  $\alpha \leq 0.5$ .

Como se puede ver, cada método posee una distribución de ciclos para el procedimiento del ensayo, con una recomendación mínima en cada paso y con patrones de ciclos definidos; también se especifica la amplitud como un porcentaje de la deriva.

Para obtener adecuadamente los resultados esperados, se debe definir el procedimiento a seguir, pues tiene mucha importancia la manera en que se aplican las cargas a los modelos para someterlos a los ensayos, y también repercute en los cálculos posteriores, donde se necesita que exista una correspondencia de valores para la obtención de promedios, máximos, mínimos, comparaciones, etc.

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1. ELEMENTOS DEL MURO: PROPIEDADES QUÍMICAS, GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS

En el presente estudio, se ha diseñado un muro SPSW rigidizado cuyo propósito es el de evaluar el aporte que genera el utilizar rigidizadores en el alma del muro conformada por la placa de acero, distribuyendo los atiesadores según el planteamiento establecido en la teoría de placas que define el fallo por pandeo que éstas sufren para distintos casos de cargas aplicadas.

Los elementos contemplados en el muro diseñado son: tubos rectangulares de sección 200x100x6 (mm) y longitud 3m para columnas (VBE), vigas (HBE) con secciones tipo IPE 140x6 (mm) y de 1,20m de longitud, los rigidizadores son ángulos de lados iguales de 20x2 (mm) (3/4" x 2mm) cuya distribución presenta dos longitudes (1,20m en horizontal y 2,40m en vertical), y una plancha de acero para el alma de 1,20m de base, 2,40m de altura y 1,40mm de espesor. La mayoría de los materiales responden al acero cuya capacidad viene dada por la norma ASTM A36, el cual está compuesto de algunos químicos como: el carbón, manganeso, fósforo, azufre, silicio y en ciertos casos cobre; las cantidades se encuentran tabuladas según muestras del metal concebido para su uso en aplicaciones de demanda estructural, las cuales son (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019):

**Tabla 8**

Requisitos químicos (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019).

NOTE 1—Where “...” appears in this table, there is no requirement. The heat analysis for manganese shall be determined and reported as described in the heat analysis section of Specification A6/A6M.

Product	Shapes <sup>A</sup>	Plates > 15-in. [380 mm] Width <sup>B</sup>				
		To ¾ [20], incl	Over ¾ to 1½ [20 to 40], incl	Over 1½ to 2½ [40 to 65], incl	Over 2½ to 4 [65 to 100], incl	Over 4 [100]
Thickness, in. [mm]	All					
Carbon, max, %	0.26	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29
Manganese, %	...	...	0.80–1.20	0.80–1.20	0.85–1.20	0.85–1.20
Phosphorus, max, %	0.04	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
Sulfur, max, %	0.05	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
Silicon, %	0.40 max	0.40 max	0.40 max	0.15–0.40	0.15–0.40	0.15–0.40
Copper, min, % when copper steel is specified	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

Product	Shapes <sup>A</sup>	Bars; Plates ≤ 15-in. [380 mm] Width <sup>B</sup>			
		To ¾ [20], incl	Over ¾ to 1½ [20 to 40], incl	Over 1½ to 4 [100], incl	Over 4 [100]
Thickness, in. [mm]	All				
Carbon, max, %	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29
Manganese, %	...	...	0.60–0.90	0.60–0.90	0.60–0.90
Phosphorus, max, %	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Sulfur, max, %	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Silicon, %	0.40 max	0.40 max	0.40 max	0.40 max	0.40 max
Copper, min, % when copper steel is specified	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

<sup>A</sup> Manganese content of 0.85–1.35 % and silicon content of 0.15–0.40 % is required for shapes with flange thickness over 3 in. [75 mm].

<sup>B</sup> For each reduction of 0.01 percentage point below the specified carbon maximum, an increase of 0.06 percentage point manganese above the specified maximum will be permitted, up to the maximum of 1.35 %.



Adicional a esto, se tiene que, en propiedades mecánicas, todo elemento cuyo material constitutivo está designado mediante esta norma (se identifican como elementos laminados a partir del acero A36) debe responder con una resistencia a la tensión (límite de rotura) y un esfuerzo de fluencia claramente definidos por los estudios que permitieron el desarrollo de esta norma, los cuales son (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019):

**Tabla 9**

Límite de fluencia y resistencia a la tensión del acero A36 (*American Society for Testing and Materials ASTM, 2019*).

<b>Plates, Shapes,<sup>B</sup> and Bars:</b>	
Tensile strength, ksi [MPa]	58–80 [400–550]
Yield point, min, ksi [MPa]	36 [250] <sup>C</sup>
<b>Plates and Bars:<sup>D,E</sup></b>	
Elongation in 8 in. [200 mm], min, %	20
Elongation in 2 in. [50 mm], min, %	23
<b>Shapes:</b>	
Elongation in 8 in. [200 mm], min, %	20
Elongation in 2 in. [50 mm], min, %	21 <sup>B</sup>

Para aquellos elementos cuya forma es distinta a las consideradas en la norma ASTM A36, pero se identifican mediante esta designación, la siguiente tabla muestra las normas ASTM que describen las características de estos elementos particulares, los cuales presentan ciertas diferencias en su composición, propiedades mecánicas y otros, pero similares (*American Society for Testing and Materials ASTM, 2019*):

**Tabla 10**

Especificaciones de materiales auxiliares (*American Society for Testing and Materials ASTM, 2019*).

Material	ASTM Designation
Steel rivets	A502, Grade 1
Bolts	A307, Grade A or F568M, Class 4.6
High-strength bolts	F3125/F3125M, Grade A325 or A325M
Steel nuts	A563 or A563M
Cast steel	A27/A27M, Grade 65–35 [450–240]
Forgings (carbon steel)	A668/A668M, Class D
Hot-rolled sheets and strip	A1011/A1011M, SS Grade 36 [250] Type 1 or Type 2 or A1018/A1018M, SS Grade 36 [250] Type 1 or Type 2
Cold-formed tubing	A500, Grade B
Hot-formed tubing	A501
Anchor bolts	F1554, Grade 36

Según las tablas previstas, se puede cubrir parte de los materiales contemplados en el diseño del muro SPSW rigidizado, pero para las planchas se tienen otras normas que responden a otro acabado del acero y de especificaciones dentro de lo correspondiente a límites de moldeado (forma), características que serán tratadas más adelante.

Estos elementos fueron obtenidos a través de las ecuaciones definidas para el diseño de muros SPSW y ecuaciones para el uso de atiesadores en placas de acero, además de realizar las comprobaciones entendiéndose que cada sección de perfil tiene su tratamiento, para justificar su correcto funcionamiento estructural como elementos resistentes a la aplicación de cargas externas.

### 3.1.1. ATIESADORES

Según el diseño obtenido, estos elementos vienen dados por los ángulos “L” de lados iguales, los cuales están repartidos en la placa de acero que conforma el alma del muro, cuyas propiedades fueron obtenidas para responder la necesidad de reducir el pandeo provocado por la repartición de carga en forma de cortante hacia el panel.

Específicamente, los ángulos han sido cortados en dos medidas distintas para poder distribuirlos en el alma del muro, con el fin de crear una discretización física tipo “rejilla” para la distribución de cargas en la placa de acero. Estas medidas son: 1,20m para los ángulos horizontales y 2,40m para los verticales; a los verticales se los ha subdividido en 4 partes de 60cm cada uno, para poder entrelazarlos con los de 1,20m y obtener esta configuración de rigidizadores.

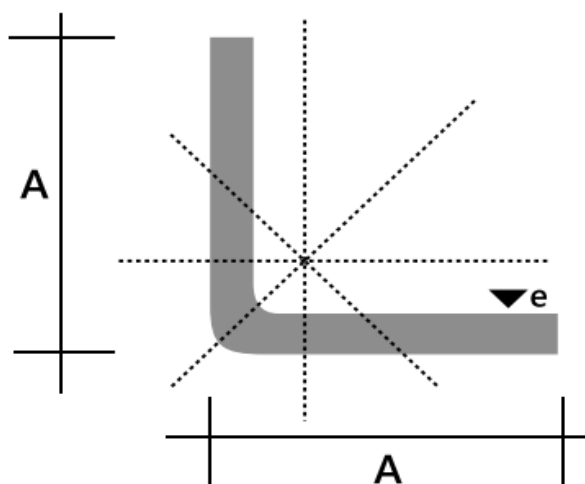
Las propiedades químicas de estos ángulos responden a la designación ASTM A36 complementadas con las especificaciones descritas en la norma SAE J 403 clasificándose este acero en el grado 1008, mientras que las medidas son las encontradas según el catálogo del proveedor, dentro de las propiedades de la sección y peso

**Tabla 11**

Composición química del acero al carbón no resulturizado (*Society of Automotive Engineers SAE, 2001*)

SAE No.	Chemical Composition Limits, % <sup>(1)(2)</sup>	Chemical Composition Limits, % <sup>(1)</sup>	Chemical Composition Limits, % <sup>(1)</sup>	Chemical Composition Limits, % <sup>(1)</sup>
	C	Mn	P, Max	S, Max
1005	0.06 Max	0.35 Max	0.030	0.050
1006	0.08 Max	0.25–0.40	0.030	0.050
1008	0.10 Max	0.30–0.50	0.030	0.050
1009	0.15 Max	0.60 Max	0.030	0.050
1010	0.08–0.13	0.30–0.60	0.030	0.050





**Figura 39.** Geometría de la sección transversal del ángulo de lados iguales. Fuente: (IMPORTACEROS, 2022).

**Tabla 12**

Características geométricas del rigidizador (IMPORTACEROS, 2022).

Denominación	Dimensiones		Peso		Área
	mm		kg/m	kg/6m	
	A	e			cm <sup>2</sup>
AL 20X2	20	2	0,60	3,62	0,76

Dentro de las propiedades mecánicas, estos ángulos cumplen con las especificaciones de resistencia mencionadas en la tabla 9, que son valores bastante repetidos en cualquier muestra de material que se ha moldeado con este tipo de acero, que como ya se ha explicado anteriormente, posee una curva esfuerzo-deformación típica con la cual se ha tenido bastante seguridad de su capacidad como un material muy tenaz.

Estos elementos son el “plato fuerte” del presente estudio, donde se busca que su intervención genere un gran aporte a través del aprovechamiento de cada una de las características descritas, mejorando la respuesta del muro SPSW mediante la reducción de la tendencia de desarrollar pandeo en la placa de acero, con lo cual también crece la contribución de la placa a través de todos los espacios discretizados por las divisiones creadas con los ángulos.

### 3.1.2. PLACA

Para efectos del diseño, el muro lleva como alma una placa de acero donde van colocados los ángulos tanto para poder sujetarla al pórtico conformado por los elementos de borde VBE y HBE, como para conformar el cuerpo de rigidizadores que abrazan la placa por los dos lados, reduciendo de manera más efectiva la

sección de placa que recibe los esfuerzos provenientes de las cargas debidas al corte.

Las dimensiones de la placa son: 1,20m de base, 2,40m de altura y 1,40mm de espesor, donde se aprovecha de cierto modo el formato con el cual vienen presentadas las planchas de acero dentro del mercado, evitando la necesidad de utilizar suelda en la conexión de placas adicionales para cubrir el espacio del pórtico y reduciendo los desperdicios por corte de las placas para el mismo propósito.

Dentro de lo que son las propiedades químicas de la placa, estas vienen descritas en la norma japonesa JIS 3141 que ubica a las placas utilizadas como tipo SPCC SD; es importante considerar estas nomenclaturas pues detrás de ellas existe un estándar que permite entender el desarrollo del objeto identificado mediante estos códigos. La composición correspondiente a esta nomenclatura podemos encontrarla en la tabla 13 (Japanese Industrial Standard JIS, 2011):

**Tabla 13**

Composición química de planchas de acero según su grado de servicio (Japanese Industrial Standard JIS, 2011).

Symbol of grade	Unit : %			
	C	Mn	P	S
SPCC	0.15 max.	0.60 max.	0.100 max.	0.035 max.
SPCD	0.10 max.	0.50 max.	0.040 max.	0.035 max.
SPCE	0.08 max.	0.45 max.	0.030 max.	0.030 max.
SPCF	0.06 max.	0.45 max.	0.030 max.	0.030 max.
SPCG <sup>a)</sup>	0.02 max.	0.25 max.	0.020 max.	0.020 max.
Alloying elements other than those in this table may be added as necessary.				
Note <sup>a)</sup> The upper limit value of Mn, P or S may be altered upon the agreement between the purchaser and the manufacturer.				

Como propiedades geométricas simplemente podemos considerar las mencionadas respecto a la base, altura y espesor, pues depende de ello para desarrollar resistencia al pandeo. Respecto a las propiedades mecánicas, se debe considerar que son planchas identificadas como SPCC SD, donde SD representa que son placas de acero cuyo grado de templado es estándar y tienen un acabado sin brillo. Lamentablemente, datos de la resistencia a la tensión y del esfuerzo de fluencia para este tipo de acabado en las placas de acero no existen, pero se tienen registros y procedimientos para determinar estos valores a través de ensayos normados y estimaciones de la dureza con el fin de tener una idea de un valor aproximado para la capacidad de las placas. La siguiente tabla muestra valores de resistencia última, esfuerzo de fluencia y deformación máxima para los distintos grados de servicio de las placas de acero (Japanese Industrial Standard JIS, 2011):

**Tabla 14**

Esfuerzo de fluencia, resistencia a la tensión y deformación según el grado de la placa (*Japanese Industrial Standard JIS, 2011*).

Symbol of grade	Yield point or proof stress <sup>a)</sup> N/mm <sup>2</sup>	Tensile strength N/mm <sup>2</sup>	Elongation %							Tensile test piece
			Thickness mm		Thickness mm					
	0.25 or over	0.25 or over	0.25 or over to and excl. 0.30	0.30 or over to and excl. 0.40	0.40 or over to and excl. 0.60	0.60 or over to and excl. 1.0	1.0 or over to and excl. 1.6	1.6 or over to and excl. 2.5	2.5 or over	
SPCC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	No. 5 test piece, rolling direction
SPCCT <sup>b)</sup>	–	270 min.	28 min.	31 min.	34 min.	36 min.	37 min.	38 min.	39 min.	
SPCD	(240 max.)	270 min.	30 min.	33 min.	36 min.	38 min.	39 min.	40 min.	41 min.	
SPCE	(220 max.)	270 min.	32 min.	35 min.	38 min.	40 min.	41 min.	42 min.	43 min.	
SPCF <sup>c)</sup>	(210 max.)	270 min.	–	–	40 min.	42 min.	43 min.	44 min.	45 min.	
SPCG <sup>c)</sup>	(190 max.)	270 min.	–	–	42 min.	44 min.	45 min.	46 min.	–	

For those under 0.60 mm in thickness, the tensile test shall generally be omitted. The elongation of the steel sheet and strip of standard temper grade that have been bright finished shall be the value so as that 2 is subtracted from the value of this table.

NOTE: 1 N/mm<sup>2</sup> = 1 MPa

Notes <sup>a)</sup> The upper limit value of yield point or proof stress in parentheses is informative and may be applied upon the agreement between the purchaser and the manufacturer.

<sup>b)</sup> The tensile test value is guaranteed for those among SPCC.

<sup>c)</sup> The non-ageing property of SPCF and SPCG shall be guaranteed for six months after the shipment from the manufacturer's factory. When the shipment is delayed due to the request from the purchaser, the term shall be six months from the original shipment date. The non-aging property is the characteristic that does not grow the stretcher-strain at the time of working.

También hay tablas de valores para la dureza de las placas cuyo grado de templado se encuentra entre “sin tratar” y “templado estándar”, y tablas que muestran el valor de la resistencia a la tensión y de la deformación para placas cuyo grado de templado es superior al estándar (1/8, 1/4, 1/2 y completo). Es necesario entender que, para placas de acero laminadas al frío, su resistencia varía según el grado de templado o compactado con el cual se da el espesor a la placa, pues mientras más material se encuentre compactado en un volumen específico, mayor será su dureza y resistencia (*Japanese Industrial Standard JIS, 2011*).

**Tabla 15**

Dureza de placas "sin templar" y "templado estándar" según: (a) Rockwell y (b) Vickers (*Japanese Industrial Standard JIS, 2011*).

	Temper grade	Symbol	Hardness		
			HRB	HR30T	HR15T
	As-annealed	A	57 max.	54 max.	79 max.
(a)	Standard temper grade	S	65 max.	60 max.	82 max.

	Temper grade	Symbol	HV
	As-annealed	A	105 max.
(b)	Standard temper grade	S	115 max.

**Tabla 16**

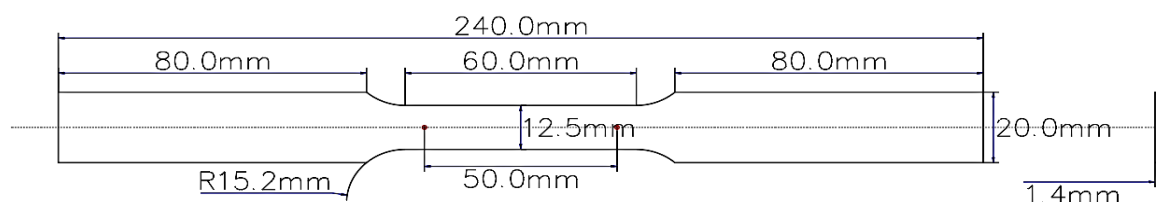
Resistencia a la tensión y deformación de placas de material duro (*Japanese Industrial Standard JIS, 2011*).

Temper grade	Symbol	Tensile strength N/mm <sup>2</sup>	Elongation %	Tensile test piece
$\frac{1}{8}$ hard	8	290 to 410	25 min.	No. 5 test piece, rolling direction
$\frac{1}{4}$ hard	4	370 to 490	10 min.	
$\frac{1}{2}$ hard	2	440 to 590	–	
Full hard	1	550 min.	–	

NOTE: This table is applied to the steel sheet and strip of 0.25 mm or over in thickness and 30 mm or over in width.

Es así que, debido a la inexistencia de valores que representen la capacidad de la placa, es necesario ejecutar un ensayo para obtener los valores reales de la resistencia a la tensión y del esfuerzo de fluencia representativos de las placas adquiridas, que permitan ajustar adecuadamente el modelo desarrollado respecto a la resistencia al corte del muro final.

Para el procedimiento de los ensayos a tensión de muestras de la placa utilizada, es necesario que éstas se encuentren adecuadas con medidas que permitan obtener la resistencia del acero ante la aplicación de tensiones en el laboratorio, para lo cual también es necesario que las placas contemplen un espacio de agarre con el equipo de medición y ensayo, todo esto de la mano con las medidas estándar de probetas descritas en la norma ASTM E8. Para el presente estudio, se tienen las siguientes dimensiones (*American Society for Testing and Materials ASTM, 2021*):



**Figura 40.** Probeta para ensayo de tensión: placa de acero de 1,4mm de espesor.  
Fuente: (*Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022*).

**Tabla 17**

Dimensiones estándar para la preparación de probetas de placas de acero (*American Society for Testing and Materials ASTM, 2021*).

MEDIDAS ESTÁNDAR PARA PROBETAS ASTM E8-21				MEDIDAS ASUMIDAS
Símbolo	Descripción	Dimensiones		
		in	mm	
G	Longitud de testeo (sec. angosta)	2,000 ± 0,005	50,0 ± 0,1	50,0
W	Ancho de la sección angosta	0,500 ± 0,010	12,5 ± 0,2	12,5
T	Espesor	-	-	1,4
R	Radio del filete (min)	0,500	12,5	15,2
L	Longitud total de la probeta (min)	8,000	200,0	280,0
A	Longitud de la sección angosta (min)	2,250	57,0	60,0
B	Longitud de la sección de agarre (min)	2,000	50,0	100,0
C	Ancho de la sección de agarre (min)	0,750	20,0	20,0

Esta combinación de propiedades y mediciones son necesarias para el desarrollo de un correcto estudio que permita apegarse lo mejor posible a la realidad del funcionamiento de las placas de acero, las cuales presentan múltiples fallas relacionadas al pandeo por la frecuencia con la cual el material se sale del plano de trabajo.

### **3.1.3. ELEMENTOS DE BORDE**

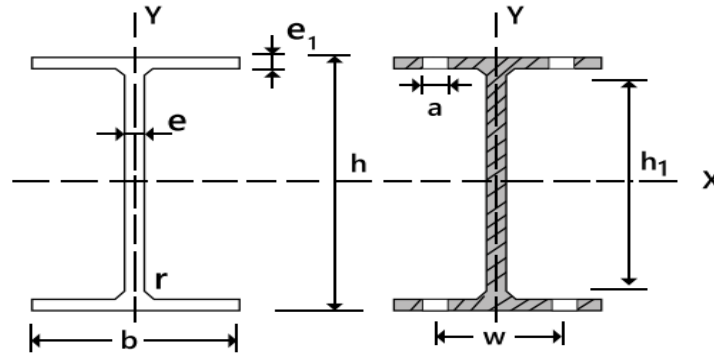
La placa de acero es un complemento creado para acompañar a recibir las cargas que el medio aplica sobre los elementos que conforman la estructura, aliviando la posibilidad de generarse fallas graves en elementos principales que son las vigas y las columnas, aprovechando también la reducción considerable de derivas producidas por desviación de los pórticos.

En el cálculo de los elementos de borde, se debe respetar al 100% la filosofía de diseño sismorresistente, garantizando que las columnas no plastifiquen bajo ningún motivo, generándose este mecanismo solamente en las rótulas plásticas de las vigas, para luego transmitir la carga transformada en corte hacia la placa. Dentro de las propiedades de los elementos considerados para el modelo planteado, se contemplan las siguientes:

#### **3.1.3.1. Vigas (Horizontal Beam Elements HBE)**

Los elementos seleccionados para este propósito son los perfiles tipo IPE 140, cortados a una longitud de 1,20m correspondiente a la medida horizontal del panel de acero, en los cuales se practicaron reducciones de sección de viga (RBS) para garantizar la formación de rótulas plásticas a una distancia medida desde las columnas. Las propiedades químicas de estas vigas corresponden a las descritas por la norma ASTM A36 (tabla 8), considerando que el acero utilizado en la fabricación de estos perfiles es el designado a través de esta marca. Del mismo modo, las propiedades mecánicas son las establecidas según la norma, donde el esfuerzo de fluencia es de 250MPa y la resistencia a la tensión está entre 400MPa a 550MPa (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019).

En la configuración geométrica de estos perfiles, se puede contemplar propiedades entregadas por el fabricante como la altura de la sección, ancho, espesor del alma, espesor de los patines, altura sólo del alma, área de la sección, perímetro, momentos de inercia, radios de giro, módulos de resistencia, momentos estáticos, peso, entre otros (IMPORTACEROS, 2022):



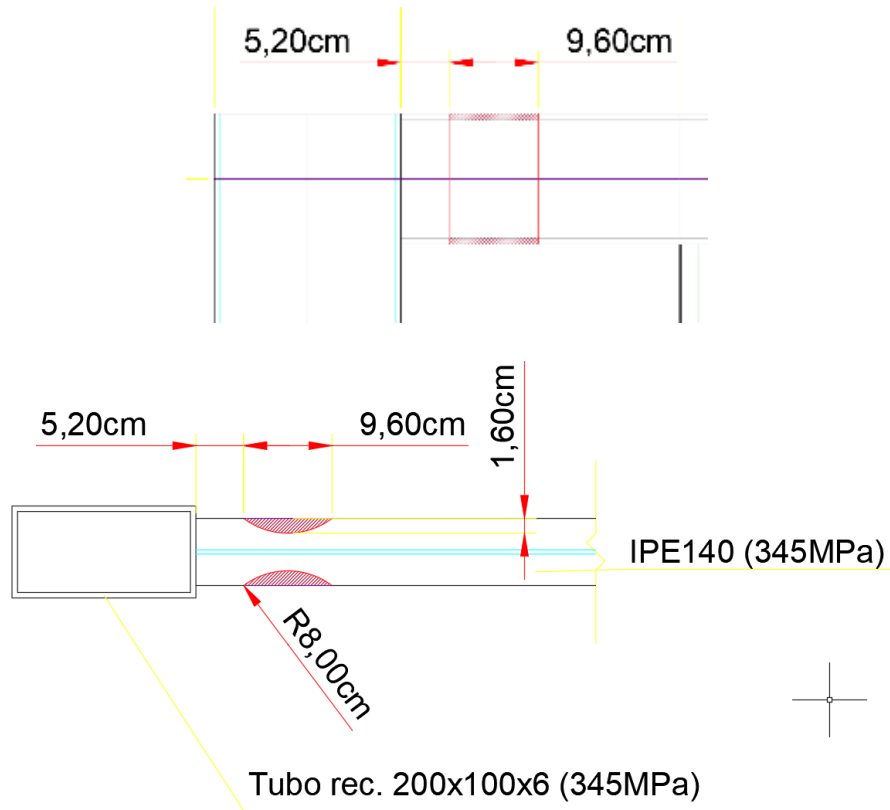
**Figura 41.** Corte transversal de una sección tipo IPE.  
Fuente: (IMPORTACEROS, 2022).

**Tabla 18**

Propiedades geométricas de distintos perfiles IPE (IMPORTACEROS, 2022).

PERFILES IPE																						
Perfil	Dimensiones							Términos de la sección											Agujeros			Peso p kp/m
	h mm	b mm	e mm	e <sub>1</sub> mm	r mm	h <sub>1</sub> mm	u mm	A cm	S <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	I <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	i <sub>x</sub> cm	I <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	i <sub>y</sub> cm	I <sub>z</sub> cm <sup>4</sup>	I <sub>a</sub> cm <sup>6</sup>	w mm	a mm	e <sub>2</sub> mm		
IPE 80	80	46	3,8	5,2	5	60	328	7,64	11,6	80,1	20,0	3,24	8,49	3,69	1,05	0,721	118			3,8	6,00	
IPE 100	100	55	4,1	5,7	7	75	400	10,3	19,7	171	34,2	4,07	15,9	5,79	1,24	1,140	351			4,1	8,10	
IPE 120	120	64	4,4	6,3	7	93	475	13,2	30,4	318	53,0	4,90	27,7	8,65	1,45	1,770	890	35		4,4	10,4	
IPE 140	140	73	4,7	6,9	7	112	551	16,4	44,2	541	77,3	5,74	44,9	12,3	1,65	2,630	1981	40	11	4,7	12,9	
IPE 160	160	82	5,0	7,4	9	127	623	20,1	61,9	869	109	6,58	68,3	16,7	1,84	3,640	3959	44	13	5	15,8	
IPE 180	180	91	5,3	8,0	9	146	698	23,9	83,2	1320	146	7,42	101	22,2	2,05	5,060	7431	48	13	5,3	18,8	

De esta sección, se ha practicado reducciones de los patines a una distancia medida desde los extremos de las vidas hacia adentro, para reducir el aporte tanto de compresión como tensión que ofrecen estos componentes del perfil y permitir que el acero involucrado en las RBS pueda entrar de manera más rápida en su rango plástico, obteniéndose las siguientes dimensiones:



**Figura 42.** Sección de Viga Reducida (RBS) para el perfil tipo IPE 140, definido para el muro modelo SPSW rigidizado.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

De estas propiedades, se puede decir que la sección tipo I es una gran configuración geométrica para utilizarla como viga, la cual es la utilidad más aplicada a este formato de sección por tener facilidades de abarcar la gran mayoría de conceptos sismorresistentes por su compatibilidad con elementos complementarios como la losa y la columna, y por su facilidad de moldeo para cumplir con mecanismos estructurales.

### 3.1.3.2. Columnas (Vertical Beam Elements VBE)

Para conformar estos elementos, se ha considerado el uso de tubos rectangulares de 200x100x6 (mm) cortados a una longitud de 3,00m para facilitar o poder cubrir cualquier necesidad presentada en el montaje, teniendo en cuenta que parte de esa longitud será ocupada por la altura de la placa de acero correspondiente a 2,40m.

Dentro de las propiedades químicas de estos tubos, cumplen con la norma ASTM A500 complementaria a la norma ASTM A36, siendo el caso del acero grado B cuya composición varía un poco en especificaciones para conseguir ciertas



mejoras en la capacidad de resistencia de los tubos, dicha composición es la siguiente (American Society for Testing and Materials ASTM, 2021):

**Tabla 19**

Composición química: requerimientos (*American Society for Testing and Materials ASTM, 2021*).

Element	Composition, %			
	Grades B and D		Grade C	
	Heat Analysis	Product Analysis	Heat Analysis	Product Analysis
Carbon, max <sup>A</sup>	0.26	0.30	0.23	0.27
Manganese, max <sup>A</sup>	1.35	1.40	1.35	1.40
Phosphorus, max	0.035	0.045	0.035	0.045
Sulfur, max	0.035	0.045	0.035	0.045
Copper, min <sup>B</sup>	0.20	0.18	0.20	0.18

<sup>A</sup> For each reduction of 0.01 percentage point below the specified maximum for carbon, an increase of 0.06 percentage point above the specified maximum for manganese is permitted, up to a maximum of 1.50 % by heat analysis and 1.60 % by product analysis.

<sup>B</sup> If copper-containing steel is specified in the purchase order.

Correspondiente a estas cantidades, el acero resultante responde con capacidades de resistencia a la tensión y esfuerzo de fluencia distinto para cada grado especificado en la tabla anterior, donde el grado B es un caso intermedio frente al grado C que es el más resistente, y el D es el menos resistente; aun así los valores rodean los especificados en la norma A36, donde la base del esfuerzo de fluencia es 250MPa y la resistencia última se ubica entre 400MPa y 550MPa, influyendo considerablemente en la tenacidad que cada material presenta al verse sometido a fuerzas externas.

**Tabla 20**

Requerimientos de tensión (*American Society for Testing and Materials ASTM, 2021*).

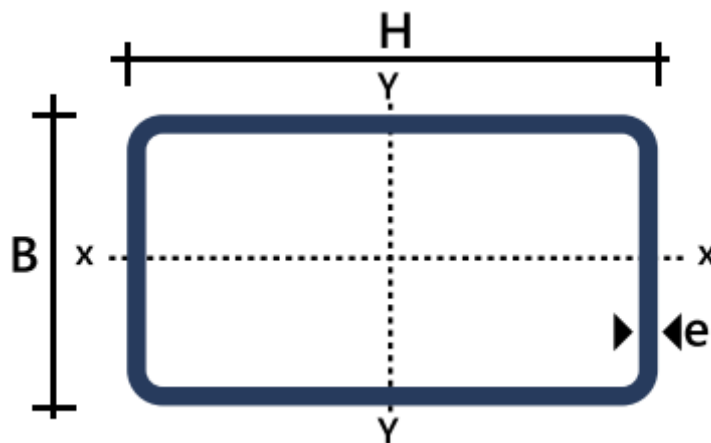
	Round, Square, Rectangular, and Special Tubular Shapes		
	Grade B	Grade C	Grade D
Tensile strength, min, psi [MPa]	58 000 [400]	62 000 [425]	58 000 [400]
Yield strength, min, psi [MPa]	46 000 [315]	50 000 [345]	36 000 [250]
Elongation in 2 in. [50 mm], min, % <sup>C</sup>	23 <sup>A</sup>	21 <sup>B</sup>	23 <sup>A</sup>

<sup>A</sup>Applies to specified wall thicknesses ( $t$ ) equal to or greater than 0.180 in. [4.57 mm]. For lighter specified wall thicknesses, the minimum elongation values shall be calculated by the formula: percent elongation in 2 in. [50 mm] =  $61t + 12$ , rounded to the nearest percent. For A500M use the following formula:  $2.4t + 12$ , rounded to the nearest percent.

<sup>B</sup>Applies to specified wall thicknesses ( $t$ ) equal to or greater than 0.120 in. [3.05 mm]. For lighter specified wall thicknesses, the minimum elongation values shall be by agreement with the manufacturer.

<sup>C</sup> The minimum elongation values specified apply only to tests performed prior to shipment of the tubing.

La geometría de los tubos, al igual que los materiales anteriores, viene descrita de buena manera en el catálogo del proveedor, con valores de inercia, radio de giro, medidas básicas, etc. Es importante que estos valores estén presentes el momento de adquirir los elementos, pues una buena afinación de los modelos al ambiente real requiere de la disponibilidad de todas las propiedades que presentan los elementos.



**Figura 43.** Sección transversal de un tubo estructural tipo rectangular.  
Fuente: (IMPORTACEROS, 2022).

**Tabla 21**

Propiedades geométricas de algunos tubos rectangulares (IMPORTACEROS, 2022).

Tubería Estructural Rectangular											
Designaciones			Área	Peso	Propiedades Estáticas						
					Eje x - x			Eje y - y			
					Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro	Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro	
B	H	e	A	P	I	W	i	I	W	i	
mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	kg/m	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	
100	200	3,00	17,41	13,67	924,37	92,44	7,29	318,26	63,65	4,28	
		4,00	22,95	18,01	1199,81	119,98	7,23	410,88	82,18	4,23	
		5,00	28,36	22,26	1459,51	145,95	7,17	497,19	99,44	4,19	
		6,00	33,63	26,40	1703,83	170,38	7,12	577,44	115,49	4,14	

Todos estos elementos son los que forman parte del muro SPSW rigidizado, modelado con el fin de enfocar la falla hacia el alma que en esta vez vendrá conformada por la placa de acero y los ángulos previstos para rigidizarla, buscando el aumento de resistencia del conjunto final y de reducción de derivas, a la par de lograr mayor capacidad de absorción de energía natural.

## **3.2. DISEÑO DEL MURO DE CORTE SPSW MODELO**

Una vez descritas todas las propiedades de los elementos involucrados, el diseño viene compuesto de los análisis correspondientes de cada pieza constitutiva, de las ecuaciones que representan los criterios de diseño sismorresistente, del cálculo de la resistencia del muro a partir de los elementos participantes y de ciertas consideraciones referentes a acabados que se ejecutan considerando que los muros van enfocados a una evaluación de la alternativa presentada.

El diseño, el cual se describe más adelante, recoge ecuaciones normadas para el cálculo de elementos que respondan con una adecuada resistencia, dependiendo de la función que van a ejercer dentro del muro estructural. Esto procurando que la falla sea desviada satisfactoriamente al panel de acero, con lo cual se puede crear un sistema de disipación de energía capaz de evacuar cualquier tentativa de daño no deseado en los elementos principales, creando un estado de funcionamiento sísmico con elementos de “sacrificio” similares a los fusibles estructurales. Gracias a los estudios desarrollados, en la actualidad la norma AISC 341-16 posee las ecuaciones y procedimiento de cálculo para el diseño de los muros de corte de placa de acero SPSW contemplados hasta el día de hoy, las cuales presentan ciertas variantes ante las exhibidas en los estudios que iniciaron con estos cálculos de diseño.

Teniendo en cuenta estas variantes y los orígenes de las ecuaciones frente a las presentadas en las normas, se reúnen los estudios que dieron la propuesta y las normas que han organizado el procedimiento, estandarizando los criterios de diseño que cubren el correcto funcionamiento de estos muros a través de todos los elementos constitutivos.

### **3.2.1. NORMAS AISC 341-16 Y 358-16**

Esta norma describe las ecuaciones y procedimientos que deben ser aplicados para el diseño de los muros SPSW, cubriendo el análisis de los elementos de borde, del diseño del panel de acero y del cálculo de la resistencia a corte del muro, con las variantes correspondientes para los muros de panel perforado y el de panel con esquinas recortadas.

Debido a la dirección del presente estudio, se muestran las ecuaciones referentes al diseño básico de muros SPSW, las cuales fueron aplicadas para la obtención de los perfiles en los elementos de borde y para el cálculo del espesor de la placa que constituye el muro, pues la variante de muro rigidizado se basa en el modelo original de la teoría desarrollada. Comenzando por las columnas, el requerimiento para su diseño en el muro es que su momento de inercia sea suficiente para evitar la formación de pandeo que provoque fallas prematuras, garantizando que éstas trabajen únicamente en su rango elástico para trasladar el comportamiento plástico a la placa de acero y las rótulas plásticas de las vigas; desde luego, esta comprobación es posterior a un cálculo de columnas previo que debe responder a las solicitaciones o cargas de diseño reglamentadas en las normas para el cálculo de estructuras sismorresistentes, pero al tratarse de

una práctica de estudio, los cálculos se reducen a la obtención de las medidas a partir del cálculo de este límite de inercia, el cual se expresa en la siguiente ecuación (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$I_c \geq 0.0031 t_w \frac{h^4}{L} \quad (5)$$

Donde:

$I_c$  = Momento de inercia de la columna VBE tomado de un eje perpendicular al plano de la placa de acero.

$t_w$  = Espesor de la placa de acero.

$h$  = Distancia entre los ejes de las vigas HBE.

$L$  = Distancia entre los ejes de las columnas VBE.

Así mismo, para el momento mínimo de inercia de las vigas, la fórmula es similar a la anterior, cambiando de manera correspondiente los términos del cálculo según la orientación; cabe recalcar que para este caso no se incluye el espesor de la placa, donde el cálculo se ve afectado únicamente por las dimensiones del pórtico (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$I_b \geq 0.0031 \frac{L^4}{h} \quad (6)$$

Donde:

$I_b$  = Momento de inercia de la viga HBE tomado de un eje perpendicular al plano de la placa de acero.

Para la revisión de la resistencia al corte que presenta la viga ante el empuje lateral, la norma AISC 341-16 hace referencia al análisis de la conexión a través del diseño de la sección reducida de la viga (RBS) contemplada en la norma AISC 358-16, necesario para el diseño de la viga teniendo en cuenta la necesidad de la formación de rótulas plásticas en el elemento. La forma de la ecuación es muy similar a la presentada en el diseño de pórticos arriostrados excéntricamente, donde de manera muy evidente el fenómeno es el mismo, pero en condiciones de geometría estructural distinta, pues el uso de las RBS es más común en muros que en arriostramientos. La ecuación para la falla en pórticos arriostrados es la siguiente (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$V_{nb} = \frac{2M_p}{e} \quad (7)$$

Donde:

$V_{nb}$  = Capacidad nominal al cortante por flexión de la viga en las conexiones con otros elementos.

$M_p$  = Momento flector plástico de la viga en las conexiones.

$e$  = “Longitud de conexión”, definida como la distancia libre medida entre las zonas de conexión de dos arriostramientos diagonales a los extremos de la viga, o la distancia libre entre la cara interna de una columna conectada a la viga y la cara del arriostramiento diagonal conectada al otro extremo de la misma viga.

No hay que olvidar que esta ecuación ha sido presentada para el cálculo de pórticos arriostrados excéntricamente, donde las variables involucradas responden a la configuración geométrica del conjunto estructural y de elementos involucrados, pero al no ser muy alejada de la realidad presente en los muros de corte de placa de acero, esta ecuación posee otra forma referente a su configuración geométrica. Para los muros SPSW donde se utiliza el diseño de secciones reducidas de las vigas, la ecuación sustituye la longitud “e” por la distancia entre el centro de las secciones RBS y considera el momento de plastificación en la reducción, llegando a la siguiente fórmula (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$V_{nb} = \frac{2M_{pr}}{L_h} \quad (8)$$

Donde:

$M_{pr}$  = Momento de plastificación probable en la rótula plástica por la sección reducida de la viga RBS.

$L_h$  = Distancia entre los centros de las secciones de viga reducidas o rótulas plásticas.

Para obtener el momento probable necesario para el cálculo de la resistencia de las rótulas en las vigas, se debe definir primero la reducción de los patines en el perfil; para esto, la norma AISC 358-16 establece los límites de las medidas representativas de los arcos recortados, su separación con respecto a la cara o patín interno de la columna y una relación mediante la cual se ajusta el arco de la reducción; los límites se definen en base a las medidas de la viga diseñada (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$0.5b_{bf} \leq A \leq 0.75b_{bf} \quad (9)$$

$$0.65d \leq b \leq 0.85d \quad (10)$$

$$0.1b_{bf} \leq c \leq 0.25b_{bf} \quad (11)$$

$$R = \frac{4c^2 + b^2}{8c} \quad (12)$$

Donde:

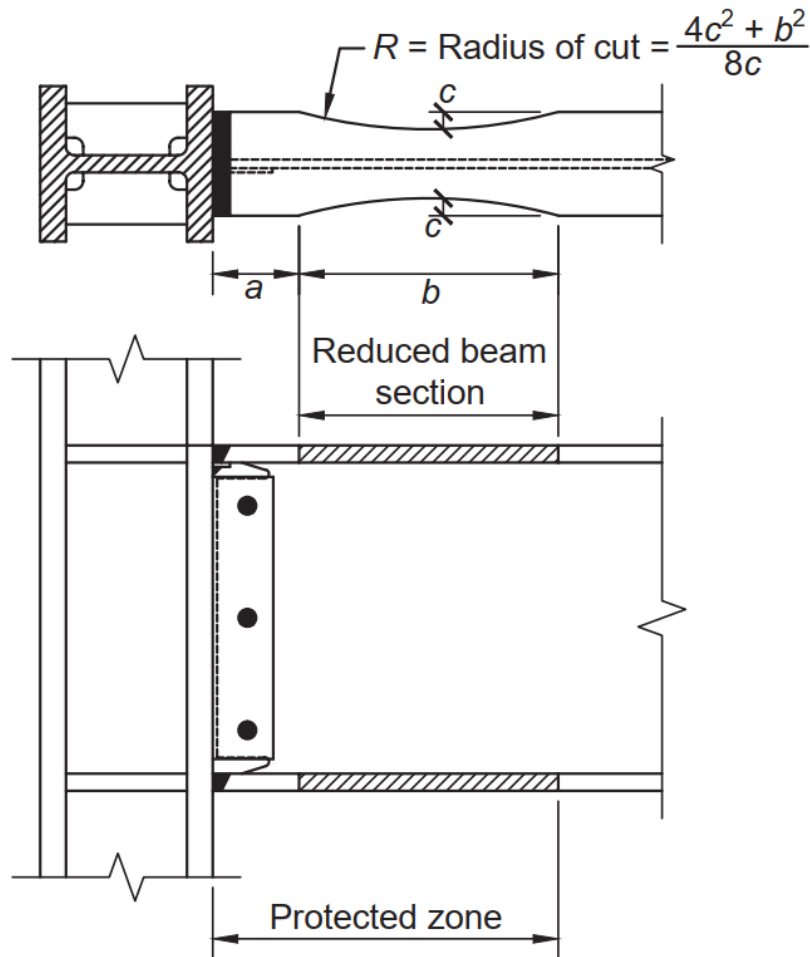
$R$  = Radio de la curva cortada en la RBS.

$a$  = Distancia horizontal medida desde la cara o patín interno de la columna hasta el inicio del corte de la sección RBS.

$b$  = Longitud de corte de la RBS.

$c$  = Profundidad del corte en el centro de la sección RBS.

$b_{bf}$  = Ancho del patín de la viga.



**Figura 44.** Esquema de la sección reducida de una viga (RBS) en la conexión.  
Fuente: (American Institute of Steel Construction AISC, 2016)

Con la reducción de la viga definida, se recalcula el módulo plástico en el centro de la sección reducida a partir de la profundidad y del espesor del patín recortado, para poder asegurar una zona en la cual, gracias a la disminución de resistencia producida en este corte, la carga se concentra en estas secciones generando plastificación del material. Como el acero entra en un “estado de libertad de deformaciones”, la sección se transforma en una especie de rótula mecánica la cual permite dar cierta libertad de movimiento a los pórticos, contrarrestando justamente en estos puntos de la viga los momentos que producen el cortante. Este módulo plástico de la sección RBS se calcula a través de la siguiente ecuación (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$Z_{RBS} = Z_x - 2c \cdot t_{bf} (d - t_{bf}) \quad (13)$$

Donde:

$Z_{RBS}$  = Módulo plástico en el centro de la sección RBS.

$Z_x$  = Módulo plástico de la sección completa del perfil respecto a su eje x.

$t_{bf}$  = Espesor del patín de la viga.

$d$  = Altura o peralte de la sección transversal de la viga.

Una vez calculado este módulo, se calcula el momento probable de la sección RBS de la viga, considerando ciertos factores adicionales definidos por la norma AISC 341-16, frente a la forma original de la fórmula para la sección completa, donde el momento sólo se calcula multiplicando el módulo plástico de la sección con el esfuerzo de fluencia correspondiente al material. El momento probable de la RBS es el siguiente (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$M_{pr} = C_{pr} \cdot R_y \cdot F_y \cdot Z_{RBS} \quad (14)$$

Donde:

$C_{pr}$  = Factor que considera la resistencia máxima de la conexión incluyendo el endurecimiento por deformación, restricción local, refuerzo adicional y otras condiciones de conexión.

$R_y$  = Relación entre el límite elástico esperado y el límite elástico mínimo especificado,  $F_y$ , como se especifica en la norma AISC: disposiciones sísmicas.

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia del acero involucrado.

El factor  $C_{pr}$  se lo calcula mediante la siguiente fórmula definida en la norma AISC 358-16, la cual posee un límite para evitar estimaciones erróneas del momento probable, que puede dispararse debido a la proporcionalidad directa con los demás parámetros; también consta de los valores de resistencia que representan al material para generar un coeficiente específico al acero identificado en el elemento (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1.2 \quad (15)$$

Por último, para completar el desarrollo del muro base, se tiene la ecuación que representa la resistencia de la placa de acero sometida a esfuerzos de corte repartidos en los bordes, la cual según la norma AISC 341-16 debe ser evaluada directamente a la carga de corte solicitante para evitar que los elementos de borde fallen antes que la placa, sin embargo, en las redacciones originales del estudio de los muros, la capacidad a corte se la obtiene mediante la suma del cortante soportado por las vigas y el corte representativo de la placa; de todos la ecuación se expresa de la siguiente forma (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$V_{np} = 0.42F_y \cdot t_w \cdot L_{cf} \cdot \sin 2\alpha \quad (16)$$



Donde:

$V_{np}$  = Capacidad nominal de la placa de acero al cortante.

$t_w$  = Espesor de la placa de acero.

$L_{cf}$  = Longitud libre entre los patines internos de las columnas.

$\alpha$  = Ángulo de trabajo de la placa.

De esta ecuación, es necesario definir el ángulo con el cual podrían distribuirse los esfuerzos de tensión y compresión dentro de la placa, el cual se lo mide relativamente desde los ejes verticales de las columnas; esto imaginando el concepto de cortante aplicado en una placa de acero. El valor de este ángulo puede asumirse como de  $40^\circ$ , de lo contrario se lo obtiene mediante la siguiente fórmula (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w \cdot L}{2A_c}}{1 + t_w \cdot H \left( \frac{1}{A_b} + \frac{H^3}{360I_c \cdot L} \right)} \quad (17)$$

Donde:

$L$  = Distancia medida entre ejes de columnas VBE.

$H$  = Distancia medida entre ejes de vigas HBE.

$A_c$  = Área de la sección transversal de las columnas.

$A_b$  = Área de la sección transversal de las vigas.

$I_c$  = Inercia de la columna referente a un eje centroidal perpendicular al plano de muro.

Todas estas ecuaciones han sido definidas para el diseño de los muros SPSW, las cuales no son las únicas, pues las presentadas corresponden al diseño básico del concepto; estas poseen variantes dependiendo del acabado que se incluya en la placa de acero, para conseguir otro tipo de comportamientos que podrían representar otras condiciones en el diseño.

### **3.2.2. APORTES A LAS ECUACIONES POR LAS CONDICIONES DE APOYO Y OTROS**

En base al propósito que debe cumplir el modelo diseñado, las ecuaciones anteriores han sido modificadas conforme a criterios descritos en los estudios que generaron las variantes de los muros SPSW hasta hoy conocidos, con el fin de abarcar de mejor manera las condiciones presentadas por el ambiente que refleja un centro de laboratorio con equipos técnicos de estudio; adicionalmente se ha utilizado otros procedimientos para revisar aspectos correspondientes a los elementos de acero involucrados.

Para el diseño de las columnas, primeramente se las ha clasificado según lo establecido en la norma AISC 360-16 (American Institute of Steel Construction

AISC, 2016), para garantizar el correcto funcionamiento de los tubos rectangulares ante el sometimiento de los muros a las cargas cíclicas producidas por los equipos de ensayo, evaluando la sección a través de factores específicos descritos como límites para la relación ancho/espesor de los elementos constitutivos de la sección transversal analizada, complementando con los factores presentados en la norma NEC-SE-AC (Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, 2014), los cuales son los siguientes:

**Tabla 22**


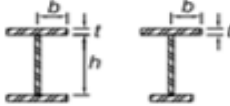
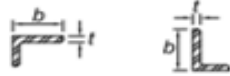
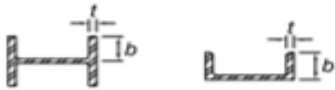
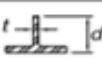
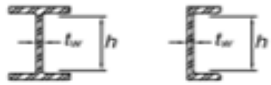
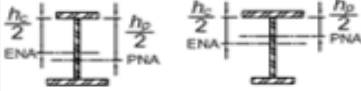


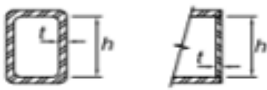


Relación Ancho-Espesor: Elementos en Compresión de Miembros Sujetos a Compresión Axial (American Institute of Steel Construction AISC, 2016).

	Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio $\lambda_r$ (nonslender/slender)	Examples
Unstiffened Elements	1	Flanges of rolled I-shaped sections, plates projecting from rolled I-shaped sections, outstanding legs of pairs of angles connected with continuous contact, flanges of channels, and flanges of tees	$b/t$	$0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	2	Flanges of built-up I-shaped sections and plates or angle legs projecting from built-up I-shaped sections	$b/t$	$0.64 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$ <sup>[a]</sup>	
	3	Legs of single angles, legs of double angles with separators, and all other unstiffened elements	$b/t$	$0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	4	Stems of tees	$d/t$	$0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Stiffened Elements	5	Webs of doubly symmetric rolled and built-up I-shaped sections and channels	$h/t_w$	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	6	Walls of rectangular HSS	$b/t$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	7	Flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	$b/t$	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	8	All other stiffened elements	$b/t$	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	9	Round HSS	$D/t$	$0.11 \frac{E}{F_y}$	

[a]  $k_c = 4\sqrt{h/t_w}$ , but shall not be taken less than 0.35 nor greater than 0.76 for calculation purposes.

**Tabla 23**

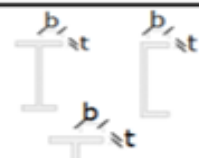

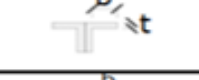

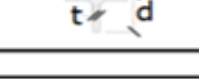
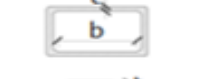


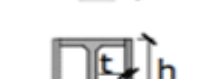

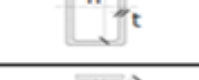

Relación Ancho-Espesor: Elementos en Compresión de Miembros Sujetos a Flexión (*American Institute of Steel Construction AISC, 2016*).

Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio		Examples
			$\lambda_p$ (compact/noncompact)	$\lambda_r$ (noncompact/slender)	
Unstiffened Elements	10 Flanges of rolled I-shaped sections, channels, and tees	$b/t$	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	11 Flanges of doubly and singly symmetric I-shaped built-up sections	$b/t$	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	<sup>[a]</sup> <sup>[b]</sup> $0.95\sqrt{\frac{k_c E}{F_L}}$	
	12 Legs of single angles	$b/t$	$0.54\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$0.91\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	13 Flanges of all I-shaped sections and channels in flexure about the minor axis	$b/t$	$0.38\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.0\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	14 Stems of tees	$d/t$	$0.84\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.52\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Stiffened Elements	15 Webs of doubly symmetric I-shaped sections and channels	$h/t_w$	$3.76\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	16 Webs of singly symmetric I-shaped sections	$h_c/t_w$	$\frac{h_c}{h_p}\sqrt{\frac{E}{F_y}}$ <sup>[c]</sup> $\left(\frac{0.54 M_p}{M_y} - 0.09\right)^2$ $\leq \lambda_r$	$5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	17 Flanges of rectangular HSS	$b/t$	$1.12\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	18 Flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	$b/t$	$1.12\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.40\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	19 Webs of rectangular HSS and box sections	$h/t$	$2.42\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$5.70\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	20 Round HSS	$D/t$	$0.07\frac{E}{F_y}$	$0.31\frac{E}{F_y}$	
21 Flanges of box sections	$b/t$	$1.12\sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$1.49\sqrt{\frac{E}{F_y}}$		

<sup>[a]</sup>  $k_c = 4\sqrt{h/t_w}$ , shall not be taken less than 0.35 nor greater than 0.76 for calculation purposes.  
<sup>[b]</sup>  $F_L = 0.7F_y$  for slender web I-shaped members and major-axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with  $S_{xt}/S_{xc} \geq 0.7$ ;  $F_L = F_y S_{xt}/S_{xc} \geq 0.5F_y$  for major-axis bending of compact and noncompact web built-up I-shaped members with  $S_{xt}/S_{xc} < 0.7$ , where  $S_{xc}$ ,  $S_{xt}$  = elastic section modulus referred to compression and tension flanges, respectively, in.<sup>3</sup> (mm<sup>3</sup>).  
<sup>[c]</sup>  $M_y$  is the moment at yielding of the extreme fiber.  $M_p = F_y Z_x$ , plastic bending moment, kip-in. (N-mm), where  $Z_x$  = plastic section modulus taken about x-axis, in.<sup>3</sup> (mm<sup>3</sup>).  
 $E$  = modulus of elasticity of steel = 29,000 ksi (200 000 MPa)      ENA = elastic neutral axis  
 $F_y$  = specified minimum yield stress, ksi (MPa)      PNA = plastic neutral axis

**Tabla 24**

Máximas Relaciones Ancho-Espesor para Elementos a Compresión (Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, 2014).

	Tipo de elemento	Relación ancho- espesor	Límites	Ejemplo
			$\lambda_{ps}$	
Elementos no Rigidizados	Flexión en alas de vigas "T" roladas o armadas, canales y vigas "T"	b/t	$0.30 \sqrt{E/F_y}$	
	Lados de ángulos simples o dobles con separadores			
	Lados salientes de pares de ángulos en contacto continuo			
	Alas de secciones para pilotes "H"	b/t	$0.45 \sqrt{E/F_y}$	
	Alma de vigas "T"	d/t	$0.30 \sqrt{E/F_y}^{(a)}$	
	Barras planas	b/t	2.5	
Elementos Rigidizados	Paredes de HSS rectangulares	b/t	$0.55 \sqrt{E/F_y}^{(b)}$	
	Alas de perfiles "T" encajonados, y secciones cajón armadas	b/t		
	Placas laterales de secciones laminadas "I" encajonadas y paredes de perfiles armados encajonados usados como arriostramientos diagonales	h/t		
	Almas de perfiles "T" armados o rolados usados para vigas o columnas <sup>(c)</sup>	h/t <sub>w</sub>	Para $C_a \leq 0.125$ $2.45 \sqrt{E/F_y} (1 - 0.93 C_a)$	
	Placas laterales de secciones laminadas "I" encajonados usados como vigas o columnas	h/t	Para $C_a > 0.125$ $0.77 \sqrt{E/F_y} (2.93 - C_a)$ $\geq 1.49 \sqrt{E/F_y}$ donde: $C_a = \frac{P_c}{\phi_c P_n} (DFCR)$ $C_a = \frac{\Omega_c P_c}{P_n} (DR.A)$	
	Almas de secciones cajón armadas usados como vigas o columnas	h/t		
	Almas de perfiles "T" rolados o armados usados como arriostramientos diagonales	h/t <sub>w</sub>	$1.49 \sqrt{E/F_y}$	
Almas de secciones para pilotes "H"	h/t <sub>w</sub>	$0.94 \sqrt{E/F_y}$		
Paredes de HSS de sección circular	D/t	$0.038 E / F_y$		

(a) Para perfiles T de miembros sujetos a compresión, la máxima relación ancho-espesor para miembros con gran ductilidad, para el alma de la "T" puede ser incrementada a  $0.38\sqrt{E/F_y}$  si se satisfacen las siguientes condiciones:  
(1) Pandeo en el miembro a compresión ocurre alrededor del plano del alma  
(2) La carga a compresión es transferida al final de la conexión, solo a la cara exterior del alma, de la T, dando como resultado una conexión excéntrica que reduzca los esfuerzos de compresión en la punta del alma de la T.

(b) La máxima relación ancho-espesor de las alas de una viga "T" rolada y una viga cajón armada para las columnas en un Pórtico Especial a Momento no debe exceder  $0.60 \sqrt{E/F_y}$

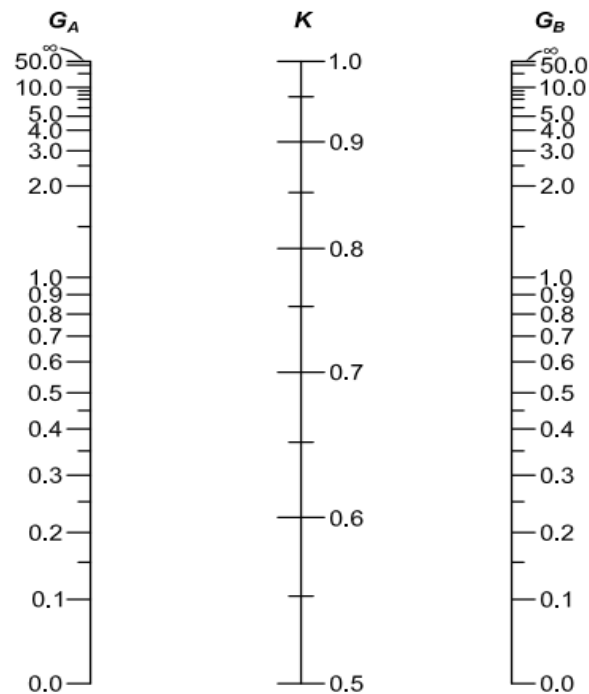
(c) Para las vigas "T" roladas usadas en sistemas PEM, donde  $C_a$  es menor o igual a 0.125, la máxima relación ancho-espesor  $h/t_w$  no debe exceder  $2.45\sqrt{E/F_y}$ .

Para el cálculo de la resistencia de las columnas, se ha procedido a obtener su capacidad en las dos direcciones a través del uso de nomogramas o de estimación de la longitud efectiva, con lo cual se obtienen los respectivos esfuerzos de “Euler” y “crítico” para el análisis de esbeltez y de pandeo del miembro estructural; esto a la vez, permite asegurar el traslado del fallo a la placa de acero en el muro. Para la estimación de la longitud efectiva, se tienen las siguientes alternativas (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

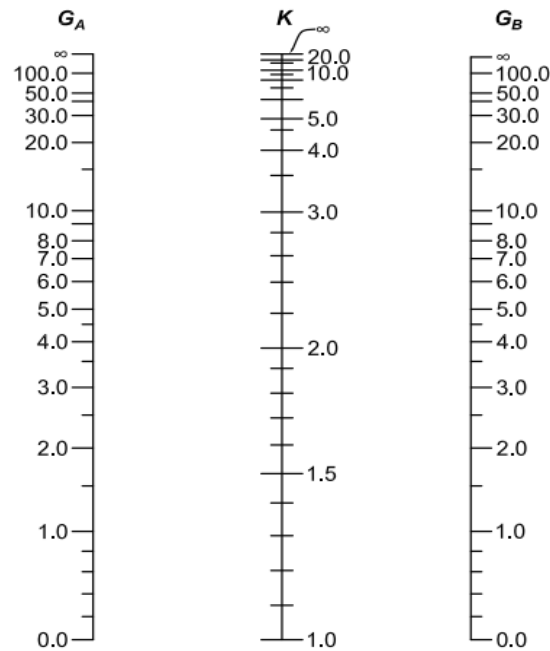
**Tabla 25**

Longitudes efectivas de columnas (American Institute of Steel Construction AISC, 2016).

Buckled shape column is shown by dashed line	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Theoretical k value	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Recommended design value: approximated ideal conditions	0.65	0.80	1.2	1.0	2.1	2.0
End condition code	<ul style="list-style-type: none"> <li> Rotation fixed and translation fixed</li> <li> Rotation free and translation fixed</li> <li> Rotation fixed and translation free</li> <li> Rotation free and translation free</li> </ul>					



**Figura 45.** Nomograma para determinar  $k$  en columnas con lado impedido. Fuente: (American Institute of Steel Construction AISC, 2016).



**Figura 46.** Nomograma para determinar  $k$  en columnas con ladeo no impedido.  
Fuente: (American Institute of Steel Construction AISC, 2016).

Los métodos descritos en la tabla 25 y en las figuras 45 y 46 permiten obtener el valor de  $k$  para el cálculo de la capacidad de una columna dependiendo de su complejidad, pues depende si posee algún impedimento de ladeo, de la conexión con otros elementos, de las asunciones que se puedan realizar respecto a los conectores, entre otros. Para utilizar los nomogramas descritos en las figuras 45 y 46, es necesario calcular el factor  $G_k$  que corresponde a cada extremo de la columna ( $G_A$  y  $G_B$ ), con el fin de estimar un cierto grado de sujeción en cada nudo, permitiendo ajustar una medida más precisa de la longitud efectiva para el cálculo de la esbeltez de la columna, siendo este factor el siguiente (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$G_k = \frac{\sum(E \cdot I/L)_{col}}{\sum(E \cdot I/L)_{vig}} \quad (18)$$

Donde:

$G_k$  = Factor de restricción en el nudo.

$E$  = Módulo de Young del acero.

$I$  = Inercia del miembro estructural.

$L$  = Longitud no soportada de cada miembro estructural (para el caso de la viga, de no serlo, se utiliza la longitud del elemento restrictivo).

Por lo general, el módulo de Young es el mismo debido al acero del que vienen hechos los distintos elementos o miembros estructurales, con lo cual se simplifica este valor de la ecuación anterior, quedando reducida al uso de únicamente de

la inercia y longitud de los elementos o restricciones al nudo, obteniéndose la siguiente forma de la ecuación:

$$G_k = \frac{\sum(I/L)_{col}}{\sum(I/L)_{vig}} \quad (19)$$

Para el cálculo de la capacidad de las columnas, luego de obtener la longitud efectiva, se calcula el factor de esbeltez con el cual se obtiene el esfuerzo de Euler, para evaluar si existe un trabajo elástico o inelástico; es necesario realizar dicha evaluación para utilizar una ecuación específica referente al cálculo del esfuerzo crítico, dependiendo del resultado obtenido. Las ecuaciones para el procedimiento son las siguientes (American Institute of Steel Construction AISC, 2016):

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{k \cdot L}{r} \quad (21)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \quad (22)$$

- Cuando  $\frac{kL}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$  o  $\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25$ , hay un trabajo inelástico:

$$F_{cr} = \left( 0.658 \frac{F_y}{F_e} \right) F_y \quad (23)$$

- Cuando  $\frac{kL}{r} > 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$  o  $\frac{F_y}{F_e} > 2.25$ , hay un trabajo elástico:

$$F_{cr} = 0.877 F_e \quad (24)$$

Donde:

$\lambda$  = Factor de esbeltez del elemento estructural.

$k$  = Longitud efectiva del elemento estructural.

$r$  = Radio de giro del elemento estructural.

$F_e$  = Esfuerzo de Euler.

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia del acero.

$F_{cr}$  = Esfuerzo crítico de falla.

$P_n$  = Capacidad nominal de compresión del elemento.

$A_g$  = Área bruta de la sección transversal del elemento.

Este aporte se ha realizado con el fin de obtener dimensiones de columnas lo suficientemente fuertes, partiendo de comparaciones realizadas con otros diseños como el presentado en el estudio del comportamiento de los muros



SPSW especiales con placa perforada y con secciones de viga reducida RBS (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. I: Experimental Investigation, 2009), donde al comparar capacidades e inercias, se ha transformado las columnas tipo I del estudio mencionado por secciones tipo tubos rectangulares, además, al utilizarse una placa de acero en vez de arriostramientos diagonales, se ha analizado la longitud efectiva de las columnas como si estas no tuvieran ningún lado impedido.

Dentro del cálculo para el diseño de las vigas, en el estudio de los muros SPSW especiales se presentan ciertas modificaciones a las ecuaciones de diseño estandarizadas, donde una de ellas es la creación de un factor con el cual se procede a calcular el corte soportado por las secciones reducidas de la viga, sin considerar los factores originales de estimación por el material, y otra es la creación de un factor que permite reemplazar la separación entre los centros de las secciones RBS con el uso de la altura o separación entre vigas del muro; todo esto con el fin de poder involucrar la separación entre el centro de las rótulas o apoyos fijos del ensayo con el eje central de la viga inferior, obteniendo las siguientes fórmulas (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. I: Experimental Investigation, 2009):

$$\beta = \frac{Z_{RBS}}{Z_x} \quad (25)$$

$$\lambda_b = \frac{L_h}{L} \quad (26)$$

$$V_{nb} = \frac{4\beta \cdot M_p}{\lambda_b(H + h_{hinge})} \quad (27)$$

$$M_p = F_y \cdot Z_x \quad (28)$$

Donde:

$\beta$  = Relación entre el módulo plástico corregido por la sección RBS y el módulo plástico de la sección completa.

$\lambda_b$  = Relación entre la distancia de las secciones RBS y la distancia entre ejes de columnas VBE.

$h_{hinge}$  = Distancia entre el eje de la viga inferior del muro y el centro de los ejes de los apoyos o rótulas.

$M_p$  = Momento flector plástico de la viga (sección transversal completa).

De la ecuación 27 se debe tener en cuenta que, el reemplazo del coeficiente de la ecuación 8 cuyo valor es "2", con el coeficiente "4", tiene que ver con relaciones de geometría presentes en el diseño del muro, con lo cual se concluye el reemplazo de la longitud entre ejes de columnas "L" con la distancia entre ejes de

vigas “H”, haciendo posible el incluir la distancia entre la viga inferior y los apoyos que sujetan al muro con la cimentación “h<sub>hinge</sub>”.

Así mismo, para el diseño de la placa de acero, se ha modificado la ecuación que calcula la capacidad de la placa cambiando el factor de 0.42 a 0.5, complementándola con una ecuación que permite considerar la separación entre la viga inferior y los apoyos del muro, con lo cual se añade un paso más para obtener la resistencia al corte que refleja el muro (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. I: Experimental Investigation, 2009):

$$V_{np} = 0.5F_y \cdot t_w \cdot L_{cf} \cdot \sin 2\alpha \quad (29)$$

$$V'_{np} = V_{np} \frac{H}{H + h_{hinge}} \quad (30)$$

Donde:

$V_{np}$  = Capacidad nominal de la placa de acero al corte

$V'_{np}$  = Capacidad nominal de la placa de acero al corte, corregida por presencia de las rótulas.

Como el presente estudio requiere de la implementación de rigidizadores en la placa de acero para evaluar el aumento de resistencia provocado por la colocación de ángulos en el panel, es necesario recurrir a las ecuaciones desarrolladas para el cálculo de la resistencia de la placa al pandeo por corte, con lo cual se analiza el rango en el que se desarrolla la falla que puede ser: el elástico o el inelástico; adicionalmente se aplica una formula referente al caso de falla y, luego de distribuir los ángulos y de calcular las inercias mínimas para la estimación de los rigidizadores, se vuelve a calcular la resistencia de la placa con las nuevas dimensiones de la distribución, siendo necesario también comprobar la resistencia del atiesador como placa para asegurar el diseño de los rigidizadores (De Buen López De Heredia, 2000).

Para llevar a cabo este propósito, el cálculo del esfuerzo crítico de una placa de acero es muy similar al procedimiento para elementos estructurales, teniendo en cuenta los soportes laterales, la geometría de la placa en relación con el espesor, de verificar si se encuentra en el rango elástico o inelástico, y recordando que la ecuación del esfuerzo crítico es muy similar a la de Euler (ecuación 1). En este caso donde se analiza el comportamiento de la placa ante cargas de corte y para efectos de las dimensiones consideradas del muro, la ecuación es la siguiente (De Buen López De Heredia, 2000):

$$\tau_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1 - \mu^2)} \left( \frac{t_w}{H_{cf}} \right)^2 k_p \quad (31)$$

Donde:

$\tau_{cr}$  = Esfuerzo de corte crítico de la placa de acero.

$\mu$  = Coeficiente de Poisson.

$H_{cf}$  = Separación entre las caras de los patines internos de las vigas.

$k_p$  = Factor de placa que depende de las condiciones de apoyo y de la relación de aspecto.

De manera similar al diseño de miembros estructurales, el factor de placa que representa una forma de “área efectiva de la placa de acero” se estima dependiendo de las condiciones de borde presentadas en el montaje del panel y, en este caso, de sus dimensiones que influyen en la respuesta estructural; es así que, para el tratamiento de este tema, se define un factor muy importante llamado: “Relación de Aspecto” (De Buen López De Heredia, 2000). En este caso referente al estudio de los muros, la relación presenta la siguiente forma:

$$\alpha_p = \frac{L_{cf}}{H_{cf}} \quad (32)$$

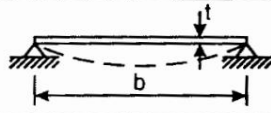
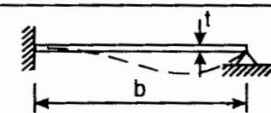
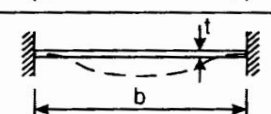
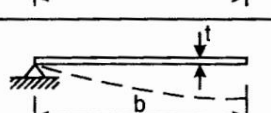
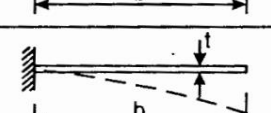
Donde:

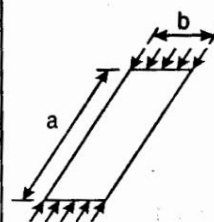
$\alpha_p$  = Relación de aspecto de la placa analizada.

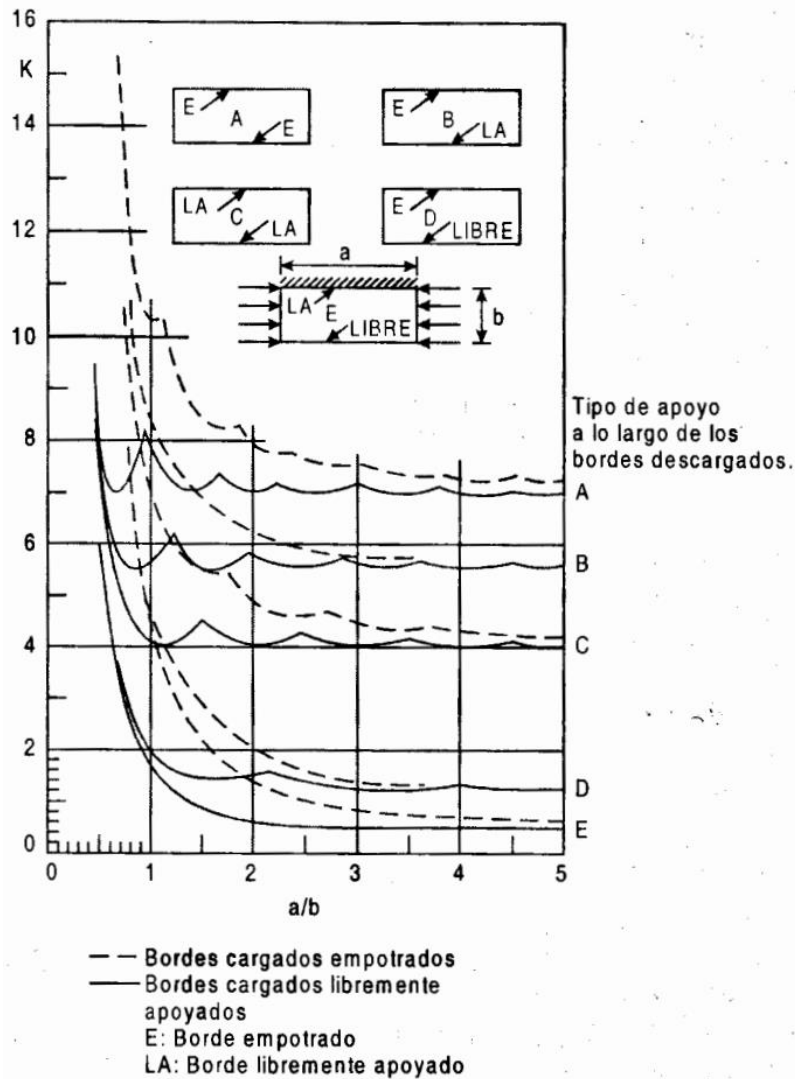
Con esta relación, se procede a estimar el factor de placa apreciando de cierto modo la capacidad de soporte que generan las conexiones de la placa hacia los bordes donde se va a producir la transferencia de esfuerzos, para relacionar estas conexiones con alguna forma de “apoyos” que pueden ser: fijos, móviles, empotramientos, borde libre, etc. A continuación, se muestran algunas tablas, curvas y ecuaciones que permiten obtener este factor de placa (De Buen López De Heredia, 2000):

**Tabla 26**

Valores mínimos del factor de placa “ $k_p$ ” (De Buen López De Heredia, 2000).

Caso	Tipo de apoyo en los bordes descargados (los bordes cargados están libremente apoyados)	$K_{min}$
1	Los dos bordes libremente apoyados 	4.000
2	Un borde libremente apoyado, el otro empotrado 	5.42
3	Los dos bordes empotrados 	6.97
4	Un borde libremente apoyado, el otro libre 	0.425
5	Un borde empotrado, el otro libre 	1.277





**Figura 47.** Resumen de valores del factor de placa “ $k_p$ ”.  
 Fuente: (De Buen López De Heredia, 2000).

También se introducen ecuaciones que ayudan a obtener el factor  $k_p$  de placa de manera más rápida considerando la relación de aspecto, claro que también las mismas están definidas para casos específicos de condiciones de apoyo, siendo necesario tener en cuenta el comportamiento del factor ante distintas relaciones de aspecto y condiciones de apoyo como se ve en las curvas y tablas presentadas. Estas ecuaciones son las siguientes:

- Para placas con apoyos libres en los bordes:

$$\text{si } \alpha_p \geq 1.0; \quad k_p = 5.34 + \frac{4.00}{\alpha_p^2} \quad (33)$$

$$\text{si } \alpha_p < 1.0; \quad k_p = 4.00 + \frac{5.34}{\alpha_p^2} \quad (34)$$

- Para cualquier valor de  $\alpha_p$  en placas apoyadas libremente:

$$k_p = 5.00 + \frac{5.00}{\alpha_p^2} \quad (35)$$

- Para placas empotradas en sus cuatro bordes ( $\alpha_p \geq 1.0$ ):

$$k_p = 8.98 + \frac{5.60}{\alpha_p^2} \quad (36)$$

Considerando que, dependiendo las propiedades de la placa, ésta puede fallar con el desarrollo de pandeo en el rango elástico o en el inelástico; para el caso de falla en el rango elástico, la ecuación 31 es suficiente, pero en el caso de falla dentro del rango inelástico, es necesario ajustar la ecuación anterior mediante procedimientos aproximados de estimación del esfuerzo crítico en la zona inelástica del acero. Una manera sencilla de calcular el esfuerzo crítico en el rango inelástico es suponer que la relación entre los esfuerzos críticos de los rangos elástico e inelástico es la misma que en columnas cargadas axialmente y realizar la corrección del esfuerzo crítico elástico mediante un fórmula o curva deducida para columnas, obteniendo la siguiente ecuación en forma general:

$$\sigma_{cr} = \sigma_y \left( 1 - \frac{\sigma_y}{4\sigma_h} \right) \quad (37)$$

Donde:

$\sigma_{cr}$  = Esfuerzo crítico corregido para el rango elástico.

$\sigma_y$  = Esfuerzo de fluencia del acero.

$\sigma_h$  = Esfuerzo crítico elástico hipotético.

De ser necesario el uso de la ecuación 37 mediante comprobaciones del rango, se toma el esfuerzo crítico elástico calculado mediante la ecuación general 1 (la ecuación 31 es el caso específico aplicado al corte) y se lo asume como el esfuerzo hipotético  $\sigma_h$  para realizar la corrección, donde el límite para considerar el trabajo elástico o inelástico en el caso de la placa sometida a esfuerzos de corte es el siguiente (De Buen López De Heredia, 2000):

$$\tau_{cr} \leq \frac{\tau_y}{2} \quad (38)$$

$$\tau_y = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_y \quad (39)$$

Donde:

$\tau_y$  = Esfuerzo de fluencia del acero ante el corte.

En caso de utilizarse la ecuación 37 para la corrección del esfuerzo de corte crítico, se utiliza la misma forma de la ecuación mediante la misma suposición, sustituyendo los esfuerzos por los correspondientes al corte, considerando las relaciones 38 y 39 descritas para transformar el esfuerzo de fluencia del acero a esfuerzo de fluencia por corte y proceder con la comprobación.

Complementando el diseño del muro y la placa de acero con los rigidizadores, se debe calcular la inercia mínima requerida para generar la rigidez necesaria en los lugares donde se coloquen los perfiles respectivos, con lo cual la falla se ve obligada a producirse en una sección de placa mucho menor, a la par de conseguir una mejor distribución de las cargas de corte en las divisiones

generadas con la colocación de los atiesadores. Para conseguir las dimensiones necesarias de los rigidizadores, se tienen las siguientes ecuaciones (De Buen López De Heredia, 2000):

$$\delta = \frac{A_{at}}{A_{pl}} \quad (40)$$

$$A_{pl} = b \cdot t_w \quad (41)$$

$$0 < \delta \leq 0.20 \quad (42)$$

$$(\gamma_o)_{m\acute{a}x} = 24.4 + 112\delta(1 + \delta) \quad (43)$$

$$\gamma_o = 11.4\alpha_p + (1.25 + 16\delta)\alpha_p^2 - 5.4\sqrt{\alpha_p} \quad (44)$$

$$\gamma_o \leq (\gamma_o)_{m\acute{a}x} \quad (45)$$

$$I_o = \frac{b \cdot t_w^3}{12(1 - \mu^2)} \gamma_o \quad (46)$$

Donde:

$\delta$  = Relación entre el área del atiesador y el área del lateral correspondiente de la placa, la cual debe ser mayor a 0 y no mayor que 0.20.

$A_{at}$  = Área de la sección transversal del rigidizador.

$A_{pl}$  = Área del lateral de la placa correspondiente al uso del rigidizador (eje del lateral debe ser perpendicular al eje del perfil).

$\gamma_o$  = Coeficiente para el cálculo de la inercia mínima del atiesador.

$(\gamma_o)_{m\acute{a}x}$  = Coeficiente máximo.

$b$  = Dimensión respecto a la cual se está evaluando la carga y la colocación de rigidizadores.

$I_o$  = Inercia mínima del rigidizador.

Este procedimiento descrito se lo lleva a cabo para diseñar las dimensiones mínimas de los rigidizadores que van a ser colocados en la placa de acero, el cual se lo desarrolla conforme el arreglo geométrico con el cual se van a distribuir los atiesadores en la placa, pues depende bastante del sentido en el que van a ser colocados para considerar las dimensiones que van a ingresar en el cálculo y cómo van a ingresar, afectando las relaciones de aspecto, “ $\delta$ ” y el valor de la inercia mínima que se debe colocar. Para el diseño de los atiesadores del muro referente al presente estudio, se debe realizar el procedimiento dos veces con el fin de obtener las características de los rigidizadores correspondientes a cada sentido (vertica y horizontal), siendo necesario considerar la relación de aspecto y la longitud correspondientes al enfoque de la dirección, obteniendo los siguientes casos:

- Para los atiesadores distribuidos con respecto a “H” (horizontales):

$$A_{pl} = H_{cf} \cdot t_w \quad (47)$$

$$\alpha_p = \frac{L_{cf}}{H_{cf}} \quad (48)$$

$$I_o = \frac{H_{cf} \cdot t_w^3}{12(1 - \mu^2)} \gamma_o \quad (49)$$

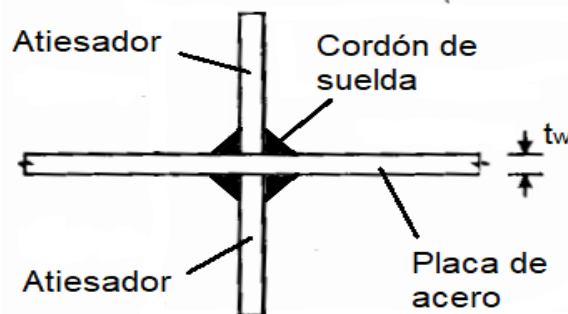
- Para los atiesadores distribuidos respecto a "L" (verticales):

$$A_{pl} = L_{cf} \cdot t_w \quad (50)$$

$$\alpha_p = \frac{H_{cf}}{L_{cf}} \quad (51)$$

$$I_o = \frac{L_{cf} \cdot t_w^3}{12(1 - \mu^2)} \gamma_o \quad (52)$$

Para efectos del estudio, las inercias mínimas se las han obtenido aplicando el área del atiesador directamente en la ecuación, suponiendo un sólo ángulo rigidizador en una de las caras de la plancha de acero, con lo cual, luego de comparar las inercias mínimas con la inercia de la sección tipo ángulo, se ha decidido aplicar un "doble ángulo" como rigidizador de la placa, superando esta necesidad de cubrir las inercias especificadas en las ecuaciones, los cuales se colocaron en cada cara de la plancha de acero de manera "contrapuesta", quedando de la siguiente forma:



**Figura 48.** Esquema de un "rigidizador doble".  
Fuente (De Buen López De Heredia, 2000).

Una vez conseguidas las dimensiones del perfil que va a ser utilizado como rigidizador, se distribuyen los atiesadores conforme el número de espacios que se desea generar en la placa y la reducción de la "sección de cálculo" de la placa de acero, para el soporte de los esfuerzos de corte que provienen del ensayo, con lo cual se vuelve a evaluar el esfuerzo crítico de la placa para observar la ganancia obtenida, respetando el mismo enfoque direccional con el cual se ingresaron las dimensiones en el análisis de la placa sin atiesadores, reemplazando de manera correspondiente las medidas de la "sección de cálculo" anterior con las medidas de la nueva "sección de cálculo, obteniendo las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_{pr} = \frac{a_w}{b_w} \quad (53)$$

$$\tau_{crr} = \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1 - \mu^2)} \left( \frac{t_w}{b_w} \right)^2 k_{pr} \quad (54)$$

Donde:

$\alpha_{pr}$  = Relación de aspecto de la nueva sección de cálculo debida a los rigidizadores.

$a_w$  = Base de la nueva sección de cálculo de la placa.

$b_w$  = Altura de la nueva sección de análisis de la placa de acero.

$k_{pr}$  = Factor de placa debido a los rigidizadores.

$T_{crr}$  = Esfuerzo crítico de la placa debido a los rigidizadores.

Como el proceso de cálculo “en concepto” es el mismo, todas las ecuaciones anteriores se aplican considerando las nuevas variables referentes a la nueva “sección de cálculo”, siendo necesario calcular su relación de aspecto (ec. 53) con al cual se recalcula el factor de placa y se procede a obtener el esfuerzo crítico (ec. 54) con el cambio correspondiente de valores; desde luego se debe acompañar con la revisión del rango en el que se produce la falla y, de ser necesario, corregir el esfuerzo crítico debido a una falla inelástica.

Obteniendo estos valores, se debe realizar la comprobación del esfuerzo de falla del atiesador analizándolo a través del cálculo de placas, donde de igual manera se debe estimar el factor de placa a través de valores tabulados; en este caso no se puede determinar la relación de aspecto pues esta tiende a ser infinita. Una vez conseguido el factor de placa, se calcula el esfuerzo crítico del ala del ángulo, analizándolo de igual manera para corregirlo en caso de fallar inelásticamente (ec. 37); el cual debe ser mayor al esfuerzo de la placa para evitar que el ángulo acompañe las deformaciones de la placa, resultando en las siguientes ecuaciones:

$$\tau_{crat} > \tau_{crr} \quad (55)$$

$$\tau_{crat} = \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1 - \mu^2)} \left( \frac{t_{at}}{b_{at}} \right)^2 k_{at} \quad (56)$$

$$\text{si } \tau_{crat} > \frac{\tau_y}{2}; \quad \tau_{crat} = \tau_y \left( 1 - \frac{\tau_y}{4\tau_h} \right) \quad (57)$$

Donde:

$T_{crat}$  = Esfuerzo crítico del atiesador analizado como placa.

$T_h$  = Esfuerzo crítico de corte hipotético, el cual se asume como el crítico elástico obtenido en la ecuación 56 en caso de falla inelástica.

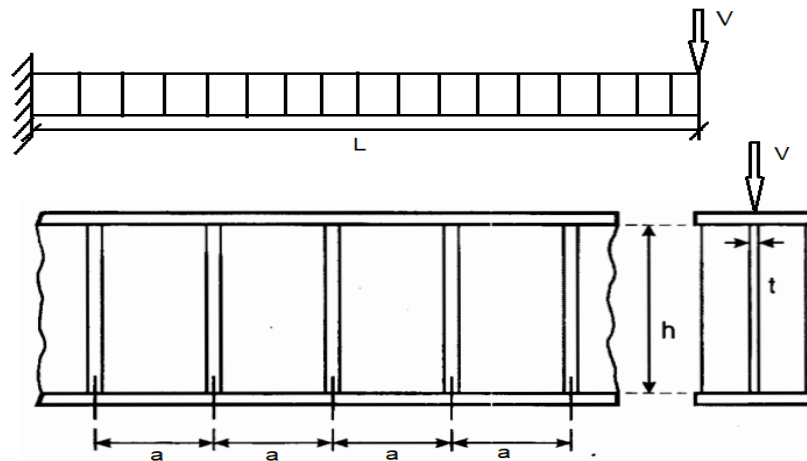
$t_{at}$  = Espesor del atiesador (si es ángulo, es el espesor del ala utilizada como rigidizador).

$b_{at}$  = longitud transversal del atiesador o ala del ángulo utilizada como rigidizador.



$k_{at}$  = Factor de placa correspondiente al atiesador.

Con todo lo desarrollado para el correcto dimensionamiento de los rigidizadores, se procede a calcular el aporte generado por el uso de atiesadores en la placa, teniendo en cuenta el sentido de aplicación de la carga cortante, que es muy importante debido a la rigidez reflejada por la posición geométrica del muro, como es el caso del presente modelo donde la altura de las columnas prevalece sobre la longitud de las vigas. Debido al desarrollo de la teoría de placas enfocada mayoritariamente para el cálculo de elementos estructurales (generalmente vigas), por el momento existe una ecuación enfocada al cálculo del aporte de rigidizadores aplicados en el alma de vigas tipo "I", pero enfocando dicha ecuación a un cálculo de integración de "franjas aportantes" a un cuerpo idealizado como la agrupación de varias vigas paralelas, se puede proyectar esta ecuación para calcular efectivamente el aporte de resistencia al corte del muro total (De Buen López De Heredia, 2000).



**Figura 49.** Viga tipo "I" de alma rigidizada, sometida a una carga puntual en su extremo libre.  
Fuente: (De Buen López De Heredia, 2000).

Como se puede ver en la figura 49, se muestra el alma de una viga tipo I que ha sido rigidizada para aumentar su capacidad al corte que representa la carga puntual ( $V$ ) aplicada en el extremo libre, donde se puede ver las dimensiones de peralte del alma ( $h$ ), separación entre rigidizadores ( $a$ ), longitud de la viga ( $L$ ) y espesor del alma ( $t$ ) en el corte transversal. Se puede decir que la capacidad aportada por los rigidizadores al corte que refleja esta viga viene dada por la siguiente expresión:

$$V = V_v + V_t \quad (58)$$

$$V_t = \sigma_t \cdot h \cdot t \frac{1}{2\sqrt{1 + (a/h)^2}} \quad (59)$$

Donde:

$V$  = Carga aplicada en el extremo libre de la viga.

$V_v$  = Carga absorbida netamente por la viga.

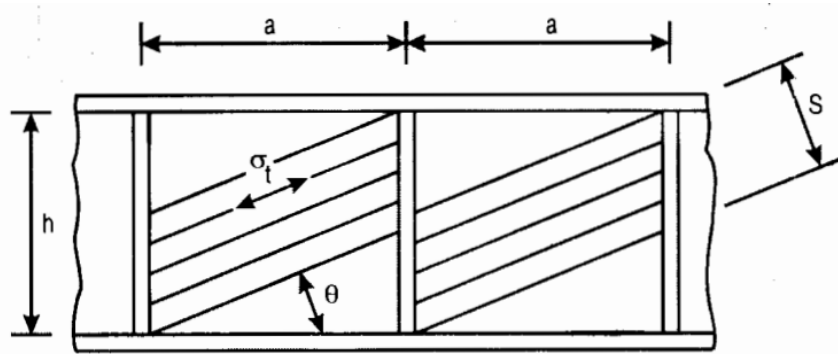
$V_t$  = Carga absorbida por el aporte de los rigidizadores en la viga.

$\sigma_t$  = Esfuerzo de tensión distribuido en los espacios definidos por los rigidizadores.

$h$  = Peralte del alma de la viga.

$t$  = espesor del alma de la viga.

$a$  = separación entre rigidizadores.



**Figura 50.** Distribución del esfuerzo de tensión en los espacios marcados por los rigidizadores.  
Fuente: (De Buen López De Heredia, 2000).

De la ecuación 59, se puede reemplazar el producto entre el peralte ( $h$ ) y el espesor ( $t$ ) con una relación que involucra el valor del corte que provoca la plastificación completa del alma ( $V_p$ ) y el esfuerzo de fluencia del acero, con lo cual se pueden juntar los esfuerzos de tensión y el esfuerzo de fluencia en una sola relación que permite cambiar estos valores por parámetros del material transformando el valor de la carga aplicada  $V_t$  por la capacidad de carga  $V_{nt}$  aportada por los atiesadores en el alma de la viga rigidizada, llegando a la siguiente ecuación (De Buen López De Heredia, 2000):

$$h \cdot t = \frac{V_p}{\tau_y} = \sqrt{3} \frac{V_p}{\sigma_y} \quad (60)$$

Usando la expresión 60 en la ecuación 59:

$$V_t = \sigma_t \left( \sqrt{3} \frac{V_p}{\sigma_y} \right) \frac{1}{2\sqrt{1 + (a/h)^2}};$$

$$V_t = \frac{\sqrt{3}}{2} V_p \left( \frac{\sigma_t}{\sigma_y} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right);$$

Donde:

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_y} + \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} = 1 \quad (61)$$

Usando la expresión 61, se tiene:

$$V_{nt} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_p \left( 1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right);$$

$$V_{nt} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{V_p}{\tau_y} \right) \left( \frac{\tau_y - \tau_{cr}}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right);$$

Volviendo a utilizar la expresión 60, se llega a la expresión final para el aporte de los rigidizadores de una viga:

$$V_{nt} = \frac{\sqrt{3}}{2} h \cdot t \left( \frac{\tau_y - \tau_{cr}}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right) \quad (62)$$

Donde:

$V_p$  = Corte que provoca la plastificación completa del alma de la viga.

$V_{nt}$  = Capacidad nominal de corte aportada por los rigidizadores en el alma de la viga.

$\sigma_y$  = Esfuerzo de fluencia del acero.

$\tau_y$  = Esfuerzo de fluencia por corte del acero.

$\tau_{cr}$  = Esfuerzo crítico de falla del acero por corte.

Donde la ecuación 62 representa la capacidad aportada (no factorizada) por el uso de rigidizadores en una viga ante la aplicación de cargas de corte externas. Esta ecuación, haciendo énfasis en una idealización de un cuerpo tipo placa de acero rigidizada, conformada de varias franjas o fajas de vigas rigidizadas, se puede recurrir a un cálculo sumatorio debido a la integración de dichas fajas de vigas en un solo cuerpo tipo muro SPSW, obteniendo de esta manera el aporte del uso de rigidizadores en la placa de acero del muro:

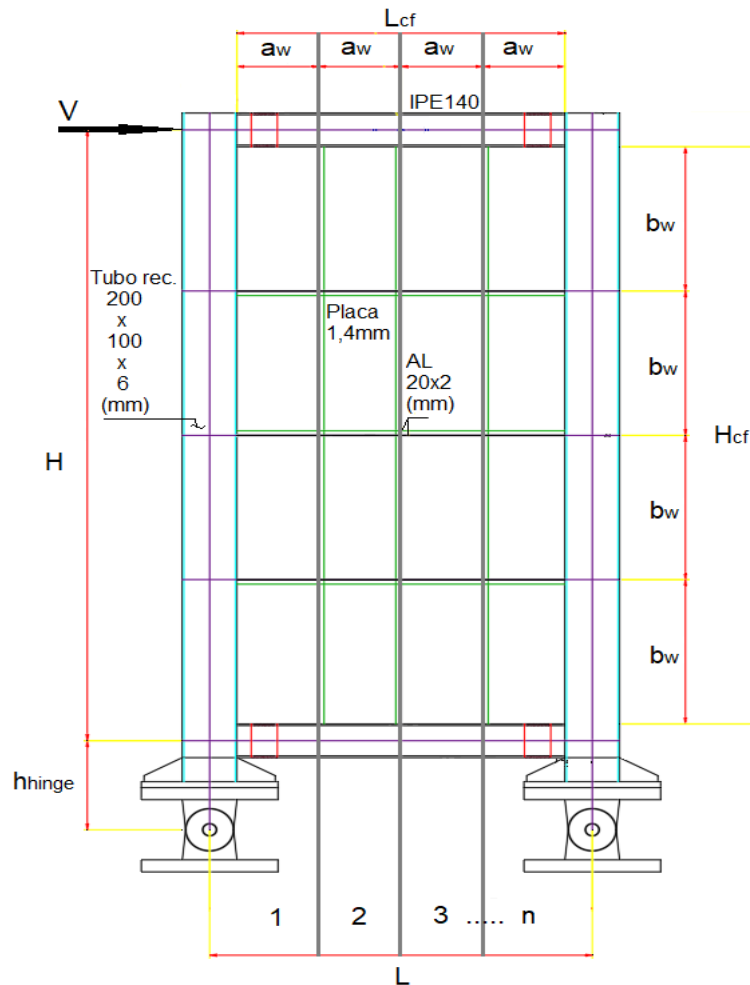
$$V_{nt} = \frac{\sqrt{3}}{2} n \cdot h \cdot t \left( \frac{\tau_y - \tau_{cr}}{\sqrt{1 + (a/h)^2}} \right) \quad (63)$$

Donde:

$n$  = Número de fajas divisadas en el muro.

De esta ecuación, se asume que todas las fajas son de igual peralte "h". Es importante considerar que la división de fajas se la debe realizar considerando la dirección de la carga aplicada para obtener el aporte de cortante que debe responder (reaccionar según la tercera ley de Newton) a la carga externa, donde haciendo referencia a la figura 49, el eje de la viga es perpendicular a la carga de corte aplicada en su extremo libre; interpolando esta configuración al muro SPSW, las franjas o fajas de vigas deben ser trazadas o divididas de manera perpendicular al eje de la carga externa, donde el peralte de estas vigas imaginarias corresponderá a la dimensión paralela al eje de dicha carga (se debe verificar entre las dimensiones "a" o "b" de la sección de cálculo la que corresponda paralelamente al eje de la carga externa), dejando a la otra

dimensión como la separación entre rigidizadores de las “vigas asumidas”; esto con el fin de ingresar los valores de manera adecuada en la ecuación 63. La siguiente figura 51 muestra las divisiones realizadas en el muro SPSW de alma rigidizada para obtener el aporte de cortante al muro total:



**Figura 51.** Muro SPSW de alma rigidizada, con las fajas trazadas para el cálculo del aporte al cortante del muro.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos

Obteniendo la siguiente ecuación:

$$V_{nt} = \frac{\sqrt{3}}{2} n \cdot a_w \cdot t_w \left( \frac{\tau_y - \tau_{cr}}{\sqrt{1 + (b_w/a_w)^2}} \right) \quad (64)$$

Donde:

$a_w$  = Base de la nueva sección de cálculo de la placa, asumida como el peralte de las franjas de vigas imaginarias.

$b_w$  = Altura de la nueva sección de análisis de la placa de acero.

$\tau_{cr}$  = Esfuerzo de corte crítico de la placa de acero.

$\tau_y$  = Esfuerzo de fluencia del acero ante el corte.

De todo el proceso descrito anteriormente, se obtiene el cortante soportado por el muro SPSW rigidizado sumando los aportes que entregan: la viga HBE a través de sus secciones reducidas RBS (ec. 27), la placa de acero (ec. 30) y los rigidizadores en la placa de acero (ec. 64), obteniendo los siguientes resultados:

$$V_n = V_{nb} + V'_{np} + V_{nt} \quad (65)$$

$$(LRFD): V_u \leq \phi V_n \quad (ASD): V_u \leq \frac{V_n}{\Omega} \quad (3.62)$$

$$(LRFD): \phi = 0.9 \quad (ASD): \Omega = 1.67 \quad (3.63)$$

Donde:

$V_u$  = Carga última obtenida de las condiciones externas.

$V_n$  = Capacidad nominal al corte del muro SPSW rigidizado.

El procedimiento contemplado, con las debidas modificaciones a las fórmulas, aportes de consideraciones y criterios en los cálculos, han sido implementados con el fin de conseguir un diseño bastante apegado a la realidad, donde se espera que los resultados del ensayo acompañen de buena manera a los valores obtenidos en los cálculos.

### 3.2.3. CÁLCULO DEL MURO SPSW RIGIDIZADO

En base a las ecuaciones planteadas para el cálculo del muro SPSW de placa rigidizada, se ha generado un programa basado en la plataforma de MATLAB acompañado con lectura de datos a partir de una hoja de cálculo en EXCEL, de donde se extraen las propiedades de los elementos para el desarrollo del diseño dentro de un algoritmo preparado para evaluar las condiciones generadas durante el ensayo.

Comenzando por el ingreso de datos (propiedades de los elementos y ciertos coeficientes), se tiene una tabla de Excel donde se registran las propiedades según lo descrito al comienzo de este capítulo (numeral 3.1: Propiedades) de donde, al conectar el software MATLAB a través del uso de funciones integradas en el algoritmo de cálculo, se puede extraer los valores de la tabla sin necesidad de digitarlos en el programa. La tabla creada en la hoja de cálculo es la siguiente:

**Tabla 27**

Datos ingresados para el diseño del muro SPSW rigidizado.

DATOS		
<b>Dimensiones Generales del Muro</b>		
L	1,4	m
H	2,54	m
Lpl	1,2	m
H. hinge	0,226	m
<b>Especificaciones de la Placa</b>		
tpl	1,4	mm
fyp	182,5	MPa
Ep	13,4	GPa
<b>Especificaciones de las Vigas HBE</b>		
Tipo	IPE140	
d	14	cm
bf	7,3	cm
tf	0,69	cm
hw	12,62	cm
tw	0,47	cm
r	0,7	cm
Ag	16,4	cm <sup>2</sup>
Ix	541	cm <sup>4</sup>
Zx	77,3	cm <sup>3</sup>
fy	320	MPa
Ev	5,75	GPa
<b>Especificaciones de las Columnas VBE</b>		
Tipo	Tubo rec. 200x100x6	
d	20	cm
bf	10	cm
tf	0,6	cm
hw	18,8	cm
tw	0,6	cm

r	0	cm
rx	7,12	cm
ry	4,14	cm
Ag	33,63	cm <sup>2</sup>
Ix	1703,83	cm <sup>4</sup>
Iy	577,44	cm <sup>4</sup>
Zx	170,38	cm <sup>3</sup>
fy	250	MPa
Ec	20	GPa
<b>Especificaciones del RBS</b>		
A	1	m
$\beta$	0,62	adim.
R	8	cm
2c	3,2	cm
<b>Otras Variables</b>		
$\Theta$	0,5	adim.
$\Phi$	0,9	adim.
$\mu_{acero}$	0,3	adim.
<b>Atiesador</b>		
Aat	0,76	cm <sup>2</sup>
Ixc	0,288	cm <sup>4</sup>
Iyc	0,288	cm <sup>4</sup>
Ix	0,538	cm <sup>4</sup>
Iy	0,538	cm <sup>4</sup>
bat	30	cm
hat	60	cm
Lat	2	cm
eat	0,2	cm
fyat	380,5	MPa
Eat	18,16	GPa

Con estos datos ingresados en la hoja de cálculo, a través de la plataforma MATLAB, se tiene procesado el algoritmo de diseño descrito en base a la teoría, con estimaciones, alternativas y un código de funciones que permite abarcar lo mejor posible cualquier posibilidad que pueda presentarse en el proceso práctico de la evaluación del modelo físico; tal es el caso que, considerando al factor de placa, se ha decidido utilizar las ecuaciones 33 y 36 como límites inferior y superior respectivamente en relación a las condiciones de apoyo presentadas en los bordes de la placa, esto sin considerar el “dominio” de relaciones de aspecto para el cual fueron definidas estas funciones, pues de cierto modo, si se evalúa todas las ecuaciones con un valor de relación de aspecto específico, se puede ver que las otras ecuaciones entran tranquilamente dentro del rango obtenido a

través del uso de las ecuaciones mencionadas como límites, tomando en cuenta a la ecuación 33 como el caso límite de apoyos libres en los bordes, y a la ecuación 36 como el límite de empotramiento en los bordes de la placa. Este tipo de consideración permite tener en cuenta cualquier “imprevisto” desarrollado durante la evaluación de los muros, pues recordando el concepto del factor de placa, éste depende de las condiciones de apoyo y de la relación de aspecto, generándose un gran conjunto de posibilidades.

Aunque el criterio establece que las ecuaciones deben usarse para determinados valores de la relación de aspecto, esto no impide que puedan ser evaluadas con valores fuera del dominio, pues en referencia a las tablas y gráficas presentadas, ciertos valores obtenidos a través de las ecuaciones concuerdan con las gráficas y criterios que evalúan el comportamiento del factor de placa en función de la relación de aspecto y de las condiciones de apoyo en los bordes, justificando la validez de los valores debido a esta gran posibilidad de respuestas abarcadas por la combinación de estos dos parámetros, además de ser evidente que los dominios definidos para estas ecuaciones responden más a una tendencia de estimación y cobertura que a una tendencia de falla de la función por incapacidad de entregar resultados; es por esto que es necesario tener en cuenta todas las fuentes posibles de información encontradas para entender este fenómeno de comportamiento que tiene el factor de placa, pues sólo así se puede lograr una mejor precisión en la estimación de este valor. Por último, al comparar entre las ecuaciones 33, 34 y 35 que presentan una configuración matemática muy similar, se puede encontrar la misma condición de apoyo, pero con distintos dominios de la relación de aspecto, donde los coeficientes que definen la función no presentan mucha variación, dando a entender que existe la posibilidad de evaluar las ecuaciones con valores ajenos a los dominios. El algoritmo desarrollado para cubrir el diseño es el siguiente:

### 3.2.3.1. Inicio

```
clc
clear all
close all
disp("DISEÑO DE MURO DE CORTE DE PLACA DE ACERO RIGIDIZADA SPSW-R")
```

### 3.2.3.2. Datos

```
E=xlsread('Datos Excel','Hoja1','A1:A50');
```

### 3.2.3.3. Cálculo de la resistencia al corte de la placa

```
disp('-Cálculo de la capacidad a corte del muro y las vigas-')
E(5)=E(5)/1000;
E(7)=E(7)*1000;
E(8:13)=E(8:13)/100;
E(14)=E(14)/(100^2);
E(15)=E(15)/(100^4);
E(16)=E(16)/(100^3);
E(18)=E(18)*1000;
E(19:26)=E(19:26)/100;
E(27)=E(27)/(100^2);
E(28:29)=E(28:29)/(100^4);
```

```

E(30)=E(30)/(100^3);
E(32)=E(32)*1000;
E(35:36)=E(35:36)/100;
E(40)=2*E(40)/10000;
E(41:44)=E(41:44)/100000000;
E(45:48)=E(45:48)/100;
E(50)=E(50)*1000;
A=1+E(5)*E(1)/(2*E(27));
B=1+E(5)*E(2)*(1/E(14)+E(2)^3/(360*E(28)*E(1)));
C=A/B;
alpha=(atan((C)^(1/4)));
alpha1=alpha*180/pi;
Vyp=E(37)*E(6)*E(5)*E(3)*sin(2*alpha)*1000;
V1yp=E(2)*Vyp/(E(2)+E(4));
c=E(36)/2;
b=sqrt(E(35)*8*c-4*c^2);
a=(E(3)-E(33)-b)/2;
Zrbs=E(16)-E(36)*E(10)*(E(8)-E(10));
beta=Zrbs/E(16);
rho=E(2)/E(1);
psi=E(33)/E(1);
Mp=E(16)*E(17)*1000;
Vyf=rho*2*beta*Mp/(psi*(E(2)+E(4)));
Vn=V1yp+Vyf;
PhVn=E(38)*Vn;
disp(['El aporte de la viga es de: ',num2str(Vyf),'kN'])
disp(['El aporte de la placa es de: ',num2str(V1yp),'kN'])
disp(['El corte nominal del muro es: ',num2str(Vn),'kN'])
disp(['La resistencia del muro es: ',num2str(PhVn),'kN'])

```

### 3.2.3.4. Cálculo de columnas

```

disp('-Cálculo de las columnas-')
% (1) Clasificación de la sección
disp('1) Clasificación de la sección')
% (1.1) eje x (alas, bases o lados cortos de la sección)
%bd=E(18)/2;
rel1=E(20)/E(21);
lambr1=1.40*sqrt(E(32)/E(31));
lambp1=1.12*sqrt(E(32)/E(31));
lambps1=0.55*sqrt(E(32)/E(31));
if rel1<=lambps1
    disp('El eje x es s. compacto')
    facx=1;
elseif (rel1>lambps1) && (rel1<=lambp1)
    disp('El eje x es compacto')
    facx=2;
elseif (rel1>lambp1) && (rel1<=lambr1)
    disp('El eje x es no compacto')
    facx=3;
else
    disp('El eje x es esbelto')
    facx=4;
end
% (1.2) eje y (alma, alturas o lados largos de la sección)
rel2=E(19)/E(23);
lambr2=1.40*sqrt(E(32)/E(31));
lambp2=1.12*sqrt(E(32)/E(31));
lambps2=0.55*sqrt(E(32)/E(31));

```



```

if rel2<=lambps2
    disp('El eje y es s. compacto')
    facy=1;
elseif (rel2>lambps2) && (rel2<=lambp2)
    disp('El eje y es compacto')
    facy=2;
elseif (rel2>lambp2) && (rel2<=lambr2)
    disp('El eje y es no compacto')
    facy=3;
else
    disp('El eje y es esbelto')
    facy=4;
end
% (1.3) Conclusión final
if facx==1
    if facy==1
        disp('La sección de la columna es s. compacta')
        fac=1;
    elseif facy==2
        disp('La sección de la columna es compacta')
        fac=2;
    elseif facy==3
        disp('La sección de la columna es no compacta')
        fac=3;
    else
        disp('La sección de la columna es ebelta')
        fac=4;
    end
elseif facx==2
    if facy<=2
        disp('La sección de la columna es compacta')
        fac=2;
    elseif facy==3
        disp('La sección de la columna es no compacta')
        fac=3;
    else
        disp('La sección de la columna es esbelta')
        fac=4;
    end
elseif facx==3
    if facy<=3
        disp('La sección de la columna es no compacta')
        fac=3;
    else
        disp('La sección de la columna es esbelta')
        fac=4;
    end
else
    disp('La sección de la columna es esbelta')
    fac=4;
end
% (2) Cálculo de la resistencia en las dos direcciones
disp('2) Capacidad en las dos direcciones')
% (2.1) eje x (perpendicular al plano del pórtico)
disp(' 2.1) Eje x')
disp('¿desea obtener la longitud efectiva a través de nomogramas o estimarlo?')
disp('opciones: 1=nomogramas o 2=estimación')
opcx=input('ingrese la opción: ');
if opcx==1

```

```

cdtbx=input('ingrese el factor por conexión rígida: ');
Gax=(E(28)*E(32)/E(2))/(E(15)*E(18)*cdtbx/E(1)); %restricción rotatoria en el extremo
inferior
Gbx=Gax; %restricción rotatoria en el extremo superior
disp('las restricciones rotatorias en los extremos son:')
disp(['Gax (extremo inferior): ',num2str(Gax)])
disp(['Gbx (extremo superior): ',num2str(Gbx)])
kx=input('ingrese la longitud efectiva del nomograma: ');
else
kx=input('ingrese la longitud efectiva: ');
end
lambx=kx*E(2)/E(25);
fex=(pi^2)*E(32)/(lambx^2);
cond=4.71*sqrt(E(32)/E(31));
if lambx<=cond
disp('hay un trabajo inelástico')
lambxc=sqrt(E(31)/fex);
fcrx=(0.658^(lambxc^2))*E(31);
else
disp('hay un trabajo elástico')
fcrx=0.877*fex;
end
Pnx=E(27)*fcrx*1000;
Pdx=E(38)*Pnx;
disp(['La capacidad de la columna en la dirección x es: ',num2str(Pdx),'kN'])
% (2.2) eje y (paralelo al plano del pórtico)
disp(' 2.2) Eje y')
disp('¿desea obtener la longitud efectiva a través de nomogramas o estimarlo?')
disp('opciones: 1=nomogramas o 2=estimación')
opcy=input('ingrese la opción: ');
if opcy==1
cdtby=input('ingrese el factor por conexión rígida: ');
Gay=(E(29)*E(32)/E(2))/(E(15)*E(18)*cdtby/E(1));
Gby=Gay;
disp('las restricciones rotatorias en los extremos son:')
disp(['Gay (extremo inferior): ',num2str(Gay)])
disp(['Gby (extremo superior): ',num2str(Gby)])
ky=input('ingrese la longitud efectiva del nomograma: ');
else
ky=input('ingrese la longitud efectiva: ');
end
lamby=ky*E(2)/E(26);
fey=(pi^2)*E(32)/(lamby^2);
if lamby<=cond
disp('hay un trabajo inelástico')
lambyc=sqrt(E(31)/fey);
fcry=(0.658^(lambyc^2))*E(31);
else
disp('hay un trabajo elástico')
fcry=0.877*fey;
end
Pny=E(27)*fcry*1000;
Pdy=E(38)*Pny;
disp(['La capacidad de la columna en la dirección y es: ',num2str(Pdy),'kN'])

```

### 3.2.3.5. Análisis de la placa

```

disp('-Análisis de la placa-')
Hcf=E(2)-E(8);

```

```

alf=E(3)/Hcf;
kf1=5.34+4/(alf^2);
kf2=5+5/(alf^2); %opcional
kf3=8.98+5.6/(alf^2);
lim1=round(kf1);
lim2=round(kf3);
cons1=E(7)*(pi^2)/(12*(1-E(39)^2));
kf=lim1:0.25:lim2;
tam=length(kf);
for i=1:tam
    taocr(i)=cons1*((E(5)/Hcf)^2)*kf(i); % en MPa
end
taoy=sqrt(3)*E(6)/3;
taolp=E(6)/(2*sqrt(3));
if taolp>taocr(tam)
    disp('El pandeo se inicia en el rango elástico')
elseif (taolp>taocr(1)) && (taolp<=taocr(tam))
    disp('Confirme el esfuerzo resistente de la placa y revise si necesita')
    disp('corrección por el rango de inicio del pandeo')
else
    disp('El pandeo se inicia en el rango inelástico')
    taoe=taocr;
    for i=1:tam
        taocr(i)=taoy*(1-taoy/(4*taoe(i)));
    end
end
end

```

### 3.2.3.6. Diseño y análisis de la placa con atiesadores

```

disp('-Diseño y análisis de la placa con atiesadores-')
% eje x
disp('1) Inercia mínima del atiesador horizontal')
dx=E(40)/(Hcf*E(5));
gamomx=24.4+112*dx*(1+dx);
gamox=11.4*alf+(1.25+16*dx)*(alf^2)-5.4*sqrt(alf);
if gamox<=gamomx
    disp('Cumple en x')
else
    disp('Cambie el atiesador')
end
cons2=1/(12*(1-E(39)^2));
Irxmin=cons2*Hcf*(E(5)^3)*gamox;
disp(['La inercia mínima horizontal es: ',num2str(Irxmin*100000000),'cm4'])
% eje y
disp('2) Inercia mínima del atiesador vertical')
alfy=Hcf/E(3);
dy=E(40)/(E(3)*E(5));
gamomy=24.4+112*dy*(1+dy);
gamoy=11.4*alfy+(1.25+16*dy)*(alfy^2)-5.4*sqrt(alfy);
if gamoy<=gamomy
    disp('Cumple en y')
else
    disp('Cambie el atiesador')
end
Irymin=cons2*E(3)*(E(5)^3)*gamoy;
disp(['La inercia mínima vertical es: ',num2str(Irymin*100000000),'cm4'])
Ir=2*E(41);
disp(['La inercia del atiesador doble es: ',num2str(Ir*100000000),'cm4'])

```

```

if (Ir>=Irxmin) && (Ir>=Irymin)
    disp('La inercia del atiesador cumple en los dos sentidos')
else
    disp('Cambie el atiesador')
end
% análisis de la placa rigidizada
disp('3) Capacidad de la placa con atiesadores')
alfr=E(45)/E(46);
kfr1=5.34+4/(alfr^2);
kfr2=5+5/(alfr^2); %opcional
kfr3=8.98+5.6/(alfr^2);
limr1=round(kfr1);
limr2=round(kfr3);
kfr=limr1:0.25:limr2;
tamr=length(kfr);
for i=1:tamr
    taocrr(i)=cons1*((E(5)/E(46))^2)*kfr(i); % en MPa
end
if taolp>taocrr(tamr)
    disp('El pandeo se inicia en el rango elástico')
elseif (taolp>taocrr(1)) && (taolp<=taocrr(tamr))
    disp('Confirme el esfuerzo resistente de la placa y revise si necesita')
    disp('corrección por el rango de inicio del pandeo')
else
    disp('El pandeo se inicia en el rango inelástico')
    taoer=taocrr;
    for i=1:tamr
        taocrr(i)=taoy*(1-taoy/(4*taoer(i)));
    end
end
% análisis del atiesador como placa
disp('4) Capacidad del atiesador como placa')
kat1=input('ingrese la condición por apoyo libre: ');
kat2=input('ingrese la condición por empotramiento: ');
limat1=round(kat1,2);
limat2=round(kat2,2);
cons3=E(50)*(pi^2)/(12*(1-E(39)^2));
kat=limat1:0.25:limat2;
tamat=length(kat);
for i=1:tamat
    taocrat(i)=cons3*((E(48)/E(47))^2)*kat(i); % en MPa
end
taoyat=sqrt(3)*E(49)/3;
taolpat=E(49)/(2*sqrt(3));
if taolpat>taocrat(tamat)
    disp('El pandeo se inicia en el rango elástico')
elseif (taolpat>taocrat(1)) && (taolpat<=taocrat(tamat))
    disp('Confirme el esfuerzo resistente de la placa y revise si necesita')
    disp('corrección por el rango de inicio del pandeo')
else
    disp('El pandeo se inicia en el rango inelástico')
    taoeat=taocrat;
    for i=1:tamat
        taocrat(i)=taoyat*(1-taoyat/(4*taoeat(i)));
    end
end
if taocrat(1)>taocrr(tamr)
    disp('El atiesador cumple')
elseif (taocrat(1)>taocrr(1)) && (taocrat(1)<=taocrr(tamr))

```

```

disp('Confirme el esfuerzo resistente del atiesador y de la placa y')
disp('revise si necesita cambiar de atiesador')
else
disp('Cambie el atiesador')
end

```

### 3.2.3.7. Cálculo del aporte de los rigidizadores al cortante

```

disp('5) Capacidad del muro con atiesadores')
disp(['Cantidad de esfuerzos críticos calculados: ',num2str(tamr)])
nbat=(E(1)-E(19))/E(45);
nhat=(E(2)-E(8))/E(46);
disp('¿Desea calcular el aporte de los rigidizadores con el esfuerzo crítico por defecto?')
disp('Nota: revisar primero el cálculo por defecto antes de proceder con la otra alternativa.')
f=input('si=1 o no=2: ');
if f==1
Vt=1000*nbat*sqrt(3)*E(45)*E(5)*(taoy-p-taocr(tamr))/(2*sqrt(1+(E(46)/E(45))^2));
elseif f==2
g=input('Ingrese el número de identificación del esfuerzo crítico que desea usar: ');
Vt=1000*nbat*sqrt(3)*E(45)*E(5)*(taoy-p-taocr(g))/(2*sqrt(1+(E(46)/E(45))^2));
end
disp(['El aporte de los rigidizadores al cortante del muro es de: ',num2str(Vt),'kN'])
Vnr=Vn+Vt;
PhVnr=E(38)*Vnr;
disp(['El corte nominal aumentado del muro es: ',num2str(Vnr),'kN'])
disp(['La resistencia aumentada del muro es: ',num2str(PhVnr),'kN'])
run("Factkplaca.m")

```

### 3.2.3.8. Algoritmo “Factkplaca.m”

```

clear alfak
clear kr
clear ka1
clear ka2
clear ka3
clear dln
clear q
close all
disp('FUNCIÓN "FACTOR DE PLACA" PARA CONEXIONES EMPOTRADAS')
alfak=0.2:0.01:2;
dln=length(alfak);
for q=1:dln
ka1(q)=5.34+4/(alfak(q)^2);           %Ec. 3.29
ka2(q)=5+5/(alfak(q)^2);             %Ec. 3.30
ka3(q)=4+5.34/(alfak(q)^2);         %Ec. 3.31
kr(q)=8.98+5.6/(alfak(q)^2);         %Ec. 3.32
end
plot(alfak,kr,'blue',alfak,ka1,'red',alfak,ka2,'green',alfak,ka3,'black')

```

Adicionalmente se tiene el algoritmo que permite graficar las ecuaciones tratadas en la sección 3.2.2. acerca del “factor de placa”, para comprobar y entender su uso en el presente estudio; se vuelve a hacer énfasis en este aspecto pues, el tratamiento de las ecuaciones descritas fuera de su dominio ha sido ejecutado con el fin de tener una mejor apreciación del factor de placa, para crear una técnica de ajuste de dicho factor frente a las condiciones que pueden aparecer durante el ensayo de los “módulos” del muro propuesto.

Para poder entender el algoritmo presentado, cada variable encontrada en las ecuaciones descritas en las secciones 3.2.1 y 3.2.2, tiene su relación con ciertas nomenclaturas ingresadas como funciones en el proceso, lo cual genera una condición de “variables identificadas mediante códigos alfanuméricos”. Para tener claro la relación de estos códigos con las variables, a continuación, se presenta una tabla de las variables con sus correspondientes nomenclaturas:

**Tabla 28**

Relación de variables con códigos ingresados en el algoritmo de cálculo.

RELACIÓN ENTRE VARIABLES Y CODIGOS DE MATLAB		
Variable	Código	Descripción
a	a	Distancia entre la cara del patin interno de la columna y la RBS
-	A	Numerador para el cálculo el ángulo "α"
$\alpha_p(x)$	alf	Relación de aspecto: placa completa (principal)
$\alpha_p$	alfak	Relación de aspecto (concepto general)
$\alpha_p(r)$	alfr	Relación de aspecto: nueva sección (placa rigidizada)
$\alpha_p(y)$	alfy	Relación de aspecto: placa completa (secundaria)
$\alpha$ (rad.)	alpha	Ángulo de trabajo de la placa de acero (radianes)
$\alpha$ (grad.)	alpha1	Ángulo de trabajo de la placa de acero (grados)
b	b	Longitud de corte de la RBS
-	B	Denominador para el cálculo del ángulo "α"
$\beta$	beta	Relación entre $Z_{RBS}$ y $Z_x$
c	c	Profundidad del corte de la RBS
-	C	Relación A/B para el ángulo "α"
-	cdtbx	Factor de reducción por conexión rígida en vigas (sentido x de la columna)
-	cdtby	Factor de reducción por conexión rígida en vigas (sentido y de la columna)
-	cond	Límite: evaluación de rango de trabajo para columnas
-	Cons(1,3)	$cons1 = (\pi^2 E) / (12(1 - \mu^2))$
-	cons2	$cons2 = (bt_w^3) / (12(1 - \mu^2))$
-	dln	Dimensión del vector "alfak"
$\delta(x)$	dx	Relación: área del aitezador y área lateral de la placa (ec. 3.36)
$\delta(y)$	dy	Relación: área del aitezador y área lateral de la placa (ec. 3.36)
-	E	Vector de propiedades (tabla 27)
-	f	Condición de pregunta (sí o no)
-	fac	Discriminante para clasificación general de las columnas
-	facx	Discriminante: clasificación de los lados cortos de la columna
-	facy	Discriminante: clasificación de los lados largos de la columna
$F_{cr}(x)$	fcrx	Esfuerzo crítico: análisis de pandeo en sentido x de la columna
$F_{cr}(y)$	fcry	Esfuerzo crítico: análisis de pandeo en sentido y de la columna
$F_e(x)$	fex	Esfuerzo de Euler: análisis de pandeo en sentido x de la columna
$F_e(y)$	fey	Esfuerzo de Euler: análisis de pandeo en sentido y de la columna
$(\gamma_o)_{máx}(x)$	gamomx	Coeficiente máximo: análisis en sentido x (ec. 3.39)
$(\gamma_o)_{máx}(y)$	gamomy	Coeficiente máximo: análisis en sentido y (ec. 3.39)
$\gamma_o(x)$	gamox	Coeficiente: inercia mínima del atiesador en sentido x

$\gamma_o (y)$	gamoy	Coeficiente: inercia mínima del atiesador en sentido y	
$G_A (x)$	Gax	Factor de restricción: nudo inferior en sentido x	
$G_A (y)$	Gay	Factor de restricción: nudo inferior en sentido y	
$G_B (x)$	Gbx	Factor de restricción: nudo superior en sentido x	
$G_B (y)$	Gby	Factor de restricción: nudo superior en sentido y	
Hcf	Hcf	Separación entre las caras de los patines internos de las vigas	
-	i	Contador	
-	Ir	Inercia del atiezador doble	
$I_o (x)$	Irxmin	Inercia mínima del atiesador para la placa: sentido x	
$I_o (y)$	Irymin	Inercia mínima del atiesador para la placa: sentido y	
$k_p$	ka1	Factor de placa: ecuación 3.29 (concepto general)	
$k_p$	ka2	Factor de placa: ecuación 3.30 (concepto general)	
$k_p$	ka3	Factor de placa: ecuación 3.31 (concepto general)	
$k_p (at)$	kat	Factor de placa: atiesador	
$k_p (at,inf)$	kat1	Factor de placa: atiesador (límite inferior)	
$k_p (at,sup)$	kat2	Factor de placa: atiesador (límite superior)	
$k_p (pl)$	kf	Factor de placa: plancha de acero	
$k_p (pl,inf)$	kf1	Factor de placa: plancha de acero (ec. 3.29)	
$k_p (pl,int)$	kf2	Factor de placa: plancha de acero (ec. 3.31)	
$k_p (pl,sup)$	kf3	Factor de placa: plancha de acero (ec. 3,32)	
$k_p (pr)$	kfr	Factor de placa: plancha rigidizada	
$k_p (pr,inf)$	kfr1	Factor de placa: plancha rigidizada (ec. 3.29)	
$k_p (pr,int)$	kfr2	Factor de placa: plancha rigidizada (ec. 3.31)	
$k_p (pr,sup)$	kfr3	Factor de placa: plancha rigidizada (ec. 3,32)	
$k_p$	kr	Factor de placa: ecuación 3.32 (concepto general)	
$k (x)$	kx	Longitud efectiva de la columna: análisis en x	
$k (y)$	ky	Longitud efectiva de la columna: análisis en v	
$\lambda_p (x)$	lambp1	Límite tabulado: secciones compactas o no compactas (en x)	
$\lambda_p (y)$	lambp2	Límite tabulado: secciones compactas o no compactas (en y)	
$\lambda_{ps} (x)$	lambps1	Límite tabulado: sec. compactas o sísmicamente compactas (en x)	
$\lambda_{ps} (y)$	lambps2	Límite tabulado: sec. compactas o sísmicamente compactas (en y)	
$\lambda_r (x)$	lambr1	Límite tabulado: secciones no compactas o esbeltas (en x)	
$\lambda_r (y)$	lambr2	Límite tabulado: secciones no compactas o esbeltas (en y)	
$\lambda (x)$	lambx	Relación de esbeltez (sentido x)	
$\lambda (y)$	lamby	Relación de esbeltez (sentido y)	
$\lambda_c (x)$	lambxc	$\lambda_c = \sqrt{F_y/F_e}$	Cálculo en x
$\lambda_c (y)$	lambyc		Cálculo en y
-	lim1	Límite inferior basado en kf1	
-	lim2	Límite superior basado en kf3	
-	limat1	Límite inferior basado en kat1	
-	limat2	Límite superior basado en kat2	
-	limr1	Límite inferior basado en kfr1	
-	limr2	Límite superior basado en kfr3	
$M_p$	$M_p$	Momento flector plástico de la viga en las conexiones	

n (L)	nbat	número de divisiones por los rigidizadores en la base
n (H)	nhat	número de divisiones por los rigidizadores en altura
-	opcX	elección del proceso de estimación de la longitud efectiva en x
-	opcY	elección del proceso de estimación de la longitud efectiva en y
P <sub>d</sub> (x)	Pdx	Capacidad efectiva de la columna en x
P <sub>d</sub> (y)	Pdy	Capacidad efectiva de la columna en y
V <sub>u</sub> (S)	PhVn	Capacidad efectiva del muro no rigidizado
V <sub>u</sub> (R)	PhVnr	Capacidad efectiva del muro rigidizado
π	pi	Valor de "pi": 3,14159265...
P <sub>n</sub> (x)	Pnx	Capacidad nominal de la columna en x
P <sub>n</sub> (y)	Pny	Capacidad nominal de la columna en y
λ <sub>b</sub>	psi	Relación entre la separación de las "RBS" y L <sub>cf</sub>
-	q	contador
b/t	rel1	Relación entre la base de la columna y su espesor
d/t	rel2	Relación entre el peralte de la columna y su espesor
ρ	rho	Relación entre la altura y la base del pórtico
-	tam	Dimensión del vector "kf"
-	tamat	Dimensión del vector "kat"
-	tamr	Dimensión del vector "kfr"
τ <sub>cr</sub> (pl)	taocr	Esfuerzo crítico de la placa sin rigidizar
τ <sub>cr</sub> (at)	taocrat	Esfuerzo crítico del atiesador
τ <sub>cr</sub> (pr)	taocr	Esfuerzo crítico de la placa rigidizada
τ <sub>h</sub> (pl)	taoe	Esfuerzo crítico hipotético de la placa no rigidizada
τ <sub>h</sub> (pr)	taoer	Esfuerzo crítico hipotético de la placa rigidizada
τ <sub>h</sub> (at)	taoeat	Esfuerzo crítico hipotético del atiesador
τ <sub>lp</sub> (pl,pr)	taolp	Esfuerzo límite: rango de trabajo de la placa antes y después de rigidizar
τ <sub>lp</sub> (at)	taolpat	Esfuerzo límite: evaluación del rango de trabajo del atiesador
τ <sub>y</sub> (at)	taoyat	Esfuerzo de fluencia por corte del atiesador
τ <sub>y</sub> (pl,pr)	taoyp	Esfuerzo de fluencia por corte de la placa antes y después de rigidizar
V' <sub>np</sub>	V1yp	Corte nominal de la placa de acero, corregido por las rótulas
V <sub>n</sub> (S)	Vn	Corte nominal del muro sin rigidizar
V <sub>n</sub> (R)	Vnr	Corte nominal del muro rigidizado
V <sub>nt</sub>	Vt	Corte nominal aportado por el uso de rigidizadores
V <sub>nb</sub>	Vyf	Corte nominal de la viga por las RBS
V <sub>np</sub>	Vyp	Corte nominal de la placa de acero
Z <sub>RBS</sub>	Zrbs	Módulo plástico en la sección reducida de la viga RBS

Recordando la ecuación 27, dentro del algoritmo se ha introducido el factor "rho", el cual representa la relación entre el alto y ancho del pórtico conformado por los elementos de borde HBE y VBE, con lo cual se logra regresar a una forma más cercana a la ecuación original (8) para el cálculo del corte en las rótulas plásticas de la viga, obteniendo la siguiente forma:

$$V_{nb} = \frac{2\rho \cdot \beta \cdot M_p}{\lambda_b(H + h_{hinge})} \quad (68)$$



$$\rho = \frac{H}{L} \quad (69)$$

Donde:

$\rho$  = Relación entre altura y ancho de los ejes del pórtico.

H = Altura entre ejes de vigas.

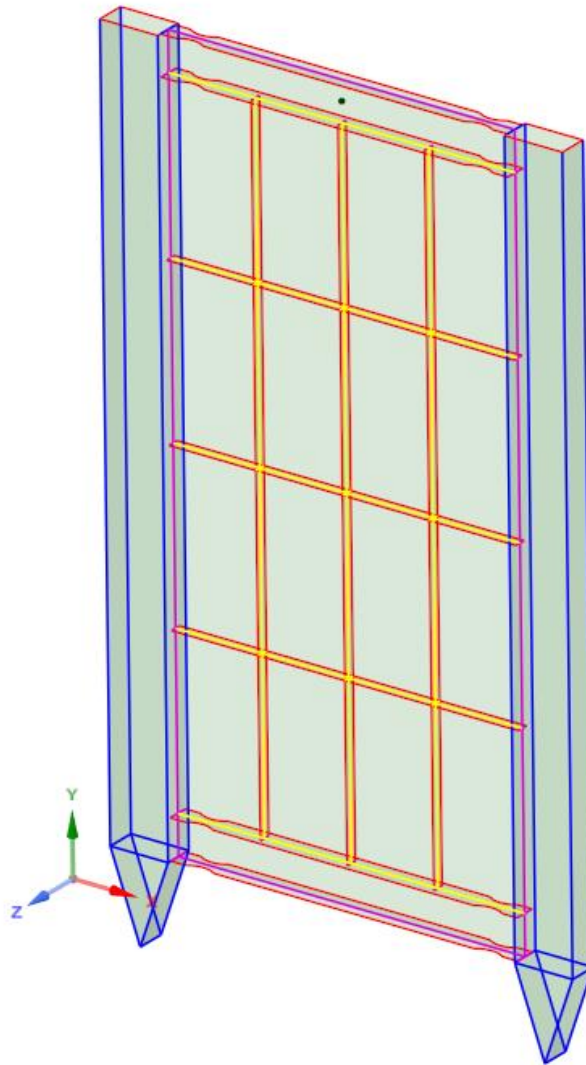
L = Ancho entre ejes de columnas.

Como una manera de realizar el diseño para un proyecto de carga natural, el cálculo del corte efectivo se lo ha presentado mediante el coeficiente o factor de seguridad “ $\phi$ ”, el cual según la literatura de diseño que describe el procedimiento de cálculo de cargas y factores LRFD (Load Resistance Factor Design), define este valor por lo general como 0.9.

#### **3.2.4. CÁLCULO DE LAS DEFORMACIONES DEL MURO SPSW RIGIDIZADO**

Para el ensayo de los muros SPSW rigidizados ante cargas cíclicas por el método C, es necesario conocer previamente las posibles deformaciones con las cuales el muro va a responder luego de aplicarse las cargas que, conforme avanza el procedimiento, aumentan con el fin de llevar al límite de resistencia del muro, provocando deformaciones conforme se presenta la respuesta del material utilizado en el muro.

Una vez desarrollado el “plano del modelo” y calculada la respectiva resistencia conformada por el aporte de los elementos constitutivos, se procedió a modelar la geometría del muro con todas las dimensiones de los perfiles y la placa de acero en el software de cálculo de elementos finitos conocido como “ANSYS”, tratando de respetar y reproducir de la mejor manera posible las condiciones de apoyo y de aplicación de la carga cíclica, con el fin de obtener resultados bastante aproximados a los reales.



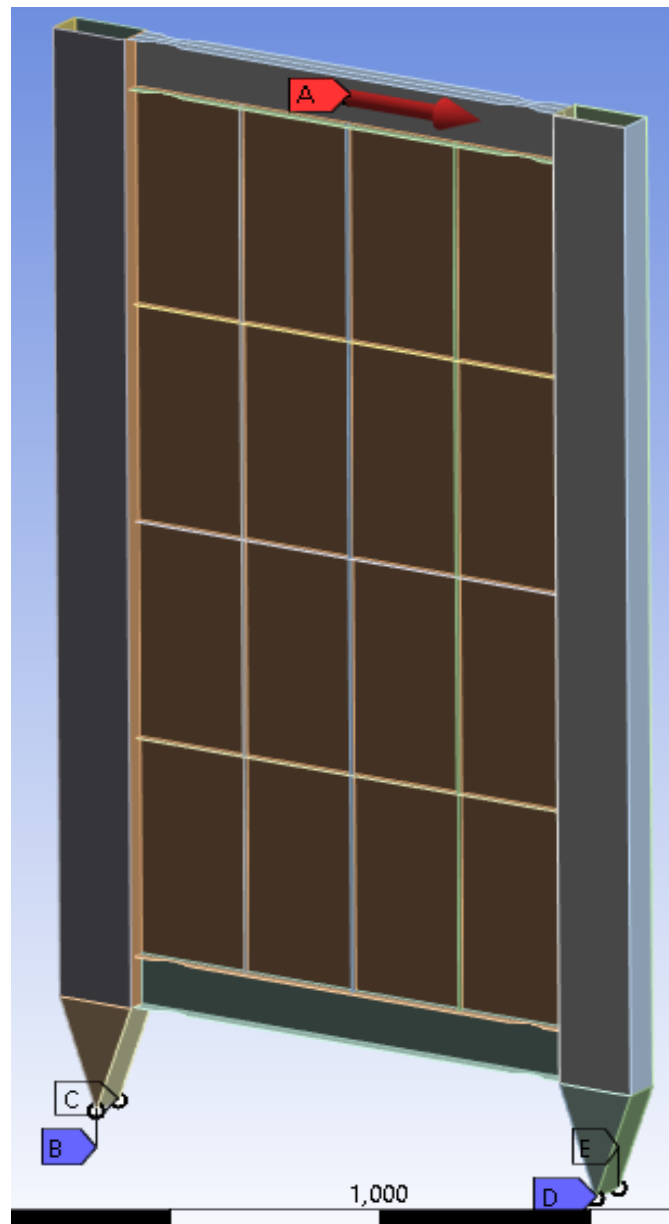
**Figura 52.** Geometría desarrollada en el programa ANSYS.

Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

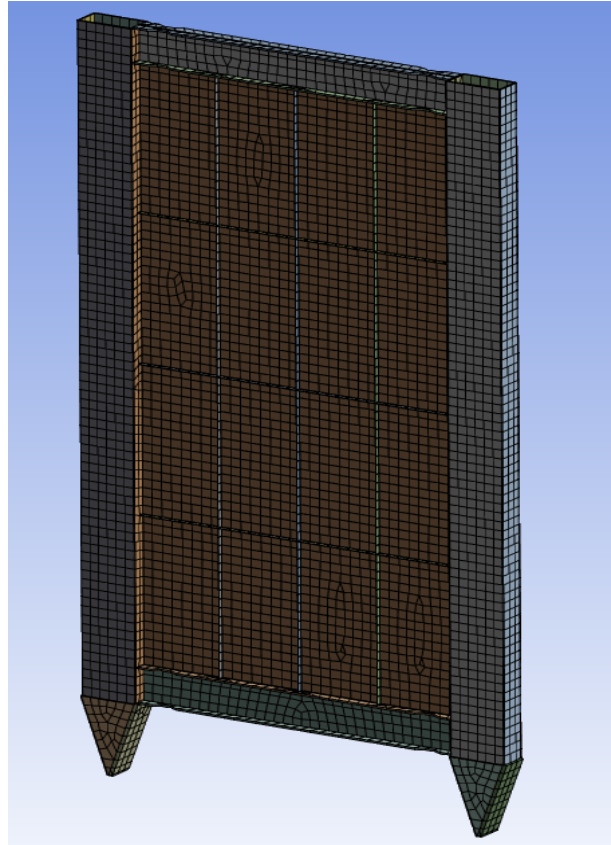
Para el desarrollo de esta geometría, se ha definido cada uno de los elementos como la composición de placas de acero de distintos espesores que se encuentran conectadas entre sí a través de los bordes, creando un arreglo de muro definido en el programa como “un solo cuerpo”, además de que las conexiones entre estas placas representarían una conexión perfectamente continua en todos los bordes, lo cual puede variar de la realidad puesto que, al soldar la placa de acero con los elementos de borde, la conexión suele desarrollarse a través de cordones de suelda separados o distribuidos cada cierta distancia.

Luego de definir geoméricamente al muro, se ha procedido a introducir información del acero utilizado en los perfiles y placa de acero; también se ha definido la fuerza que representaría la resistencia calculada del muro y las condiciones de apoyo modeladas en los extremos inferiores de las columnas,

para luego generar la malla de cálculo presentada por el programa, pues es necesario recalcar que el software se ha desarrollado con el fin de modelar cualquier estructura o mecanismo para luego estimar su comportamiento a través de un cálculo enfocado al método de los “Elementos Finitos”.

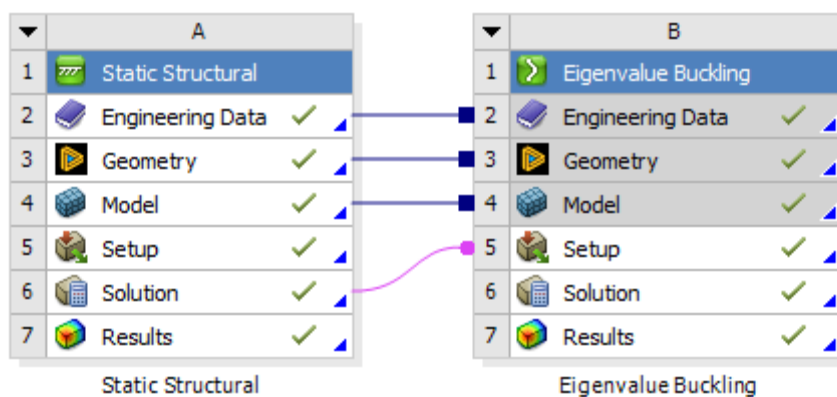


*Figura 53.* Modelo del muro SPSW rigidizado en ANSYS con sus condiciones de borde.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 54.** Modelo del muro SPSW rigidizado en ANSYS con la malla definida.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Con el modelo ingresado en el programa, se realizaron dos tipos de análisis, los cuales son: estático estructural y pandeo de “eigen-valores”, de esta manera, se obtuvieron las deformaciones en el caso “estático” y la reacción de la placa de acero ante la aplicación de las cargas de tipo cortantes, pues es importante observar este fenómeno del pandeo de la placa del muro ya que el sometimiento de este conjunto estructural debe responder a la absorción de cargas cortantes distribuidas en los bordes de la placa de acero,



**Figura 55.** Análisis desarrollados en el modelo del muro SPSW rigidizado.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Todos estos cálculos previos fueron desarrollados para predecir de la mejor manera posible el comportamiento de los muros SPSW rigidizados, con el fin de respetar la capacidad de los componentes estructurales en los cuales serán colocados los modelos físicos, y de los equipos de ensayo para evitar cualquier daño de estos, tratando de ajustarse a las condiciones del laboratorio donde se ejecutarán los ensayos.

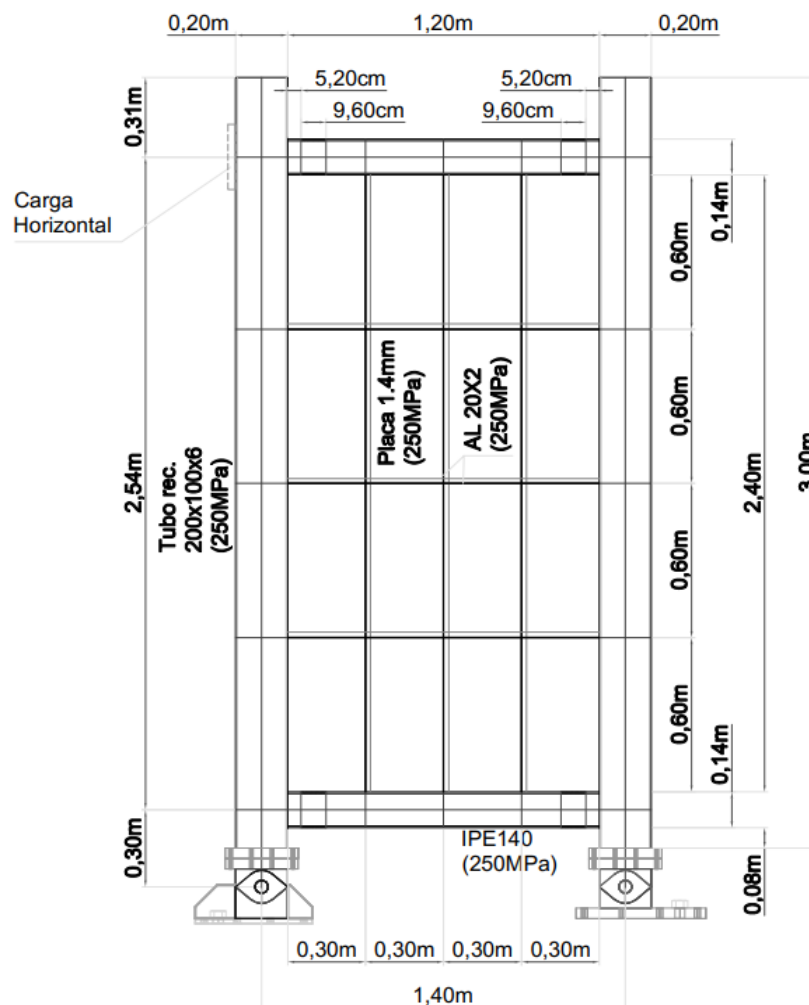
## CAPÍTULO IV

### MUROS SPSW RIGIDIZADOS: MONTAJE DE MODELOS FÍSICOS Y ENSAYO

#### 4.1. CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS SPSW

En base al procedimiento descrito en el capítulo anterior, se ha obtenido un modelo de muro SPSW donde se ha implementado rigidizadores en la placa de acero para aumentar su capacidad de resistencia, colocados en sus dos caras laterales, la cual se encuentra soportada por un pórtico cuyas columnas son tubos rectangulares y las vigas son perfiles IPE tratadas previamente para moldear las secciones RBS.

En la siguiente figura 56, se muestra en resumen el diseño del muro concebido a través del procedimiento descrito en el capítulo 3, identificándose los diferentes materiales seleccionados para el modelo y sus respectivas ubicaciones dentro del arreglo estructural, es así como la geometría obtenida luego del diseño y modificaciones presentadas es la siguiente:



*Figura 56.* Muro SPSW rigidizado: diseño.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

El modelo presentado en la figura 56 posee los valores del esfuerzo de fluencia general para el acero A36, como referencia a una aproximación al esfuerzo de fluencia real que se presenta más adelante gracias a los resultados de los ensayos realizados a las probetas de acero extraídas, mientras que las dimensiones y geometrías de los perfiles son las que se utilizaron en los modelos físicos, siendo éste el acabado final de los muros presentados.

#### 4.1.1. ARMADO DE LOS MÓDULOS

Para llevar a cabo la construcción de los módulos (modelos físicos), previamente se han cortado los elementos respetando las dimensiones del pórtico definido y contemplando ciertas consideraciones que se pueden presentar durante el montaje, así como también ciertas condiciones que debe tener el muro para que pueda encajar adecuadamente en la zona de ensayo.

Dentro de las dimensiones, las columnas poseen un largo de 3m aprovechando la libertad que estas tienen para extenderse por fuera de los ejes de las vigas sin alterar los resultados del diseño presentado, permitiendo que se pueda ejecutar un solo corte de los perfiles en la mitad de la longitud presentada por el vendedor (6m según los catálogos del mercado), lo cual a su vez facilitó la colocación de ganchos en los extremos superiores que ayudaron al traslado de las muestras a través de un puente-grúa. Para el corte de las vigas, fue necesario respetar la longitud de 1,20m, pues estas no pueden extenderse por fuera de los ejes de las columnas; por otro lado, como las columnas tienen la libertad de extenderse, se puede observar claramente que el correcto montaje del pórtico con sus dimensiones características queda a cargo del arreglo que se debe realizar a través de las vigas. Así mismo, los ángulos que se implementaron para rigidizar la placa de acero, fueron cortados respetando la configuración presentada en la figura 56, pues estos dependen aún más de las dimensiones ya establecidas por el pórtico, además de necesitar formalizar los puntos donde se cruzan los rigidizadores entre sí; para este propósito, se permitió cortar los ángulos horizontales de 1,20m y los verticales de 60cm, practicando en los cortes las reducciones necesarias para el encaje de los elementos en el “tejido de los paneles”. Una vez cortados los elementos a la medida, se ejecutaron las correspondientes reducciones en los patines de las vigas, para permitir físicamente la formación de las rótulas plásticas en las zonas destinadas por el diseño.



**Figura 57.** Moldeado de las secciones RBS en las vigas.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



Conseguidas las placas de soporte para el montaje de los muros en la cimentación, se soldaron las columnas centrando lo mejor posible la columna en el centro del soporte, para luego armar el pórtico encajando en su lugar las vigas y las columnas, verificando “la escuadra” que debe existir entre los elementos. En la comprobación de la escuadra, para reducir lo mejor posible los errores se utilizó una escuadra magnética en las esquinas de las conexiones entre vigas y columnas, y un flexómetro para comparar la longitud de las diagonales internas referentes a la geometría del pórtico. Una vez conformado el marco, se soldaron parte de los ángulos como soportes para la colocación de la plancha de acero, la cual también fue cortada previamente para corresponder a las dimensiones internas del marco del muro SPSW, pues las dimensiones reales de la placa de acero adquirida son de 1,22m de ancho y 2,44m de alto, sobrando ciertos centímetros con respecto a las medidas abarcadas en el muro.



**Figura 58.** Columnas de los muros y sus respectivas bases.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 59.** Montaje de uno de los pórticos para los muros SPSW rigidizados.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Después de montar el pórtico y las bases para la plancha de acero, se ha colocado ésta en el espacio procurando que se mantenga lo más paralela al plano del muro, para luego soldarla en los bordes sujetándola al marco; posteriormente se han distribuido los atiesadores según el entramado de las divisiones que responden al cálculo de aporte de resistencia a la placa de acero, soldando respectivamente los cruces entre rigidizadores y los terminales que se conectan a los elementos de borde del pórtico. Una vez obtenido el panel en una



de las caras, se replica el procedimiento para generar el panel complementario en la otra cara del muro, para después soldar la placa de acero a los paneles de rigidizadores en ambas caras.



**Figura 60.** Distribución de rigidizadores horizontales de 1,20m de largo.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 61.** Distribución de rigidizadores verticales de 60cm cada pieza.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



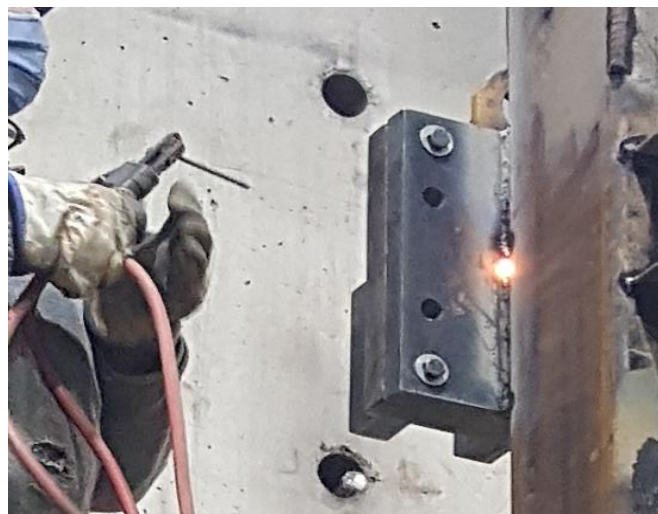
**Figura 62.** Panel de rigidizadores terminado en una cara del muro.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Este procedimiento se lo ha llevado a cabo en el armado de todas las réplicas y modelos alternos, donde se ha verificado reproducir de la mejor manera posible las mismas condiciones de montaje en todos los módulos, con el fin de generar un ambiente adecuado de comparación entre los modelos presentados; esto con el fin de poder observar cualquier comportamiento que puedan presentar los muros durante los ensayos y diferencias de resistencia entre las muestras fabricadas.



**Figura 63.** Réplicas del muro SPSW rigidizado.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Como es necesario que los muros tengan un conector preparado para colocar un gato hidráulico que es el que ejerce la fuerza en el estudio, se ha soldado una base de placa de acero en el lateral de la columna que se ubique en el lado correspondiente al muro de carga de la estructura encontrada en las instalaciones del laboratorio, llegando de esta manera a concluir la preparación de los muros.



**Figura 64.** Placa base para la conexión del gato hidráulico.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Adicionalmente, se ha colocado unos ganchos preparados de varilla corrugada para poder trasladar las muestras a la zona de ensayo a través de un puente grúa, pues estos han sido colocados en el sobrante de las columnas que sobresalen del eje de la viga superior del pórtico. Estos detalles han sido posible ejecutarlos gracias a la posibilidad de los equipos que permiten el montaje y desmontaje de los muros conforme van siendo ensayados en el laboratorio, pues las columnas en su parte inferior poseen únicamente las placas de acero diseñadas de manera correspondiente a las bases de los apoyos fijos donde se asentarán las columnas de los muros conforme el avance de los ensayos.

#### 4.1.2. PREPARACIÓN DE LA CIMENTACIÓN

Como es necesario que los muros se encuentren sujetos en la parte inferior sin que esto genere daños en la estructura principal del laboratorio, es necesario que se construya una base de cimentación que permita aislar ciertas intervenciones que suelen ser necesarias para dar lugar a las medidas de cualquier modelo que sea necesario desarrollar, además de generar un elemento adicional externo que sea capaz de absorber la energía proveniente de la fuerza aplicada por los equipos de estudio.

Luego de haber construido las réplicas, se ha procedido a preparar la cimentación, la cual al haber utilizado una estructura existente que se trata de una losa de cimentación fabricada para un estudio anterior, fue necesario modificar las conexiones existentes con nuevas que se ajusten a las condiciones presentadas en este estudio, donde se ha decidido utilizar apoyos fijos que replacen la formación de rótulas plásticas en las bases de las columnas si se hubiera utilizado empotramientos directos, por rótulas mecánicas que permitan el alivio de las columnas y se evite fallas no deseadas en los elementos de borde que alternen los resultados.



*Figura 65.* Losa de cimentación con los apoyos instalados.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Para lograr esta instalación, se ha comenzado por colocar uno de los apoyos completos contemplando la ubicación que acompañe al ancho del muro, donde luego de realizar comprobaciones de posición y alineamiento, se ha marcado los agujeros que, luego de ser perforados mediante un taladro “rotomartillo”, en ellos



se han instalado pernos de anclaje expansivos, acompañados por un epóxico para que los pernos se adhieran adecuadamente al hormigón.



**Figura 66.** Posicionamiento de la rótula mecánica.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 67.** Ubicación de los agujeros para la instalación de pernos de anclaje en la losa de cimentación.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 68.** Perforado de los agujeros para la colocación de los pernos de anclaje.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 69.** Perno de anclaje expansivo y epóxico utilizados en la cimentación.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 70.** Rótula mecánica sujeta con los pernos de anclaje.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Posteriormente, se preparó uno de los empotramientos encontrados en la losa para modificarlo conforme al uso de un apoyo fijo en su lugar, con lo cual fue necesario cortar parte de algunos restos soldados que quedaban por encima de la placa de acero sujeta a la losa, para luego colocar el nuevo mecanismo que permite conectar los muros a la cimentación facilitando los ensayos mediante el simple reemplazo de los módulos y evitando cualquier falla que pueda producirse en las columnas.



**Figura 71.** Cortado de restos encontrados en un empotramiento.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.





**Figura 72.** Colocado de la rótula en el empotramiento preparado.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Así mismo, antes de proceder con el fijado del apoyo en el empotramiento modificado, se ha ubicado en su lugar el mecanismo alineándolo al apoyo empernado en la losa y al gato hidráulico que ejerce la fuerza hacia el muro, para cumplir con los requisitos del ensayo donde el correcto desarrollo de las evaluaciones depende de las condiciones de la zona de ensayo, siendo un caso muy común la desviación del muro fuera del plano de ensayo. Luego de ubicar el apoyo confirmando las dimensiones del muro, se lo ha soldado en la placa de acero modificada para que el mecanismo se mantenga fijo ante el empuje ejercido por el gato hidráulico.



**Figura 73.** Fijación del apoyo en el empotramiento modificado.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Como se puede observar en la figura 73, fue necesario preinstalar uno de los muros para ubicar de mejor manera el apoyo a la cimentación, consiguiendo un trabajo más eficiente en el centrado de todas las piezas involucradas para la sujeción y aplicación de fuerzas en los módulos. Una vez instalados los apoyos y cubiertos todos los detalles que deben tener los muros para su instalación en la zona de trabajo, se ha procedido con el montaje de cada muestra conforme se ha desarrollado las evaluaciones.

#### 4.1.3. MONTAJE DE LOS MUROS EN LA ZONA DE ENSAYO

Con la zona de trabajo preparada, se ha instalado cada muro según el desarrollo del estudio, empezando con los muros rigidizados que, gracias a la maquinaria presente en las instalaciones del laboratorio, pueden trasladarse conforme se cubre el avance de los ensayos, a la par de tener una gran facilidad de montaje mediante los apoyos instalados cuya conexión con las columnas se ejerce a través de una junta empernada, conformada entre las placas de soporte preinstaladas en los tubos rectangulares y las placas encontradas en los apoyos.

Para colocar los muros en la zona de ensayo preparada, con la instalación de ganchos en los extremos superiores de las columnas, se trasladaron los módulos hasta la cimentación donde, luego de centrar las bases de las columnas con los apoyos verificando que los agujeros de los pernos coincidan entre las placas de acople, se colocaron los pernos de sujeción ajustándolos para que la estructura se fije en la zona de trabajo.



**Figura 74.** Muro colocado en la cimentación.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Cada muro cuenta con placas de conexión tanto en las bases de las columnas como en el lateral de una de ellas, donde se colocó el gato hidráulico

comprobando su capacidad de desplazarse pues, al tratarse de un ensayo de aplicación de cargas cíclicas, fue necesario ubicar el émbolo del gato aproximadamente en la mitad de su capacidad, con el fin de que pueda extenderse por encima de esta marca y contraerse por debajo de ella, creando un estado de carga y descarga de las muestras conforme a los protocolos tratados en el capítulo 2 (sección 2.6.2).



**Figura 75.** Comprobación del desplazamiento del émbolo en el gato hidráulico.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Desde luego, para poder colocar el gato hidráulico en su lugar, es necesario instalar el acople entre la base de aplicación de la carga del muro y el émbolo del gato con la respectiva celda de carga, el cual así mismo se trata de una rótula fija (apoyo fijo) en la columna del muro y que permite rotaciones cuyo eje es perpendicular al plano del muro ensayado, como las rotaciones permitidas en las bases descritas en la cimentación, con lo cual se aísla el equipo de ensayo de cualquier esfuerzo destructivo no compatible a la naturaleza del trabajo del gato, el cual ejerce fuerzas del tipo axiales a su eje de carga, pues la ventaja de estas rótulas es el de transformar los esfuerzos transmitidos por los elementos a únicamente axiales en el lugar donde se ubique estos mecanismos.



**Figura 76.** Acople instalado entre la celda de carga del gato hidráulico y la placa base previamente fijada en la columna.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Es necesario que el equipo de ensayo se encuentre correctamente instalado, para lo cual se debe comprobar que el gato hidráulico se encuentre



correctamente nivelado antes de ajustar el acople entre el muro y la celda de carga, pues el concepto del ensayo mediante la aplicación de cargas cíclicas contempla el procedimiento con la aplicación de cargas puramente horizontales, además de tener en cuenta el correcto funcionamiento del gato hidráulico sin que las condiciones generen daños en los equipos.



**Figura 77.** Nivelación del gato hidráulico.  
Fuente: (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022).

Por último, se instalaron los equipos de medición tanto de deformaciones como de carga, conectándolos según el manual del fabricante para obtener un seguimiento adecuado del comportamiento de los muros durante la aplicación de las cargas cíclicas, ajustando los equipos hasta obtener las curvas apropiadas para la lectura del ensayo.



**Figura 78.** Preparación del soporte para LVDT's.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 79.** Instalación terminada de un muro SPSW rigidizado.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Con todos los trabajos previos al ensayo terminados, el avance del estudio se desarrolló de manera secuencial, donde una vez fatigado cada módulo, se lo extraía de la zona de ensayo para luego reemplazarlo con otro módulo, donde de igual manera se aplicaba el proceso de: centrado de bases, ajuste de pernos, nivelación del gato hidráulico y ajuste de la base del gato, y colocación de instrumentos de medida.



## 4.2. EXTRACCIÓN DE PROBETAS DE MATERIALES PRINCIPALES

Durante el ensamble de los muros para los ensayos, debido a los cortes se extrajeron sobrantes de los materiales involucrados, de los cuales se moldearon las debidas probetas para obtener las propiedades básicas de los materiales principales siguiendo las especificaciones de la norma referente a los ensayos de tracción en el acero.

Gracias a las dimensiones previstas del muro frente a las dimensiones de los materiales que se encuentran en el mercado, se obtuvieron sobrantes de los perfiles tipo IPE 140 (vigas), de la plancha de acero cuyas dimensiones de mercado en base y altura son de 1,22x2,44 metros y de los ángulos utilizados como rigidizadores del muro. De las planchas de acero se obtuvieron tiras de 4 cm de ancho y 1,20m de largo, de las cuales fue posible extraer muestras cuyas dimensiones se muestran en la figura 40; por otro lado, de las vigas IPE 140 se obtuvieron dos piezas de 1,20m de largo y de los ángulos sobró una tira de 2,40m de largo, a las cuales se les ha aplicado las mismas dimensiones de las probetas especificadas en la figura 40, puesto que son estándares abiertos para aplicarse a cualquier espesor de placa de acero (American Society for Testing and Materials ASTM, 2021).

Debido a ciertas condiciones presentadas por el taller especializado en cortes mediante laser en acero, fue necesario separar los patines y el alma de la viga en placas separadas (constitutivas) antes de realizar el pedido, de las cuales se aprovechó el alma para la extracción de las probetas de acero cuyo espesor es de 4,7mm, mientras que de los ángulos fue necesario practicar el moldeado de las muestras a través de la extracción de una de las alas para luego desarrollar la geometría a través del pulido del ala en un “esmeril”; los resultados de la extracción de las muestras fueron los siguientes:



**Figura 80.** Tira sobrante de la plancha de acero de 1,4mm luego de la extracción de las probetas.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 81.** Alma de la viga IPE 140 luego de la extracción de las muestras.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 82.** Probeta de acero extraída de la separación de una de las alas del ángulo utilizado como rigidizador.

Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 83.** Muestras de acero extraídas del ángulo rigidizador.

Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Todas las probetas extraídas fueron entregadas al laboratorio para el desarrollo del ensayo a tensión, con el cual se desea obtener el esfuerzo de fluencia y esfuerzo último del acero de cada uno de los materiales utilizados, teniendo en cuenta que se han creado dos muestras por cada material para evitar imprevistos y proceder con un promedio entre los resultados de ambas probetas de acero.

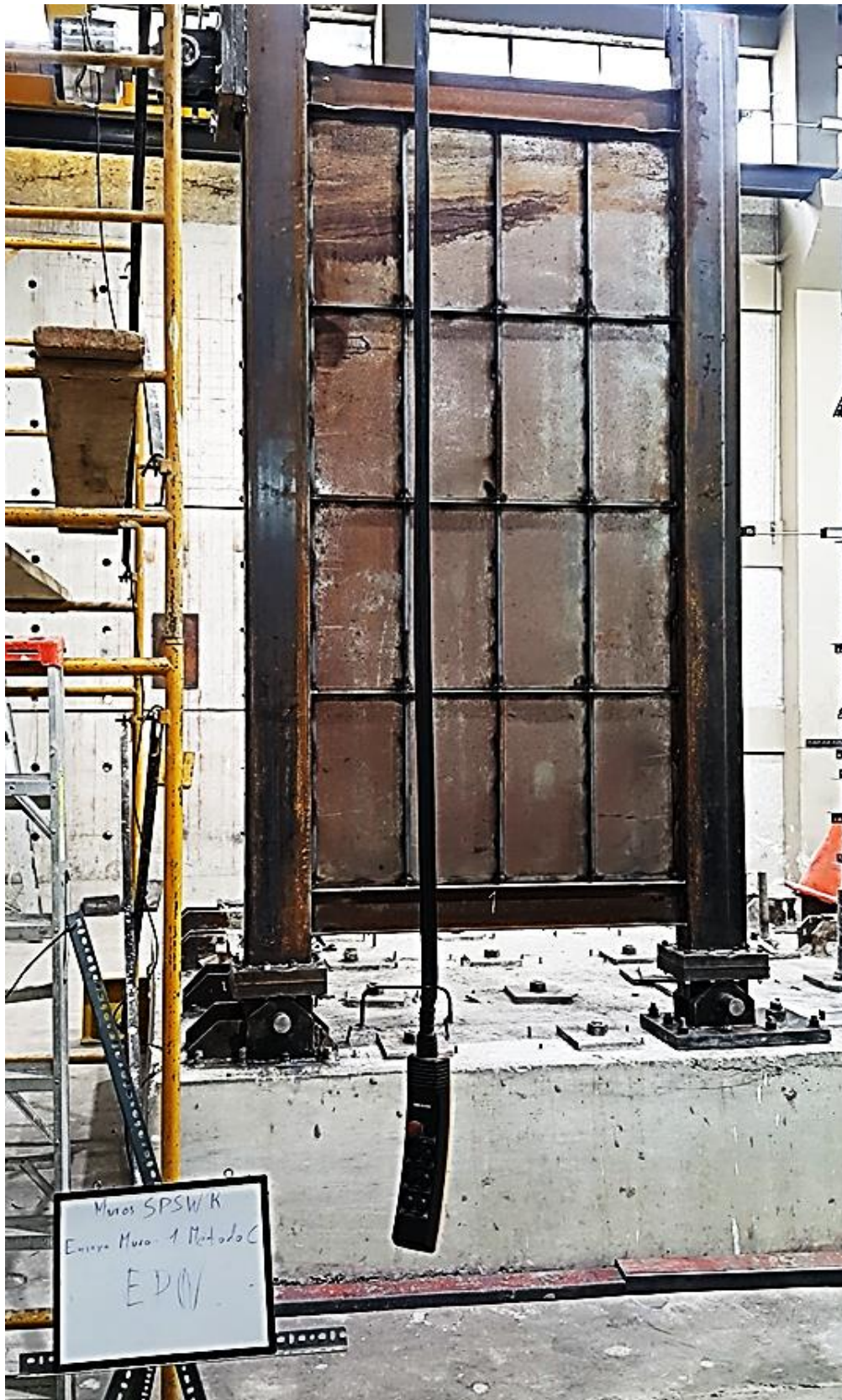
### **4.3. ENSAYO DE LOS MUROS SPSW RIGIDIZADOS**

Con la zona de ensayos preparada para la evaluación de los muros, se ha procedido a instalar cada módulo siguiendo una secuencia, para seguir evaluando el comportamiento de las muestras desarrolladas comparando entre ellas los resultados, con el fin de dar un seguimiento a las estructuras concebidas mientras el sistema entra en funcionamiento con la aplicación de cargas a través del gato hidráulico.

En primer lugar, se han ensayado los muros SPSW rigidizados propuestos en el presente estudio, instalando de esta manera la primera muestra del diseño desarrollado, teniendo en cuenta todas las restricciones del espacio y comprobaciones básicas de: posicionamiento y centrado de las muestras en las bases identificadas, nivel y centrado de los equipos tanto de ejecución del



ensayo como de lectura, firmeza de los muros y todos sus elementos, y correspondencia de medidas.



**Figura 84.** Muro SPSW rigidizado número 1: ensayo de cargas cíclicas por el método "C".  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Durante el ensayo del primer muro, se pudo observar como la plancha de acero se deformó por pandeo, creando ondulaciones en dirección diagonal al pórtico del muro conforme a la absorción de la fuerza aplicada por el gato hidráulico, cuya posición permite generar esfuerzos cortantes distribuidos en el alma de la pared, los cuales se vuelven evidentes con este comportamiento que corresponde a la dirección de las cargas transmitidas entre los elementos estructurales, obligando a que todo el pórtico se desvíe de su geometría principal, transformándolo de un rectángulo a un romboide, donde una de sus diagonales se reduce creando compresión en su eje director, mientras que la otra diagonal se alarga creando tensión así mismo en su correspondiente eje director.



*Figura 85.* Muro SPSW rigidizado número 1 durante el ensayo de cargas cíclicas.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



Para llevar el control de la ejecución del ensayo, se observó el desarrollo de los ciclos de carga a través de las curvas trazadas por el equipo de monitoreo del ensayo, que recolecta los datos de la carga aplicada correspondiente a las deformaciones provocadas por dichas cargas en la estructura ensayada, con lo cual se pudo dar el debido seguimiento del agotamiento de los muros debido a esta repetición de cargas cíclicas, generando una falla de las estructuras por fatiga de los materiales; de esta manera también fue posible determinar el momento en que finalizó cada uno de los muros ensayados por la caída de la carga soportada, que va de la mano con la preparación del número de ciclos que se describen en la norma ASTM E2126-11, donde el método que se aplicó para el ensayo de todos los muros SPSW fue el "C" (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019).



**Figura 86.** Gráfica desarrollada por el equipo de ensayo durante la aplicación de las cargas cíclicas.

Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

FORMATO ENSAYO DE CARGA LATERAL																				FT.CIV.07/03	
Dirección del laboratorio: Fecha (AAAA/MM/DD): Cliente / Testista: Dirección del cliente / Testista: Identificación del espécimen:										Ladrón de Guevara E31-253, Edificio N°5 2022/04/25 Rawl Pluggero - Carlos Gallegos Muro 1										Archivo: Carlos Gallegos Muro 1 (Ensayo Final OK)	
										Inicio de ensayo		Fin de ensayo									
										18:1		17:3									
										60		85									
										11:00		13:50									
ASTM E2126 - 11: Método de Ensayo C - Amplitud de los Ciclos Primarios																					
Patrón	Paso	Número mínimo de ciclos	Desplazamiento Objetivo (mm), Desplazamiento (mm) y Fuerza (kg) registrados																Amplitud del ciclo primario (% Δ)		
			Δ(+)	Δ(-)	F(+)	Δ(+)	Δ(-)	F(+)	Δ(+)	Δ(-)	F(+)	Δ(+)	Δ(-)	F(+)	Δ(+)	Δ(-)	F(+)	Δ(+)		Δ(-)	F(+)
1	1	5	3.91	4.5	151	3.02	-3	52	3.02	-3.0	53	3.02	-3.0	53	3.02	-3.0	53	3.02	-3.0	53	5.00
			4.5	4.5	49	3.02	-3.40	51	3.38	-3.4	56	3.38	-3.46	57	3.38	-3.51	59	3.38	-3.54	56	
			4.51	4.6	69	-3.38	3.40	50	-3.38	3.4	51	-3.38	3.28	50	-3.38	3.20	50	-3.38	3.20	46	
			6.30	6.0	85	4.30	-4.6	70	4.30	-4.7	68	4.30	-4.7	69	4.30	-4.7	69	4.30	-4.7	67	
			6.30	5.9	82	4.30	-4.7	65	4.30	-4.7	64	4.30	-4.7	64	4.30	-4.7	64	4.30	-4.7	60	
3	4	4	12.00	-12.1	105	9.00	-9.3	80	9.00	-9.3	80	9.00	-9.3	81	9.00	-9.0	81	9.00	-9.0	81	20.00
			16.00	16.6	112	13.00	-13.3	87	13.00	-13.3	87	13.00	-13.3	87	13.00	-13.3	87	13.00	-13.3	87	
			18.00	17.9	110	13.00	-13.0	75	13.00	-13.0	74	13.00	-13.0	74	13.00	-13.0	74	13.00	-13.0	74	
			24.00	25.0	105	18.00	-18.0	71	18.00	-18.0	71	18.00	-18.0	71	18.00	-18.0	71	18.00	-18.0	68	
			34.00	32.0	105	18.00	-18.0	58	18.00	-18.0	55	18.00	-18.0	55	18.00	-18.0	55	18.00	-18.0	55	
4	7	7	42.00	-43.0	68	31.50	-32.0	49	31.50	-32.0	49	31.50	-32.0	49	31.50	-32.0	49	31.50	-32.0	49	70.00
			47.00	47.0	41	31.50	-32.0	39	31.50	-32.0	39	31.50	-32.0	39	31.50	-32.0	39	31.50	-32.0	39	
			50.00	51.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	
			60.00	60.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	
			60.00	60.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	25.00	-25.0	30	

**Figura 87.** Tabla de recolección de datos correspondiente al ensayo de cargas cíclicas por el método "C"

Fuente: (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019)



Una vez finalizado el ensayo del primer muro, fue desmontado de la zona de ensayo, para luego reemplazarlo por la siguiente muestra de los muros SPSW rigidizados, con el fin de proceder de la misma manera con la aplicación de las cargas cíclicas para fatigarla; el procedimiento fue repetido para todas las muestras de los muros SPSW rigidizados, donde el comportamiento y desarrollo de las cargas aplicadas fue muy similar.



**Figura 88.** Muro SPSW rigidizado número 2: ensayo de cargas cíclicas por el método "C".  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.





*Figura 89.* Muro SPSW rigidizado número 2 durante el ensayo de cargas cíclicas.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.





**Figura 90.** Muro SPSW rigidizado número 3: ensayo de cargas cíclicas por el método “C”.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.





*Figura 91.* Muro SPSW rigidizado número 3 durante el ensayo de cargas cíclicas.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.





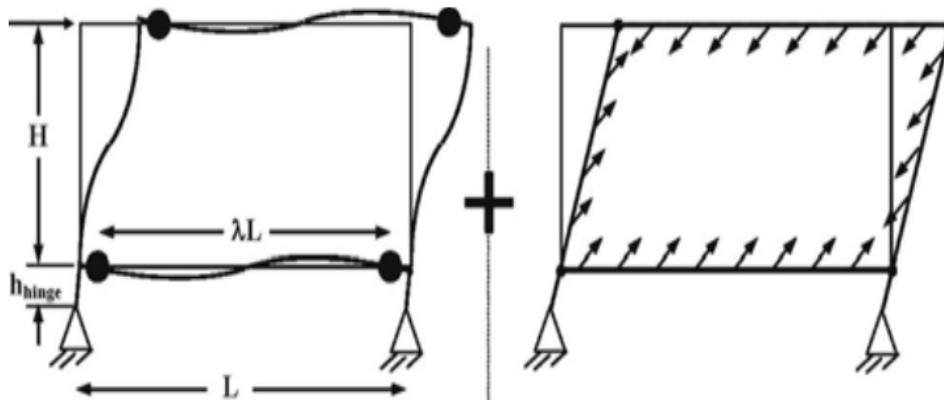
**Figura 92.** Muro SPSW rigidizado número 4: ensayo de cargas cíclicas por el método "C".  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.





*Figura 93.* Muro SPSW rigidizado número 4 durante el ensayo de cargas cíclicas.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Los ensayos empleados en el presente estudio, provocan deformaciones paralelas al plano del muro en la dirección horizontal, desviando la configuración geométrica del pórtico como ya se lo ha mencionado anteriormente, siendo claramente notoria la deformación del muro en la viga superior del pórtico que corresponde al eje de ubicación del gato hidráulico, donde ésta se desplaza producto de la aparición de las rotulas plásticas en las secciones reducidas de las vigas que, en conjunto con las rótulas mecánicas instaladas en la base de las columnas, permiten que éstas se inclinen manteniéndose fija la parte inferior del muro correspondiente a la base de las columnas y, conforme se aumenta la altura, el desplazamiento de los elementos encontrados en el eje horizontal, paralelo al plano del muro y que corta dicha altura de análisis, también aumenta de manera proporcional hasta llegar al desplazamiento total de la viga superior; este comportamiento se lo puede representar a través de la siguiente imagen (figura 94):



**Figura 94.** Representación de las deformaciones producidas por el ensayo de cargas cíclicas en un muro de corte.

Fuente: (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, 2009).

Para poder obtener información de las deformaciones producidas en los muros durante los ensayos, se instalaron LVDT's tanto en el eje de la viga superior del muro, en la mitad del muro y en el apoyo emperrado para tener una clara idea de la inclinación que sufren las columnas por el empuje generado a través del gato hidráulico del ensayo, pues estas deformaciones son muy pequeñas como para poder percibir las durante la ejecución del ensayo en cada muro, y esto gracias a la rigidez que cada uno de ellos posee por el aporte de los elementos involucrados en la resistencia al corte de estas paredes de acero.

#### 4.4. ENSAYO DEL PÓRTICO Y MURO SPSW NO RIGIDIZADO

Después de ensayar los muros SPSW rigidizados, en seguida se reemplazó la última muestra del diseño, por una muestra conformada únicamente de los elementos de borde del muro (vigas y columnas que constituyen el pórtico), para verificar la resistencia aportada por el diseño de las secciones reducidas en las vigas superior e inferior; y también se ha ensayado un muro compuesto únicamente de una plancha de acero que representa a los muros SPSW base, para poder comparar los resultados de cada configuración estructural.

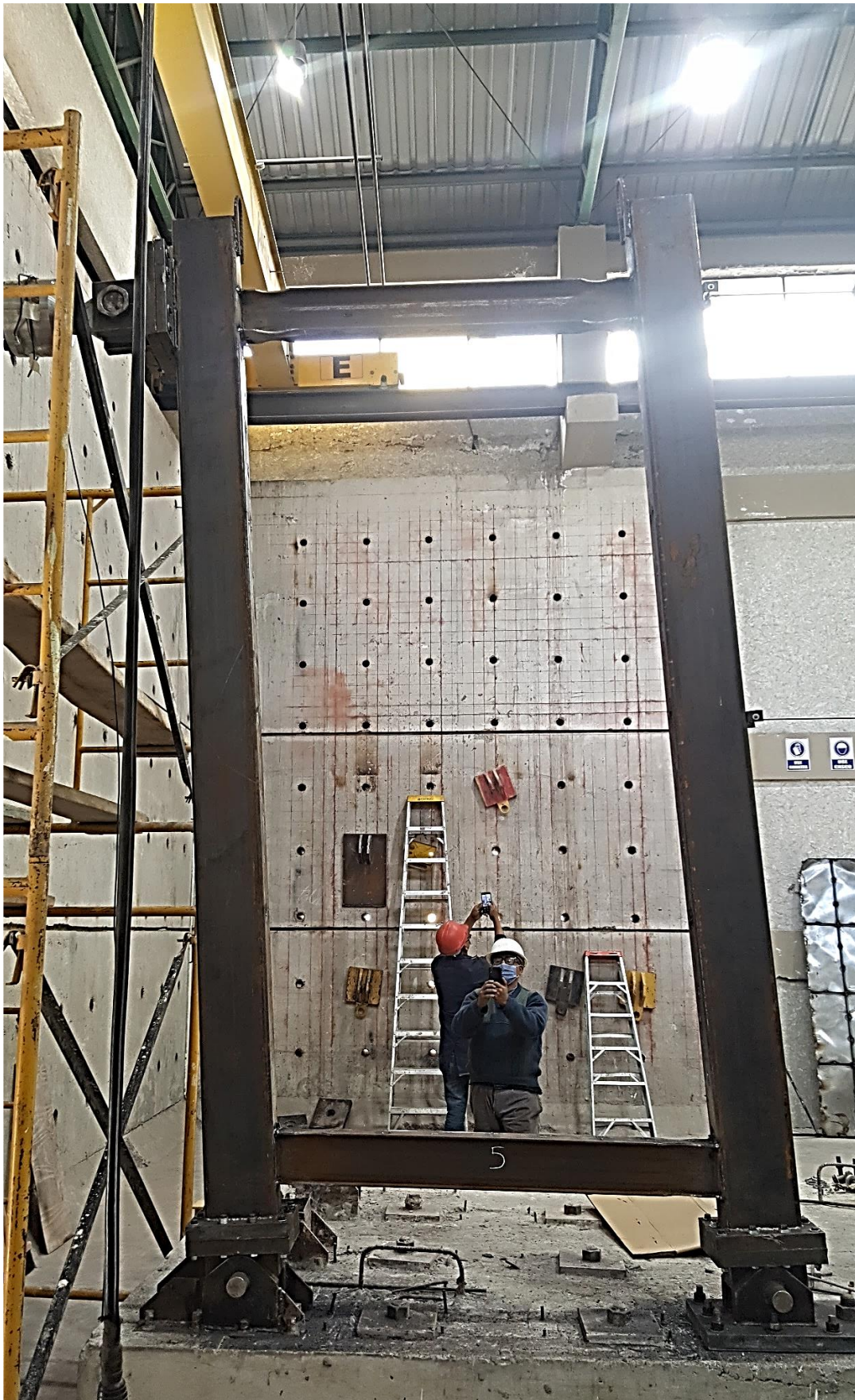


Para el ensayo de la muestra que representa al pórtico del muro SPSW rigidizado, se ha respetado las dimensiones de los elementos de borde que lo conforman, asegurando las mismas condiciones de acoplamiento de la muestra a los equipos de ensayo y respectiva cimentación representada por las rótulas o “apoyos fijos”, cuya configuración dio cabida a la facilidad de montaje y desmontaje de muestras de muros. Esta muestra tipo “pórtico”, al poseer menos elementos que rigidicen el conjunto en general, obtiene mayor libertad en el desarrollo de deformaciones, con lo cual fue posible evidenciar cómo esta muestra contempla el cambio de geometría representado en la figura 94, además de ser posible observar cómo las rótulas de la cimentación se inclinan por el giro que sufre la columna con respecto a estos ejes hasta lograr la resistencia estimada en los cálculos.



**Figura 95.** Muestra número 5 (pórtico): ensayo monotónico.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.





**Figura 96.** Muestra número 5 (pórtico) durante el ensayo monotónico.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



Una vez ejecutado el ensayo de la muestra número 5 correspondiente al pórtico, así mismo se realizó su desmontaje para colocar la última muestra número 6 que representa al muro SPSW original, donde sólo se utiliza la placa de acero como alma de aporte a la rigidez de la estructura de acero. Así mismo, se respetaron las dimensiones de los elementos de borde para que la muestra encaje en la zona de ensayo, además de que es necesario que todas las muestras respeten estas medidas puesto que solo así se puede comparar entre ellas para evaluar de manera correcta el aporte de resistencia debido a los elementos constitutivos de cada modelo.



**Figura 97.** Muestra número 6 (muro SPSW): ensayo de cargas cíclicas por el método "C".

Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.





**Figura 98.** Muestra número 6 (muro SPSW) durante el ensayo de cargas cíclicas.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Para que la ejecución de los ensayos se la haya realizado de manera satisfactoria, es necesario recalcar que todas las muestras han sido armadas comprobando que se respete las mismas condiciones de conexión entre los elementos de acero previamente preparados, considerando todas la características dentro de las dimensiones, acabados de suelda en todas las uniones, posición de las bases para las respectivas juntas entre cimentación, equipos de ensayo y las muestras, y llevando a cabo un proceso de montaje con el fin de asegurar que las muestras se encuentren debidamente colocadas para los ensayos; como resultado de estas observaciones, cada uno de los ensayos fue concebido de la mejor manera gracias a que no fue necesario implementar algún mecanismo de soporte adicional y, el progreso con el cual aumentaba gradualmente el estado de carga, permitió obtener resultados muy certeros del comportamiento de las muestras ante la aplicación de cargas cíclicas que sometieron a las estructuras a un trabajo por cortante.

#### **4.5. ENSAYO DE PROBETAS DE ACERO**

Para poder ajustar de mejor manera los modelos desarrollados en los programas computacionales, se extrajeron muestras del acero contenido en los distintos elementos o perfiles que han sido utilizados para el modelo físico de los muros SPSW rigidizados, aprovechando los sobrantes obtenidos durante el ensamble de los muros, para luego enviarlos al laboratorio donde se ejecutaron los ensayos pertinentes.

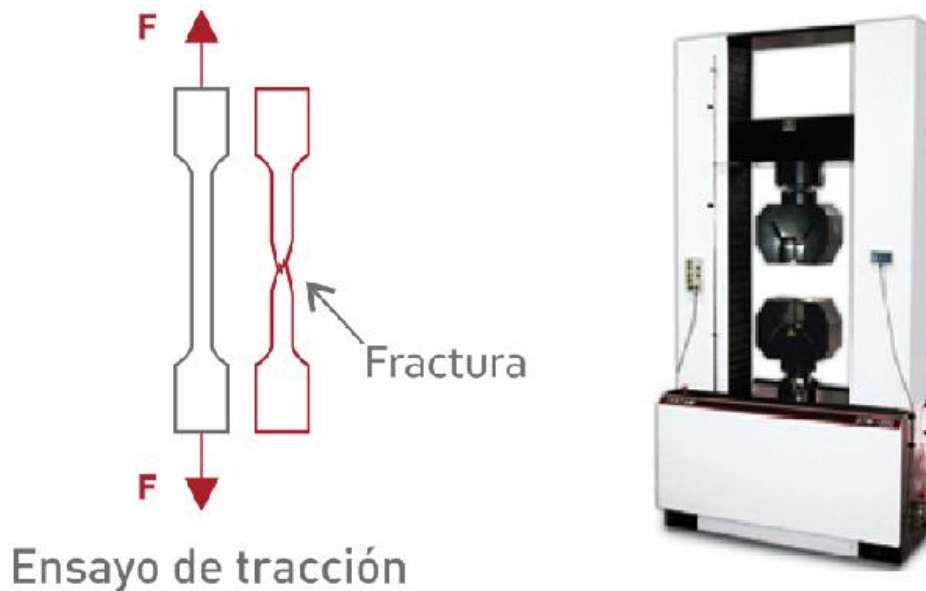
Como ya se explicó en el apartado 4.2, las probetas de acero fueron extraídas de residuos de los perfiles cortados según las medidas presentadas, las cuales fueron entregadas al laboratorio de ensayo de materiales donde se procedió a someterlas a esfuerzos de tensión, con lo cual se obtuvieron las correspondientes curvas de carga vs desplazamiento de cada uno de los materiales solicitados.



*Figura 99.* Probetas de acero entregadas al laboratorio de ensayo de materiales.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



El ensayo consiste en colocar las platinas o probetas de acero en una máquina especial, sujetándolas por ambos extremos (previamente preparados) en un par de pinzas, para luego encender la máquina y proceder a separarlas garantizando que el elemento sujetado se someta a estiramiento, provocando que el material de las muestras comience a trabajar según la teoría de “resistencia de materiales”.



**Figura 100.** Esquema de ensayo a tracción de muestras de acero.  
Fuente: (Taller Industrial ALTEDA, 2022).

Una vez ejecutados los ensayos, las probetas de acero desarrollaron una fractura parecida a la presentada en la figura 100, donde se puede observar el estiramiento del acero caracterizado por la dilatación o deformación de la sección destinada a la cedencia del material en estudio; de esta manera, es posible demostrar la presencia del rango elástico, plástico y falla del material una vez excedidos los límites de fluencia y de resistencia última.



**Figura 101.** Restos de probetas ensayadas.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



Una vez llevados a cabo todos estos ensayos, se obtuvieron importantes resultados que permitieron evaluar el comportamiento de los muros frente a todas las condiciones que pueden presentarse debido a cualquier factor medioambiental, siendo entre los más relevantes los presentados por: mano de obra, condiciones climáticas, exposición o tratamiento de químicos involucrados en la fundición y presentación del producto, etc.

# CAPÍTULO V

## ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE RESULTADOS

### 5.1. DISEÑO PRELIMINAR DEL MURO SPSW RIGIDIZADO

Con el fin de preparar un modelo de muro SPSW rigidizado que pueda ser probado en el laboratorio y permita la extracción de una buena e importante cantidad de información, previamente se realizó el diseño del muro utilizando las ecuaciones y el procedimiento descritos en el capítulo 3, teniendo en cuenta de manera preliminar las propiedades de los materiales según la descripción de cada uno de los perfiles adquiridos, la cual se encuentra en los catálogos del proveedor.

Dentro del algoritmo de diseño preparado en MATLAB y en las herramientas de modelamiento detalladas en el programa ANSYS, existen espacios donde se solicita toda la información de los perfiles y de la geometría del muro que puede ser asumida previamente, con el fin de evaluar cualquier alternativa de muro que pueda ser propuesta por el diseñador según las condiciones de ensayo y costo de fabricación de los muros.

Para todo el cálculo preliminar, se ha asumido que todos los perfiles y la plancha destinada como alma del muro corresponden al acero A36, cuyas características de resistencia son: 250MPa como esfuerzo de fluencia, 460MPa como resistencia última, 200GPa como módulo de Young y 0,3 como coeficiente de Poisson característico del acero; datos que requieren ser confirmados pues todos los resultados como la resistencia del muro y las deformaciones dependen del nivel de certeza que tengan estos valores con los reales que pueden entregar los materiales ante un ensayo de evaluación del acero.

Una vez ingresados estos valores junto con las características geométricas de los perfiles, de la plancha de acero y del muro armado, se ha obtenido una primera entrega de la capacidad del muro en la carga soportada y en las deformaciones correspondientes a dicha capacidad de carga, luego de realizar un seguimiento del cálculo para confirmar que los primeros resultados pueden ser utilizados en el desarrollo de los ensayos.

#### 5.1.1. CÁLCULO EN MATLAB

Aplicando el algoritmo de cálculo descrito en el capítulo 3, se han registrado todos los datos solicitados en una hoja de cálculo que ha sido destinada como fuente de información para la ejecución del algoritmo en el programa MATLAB, el cual, al dar clic en la herramienta de arranque del algoritmo, comienza a presentar ciertas condiciones de desarrollo que se deben responder para culminar con los cálculos y entregar el resultado de la capacidad del muro.

Los datos ingresados en la hoja de cálculo se representan en la tabla 27, donde el módulo de Young de cada elemento ( $E_p$ ,  $E_v$ ,  $E_c$  y  $E_{at}$ ) fue asumido previamente como 200GPa y el esfuerzo de fluencia de cada perfil de igual manera fue asumido como 250GPa. Luego de guardar la hoja de cálculo con la

información registrada, se ejecutó el algoritmo para realizar el seguimiento del cálculo y registrar ciertos valores adicionales para que el procedimiento pueda concluir con los primeros resultados; de esta manera se obtuvo la siguiente información:

### "DISEÑO DE MURO DE CORTE DE PLACA DE ACERO SPSW"

-Cálculo de la capacidad a corte del muro y las vigas-

El aporte de la viga es de: 21.9984kN

El aporte de la placa es de: 170.1753kN

El corte nominal del muro es: 192.1737kN

La resistencia del muro es: 172.9563kN

-Cálculo de las columnas-

1) Clasificación de la sección

El eje x es compacto

El eje y es no compacto

La sección de la columna es no compacta

2) Capacidad en las dos direcciones

2.1) Eje x

¿desea obtener la longitud efectiva a través de nomogramas o estimarlo?

opciones: 1=nomogramas o 2=estimación

ingrese la opción: 1

ingrese el factor por conexión rígida: 0.5

las restricciones rotatorias en los extremos son:

Gax (extremo inferior): 3.4718

Gbx (extremo superior): 3.4718

ingrese la longitud efectiva del nomograma: 1.91

hay un trabajo inelástico

La capacidad de la columna en la dirección x es: 591.5949kN

2.2) Eje y

¿desea obtener la longitud efectiva a través de nomogramas o estimarlo?

opciones: 1=nomogramas o 2=estimación

ingrese la opción: 2

ingrese la longitud efectiva: 2

hay un trabajo inelástico

La capacidad de la columna en la dirección y es: 340.6254kN

-Análisis de la placa-

El pandeo se inicia en el rango elástico

-Diseño y análisis de la placa con atiesadores-

1) Inercia mínima del atiesador horizontal

"Cumple en x"

La inercia mínima horizontal es: 0.14324cm<sup>4</sup>

2) Inercia mínima del atiesador vertical

"Cumple en y"

La inercia mínima vertical es: 0.7826cm<sup>4</sup>

La inercia del atiesador doble es: 1.076cm<sup>4</sup>

"La inercia del atiesador cumple en los dos sentidos"

3) Capacidad de la placa con atiesadores

El pandeo se inicia en el rango elástico

4) Capacidad del atiesador como placa

ingrese la condición por apoyo libre: 0.425

ingrese la condición por empotramiento: 1.277

El pandeo se inicia en el rango inelástico

"El atiesador cumple"

5) Capacidad del muro con atiesadores

Cantidad de esfuerzos críticos calculados: 41

¿Desea calcular el aporte de los rigidizadores con el esfuerzo crítico por defecto?

Nota: revisar primero el cálculo por defecto antes de proceder con la otra alternativa.

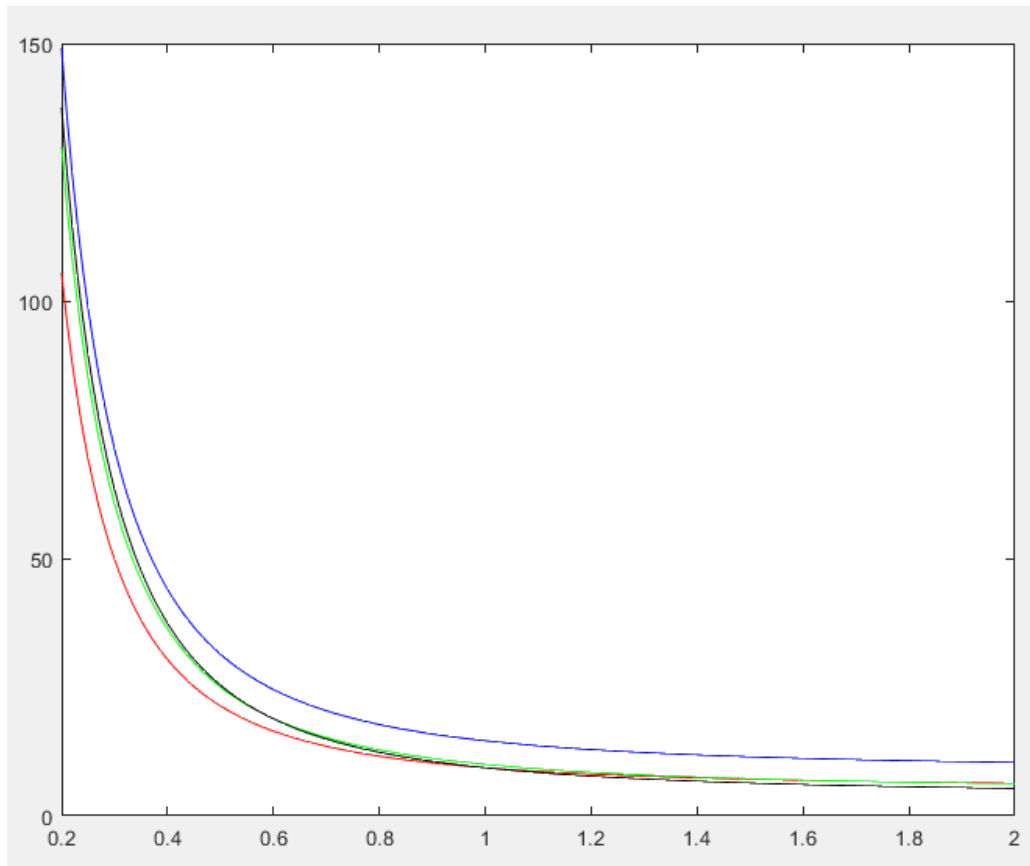
sí=1 o no=2: 1

El aporte de los rigidizadores al cortante del muro es de: 74.0641kN

El corte nominal aumentado del muro es: 266.2378kN

La resistencia aumentada del muro es: 239.614kN

**FUNCIÓN "FACTOR DE PLACA" PARA CONEXIONES EMPOTRADAS**



**Figura 102.** Gráfica de las ecuaciones planteadas para el cálculo del factor de placa.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Como se puede ver en la descripción de los resultados, el cálculo comienza con la presentación de la resistencia del muro como si fuera un muro SPSW sin rigidizadores (muro base), donde presenta el aporte nominal de la viga, de la placa, la capacidad nominal del muro y su correspondiente resistencia como una fracción de la capacidad nominal (que por lo general es de 0,9); luego pasa por el cálculo de las columnas, empezando con la clasificación del elemento destinado para este propósito estructural, con lo cual ya se puede dar una breve perspectiva de cómo se va a comportar la columna una vez ensamblada y, de ser necesario, cambiar el elemento por otro que refleje mejores resultados que el anterior.

Una vez clasificado el elemento, el algoritmo continúa con el cálculo de la capacidad de la columna para poder cubrir la demanda del diseño y evitar que la columna falle primero por resistencia o capacidad inferior a la de los elementos complementarios del muro, respetando así la filosofía de diseño estructural de un edificio en general. Una vez calculada estas capacidades, se procede con el análisis de la placa de acero según la “teoría de placas” para determinar el esfuerzo crítico mediante el cual se estima que la placa falle por pandeo debido al corte; con este resultado, se colocan rigidizadores distribuidos una separación conocida que se registra previamente en la hoja de cálculo destinada para datos del programa, para luego evaluar la inercia mínima vs la inercia del elemento asumido y verificar si cumple con los requisitos del diseño. Después, se calcula

el nuevo esfuerzo crítico de falla por pandeo que responde a las nuevas condiciones del mejoramiento con los atiesadores, para luego verificar que la resistencia del atiesador, analizado como una placa de acero, sea mayor que la obtenida por la plancha del muro y garantizar que la plancha de acero sufra pandeo en cada una de las divisiones generadas por la distribución de los rigidizadores, pues si por el contrario, el esfuerzo crítico del atiesador es menor que el esfuerzo crítico de la plancha de acero, los atiesadores fallarían primero y toda la plancha comenzaría a deformarse fuera de su plano conjuntamente con los atiesadores. Por último, se calcula el aporte nominal de los rigidizadores a la resistencia por corte del muro, para luego sumarla a los cálculos previos de un muro diseñado sin rigidizadores, con lo cual se obtiene la capacidad del muro SPSW rigidizado y, por ende, su resistencia final.

Adicionalmente, en la figura 102, se muestra las curvas de cada una de las ecuaciones presentadas en el capítulo 3 referentes al factor de placa “ $k_p$ ” (ecuaciones de la 33 a la 36), donde se puede observar que entre las ecuaciones 33 y 36 existe una clara diferencia para cualquier valor de la “relación de aspecto”; por otro lado, con respecto a las ecuaciones 34 y 35, se puede ver que estas se parecen a la ecuación 33 cuando la relación de aspecto es menor a 0,25, pero en valores ubicados entre 0,25 y 0,8, las ecuaciones 34 y 35 se ubican en la mitad de las ecuaciones 33 y 36, para luego pasar a ser similares con la ecuación 36; estos aspectos deben ser considerados puesto que el factor de placa depende bastante de las condiciones de apoyo entre la placa de acero y los elementos de borde, y de la relación de aspecto que responde a la configuración geométrica de la plancha con respecto a la distribución de cargas en el muro (De Buen López De Heredia, 2000).

Como se puede ver en los resultados preliminares, la resistencia del muro SPSW base es menor a la resistencia del muro rigidizado, donde la diferencia nominal entre ambos diseños es de 74,064kN o 7,55Ton, con lo cual la resistencia del muro SPSW rigidizado es de 239,614kN o 24,43Ton; mientras tanto, el aporte que genera la viga a la resistencia del muro es de 22kN o 2,24Ton, el aporte de la placa de acero es de 170,175kN o 17,35Ton y la resistencia calculada de las columnas en ambas direcciones es de 591,595kN o 60,31Ton en sentido “X” y de 340,625kN o 34,72Ton en sentido “Y”, con respecto a la sección de la columna. De esta manera, se podría decir que los primeros elementos en sufrir fallas considerables serían las vigas en las secciones RBS destinadas para la formación de las rótulas plásticas, pero debido a que el cálculo todavía se mantiene con una asunción de datos “idealizados”, se ha procedido con el modelo desarrollado.

Una vez obtenidos estos datos de resistencia del muro, se los ha ingresado en el modelo creado mediante el programa ANSYS, para determinar las deformaciones que sufriría el muro por la aplicación de cargas según el ensayo cuasi-estático de cargas cíclicas, donde se busca someter al muro a fuerzas que lo lleven a su límite y verificar el comportamiento del muro frente a la exigencia de ciertos esfuerzos de tipo cortante distribuidos en la estructura.



### 5.1.2. MODELAMIENTO EN ANSYS













Con la geometría del muro establecida y calculada su respectiva resistencia, se ha desarrollado un modelo virtual del muro SPSW rigidizado, donde se ha aplicado la fuerza obtenida y, de igual manera, se ha asumido que los materiales utilizados son de acero que responden a la norma ASTM A36, siguiendo el orden establecido por las herramientas de modelamiento presentadas en el programa ANSYS.

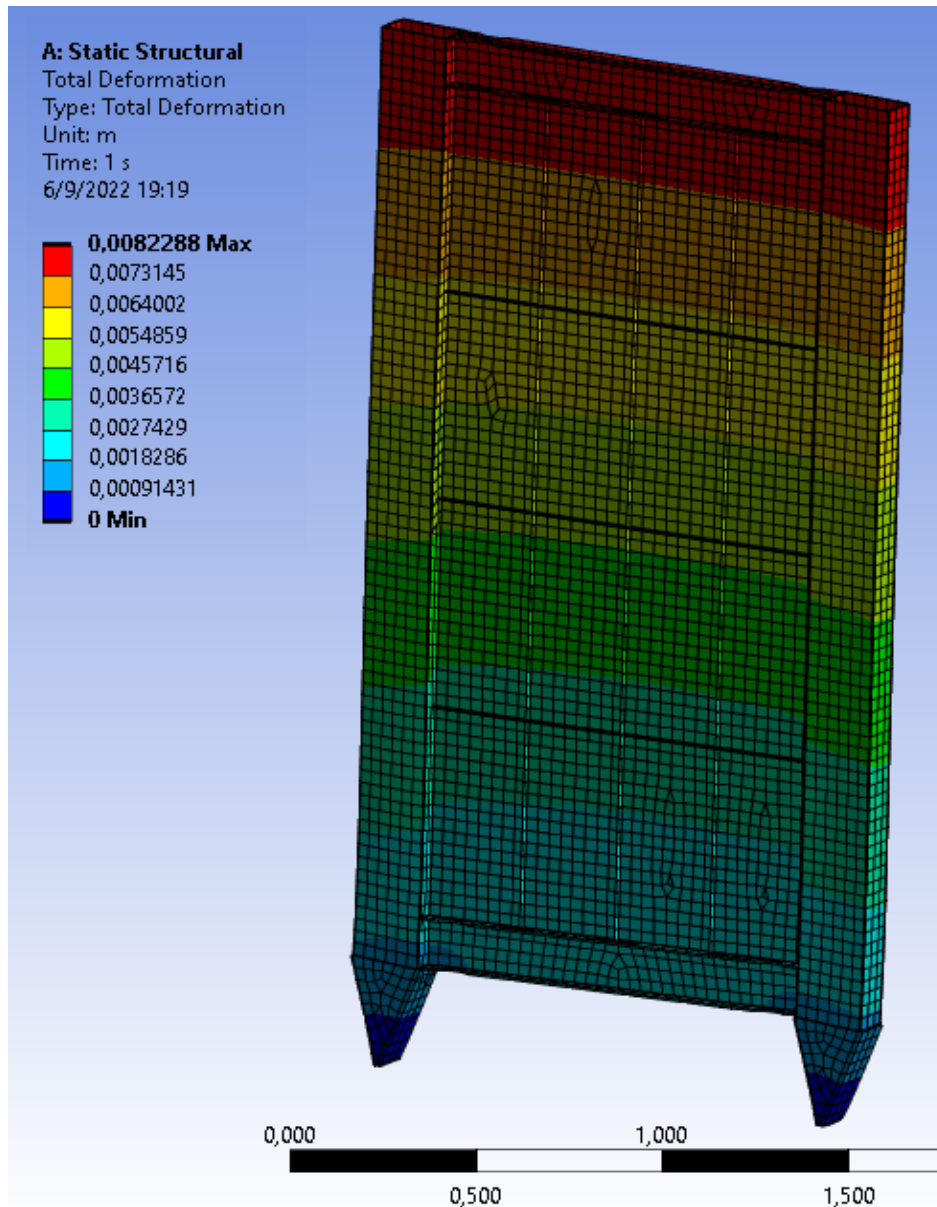
Para los cálculos que se desarrollan dentro del programa ANSYS, es necesario considerar adicionalmente el coeficiente de Poisson representativo del acero y la resistencia última, pues este programa utiliza todas las características de los materiales involucrados con el fin de aproximarse de mejor manera a la realidad del comportamiento de cualquier estructura o mecanismo, además de poder definir con mayor facilidad cualquier geometría utilizando ciertos mecanismos que ofrece este software.

Una vez definido el modelo como se explica en el capítulo 3 y registrados todos los datos recogidos, se ha ejecutado el programa para obtener las deformaciones con las que el muro responde a la fuerza ejercida, debido a la calidad del acero involucrado, es por esto que es muy importante considerar el módulo de Young que representa la relación entre esfuerzos y desplazamientos unitarios. Con el programa ejecutado, se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 29**

Datos del acero ingresados en ANSYS

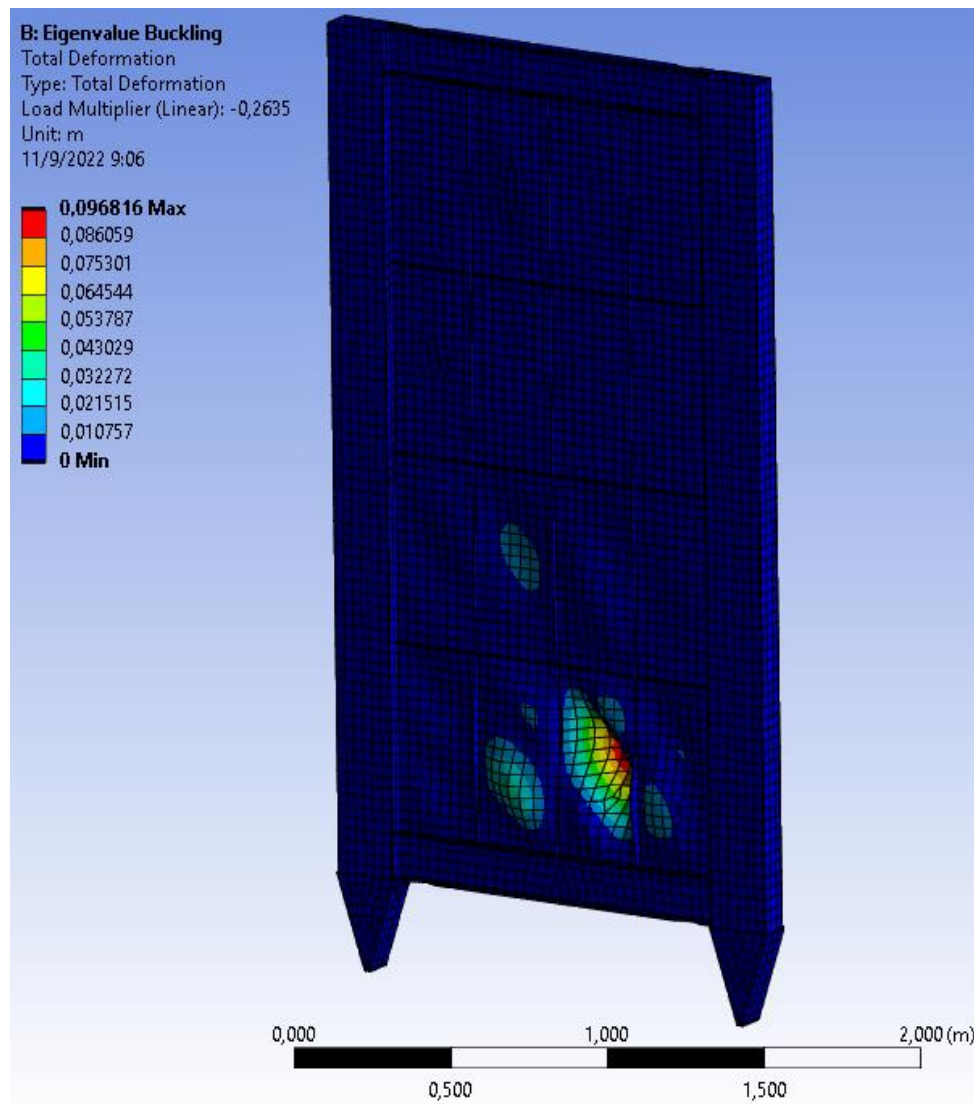
es of Outline Row 4: Structural Steel		
A	B	
Property	Value	
 Material Field Variables	 Table	
 Density	7850	kg m <sup>-3</sup>
 Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
 Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	2E+11	Pa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
 Strain-Life Parameters		
 S-N Curve	 Tabular	
 Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa
 Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa
 Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa
 Compressive Ultimate Strength	0	Pa



**Figura 103.** Deformaciones desarrolladas en el muro por el acero registrado en ANSYS.  
 Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Como se puede ver en la figura 103, la deformación máxima que corresponde a la ubicada en la parte superior es de 8,23mm que correspondería a las propiedades del acero registrado en la tabla 29, pues se ha idealizado que todos los elementos están hechos de acero A36 y las propiedades mecánicas del material corresponderían a esta norma.

Como se ha explicado en el capítulo 3, también se ha desarrollado un análisis de pandeo para poder observar cómo se comporta la placa del muro frente a la aplicación de cargas cortantes debidas al ensayo de cargas cíclicas, ya que el propósito del estudio es justamente poner en funcionamiento un muro desarrollado para absorber cargas de tipo cortantes distribuidas por los elementos de borde durante la presencia de un movimiento telúrico. El resultado del modelamiento es el siguiente:



*Figura 104.* Pandeo por corte de la placa de acero del muro SPSW rigidizado.  
 Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Como se observa en la figura 104, debido a la presencia de fuerzas del tipo cortantes, se producen ondulaciones diagonales en cada una de las divisiones obtenidas de la distribución de los ángulos tanto en vertical como en horizontal, lo cual es claro observar por la concentración de deformaciones (cambios o manchas de colores) en cada cuadrícula, además se observa una concentración muy grande de esfuerzos cerca de la esquina derecha e inferior del muro modelado.

Estos cálculos desarrollados permitieron obtener un modelo de muro cuyas dimensiones son aproximadas a las utilizadas cuando se levanta un edificio, donde un dato adicional obtenido de la geometría es la relación altura-base del muro cuyo valor es de 1,81, puesto que el largo de las columnas es casi el doble del largo de las vigas si se las mide desde el corte con el cruce de sus ejes correspondientes (vertical y horizontal), con lo cual fue posible proceder con la adquisición de los materiales para el ensamble de los modelos físicos.

## **5.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EJECUTADOS**

De la ejecución de los ensayos correspondientes a la aplicación de cargas cíclicas en los muros y al sometimiento de las muestras de acero a cargas de tensión, se obtuvo la resistencia real del modelo físico del muro SPSW rigidizado, no rigidizado, del pórtico y del acero utilizado en la configuración estructural de cada una de las muestras de los muros ensamblados en el laboratorio, acompañado de las deformaciones correspondientes a las fuerzas desarrolladas.

Estos valores fueron recogidos a través de los equipos de medición instalados durante el montaje de las muestras en la zona de ensayo, los cuales fueron registrados en una hoja de cálculo para proceder con el debido tratamiento y obtener las gráficas correspondientes a los ensayos de carga cíclica, los ensayos monotónicos y los ensayos de tensión de las muestras de acero. Según la naturaleza de los valores obtenidos, estos fueron ordenados en columnas para observar la relación entre fuerzas y deformaciones, conseguir los máximos de cada ciclo desarrollado y extraerlos para crear tablas resumidas de las lecturas entregadas.

Según el tipo de ensayo, cada una de las evaluaciones fue procesada de manera que se pueda evidenciar las características de las muestras probadas en el laboratorio, pues dependiendo del enfoque, los resultados deben corresponder a los valores obtenidos en el modelamiento matemático y a los resultados de los ensayos complementarios de los muros SPSW, con el fin de poder compararlos y aprovechar cualquier tipo de novedad que pueda describir lo sucedido en la evaluación de las estructuras.

### **5.2.1. TABULACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES**

Con los datos registrados en Excel, se los ha ordenado en tablas con el fin de entender a qué medida corresponde cada uno de ellos, poder identificar los máximos y mínimos, promediar entre lecturas de muestras semejantes, etc., con lo cual, se obtiene las medidas correspondientes a cada una de las muestras identificadas.

Para llevar a cabo un correcto procesamiento de los datos recolectados, se ha procedido a crear tablas consecutivas de las lecturas tomadas en los laboratorios, con las cuales se va obteniendo ciertas medidas importantes para identificar a manera de resumen, las distintas curvas que deben ser obtenidas al relacionar entre los valores de fuerzas o cargas vs deformaciones de los elementos ensayados.

Debido a la complejidad de cada ensayo, en ciertos casos fue necesario recurrir a la creación de varias tablas consecutivas para obtener los datos correspondientes a cada tipo de curva que debe ser identificada para determinar su gráfica, pues además, debido a que las lecturas de los ensayos registran una cantidad de medidas que no es la misma a otras lecturas, es necesario identificar las medidas importantes con las cuales si se puede obtener la misma cantidad de lecturas, para luego llevarlas a un promedio que represente el modelo de las

muestras ensayadas. Cada una de las tablas se encuentra debidamente identificada según los datos que refleja, como producto del proceso que fue llevado a cabo para la recolección de los valores.

Es necesario procesar los datos recogidos de los ensayos ejecutados en la práctica, ya que las lecturas de los equipos siempre se presentan como valores “en bruto”, los mismos que deben ser identificados con el fin de obtener los resúmenes, valores y representaciones importantes que permiten aclarar los conceptos descritos en la literatura, los cuales siempre se encuentran de la mano con el desarrollo científico, pero así mismo es importante tener el sustento de las lecturas directas de los equipos, pues gracias a los valores que se recogen, se puede percibir con gran detalle el comportamiento de las muestras una vez trazadas las curvas.

#### **5.2.1.1. Ensayo de muros**

Los ensayos de carga cíclica son pruebas de laboratorio cuya información recolectada es muy amplia, pues los equipos utilizados ejercen fuerzas de carga y descarga que someten a la estructura a un trabajo por fatiga, donde los valores entregados reflejan una gran cantidad de características que representan el comportamiento de la muestra probada.

Los principales valores que se obtienen del desarrollo de este ensayo corresponden a la fuerza aplicada por el gato hidráulico y la deformación de la muestra que acompaña a dicha fuerza, con lo cual se puede relacionar estos valores para determinar una función representativa de cómo se deforma un objeto debido a la fuerza que lo obliga a cambiar de forma.

En este caso, al tratarse de muros sometidos a una fuerza horizontal aplicada en su extremo superior, se sabe que el elemento estructural se encuentra absorbiendo la fuerza en una configuración de tipo “cortante”, pues al encontrarse sujetado en la parte inferior, la cimentación responderá con una fuerza contraria y de igual magnitud a la fuerza aplicada en la parte superior, obligando al muro a deformarse desplazando únicamente sus elementos superiores, pero para que esto sea posible, es necesario de que los elementos complementarios presenten una salida de su eje representativo y, dependiendo del material del cual están conformados, esta salida será apreciable o no apreciable, por esta razón se necesita de la instalación de “deformímetros” (LVDT's) que permiten medir esta salida de los ejes (FEMA, 2007).

En base a este concepto, las deformaciones más importantes que se recogen durante el ensayo de cargas cíclicas de un muro de corte son la ubicada en el eje de aplicación de la fuerza (eje horizontal superior) y la ubicada entre los ejes superior e inferior (aproximadamente la mitad del muro), pues se sabe que la base se mantendrá estable, sin embargo también es necesario medir deformaciones en la base en caso de existir deformaciones considerables, las cuales incurren en alteraciones a los resultados obtenidos. Los datos obtenidos durante el ensayo son los siguientes:

**Tabla 30**

Ejemplo de datos recolectados durante el ensayo de cargas cíclicas: MURO 1 (29/4/2022 12:19 - DATASOIL - CH1: 2019AFB006 CH2: LTD 500mm CH3: LTD 500mm CH4: LTD 500mm)

Nr.	Time	Time	1 (CH1)	1 real	3 (CH2)	5 (CH3)	27 (CH4)
	mins	mins	kN	kN	mm	mm	mm
1	00:00:00:00	0.000	0,02	-0,02	0	0	0
2	00:00:00:01	0.017	0,02	-0,02	0	0	0
3	00:00:00:02	0.033	0,02	-0,02	0	0	0
4	00:00:00:03	0.050	0	0	0	0	0
5	00:00:00:04	0.067	-0,02	0,02	0	0	0
6	00:00:00:05	0.083	-0,02	0,02	0	0	0
7	00:00:00:06	0.100	-0,02	0,02	0	0	0
8	00:00:00:07	0.117	-0,02	0,02	0	0	0
9	00:00:00:08	0.133	0	0	0	0	0
10	00:00:00:09	0.150	0,02	-0,02	0	0	0
11	00:00:00:10	0.167	0,1	-0,1	0	0	0
12	00:00:00:11	0.183	0,15	-0,15	0	0	0
13	00:00:00:12	0.200	0,24	-0,24	0	0	0
14	00:00:00:13	0.217	0,32	-0,32	0	0	0
15	00:00:00:14	0.233	0,39	-0,39	0	0	0
16	00:00:00:15	0.250	0,48	-0,48	0	0	0
17	00:00:00:16	0.267	0,92	-0,92	0	0	0
18	00:00:00:17	0.283	1,22	-1,22	0	0	0
19	00:00:00:18	0.300	1,83	-1,83	0	0	0
20	00:00:00:19	0.317	2,12	-2,12	0	0	0
21	00:00:00:20	0.333	2,12	-2,12	0	0	0
22	00:00:00:21	0.350	2,14	-2,14	0	0	0
23	00:00:00:22	0.367	2,16	-2,16	0	0	0
24	00:00:00:23	0.383	2,16	-2,16	0	-0,01	0
25	00:00:00:24	0.400	2,19	-2,19	0	0	0
26	00:00:00:25	0.417	2,22	-2,22	0	0	0
27	00:00:00:26	0.433	2,24	-2,24	0	0	0
28	00:00:00:27	0.450	2,29	-2,29	0	0	0
29	00:00:00:28	0.467	2,16	-2,16	0	0	0
30	00:00:00:29	0.483	2,34	-2,34	0	-0,01	0
31	00:00:00:30	0.500	2,46	-2,46	0	0	0
32	00:00:00:31	0.517	3,53	-3,53	0	-0,01	0
33	00:00:00:32	0.533	5,15	-5,15	0	0	-0,07
34	00:00:00:33	0.550	6,74	-6,74	0	0	-0,18
35	00:00:00:34	0.567	8,51	-8,51	0	0	-0,29
36	00:00:00:35	0.583	10,09	-10,09	0	0	-0,39
37	00:00:00:36	0.600	10,34	-10,34	0	0	-0,42
38	00:00:00:37	0.617	10,56	-10,56	-0,01	0	-0,44
39	00:00:00:38	0.633	10,8	-10,8	-0,01	0	-0,45
40	00:00:00:39	0.650	11,09	-11,09	-0,02	0	-0,46
41	00:00:00:40	0.667	11,4	-11,4	-0,03	0	-0,48
42	00:00:00:41	0.683	11,67	-11,67	-0,04	0	-0,49



43	00:00:00:42	0.700	11,94	-11,94	-0,04	0	-0,51
44	00:00:00:43	0.717	12,09	-12,09	-0,05	-0,01	-0,53
45	00:00:00:44	0.733	12,3	-12,3	-0,06	0	-0,54
46	00:00:00:45	0.750	12,45	-12,45	-0,07	0	-0,55
47	00:00:00:46	0.767	12,65	-12,65	-0,07	0	-0,56
48	00:00:00:47	0.783	12,82	-12,82	-0,08	0	-0,57
49	00:00:00:48	0.800	12,99	-12,99	-0,08	0	-0,58
50	00:00:00:49	0.817	13,16	-13,16	-0,09	0	-0,58

Como se puede ver en la tabla 30, los datos entregados por el equipo de lecturas son muchos; este ejemplo que corresponde al muro 1 entregó un total de 5688 lecturas, donde cada lectura corresponde a un conjunto de fuerza y tres deformaciones correspondientes a los LVDT's colocados según lo explicado anteriormente, donde la columna número 1 (instrumento 1) corresponde a la fuerza en kN, la columna 3 (instrumento 3) representa las deformaciones en la mitad del muro, la columna 5 (instrumento 5) es de las deformaciones en la cimentación y la columna 27 (instrumento 27) corresponde a las deformaciones en el eje de aplicación de las cargas, todas estas en mm.

Una vez identificados los valores, fueron procesados de tal manera que se pueda reconocer los picos de todos los ciclos practicados en la ejecución del ensayo, con lo cual se crearon dos tablas por cada muro: una para las fuerzas en kN y otra para las deformaciones en mm. Las tablas poseen una configuración en base al número de ciclos establecidos por el protocolo de ensayo para el método "C", logrando los siguientes resultados:

**Tabla 31**

MURO 1: Fuerzas pico de cada ciclo de ensayo

FUERZAS PICO DE CADA CICLO (kN)						
F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)
F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)
-51,00	-51,56	-53,07	-52,87	-54,42	-52,68	
49,30	51,40	49,45	49,66	50,66	49,83	
-69,72	-55,09	-55,03	-56,50	-58,47	-55,71	-56,53
69,95	50,52	51,34	49,62	49,45	48,33	49,54
-84,83	-69,46	-67,99	-69,29	-66,66	-67,19	-66,88
81,93	64,50	64,08	66,74	61,86	61,38	59,97
-106,45	-90,85	-89,10	-85,94			
105,52	81,01	81,43	80,64			
-111,53	-85,60	-82,20	-80,28			
109,02	73,71	74,53	69,68			
-99,54	-73,81	-67,42				
104,68	57,05	52,64				
-56,44	-39,62	-39,47				
59,01	38,48	37,09				
-51,60						
48,03						

**Tabla 32**

MURO 1: Deformaciones pico de cada ciclo de ensayo

DEFORMACIONES PICO DE CADA CICLO (mm)						
$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$
$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$
-2,99	-2,95	-3,03	-3,02	-3,12	-3,03	
2,97	3,11	3,00	3,02	3,06	3,02	
-4,56	-3,32	-3,33	-3,41	-3,55	-3,39	-3,43
4,49	3,30	3,34	3,24	3,23	3,16	3,25
-5,99	-4,59	-4,51	-4,62	-4,41	-4,47	-4,52
5,96	4,68	4,63	4,81	4,48	4,44	4,34
-12,00	-9,17	-9,21	-8,96			
12,04	9,05	9,05	8,99			
-18,10	-13,23	-13,04	-13,11			
17,13	12,73	12,78	12,23			
-23,99	-17,45	-18,01				
28,01	18,19	17,34				
-41,24	-31,19	-33,76				
41,36	30,13	29,83				
-59,67						
55,36						

**Tabla 33**

MURO 2: Fuerza pico de cada ciclo de ensayo

FUERZAS PICO DE CADA CICLO (kN)						
F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)
F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)
-55,91	-57,37	-58,27	-57,25	-56,56	-56,91	
59,31	60,55	61,33	58,16	58,63	59,52	
-73,25	-59,00	-57,69	-56,25	-59,41	-56,47	-59,70
77,18	62,04	63,10	64,91	63,57	63,21	62,40
-83,51	-71,50	-70,97	-70,38	-69,45	-72,64	-73,66
91,36	70,65	69,85	72,16	72,19	73,99	72,07
-98,25	-83,95	-81,08	-74,56			
105,90	77,97	77,69	77,69			
-87,43	-52,84	-48,10	-43,72			
77,26	54,83	50,47	46,20			
-51,61	-37,81	-37,28				
56,95	42,14	39,19				
-52,04	-35,63	-34,43				
53,00	32,86	32,44				
-45,23						
34,70						

**Tabla 34**

MURO 2: Deformaciones pico de cada ciclo de ensayo

DEFORMACIONES PICO DE CADA CICLO (mm)						
$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$
$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$
-3,13	-3,11	-3,13	-3,06	-3,06	-3,09	
3,03	3,09	3,16	2,99	2,97	3,03	
-4,48	-3,34	-3,37	-3,35	-3,50	-3,30	-3,53
4,49	3,26	3,21	3,34	3,23	3,18	3,12
-6,04	-4,49	-4,55	-4,48	-4,43	-4,70	-4,85
6,00	4,38	4,32	4,31	4,31	4,37	4,33
-11,45	-9,30	-9,55	-9,05			
10,73	8,65	8,83	9,08			
-14,76	-13,16	-13,27	-13,41			
17,93	13,67	13,27	13,06			
-24,13	-18,89	-19,14				
24,59	19,30	18,19				
-31,75	-31,73	-31,49				
28,06	31,10	31,08				
-51,09						
38,32						

**Tabla 35**

MURO 3: Fuerzas pico de cada ciclo de ensayo

FUERZAS PICO DE CADA CICLO (kN)						
F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)
F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)
-43,21	-46,14	-44,72	-44,23	-44,14	-43,05	
45,64	46,15	46,93	44,08	44,50	44,45	
-50,17	-41,88	-41,22	-39,42	-39,81	-37,91	-36,14
51,83	40,34	40,48	38,33	37,77	37,32	37,58
-47,78	-38,21	-35,51	-36,75	-33,37	-34,80	-33,10
49,23	35,97	35,36	34,51	35,90	34,36	35,19
-44,70	-30,69	-28,36	-26,83			
41,70	28,21	27,94	26,77			
-34,94	-23,35	-23,76	-22,71			
35,88	21,31	20,89	22,45			
-33,66	-25,95	-24,80				
40,70	26,67	25,13				
-40,66	-30,94	-30,33				
42,67	27,30	29,44				
-42,76						
37,58						

**Tabla 36**

MURO 3: Deformaciones pico de cada ciclo de ensayo

DEFORMACIONES PICO DE CADA CICLO (mm)						
$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$
$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$
-3,00	-3,05	-3,03	-2,99	-3,01	-2,98	
3,01	2,98	3,11	2,95	2,96	2,98	
-4,03	-3,27	-3,32	-3,25	-3,31	-3,25	-3,17
4,37	3,27	3,30	3,20	3,16	3,14	3,23
-6,00	-4,76	-4,53	-4,77	-4,46	-4,67	-4,57
5,80	4,36	4,35	4,27	4,50	4,40	4,65
-10,98	-9,40	-9,14	-8,91			
11,96	8,92	8,94	8,97			
-18,21	-12,73	-13,13	-12,77			
17,85	12,51	12,39	12,98			
-22,52	-18,46	-17,98				
24,28	18,09	18,38				
-40,21	-31,09	-31,16				
33,26	29,79	33,09				
-60,31						
59,66						

**Tabla 37**

MURO 4: Fuerzas pico de cada ciclo de ensayo

FUERZAS PICO DE CADA CICLO (kN)						
F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)
F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)
-71,43	-67,43	-68,94	-65,15	-68,92	-63,49	
59,28	59,11	59,12	58,43	58,72	59,02	
-78,89	-67,80	-64,69	-61,99	-62,77	-60,55	-61,55
76,31	58,62	58,62	59,55	59,31	58,21	60,74
-83,75	-69,40	-66,51	-68,92	-65,68	-70,84	-66,36
86,24	69,66	68,22	70,10	69,63	71,95	70,59
-87,09	-66,68	-62,99	-59,27			
96,08	67,34	64,20	62,45			
-63,25	-48,73	-44,68	-44,02			
82,71	48,93	45,87	47,08			
-56,59	-41,51	-41,05				
71,22	41,18	42,06				
-51,83	-39,27	-38,25				
59,63	37,43	38,90				
-45,62						
44,99						

**Tabla 38**

MURO 4: Deformaciones pico de cada ciclo de ensayo

DEFORMACIONES PICO DE CADA CICLO (mm)						
$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$
$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$
-3,07	-3,03	-3,13	-2,95	-3,15	-2,98	
2,99	2,97	2,98	2,96	2,96	2,97	
-4,48	-3,38	-3,27	-3,25	-3,32	-3,22	-3,22
4,48	3,14	3,12	3,17	3,12	3,07	3,13
-6,01	-4,41	-4,20	-4,48	-4,45	-4,63	-4,46
5,87	4,38	4,26	4,35	4,31	4,44	4,34
-11,98	-8,96	-8,87	-9,12			
9,84	8,69	8,54	8,59			
-17,95	-13,41	-12,88	-13,02			
17,90	12,78	12,29	12,62			
-24,35	-17,54	-17,75				
21,56	17,18	17,48				
-26,16	-31,36	-31,28				
31,66	29,66	30,91				
-50,43						
47,83						

**Tabla 39**

MURO 6: Fuerzas pico de cada ciclo de ensayo

FUERZAS PICO DE CADA CICLO (kN)						
F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)	F(-)
F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)	F(+)
-47,25	-51,00	-46,55	-48,05	-47,49	-46,08	
38,92	38,56	38,75	38,89	39,72	39,06	
-58,51	-42,41	-44,55	-44,48	-45,38	-42,54	-43,85
53,29	40,58	38,97	37,14	39,95	38,31	39,11
-66,93	-53,89	-53,63	-51,55	-54,99	-46,99	-46,57
62,21	48,15	47,47	52,68	53,61	46,91	47,50
-67,75	-46,08	-41,81	-39,42			
74,14	47,30	51,10	47,57			
-53,16	-40,39	-39,89	-39,10			
68,20	44,20	44,62	43,86			
-50,73	-38,82	-36,85				
58,89	45,71	47,08				
-47,30	-36,19	-32,01				
51,30	38,11	32,22				
-33,20						
32,34						

**Tabla 40**

MURO 6: Deformaciones pico de cada ciclo de ensayo

DEFORMACIONES PICO DE CADA CICLO (mm)						
$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$	$\Delta r(-)$
$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$	$\Delta r(+)$
-3,02	-3,23	-3,07	-3,05	-3,08	-2,98	
2,98	2,97	2,97	2,98	3,02	2,99	
-4,51	-3,10	-3,17	-3,18	-3,18	-3,14	-3,01
4,50	3,13	3,11	3,16	3,14	3,18	3,27
-6,01	-4,67	-4,66	-4,44	-4,76	-4,44	-4,30
5,90	4,46	4,40	4,85	4,93	4,38	4,38
-9,12	-9,75	-8,75	-8,79			
9,11	8,91	9,42	8,85			
-14,11	-13,20	-13,02	-12,98			
14,51	13,24	13,34	12,62			
-23,82	-17,84	-17,59				
21,12	17,24	17,83				
-27,00	-31,10	-30,74				
35,94	30,45	28,76				
-59,28						
52,13						

Según lo observado en las tablas de la 31 a la 40, la configuración presentada responde al número de ciclos ejecutados en cada paso del ensayo total, donde cada par de filas tomadas desde arriba hacia abajo corresponde a un paso, consiguiendo un total de 8; los pasos más visibles de estas tablas son el primero y el último, donde el primero está conformado de 6 ciclos de ensayo y el último consta de un solo ciclo. Siguiendo la secuencia, se puede percibir que los pasos 2 y 3 están conformados de 7 ciclos cada uno, luego se tiene los pasos 4 y 5 constituidos cada uno de 4 ciclos y, por último, se tiene los pasos 6 y 7 compuestos de 3 ciclos, con lo cual se puede ver que para el ensayo de cada uno de los muros se han ejecutado un total de 35 ciclos.

Además, cada par de tablas que representan los resultados de un muro, por un lado detallan las fuerzas aplicadas y, por el otro, las deformaciones correspondientes a dichas fuerzas, donde la correspondencia de las deformaciones con las fuerzas aplicadas están dadas por la posición de valor en cada celda específica; también, en estas tablas existen valores marcados en amarillo que representan los máximos (en valor absoluto) de los pares fuerza-deformación de los ciclos de ensayo relevantes para el trazo de la curva envolvente, con los cuales es posible promediar aquellos resultados que corresponden a un mismo modelo de muro. Estos valores luego son extraídos y ordenados pasando desde las deformaciones negativas hasta las positivas en una tabla que permite trazar la curva que, como su nombre lo indica, envuelve la curva de histéresis obtenida directamente de los datos recogidos en el ensayo. Estas tablas de envolventes son las siguientes:



**Tabla 41**

Envolventes representativas de los muros SPSW.

ENVOLVENTES																			
MURO 1				MURO 2				MURO 3				MURO 4				MURO 6			
F	Δ	F	Δ	F	Δ	F	Δ	F	Δ	F	Δ	F	Δ	F	Δ	F	Δ	F	Δ
kN	mm	Ton	cm	kN	mm	Ton	cm	kN	mm	Ton	cm	kN	mm	Ton	cm	kN	mm	Ton	cm
-51,60	-59,67	-5,26	-5,97	-45,23	-51,09	-4,61	-5,11	-42,76	-60,31	-4,36	-6,03	-45,62	-50,43	-4,65	-5,04	-33,20	-59,28	-3,38	-5,93
-56,44	-41,24	-5,75	-4,12	-52,04	-31,75	-5,30	-3,18	-40,66	-40,21	-4,14	-4,02	-51,83	-26,16	-5,28	-2,62	-47,30	-27,00	-4,82	-2,70
-99,54	-23,99	-10,15	-2,40	-51,61	-24,13	-5,26	-2,41	-33,66	-22,52	-3,43	-2,25	-56,59	-24,35	-5,77	-2,44	-50,73	-23,82	-5,17	-2,38
-111,53	-18,10	-11,37	-1,81	-87,43	-14,76	-8,91	-1,48	-34,94	-18,21	-3,56	-1,82	-63,25	-17,95	-6,45	-1,80	-53,16	-14,11	-5,42	-1,41
-106,45	-12,00	-10,85	-1,20	-98,25	-11,45	-10,02	-1,15	-44,70	-10,98	-4,56	-1,10	-87,09	-11,98	-8,88	-1,20	-67,75	-9,12	-6,91	-0,91
-84,83	-5,59	-8,65	-0,56	-83,51	-6,04	-8,51	-0,60	-47,78	-6,00	-4,87	-0,60	-83,75	-6,01	-8,54	-0,60	-66,93	-6,01	-6,82	-0,60
-69,72	-4,56	-7,11	-0,46	-73,25	-4,48	-7,47	-0,45	-50,17	-4,03	-5,11	-0,40	-78,89	-4,48	-8,04	-0,45	-58,51	-4,51	-5,96	-0,45
-54,42	-3,12	-5,55	-0,31	-58,27	-3,13	-5,94	-0,31	-46,14	-3,05	-4,70	-0,31	-71,43	-3,07	-7,28	-0,31	-51,00	-3,23	-5,20	-0,32
51,40	3,11	5,24	0,31	61,33	3,16	6,25	0,32	46,93	3,11	4,78	0,31	59,28	2,99	6,04	0,30	39,72	3,02	4,05	0,30
69,95	4,49	7,13	0,45	77,18	4,49	7,87	0,45	51,83	4,37	5,28	0,44	76,31	4,48	7,78	0,45	53,29	4,50	5,43	0,45
81,93	5,96	8,35	0,60	91,36	6,00	9,31	0,60	49,23	5,80	5,02	0,58	86,24	5,87	8,79	0,59	62,21	5,90	6,34	0,59
105,52	12,04	10,76	1,20	105,90	10,73	10,80	1,07	41,70	11,96	4,25	1,20	96,08	9,84	9,79	0,98	74,14	9,11	7,56	0,91
109,02	17,13	11,11	1,71	77,26	17,93	7,88	1,79	35,88	17,85	3,66	1,79	82,71	17,90	8,43	1,79	68,20	14,51	6,95	1,45
104,68	28,01	10,67	2,80	56,95	24,59	5,81	2,46	40,70	24,28	4,15	2,43	71,22	21,56	7,26	2,16	58,89	21,12	6,00	2,11
59,01	41,36	6,02	4,14	53,00	28,06	5,40	2,81	42,67	33,26	4,35	3,33	59,63	31,66	6,08	3,17	51,30	35,94	5,23	3,59
48,03	55,36	4,90	5,54	34,70	38,32	3,54	3,83	37,58	59,66	3,83	5,97	44,99	47,83	4,59	4,78	32,34	52,13	3,30	5,21

Con estos valores ordenados, fue posible calcular la energía absorbida por cada uno de los muros ensayados, a través del cálculo del área bajo la curva envolvente; claro está que, debido a que la curva recoge únicamente los picos de los ciclos máximos, se pierde la información de las zonas de inflexión que pueden ser observadas en las curvas de histéresis, pero se obtiene una buena referencia de la “tenacidad” de los muros cuando son sometidos a este tipo de fuerzas. Las tablas de cálculo de la energía absorbida por cada muro son las siguientes:

**Tabla 42**

Capacidad de energía de los muros SPSW.

CAPACIDAD DE ENERGÍA										
VALOR	MURO 1		MURO 2		MURO 3		MURO 4		MURO 6	
	kN-m	Ton-cm	kN-m	Ton-cm	kN-m	Ton-cm	kN-m	Ton-cm	kN-m	Ton-cm
1	0,9955886	10,1487115	0,9406009	9,58818451	0,838371	8,54608563	1,18255575	12,0545948	1,29927	13,2443425
2	1,3453275	13,7138379	0,3949065	4,02555046	0,6573604	6,70092151	0,0981201	1,00020489	0,1558677	1,58886544
3	0,62160115	6,33640316	0,6514024	6,64018756	0,147833	1,50696228	0,383488	3,90915392	0,50438595	5,14154893
4	0,664839	6,77715596	0,3073004	3,13252192	0,2878986	2,93474618	0,4487649	4,57456575	0,30167045	3,07513201
5	0,6130524	6,24925994	0,4916608	5,01183282	0,2302752	2,34735168	0,5099574	5,19834251	0,2094274	2,13483588
6	0,07959325	0,81134811	0,1222728	1,24640979	0,09648075	0,98349388	0,1244196	1,26829358	0,09408	0,95902141
7	0,0893808	0,91111927	0,088776	0,90495413	0,0471919	0,48105912	0,1059756	1,08028135	0,0700864	0,71443833
8	0,1648222	1,68014475	0,18809395	1,91736952	0,14333965	1,46115851	0,19826865	2,02108716	0,1423422	1,45099083
9	0,0837315	0,85353211	0,09210915	0,93893119	0,0622188	0,63423853	0,10101455	1,02970999	0,0688274	0,70160449
10	0,1116318	1,13793884	0,1272477	1,29712232	0,0722579	0,7365739	0,11297225	1,15160296	0,08085	0,82415902
11	0,569848	5,80884811	0,4665199	4,75555454	0,2800644	2,85488685	0,3619052	3,68914577	0,21884175	2,23080275
12	0,5460043	5,56579307	0,659376	6,72146789	0,2284731	2,32898165	0,7205237	7,34478797	0,384318	3,91761468
13	1,162528	11,8504383	0,4469193	4,55575229	0,2462047	2,50973191	0,2816919	2,87147706	0,42003245	4,28167635
14	1,09263075	11,1379281	0,19076325	1,94457951	0,3743313	3,81581346	0,6607925	6,73590724	0,8165079	8,32322018
15	0,74928	7,63792049	0,449901	4,58614679	1,0593	10,7981651	0,8458527	8,62235168	0,6770658	6,90179205
Total	8,88985925	90,6203797	5,61785005	57,2665652	4,7716007	48,6401702	6,1363028	62,5515066	5,4435734	55,4900449

Una vez desarrolladas las tablas de cada muestra, se promediaron los valores para obtener una curva envolvente representativa del modelo del muro SPSW rigidizado, donde se procesaron las envolventes de los muros 1, 2 y 4 debido a que el muro 3 se convirtió en un caso atípico por el comportamiento que entregó durante el ensayo, el cual se puede observar en las tablas de este módulo. Este promedio es el siguiente:

**Tabla 43**

Envolvente promedio del muro SPSW rigidizado

ENVOLVENTE PROMEDIO			
F	$\Delta$	F	$\Delta$
kN	mm	Ton	cm
-47,48	-53,73	-4,84	-5,37
-53,44	-33,05	-5,45	-3,31
-69,25	-24,16	-7,06	-2,42
-87,40	-16,94	-8,91	-1,69
-97,26	-11,81	-9,91	-1,18
-84,03	-5,88	-8,57	-0,59
-73,95	-4,51	-7,54	-0,45
-61,37	-3,11	-6,26	-0,31
57,34	3,09	5,84	0,31
74,48	4,49	7,59	0,45
86,51	5,94	8,82	0,59
102,50	10,87	10,45	1,09
89,66	17,65	9,14	1,77
77,62	24,72	7,91	2,47
57,21	33,69	5,83	3,37
42,57	47,17	4,34	4,72

**Tabla 44**

Capacidad de energía promedio del muro SPSW rigidizado

CAPACIDAD DE ENERGÍA		
Valor	kN-m	Ton-cm
1	1,0435	10,6372
2	0,5455	5,5610
3	0,5655	5,7646
4	0,4734	4,8253
5	0,5375	5,4795
6	0,1085	1,1058
7	0,0947	0,9656
8	0,1838	1,8738
9	0,0923	0,9406
10	0,1173	1,1953
11	0,4656	4,7461
12	0,6518	6,6438
13	0,5911	6,0250
14	0,6049	6,1665
15	0,6724	6,8542
Total	6,7477	68,7844

Debido a que la muestra numero 5 representa el pórtico de los muros SPSW, en esta muestra se ha practicado un ensayo monotónico donde el procesamiento de los datos recogidos es menor, siendo solamente necesario la obtención de la curva carga-deformación donde se muestra el rango lineal, no lineal y plástico del pórtico, además de su resistencia y deformación máximas. La tabla de lecturas recogidas de esta muestra es la siguiente:

**Tabla 45**

Ejemplo de lecturas recogidas de la muestra número 5: PÓRTICO (3/5/2022 15:07 - DATASOIL - CH1: 2019AFB006 CH2: LTD 500mm CH3: LTD 500mm CH4: LTD 500mm)

Nr.	Time	Time	1 (CH1)	3 (CH2)	5 (CH3)	27 (CH4)
	mins	mins	kN	mm	mm	mm
1	00:00:00:00	0.000	0,05	0	-0,02	-0,03
2	00:00:00:01	0.017	0,05	0	-0,02	-0,03
3	00:00:00:02	0.033	0,07	0	-0,01	-0,04
4	00:00:00:03	0.050	0,03	0	-0,02	-0,03
5	00:00:00:04	0.067	0,03	0	-0,01	-0,04
6	00:00:00:05	0.083	0,03	0	-0,02	-0,04
7	00:00:00:06	0.100	0,07	0	-0,02	-0,04
8	00:00:00:07	0.117	0,07	0	-0,02	-0,04
9	00:00:00:08	0.133	0,05	0	-0,01	-0,04
10	00:00:00:09	0.150	0,03	0	-0,01	-0,04
11	00:00:00:10	0.167	0,05	0	-0,01	-0,04
12	00:00:00:11	0.183	0,07	0	-0,01	-0,04
13	00:00:00:12	0.200	0,07	0	-0,02	-0,04
14	00:00:00:13	0.217	0,05	0	-0,02	-0,04
15	00:00:00:14	0.233	0,05	0	-0,01	-0,04
16	00:00:00:15	0.250	0,03	0	-0,01	-0,04
17	00:00:00:16	0.267	0,05	0	-0,01	-0,04
18	00:00:00:17	0.283	0,05	0	-0,01	-0,04
19	00:00:00:18	0.300	0,07	0	-0,02	-0,04
20	00:00:00:19	0.317	0,07	0	-0,01	-0,04
21	00:00:00:20	0.333	0,05	0	-0,01	-0,04
22	00:00:00:21	0.350	0,05	0	-0,01	-0,03
23	00:00:00:22	0.367	0,05	0	-0,02	-0,04
24	00:00:00:23	0.383	0,05	0	-0,01	-0,04
25	00:00:00:24	0.400	0,07	0	-0,02	-0,04
26	00:00:00:25	0.417	0,07	0	-0,02	-0,04
27	00:00:00:26	0.433	0,05	0	-0,01	-0,04
28	00:00:00:27	0.450	0,05	0	-0,01	-0,04
29	00:00:00:28	0.467	0,05	0	-0,02	-0,04
30	00:00:00:29	0.483	0,07	0	-0,01	-0,04
31	00:00:00:30	0.500	0,07	0	-0,01	-0,03
32	00:00:00:31	0.517	0,07	0	-0,02	-0,04
33	00:00:00:32	0.533	0,07	0	-0,01	-0,04

34	00:00:00:33	0.550	0,07	0	-0,01	-0,04
35	00:00:00:34	0.567	0,05	0	-0,01	-0,04
36	00:00:00:35	0.583	0,05	0	-0,01	-0,04
37	00:00:00:36	0.600	0,07	0	-0,01	-0,04
38	00:00:00:37	0.617	0,07	0	-0,01	-0,04
39	00:00:00:38	0.633	0,08	0	-0,01	-0,03
40	00:00:00:39	0.650	0,1	0	-0,02	-0,04
41	00:00:00:40	0.667	0,1	0	-0,01	-0,04
42	00:00:00:41	0.683	0,12	0	-0,01	-0,04
43	00:00:00:42	0.700	0,12	0	-0,02	-0,04

En este ensayo se recogieron un total de 1576 lecturas, las cuales fueron utilizadas para el trazo de la curva carga-desplazamiento del pórtico, de donde se determinó que la carga máxima alcanzada fue de 24,76kN o 2,52Ton, y la deformación máxima en el rango plástico fue de 23cm, además de tener una capacidad de absorción de energía muy grande debido a la facilidad que tiene esta estructura de desarrollar deformaciones; la energía calculada de este sistema fue de 4,8kNm o 48,95Ton-cm

Con estas tablas procesadas, fue posible el desarrollo de las curvas correspondientes a cada ensayo, donde se utilizaron las lecturas obtenidas de los equipos de registro para conseguir a detalle las curvas de histéresis en los ensayos de carga cíclica y la curva carga-desplazamiento del ensayo monotónico correspondiente a la muestra 5, además de trazar las curvas envolventes una vez identificados los picos máximos de cada ciclo representativo.

#### 5.2.1.2. Ensayo de probetas de acero

Al tratarse de ensayos unidireccionales donde se aplica una carga de tracción en el material probado, el tratamiento de los resultados es muy similar al ensayo monotónico de estructuras, donde la curva que se desea obtener es la de esfuerzo-deformación unitaria que permita describir las propiedades del material, con la diferencia de que a través de los datos recolectados se puede calcular el Módulo de Young.

Para este tipo de ensayo, los resultados relevantes son: el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo o resistencia última y el módulo de Young o módulo de elasticidad; pues una vez conseguido estos valores, se puede corregir cualquier asunción realizada en los cálculos preliminares para la obtención del modelo estructural, donde se puede tener más correspondencia entre los ensayos realizados vs los cálculos del modelo matemático.

La cantidad de lecturas obtenidas para este tipo de ensayos es menor, pero también se logra obtener una curva bastante detallada del comportamiento de los materiales durante el ensayo a tracción, con los cuales se puede apreciar el rango elástico, plástico, elastoplástico y rotura del material una vez superada su capacidad. Un ejemplo de esos resultados es el siguiente:

**Tabla 46**

Ejemplo de valores obtenidos del ensayo a tracción

MUESTRA 1: ÁNGULO L20X2					
$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)	$\epsilon$	$\sigma$ (MPa)	$\delta$ (mm)	$\epsilon$
0	0	0	455,808	4,800	0,09302326
66,288	0,200	0,00387597	459,596	5,000	0,09689922
129,419	0,400	0,00775194	463,384	5,200	0,10077519
229,798	0,600	0,01162791	467,172	5,400	0,10465116
340,909	0,800	0,01550388	470,328	5,600	0,10852713
385,101	0,900	0,01744186	473,485	5,800	0,1124031
386,364	1,000	0,01937984	476,641	6,000	0,11627907
387,626	1,200	0,02325581	479,167	6,200	0,12015504
388,889	1,400	0,02713178	481,061	6,400	0,12403101
390,152	1,600	0,03100775	482,955	6,600	0,12790698
391,414	1,800	0,03488372	484,848	6,800	0,13178295
392,677	2,000	0,03875969	486,111	7,000	0,13565891
393,939	2,200	0,04263566	487,374	7,200	0,13953488
396,465	2,400	0,04651163	488,636	7,400	0,14341085
398,99	2,600	0,0503876	489,899	7,600	0,14728682
404,04	2,800	0,05426357	491,162	7,800	0,15116279
409,091	3,000	0,05813953	491,793	8,000	0,15503876
416,667	3,200	0,0620155	492,424	8,200	0,15891473
424,242	3,400	0,06589147	493,056	8,400	0,1627907
428,03	3,600	0,06976744	493,687	8,600	0,16666667
431,818	3,800	0,07364341	494,318	8,800	0,17054264
435,606	4,000	0,07751938	494,949	9,000	0,1744186
441,919	4,200	0,08139535	495,581	9,200	0,17829457
445,707	4,400	0,08527132	496,212	9,400	0,18217054
449,495	4,600	0,08914729	496,843	9,600	0,18604651

Como se puede ver en la tabla 46 correspondiente al ensayo de la muestra 1, que representa el acero de un ángulo L de lados iguales utilizado como atiesador, se han obtenido un total de 50 lecturas, donde se refleja el esfuerzo de tracción aplicado en el material, la deformación en mm de la probeta y la deformación unitaria correspondientes al esfuerzo generado.

Una vez realizados los cálculos, se ha resumido los resultados de cada una de las probetas donde se presentan los valores relevantes antes mencionados, además de haber calculado el promedio de cada par de probetas moldeadas de los elementos de acero principales, que han sido utilizados en los muros ensayados. Estos valores son los siguientes:



**Tabla 47**

Resumen de características de las muestras de acero ensayadas

RESUMEN					
Elemento	Muestra	L (mm)	Fy (MPa)	Fu (MPa)	E (GPa)
Ángulo L20x2	1	51,60	367,00	497,00	19,526
	2	50,32	394,00	514,00	16,794
	Promedio	50,96	380,50	505,50	18,160
Plancha de acero de 1,4mm	3	49,75	171,00	279,00	10,372
	4	50,05	194,00	300,00	16,393
	Promedio	49,90	182,50	289,50	13,039
Alma de viga IPE140	5	49,78	305,00	472,00	5,507
	6	49,98	335,00	480,00	6,352
	Promedio	49,88	320,00	476,00	5,748

Una vez identificados todos los resultados obtenidos de los ensayos ejecutados, se ha procedido a trazar las curvas características de cada prueba, y además se ha revisado los modelos matemáticos con el fin de ajustar cualquier tipo de inconsistencia presentada entre estos modelos y los desarrollados en la práctica.

### 5.2.2. DESARROLLO DE GRÁFICAS

Con todos los valores organizados, se ha desarrollado las correspondientes curvas dependiendo de los ensayos practicados, que pueden ser en los muros o en las muestras de acero, donde cada una de ellas ayuda a percibir de mejor manera la reacción que presenta los objetos probados frente a las fuerzas aplicadas en estos, pues es claro que en este tema juega un papel muy importante la “resistencia de materiales”

Las gráficas que se muestra a continuación corresponden al arreglo de valores presentados en las tablas anteriores, en los que se expresa claramente el desarrollo de los ensayos practicados en cada una de las distintas muestras en las que se busca que fallen ante una determinada fuerza, la cual puede ser de tipo unidireccional (monotónica) o cíclica donde, a más del esfuerzo que sufre la muestra respondiendo al gato hidráulico, conforme el avance de la carga el material sufre desgaste o fatiga.

La ventaja que tiene el desarrollo de gráficas es que a través de ellas se puede reconocer la capacidad máxima, deformación máxima alcanzada, la energía absorbida, degradación, cambio del estado de equilibrio interno, comportamientos como: el elástico, plástico, elastoplástico, etc. Dependiendo del ensayo ejecutado, la gráfica es capaz de presentar cierta cantidad de información donde la curva también adquiere una forma característica a la aplicación de las cargas.

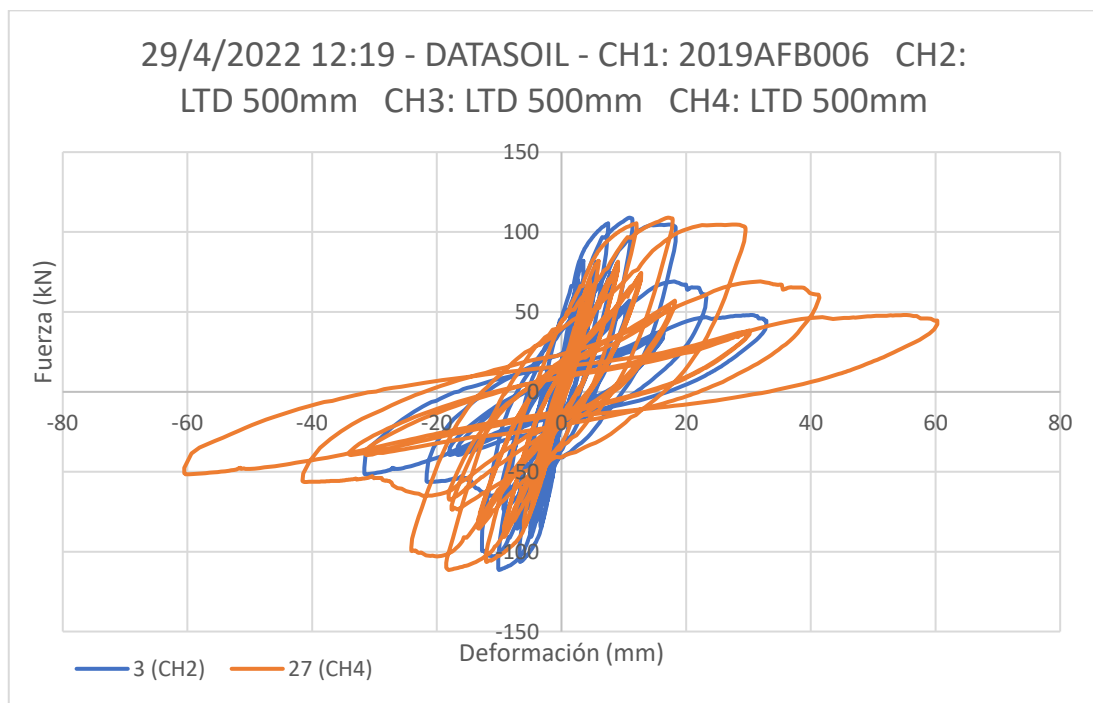
Es importante desarrollar las curvas puesto que de esta manera se procesa en una presentación más resumida toda la información recolectada, pues como ya se ha podido percibir en las tablas, durante el ensayo los equipos de monitoreo

recogen una cantidad muy grande de lecturas, donde cada una de ellas es un conjunto de valores correspondientes entre ellos.

### 5.2.2.1. Ensayo de muros

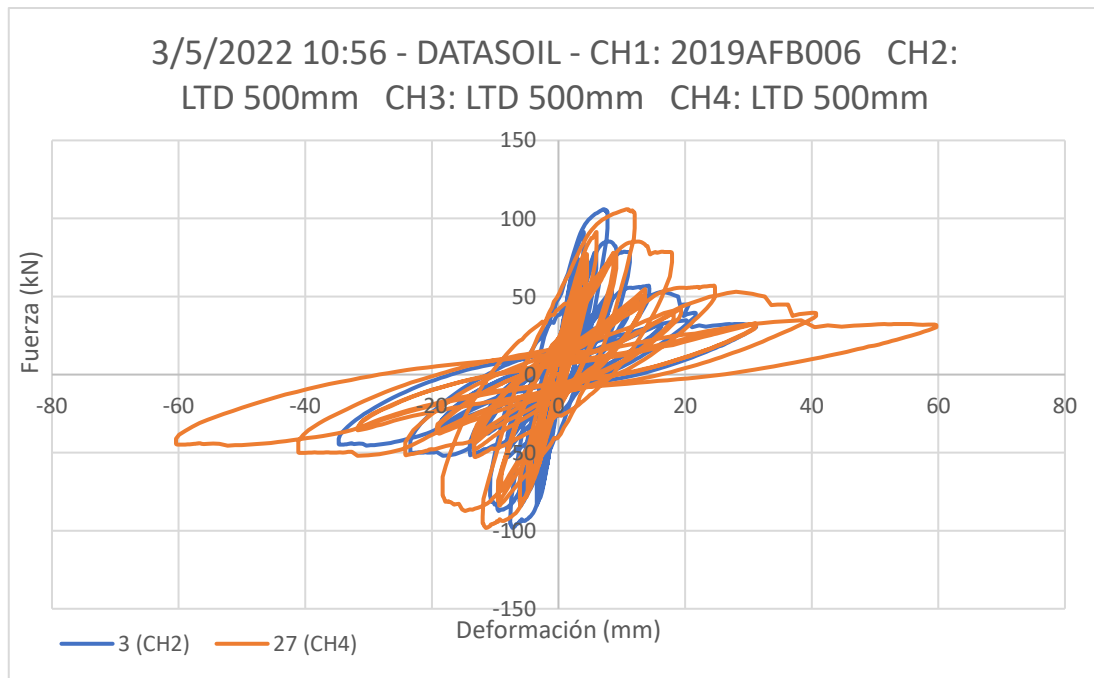
En el ensayo de las muestras que representan a los muros SPSW y al pórtico formado por los elementos de borde, se ha ejecutado dos tipos de ensayo, dependiendo de la información que se extrajo de la muestra sometida a la práctica, pues según la configuración estructural, cada modelo tiene un comportamiento distinto que repercute en el proceso del ensayo.

Comenzando con los ensayos de carga cíclica (muros SPSW base y rigidizado), las gráficas obtenidas corresponden a las curvas de histéresis que representan el estado de carga y descarga que ejerce el equipo de estudio sobre una estructura de prueba, donde cada “órbita” de la curva representa un ciclo, entendiéndose como ciclo al proceso de cargar la estructura con una fuerza que actúa en los dos sentidos de un mismo eje de aplicación, comenzando por uno de los sentidos para luego regresar y cargar a la estructura en el sentido contrario, muy similar al movimiento de un péndulo (American Society for Testing and Materials ASTM, 2019). Para poder trazar cada una de estas curvas, se ha procesado las lecturas en una columna de fuerzas y otra de deformaciones, con lo cual se crea la imagen ingresando las deformaciones en el eje “x” y las fuerzas en el eje “y”, para que el EXCEL represente cada punto (par de fuerza-deformación) conectado con el siguiente a través de una línea continua. El resultado de este proceso son las siguientes gráficas:

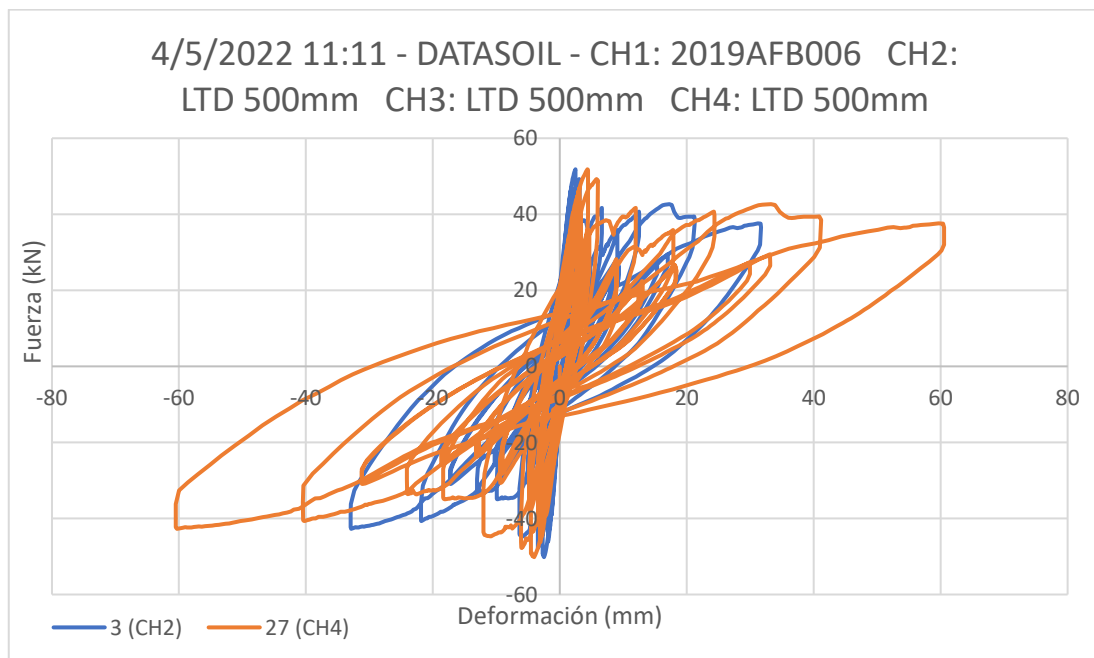


**Figura 105.** MURO 1: curva de histéresis.

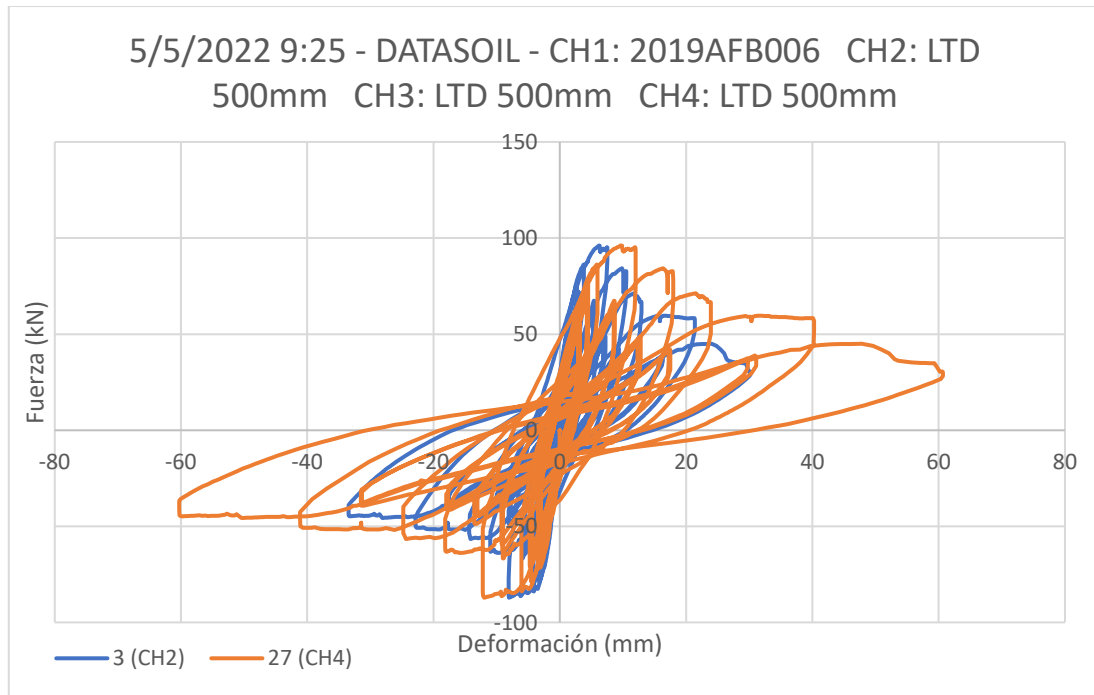
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



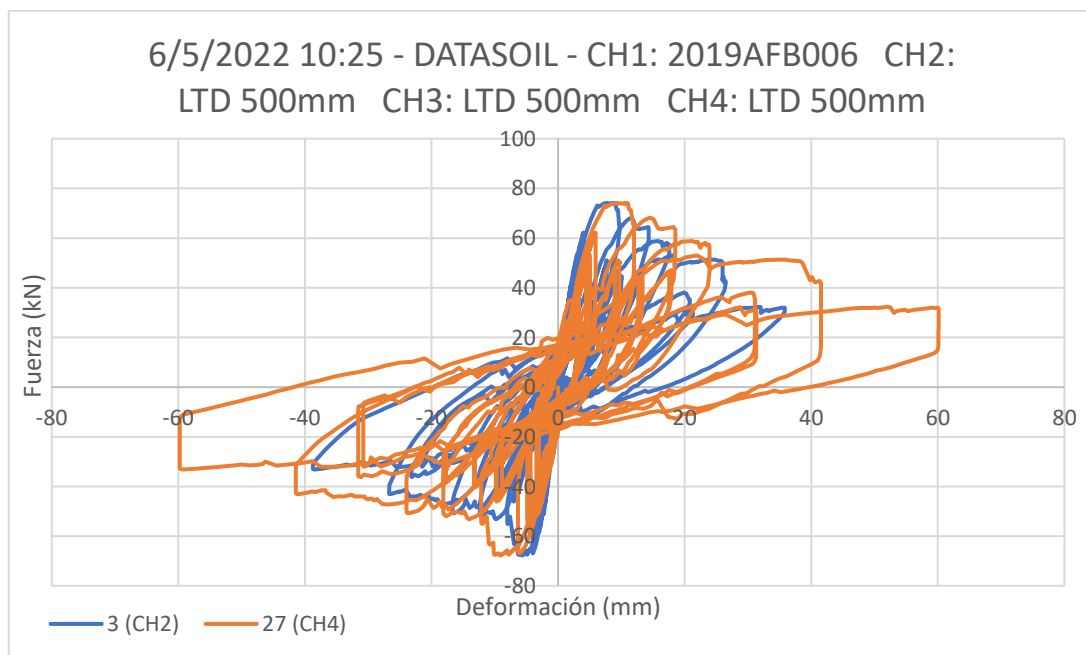
**Figura 106.** MURO 2: curva de histéresis  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 107.** MURO 3: curva de histéresis.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos



**Figura 108.** MURO 4: curva de histéresis.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 109.** MURO 6: curva de histéresis.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

La consecuencia de aplicar una carga cíclica es que somete a la estructura a un trabajo por “fatiga” (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022), donde cada uno de los ciclos siguientes crece en referencia al anterior, hasta llegar a la fuerza de falla representativa de la muestra probada, la cual se puede observar en la órbita cuyos picos supera a cualquiera de las otras; a partir de ésta, las orbitas siguientes desplazan sus picos acercándolos cada vez más hacia el eje de las deformaciones (decrecimiento de la resistencia), y alejándolos del eje que

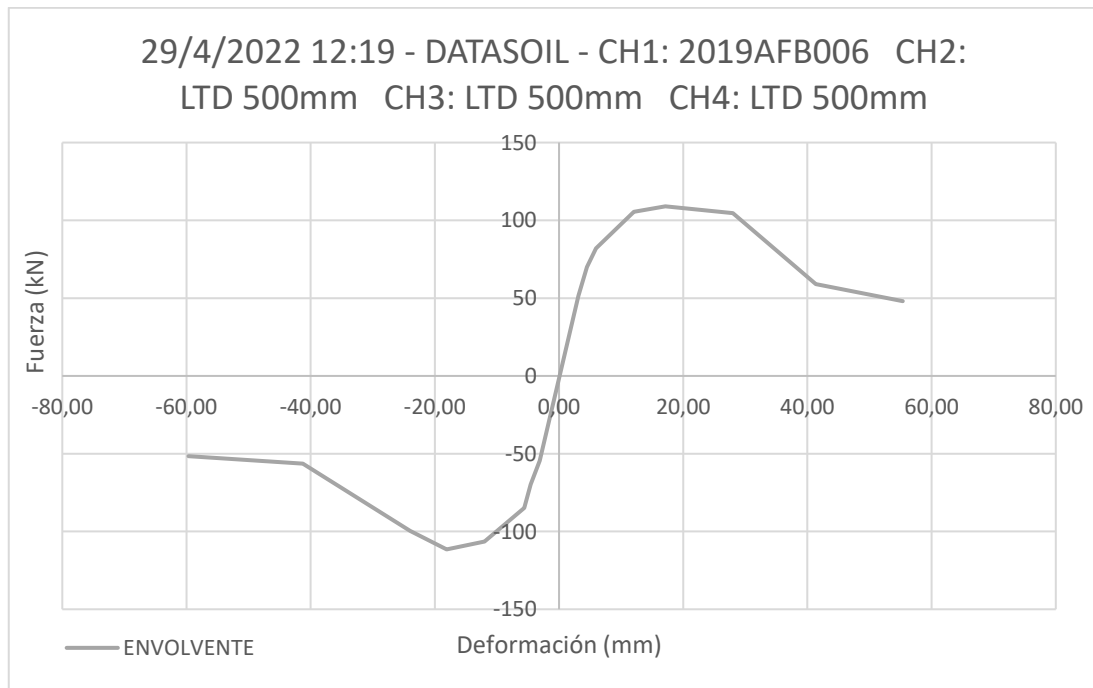
representa la carga aplicada (crecimiento de deformaciones), dando una sensación de que cada ciclo siguiente se empareja cada vez más con el eje horizontal. Este fenómeno representado en las curvas se conoce como “degradación de la resistencia”, puesto que, según la resistencia de materiales, el acero una vez que ha superado su límite de resistencia, entra en un estado plástico, para luego entrar en un estado elastoplástico donde prevalece el desarrollo de deformaciones antes que la entrega de resistencia. En una estructura compuesta por elementos de este material y que ha sido sometida a este tipo de prueba, presenta una caída de su resistencia donde, el momento en que llega a su límite, falla internamente en las partes de mayor exigencia por esfuerzos, trasladándose la distribución de cargas internas en los elementos que todavía se encuentran “en buen estado”, con lo cual es claro que cualquier parte que aportaba a la resistencia del muro, deja de trabajar y la resistencia total de la estructura queda en manos de los elementos restantes; la única respuesta de las partes dañadas es permitir las deformaciones y, al no presentar resistencia, es clara su falla puesto que ya no es capaz de absorber parte de la energía.

En las figuras de la 105 a la 109 se puede observar este comportamiento, donde la energía total absorbida por el sistema se calcula como el área total cubierta por todas las órbitas de la curva de histéresis. Para poder interpretar eso en las figuras mencionadas, primeramente se debe aclarar de que cada gráfica posee un par de curvas: la primera corresponde a la de color naranja la cual relaciona las fuerzas con las deformaciones tomadas en el eje de aplicación de la carga (LVDT número 27), con lo cual se puede entender que esta curva es la que representa el trabajo total ejercido en los muros; mientras que la curva de color azul relaciona las fuerzas aplicadas con las deformaciones tomadas en la mitad de los muros (LVDT número 3), siendo utilizada únicamente como una referencia de las deformaciones desarrolladas en esta sección.

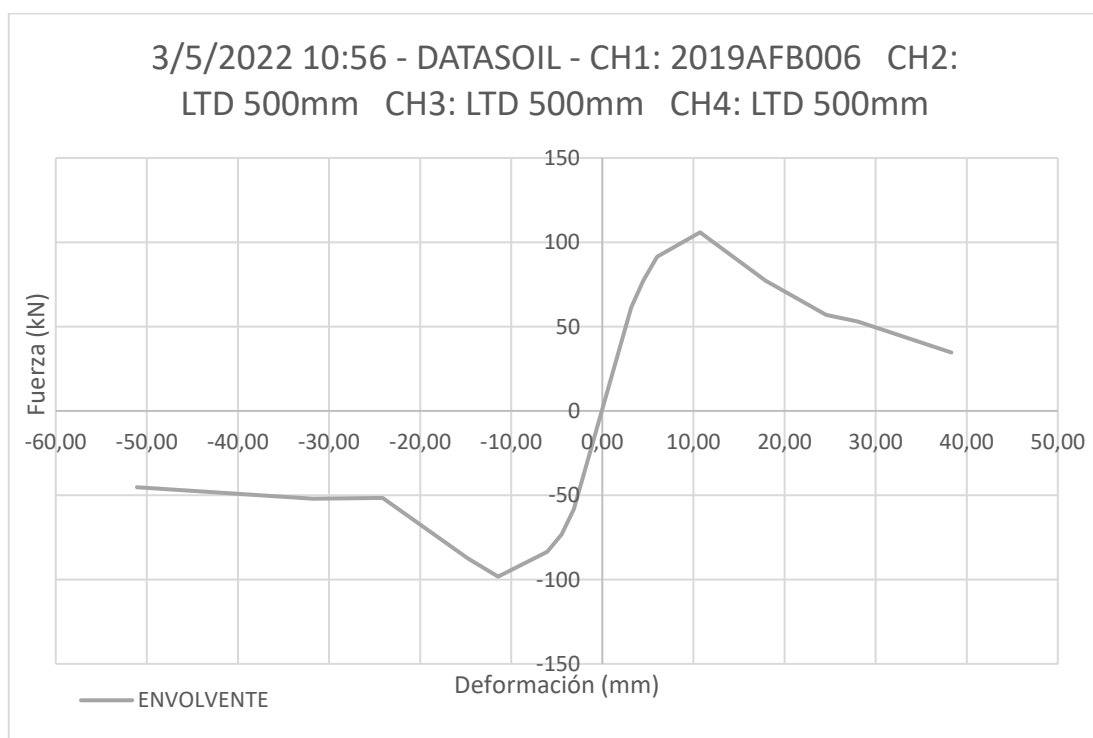
Ahora, el cálculo de la energía absorbida a través de la curva de histéresis es bastante complejo de realizar, por lo que se recurre a otra gráfica que se obtiene a partir de la curva de histéresis, la cual se conoce como “la envolvente”. Para determinar esta curva, se toma los picos de aquellos ciclos que presentan los resultados más altos en fuerza y en desplazamiento, con lo cual se logra envolver la curva de histéresis y se obtiene un método más simplificado de obtener la energía absorbida; el problema con esta aproximación se tiene cuando la energía se calcula con el área cubierta entre la curva y el eje horizontal de las deformaciones, donde se desperdicia las zonas de inflexión de la curva de histéresis real, pero se asume que esta energía desperdiciada es aproximadamente la misma en todas las curvas de comparación y que es mínima, por lo que al utilizar este método, se obtiene una buena referencia de esta cantidad.

Siguiendo este procedimiento, para obtener la curva envolvente a partir de las curvas de histéresis, se recogieron los datos en las tablas 41 y 43, donde así mismo se creó las gráficas en las cuales se ingresó los desplazamientos recogidos en el eje horizontal, y las fuerzas correspondientes en el eje vertical

del sistema coordinado, envolviendo de esta manera a la curva de histéresis principal (LVDT número 27), llegando a las siguientes gráficas:

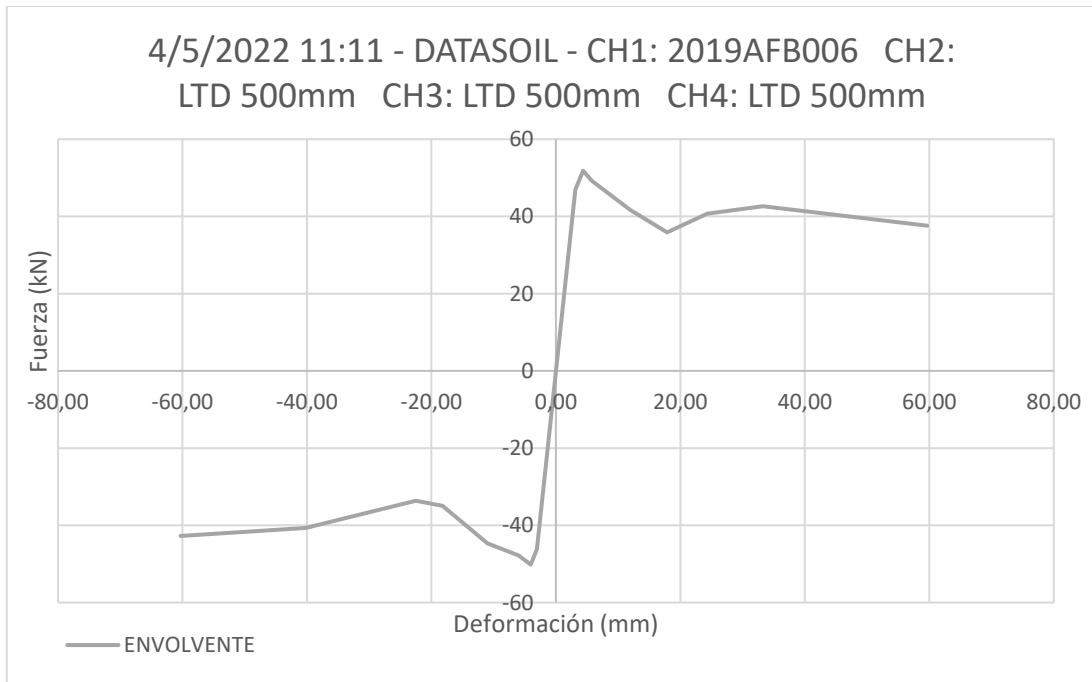


**Figura 110.** MURO 1: curva envolvente.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

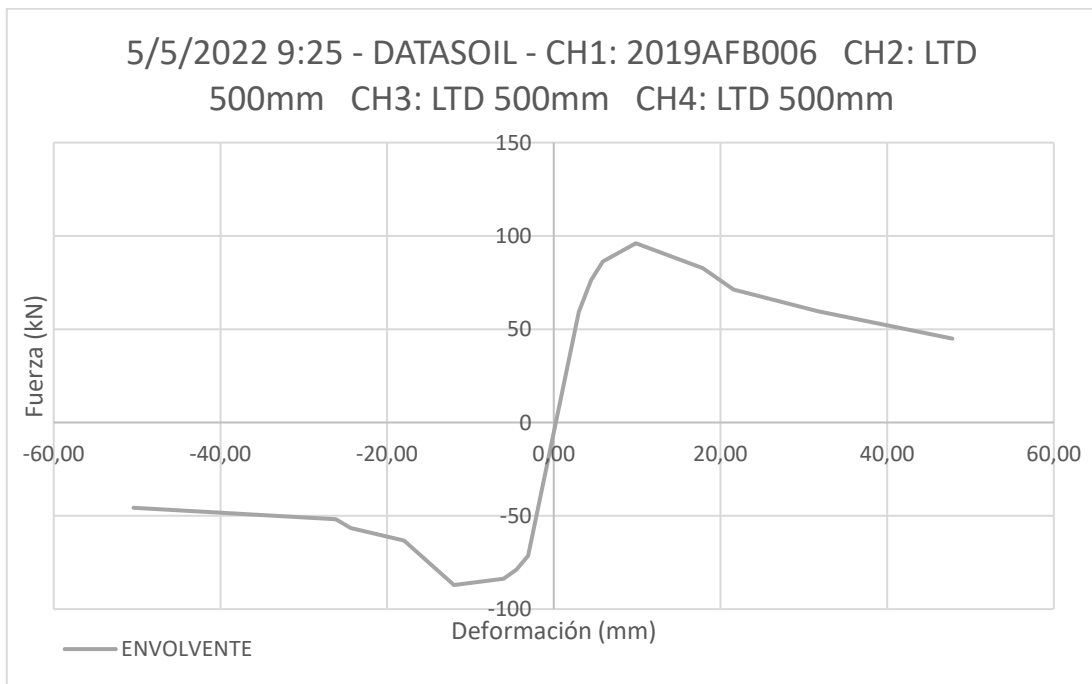


**Figura 111.** MURO 2: curva envolvente.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

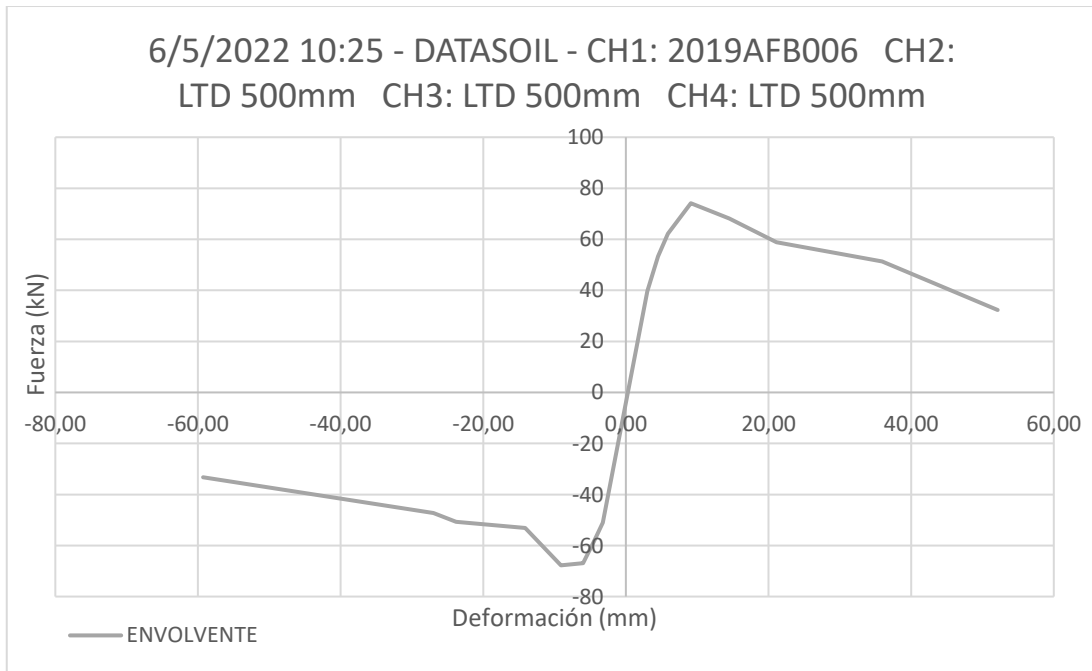




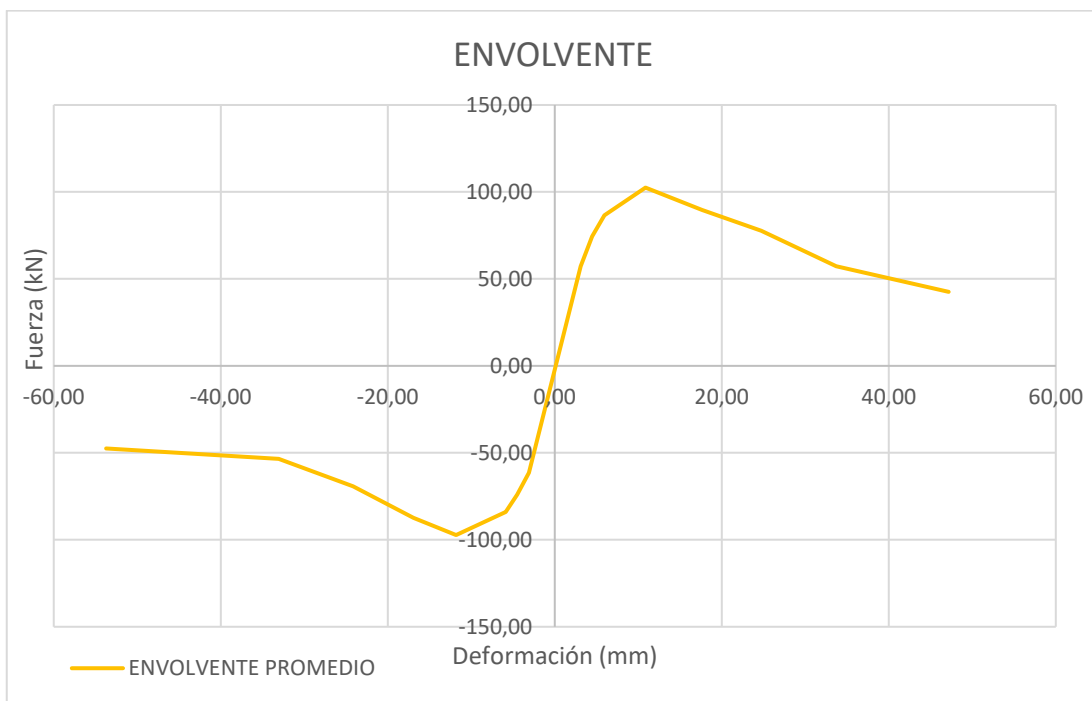
**Figura 112.** MURO 3: curva envolvente.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 113.** MURO 4: curva envolvente.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



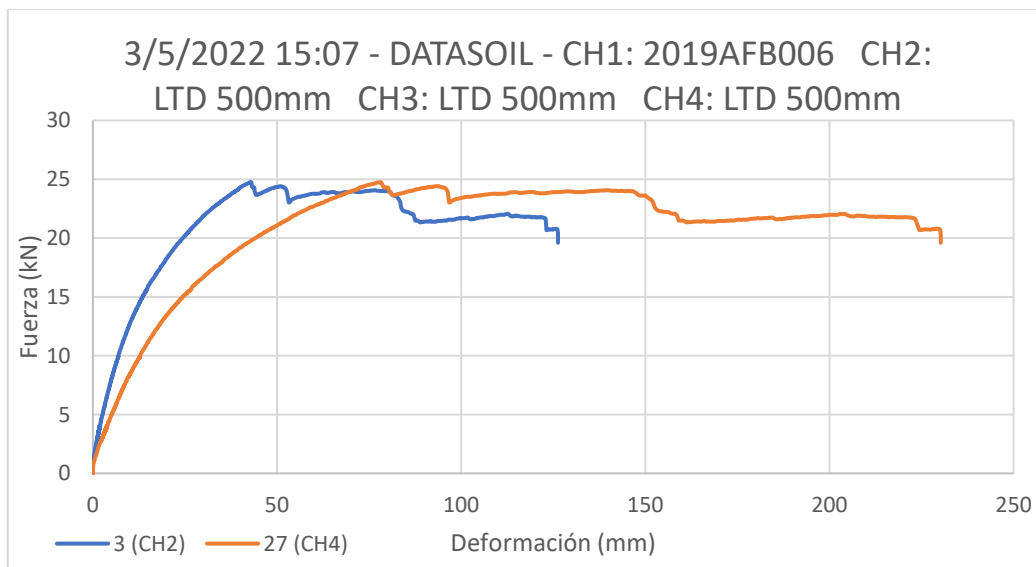
**Figura 114.** MURO 6: curva envolvente.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 115.** Curva envolvente promedio: Muro SPSW rigidizado.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Debido a que todos los ensayos de carga cíclica poseen la misma cantidad de ciclos desarrollados, se ha promediado las envolventes de los muros 1, 2 y 4 para obtener una envolvente representativa del modelo de muro SPSW rigidizado, descartando la 3 por considerarse un caso atípico (condiciones distintas a las réplicas más semejantes), obteniendo la curva presentada en la figura 115.

Una vez procesados los datos recolectados de los ensayos cíclicos, se ha procedido con el tratamiento de los datos del ensayo monotónico ejecutado en la muestra 5 que representa el pórtico de los muros, donde únicamente se ha identificado los valores de fuerza y deformación para crear la curva carga-desplazamiento del pórtico, así mismo ingresando las columnas de valores en los ejes correspondientes de la gráfica creada, consiguiendo el siguiente resultado:



**Figura 116.** PÓRTICO: Curva carga-desplazamiento (muestra 5).  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

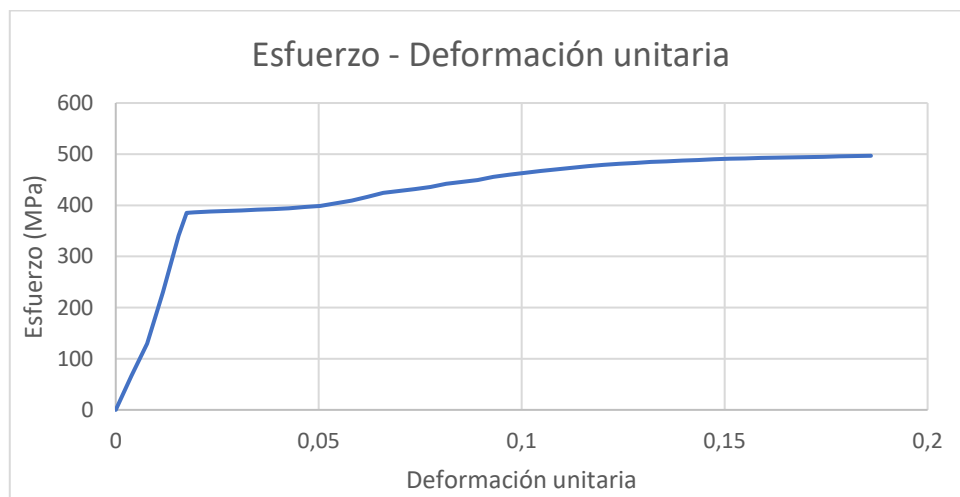
Similar a las curvas de histéresis de cada uno de los muros, en la figura 116 se puede ver representado dos curvas semejantes, donde la principal (LVDT número 27) es la curva naranja que relaciona los desplazamientos medidos en el eje de aplicación de la carga con la fuerza aplicada, siendo esta la que representa el trabajo desarrollado por el pórtico, mientras que la curva azul (LVDT número 3) es una curva de referencia de los desplazamientos medidos en la mitad del muro con respecto a la carga aplicada.

Como en este caso se facilita el cálculo de la energía absorbida por el pórtico, la obtención de gráficas para el ensayo monotónico termina con la figura 116, donde directamente se utiliza un método numérico para determinar el área bajo la curva principal (LVDT número 27), obteniendo de esta manera la “tenacidad” del pórtico.

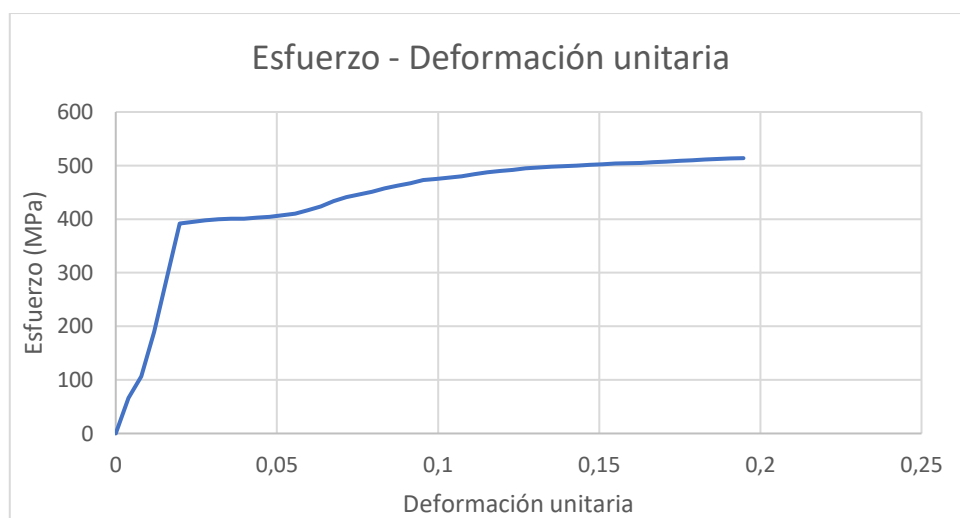
### 5.2.2.2. Ensayo de probetas de acero

El ensayo de tracción en acero es un ensayo que se puede considerar como “monotónico” por la naturaleza de la carga, donde el tratamiento de datos es más directo que en los ensayos cíclicos en términos de la complejidad, de esta manera las curvas que se extraen de estos ensayos son las curvas esfuerzo-deformación unitaria.

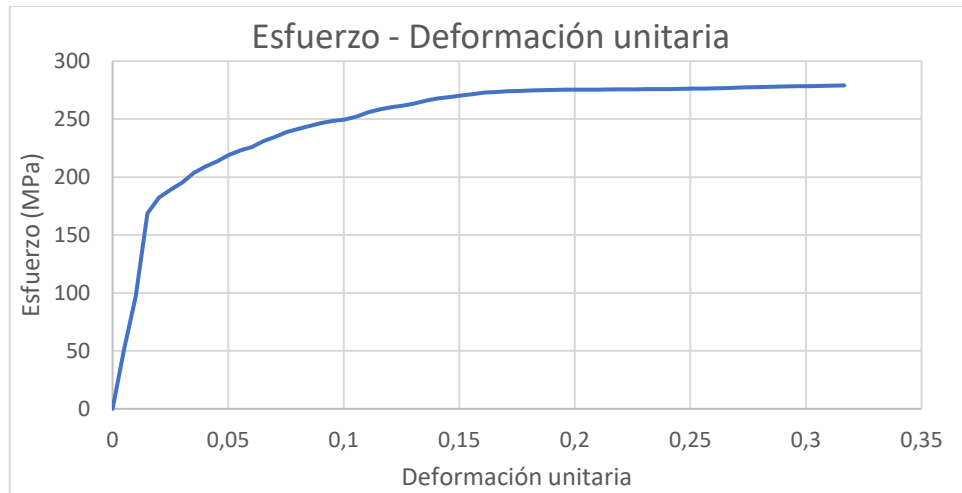
En general, en los ensayos monotónicos la carga se aplica de manera unidireccional, hasta que el equipo de prueba supere los límites de capacidad del material, obteniéndose una curva similar a la presentada en la figura 19 (capítulo 2) donde la percepción del comportamiento del acero en sus rangos elástico, plástico y elastoplástico es más evidente. Procesando las tablas de lecturas de los ejemplares extraídos (la tabla 46 es un ejemplo), se obtuvieron las siguientes curvas:



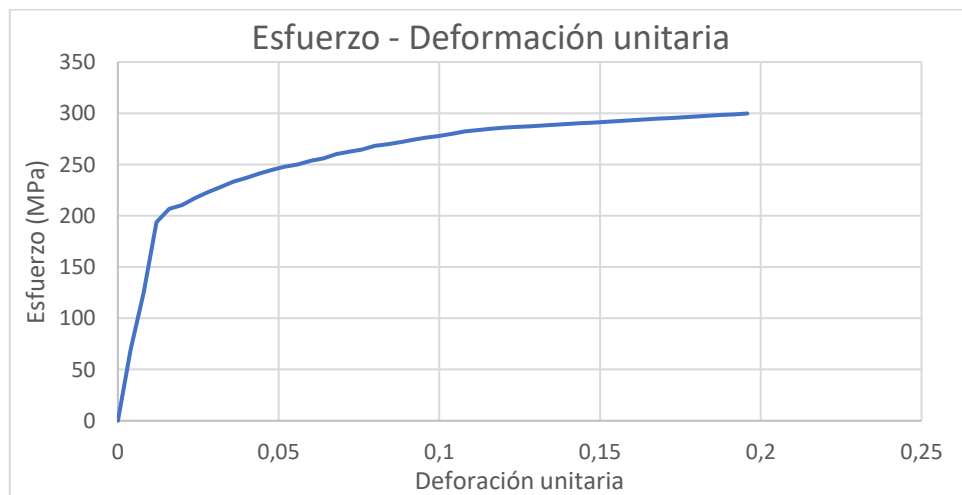
**Figura 117.** MUESTRA 1: curva esfuerzo-deformación unitaria.  
Fuente: Elaborado por Carlos



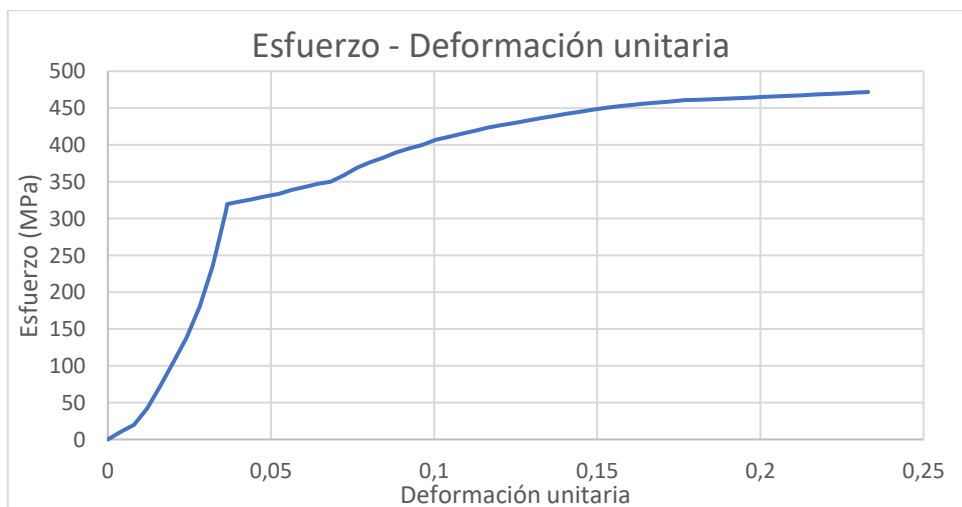
**Figura 118.** MUESTRA 2: curva esfuerzo-deformación unitaria.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



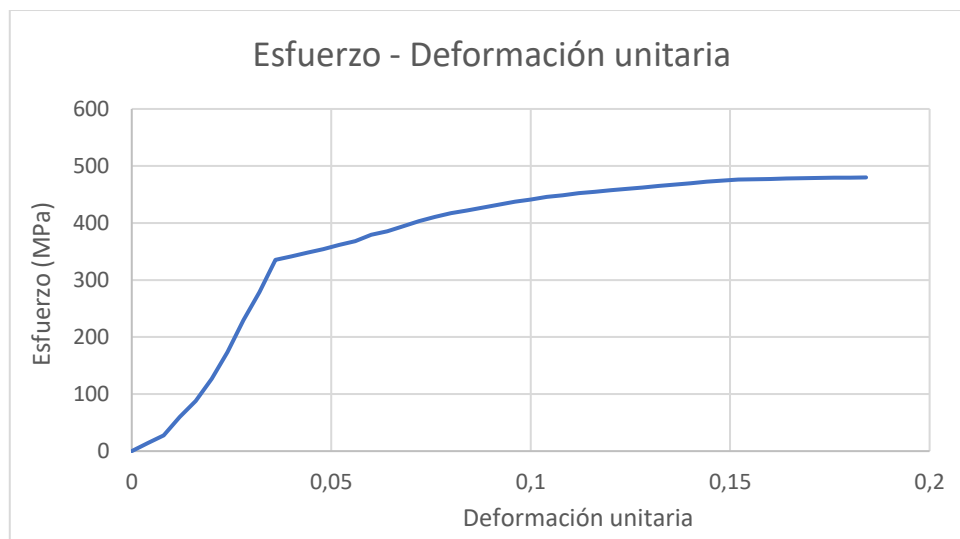
**Figura 119.** MUESTRA 3: curva esfuerzo-deformación unitaria.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 120.** MUESTRA 4: curva esfuerzo-deformación unitaria.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 121.** MUESTRA 5: curva esfuerzo-deformación unitaria.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 122.** MUESTRA 6: curva esfuerzo-deformación unitaria.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Recordando la tabla 47, cada una de las curvas corresponde a una muestra que ha sido extraída del elemento identificado en ella, donde cada elemento contiene dos muestras de prueba, por lo que al observar las figuras de la 117 a la 122, se puede observar que las curvas obtenidas se corresponden entre pares, un ejemplo de esto son las curvas 121 y 122 que representan a las muestras 5 y 6 extraídas del alma de una viga IPE140.

De esta manera se tiene un esquema visual de la actividad desarrollada internamente en el material, donde los elementos químicos que conforman el acero comienzan a presentar cambios que influyen en sus campos característicos, creándose fuerzas internas de reacción que responden al trabajo que ejerce la máquina de ensayo al tratar de obligar al material a presentar deformaciones y, por ende, una falla; por tal motivo, siempre es necesario recordar aquellos conceptos de la “FÍSICA” y de la “QUÍMICA”, porque al evaluar las curvas de esfuerzo-deformación unitaria, se evalúa la fuerza acumulada del campo de interacción entre dichas partículas encontradas en una determinada sección, al ser sometidas a una separación forzada correspondiente a la necesidad de superar dichos campos de interacción que corresponden a las condiciones ambientales de ensayo; adicionalmente, los mismos equipos de ensayo son capaces de tomar lecturas del material probado gracias a los mecanismos y sistemas internos que utilizan sensores calibrados basados en la tercera “Ley de Newton”, puesto que esta ley es muy universal y su importancia radica en la transmisión comprobada de la energía a través de los materiales (Bragado, 2003).

En consecuencia, las curvas obtenidas permiten observar el comportamiento de un material cuando se lo somete a una fuerza de tracción que busca separarlo en dos piezas, obteniendo información de su capacidad de resistencia, la deformación que sufre la muestra frente a la fuerza aplicada, la energía que absorbe hasta que llega a su límite y su capacidad de cambiar o recuperar su estado inicial.



### **5.3. COMPORTAMIENTO DE LOS MUROS EN EL ENSAYO**

Cuando una estructura se somete a la aplicación de fuerzas que lo obliguen a fallar, los elementos que la conforman se reparten los esfuerzos internamente, de tal manera cada uno aporte a la resistencia total del muro, pero como cada elemento posee su geometría y propiedades, cada uno responde de distinta manera, donde uno de ellos falla primero reduciendo el aporte y, por ende, la resistencia y capacidad de absorción de la estructura en conjunto disminuye.

Esto es lo que se conoce como “el comportamiento de la estructura”, pues las características de los elementos internos y de ciertos mecanismos implementados en el diseño, crean un sistema desarrollado para trabajar en la absorción de energía sísmica a través de la distribución de cargas y esfuerzos hacia cada uno de los elementos y mecanismos constitutivos; el comportamiento hace referencia a la manera en que cada elemento recoge su parte de energía.

Los muros de corte de placa de acero SPSW constituyen un mecanismo estructural conformado de vigas, columnas, la plancha intermedia (alma del muro) y ciertos acabados que se realizan en ella para definir en el muro un sistema de absorción de energía específico que corresponda a la funcionalidad de un edificio, entendiendo este sistema como una combinación de propiedades como: la resistencia, rigidez, rangos elástico, plástico, elastoplástico; los cuales varían dependiendo de la geometría del pórtico, tipo de conexión entre los elementos, acabado de las conexiones, moldeado de mecanismos en los elementos (como son las secciones RBS en vigas o perforaciones en la plancha) y de la implementación de nuevos elementos en el muro.

Las evidencias recolectadas que se presentan a continuación, y los datos tabulados acompañados de sus correspondientes gráficas, son un claro ejemplo de todas las características antes descritas, donde cada una de las fallas detectadas y desarrollo de deformaciones en los elementos corroboran toda la información que se puede extraer acerca del funcionamiento de estos muros y de conceptos adicionales como son: las conexiones entre elementos de acero, la influencia del acabado en la conexión y la resistencia de materiales.

Es necesario tener en cuenta todos estos conceptos y desarrollar una agudeza en los sentidos para poder dar un correcto seguimiento del trabajo de cualquier mecanismo, y saber diagnosticar su funcionamiento a través de una descripción detallada del sistema evaluado, con el fin de tener “precisión” en la detección de cualquier “síntoma” que pueda presentar la estructura, ya sea mientras constituya un concepto en prueba o luego de haber trabajado ante cualquier aparición eventual de algún fenómeno natural, pues sólo de esta manera se puede entender el significado de “comportamiento”.

#### **5.3.1. MUROS SPSW RIGIDIZADOS**

Durante el ensayo de los muros que representan el modelo desarrollado en este estudio, se obtuvo una gran cantidad de información acerca del comportamiento que puede presentar este diseño gracias a la implementación de rigidizadores en el alma del muro, lo cual fue posible evidenciar al observar las deformaciones

presentadas durante la aplicación de las cargas cíclicas, y de la importancia que tiene el acabado de suelda entre la placa y los elementos de borde.

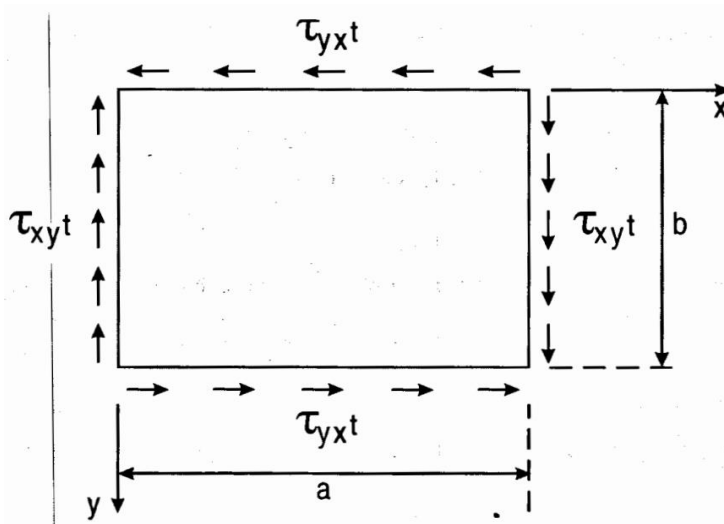
Conforme se desarrolló el avance de las pruebas, los muros practicados presentaron aquellas ondulaciones diagonales por pandeo debido al corte en la placa de acero, las cuales se encontraban repartidas en cada una de las divisiones del entramado obtenido como una consecuencia de colocar rigidizadores distribuidos tanto en horizontal como en vertical; esta evidencia visual permite tener una buena percepción de la mejoría en la distribución de esfuerzos internos durante el funcionamiento de la estructura planteada, la cual puede ser observada en las figuras 85, 89, 91 y 93.

Mientras la carga aplicada aumentaba, las deformaciones en la placa también presentaban una mayor pronunciación, generando poco a poco ciertos daños irreversibles en el alma, con lo cual la resistencia comenzaba a reducirse y la degradación de la capacidad del muro fue evidente conforme se presentaban fallas por incapacidad de recuperar la forma en la placa de acero; estas fallas fueron concentrándose en las conexiones entre el alama y los elementos de borde, donde los cordones de suelda fueron cediendo liberando a la placa de las esquinas que fue el lugar en el que se presentaron deformaciones fuertes, puesto que inclusive aquellos ángulos ubicados en estas zonas también presentaron deformaciones.



**Figura 123.** Muro SPSW rigidizado luego del ensayo.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Como se puede ver, el acabado de la conexión entre la placa de acero y los elementos de borde juega un papel muy importante, pues el corte también se distribuye como tal en el perímetro de la placa y, si este acabado resulta en un componente cuya capacidad es menor a la estimada por los demás elementos, la falla se desarrolla primero en este mecanismo. La figura 124 representa el esquema de distribución de esfuerzos cortantes alrededor de una placa de acero, destinada a trabajar ante la aplicación de una carga que, luego de ser recibida por cualquier elemento que rodee a la placa, la transforma en estos esfuerzos.



**Figura 124.** placa sometida a esfuerzos cortantes en su perímetro.  
Fuente: (De Buen López De Heredia, 2000).

Como el alma de este tipo de muros va conformada de un conjunto de placa de acero y atiesadores ubicados en ambos lados de la placa, el propósito de este conjunto es de intervenir anticipadamente en la absorción de la mayoría de los esfuerzos distribuidos en la estructura, buscando que este implemento se “sacrifique” en vez de los elementos de borde, por lo tanto, es de esperar que la placa sufra daños antes que los elementos de borde. Haciendo referencia a este comportamiento, es un tema cubierto en el diseño de muros SPSW en general, donde la norma pide que el cálculo de los elementos de borde asegure una mayor resistencia por parte de estos frente a la capacidad de la placa, para asegurar que la estructura principal se mantenga firme una vez cumplida la función del alma del muro, pero debido a la configuración geométrica del diseño presentado, se ha decidido mantener los perfiles IPE 140 como vigas, puesto que para cubrir el requerimiento de la norma, era necesario utilizar vigas cuyas dimensiones sobrepasaban las encontradas en el mercado; este tema se explica con mayor profundidad más adelante. Lo que se observó durante el ensayo de estos muros, es que la placa asumió la mayoría del trabajo donde las fallas más evidentes fueron en las esquinas, mientras que los elementos de borde se mantuvieron en buen estado (figura 123).

Gracias al uso de cuatro réplicas correspondientes al modelo de muro SPSW rigidizado, fue posible evaluar cualquier síntoma que presentaban las muestras durante la aplicación de las cargas cíclicas, llegando a detectar cualquier postura que tomaron los muros como respuesta a la fuerza aplicada; tal es el caso de la muestra número 3, la cual permitió detectar un problema con respecto al acabado de solda en el contacto entre la placa de acero y los elementos de borde pues, al no tener una buena cobertura, la muestra falló más temprano de lo normal. Aun así, la muestra fue relevante en el estudio ya que permite ver cierto modo un aporte que presentan los rigidizadores por sí solos, pues la solda entre estos elementos con las columnas y las vigas se mantuvieron hasta que la muestra cumpla con el procedimiento.



**Figura 125.** Falla de la soldadura en el muro 3.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 126.** Acabado de suelda en el muro 3.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Según lo presentado en las figuras 125 y 126, es claro que el acabado de suelda entre la placa y los elementos de borde presenta un estado “deficiente”, el cual provocó que la placa se desprenda antes del cumplimiento de la resistencia promedio, pero esto no sucedió con los ángulos que aportaron mientras la placa se liberó de las columnas y las vigas. Una vez detectada esta falla, se revisó el acabado de suelda en la muestra número 4 con el fin de evitar este comportamiento y tener una similitud con las muestras 1 y 2, para conseguir que la muestra 4 ratifique lo observado en dichas muestras primarias que presentaron resultados muy parecidos entre ellas; esto también fue llevado más adelante en la revisión de la suelda de la muestra 6. Una vez corregido el acabado de suelda en el muro 4, los resultados permitieron confirmar la falla puesto que los valores tabulados fueron similares a los obtenidos en las muestras 1 y 2.

Con la similitud obtenida entre las muestras 1, 2 y 4, fue posible promediar sus resultados con el fin de obtener una resistencia promedio del modelo planteado, el cual fue de 102,5kN (10,45Ton), y la capacidad de desplazamiento promedio obtenida entre las tres muestras fue de 4,717cm; desde luego, con la curva envolvente promedio del modelo se determinó que la capacidad promedio de energía absorbida por el muro fue de 6,75kNm (68,78Ton-cm). Por otro lado, los resultados presentados por la muestra 3 fueron una resistencia de 51,83kN (5,28Ton), un desplazamiento máximo de 5,97cm y una absorción de energía de 4,77kNm (48,64Ton-cm).

En resumen, estos muros han desarrollado un comportamiento bastante parecido al esperado (a excepción del muro 3), donde la placa de acero ha sufrido la mayoría de los daños en conjunto con la suelda, pues al haber utilizado la suelda tipo SMAW (electrodos), su eficiencia se ve afectada por el proceso y características propias de este método de soldadura.

### **5.3.2. PÓRTICO**

Una vez ensayados los muros SPSW rigidizados, se ha ensayado el pórtico identificado como la muestra número 5, el cual ha sido sometido únicamente a un ensayo monotónico que ha sido suficiente para evaluar la capacidad que poseen los elementos de borde por sí solos, además de permitir la obtención de una buena referencia real de las deformaciones que se producen durante el ensayo de cargas cíclicas.

EL comportamiento de este sistema estructural fue muy similar al que se obtiene durante un ensayo de tracción en acero, donde la curva desarrollada (figura 116) permite identificar un rango elástico y un elastoplástico puesto que en esta muestra ya se encuentra la combinación de elementos de acero con un trabajo de suelda aplicado en las uniones. Como resultado de esta práctica, se observó que el pórtico es capaz de desplazarse por encima de la capacidad de lectura de los LVDT's, pues una vez llegado al límite, el pórtico no presentó ninguna fisura que pueda considerarse como falla; aun así, la curva fuerza-desplazamiento (figura 116) permite ver que la estructura comenzó a perder capacidad, asumiendo que cumplió con su resistencia.

La evidencia de la incapacidad de continuar con el ensayo puede verse en la figura 96, donde es claro que el pórtico se encuentra bastante inclinado cuya deformación máxima por suspensión del ensayo fue de aproximadamente 23cm (figura 116), donde a pesar de que su límite de resistencia fue de 24,76kN (2,52Ton), gracias a esta capacidad de deformación, éste absorbió una cantidad de energía de 4,8kNm (48,95Ton-cm), con lo cual se comprueba la eficiencia del diseño de las secciones reducidas de las vigas (RBS) para permitir el desarrollo de rótulas plásticas en los puntos destinados.

Con esto se puede ver que el pórtico conformado por las columnas tubulares de 200x100x6 y las vigas IPE140 son capaces de soportar grandes deformaciones sin que los elementos comiencen a fallar por daños serios que puedan presentarse en los elementos constitutivos, especialmente en las secciones RBS que fueron diseñadas para representar la resistencia del pórtico.

### **5.3.3. MURO SPSW BASE**

Así mismo, luego de haber ejecutado los ensayos de los muros SPSW rigidizados y del pórtico (muestra 5), se ha procedido con la práctica del muro SPSW original (muestra 6), el cual se encuentra compuesto de la misma configuración estructural de los muros SPSW rigidizados, pero sin la intervención de los rigidizadores en el alma.

Como ya se explicó anteriormente, para cumplir con las mismas condiciones de ensamblaje de las muestras desarrolladas en este estudio, se ha revisado el acabado de suelda entre la placa de acero y los elementos de borde, para que el cambio que resulte en la resistencia de la muestra sea la obtenida por el uso de únicamente la plancha de acero, a diferencia de las otras muestras cuya resistencia se ve aportada por el conjunto de la placa de acero y los rigidizadores.

Una vez comprobado el acabado del ensamblaje de esta muestra, se desarrolló su correspondiente ensayo para observar cómo se comporta el muro sin rigidizadores. Durante la práctica, conforme se ejecutaban los ciclos de carga, la plancha presentaba deformaciones más concentradas, pronunciadas y caóticas de las ondulaciones diagonales de pandeo debidas a los esfuerzos cortantes (figura 98), donde se observó que hubo una concentración de deformaciones en una de las esquinas inferiores de la plancha de acero.

Luego del ensayo, el daño observado en el alma del muro fue muy notorio puesto que en esta vez sólo corresponde a la placa de acero, la cual soportó todo el trabajo de la práctica por sí sola, llegando a presentar un pandeo muy fuerte de aproximadamente 15cm (véase las figuras 127 y 128). Así mismo, como la plancha de acero fue incapaz de recuperar su estado de equilibrio, comenzaron a ceder las conexiones entre la placa de acero y los elementos de borde, siendo más notorio en las esquinas. Nuevamente, los elementos de borde fueron capaces de mantener un buen estado luego de la prueba.





**Figura 127.** Muro SPSW luego del ensayo.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.



**Figura 128.** Pandeo de la placa de acero  
luego del ensayo.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Revisando los valores recogidos de este muro, se tiene que su resistencia alcanzó un valor de 74,14kN (7,56Ton), cuya deformación máxima alcanzada luego del límite fue de 5,21cm y la energía total absorbida por el muro fue de 5,44kNm (55,49Ton-cm), llegando a presentar una buena capacidad de energía disipada por el sistema estructural.

Con todo esto, es claro que la muestra 6 también fue capaz de comportarse de una manera muy cercana a la deseada, donde la placa recibió todo el daño de la aplicación de las cargas manteniendo la integridad de los elementos de borde, siendo que las deformaciones desarrolladas en la placa fueron las ondas diagonales características de una aplicación de esfuerzos cortantes en su perímetro.

#### **5.4. CORRECCIÓN DEL MODELO ANTE LOS ENSAYOS**

Debido a los valores recolectados de los ensayos tanto de los muros y el pórtico, como de las muestras de acero, fue necesario revisar los valores ingresados en los cálculos computacionales, especialmente por las deformaciones obtenidas en el modelo matemático "ideal" y los desarrollados por las muestras físicas durante la aplicación de las cargas cíclicas.

Con las comparaciones realizadas, las cuales se explican con más detalle en el siguiente apartado, se observó que las deformaciones desarrolladas en el ensayo fueron de aproximadamente 10 veces más grandes que las presentadas en el modelo de ANSYS, donde fue necesario revisar nuevamente los datos ingresados con el fin de verificar que se ha respetado la ventana de registro de propiedades, correspondientes a los elementos considerados en el diseño. Luego de desarrollar los ensayos de los materiales, se pudo encontrar la fuente del error, puesto que la misma diferencia se encontraba al comparar el módulo de Young estándar vs el obtenido en cada una de las muestras de acero, lo cual provocó que sea necesario corregir los datos ingresados tanto en el algoritmo de MATLAB como en el modelo virtual del muro en ANSYS, de tal manera que los resultados matemáticos se acerquen aún más a la realidad de los hechos.

Como se ha explicado, se ha procesado los datos recolectados de los ensayos de tracción ejecutados en las muestras, para obtener el módulo de Young real del material e ingresarlo en cada uno de los materiales registrados en el cálculo, acompañado de los límites reales como lo son el esfuerzo de fluencia y la resistencia última, puesto que estos valores tuvieron cambios considerables.

##### **5.4.1. CÁLCULO EN MATLAB**

Debido a que los valores recolectados influyen en todo el cálculo de la resistencia de los muros, se ha comenzado con el reemplazo de los datos en el algoritmo desarrollado en MATLAB, siguiendo el orden establecido en la hoja de cálculo destinada para el registro de las propiedades de cada elemento establecido en el diseño.

El algoritmo de MATLAB presenta una función de concatenación con el software EXCEL, donde se ha creado una hoja que permite el registro de las propiedades

de los materiales según el elemento detallado para diferenciarlos (tabla 27), con lo cual, luego de procesar estos datos en una sola columna, el algoritmo de MATLAB recoge dicha columna y la procesa distribuyendo estos valores en cada una de las funciones tratadas en el capítulo 3. Una vez reconocidos los valores reales, se los ha corregido para obtener el cálculo real de la resistencia del muro SPSW rigidizado, obtenido en el diseño. Este reemplazo se encuentra registrado en la tabla 27, la cual ya posee las propiedades reales de las muestras ensayadas en el laboratorio.

Con la corrección realizada, se ha ejecutado el algoritmo para obtener los nuevos resultados de todas las evaluaciones de los elementos y cálculo de la resistencia final del muro. Los resultados obtenidos, luego de la corrección y ejecución del algoritmo, presentaron importantes cambios en la capacidad de los elementos, criterios de evaluación y resistencia final de la estructura; estos nuevos resultados son los siguientes:

#### "DISEÑO DE MURO DE CORTE DE PLACA DE ACERO SPSW"

-Cálculo de la capacidad a corte del muro y las vigas-

El aporte de la viga es de: 28.158kN

El aporte de la placa es de: 124.2279kN

El corte nominal del muro es: 152.3859kN

La resistencia del muro es: 137.1473kN

-Cálculo de las columnas-

1) Clasificación de la sección

El eje x es esbelto

El eje y es esbelto

La sección de la columna es esbelta

2) Capacidad en las dos direcciones

2.1) Eje x

¿desea obtener la longitud efectiva a través de nomogramas o estimarlo?

opciones: 1=nomogramas o 2=estimación

ingrese la opción: 2

ingrese la longitud efectiva: 2.6

hay un trabajo elástico

La capacidad de la columna en la dirección x es: 60.9038kN

2.2) Eje y

¿desea obtener la longitud efectiva a través de nomogramas o estimarlo?

opciones: 1=nomogramas o 2=estimación

ingrese la opción: 2

ingrese la longitud efectiva: 2

hay un trabajo elástico

La capacidad de la columna en la dirección y es: 34.7994kN

-Análisis de la placa-

El pandeo se inicia en el rango elástico

-Diseño y análisis de la placa con atiesadores-

1) Inercia mínima del atiesador horizontal

"Cumple en x"

La inercia mínima horizontal es: 0.14324cm<sup>4</sup>

2) Inercia mínima del atiesador vertical

"Cumple en y"

La inercia mínima vertical es: 0.7826cm<sup>4</sup>

La inercia del atiesador doble es: 1.076cm<sup>4</sup>

"La inercia del atiesador cumple en los dos sentidos"

3) Capacidad de la placa con atiesadores

El pandeo se inicia en el rango elástico

4) Capacidad del atiesador como placa

ingrese la condición por apoyo libre: 0.425

ingrese la condición por empotramiento: 1.277

Confirme el esfuerzo resistente de la placa y revise si necesita

corrección por el rango de inicio del pandeo

"El atiesador cumple"

5) Capacidad del muro con atiesadores

Cantidad de esfuerzos críticos calculados: 41

¿Desea calcular el aporte de los rigidizadores con el esfuerzo crítico por defecto?

Nota: revisar primero el cálculo por defecto antes de proceder con la otra alternativa.

sí=1 o no=2: 1

El aporte de los rigidizadores al cortante del muro es de: 66.7554kN

El corte nominal aumentado del muro es: 219.1413kN

La resistencia aumentada del muro es: 197.2272kN

Ciertos aspectos del cálculo obtenido reflejan cambios muy drásticos pero correspondientes a esta diferencia proporcional de aproximadamente 10 veces lo anterior; el caso más directo de este cambio es en el cálculo de las columnas, donde se incurre en una advertencia puesto que la capacidad de las columnas es menor al aporte presentado por la placa de acero y, por ende, a la resistencia total del muro, pero por el momento este valor puede mantenerse puesto que no afecta a la resistencia del muro y, durante los ensayos, las columnas no presentaron problemas; este resultado comparativo se explica a profundidad en el apartado 5.5.

También se ha presentado otra observación correspondiente a la evaluación del ángulo atiesador como una placa de acero, pues esa comprobación requiere de la estimación del factor de placa representado en las figuras 47 y 102, donde dependiendo del mismo, varía el esfuerzo crítico de manera directamente proporcional; sin embargo este resultado tampoco afecta al criterio de elección de los ángulos L de 2x2, pues gracias a la revisión de todos los posibles factores presentados para esta evaluación, se ha observado que el valor más bajo del esfuerzo crítico soportado por el ángulo es mayor al esfuerzo crítico de la plancha de acero rigidizada, superando el criterio de elección del atiesador como se expresa después de la observación.

De esta manera y, observando que la mayoría de los resultados del cálculo son satisfactorios, se ha determinado que los aportes nominales de los elementos constitutivos son: vigas de 28,158kN (2,87Ton), placa de acero de 124,228kN (12,66Ton) y atiesadores de 66,755kN (6,81Ton); con lo cual la resistencia nominal del muro sin rigidizadores es de 152,386kN (15,53Ton) y con rigidizadores de 219,141kN (22,34Ton), las cuales al factorar se obtienen resistencias de 137,147kN (13,98Ton) y 192,227kN (19,60Ton) respectivamente.

Con las correcciones realizadas en el algoritmo, los resultados de la resistencia se acercaron más a los límites evidenciados en las envolventes de cada muestra, pues estos resultados poseen las características reales de los materiales involucrados en la estructura de los muros, los cuales en conjunto con el acabado de la suelda, constituyen la resistencia general de las estructuras ensayadas.

#### **5.4.2. MODELAMIENTO EN ANSYS**

El módulo de Young, al ser un valor que representa la relación entre los esfuerzos aplicados vs las deformaciones provocadas por estas fuerzas, es un valor que afecta a todos los cálculos que permiten estimar la capacidad de cualquier estructura diseñada, y el caso de los programas computacionales no es la excepción, debido al algoritmo de cálculo que poseen dentro del software desarrollado.





El programa ANSYS, de manera similar al algoritmo de cálculo desarrollado en MATLAB para el diseño de los modelos desarrollados en el presente estudio,

posee una ventana de registro de todas las características que representan a los materiales que conforman los elementos utilizados en el diseño, donde a partir de ellos, obtiene la capacidad de cualquier estructura modelada en este software especializado.

Debido a los resultados preliminares obtenidos a partir del registro de características “ideales”, se ha revisado el modelo tanto en las geometrías, conexiones entre elementos, datos ingresados y aplicación de la malla de cálculo provista por el programa, llegando a concluir que la falla fue encontrada en el registro del módulo de Young; esta conclusión fue ratificada luego de ejecutar los ensayos pertinentes en las muestras de acero tomadas en los materiales que aportan a la resistencia de los muros. Los materiales registrados para utilizar en los elementos correspondientes son los siguientes:

**Tabla 48**

Materiales ingresados para el modelo de muro SPSW rigidizado.

Contents of Engineering Data	
Material	
 Structural Steel	▼
 Structural Steel 2	▼
 Structural Steel 3	▼
 Structural Steel 4	▼
<a href="#">Click here to add a new material</a>	

De la tabla 48, es necesario identificar cada uno de los materiales relacionándolos con el elemento al que corresponden, de esta manera se puede entender que las diferencias encontradas entre cada uno de ellos si influye en el diseño de una estructura; llevando a cabo esta diferenciación, se tiene que el material “Structural Steel” corresponde al acero encontrado en las columnas, el material “Structural Steel 2” representa al acero de los ángulos utilizados como rigidizadores, el material “Structural Steel 3” pertenece al acero identificado en la plancha de acero y, por último, el material “Structural Steel 4” hace referencia al acero encontrado en las vigas IPE.

Cada uno de los materiales presentados posee su correspondiente desglose de propiedades, donde debe ser registrado todas las características observadas y recogidas de los ensayos en los materiales. La tabla 29 refleja este desglose de propiedades, donde las celdas permiten el ingreso de ciertas variables y, debido a las ecuaciones que permiten calcular otras propiedades, otras celdas se mantienen “bloqueadas”, un ejemplo de esto es el módulo de corte que se calcula a partir del módulo de Young y del coeficiente de Poisson, para lo cual se debe seleccionar esta manera de registro de propiedades pues también existen opciones en base a los datos más disponibles que puedan ser recogidos como



información. A continuación, se muestran las tablas de cada uno de los materiales:

**Tabla 49**

Propiedades del acero "Structural Steel"

Properties of Outline Row 3: Structural Steel		
A	B	
Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m <sup>-3</sup>
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	20	GPa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,6667E+10	Pa
Shear Modulus	7,6923E+09	Pa
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	250	MPa
Compressive Yield Strength	250	MPa
Tensile Ultimate Strength	460	MPa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa

**Tabla 50**

Propiedades del acero "Structural Steel 2"

Properties of Outline Row 4: Structural Steel 2		
A	B	
Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m <sup>-3</sup>
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	18,16	GPa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,5133E+10	Pa
Shear Modulus	6,9846E+09	Pa
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	380,5	MPa
Compressive Yield Strength	380,5	MPa
Tensile Ultimate Strength	505,5	MPa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa

**Tabla 51**

Propiedades del acero "Structural Steel 3"

Properties of Outline Row 5: Structural Steel 3		
A	B	
Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m <sup>-3</sup>
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	13,4	GPa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,1167E+10	Pa
Shear Modulus	5,1538E+09	Pa
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	182,5	MPa
Compressive Yield Strength	182,5	MPa
Tensile Ultimate Strength	289,5	MPa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa

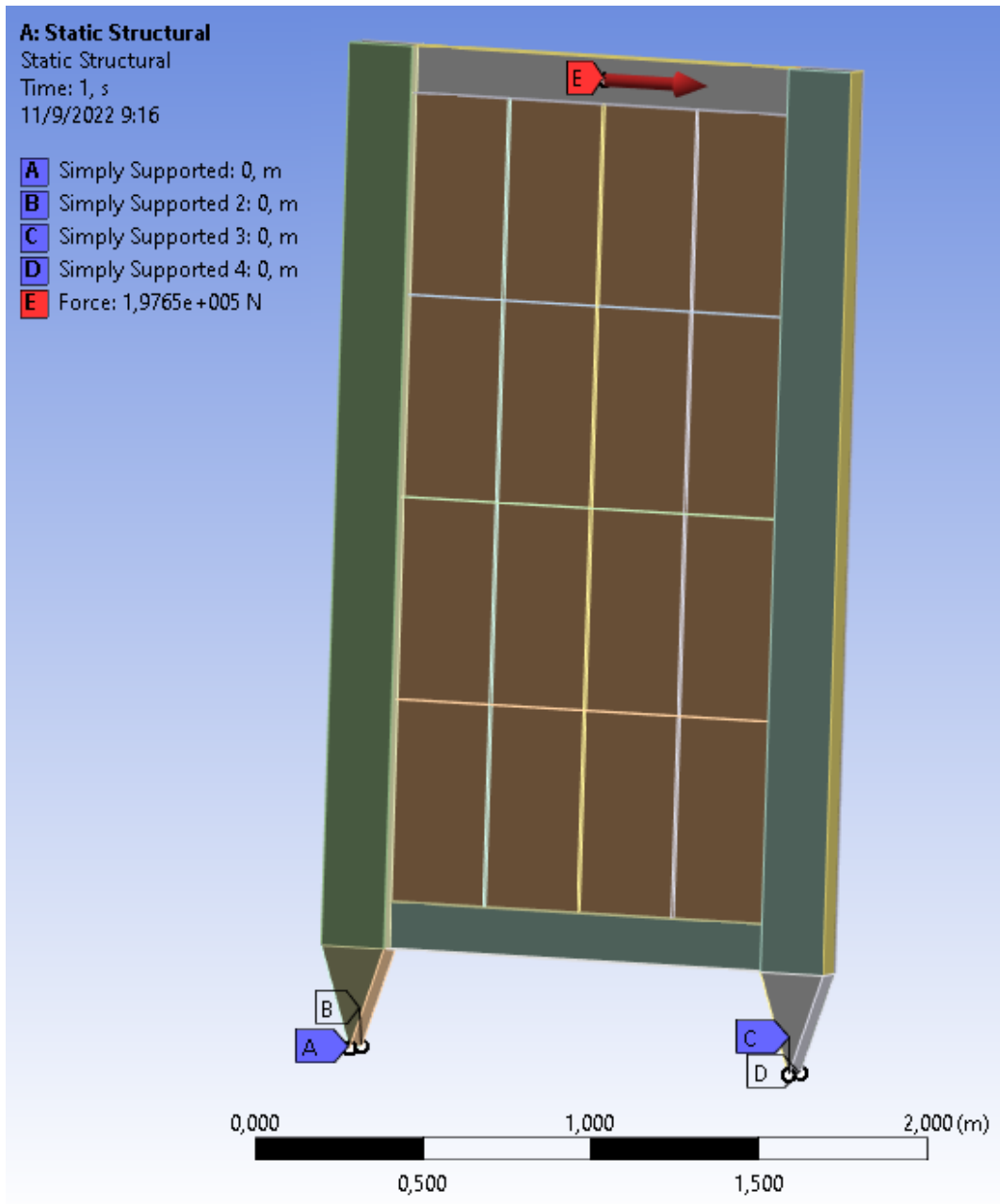
**Tabla 52**

Propiedades del acero "Structural Steel 4"

Properties of Outline Row 6: Structural Steel 4		
A	B	
Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7850	kg m <sup>-3</sup>
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson...	
Young's Modulus	6	GPa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	5E+09	Pa
Shear Modulus	2,3077E+09	Pa
Strain-Life Parameters		
S-N Curve	Tabular	
Tensile Yield Strength	320	MPa
Compressive Yield Strength	320	MPa
Tensile Ultimate Strength	476	MPa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Como se puede ver en las tablas de la 50 a la 52, se ha ingresado los valores resumidos en la tabla 47 que representan los resultados de los materiales probados en laboratorio, mientras que en el material de las columnas descrito en la tabla 49, se ha asumido que el módulo de Young se comporta de manera

similar a los valores entregados por los otros materiales, pasándolo de un valor de 200GPa un valor de tan solo 20GPa. En el caso del coeficiente de Poisson, al no existir un método disponible que permita determinar este valor, se ha mantenido el mismo coeficiente asumido de 0,3. En base a la nueva resistencia calculada, también fue necesario corregir la fuerza aplicada en el muro para que las deformaciones correspondan al límite de resistencia que puede entregar el muro diseñado:

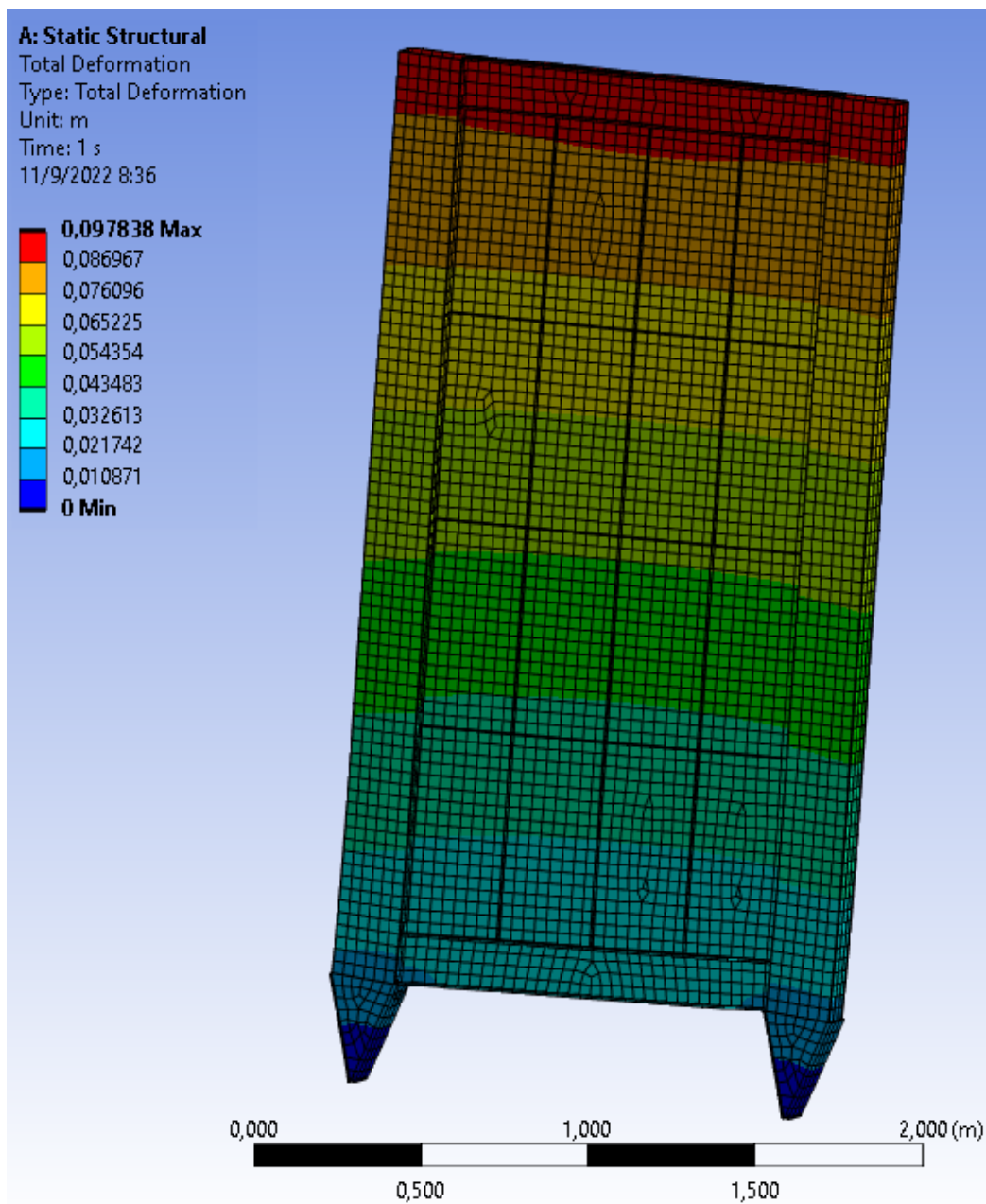


**Figura 129.** Fuerza corregida en el modelo de ANSYS.

Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Gracias a la versatilidad de este software, no hace falta volver a crear las geometrías ni tampoco recrear la malla de cálculo, con lo cual basta volver a correr el programa para que calcule las nuevas deformaciones a partir de los cambios registrados en los materiales y en la fuerza aplicada, pues en cada parte

de los pasos a seguir, se encuentran distintas ventanas que mantienen disponibles los datos mediante los cuales el programa obtiene sus resultados. Con todos estos cambios, se ha ejecutado el programa llegando a las siguientes deformaciones:

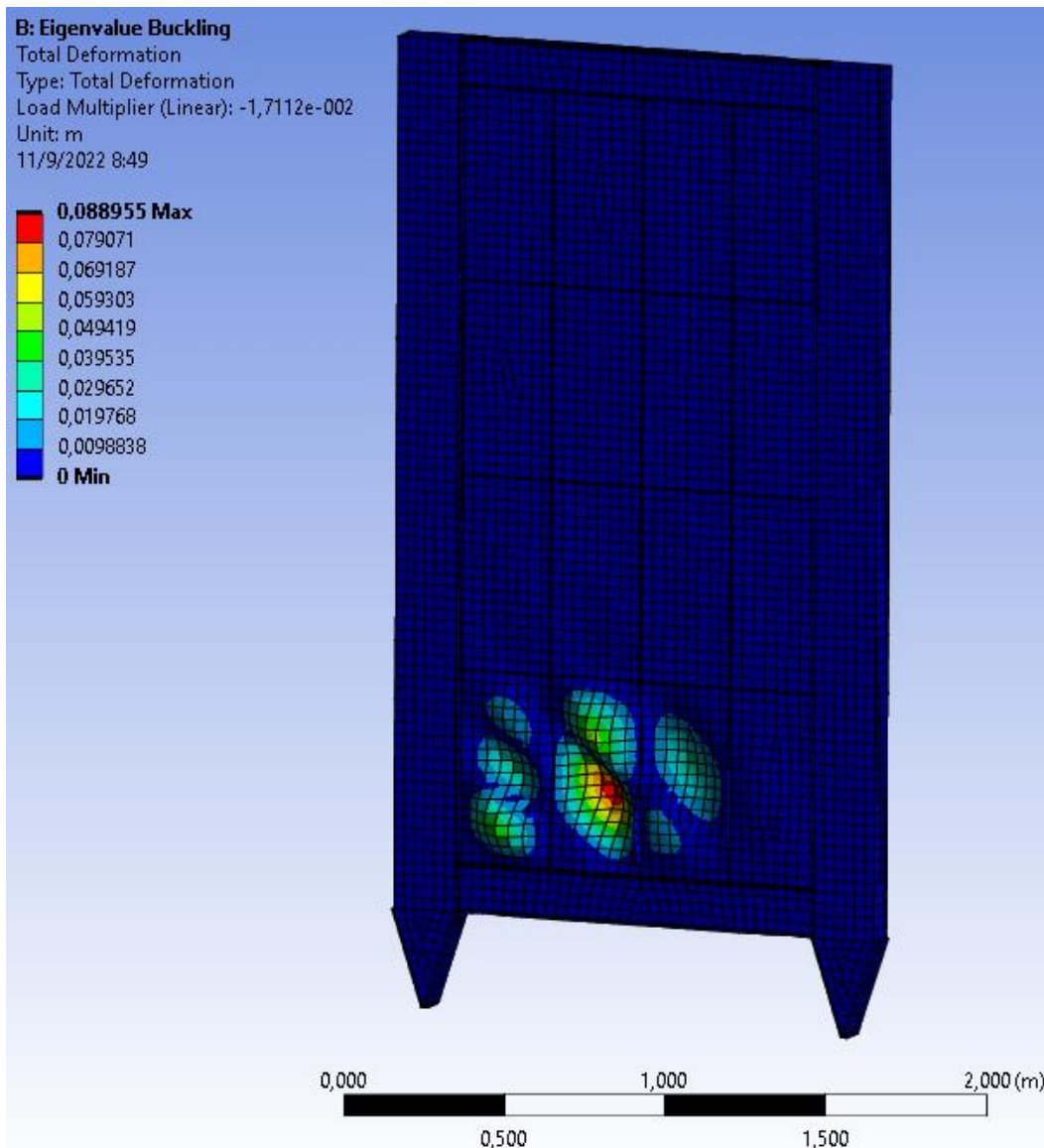


*Figura 130.* Deformaciones corregidas en ANSYS.

Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

De la misma manera, se realizó una evaluación de pandeo a través del programa para comprobar el trabajo desarrollado por la placa durante el ensayo, pues al tratarse de un modelo “aproximado a la realidad”, debe representar lo más cercano posible el comportamiento esperado debido a la aplicación de una carga de naturaleza cortante, pues es muy importante buscar de la mejor manera un medio de “predicción” que permita cubrir cualquier eventualidad que pueda

desarrollarse no sólo en el campo de los estudios y ensayos, sino también en el campo de los fenómenos naturales. El resultado fue el siguiente:



*Figura 131.* Pandeo corregido en ANSYS.

Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Como se puede observar en la figura 131, ANSYS presenta medidas de la deformación desarrollada por las ondulaciones de pandeo en la placa de acero; con las correcciones realizadas, se tiene que la deformación máxima en una onda de la placa pandeada es de 8,9cm, donde la tendencia de presentarse esta falla es en la esquina inferior izquierda.

Con todas las correcciones y revisiones realizadas en el modelo, se ha obtenido estos resultados en deformaciones tanto en el eje de aplicación de la carga, a lo largo del eje de las columnas, y en las ondulaciones de la placa por el pandeo que provoca los esfuerzos cortantes repartidos en su perímetro, además de ser posible la observación de la concentración de daños por la escala de colores representada en ANSYS.

## **5.5. COMPARACIONES**

Se han presentado todos los resultados obtenidos durante el presente estudio, recogiendo los valores que cada modelo refleja según el procedimiento y asunciones aplicadas, donde a la vez se dio seguimiento a la secuencia del modelo matemático en general y al modelo físico, analizando, observando y comparando en todo momento entre estos modelos.

Es importante durante toda práctica laboral realizar el seguimiento de las tareas desarrolladas, puesto que de esta manera se puede evidenciar a detalle cada paso que sea cubierto durante el desarrollo de la labor; en este caso, al tratarse de un proceso matemático, es necesario que cada fórmula se encuentre en el lugar correcto, donde cada una de las variables introducidas debe ir en el modelo cuya composición responde a una manera de ver la realidad que nos rodea, asumiendo condiciones e integrando las más relevantes, con el fin de que cada vez el modelo se parezca aún más. Para que esto sea un hecho, también se debe recurrir a procesos técnicos cuyo propósito es el de reproducir lo idealizado en la realidad, donde cada paso dentro del trabajo técnico influye en el acercamiento al modelo virtual, puesto que siempre se tiene una cantidad de variables infinita que afecta a esta reproducción; sin embargo, existen condiciones que afectan más que otras, donde parte de este conjunto de factores se pueden despreciar por su impacto en el modelo físico, pero otros provocan que el objeto adquiera un comportamiento distinto al esperado si no se los ha tomado en cuenta. Por este motivo es importante desarrollar un criterio de seguimiento con el cual, una vez detectada la condición, se la resuelve para que el modelo presente los resultados deseados.

Siguiendo este proceso de evaluación de los modelos, se ha comparado los resultados preliminares, los obtenidos en los ensayos y los presentados tomando en cuenta ciertos factores de las pruebas ejecutadas para llegar a una solución más cercana entre los modelos desarrollados, recogiendo a la par toda la información que pueda reflejar aquellas condiciones presentadas durante la creación de estos modelos.

### **5.5.1. MURO SPSW RIGIDIZADO: EVALUACIÓN ENTRE MUESTRAS**

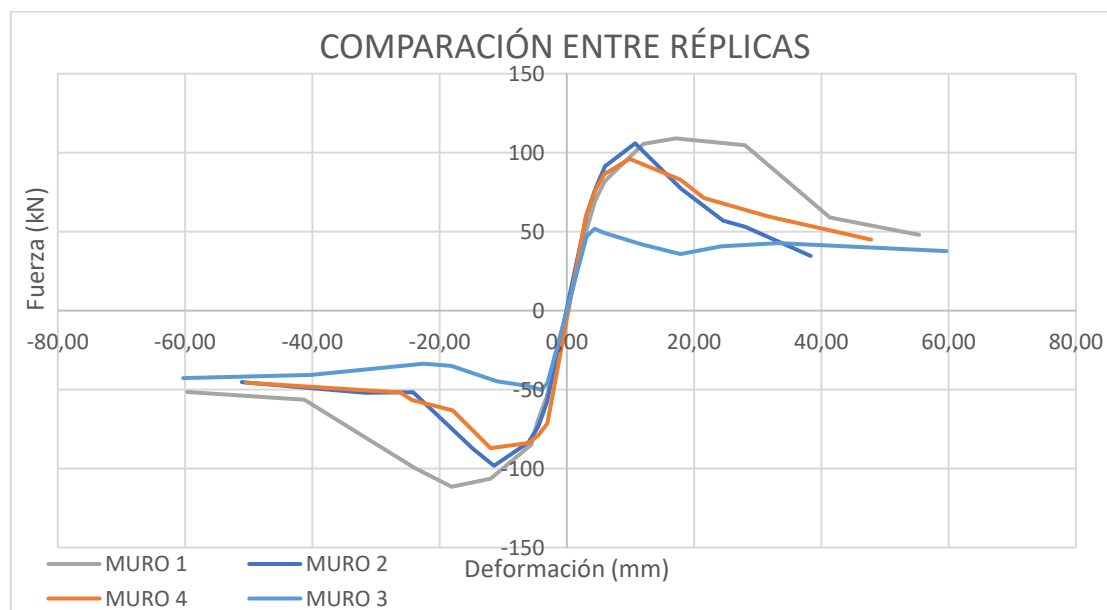
Cada muestra física durante los ensayos presento resultados muy similares entre ellas, pero no iguales, además de la existencia de una muestra cuyos resultados fueron completamente distintos a los esperados, aunque también tuvo relevancia dentro de los estudios y evaluaciones realizadas durante la práctica de esta muestra.

Dentro de los ensayos experimentales, la muestra número 3 ha presentado una capacidad muy baja frente a las réplicas cuya capacidad fue mayor, lo cual llamó la atención pues las muestras anteriores habían presentado resultados muy similares entre ellas, pero luego de revisarla, se detectó que presentó problemas a través de la suelda entre la placa de acero y los elementos de borde, justificando la caída de su capacidad, aunque mantuvo cierta capacidad, la cual se atribuye a la existencia de los rigidizadores que no corrieron con el mismo



problema, impidiendo que el trabajo de responder ante la carga aplicada sea cubierta por únicamente el pórtico.

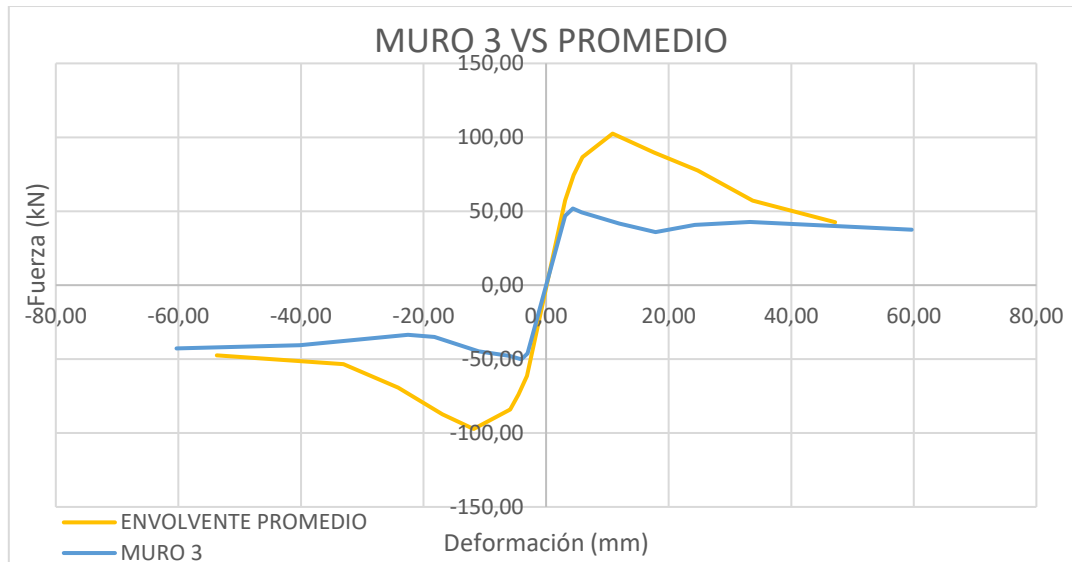
Para entender mejor este fenómeno, se ha creado una gráfica comparativa entre las envolventes de las muestras donde se refleja el trabajo del muro 3 en comparación a los otros, reflejando de esta manera la posible causa de la falla prematura del muro pues sus comportamientos finales son muy similares, el único cambio evidente entre las envolventes comparadas es la curva de la resistencia máxima alcanzada.



**Figura 132.** Muro SPSW rigidizado: comparación de envolventes entre muestras.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

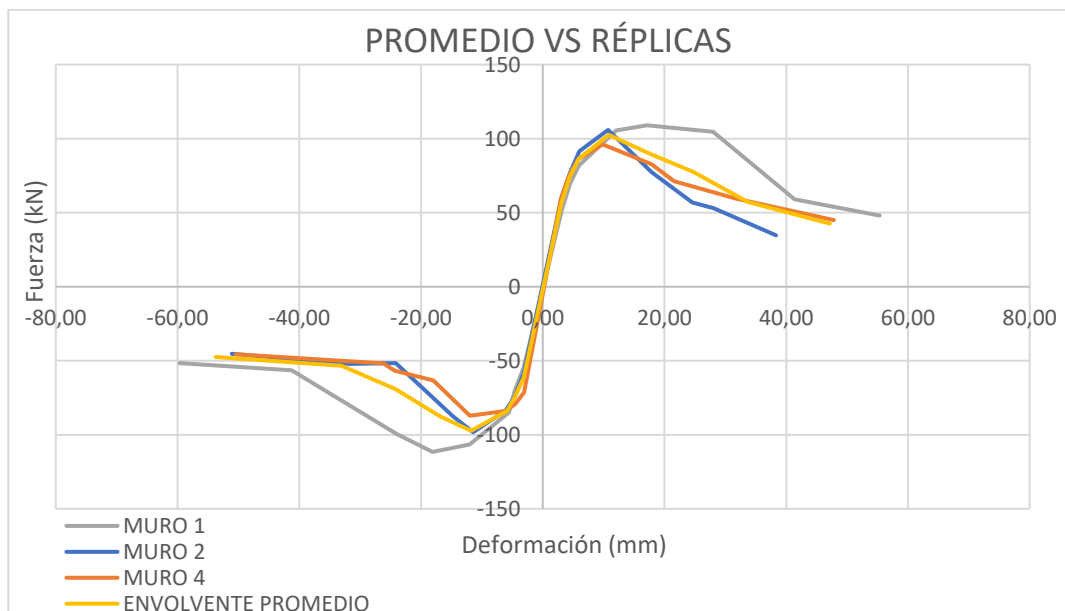
Como se puede ver en la comparación (figura 132), la curva de los muros 1, 2 y 4 presenta una curva donde se refleja la resistencia máxima de cada uno de estos muros; a partir de esta lectura, la curva decae hasta un valor aproximado de 42,57kN (4,34Ton) calculado en la envolvente promedio (figura 115). Por otro lado, si se observa la envolvente del muro 3, su resistencia máxima fue de 49,23kN y, luego de presentarse la falla por cedencia de la suelda en el perímetro de la plancha, el valor se mantuvo alrededor de 39kN (3,98Ton), el cual es un valor muy cercano a este promedio.

Para poder visualizar mejor esta comparación, se presenta la figura 133 que relaciona los resultados de la envolvente promedio vs los resultados del muro 3, de esta manera se puede percibir un área que puede ser asumida como el aporte de la placa mientras se sujeta con los elementos de borde, una vez que termina el funcionamiento de la placa, los valores comienzan a acercarse a los obtenidos en el muro 3, cuya envolvente puede ser tratada como una lectura del funcionamiento de los ángulos a través de la meseta que se observa desde una deformación de 0,58cm hasta una deformación de 5,97cm. Claro está que esta descripción también puede ser percibida en la figura 132, porque las envolventes de los muros 1, 2 y 4 también muestran un área adicional por encima de la meseta del muro 3.



**Figura 133.** Muro SPSW rigidizado: comparación de envolventes entre el muro 3 vs promedio.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Por otro lado, al observar las curvas envolventes de las muestras 1, 2 y 4, también se observa ciertos cambios entre ellas y, especialmente, con la curva representativa del muro 1, la cual refleja un resultado muy bueno por parte de este muro ante la aplicación de cargas cíclicas. Llevando las curvas envolventes a una gráfica comparativa, se puede ver como varía la energía absorbida por cada muestra en comparación con el promedio, lo cual también es una clara evidencia de la capacidad que puede desarrollar la estructura al llevar un buen control del acabado de solda.



**Figura 134.** Muro SPSW rigidizado: comparación de envolventes entre muros representativos vs promedio.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

Para tener una mejor percepción de la diferencia de energía entre las muestras de los muros SPSW rigidizados, se ha comparado las magnitudes obtenidas del

cálculo del área cubierta por la envolvente de cada representación de este muro, teniendo en cuenta que para este caso los muros 1, 2 y 4 se han asumido como representativos por su similitud, y el muro 3 con el promedio de las muestras 1, 2 y 4 se han definido como referencias, obteniendo las siguientes comparaciones:

**Tabla 53**

Comparación de energía absorbida entre los muros 1, 2 y 4 frente al muro 3.

COMPARACIÓN DE ENERGÍA: M(1,2,4) VS M3					
Muestra	Energía		Diferencia		Observaciones
	kN-m	Ton-cm	kN-m	Ton-cm	
1	8,890	90,620	4,118	41,980	Réplicas rigidizadas
2	5,618	57,267	0,846	8,626	
4	6,136	62,552	1,365	13,911	
3	4,772	48,640	-	-	Atípico

**Tabla 54**

Comparación de energía absorbida entre los muros 1, 2 y 4 frente al promedio.

COMPARACIÓN DE ENERGÍA: M(1,2,4) VS PROMEDIO					
Muestra	Energía		Diferencia		Observaciones
	kN-m	Ton-cm	kN-m	Ton-cm	
1	8,890	90,620	2,142	21,836	Réplicas rigidizadas
2	5,618	57,267	1,130	11,518	
4	6,136	62,552	0,611	6,233	
Promedio	6,748	68,784	-	-	Promedio

Recogiendo las comparaciones de las tablas 53 y 54, la energía disipada por los muros 1, 2 y 4 es mayor a la disipada por el muro 3 (caso atípico), donde el muro 1 ha presentado el valor más alto de capacidad de energía disipada con respecto a las demás muestras, pues su capacidad supera al muro 3 con una diferencia de 4,12kNm (41,98Ton-cm), un valor que casi iguala a la energía total de este caso atípico, pues la energía total disipada por el muro 1 fue de casi el doble del muro 3; teniendo en cuenta esta diferencia y las características presentadas por cada una de estas muestras, es claro que esta diferencia de disipación de energía se debe a las condiciones de suelda desarrolladas en el muro 1 frente a las conseguida en el muro 3.

Complementando estos resultados con los de la tabla 54, también se observa con claridad este hecho, pues el muro 1 supera al promedio con una diferencia de energía disipada de 2,14kNm (21,84Ton-cm), mientras que las muestras 2 y 4 presentan una diferencia por debajo del promedio, las cuales son de 1,13kNm (11,52Ton-cm) y 0,61kNm (6,23Ton-cm) respectivamente; este comportamiento donde los muros 2 y 4 son más cercanos al promedio se debe a que, en cantidad, ambas muestras presentaron condiciones muy similares de acabado en el trabajo de suelda, mientras que el muro 1 fue el único que obtuvo una calidad de suelda mucho mejor frente a las dos anteriores, inclusive por encima del caso

obtenido en el muro 3, donde debido a un acabado “deficiente”, se obtuvo esta gran diferencia de capacidades.

Otras comparaciones muy interesantes se obtienen al evaluar la diferencia de capacidades entre el caso atípico (muro 3) versus el promedio de envolventes obtenido de los casos más representativos, y la diferencia de capacidades entre el muro 1 frente a los muros 2 y 4 que fueron los más similares entre ellos. Al comparar las capacidades de energía desarrolladas por el muro 3 y por el promedio representativo del modelo, se tiene que la capacidad del muro 3 se encuentra por debajo del promedio con una diferencia de 1,98kNm (20,14Ton-cm), llegando a obtener una gran pérdida de capacidad por la falla desarrollada en el muro. Para las comparaciones entre el muro 1 frente a los muros 2 y 4, se tiene la siguiente tabla:

**Tabla 55**

Comparación de energía absorbida entre los muros 2 y 4 frente al muro 1.

COMPARACIÓN DE ENERGÍA: M(2,4) VS M1					
Muestra	Energía		Diferencia		Observaciones
	kN-m	Ton-cm	kN-m	Ton-cm	
2	5,618	57,267	3,27	33,35	Réplicas rigidizadas
4	6,136	62,552	2,75	28,07	
1	8,890	90,620	-	-	

Como se puede ver en la tabla 55, la comparación de capacidades demuestra que, debido a que los muros 2 y 4 presentaron una degradación de la resistencia más temprana que la desarrollada por el muro 1, su capacidad de disipar energía se vio grandemente afectada, pues el muro 2 se encuentra por debajo del muro 1 con una diferencia de 3,27kNm (33,35Ton-cm) y el muro 4 también se encuentra por debajo del muro 1 con una diferencia de 2,75kNm (28,07Ton-cm); estas diferencias de capacidad son valores muy importantes de energía que pudo haber sido aprovechada si las condiciones de suelda se acercaban a las practicadas en el muro 1, pues estas diferencias son casi similares a la obtenida en la comparación del muro 3 con el promedio del modelo desarrollado en el estudio.

Con respecto a la resistencia de los muros SPSW rigidizados, se tiene que las muestras 1, 2 y 4 alcanzaron valores muy similares, aunque el muro 1 sigue siendo el mejor de los casos presentados, mientras que el muro 3 (caso más deficiente), entregó una resistencia por debajo del promedio; esto complementa la necesidad de controlar el trabajo de suelda en la placa de acero, pues al combinar los resultados de resistencia y energía disipada, se puede ver que al obtener valores altos de estas dos características, las fuerzas externas no afectan significativamente a la estructura, reduciendo la tendencia de presentarse daños y posibles fracturas peligrosas en los elementos estructurales, donde si uno de estos muros trabaja por debajo de su resistencia, la necesidad de intervenirlo es mínima en comparación a uno que trabaje por encima de su límite; en tal caso, se espera que el muro sea capaz de amortiguar

la fuerza antes de presentarse fallas peligrosas, para lo cual es necesario asegurar que los muros sean capaces de absorber gran cantidad de energía, manteniendo la resistencia en un intervalo grande de desplazamientos.

**Tabla 56**

Comparación de resistencias: muros 1, 2 y 4 vs muro 3.

COMPARACIÓN DE RESISTENCIA: M(1,2,4) VS M3					
Muestra	Resistencia		Diferencia		Observaciones
	kN	Ton	kN	Ton	
1	111,530	11,369	59,700	6,086	Réplicas rigidizadas
2	105,900	10,795	54,070	5,512	
4	96,080	9,794	44,250	4,511	
3	51,830	5,283	-	-	Atípico

**Tabla 57**

Comparación de resistencias: muros 1, 2 y 4 vs promedio.

COMPARACIÓN DE RESISTENCIA: M(1,2,4) VS PROMEDIO					
Muestra	Resistencia		Diferencia		Observaciones
	kN	Ton	kN	Ton	
1	111,530	11,369	9,030	0,920	Réplicas rigidizadas
2	105,900	10,795	3,400	0,347	
4	96,080	9,794	6,420	0,654	
Promedio	102,500	10,449	-	-	Promedio

**Tabla 58**

Comparación de resistencias: muros 2 y 4 vs muro 1.

COMPARACIÓN DE RESISTENCIA: M(2,4) VS M1					
Muestra	Resistencia		Diferencia		Observaciones
	kN	Ton	kN	Ton	
2	105,900	10,795	5,63	0,57	Réplicas rigidizadas
4	96,080	9,794	15,45	1,57	
1	111,530	11,369	-	-	

Desde luego, si la estructura entra en el rango elastoplástico, es muy posible que los muros presenten deformaciones (daños) considerables, con lo cual se debe intervenir los elementos dañados para reemplazarlos en caso de mantener una edificación y, aunque estos elementos lleguen a ser reemplazados en caso de presentarse este comportamiento, es preferible que los muros puedan absorber una buena cantidad de energía para evitar la formación de fisuras peligrosas que, en caso de fracturarse los elementos, pueden ocasionar serias afectaciones humanas.

Debido a que, durante la ejecución de los ensayos se detectó este problema, se tomó como referencia el acabado de suelda practicado en los muros 2 y 4, para evitar que la muestra 6 no pueda ser utilizada como un modelo referencial del cual se pueda realizar comparativas con las muestras desarrolladas del muro SPSW rigidizado.

### 5.5.2. MODELO PRELIMINAR VS MODELO CORREGIDO

En las secciones 5,1 y 5,4 se ha presentado los resultados del modelo matemático antes del desarrollo de los ensayos en los modelos físicos y después de ejecutarlos, pues debido a los valores obtenidos durante las pruebas, fue necesario realizar una revisión de los cálculos preliminares para reemplazar las características que requerían ser comprobadas durante la práctica experimental.

Con las correcciones cubiertas luego de reemplazar las características de los materiales principales, se han obtenido otras resistencias estimadas para los modelos de los muros SPSW sin rigidizar y rigidizado, donde la diferencia se obtiene al añadir el aporte de los atiesadores en la resistencia nominal del muro; y también se han obtenido cambios muy importantes en las deformaciones desarrolladas producto de la aplicación de una carga similar a la resistencia del muro SPSW rigidizado. Estas comparaciones se las presenta en las siguientes tablas:

**Tabla 59**

Comparación de resistencias entre resultados preliminares vs corregidos.

COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS: MODELOS MATEMÁTICOS				
Elemento aportante	Preliminar		Corregido	
	kN	Ton	kN	Ton
Vigas	21,998	2,242	28,158	2,870
Placa de acero	170,175	17,347	124,228	12,663
Rigidizadores	74,064	7,550	66,755	6,805
MSR (nominal)	192,174	19,590	152,386	15,534
MCR (nominal)	266,238	27,139	219,141	22,339
MSR (factorada)	172,956	17,631	137,147	13,980
MCR (factorada)	239,614	24,425	197,227	20,105

**Tabla 60**

Comparación de deformaciones entre resultados preliminares vs corregidos.

COMPARACIÓN DE DEFOMRACIONES: MODELOS MATEMÁTICOS				
Valor	Preliminar		Corregido	
	mm	cm	mm	cm
1 (máximo)	8,229	0,823	97,838	9,784
2	7,315	0,732	86,967	8,697
3	6,400	0,640	76,096	7,610
4	5,486	0,549	65,225	6,523
5	4,572	0,457	54,354	5,435
6	3,657	0,366	43,483	4,348
7	2,743	0,274	32,613	3,261
8	1,829	0,183	21,742	2,174
9	0,914	0,091	10,871	1,087
10	0	0	0	0



Como se puede ver en la tabla 59, la resistencia nominal aportada por las vigas aumenta luego de la corrección, pero el aporte de la placa de acero y de los rigidizadores disminuyen, con lo cual las resistencias nominal y factorada de los muros SPSW sin rigidizar (MSR) y rigidizados (MCR) también disminuyen, pero en el caso de los desplazamientos desarrollados por la carga aplicada, estos aumentan en una proporción de aproximadamente 12 veces los desplazamientos preliminares (tabla 60).

Además, debido a los nuevos valores del módulo de Young ingresados en los cálculos, se ha asumido que el módulo correspondiente a las columnas pase de 200GPa a 20GPa, puesto que los valores obtenidos de las muestras que representan los elementos complementarios, presentaron valores de entre 5GPa a 19GPa, lo cual influyó en el algoritmo de MATLAB donde clasificó a las columnas como “esbeltas” y, producto de esta evaluación, la resistencia disminuyó con una diferencia muy marcada a los valores preliminares; esta comparación se representa en la siguiente tabla:

**Tabla 61**

Resultado de columnas: cálculo preliminar vs corregido

COMPARACIÓN DE CÁLCULOS EN COLUMNAS				
Criterio	Preliminar		Corregido	
	Resultado	Unidad	Resultado	Unidad
Clasificación (x)	Compacto	-	Esbelto	-
Resistencia eje x	591,595	kN	60,904	kN
Clasificación (y)	No comp.	-	Esbelto	-
Resistencia eje y	340,625	kN	34,799	kN

Como se puede ver en la tabla 61, los resultados reflejan una gran diferencia entre ellos, donde los nuevos resultados presentan una resistencia de aproximadamente 10 veces lo obtenido en el cálculo preliminar y, debido a que la resistencia de los muros todavía representan cantidades considerables, se podría concluir de que las columnas van a fallar antes que la placa interna, pero debido a que el diseño ya se encuentra cubierto por los resultados obtenidos tanto en ANSYS como en los ensayos practicados, se ha descartado esta observación enfocando más la comparación de la capacidad del muro SPSW rigidizado a la aplicación de cargas de tipo cortantes; esto también se puede justificar puesto que en el cálculo de la resistencia del muro, se calcula el aporte de las vigas, la placa y los rigidizadores, donde no interviene las columnas, pero si es necesario enfatizar la revisión de la capacidad de las columnas y del pórtico en general puesto que, si no se revisa su resistencia, se puede presentar fallas prematuras en estos elementos por capacidades insuficientes a comportamientos complementarios.

Con respecto a los resultados de las deformaciones presentadas en ANSYS, observando las figuras 103 y 104 correspondientes a los cálculos preliminares, y al compararlas con las figuras 130 y 131 que representan los cálculos corregidos, prácticamente los muros presentan comportamientos muy similares

donde, para los desplazamientos en el eje de aplicación de la carga, se presenta una concentración de cargas en la parte superior, y la placa presenta concentraciones en las esquinas inferiores, donde la diferencia entre el modelo preliminar y el corregido es más en la esquina donde se produce esta concentración, dando a entender que las fallas en los muros se presentan en estos espacios, además, entre ambos modelos no se percibe deformaciones considerables en los elementos de borde, con lo cual se puede creer que las vigas y las columnas son suficientes para responder a la aplicación de cargas cíclicas.

Hay que recalcar que, para el cálculo de la sección mínima de las columnas y, en general, de los elementos de borde, están planteadas las ecuaciones 5 y 6 con las cuales se estima que las columnas y las vigas son suficientes para soportar la distribución de esfuerzos, pero esto todavía no se ha establecido con firmeza puesto que, en los estudios presentados de los muros SPSW de alma perforada y que incluyen el uso de secciones reducidas en las vigas (RBS), se muestra un problema presentado durante el estudio, donde uno de los muros presentó fallas por una fractura desarrollada en una de sus vigas; adicionalmente esta observación se presenta en el libro "Diseño Sismorresistente de Construcciones de Acero", pues debido a que la teoría presentada en el mismo se basa en los estudios realizados para los muros de alma perforada, se considera que el uso de estas fórmulas no es suficiente para cubrir la comprobación de los elementos de borde. Por último, para evitar cualquier problema similar al desarrollado en el estudio desarrollado por Michel Bruneau, teniendo en cuenta esta observación mencionada, se ha añadido en el algoritmo de MATLAB el proceso de clasificación de las columnas y el cálculo para la resistencia de las columnas a la compresión, tratando de dar un mayor soporte a la obtención de una sección adecuada para las columnas; este cálculo se ha usado durante el proceso de obtención de una geometría para la presentación de un modelo de ensayo, con el fin de conseguir perfiles de elementos basados en los utilizados para el estudio de los muros SPSW de alma perforada, donde los cambios más relevantes fueron el uso de tubos rectangulares en vez de los perfiles tipo W, el cambio de relación altura/base y el uso de vigas cuya sección es menor que la esperada (ver el estudio de muros SPSW de alma rigidizada) (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, 2009) (Crisafulli, 2018).

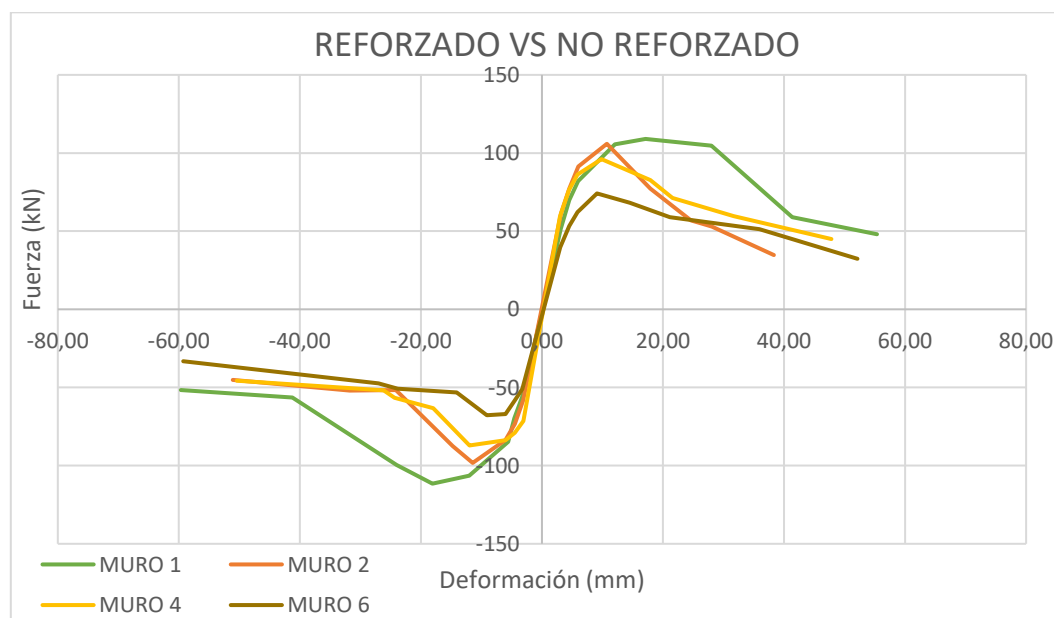
Estas comparaciones han permitido observar las distintas posturas que puede presentar el cálculo desarrollado dependiendo de los valores que se ingresen tanto en las hojas de datos como en las ventanas provistas por el software, donde el arreglo de procesos matemáticos plasmados en las fórmulas matemáticas, dan relevancia a las variables introducidas mediante las cuales se espera conseguir resultados muy cercanos a la realidad.

### **5.5.3. MURO RIGIDIZADO VS MURO BASE VS PÓRTICO**

En la sección 5.5.1 se compararon los resultados obtenidos de las muestras que representan al modelo del muro SPSW rigidizado, concluyendo de esta manera con un promedio que refleje los resultados del modelo en general, ahora con este

promedio y volviendo a utilizar los resultados de cada una de las réplicas, se compara el muro SPSW rigidizado con el muro sin rigidizadores y con el pórtico que recibe las dos distintas configuraciones del alma.

Comparando primeramente cada réplica del muro rigidizado con el muro sin rigidizar, se tiene que cada una de ellas presenta una capacidad mayor de disipar energía, donde su límite de resistencia supera a la obtenida en el muro sin rigidizar; sin embargo, haciendo referencia nuevamente a la calidad del acabado de suelda, como el acabado en los muros 2 y 4 fue menos eficiente que la desarrollada en el muro 1, una vez cumplida la resistencia, la caída de este valor fue muy fuerte provocando que la energía disipada por los muros 2 y 4 (rigidizados) no presenten mucha diferencia con el muro 6 (sin rigidizar), perdiéndose una buena cantidad de energía debido a una degradación muy rápida de la resistencia de estos dos muros. A continuación, se presentan las envolventes comparadas y las tablas con los respectivos resultados de energía con los cuales se ha obtenido la diferencia de energía entre cada modelo desarrollado:



**Figura 135.** Comparación de envolventes entre los muros rigidizados con el muro no rigidizado.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

**Tabla 62**

Comparación de energía disipada por cada muro rigidizado frente al muro no rigidizado.

COMPARACIÓN DE ENERGÍA: M(1,2,4) VS M6					
Muestra	Energía		Diferencia		Observaciones
	kN-m	Ton-cm	kN-m	Ton-cm	
1	8,890	90,620	3,45	35,13	Réplicas rigidizadas
2	5,618	57,267	0,17	1,78	
4	6,136	62,552	0,69	7,06	
6	5,444	55,490	-	-	No rigidizado

Como se puede ver en la figura 135, los muros 2 y 4 presentaron una degradación muy rápida de su resistencia y un desarrollo de desplazamientos menores, por lo que su capacidad de absorber energía no presenta mucha diferencia con la disipada por el muro 6 (no rigidizado), siendo el caso más deficiente el muro 2, puesto que su envolvente se cruza con la presentada por el muro 6, comportamiento que no se repite en los muros 4 y 1, donde el muro 4 si supera con un poco más la capacidad de energía absorbida por el muro sin rigidizar; por otra parte, el muro 1 supera enormemente al muro 6 ya que su acabado de suelda fue mucho más eficiente, permitiendo que la degradación de su resistencia sea más progresiva y más lenta, aprovechando de mejor manera cada parte de su estructura compositiva para disipar la mayor cantidad de energía posible.

Estas características se pueden acompañar con las presentadas en la tabla 62, donde los valores representan aquella energía adicional que disiparon los muros 1, 2 y 4 frente a la energía total disipada por el muro 6, siendo el más relevante el muro 1 cuyo aporte adicional fue de 3,45kNm (35,13Ton-cm); por lo demás, en resistencia los muros 1, 2 y 4 presentaron un límite muy similar y superior a la resistencia obtenida por el muro sin rigidizar, obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 63**

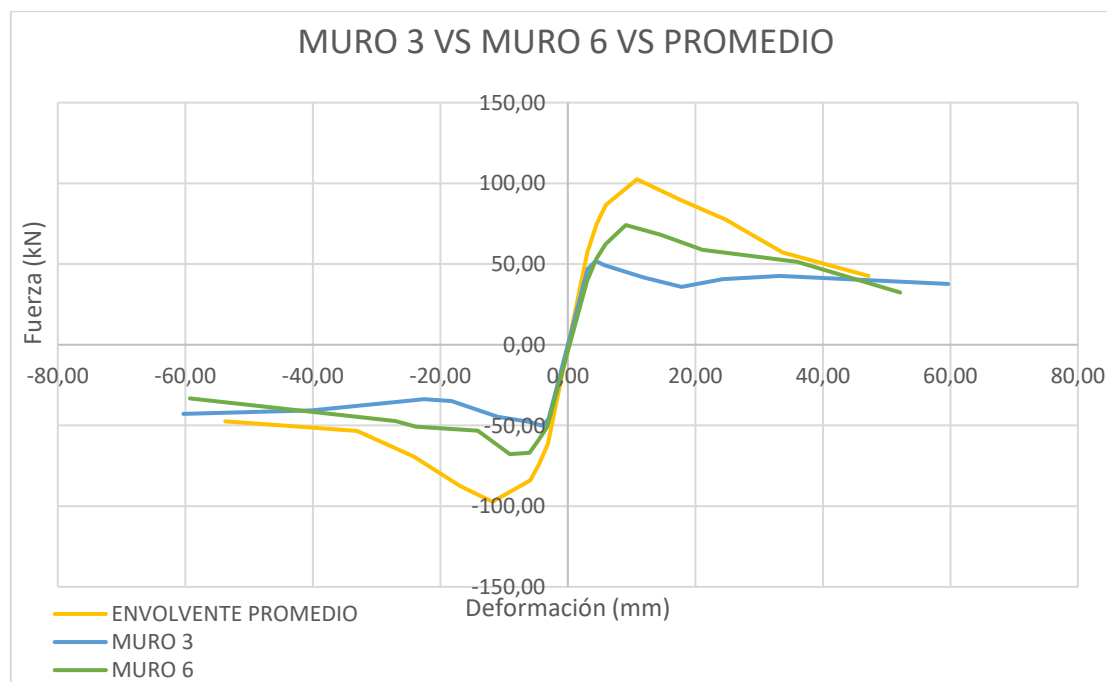
Comparación de resistencias: muros 1, 2 y 4 vs muro 6.

COMPARACIÓN DE RESISTENCIA: M(1,2,4) VS M6					
Muestra	Resistencia		Diferencia		Observaciones
	kN	Ton	kN	Ton	
1	111,530	11,369	37,39	3,81	Réplicas rigidizadas
2	105,900	10,795	31,76	3,24	
4	96,080	9,794	21,94	2,24	
6	74,140	7,558	-	-	No rigidizado

Una vez más, según la tabla 63, el muro 1 presenta los mejores resultados, puesto que su resistencia está por encima del muro 6 con una diferencia de 37,39kN (3,81Ton); un resultado interesante de estas comparaciones entre las tablas 62 y 63 es que el muro 2 presenta una capacidad de energía con una diferencia de 0,17kNm (1,78Ton-cm), pero en resistencia presenta una diferencia de 31,76kN (3,81Ton), ambas diferencias por encima del muro 6, mientras que el muro 4 presenta una diferencia de energía disipada de 0,69kNm (7,06Ton-cm) pero en resistencia su diferencia es de 21,94kN (2,24Ton), así mismo por encima del muro sin rigidizar; con esto se puede ver que el muro 2 es mejor en resistencia que el muro 4, pero el muro 2 no es tan capaz de absorber energía como el muro 4, siendo el muro 2 el que tiene más resistencia que los muros 4 y 6, y el muro 4 es el que disipa más energía que los muros 2 y 6, todos estos siendo superados por el muro 1. Estos resultados pueden ser comprobados en la figura 135 que esquematiza el trabajo que desarrolló cada uno de estos muros

comparados entre sí, con el fin de entender la razón de los valores presentados en las tablas 62 y 63.

Por otro lado, también es necesario comparar el muro 3 que ha sido considerado como un caso atípico y el promedio que sería el representante del muro SPSW rigidizado, con el muro 6 que representa al muro SPSW sin rigidizadores, con lo cual se puede tener una perspectiva general de la relevancia que tienen las condiciones de ensamblado frente a la implementación de sistemas que busquen mejorar un determinado diseño estructural. En la siguiente figura, se relacionan las envolventes de estos tres casos para poder percibir estos comportamientos:



**Figura 136.** Comparación de envolventes entre muros de referencia: muro 3 vs muro 6 vs promedio.  
Fuente: Elaborado por Carlos Gallegos.

En esta representación (figura 136), se puede ver como la envolvente del muro sin rigidizar se encuentra entre las dos envolventes del muro 3 y el promedio (muro SPSW rigidizado). Como ya se ha explicado antes, debido a un problema presentado en la conexión tipo suelda entre la placa de acero y los elementos de borde, es como que el muro 3 se hubiera convertido en una configuración de únicamente el pórtico y los ángulos rigidizadores, es por esto que, una vez conseguida la resistencia máxima de esta muestra, la envolvente presenta un desarrollo de dos mesetas en ambos cuadrantes del sistema fuerza vs desplazamiento o deformación, con lo cual demuestra gran capacidad de mantener la carga a lo largo de grandes desplazamientos obtenidos durante el ensayo. Tomando en cuenta este comportamiento, debido a que el muro 6 fue llevado con las mismas condiciones de suelda presentadas en los muros 1, 2 y 4, presentó mejor resistencia que la obtenida en el muro 3, pero luego de superar este valor, el muro 6 comienza a presentar un decaimiento de la resistencia conforme aumentan los desplazamientos, hasta llegar al punto en el que la resistencia cae por debajo de la presentada por el muro 3 en las mismas

condiciones de desplazamientos; esto permite ver que, una vez que la placa ha trabajado, el pórtico se libera y comienza a trabajar por sí solo puesto que no tiene ningún elemento adicional que lo pueda ayudar a mantener más tiempo la carga. Añadiendo ahora el comportamiento del modelo de muro SPSW rigidizado en general, la curva presenta mayor resistencia que los otros dos muros, luego de manera similar al muro 6 su resistencia comienza a decaer hasta cierto límite donde su resistencia es similar a la presentada por el muro 3 en las mismas condiciones de deformación o desplazamiento, donde se puede asumir que la curva promedio se empareja a la curva del muro 3, caso que si se presenta en el tercer cuadrante del sistema de coordenadas. Esto se puede asumir que, debido a que los rigidizadores todavía representan una forma de aporte al “muro promedio”, tratan de mantener ese nivel de resistencia a lo largo de los desplazamientos desarrollados, algo que nuevamente se enfatiza en el muro 3, pues directamente se asume que llegó a la resistencia de los ángulos quedando únicamente este sistema para aportar al pórtico. Para complementar esta información, se presentan las siguientes tablas:

**Tabla 64**

Comparación de capacidad de energía entre muros de referencia.

COMPARACIÓN DE ENERGÍA ENTRE REFERENCIAS			
Referencia	Energía		Observaciones
	kN-m	Ton-cm	
M3	4,772	48,640	Atípico
M6	5,444	55,490	No rigidizado
Promedio	6,748	68,784	Promedio
Diferencia	1,976	20,144	M3 vs Prom.
	0,672	6,850	M3 vs M6
	1,304	13,294	M6 vs Prom

**Tabla 65**

Comparación de resistencias entre muros de referencia.

COMPARACIÓN DE RESISTENCIA ENTRE REFERENCIAS			
Referencia	Resistencia		Observaciones
	kN	Ton	
M3	51,830	5,283	Atípico
M6	74,140	7,558	No rigidizado
Promedio	102,500	10,449	Promedio
Diferencia	50,670	5,165	M3 vs Prom.
	22,310	2,274	M3 vs M6
	28,360	2,891	M6 vs Prom



Hablando primero en términos de energía, la tabla 64 presenta la capacidad correspondiente a cada muro de referencia, para luego comparar estos valores entre los muros con el fin de observar ciertas características de cada uno de ellos; parte de esto se observa en la comparación de envolventes (figura 136), pues a partir de ellas se determina los valores de energía y de resistencia. Comparando la capacidad de energía entre el muro 3 y el promedio, se observa que la energía disipada por el caso atípico se encuentra por debajo del promedio con una diferencia de 1,976kNm (20,144Ton-cm); por otro lado, al comparar el muro 3 con el muro 6, el muro 3 se encuentra por debajo del muro 6 con una diferencia de 0,672kNm (6,850Ton-cm); y por último, comparando el muro 6 con el promedio, el muro 6 se encuentra por debajo del promedio con una diferencia de energía disipada de 1,304kNm (13,294Ton-cm). Con estos valores, se puede ver que, en términos de energía, entre los muros 3 y 6 no existe mucha diferencia, pero tanto el muro 3 como el 6 poseen una gran diferencia de capacidad de energía con referencia al promedio; este comportamiento presentado entre los muros 3 y 6 se puede justificar debido al cruce de envolventes representado en la figura 136, mientras que la envolvente del promedio se encuentra por encima de las otras dos.

Continuando con la comparación de resistencias, así mismo la tabla 65 presenta la fuerza máxima que puede resistir cada una de las referencias (muros 3, 6 y promedio), para luego compararlas entre ellas observando la diferencia con respecto a este valor. En las comparaciones anteriores y, sujetando estos hechos con las evidencias obtenidas a través de las gráficas, se ha observado que existen casos donde ciertos muros tienen una buena capacidad de disipar energía pero su resistencia es menor en comparación a otros; esto también es posible justificar a través del cálculo de la energía absorbida por el muro, pues la energía es un concepto que relaciona el trabajo externo realizado sobre la estructura con el cambio de energía que sufre debido a la aplicación de este trabajo externo, y el trabajo se calcula a través del producto entre la fuerza y el desplazamiento (Bragado, 2003). En otras palabras, la energía disipada por el muro se obtiene a través de la combinación de fuerzas vs desplazamientos, con lo cual, si un muro no ha presentado una buena resistencia, pero ha logrado desarrollar grandes desplazamientos manteniendo el valor de fuerza resistida, absorbe una gran cantidad de energía que puede superar a un muro que, por el contrario, pudo haber presentado mejor resistencia, pero con desplazamientos menores y caídas de resistencia más pronunciadas. Siguiendo esta analogía, al comparar la resistencia entre el muro 3 y el promedio, se tiene que la resistencia del muro 3 se encuentra por debajo del promedio con una diferencia de 50,670kN (5,165Ton); así mismo, al comparar el muro 3 con el muro 6, la muestra atípica se encuentra por debajo del muro base con una diferencia de 22,310kN (2,274Ton) y, concluyendo con la última comparación, el muro base se encuentra por debajo del promedio con una diferencia de 28,360kN (2,891Ton); este comportamiento puede ser observado en la figura 136, donde la envolvente del muro base (muro 6) se encuentra entre las curvas del muro 3 y el promedio.

También es necesario llevar una comparación con el pórtico puesto que, al formar parte de los otros modelos, se debe observar cuánto es capaz de resistir

por sí solo y cuanta energía puede disipar al combinarse sus desplazamientos con la fuerza resistida, pues al presentar un comportamiento ya sea por la resistencia, por deformaciones o por ambas (energía), estos comportamientos ayudan a entender la razón de la presencia de fallas en los distintos sectores de una configuración estructural. Realizando una tabla comparativa de la resistencia y la energía disipada por el pórtico frente a las referencias, se tiene lo siguiente:

**Tabla 66**

Comparación de energía: muros referencia vs pórtico.

COMPARACIÓN DE ENERGÍA: REFERENCIAS VS PÓRTICO					
Referencia	Energía		Diferencia		Observaciones
	kN-m	Ton-cm	kN-m	Ton-cm	
3	4,772	48,640	0,03	0,31	Atípico
6	5,444	55,490	0,64	6,54	No rigidizado
Promedio	6,748	68,784	1,95	19,83	Promedio
5	4,802	48,950	-	-	Pórtico

**Tabla 67**

Comparación de resistencias: muros referencia vs pórtico.

COMPARACIÓN DE RESISTENCIA: REFERENCIAS VS PÓRTICO					
Referencia	Resistencia		Diferencia		Observaciones
	kN	Ton	kN	Ton	
3	51,830	5,283	27,07	2,76	Atípico
6	74,140	7,558	49,38	5,03	No rigidizado
Promedio	102,500	10,449	77,74	7,92	Promedio
5	24,760	2,524	-	-	Pórtico

Como se puede ver en la tabla 66, el muro 3 presenta una capacidad de energía por debajo del pórtico, con una diferencia de 30Nm (0,31Ton-cm), la cual tampoco es muy pronunciada, pues se puede asumir que su capacidad ha llegado a ser casi igual; por otro lado, el muro 6 posee una capacidad un poco más diferenciada del pórtico, logrando una diferencia por encima de 0,64kNm (6,54Ton-cm), con lo cual se puede decir que el muro ha disipado un poco más e energía que el pórtico; por último, el promedio de los muros SPSW rigidizados presenta una capacidad de energía por encima del pórtico con una diferencia de 1,95kNm (19,83Ton-cm). Por el lado de la resistencia, se tiene que el muro 3 presenta una carga máxima por encima del pórtico, con una diferencia de 27,07kN (2,76Ton); el muro 6 ha desarrollado una resistencia con una diferencia por encima del pórtico de 49,38kN (5,03(Ton), y por último, el promedio de los muros rigidizados ha presentado una resistencia por encima del pórtico cuya diferencia es de 77,74kN (7,92Ton). Haciendo énfasis en la comparación entre la resistencia alcanzada por el muro 3 frente a la desarrollada por el pórtico, se observa que gracias al aporte que presentaron los atiesadores ante la falla prematura de la placa, el muro 3 obtuvo una resistencia d más del doble que ha reflejado sólo el pórtico.

Hay que recordar que, en estas comparaciones, el pórtico ha sido ensayado bajo una carga unidireccional (monotónica), donde la resistencia alcanzada puede ser representativa para evidenciar la diferencia con los muros, pero en energía, la curva carga-desplazamiento del pórtico (figura 116) sólo demuestra un aporte de absorción para una carga que somete a la estructura a una falla por fuerzas que sobrepasan su límite ante un sólo estado de carga, es decir que la estructura sólo trabaja una vez, mientras que en un ensayo cíclico, la carga es reversible, sometiendo a la estructura a trabajar varias veces conforme se desarrollan los denominados “ciclos de carga”, con lo cual se evalúa la postura de los muros ante distintos estados de carga, siendo más representativa la energía disipada durante cada ciclo de trabajo, pero debido a que el pórtico ha presentado gran capacidad de desplazamientos, superando inclusive la capacidad de lectura de los equipos, se puede tomar como referencia estas características presentadas durante el ensayo del pórtico, pues comparando este comportamiento desarrollado por la muestra 5 en comparación a las muestras que representan los modelos de los muros SPSW, una vez que cada muro cumplía con su trabajo, sus desplazamientos fueron menores al presentado por las columnas y las vigas, por lo que se puede considerar que la energía disipada por el pórtico durante el ensayo monotónico, es bastante representativa.

Con todas estas comparaciones, se ha observado que los muros rigidizados han conseguido superar la resistencia de un muro SPSW sin rigidizar, pero este resultado sólo puede ser asegurado si se lleva un buen control del trabajo de suelda desarrollado en el alma del muro, puesto que, si este trabajo no presenta un desarrollo de conexiones “seguras”, aunque los rigidizadores se encuentren colocados, la resistencia se verá afectada si la placa de acero se desprende de las columnas y las vigas, obteniendo una resistencia menor a la desarrollada por un muro con placa sin rigidizar y, en términos de energía, aunque la resistencia mejore en el muro rigidizado, se puede conseguir una capacidad de energía similar a la de un muro sin rigidizadores, donde el muro sólo aporta mayoritariamente mientras no se supere su límite.

#### **5.5.4. MODELOS FÍSICOS VS MODELOS MATEMÁTICOS**

Para entender lo ocurrido durante los ensayos ejecutados, se debe comparar los valores recogidos a través del cálculo, que permite estimar la resistencia y deformaciones que puede sufrir la estructura durante el estudio, con los valores reales obtenidos de las lecturas presentadas por los equipos de ensayo, pues todo lo ocurrido durante el ensamblado, montaje y práctica de las evaluaciones pertinentes, poseen una relación con los modelos matemáticos desarrollados.

Como el presente estudio contempla un diseño preliminar y la práctica de pruebas de laboratorio con ejemplares físicos del diseño concebido, se ha comparado primero el cálculo previo con los valores reflejados por los muros durante el ensayo, de tal manera que se pueda seguir determinando cualquier condición presentada por los muros durante las evaluaciones desarrolladas. A continuación, se muestra la tabla 68 que refleja la resistencia calculada en el diseño preliminar con la resistencia reflejada por los muros que representan a

cada modelo de referencia, en el cual se ha determinado una eficiencia previa debido a los valores entregados en la realidad, lo cual también justifica el problema encontrado durante el ensayo que corresponde a la conexión entre la placa de acero y los elementos de borde, llegando a los siguientes resultados:

**Tabla 68**

Comparación de resistencias entre valores preliminares vs ensayos ejecutados.

<b>RESISTENCIA: MODELOS FÍSICOS VS MODELO PRELIMINAR</b>				
<b>Modelo</b>	<b>Identificación</b>	<b>Resistencia</b>		<b>Eficiencia</b>
		kN	Ton	%
SPSW rigidizados	C. Preliminar	266,238	27,139	-
	1	111,530	11,369	41,891
	2	105,900	10,795	39,776
	3	51,830	5,283	19,468
	4	96,080	9,794	36,088
	Promedio	102,500	10,449	38,499
Pórtico (vigas)	C. Preliminar	21,998	2,242	-
	5	24,760	2,524	112,556
SPSW sin rigidizadores	C. Preliminar	192,174	19,590	-
	6	74,140	7,558	38,580
Rigidizadores	C. Preliminar	74,064	7,550	-
	Prom. vs M6	28,360	2,891	38,291

Observando la resistencia desarrollada por las muestras en la práctica, en primer lugar se ve que los valores reales distan en gran medida de los calculados, lo cual da a entender que se desarrolló un problema durante el ensamblado de los muros que redujo su capacidad, pero luego de procesar estos resultados, se observa que la eficiencia desarrollada por la mayoría de las muestras es muy similar, llegando a un porcentaje aproximado de eficiencia de un 38%, siendo los casos más críticos: el muro 1, muro 3 y el pórtico. Mientras el muro 1 desarrolló una eficiencia por encima del promedio (41,89%), el muro 3 fue el más deficiente, con una eficiencia de 19,57%, pero las vigas obtuvieron una resistencia por encima de lo calculado, lo cual en términos de eficiencia entregó un porcentaje de 112,56%; entonces, al recoger estos resultados y observar lo ocurrido durante los ensayos, se pudo concluir de manera eficiente que el problema no viene por el lado del pórtico cuyo valor representativo es la resistencia obtenida en las vigas, sino que se presentó en el alma de los muros y, volviendo al tema de la curva envolvente presentada por el muro 3 con respecto a lo observado durante el ensayo, se confirma de que el problema se dio en la conexión entre la placa de acero con los elementos de borde, donde la eficiencia reflejada representa la calidad de la suelta utilizada entre estos elementos de acero. Debido a la eficiencia obtenida por la resistencia del pórtico, se puede justificar que las eficiencias obtenidas todavía no son las reales, pues debido a que los valores ingresados preliminarmente son datos idealizados, estos valores todavía no se acercan a los reales, con lo cual se justifica la necesidad de ingresar aquellos

valores de las propiedades reales entregadas por los materiales en los ensayos, para que los resultados obtenidos de eficiencia sean más reales.

Antes de pasar a las comparaciones con los cálculos corregidos, también se han comparado las deformaciones obtenidas en el cálculo preliminar con los obtenidos durante la ejecución de los ensayos, para observar la diferencia de los desplazamientos estimados frente a los obtenidos en los ejemplares de muestra, los cuales reflejan la realidad de los hechos por las condiciones de ensamblado y estudio.

**Tabla 69**

Comparación de desplazamientos: resultados preliminares vs ensayos ejecutados.

DEFORMACIÓN: MODELOS FÍSICOS VS MODELO PRELIMINAR				
Modelo	Identificación	Desplazamientos		Eficiencia
		mm	cm	%
SPSW rigidizados	C. Preliminar	8,229	0,823	-
	1	59,670	5,967	725,118
	2	51,090	5,109	620,853
	3	60,310	6,031	732,896
	4	50,430	5,043	612,833
	Promedio	53,730	5,370	652,935

Como se puede ver en la tabla 69, el desplazamiento máximo calculado en el modelo apenas cubre unos 8,23mm, mientras que los desplazamientos máximos obtenidos en los muros se encuentran alrededor de 50mm, siendo el promedio un valor de 53,73mm, por lo que al calcular en porcentaje de eficiencia, se obtiene que los porcentajes entregan valores cuyo promedio es de 652,94%, con lo cual se podría decir que existe algún problema con los datos ingresados en la ventana de propiedades presentada por el software ANSYS.

Tomando en cuenta estos resultados presentados por el diseño preliminar y los reflejados durante el ensayo, se ha desarrollado un estudio del acero involucrado en los elementos principales que aportan a la resistencia de los muros modelados, con el fin de obtener las características reales del material para corregirlos en la ventana de datos proporcionada por el programa, y calcular nuevamente los valores de resistencia de los muros y desplazamientos del modelo. Una vez obtenidos los resultados corregidos, se ha comparado nuevamente los resultados entregados en el ensayo de los ejemplares con los presentados por el cálculo corregido, comenzando así mismo con la resistencia.

**Tabla 70**

Comparación de resistencias entre valore corregidos vs ensayos ejecutados.

<b>RESISTENCIA: MODELOS FÍSICOS VS MODELO CORREGIDO</b>				
<b>Modelo</b>	<b>Identificación</b>	<b>Resistencia</b>		<b>Eficiencia</b>
		kN	Ton	%
SPSW rigidizados	C. Corregido	219,141	22,339	-
	1	111,530	11,369	50,894
	2	105,900	10,795	48,325
	3	51,830	5,283	23,651
	4	96,080	9,794	43,844
	Promedio	102,500	10,449	46,774
Pórtico (vigas)	C. Corregido	28,158	2,870	-
	5	24,760	2,524	87,932
SPSW sin rigidizadores	C. Corregido	152,386	15,534	-
	6	74,140	7,558	48,653
Rigidizadores	C. Corregido	66,755	6,805	-
	Prom. vs M6	28,360	2,891	42,484

Como se puede ver en la tabla 70, la resistencia que se obtiene a través del algoritmo de MATLAB, se redujo acercándose un poco a los valores obtenidos por cada uno de los muros probados, llegando a incrementarse la eficiencia a un valor más real, donde los porcentajes obtenidos llegan a presentar valores alrededor de un 47%, donde le promedio de eficiencia de los muros SPSW rigidizados es de 46,77%, siendo nuevamente el más eficiente el muro 1, cuyo porcentaje de eficiencia fue de 50,89% y el muro 3 como el más deficiente con un porcentaje de 23,65%. En este caso, el pórtico obtuvo una eficiencia más real, donde debido al incremento de la resistencia calculada de las vigas, el porcentaje se redujo por debajo del 100%, llegando a presentar una eficiencia de 87,93%, demostrando con más seguridad que el problema presentado durante los ensayos tiene que ver con la conexión entre el alma de los muros con los elementos de borde.

Como un adicional, luego de observar que las eficiencias entre el modelo rigidizado y el modelo sin rigidizar son muy similares, donde la eficiencia del muro 6 fue de 48,65%, se ha restado la resistencia promedio alcanzada por el muro SPSW rigidizado con la resistencia presentada por el muro 6 (SPSW sin rigidizar), con el fin de obtener un valor de resistencia aportada por los atiesadores, y luego de calcular su eficiencia con la resistencia nominal de aporte de estos elementos obtenida en el cálculo, se ha obtenido una eficiencia de 42,48%, con lo cual se evidencia que la calidad de suelda entre el alma de los muros y los elementos de borde debe ser controlada con mayor precisión.

Así mismo, luego de obtener los desplazamientos del muro en el modelo desarrollado en ANSYS, se ha comparado nuevamente estos valores con los reflejados durante el ensayo, con el fin de evaluar el porcentaje de desplazamientos conseguidos frente a los que debían desarrollares como



producto de la aplicación de la carga real, pues así como la carga llegó hasta un cierto porcentaje de lo estimado en el cálculo, los desplazamientos también no llegaron a ser cubiertos en su totalidad, con lo cual se tiene la siguiente comparación:

**Tabla 71**

Comparación de desplazamientos: resultados corregidos vs ensayos ejecutados.

DEFORMACIÓN: MODELOS FÍSICOS VS MODELO CORREGIDO				
Modelo	Identificación	Desplazamientos		Eficiencia
		mm	cm	%
SPSW rigidizados	C. Corregido	97,838	9,784	-
	1	59,670	5,967	60,989
	2	51,090	5,109	52,219
	3	60,310	6,031	61,643
	4	50,430	5,043	51,544
	Promedio	53,730	5,370	54,917

Observando la tabla 71, se puede ver que en este caso el desplazamiento máximo presentado por el modelo tiene un valor de 97,84mm, el cual como ya se ha explicado anteriormente, este valor es aproximadamente 12 veces más grande que el anterior, donde los porcentajes así mismo se reducen respetando el mismo factor. Con estos nuevos valores, los porcentajes obtenidos son de alrededor de un 58%, donde la deformación máxima presenta un avance del 61%, mientras que el promedio posee un porcentaje de 54,92%, a comparación del porcentaje anterior que sobrepasaban en gran cantidad el 100%. Estos porcentajes de alrededor de un 58% se deben a que la carga tampoco llegó a cumplir con una eficiencia aproximada de 90%, con lo cual se estima que los desplazamientos son capaces de llegar a un valor muy cercano al calculado a través del modelo matemático.

Debido a que la calidad de suelda depende en gran medida del proceso utilizado, también se justifica esta caída de la resistencia pues, al haber utilizado el proceso convencional de suelda por electrodos (SMAW), se ha comprobado que la eficiencia de trabajo con este proceso no supera el 60%, pues sólo hablando en términos de deposición del material, se puede ver que se cumple esta deficiencia de trabajo por parte de este proceso, pues el cumplimiento de la resistencia del trabajo de suelda depende de cubrir de la misma manera la conexión entre los elementos, procurando llegar a un aproximado de 90% (Mazuera Robledo, Suarez Gómez, & Giraldo Barrada, 2011).

**Tabla 72**

Indicadores de productividad para la suelda SMAW vs GMAW (Mazuera Robledo, Suarez Gómez, & Giraldo Barrada, 2011).

Indicadores	WPS				
	SMAW		GMAW		
	1 E11018M	2 E312-16	3 E312-16	4 ER100S1	5 ER100S1
Eficiencia de deposición[%]	60 <sup>1</sup>	55 <sup>1</sup>	N.R <sup>3</sup>	96 <sup>2</sup>	98 <sup>2</sup>
Eficiencia de deposición del WPS sin considerar colillas [%]	55	43	51	92	84
Eficiencia de deposición del WPS considerando colillas [%]	47	40	41	N.A	N.A
Tasa de deposición [kg/h]	0,761	0,821	N.R3	2,492	4,632
Tasa de deposición en producción [kg/h]	0,2	0,21	0,22	2,65	3,71
Factor de operación [%]	38	27	35	85	72

<sup>1</sup> Tomado de la referencia [1]

<sup>2</sup> Tomado de la referencia [3]

<sup>3</sup> No se encontró registro en la literatura

Como se puede ver en la tabla 72, la eficiencia de deposición para la suelda tipo SMAW se encuentra en un porcentaje aproximado de 55%, mientras que la suelda tipo GMAW posee un porcentaje de eficiencia aproximado de 92%, por tal motivo se puede concluir que el proceso de suelda MIG o GMAW es mejor en rendimiento que la suelda tipo SMAW, lo cual se complementa con los resultados obtenidos de la eficiencia obtenida por cada uno de los ejemplares de los muros ensayados.

Según todas las observaciones realizadas en los resultados obtenidos tanto en los cálculos preliminar y corregido, como en los ensayos ejecutados y con la información presentada de la eficiencia obtenida de dos procesos de suelda distintos, es necesario saber elegir el tipo de suelda más adecuado para cumplir con los requerimientos de diseño sismorresistente de estructuras de acero, donde los muros de acero SPSW rigidizados han llegado a constituirse un claro ejemplo de este acontecimiento.

### 5.5.5. MURO SPSW RIGIDIZADO (POPUESTO) VS OTRAS ALTERNATIVAS

Dentro de los muros de corte, cuyo concepto ha sido concebido con el fin de crear un aporte de resistencia al cortante provocado por las aceleraciones del suelo, las cuales emergen de la liberación de la energía acumulada en las fallas geológicas encontradas en la corteza terrestre, existen un número muy grande de alternativas basadas en los materiales y mecanismos desarrollados durante la evolución científica de las edificaciones civiles.

Debido a la existencia de un número muy grande de configuraciones de muros de corte, se ha comparado el muro propuesto en el presente estudio con los planteados en los estudios desarrollados para los muros SPSW de placa perforada (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, 2009) y los muros de acero-concreto reforzados con diagonales (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022), considerando las diferencias encontradas en el diseño concebido para cada propuesta (condiciones de estudio).

Comenzando con los muros SPSW de placa perforada, se observa que los especímenes desarrollaron su capacidad adecuadamente durante los ensayos ejecutados, cuyos valores fueron muy cercanos a los obtenidos en los cálculos pertinentes, además de existir una clara evidencia de la existencia de conexiones soldadas practicadas adecuadamente, pues las placas no presentan separaciones entre los elementos constitutivos; sin embargo, el modelo correspondiente al muro de esquinas perforadas CR (cutout corner-reinforced panel) presentó una falla debido a la salida del muro de su plano de trabajo, cuyas deformaciones son claramente visibles en la secciones reducidas de la viga superior, y el muro de placa de acero sin perforar S2 (muro base) falló en una de las secciones reducidas de la viga inferior, pues estas secciones fueron previstas como las más vulnerables del diseño concebido por Michel Bruneau y su equipo a través de los modelos matemáticos desarrollados en la plataforma ANSYS (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, 2009).

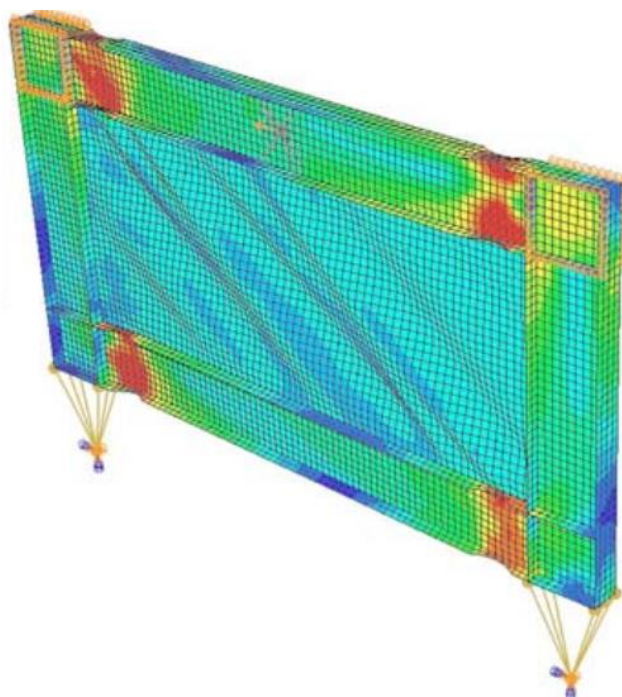


(a)



(b)

**Figura 137.** (a) Falla longitudinal del espécimen CR. (b) Falla del espécimen S2 en la sección reducida de la viga inferior.  
Fuente: (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, 2009).



**Figura 138.** Modelo matemático en ANSYS del espécimen S2.

Fuente: (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, 2009).

Dentro de la resistencia alcanzada por los especímenes, cada uno presentó valores por encima del obtenido a través de los cálculos, pues el diseño desarrollado para el muro base entregó un valor de resistencia estimado en 1682kN (171,46Ton), siendo el valor más alto el entregado por el espécimen S2 (muro base), pero la aplicación de las perforaciones en la placa de acero ha provocado una reducción de la resistencia en cada variante de los muros de placa perforada (especímenes P y CR), siendo el muro P (perforated panel) el más débil de los especímenes (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, 2009), lo cual se representa en la siguiente tabla:

**Tabla 73**

Resumen de resultados de los muros SPSW de placa perforada.

Fuente: (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, 2009).

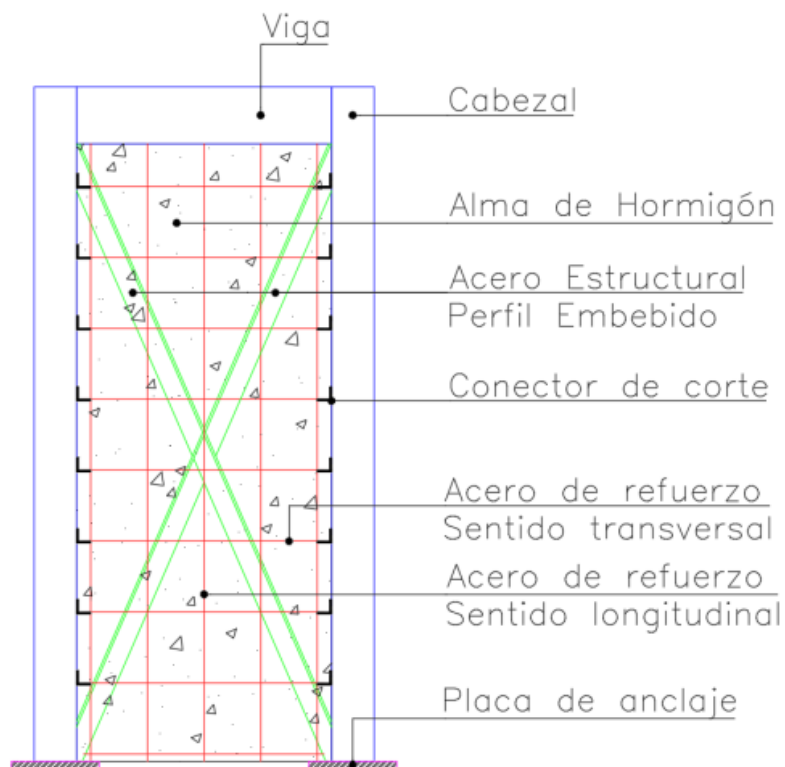
Specimen	Elastic stiffness (kN/mm)	Maximum base shear strength (kN)	Approximate maximum displacement ductility ( $\mu = \Delta / \Delta_y$ )	Maximum interstory drift (%)	Strength reduction at maximum drift (%)
P	115	1,790	10	3	14.5
CR	140	2,050	13.33	4	30
S2	135.5	2,115	10	3	18

Utilizando estos resultados para compararlos con los obtenidos por el modelo de muro SPSW rigidizado, se observa que la conexión de suelda entre los

elementos de borde y la placa de acero juegan un papel muy importante para lograr que la resistencia obtenida en los ensayos sea muy cercana a la determinada en los cálculos matemáticos, pues recordando las imágenes presentadas de los muros del 1 al 4 (muros SPSW rigidizados), y del muro 6 (muro SPSW base) que representan al diseño contemplado en el presente estudio (figura 56), todos presentaron una falla de desprendimiento de la conexión de suelda entre la placa de acero y los elementos de borde, afectando la resistencia máxima de los muros, pero su comportamiento también fue muy similar al obtenido a través del modelamiento matemático del muro SPSW rigidizado en ANSYS (figuras 130 y 131), donde el elemento que sufrió completamente los daños fue la placa de acero, sin llegar a afectarse los elementos de borde ni presentar salida de los muros de su plano de trabajo, resultado que se complementa con el ensayo de únicamente el pórtico representativo (figura 96); además, teniendo en cuenta las condiciones de suelda y de armado de los especímenes del muro SPSW rigidizado, se construyó el muro 6 que representa al muro SPSW base, el cual también fue ensamblado bajo las mismas condiciones de los otros muros, con lo cual sus resultados permitieron crear una comparativa adecuada de la mejoría de los muros al utilizar los rigidizadores, de la eficiencia alcanzada por los modelos frente al valor calculado, y de la importancia de comprobar con más detalle la suelda entre la placa de acero y los elementos de borde, pues la placa de acero es un elemento cuyo espesor generalmente es menor al de los elementos de borde, con lo cual es más susceptible a presentar deficiencias en el cordón de suelda; cabe recalcar que estos dos modelos de muros propuestos (muros SPSW rigidizados y muros SPSW de placa perforada) poseen la misma condición de apoyos fijos en las bases de las columnas para simular la formación de las rótulas plásticas en las columnas, y del diseño de secciones reducidas en las vigas, teniendo diferencias en la geometría, en la zona de aplicación de la carga y en la composición de los elementos estructurales.

Al diseñar adecuadamente los mecanismos de disipación de energía, se puede garantizar que las fallas se presenten en los elementos deseados y no en partes fuera de las consideraciones realizadas durante el diseño, pues el concepto de secciones reducidas en las vigas es un mecanismo desarrollado para provocar la plastificación de las vigas en los puntos adecuados, permitiendo que la estructura pueda presentar desplazamientos de inclinación controlada sin afectar las conexiones entre los elementos de borde (entre vigas y columnas); para esto, se ha comparado el modelo de muro de corte compuesto de acero-concreto con el modelo de muros SPSW rigidizados, cuyas condiciones de geometría y de aplicación de la carga son muy similares, pero difieren en la composición de los elementos estructurales y en la cimentación, donde estos muros de acero-concreto se encuentran directamente empotrados en la cimentación, sus columnas son perfiles tubulares de acero con núcleo de hormigón, y sólo poseen una viga tipo tubo rectangular en la parte superior; además, el alma del muro es una composición de arrostamientos diagonales, reforzados con varillas repartidas tanto en horizontal como en vertical a manera de dos mallas ubicadas en ambas caras del muro; esta estructura se encuentra embebida en hormigón

para conformar el alma compuesta de acero y concreto (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022).

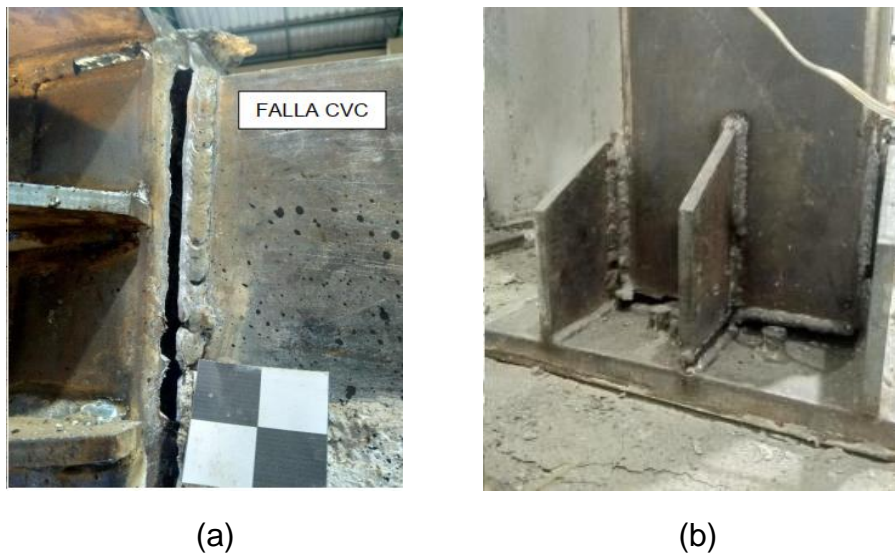


**Figura 139.** Propuesta de muro compuesto de acero-concreto.  
Fuente: (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022).

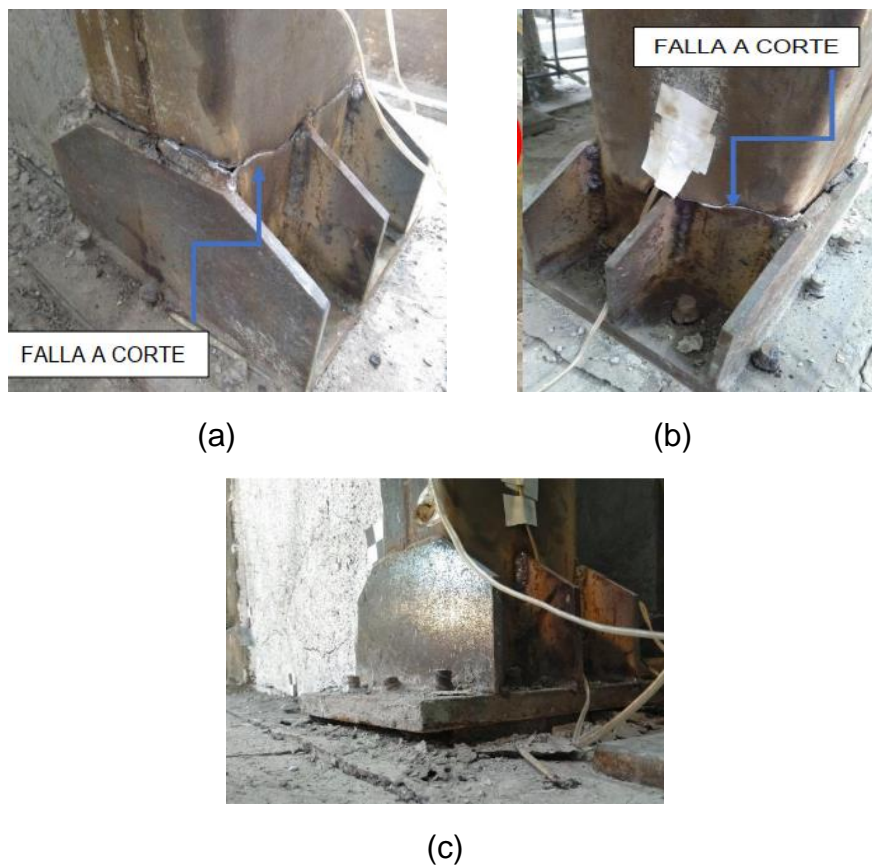
Según las curvas de capacidad presentadas en el estudio de estos muros compuestos, la resistencia máxima aproximada que ha sido obtenida a través del cálculo modelado en ANSYS fue de 640kN (65,24Ton), el cual fue bastante cercano a los obtenidos durante los ensayos de carga cíclica, donde la primera muestra entregó una carga máxima de 587,34kN (59,87Ton), claro que este valor fue obtenido a través de un ensayo monotónico debido a la falla en la conexiones entre las columnas con la viga superior y la presentada en una de las columnas al fracturarse en la rótula plástica. Corregidos estos inconvenientes, el muro 2 presentó una carga máxima de 591,72kN (60,32Ton), el muro 3 logró una carga de 620,65kN (63,27Ton) y el muro 4 obtuvo una resistencia máxima de 612,13kN (62,40Ton), siendo los menos resistentes los muros 1 y 2; dentro de las fallas encontradas en estas configuraciones, se tiene que el muro 1 presentó una separación de la viga con la columna izquierda que contiene el cabezal de conexión del gato hidráulico, separándose el cordón de suelda entre estos dos elementos, y una fractura de la misma columna izquierda en la base del empotramiento, así mismo por separación de los cordones de suelda. Para los muros posteriores (2, 3 y 4), se corrigieron las conexiones entre las columnas con la viga superior y se procedió a ejecutar los ensayos de carga cíclica, donde la fractura en la base empotrada de la columna izquierda persistió, con la diferencia que la rotura se presentó en el perfil, cediéndose a una altura que podría considerarse como la rótula plástica del perfil, mientras que las columnas



derechas de cada muestra desarrollaron pandeo a la misma altura; un caso algo distinto se presentó en el muro 4, donde la falla de la columna izquierda se produjo en los pernos de anclaje del empotramiento (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022).

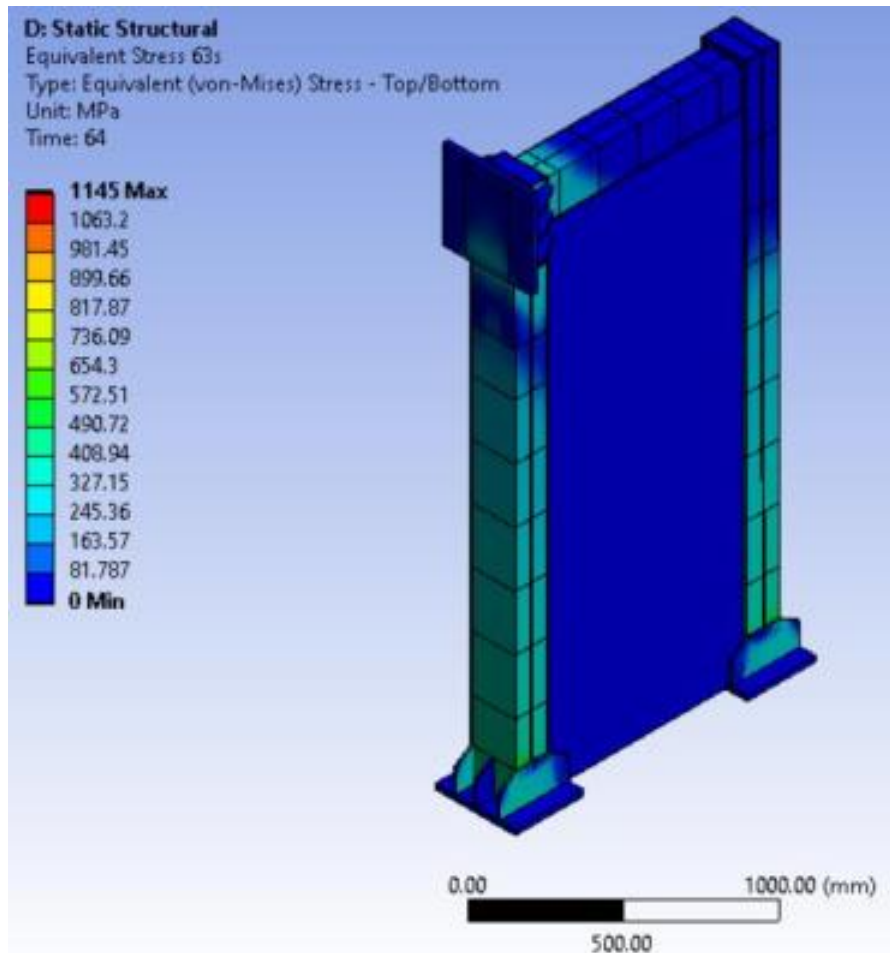


**Figura 140.** Fallas presentadas en los elementos de borde del muro compuesto 1. Fuente: (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022).



**Figura 141.** Falla de la columna en los empotramientos de los muros compuestos: (a) 2, (b) 3 y (c) 4. Fuente: (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022).

Este comportamiento puede ser comprobado gracias al resultado de los esfuerzos a los cuales se someten los muros modelados en la plataforma de ANSYS, pues se observa que las columnas poseen una distribución de esfuerzos más relevantes que los presentados en el alma de acero-concreto, definiéndose de esta manera que los elementos vulnerables de este diseño son las columnas (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022).

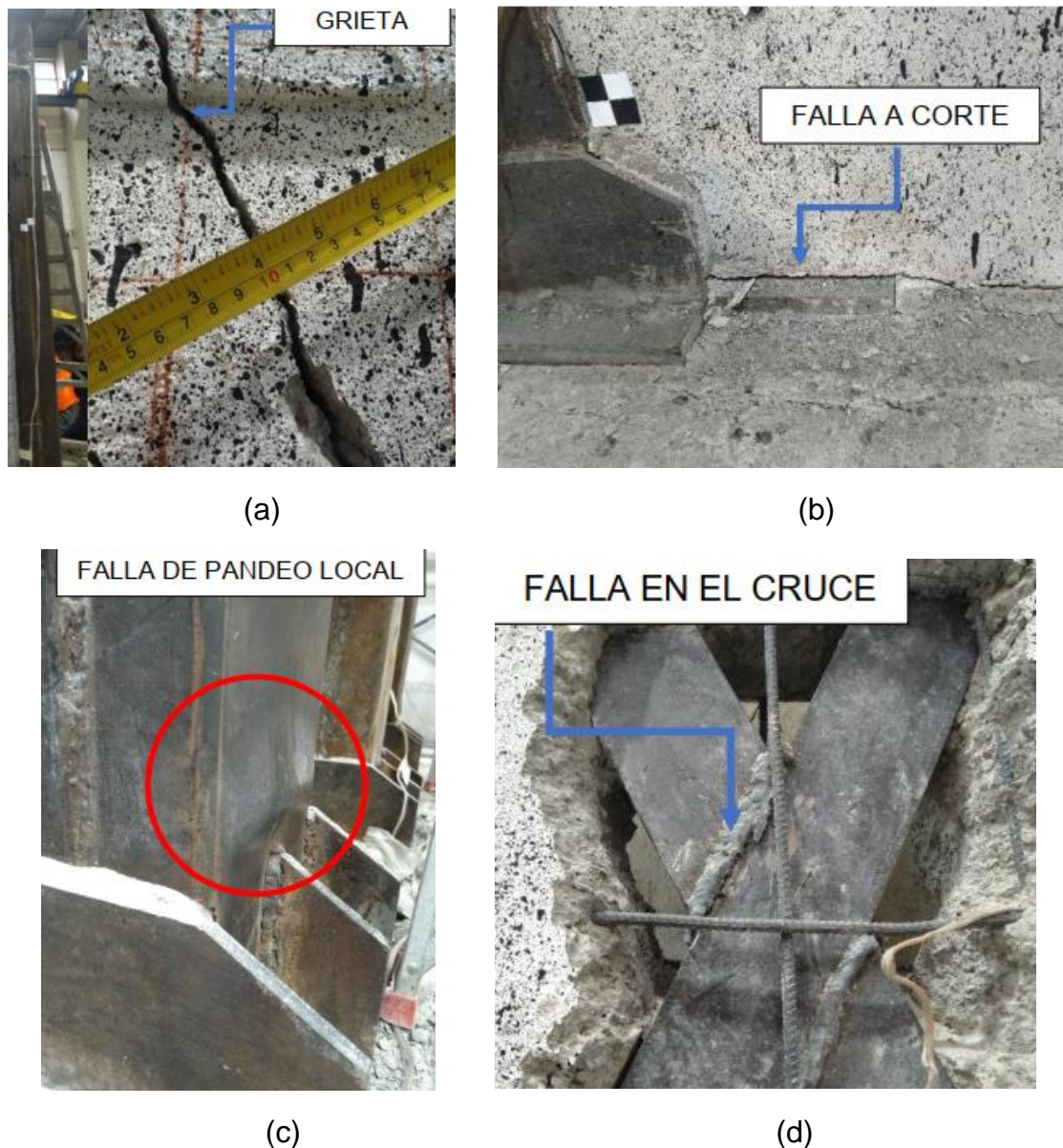


**Figura 142.** Distribución de esfuerzos en el muro compuesto: modelo de ANSYS.

Fuente: (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022).

Este comportamiento del muro compuesto puede deberse a la alta rigidez que posee el alma del muro, puesto que esta se encuentra conformada por una combinación de arriostramientos diagonales, varillas de reforzamiento y hormigón fundido en el armazón de acero. Estos muros desarrollaron algunas fallas similares a las presentadas en los muros SPSW rigidizados, donde de igual manera se observa un desprendimiento del alma de hormigón con respecto a los elementos de borde, también se obtuvo fisuras diagonales que corresponden al comportamiento de los muros de concreto frente a la aplicación de cargas de corte, similares a las ondulaciones por pandeo que se obtiene en la placa de acero de los muros SPSW y, algunas fallas adicionales también fueron las

presentadas por el desprendimiento del cordón de suelda entre los arriostramientos, y el pandeo local de las columnas derechas de los muros.

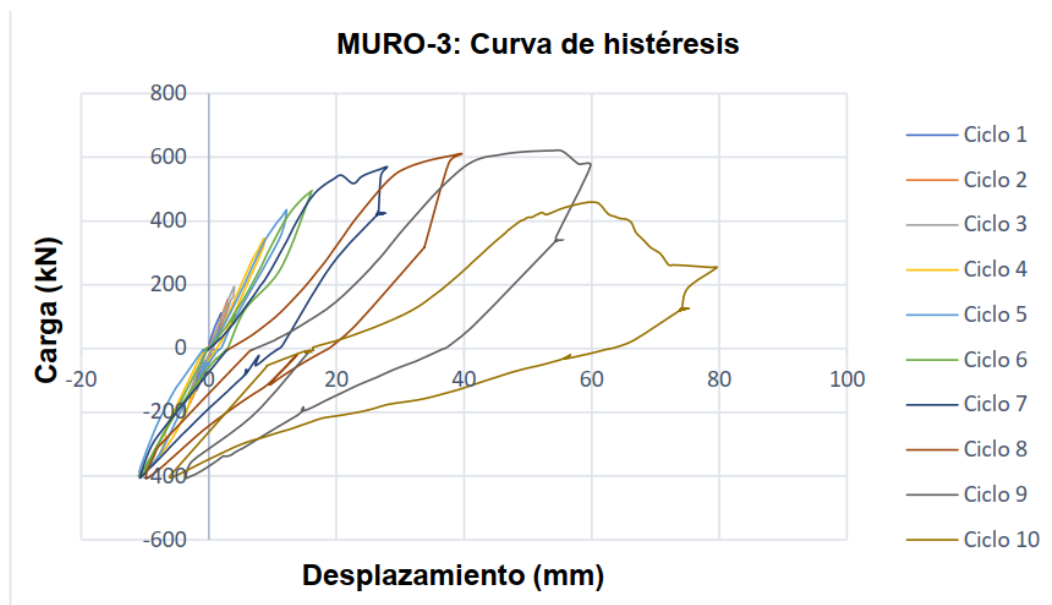


**Figura 143.** Fallas presentadas en el alma de los muros compuestos.  
Fuente: (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022).

Una similitud de estos muros con los muros SPSW rigidizados ha sido la falla prematura de los cordones de suelda entre los elementos constitutivos, lo cual permite tener en cuenta que el trabajo de suelda debe ser un proceso estrictamente controlado, a la par de elegir el proceso más eficiente de soldadura y proceder con la adquisición del mejor material para el fundido del acero que se utiliza para el relleno de los cordones, asegurando que este trabajo garantice que la suelda sea más resistente que los mismos elementos de acero, recordando nuevamente que este proceso depende principalmente del criterio del soldador para definir un excelente acabado de suelda acorde al grosor de los perfiles y láminas de acero.



A continuación, se muestra la curva de histéresis de la muestra más relevante de los muros compuestos de acero-concreto, con el fin de visualizar brevemente el comportamiento de cada sistema al comparar esta curva con las presentadas en las figuras 3, 105 y 109, recordando que dicho comportamiento depende de las condiciones bajo las cuales se han desarrollado los diseños representativos de cada alternativa de los muros de corte:



**Figura 144.** Curva de histéresis del muro compuesto número 3.  
Fuente: (Benítez Guachalá & Vitar Semanate, 2022).

Como se puede ver en la figura 144, los ciclos desarrollados para este tipo de muro han terminado en un total de 10 ciclos, los cuales han sido suficientes para determinar la capacidad de esta alternativa de muros de corte, con lo cual se podría decir que, al ser un sistema donde se involucra al hormigón como un componente de la resistencia de la estructura final, este tipo de muro tiene un comportamiento muy similar a la del hormigón donde, una vez se ha alcanzado la resistencia del hormigón, falla inmediatamente, además de observarse un aporte de absorción de energía y de un aprovechamiento pleno de las propiedades del diseño, concebido como ejemplo del uso de estos muros, en la dirección positiva del desarrollo de la aplicación de la carga, pues en la dirección contraria, el aporte y aprovechamiento de la capacidad en resistencia y absorción de energía de estos muros es muy pequeño. Comparando esta curva con las presentadas para los muros de placa perforada, donde se incluye un muro de comparaciones correspondiente al espécimen S2 (figura 3), se observa que el sistema, acompañado de las condiciones de diseño del estudio correspondiente, ha generado un aprovechamiento óptimo de las propiedades del diseño de este tipo de muros, donde ha sido necesario desarrollar una gran cantidad de ciclos para obtener la resistencia máxima de cada espécimen, además, cada curva muestra que la configuración estructural de los muros P, CR y S2 ha permitido que los elementos generen un área de absorción de energía casi perfectamente definida, donde estos muros aportan al recoger una enorme cantidad de energía inclusive cuando los muros comienzan a ser descargados y ensayados en la

dirección contraria conforme a la definición de los ciclos de carga, siendo las curvas muy simétricas con respecto al origen del sistema de coordenadas carga-desplazamiento. Completando estas comparaciones con las curvas obtenidas en el presente estudio de muros SPSW rigidizados (figuras 105 y 109), se ha observado que la configuración estructural concebida para el ejemplo, ha presentado de igual manera curvas de histéresis muy simétricas con respecto al origen del sistema de coordenadas, donde de igual manera cada curva presenta una forma bien definida tanto en la dirección positiva como en la negativa, además de evidenciarse un número de ciclos bastante grande para la obtención de la capacidad en resistencia y en energía de los muros ensayados, pero es necesario enfatizar en las diferencias propuestas en cada modelo, pues tanto en los muros SPSW de placa perforada (Vian, Bruneau, Tsai, & Lin, 2009), como en los muros SPSW rigidizados, se ha creado una muestra de comparaciones que hace referencia al muro SPSW base (placa de acero sin ningún mecanismo implementado), pues al comparar la curva del muro 6 (figura 109) con la curva del muro S2 (figura 3, literal c), se observa que el muro S2 no posee inflexión en la zona cercana al origen del sistema de coordenadas, mientras que el muro 6 posee inflexión en la zona cercana al origen, dando a entender que la configuración estructural ha permitido que los muros SPSW de placa perforada generen un aporte inclusive cuando la carga se revierte, mientras que en los muros SPSW rigidizados, el aporte en la reversión de la carga es mínimo, lo cual permite hacer referencia a la relación de aspecto mediante la cual se encuentran configuradas las estructuras de los muros.

En referencia al peso y costo considerado en cada diseño, para poder tener una idea breve de los sistemas estructurales considerados a través de las imágenes presentadas, se puede decir que el más pesado de los sistemas constituye el muro compuesto de acero-concreto, y posiblemente es el más costoso, pues considera la implementación de una cantidad muy importante de mecanismos de resistencia involucrados en el alma de los muros, los cuales requieren del aumento de piezas estructurales para su concepción, mientras que los muros SPSW base y perforados son los más livianos y menos costosos, pues no requieren de mecanismos que involucren el aumento de piezas estructurales, siendo un caso intermedio los muros SPSW rigidizados, pues como se ha visto, su diseño requiere del uso de perfiles que aumenten la rigidez y resistencia del alma de los muros, pero tampoco generan un impacto muy grande en comparación al muro SPSW base, pues los elementos utilizados como rigidizadores son perfiles muy fáciles de adquirir por su precio en el mercado, y se tratan de elementos cuyas secciones transversales no son muy grandes en comparación a los elementos de borde principales, además se debe recordar que, gracias a las propiedades del acero, los perfiles de acero no generan mucho impacto debido a las cantidades que se manejan justamente por las secciones definidas en los perfiles, mientras que el hormigón requiere que el material sea macizo, manejándose cantidades muy grandes que impactan considerablemente en el peso final de las estructuras; sin embargo, el precio final de las estructuras de acero para los muros SPSW rigidizados, si se afecta conforme el método de soldadura que se defina para conectar los elementos estructurales, siendo que

estos muros no se encarecen cuando se utiliza el proceso de soldadura por arco eléctrico SMAW, pues el costo de los electrodos tampoco es muy grande, pero en el proceso de soldadura GMAW O MIG, el costo del cordón involucra la compra del tanque de gas inerte que utiliza la máquina para la protección del arco eléctrico, y la compra del alambre de soldado que debe ir colocado en la “pistola”.

Se puede seguir comparando estos muros con cualquier otro sistema estructural de muros de corte, pues el alma de los muros que aporta a la resistencia al cortante del sistema estructural puede contemplar el uso de “bloques o ladrillos”, los mismos que pueden ser de hormigón u otro material alternativo gracias a la implementación de sistemas de “reciclaje”, los cuales han seguido en aumento conforme se desea dar un espacio de albergue y nuevo uso a los materiales como el caucho, plásticos, etc., que en el ambiente son materiales cuyo proceso de degradación se extiende a lo largo de muchos años, y es necesario recordar que el caucho es un material muy utilizado como “amortiguador” de cargas, pues en el sector mecánico, este material es muy utilizado para absorber las vibraciones de motores y mecanismos que se encuentran en movimiento; así también, la respuesta del pórtico de los muros depende de la composición de los elementos de borde según los materiales o perfiles (secciones) que se definan para el diseño de los muros.

En resumen, los muros de corte poseen distintas variantes que pueden ser evaluadas dependiendo de los materiales y mecanismos de absorción de energía que se utilicen en el espacio destinado para el alma del muro y en los elementos de borde, donde estos pueden ser de hormigón armado o acero estructural y la formación o definición de las rótulas plásticas y de procesos de construcción depende del material que se asuma para el ensamblado de la estructura total.



# CAPÍTULO VI

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha desarrollado el estudio del comportamiento de muros de corte de placa de acero rigidizada, sometidos a la aplicación de cargas cíclicas con un diseño cuya relación de aspecto es de 1,81, comparando el modelo planteado con uno representativo de los muros de corte de placa de acero no rigidizada, cuyas características son similares donde la única variante es el alma del muro constituida por una placa de acero sin rigidizadores, y con una muestra que representa al pórtico del diseño, cuya configuración se compone de únicamente los elementos de borde.

### 6.1. CONCLUSIONES

- El comportamiento de los muros de corte de placa de acero (SPSW) rigidizada demostró un funcionamiento superior al reflejado por los muros SPSW sin rigidizar, cuyos resultados permitieron evidenciar capacidades superiores dentro de aspectos como: la resistencia, disipación de energía, soporte de la carga a través del funcionamiento de los distintos elementos integrados en el diseño, distribución de los efectos del pandeo por cortante en la placa de acero, deformaciones y daños presentados en el alma, etc.
- Mediante la investigación de documentos científicos y libros que describen el pandeo de placas de acero por cortante, se determinó que el alma de los muros SPSW desarrolla ondulaciones de pandeo diagonales conforme a la distribución de esfuerzos de corte que se distribuyen a lo largo del perímetro de la placa de acero, creando un efecto de compresión en una de las diagonales de la geometría del muro y un efecto de tensión en la diagonal contraria; con el uso de rigidizadores en la placa de acero, estas ondulaciones y efectos de carga se reparten en las divisiones obtenidas de la repartición de los elementos utilizados para este propósito; este comportamiento del alma se complementa con la formación de rótulas plásticas en las vigas, siendo más relevante cuando se diseña el mecanismo conocido como sección de viga reducida (RBS), mediante el cual se define los lugares de la viga en donde el alma de la sección plastifica para permitir la inclinación del muro en general.
- Con la ejecución de los ensayos pertinentes a los muros SPSW rigidizados, al muro SPSW sin rigidizar y al pórtico, se determinó que los muros de corte desarrollan ondulaciones en la placa de acero debido a la inclinación del muro que se logra a través de la formación de rótulas plásticas tanto en las secciones reducidas en las vigas (RBS) como en las bases de las columnas, donde para efectos del estudio se ha utilizado rótulas mecánicas; estas ondulaciones se desarrollaron de manera más distribuida en los muros con placa rigidizada, generando deformaciones menos pronunciadas que en el muro con placa sin rigidizar, puesto que la placa de acero de este muro presentó ondulaciones más concentradas, con deformaciones más

evidentes que sobresalieron de uno de los planos referentes a las caras laterales de las columnas.

- A través del procesamiento de las lecturas obtenidas del ensayo con presentación de tablas, curvas de histéresis de los muros SPSW y la curva carga-desplazamiento del pórtico, se determinó que la resistencia del modelo promedio representativo de los muros SPSW rigidizados obtuvo una resistencia de 102,5kN (10,449Ton), una capacidad de energía disipada de 6,748kNm (68,784Ton-cm) y un desplazamiento máximo de 53,73mm.
- Mediante las comparaciones ejecutadas entre las muestras presentadas, se determinó el caso de un muro rigidizado sobresaliente donde su resistencia máxima fue de 111,530kN (11,369Ton), con un desplazamiento máximo de 59,670mm y una capacidad de disipación de energía de 8,890kNm (90,620Ton-cm), y un caso atípico cuya resistencia máxima fue de 51,830kN (5,283Ton), con un desplazamiento máximo de 60,310mm y una capacidad de energía absorbida de 4,772kNm (48,640Ton-cm).
- Se determinó la resistencia aportada por el pórtico a través del ensayo monotónico desarrollado en la muestra correspondiente (número 5), la cual entregó un valor de 24,760kN (2,524Ton), con un desplazamiento máximo de 23,023cm y una capacidad de absorción de energía de 4,802kNm (48,950Ton-cm).
- Debido a la necesidad de comparar los muros SPSW rigidizados con un muro SPSW sin rigidizar, se determinó que el muro número 6 no rigidizado alcanzó una resistencia de 74,140kN (7,558Ton), con una capacidad de absorción de energía de 5,444kNm (55,490Ton-cm) y con un desplazamiento máximo de 59,28mm.
- Durante los ensayos, se observó que los muros presentaron fallas cuya reincidencia fue más evidente entre las esquinas inferiores, pues luego de sobrepasar su límite, la placa presentó un desprendimiento de la soldadura en estas zonas donde se desarrollaron los daños más fuertes, pero también se observó que, conforme se completaron los ciclos de ensayo, la suelda continuaba desprendiéndose hacia arriba continuando la falla presentada en las esquinas correspondientes; esta falla fue más evidente en el muro 3, donde se evidenció una caída muy fuerte de su resistencia.
- Debido al comportamiento presentado por el muro 3 considerado como atípico, se observó que los rigidizadores, a más de aumentar la capacidad de los muros en referencia a uno sin rigidizadores, una vez fallada la placa, los atiesadores permiten amortiguar un poco más de fuerza frente a un muro sin rigidizadores, manteniendo de esta manera una resistencia mínima del muro; en el caso del muro 3 donde la placa fallo inmediatamente (falla prematura detectada en la conexión placa-elementos de borde), este estado permitió que el pórtico sea capaz de disipar, con desplazamientos menores, una cantidad de energía similar a la absorbida por sí solo, donde su capacidad de desplazarse fue bastante notoria.

- Se comprobó la eficiencia del proceso de suelda utilizado para el ensamblado de estos muros, a través de las comparaciones llevadas a cabo entre las muestras ensayadas en el laboratorio, con los valores obtenidos a través del diseño y con la ayuda de información recolectada que confirma la eficiencia de los procesos de suelda tipo SMAW y GMAW o MIG, donde los valores reflejados fueron: 55% para suelda tipo SMAW (aproximadamente 47% en los muros) y 92% para suelda tipo MIG o GMAW.
- Se determinaron las curvas de histéresis y curvas envolventes de los muros ensayados bajo la aplicación de cargas cíclicas, la curva carga-desplazamientos del pórtico sometido a un ensayo monotónico, y las curvas esfuerzo-deformación unitaria de las muestras extraídas de los elementos principales que aportan a la resistencia de los muros.
- Se determinaron las características reales de los materiales mediante los cuales están conformados los elementos que aportan a la resistencia de los muros, estos materiales presentaron los siguientes resultados: para los ángulos rigidizadores, su esfuerzo de fluencia fue de 380,50MPa, con una resistencia última de 505,50MPa y cuyo módulo de Young fue 18,16GPa; para la plancha de acero, su esfuerzo de fluencia fue de 182,50MPa, con una resistencia última de 289,50MPa y cuyo módulo de Young fue de 13,04GPa; y por último, el esfuerzo de fluencia de las vigas fue de 320,00MPa, cuya resistencia última fue de 476,00MPa y con un módulo de Young de 5,75GPa.
- Se compararon los resultados obtenidos a través del modelo matemático, entre los determinados con las características preliminares de diseño, con los extraídos después de corregir la ventana de datos con los valores obtenidos de los ensayos ejecutados en las muestras de acero, a través de la resistencia calculada y de las deformaciones entregadas en el modelo.
- Debido a las correcciones ejecutadas en el modelo matemático y las comparaciones realizadas entre los cálculos preliminar y corregido, se evidenció el acercamiento de los cálculos matemáticos a los valores obtenidos en los ensayos, donde las diferencias entre las estimaciones versus las lecturas de los ensayos se representan a través de los porcentajes de eficiencia calculados.
- Se creó un algoritmo matemático que involucre todas las ecuaciones establecidas para el diseño de los muros SPSW, añadiendo aquellos conceptos del cálculo de placas de acero ante distintos casos de aplicación de cargas, los cuales pueden provocar el pandeo de la hoja debido a la reacción del acero frente a estas cargas, e implementando algunos criterios adicionales para evitar fallos en los elementos de borde.
- Se observó que, en el cálculo del esfuerzo crítico de pandeo de la placa de acero evaluada, la fórmula es muy similar a la establecida para el cálculo de elementos de acero, donde se involucra un factor conocido como “factor de

placa, el cual depende de la relación de aspecto del área de análisis y de las condiciones de borde mediante las cuales se encuentra sujeta.

- A través de los cálculos desarrollados en el modelo matemático de ANSYS, se observó que los elementos de borde son suficientes para soportar las cargas cíclicas que fueron aplicadas en los muros durante los ensayos ejecutados, llevándose de esta manera la parte de los daños hacia la placa de acero, cuyas evidencias son los muros luego de las pruebas realizadas.
- Mediante la revisión bibliográfica y comparaciones con los actuales estudios, se determinó que el cálculo de la inercia mínima de los elementos de borde para la obtención de las secciones de columnas y vigas mínimas, no son suficientes debido a todas las condiciones que pueden presentarse y que todavía no han sido tomadas en cuenta en un procedimiento más preciso para el cálculo de estos elementos.
- Para el diseño de los rigidizadores, se observó que el procedimiento contempla la comparación de los esfuerzos críticos soportados por el elemento rigidizador frente al obtenido por el análisis de la placa de acero, donde el resultado es la seguridad de la formación de deformaciones por pandeo en las secciones discretizadas por la distribución de los elementos, evitando que el atiesador se deforme en conjunto con la placa de acero.
- A través de la comparación entre distintas alternativas de muros, se observó la influencia de los materiales y composición estructural que se defina en el diseño de los muros, donde todas las características geométricas, físicas y de ensamblado influyen en la resistencia final del producto terminado.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

- Considerar todas las condiciones de falla que pueden presentarse en el diseño de los elementos de borde, reforzando de esta manera el criterio de diseño de los muros SPSW, procurando que la estructura cumpla con el funcionamiento previsto.
- Tomar en cuenta la eficiencia del procedimiento de suelda seleccionado de tal manera que los criterios de cálculo permitan una predicción más certera de la capacidad de los muros tanto en resistencia como en deformaciones, teniendo especial cuidado en las conexiones entre la placa de acero y los rigidizadores con los elementos de borde.
- Realizar pruebas de los materiales contemplados en los elementos constitutivos de la estructura general de los muros SPSW, para que los datos registrados en los procedimientos de cálculo sean los reales y, de este modo, los resultados de capacidad de los muros sean más precisos a los recogidos en ensayos o en construcciones.
- Para la obtención de la curva envolvente a través del procesamiento de los datos tabulados y las curvas de histéresis, estimar el valor más representativo de los picos encontrados en las órbitas que identifican a cada

ciclo de carga correspondiente al ensayo de cargas cíclicas, de tal manera que se pueda cubrir un área bastante aproximada de la curva de histéresis real.

- Llevar el correspondiente control del ensamblado de los muros y de cualquier estructura de acero con la finalidad de que los elementos constitutivos contemplen lo más preciso posible las dimensiones establecidas en la geometría del diseño, evitando también de esta manera ciertas incomodidades del proceso de soldadura como “los rellenos”
- Tener en cuenta la configuración geométrica del diseño de los muros para el registro de las dimensiones de la sección de análisis de la placa, de tal manera que todos los parámetros correspondan adecuadamente a la configuración de las dimensiones, pues la fórmula establecida para el cálculo del esfuerzo crítico de pandeo depende mucho de estos valores.
- Utilizar el correspondiente equipo de protección que ayude evitando cualquier imprevisto debido a la manipulación de los equipos y herramientas de armado, pues cada uno de ellos poseen un nivel de riesgo debido a la función que cumple cada uno.
- Utilizar equipos de medición debidamente calibrados de tal manera que las medidas de los elementos, geometrías y cualquier corte que se ejecute durante el proceso de ensamblado, reduzca al máximo su margen de error y se ubique de manera adecuada en el lugar correspondiente a su función.
- Mantener el orden de desarrollo de los modelos matemáticos representativos de la estructura contemplada, describiendo paso a paso las características del diseño en el software para que el resultado sea bastante similar a los modelos físicos y que el comportamiento obtenido sea el adecuado.
- Considerar la evaluación de los muros antes del procedimiento con los ensayos de carga cíclica, buscando que el funcionamiento de los muros sea únicamente en su plano de trabajo y no se desvíen del mismo; en tal caso considerar el uso de arriostramientos que mantengan los muros en su plano de trabajo.
- Considerar el cálculo de momentos de plastificación a la altura considerada para la formación de rótulas plásticas de las columnas en caso de colocarse directamente empotradas a la cimentación, de tal manera que el cálculo de la resistencia de los muros ante la aplicación de cargas, las cuales ejercen esfuerzos cortantes en su distribución, contemple de manera más real el aporte de todos los elementos considerados en la estructura.
- Tener en cuenta la geometría de los elementos utilizados para la configuración estructural diseñada, de tal manera que, en caso de necesitar la extracción de muestras de acero, las dimensiones permitan crear las muestras según las dimensiones de probetas normadas por el ASTM.

- Considerar la geometría de los elementos seleccionados como rigidizadores para la placa de acero de los muros, de tal manera que el entramado sea el más adecuado, permita estimar cualquier imprevisto y que el resultado sea un arreglo equilibrado entre todas las condiciones de diseño sismorresistente contempladas en el desarrollo de cualquier proyecto.
- Comprobar que la geometría de las probetas extraídas para la obtención de las características reales de los elementos de acero, cumplan con los requerimientos establecidos en la norma ASTM, cubriendo de esta manera una reducción de la tendencia de presentarse casos atípicos en el ensayo a tracción de las muestras de acero.
- Verificar el uso de las ecuaciones para el cálculo del aporte al cortante del muro, generado por el momento de plastificación obtenido en el diseño de las secciones reducidas de las vigas (RBS) correspondientes a la formación de las rótulas plásticas que permiten la inclinación de los muros sin que las columnas sufran daños en sectores peligrosos.



## BIBLIOGRAFÍA

- Alavi, E., & Nateghi, F. (2013). Experimental Study of Diagonally Stiffened Steel Plate Shear Walls. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 1795-1811.
- American Concrete Institute ACI. (2019). *Requisitos y Comentarios de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318-19*. Farmington Hills: ACI.
- American Institute of Steel Construction AISC. (2016). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications ANSI/AISC 358-16*. Chicago: AISC.
- American Institute of Steel Construction AISC. (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 341-16*. Chicago: AISC.
- American Institute of Steel Construction AISC. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360-16*. Chicago: AISC.
- American Society for Testing and Materials ASTM. (2019). *Standard Specification for Carbon Structural Steel ASTM A36/A36M*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society for Testing and Materials ASTM. (2019). *Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings E2126-11*. Montgomery: ASTM.
- American Society for Testing and Materials ASTM. (2021). *Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes ASTM A500/A500M-21*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society for Testing and Materials ASTM. (2021). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials ASTM E8-21*. West Conshohocken: ASTM.
- American Welding Society AWS. (1998). *Código de Soldadura Estructural - Lámina de Acero ANSI/AWS D1.3-98*. Miami: American National Standards Institute ANSI.
- American Welding Society AWS. (1998). *Especificación para Electrodo de Acero al Carbón para Soldadura de Metal por Arco Protegido ANSI/AWS 5.1-91*. Miami: American National Standards Institute ANSI.
- Arancibia, F. (16 de Abril de 2006). *Sección de Perfiles Laminados*. Obtenido de Ingeniería y Construcción: <https://facingyconst.blogspot.com/2006/04/seccion-de-perfiles-laminados.html>
- Benítez Guachalá, É. A., & Vitar Semanate, J. E. (2022). *Estudio Técnico-Experimental de Muros Compuestos de Acero-Concreto reforzados con diagonales en cruz ante carga lateral*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

- Bleich, F. (1952). *Buckling Strength of Metal Structures*. Nueva York: McGraw-Hill Book Company, INC.
- Bonett Díaz, R. L. (2003). *Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a Entornos Urbanos en Zonas de Amenaza Alta y Moderada*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Bragado, I. (2003). *Física General*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Bruneau, M. (2012). Steel Plate Shear Walls (SPSW), TEBF, CFST, SF, and other short stories. *Semantic Scholar*, 1-16.
- Carrillo, J., Porras, P., & Sánchez, M. (2016). Herramienta Didáctica para Ensayos Cuasi-Estáticos de Pequeños Epecímenes Estructurales. *Revista Científica General José María Córdova*, 149-165.
- CICEPAC. (04 de Agosto de 2022). *Análisis del Tipo de Fallas Estructurales Debidas al Sismo del 15 de Junio de 1999*. Obtenido de Bibliotecas UDLAP:  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lic/murillo\\_j\\_cg/capitulo\\_5.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/murillo_j_cg/capitulo_5.pdf)
- Crisafulli, F. (2018). *Diseño Sismorresistente de Construcciones de Acero, Quinta Edición*. Mendoza: Alacero.
- De Buen López De Heredia, O. (2000). *Diseño de Estructuras de Acero, Placas*. Toluca, Estado de México: Fundación ICA.
- de Solminihaç, H., & Thenoux, G. (1997). *Procesos y Técnicas de Construcción*. Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile.
- del Río, M., & Busnelli, A. (22 de 07 de 2022). *Dimensionamiento Directo de Perfiles Conformados en Frío*. Obtenido de Universidad Nacional de Rosario:  
<https://jornadasaie.org.ar/jornadas-aie-antteriores/2014/contenidos/trabajos/014.pdf>
- El Heraldó SLP. (25 de Diciembre de 2019). *El arte prehistórico es para comprender el mundo simbólico*. Obtenido de El Heraldó de San Luis Potosí: <https://elheraldoslp.com.mx/2019/12/25/el-arte-prehistorico-es-para-comprender-el-mundo-simbolico/>
- FEMA. (Junio de 2007). Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components. *Federal Emergency Management Agency FEMA 461*. Washington, D.C., Estados Unidos.
- Fiorella Representaciones S.A.C. (27 de Junio de 2022). *Plancha de Acero A-36: Ficha Técnica*. Obtenido de Fiorella: Plancha de Acero A-36:  
<https://www.fiorellarepre.com.pe/PLANCHA-ACERO-A-36/605020>
- Fundación Laboral de la Construcción. (22 de Junio de 2022). *Diccionario de la Construcción*. Obtenido de Términos técnicos del sector de la construcción:

<http://www.diccionariodelaconstruccion.com/buscar/?q=elemento+estructural>

Gallegos, H. (1991). *Albañilería Estructural*. San Miguel, Lima: Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.

Gantley, M. (14 de Septiembre de 2021). *Stonehenge, los enigmas del círculo de piedra*. Obtenido de National Geographic: [https://historia.nationalgeographic.com.es/a/stonehenge-enigmas-circulo-piedra\\_8857](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/stonehenge-enigmas-circulo-piedra_8857)

Harmsen, T. (2002). *Diseño de Estructuras de Concreto Armado Tercera Edición*. San Miguel, Lima: Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.

IMPORTACEROS. (09 de Julio de 2022). *Catálogo de Productos*. Obtenido de IMPORTACEROS: [https://www.importaceros.com/?gclid=Cj0KCQjwzqSWBhDPARIsAK38LY8nDIJ438GaG3e-b2Bt8edPAgVPqJa\\_jNBP-N7p27opWhZ7hKthVnAaAs5JEALw\\_wcB](https://www.importaceros.com/?gclid=Cj0KCQjwzqSWBhDPARIsAK38LY8nDIJ438GaG3e-b2Bt8edPAgVPqJa_jNBP-N7p27opWhZ7hKthVnAaAs5JEALw_wcB)

INDURA. (2007). *Manual de Sistemas y materiales de Soldadura*. Cerrillos, Chile: INDURA.

INDURA. (2022). *Catálogo de Procesos y Productos*. Cerrillos, Chile: INDURA.

INDURA. (08 de Agosto de 2022). *Sistema MIG*. Obtenido de Air Products: <http://www.indura.cl/web/cl/menu/100>

INEN. (05 de 2018). *Electrodos Revestidos de Acero al Carbono para Soldadura por Arco de Metal Protegido. Requisitos. Norma Técnica Ecuatoriana NTE-INEN 1390*. Quito, Pichincha, Ecuador: INEN.

Japanese Industrial Standard JIS. (2011). *Cold-Reduced Carbon Steel Sheet and Stript JIS G3141*. Tokyo: JIS.

Kuang, W. (23 de Octubre de 2018). *Pernos vs soldaduras vs remaches para conexiones de acero*. Obtenido de Sky Civ: <https://skyciv.com/es/technical/bolts-vs-welds-vs-rivets-for-steel-connections/>

Langdon, D. (03 de Diciembre de 2014). *Clásicos de Arquitectura: Biósfera de Montreal / Buckminster Fuller*. Obtenido de Arch Daily: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/758384/clasicos-de-arquitectura-biosfera-de-montreal-buckminster-fuller>

Langdon, D. (07 de Enero de 2015). *Clásicos de Arquitectura: Pabellón de Portugal Expo'98 / Álvaro Siza*. Obtenido de Arch Daily: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/759986/clasicos-de-arquitectura-pabellon-de-portugal-expo98-alvaro-siza>

- Láser Comercial. (06 de Noviembre de 2020). *Las Claves de la Soldadura Láser*. Obtenido de Láser Comercial Blog: <https://lasercomercial.com/2020/11/06/las-claves-de-la-soldadura-laser/>
- Lubell, A., Prion, H., Ventura, C., & Rezai, M. (2000). Unstiffened Steel Plate Shear Wall Performance Under Cyclic Loading. *Journal of Structural Engineering*, 453-460.
- Mazuera Robledo, D., Suarez Gómez, J., & Giraldo Barrada, J. (2011). Estudio de productividad en la soldadura del acero MIL A 46100 con los procesos GMAW y SMAW. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 66-74.
- McCormac, J., & Csernak, S. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero, Quinta Edición*. Ciudad de México: Alfaomega Grupo Editor.
- Meriam, J. (1978). *Estática*. Barcelona: Reverté S.A.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento VIVIENDA; Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción SENCICO. (2006). *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Lima, Perú: VIVIENDA, SENCICO.
- Múnera, A. (2018 de Abril de 2018). *Habrà más controles a edificaciones tras singular accidente*. Obtenido de El Tiempo: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/anuncian-controles-a-construccion-de-edificios-en-dosquebradas-209024>
- Niebles Nuñez, E. E. (2011). Concurrencia de las Tecnologías de Soldadura en las Construcciones Soldadas. *Prospect*, 38-45.
- Nilson, A. (1999). *Diseño de Estructuras de Concreto duodécima edición*. Bogotá: McRAW HILL.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC. (2014). *Cargas Sísmicas Diseño Sismoresistente NEC-SE-DS*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC. (2014). *Estructuras de Acero NEC-SE-AC*. Quito: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Purple Wave. (04 de Mayo de 2011). *Soldador de arco Century 230 amp*. Obtenido de Purple Wave Servicio de Subastas en Línea sin Reserva: [https://www.purplewave.com/auction/110405/item/4709/Torches,\\_Welder\\_s\\_and\\_Plasma\\_Cutters-Welder\\_%28Manual%29-Kansas](https://www.purplewave.com/auction/110405/item/4709/Torches,_Welder_s_and_Plasma_Cutters-Welder_%28Manual%29-Kansas)
- Rodas Andrade, H. (2014). *Estructuras 1: Apuntes de Clase*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Rodríguez, P. C. (2001). *Manual de Soldadura Eléctrica, MIG y TIG Primera Edición*. Buenos Aires: Librería y Editorial Alsina.

- Salazar Guerrero, D. M. (2015). *Análisis comparativo entre el comportamiento de edificios con Muros de Corte de Placas de Acero y edificios con Pórticos Arriostrados Concéntricamente mediante diagonales de acero*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Salmon, C., Johnson, J., & Malhas, F. (2009). *Steel Structures: Design and Behavior (quinta edición)*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Society of Automotive Engineers SAE. (2001). *Chemical Compositions of SAE Carbon Steels SAE J 403*. Warrendale, Estados Unidos: SAE.
- Spikermann, J. P. (2010). *Elementos de Geología General*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
- Taller Industrial ALTEDA. (05 de Agosto de 2022). *Pruebas o Ensayos del Acero*. Obtenido de DOCPLAYER: <https://docplayer.es/39229073-Pruebas-o-ensayos-del-acero.html>
- Timoshenko, S. (1957). *Resistencia de Materiales: Primera Parte*. Madrid: Espasa-Calpe S.A.
- Totter, E., Torrisi, G., & Crisafulli, F. (2017). Refuerzo Sísmico de Estructuras de Mampostería Encadenada a partir de la utilización de Muros de Corte con Placa de Acero Parcialmente Conectadas. *X EIPAC - Encuentro Argentino de Profesionales de la Construcción* (pág. 10). San Salvador de Jujuy: Universidad Nacional de Jujuy.
- Vian, D., Bruneau, M., Tsai, K., & Lin, Y. (2009). Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. I: Experimental Investigation. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 211-221.
- Vian, D., Bruneau, M., Tsai, K., & Lin, Y. (2009). Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams. II: Analysis and Design Recommendations. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 221-228.
- Walsh, N. P. (29 de Febrero de 2020). *Arquitectura en acero: veinte proyectos icónicos del siglo XX*. Obtenido de Arch Daily: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/934438/arquitectura-en-acero-veinte-proyectos-icnicos-del-siglo-xx>

## **ANEXOS**

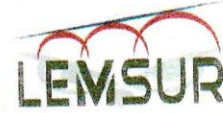


# **ANEXO 1**

## **Informes de los Materiales Ensayados**



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### TRACCIÓN EN ELEMENTOS METÁLICOS

INF. No. 22 - 0424-I  
Hoja 01 de 06

Quito, 26 de agosto de 2022

#### DATOS DEL CLIENTE

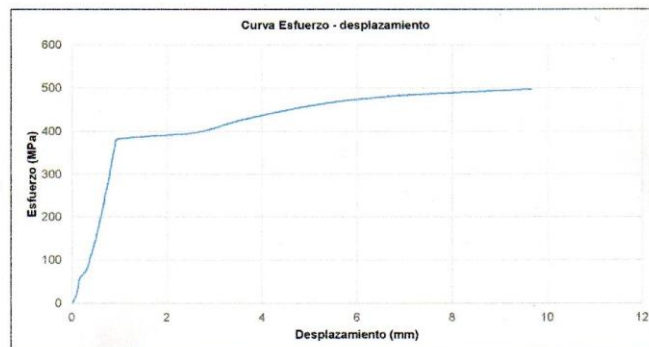
**Razón social:** Carlos Luis Gallegos Flores  
**Dirección:** Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía

#### DATOS DEL PROYECTO

**Proyecto:** Estudio del Comportamiento de Muros de Corte de Placa de Acero Rigidizadas ante Cargas Cíclicas  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**NORMA:** ASTM E8

Datos de la probeta de ensayo					
Identificación	Material/Procedencia	Tipo de probeta	Sección transversal <sup>(1)</sup>		
			D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
21-I-01	ÁNGULO L 20	Placa	12,355	1,93	23,8
Datos del ensayo					
Velocidad de ensayo MPa/s	Límite de fluencia superior <sup>(2)</sup>	Resistencia a la tracción	Elongación después de la rotura		
	Fuerza (kN)	Fuerza máxima (kN)	Longitud calibrada inicial (mm)	Longitud calibrada final después de la rotura (mm)	
8	8,75	11,84	51,60	59,67	

Resumen de resultados	
Límite de fluencia superior (MPa)	367
Resistencia a la tracción (MPa)	497
Elongación después de la rotura (%)	15,5



**Observaciones:** Todos los datos de la probeta de ensayo (identificación, material/procedencia) son proporcionadas por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente al ítem ensayado.

La información del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

(1) D<sub>1</sub> y D<sub>2</sub> corresponden a las dimensiones de la sección central de la probeta de ensayo. En el caso de probetas circulares, se reportan dos diámetros medidos o nominales.

(2) El método para determinar el límite fluencia superior, acordado con el cliente corresponde al desfase del 0,2%.

ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DE LABORATORIO

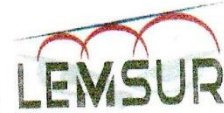


Tel.: 2976300  
Ext.: 1609

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### TRACCIÓN EN ELEMENTOS METÁLICOS

INF. No. 22 - 0424-I  
Hoja 02 de 06

Quito, 26 de agosto de 2022

#### DATOS DEL CLIENTE

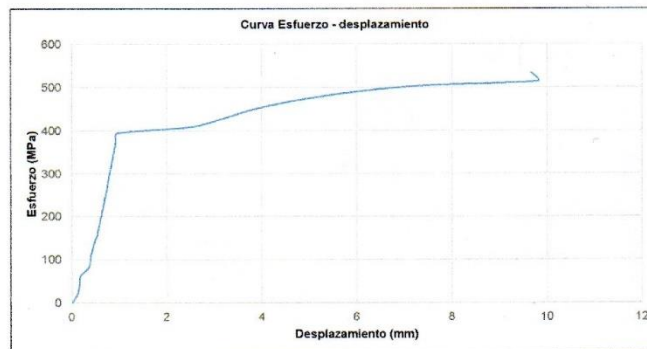
Razón social: Carlos Luis Gallegos Flores  
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía

#### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio del Comportamiento de Muros de Corte de Placa de Acero Rigidizadas ante Cargas Cíclicas  
Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
NORMA: ASTM E8

Datos de la probeta de ensayo					
Identificación	Material/Procedencia	Tipo de probeta	Sección transversal <sup>(1)</sup>		
			D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
21-I-02	ÁNGULO L 20	Placa	11,825	1,86	22,2
Datos del ensayo					
Velocidad de ensayo MPa/s	Límite de fluencia superior <sup>(2)</sup>	Resistencia a la tracción	Elongación después de la rotura		
	Fuerza (kN)	Fuerza máxima (kN)	Longitud calibrada inicial (mm)	Longitud calibrada final después de la rotura (mm)	
8	8,75	11,43	50,32	59,30	

Resumen de resultados	
Límite de fluencia superior (MPa)	394
Resistencia a la tracción (MPa)	514
Elongación después de la rotura (%)	18,0



**Observaciones:** Todos los datos de la probeta de ensayo (identificación, material/procedencia) son proporcionadas por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente al ítem ensayado.

La información del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

(1) D<sub>1</sub> y D<sub>2</sub> corresponden a las dimensiones de la sección central de la probeta de ensayo. En el caso de probetas circulares, se reportan dos diámetros medidos o nominales.

(2) El método para determinar el límite fluencia superior acordado con el cliente corresponde al desfase del 0.2%.

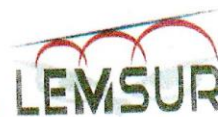
ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### TRACCIÓN EN ELEMENTOS METÁLICOS

INF. No. 22-0424-I  
Hoja 03 de 06

Quito, 26 de agosto de 2022

#### DATOS DEL CLIENTE

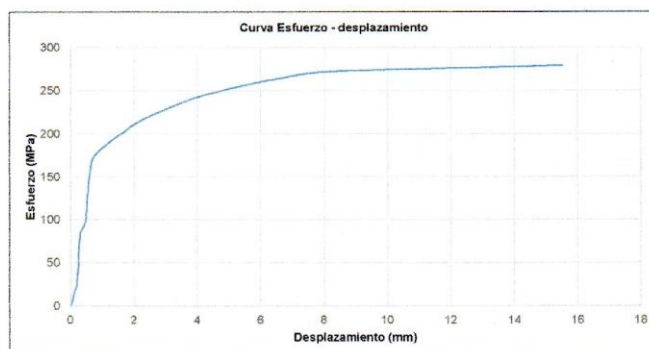
Razón social: Carlos Luis Gallegos Flores  
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía

#### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: Estudio del Comportamiento de Muros de Corte de Placa de Acero Rigidizadas ante Cargas Cíclicas  
Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
NORMA: ASTM E8

Datos de la probeta de ensayo				
Identificación	Material/Procedencia	Tipo de probeta	Sección transversal <sup>(1)</sup>	
			D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)
21-I-03	PLANCHA DE ACERO	Placa	12,8	1,51
			Área (mm <sup>2</sup> ) 19,3	
Datos del ensayo				
Velocidad de ensayo MPa/s	Límite de fluencia superior <sup>(2)</sup>	Resistencia a la tracción	Elongación después de la rotura	
	Fuerza (kN)	Fuerza máxima (kN)	Longitud calibrada inicial (mm)	Longitud calibrada final después de la rotura (mm)
8	3,30	5,40	49,75	65,82

Resumen de resultados	
Límite de fluencia superior (MPa)	171
Resistencia a la tracción (MPa)	279
Elongación después de la rotura (%)	32,5



**Observaciones:** Todos los datos de la probeta de ensayo (identificación, material/procedencia) son proporcionadas por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente al ítem ensayado.

La información del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

(1) D<sub>1</sub> y D<sub>2</sub> corresponden a las dimensiones de la sección central de la probeta de ensayo. En el caso de probetas circulares, se reportan dos diámetros medidos o nominales.

(2) El método para determinar el límite fluencia superior acordado con el cliente corresponde al desfase del 0,2%.

ING. MERCEDES VILLACIS  
JEFE DE LABORATORIO

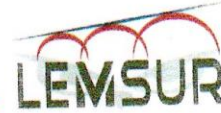


Tel.: 2976300  
Ext.: 1609





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### TRACCIÓN EN ELEMENTOS METÁLICOS

INF. No. 22 - 0424-I  
Hoja 04 de 06

Quito, 26 de agosto de 2022

#### DATOS DEL CLIENTE

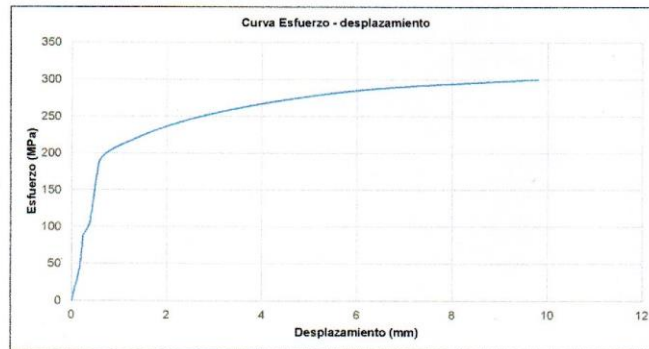
**Razón social:** Carlos Luis Gallegos Flores  
**Dirección:** Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía

#### DATOS DEL PROYECTO

**Proyecto:** Estudio del Comportamiento de Muros de Corte de Placa de Acero Rigidizadas ante Cargas Cíclicas  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**NORMA:** ASTM E8

Datos de la probeta de ensayo					
Identificación	Material/Procedencia	Tipo de probeta	Sección transversal <sup>(1)</sup>		
			D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
21-I-04	PLANCHA DE ACERO	Placa	11,735	1,45	17,0
Datos del ensayo					
Velocidad de ensayo MPa/s	Límite de fluencia superior <sup>(2)</sup>	Resistencia a la tracción	Elongación después de la rotura		
	Fuerza (kN)	Fuerza máxima (kN)	Longitud calibrada inicial (mm)	Longitud calibrada final después de la rotura (mm)	
8	3,30	5,10	50,05	57,52	

Resumen de resultados	
Límite de fluencia superior (MPa)	194
Resistencia a la tracción (MPa)	300
Elongación después de la rotura (%)	15,0



**Observaciones:** Todos los datos de la probeta de ensayo (identificación, material/procedencia) son proporcionados por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente al ítem ensayado.

La información del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

(1) D<sub>1</sub> y D<sub>2</sub> corresponden a las dimensiones de la sección central de la probeta de ensayo. En el caso de probetas circulares, se reportan dos diámetros medidos o nominales.

(2) El método para determinar el límite fluencia superior acordado con el cliente corresponde al desfase del 0,2%.

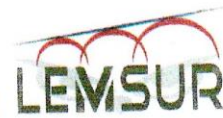
ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### TRACCIÓN EN ELEMENTOS METÁLICOS

INF. No. 22 - 0424-I  
Hoja 05 de 06

Quito, 26 de agosto de 2022

#### DATOS DEL CLIENTE

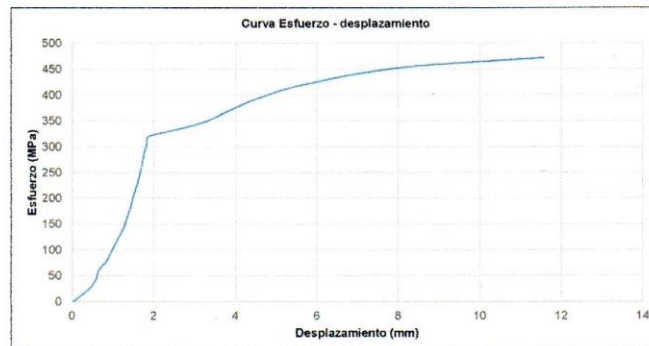
**Razón social:** Carlos Luis Gallegos Flores  
**Dirección:** Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía

#### DATOS DEL PROYECTO

**Proyecto:** Estudio del Comportamiento de Muros de Corte de Placa de Acero Rigidizadas ante Cargas Cíclicas  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**NORMA:** ASTM E8

Datos de la probeta de ensayo				
Identificación	Material/Procedencia	Tipo de probeta	Sección transversal <sup>(1)</sup>	
			D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)
21-I-05	ALMA DE VIGA IPE 140	Placa	13,045	4,53
Área (mm <sup>2</sup> )				
59,1				
Datos del ensayo				
Velocidad de ensayo MPa/s	Límite de fluencia superior <sup>(2)</sup>	Resistencia a la tracción	Elongación después de la rotura	
	Fuerza (kN)	Fuerza máxima (kN)	Longitud calibrada inicial (mm)	Longitud calibrada final después de la rotura (mm)
8	18,00	27,90	49,78	56,14

Resumen de resultados	
Límite de fluencia superior (MPa)	305
Resistencia a la tracción (MPa)	472
Elongación después de la rotura (%)	13,0



**Observaciones:** Todos los datos de la probeta de ensayo (identificación, material/procedencia) son proporcionadas por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente al ítem ensayado.

La información del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

(1) D<sub>1</sub> y D<sub>2</sub> corresponden a las dimensiones de la sección central de la probeta de ensayo. En el caso de probetas circulares, se reportan dos diámetros medidos o nominales.

(2) El método para determinar el límite fluencia superior acordado con el cliente corresponde a la fase del 0.2%.

ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DE LABORATORIO

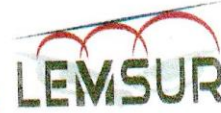


Tel.: 2976300  
Ext.: 1609





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### TRACCIÓN EN ELEMENTOS METÁLICOS

INF. No. 22 - 0424-I  
Hoja 06 de 06

Quito, 26 de agosto de 2022

#### DATOS DEL CLIENTE

**Razón social:** Carlos Luis Gallegos Flores  
**Dirección:** Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía

#### DATOS DEL PROYECTO

**Proyecto:** Estudio del Comportamiento de Muros de Corte de Placa de Acero Rigidizadas ante Cargas Cíclicas  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**NORMA:** ASTM E8

Datos de la probeta de ensayo					
Identificación	Material/Procedencia	Tipo de probeta	Sección transversal <sup>(1)</sup>		
			D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
21-I-06	ALMA DE VIGA IPE 140	Placa	13,1	4,51	59,1
Datos del ensayo					
Velocidad de ensayo MPa/s	Límite de fluencia superior <sup>(2)</sup>	Resistencia a la tracción	Elongación después de la rotura		
	Fuerza (kN)	Fuerza máxima (kN)	Longitud calibrada inicial (mm)	Longitud calibrada final después de la rotura (mm)	
8	19,80	28,36	49,98	57,66	

Resumen de resultados	
Límite de fluencia superior (MPa)	335
Resistencia a la tracción (MPa)	480
Elongación después de la rotura (%)	15,5



**Observaciones:** Todos los datos de la probeta de ensayo (identificación, material/procedencia) son proporcionadas por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente al ítem ensayado.

La información del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

(1) D<sub>1</sub> y D<sub>2</sub> corresponden a las dimensiones de la sección central de la probeta de ensayo. En el caso de probetas circulares, se reportan dos diámetros medidos o nominales.

(2) El método para determinar el límite fluencia superior acordado con el cliente correspondió al desfase del 0,2%.

ING. MERCEDES VILLACIS  
JEFE DE LABORATORIO



Tel.: 2976300  
Ext.: 1609

## **ANEXO 2**

### **Tablas de Datos de las Muestras de Acero**

ÁNGULO L20X2 (LADOS IGUALES)					
Muestra 1			Muestra 2		
$\sigma$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\epsilon$	$\sigma$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\epsilon$
0	0	0	0	0	0
66,288	0,200	0,00387597	66,416	0,200	0,00397456
129,419	0,400	0,00775194	106,516	0,400	0,00794913
229,798	0,600	0,01162791	189,223	0,600	0,01192369
340,909	0,800	0,01550388	290,727	0,800	0,01589825
385,101	0,900	0,01744186	391,604	1,000	0,01987281
386,364	1,000	0,01937984	394,737	1,200	0,02384738
387,626	1,200	0,02325581	397,87	1,400	0,02782194
388,889	1,400	0,02713178	399,749	1,600	0,0317965
390,152	1,600	0,03100775	401,003	1,800	0,03577107
391,414	1,800	0,03488372	401,003	2,000	0,03974563
392,677	2,000	0,03875969	402,882	2,200	0,04372019
393,939	2,200	0,04263566	404,135	2,400	0,04769475
396,465	2,400	0,04651163	407,268	2,600	0,05166932
398,99	2,600	0,0503876	410,401	2,800	0,05564388
404,04	2,800	0,05426357	416,667	3,000	0,05961844
409,091	3,000	0,05813953	423,559	3,200	0,063593
416,667	3,200	0,0620155	433,584	3,400	0,06756757
424,242	3,400	0,06589147	441,103	3,600	0,07154213
428,03	3,600	0,06976744	446,115	3,800	0,07551669
431,818	3,800	0,07364341	451,128	4,000	0,07949126
435,606	4,000	0,07751938	457,393	4,200	0,08346582
441,919	4,200	0,08139535	462,406	4,400	0,08744038
445,707	4,400	0,08527132	466,792	4,600	0,09141494
449,495	4,600	0,08914729	473,058	4,800	0,09538951
455,808	4,800	0,09302326	474,937	5,000	0,09936407
459,596	5,000	0,09689922	477,444	5,200	0,10333863
463,384	5,200	0,10077519	479,95	5,400	0,1073132
467,172	5,400	0,10465116	483,709	5,600	0,11128776
470,328	5,600	0,10852713	487,469	5,800	0,11526232
473,485	5,800	0,1124031	489,975	6,000	0,11923688
476,641	6,000	0,11627907	491,855	6,200	0,12321145
479,167	6,200	0,12015504	494,987	6,400	0,12718601
481,061	6,400	0,12403101	496,241	6,600	0,13116057
482,955	6,600	0,12790698	498,12	6,800	0,13513514
484,848	6,800	0,13178295	498,747	7,000	0,1391097
486,111	7,000	0,13565891	500	7,200	0,14308426
487,374	7,200	0,13953488	501,253	7,400	0,14705882
488,636	7,400	0,14341085	502,506	7,600	0,15103339
489,899	7,600	0,14728682	503,759	7,800	0,15500795

491,162	7,800	0,15116279	504,386	8,000	0,15898251
491,793	8,000	0,15503876	505,013	8,200	0,16295707
492,424	8,200	0,15891473	506,266	8,400	0,16693164
493,056	8,400	0,1627907	507,519	8,600	0,1709062
493,687	8,600	0,16666667	508,772	8,800	0,17488076
494,318	8,800	0,17054264	510,025	9,000	0,17885533
494,949	9,000	0,1744186	511,278	9,200	0,18282989
495,581	9,200	0,17829457	512,531	9,400	0,18680445
496,212	9,400	0,18217054	513,158	9,600	0,19077901
496,843	9,600	0,18604651	513,784	9,800	0,19475358

PLANCHA DE ACERO DE 1,4mm					
Muestra 3			Muestra 4		
$\sigma$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\epsilon$	$\sigma$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\epsilon$
0	0	0	0	0	0
51,81	0,250	0,00502513	69,444	0,200	0,003996
96,754	0,500	0,01005025	125	0,400	0,00799201
168,539	0,750	0,01507538	193,713	0,600	0,01198801
182,272	1,000	0,0201005	206,871	0,800	0,01598402
189,138	1,250	0,02512563	210,526	1,000	0,01998002
195,381	1,500	0,03015075	217,105	1,200	0,02397602
203,496	1,750	0,03517588	222,953	1,400	0,02797203
209,114	2,000	0,04020101	228,07	1,600	0,03196803
213,483	2,250	0,04522613	233,187	1,800	0,03596404
219,101	2,500	0,05025126	236,842	2,000	0,03996004
222,846	2,750	0,05527638	241,228	2,200	0,04395604
225,968	3,000	0,06030151	244,883	2,400	0,04795205
230,961	3,250	0,06532663	247,807	2,600	0,05194805
234,707	3,500	0,07035176	250	2,800	0,05594406
238,702	3,750	0,07537688	253,655	3,000	0,05994006
241,573	4,000	0,08040201	255,848	3,200	0,06393606
244,07	4,250	0,08542714	260,234	3,400	0,06793207
246,567	4,500	0,09045226	262,427	3,600	0,07192807
248,439	4,750	0,09547739	264,62	3,800	0,07592408
249,688	5,000	0,10050251	268,275	4,000	0,07992008
252,185	5,250	0,10552764	269,737	4,200	0,08391608
255,93	5,500	0,11055276	271,93	4,400	0,08791209
258,427	5,750	0,11557789	274,123	4,600	0,09190809
260,3	6,000	0,12060302	276,316	4,800	0,0959041
261,548	6,250	0,12562814	277,778	5,000	0,0999001
263,421	6,500	0,13065327	279,971	5,200	0,1038961
265,918	6,750	0,13567839	282,164	5,400	0,10789211
267,79	7,000	0,14070352	283,626	5,600	0,11188811
269,039	7,250	0,14572864	284,722	5,800	0,11588412

270,287	7,500	0,15075377	285,819	6,000	0,11988012
271,536	7,750	0,15577889	286,55	6,200	0,12387612
272,784	8,000	0,16080402	287,281	6,400	0,12787213
273,408	8,250	0,16582915	288,012	6,600	0,13186813
274,032	8,500	0,17085427	288,743	6,800	0,13586414
274,345	8,750	0,1758794	289,474	7,000	0,13986014
274,657	9,000	0,18090452	290,205	7,200	0,14385614
274,864	9,250	0,18592965	290,936	7,400	0,14785215
275,073	9,500	0,19095477	291,667	7,600	0,15184815
275,281	9,750	0,1959799	292,398	7,800	0,15584416
275,331	10,000	0,20100503	293,129	8,000	0,15984016
275,376	10,250	0,20603015	293,86	8,200	0,16383616
275,452	10,500	0,21105528	294,591	8,400	0,16783217
275,527	10,750	0,2160804	295,322	8,600	0,17182817
275,602	11,000	0,22110553	296,053	8,800	0,17582418
275,677	11,250	0,22613065	296,784	9,000	0,17982018
275,754	11,500	0,23115578	297,515	9,200	0,18381618
275,825	11,750	0,2361809	298,246	9,400	0,18781219
275,905	12,000	0,24120603	298,977	9,600	0,19180819
276,061	12,250	0,24623116	299,708	9,800	0,1958042
276,218	12,500	0,25125628			
276,374	12,750	0,25628141			
276,529	13,000	0,26130653			
276,842	13,250	0,26633166			
277,154	13,500	0,27135678			
277,466	13,750	0,27638191			
277,778	14,000	0,28140704			
277,957	14,250	0,28643216			
278,134	14,500	0,29145729			
278,313	14,750	0,29648241			
278,491	15,000	0,30150754			
278,67	15,250	0,30653266			
278,847	15,500	0,31155779			
279,026	15,750	0,31658291			

ALMA DE VIGA IPE140					
Muestra 5			Muestra 6		
$\sigma$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\epsilon$	$\sigma$ (Mpa)	$\delta$ (mm)	$\epsilon$
0	0	0	0	0	0
10,482	0,2	0,00401768	13,819	0,2	0,0040016
19,916	0,4	0,00803536	27,638	0,4	0,0080032
41,929	0,6	0,01205303	59,673	0,6	0,0120048
72,327	0,8	0,01607071	87,94	0,8	0,0160064
104,822	1	0,02008839	126,884	1	0,020008

138,365	1,2	0,02410607	173,367	1,2	0,0240096
180,294	1,4	0,02812374	229,899	1,4	0,0280112
235,849	1,6	0,03214142	278,894	1,6	0,03201281
309,224	1,8	0,0361591	335,427	1,8	0,03601441
319,706	1,82	0,03656087	341,709	2	0,04001601
322,851	2	0,04017678	347,99	2,2	0,04401761
325,996	2,2	0,04419446	354,271	2,4	0,04801921
330,189	2,4	0,04821213	361,809	2,6	0,05202081
333,333	2,6	0,05222981	368,09	2,8	0,05602241
338,574	2,8	0,05624749	379,397	3	0,06002401
342,767	3	0,06026517	385,678	3,2	0,06402561
346,96	3,2	0,06428284	394,472	3,4	0,06802721
350	3,4	0,06830052	403,266	3,6	0,07202881
358,491	3,6	0,0723182	410,804	3,8	0,07603041
368,973	3,8	0,07633588	417,085	4	0,08003201
376,31	4	0,08035356	422,111	4,2	0,08403361
382,6	4,2	0,08437123	427,136	4,4	0,08803521
389,937	4,4	0,08838891	432,161	4,6	0,09203681
395,178	4,6	0,09240659	437,186	4,8	0,09603842
400	4,8	0,09642427	440,955	5	0,10004002
406,709	5	0,10044194	445,98	5,2	0,10404162
410,901	5,2	0,10445962	448,492	5,4	0,10804322
415,094	5,4	0,1084773	452,261	5,6	0,11204482
419,287	5,6	0,11249498	454,774	5,8	0,11604642
423,48	5,8	0,11651266	457,286	6	0,12004802
426,625	6	0,12053033	459,799	6,2	0,12404962
429,769	6,2	0,12454801	462,312	6,4	0,12805122
432,914	6,4	0,12856569	464,824	6,6	0,13205282
436,059	6,6	0,13258337	467,337	6,8	0,13605442
439,203	6,8	0,13660104	469,849	7	0,14005602
442,348	7	0,14061872	472,362	7,2	0,14405762
444,969	7,2	0,1446364	474,246	7,4	0,14805922
447,589	7,4	0,14865408	476,131	7,6	0,15206082
450,21	7,6	0,15267176	476,759	7,8	0,15606242
452,306	7,8	0,15668943	477,387	8	0,16006403
454,403	8	0,16070711	478,015	8,2	0,16406563
455,975	8,2	0,16472479	478,643	8,4	0,16806723
457,547	8,4	0,16874247	478,957	8,6	0,17206883
459,119	8,6	0,17276014	479,271	8,8	0,17607043
460,692	8,8	0,17677782	479,585	9	0,18007203
461,347	9	0,1807955	479,899	9,2	0,18407363
462,002	9,2	0,18481318			
462,657	9,4	0,18883086			
463,312	9,6	0,19284853			
464,151	9,8	0,19686621			

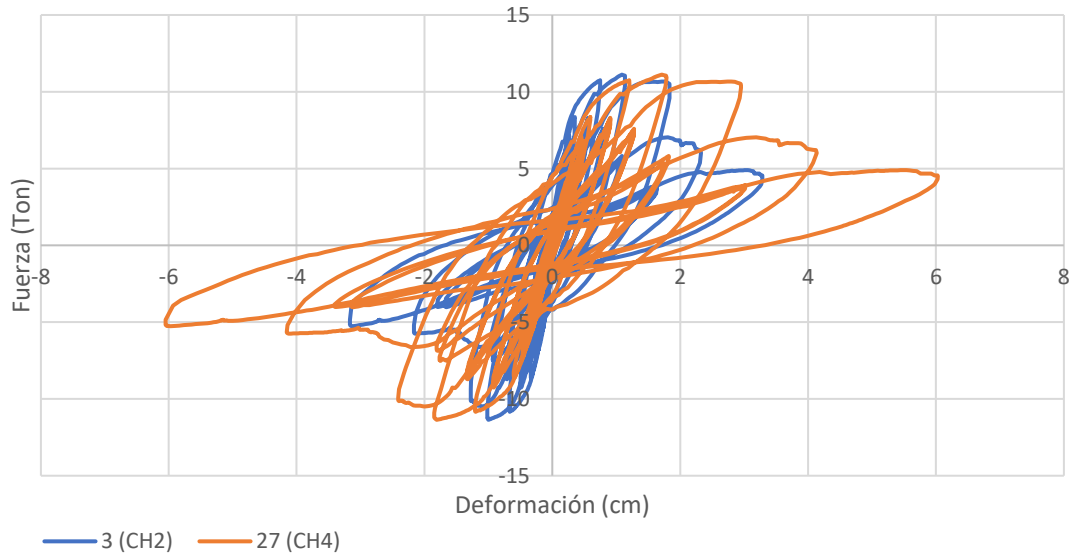


464,989	10	0,20088389
465,828	10,2	0,20490157
466,667	10,4	0,20891924
467,505	10,6	0,21293692
468,344	10,8	0,2169546
469,182	11	0,22097228
470,021	11,2	0,22498996
470,859	11,4	0,22900763
471,698	11,6	0,23302531

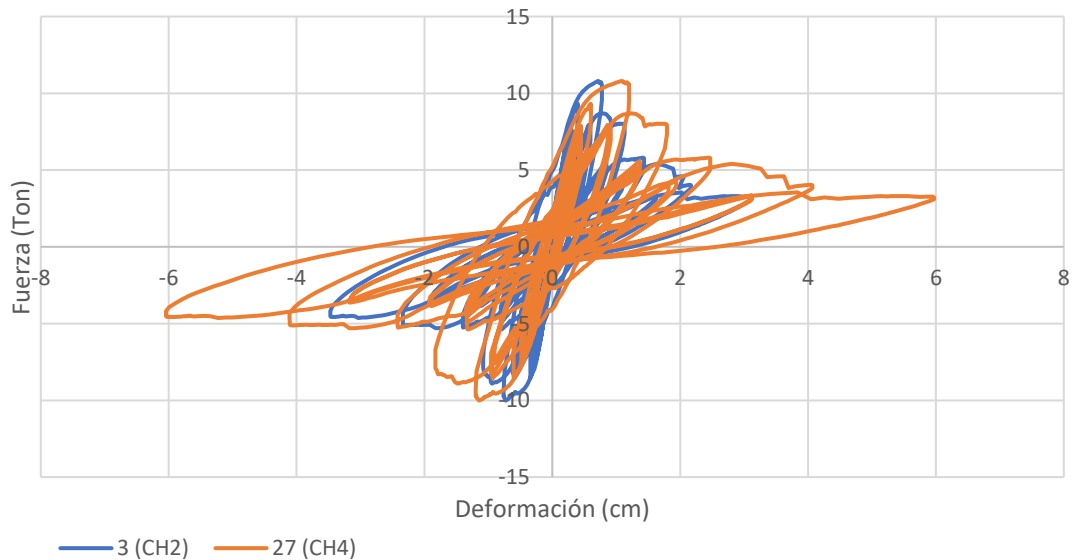
## **ANEXO 3**

**Curvas de los Muros y el Pórtico (en Toneladas y centímetros)**

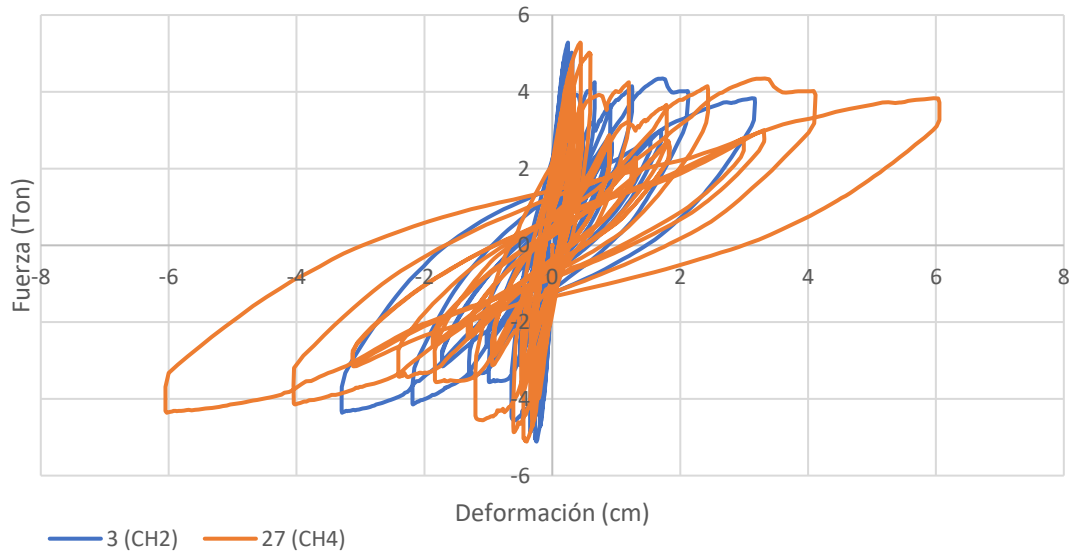
29/4/2022 12:19 - DATASOIL - CH1: 2019AFB006 CH2: LTD 500mm  
 500mm CH3: LTD 500mm CH4: LTD 500mm MURO 1



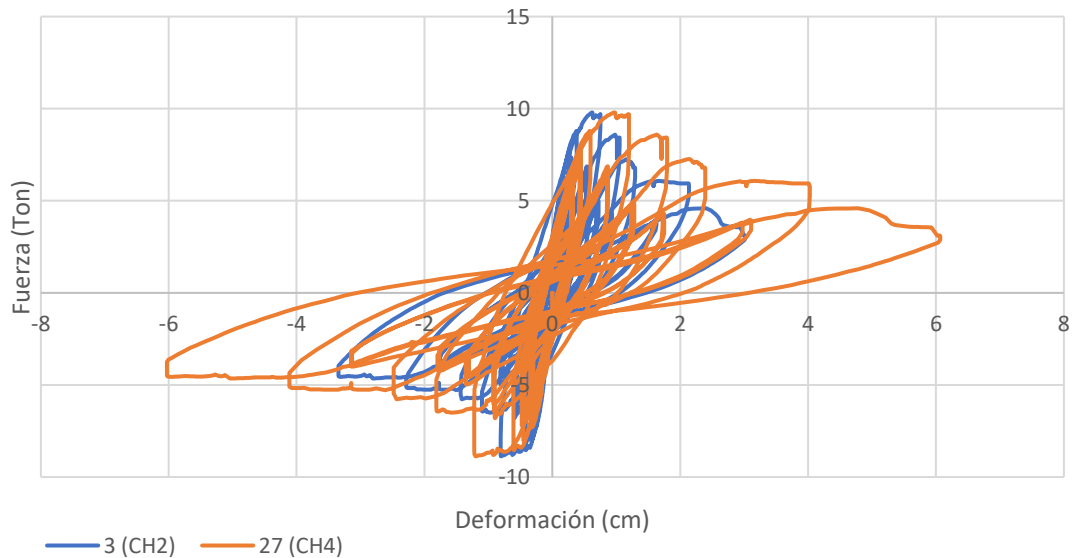
3/5/2022 10:56 - DATASOIL - CH1: 2019AFB006 CH2: LTD 500mm  
 500mm CH3: LTD 500mm CH4: LTD 500mm MURO 2



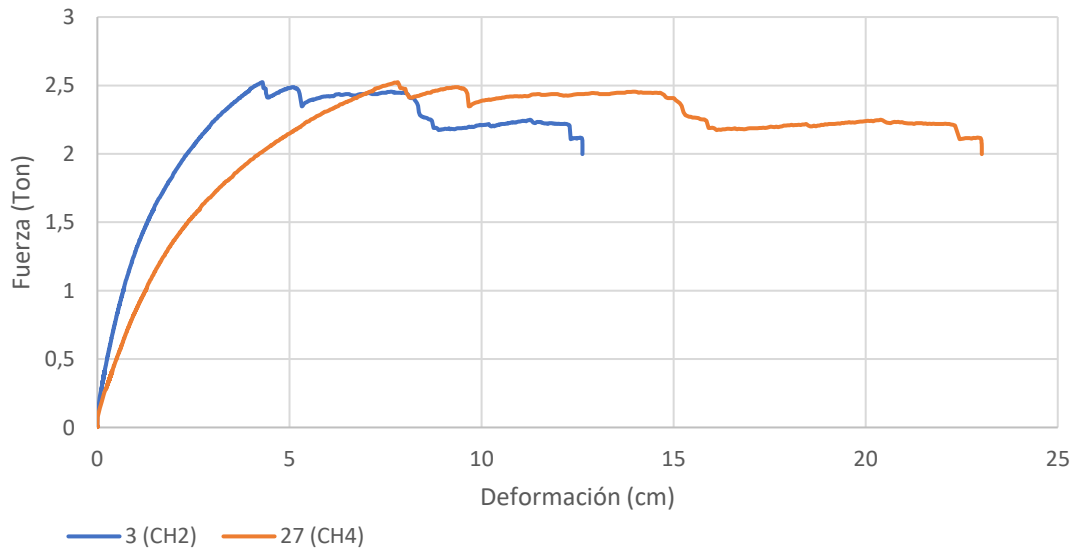
4/5/2022 11:11 - DATASOIL - CH1: 2019AFB006 CH2: LTD 500mm  
 500mm CH3: LTD 500mm CH4: LTD 500mm MURO 3



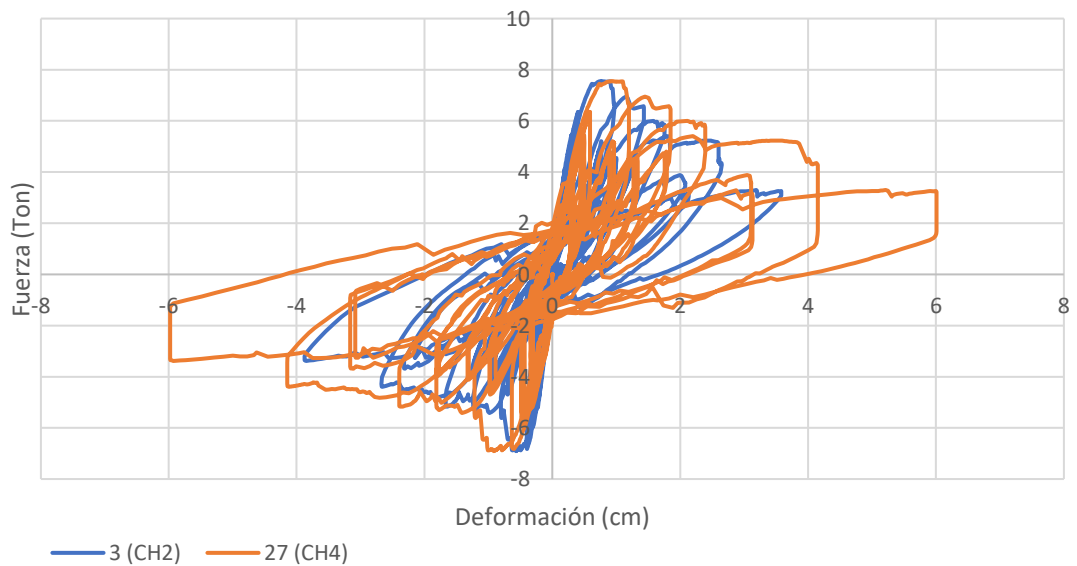
5/5/2022 9:25 - DATASOIL - CH1: 2019AFB006 CH2: LTD 500mm  
 500mm CH3: LTD 500mm CH4: LTD 500mm MURO 4

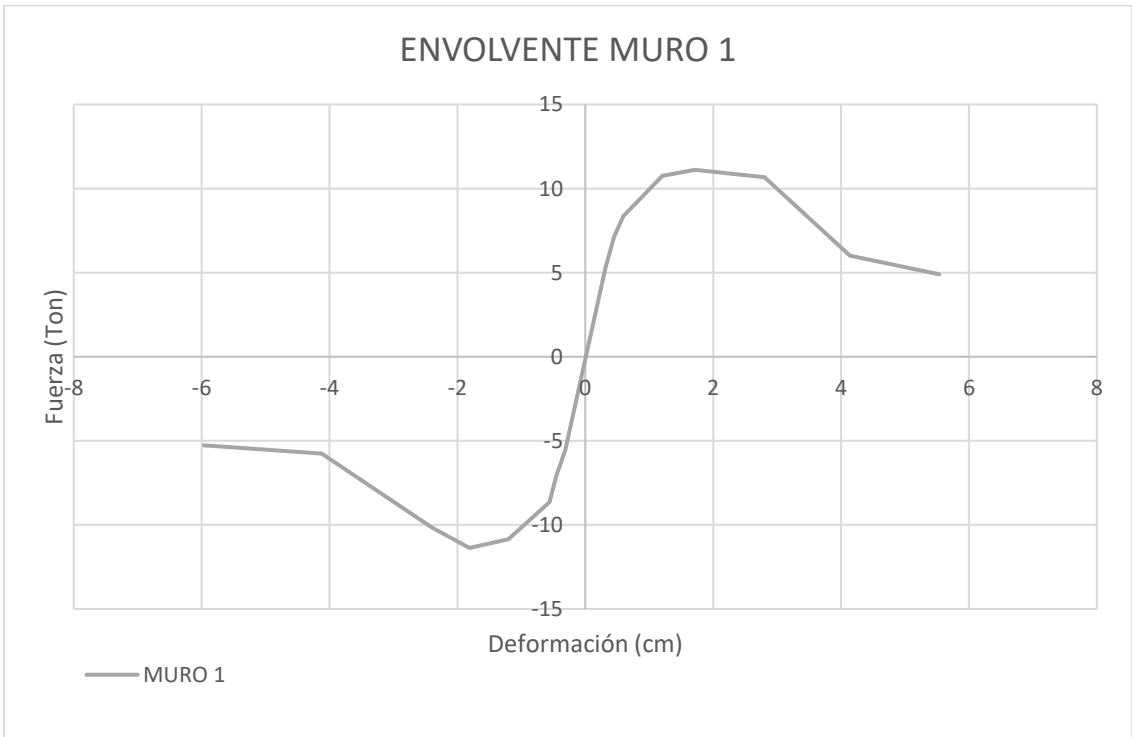


3/5/2022 15:07 - DATASOIL - CH1: 2019AFB006 CH2: LTD 500mm  
500mm CH3: LTD 500mm CH4: LTD 500mm PÓRTICO 5

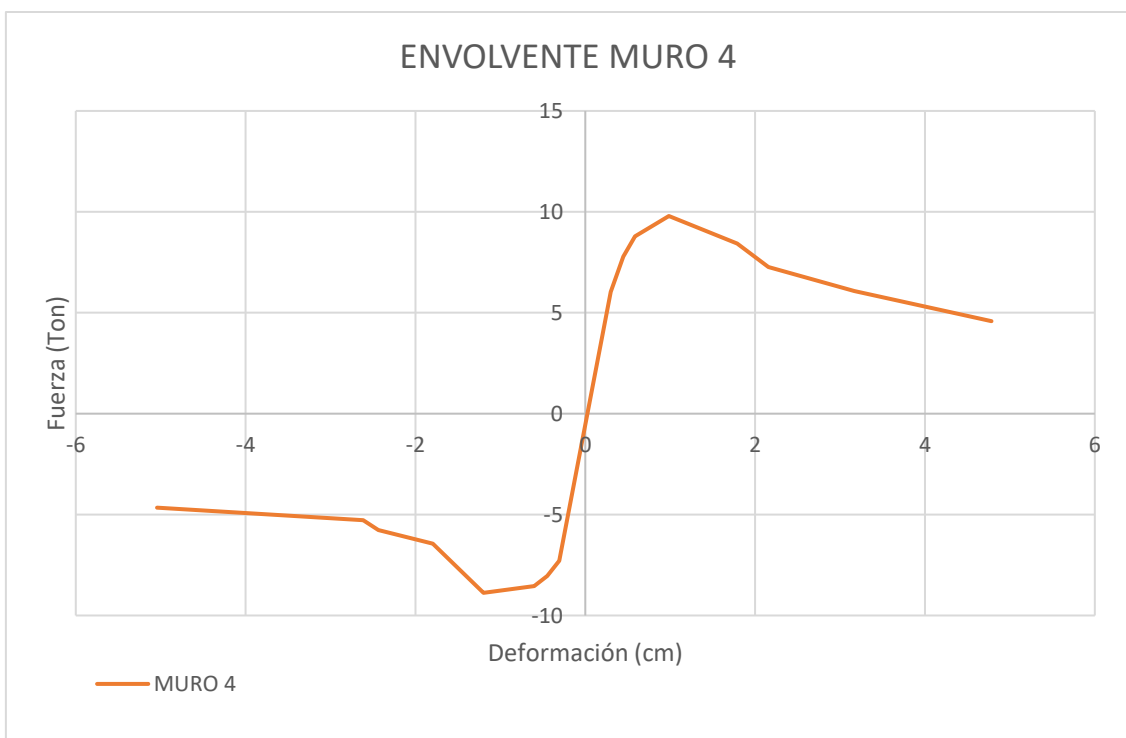
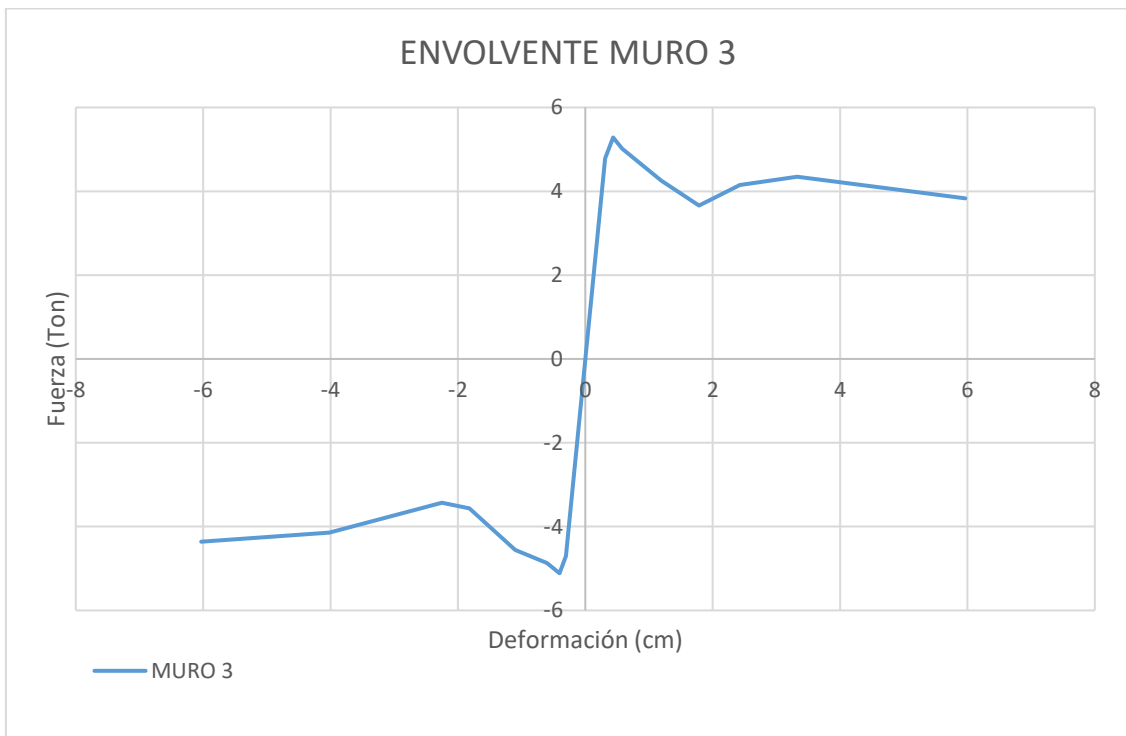


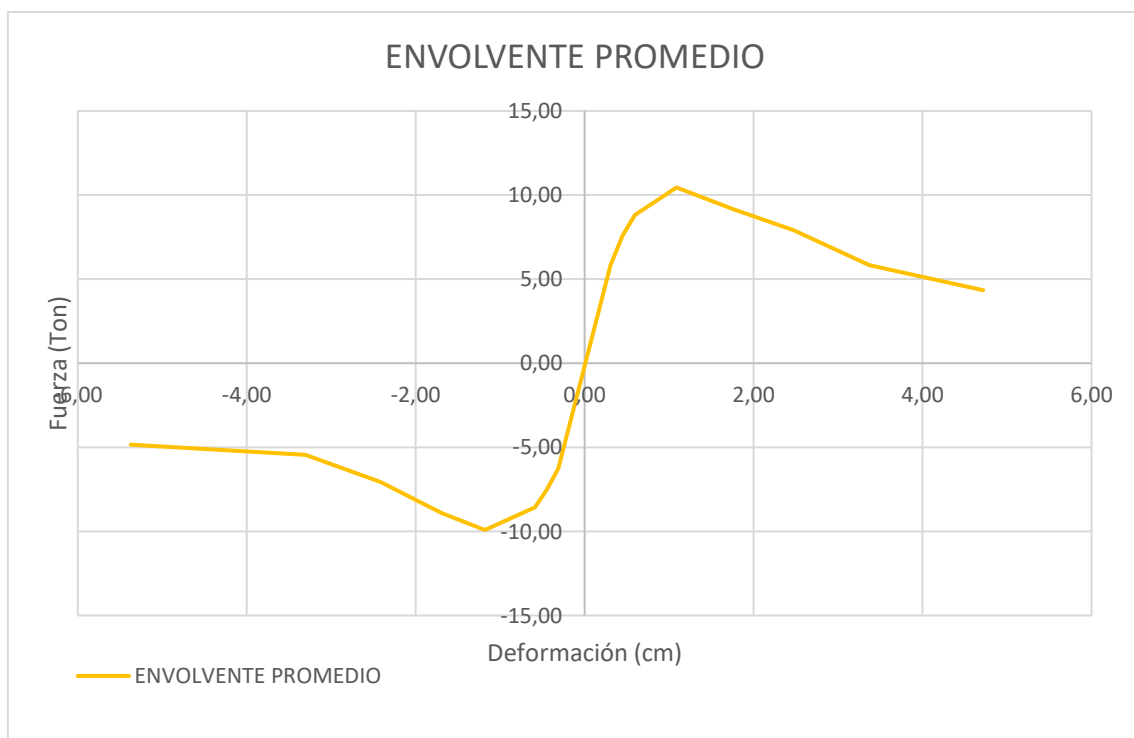
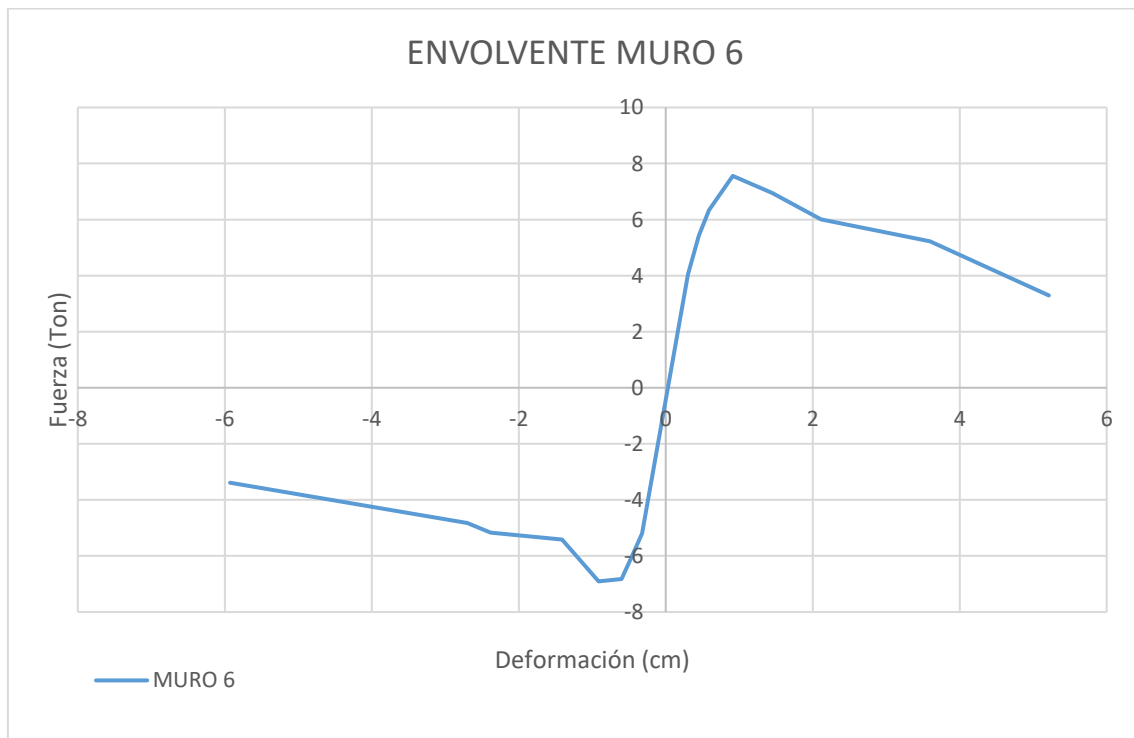
6/5/2022 10:25 - DATASOIL - CH1: 2019AFB006 CH2: LTD 500mm  
500mm CH3: LTD 500mm CH4: LTD 500mm MURO 6

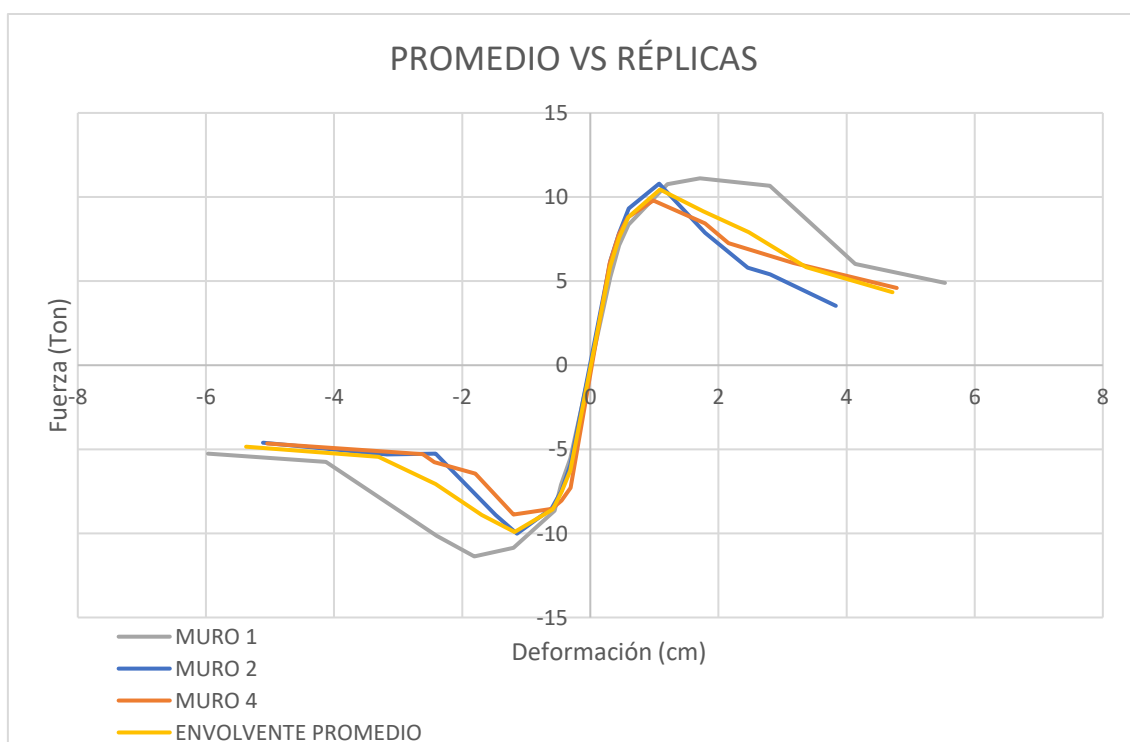
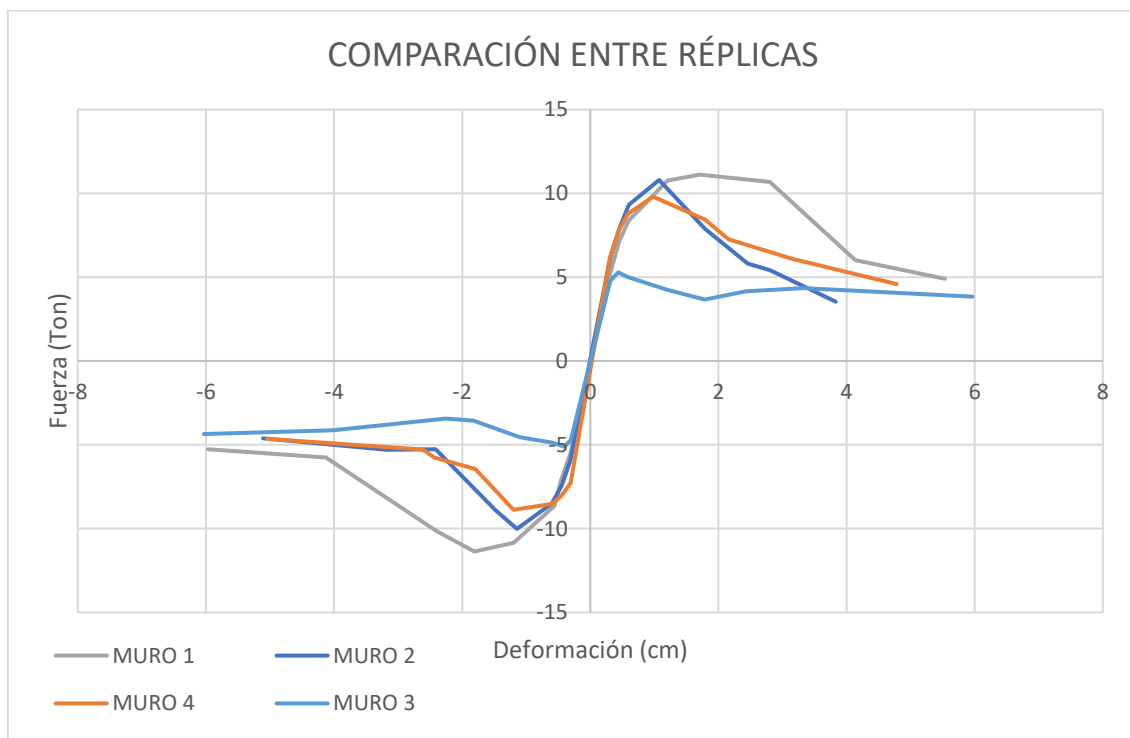


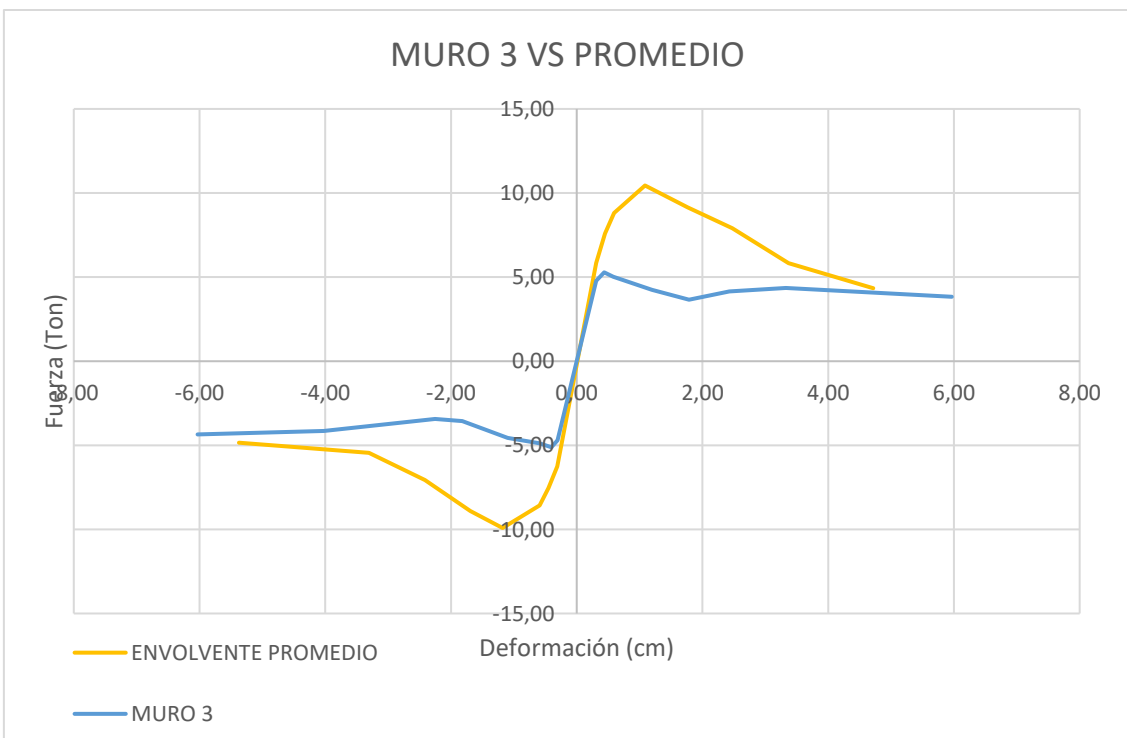
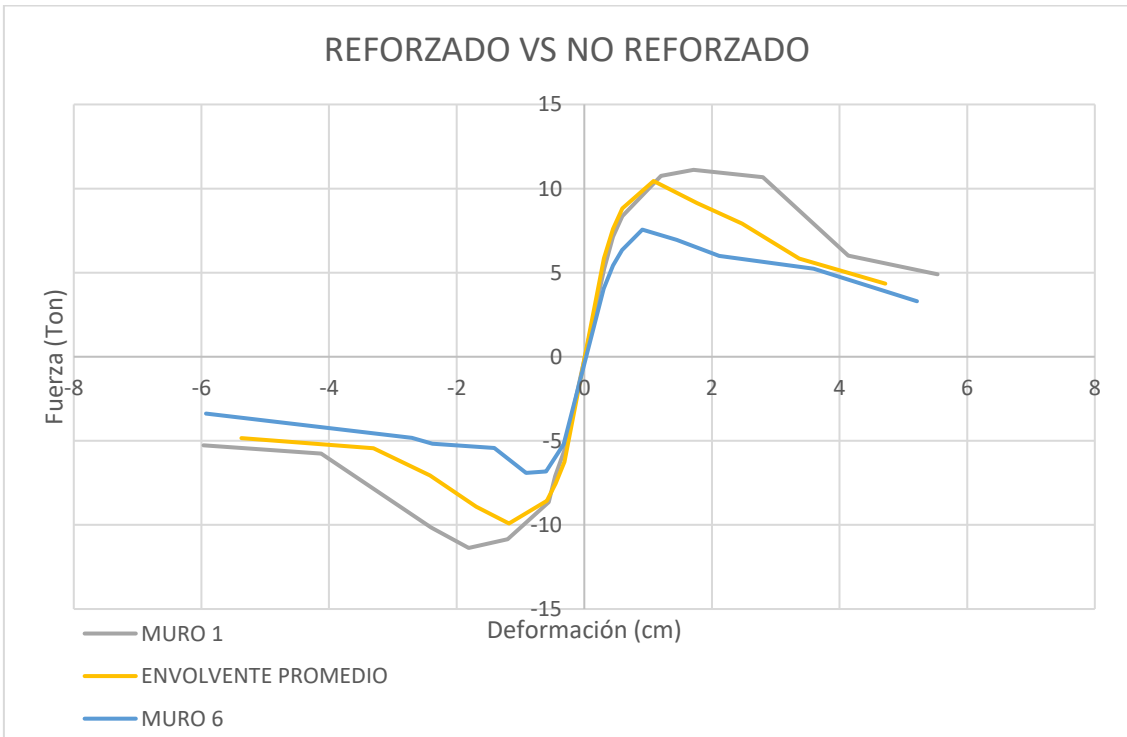


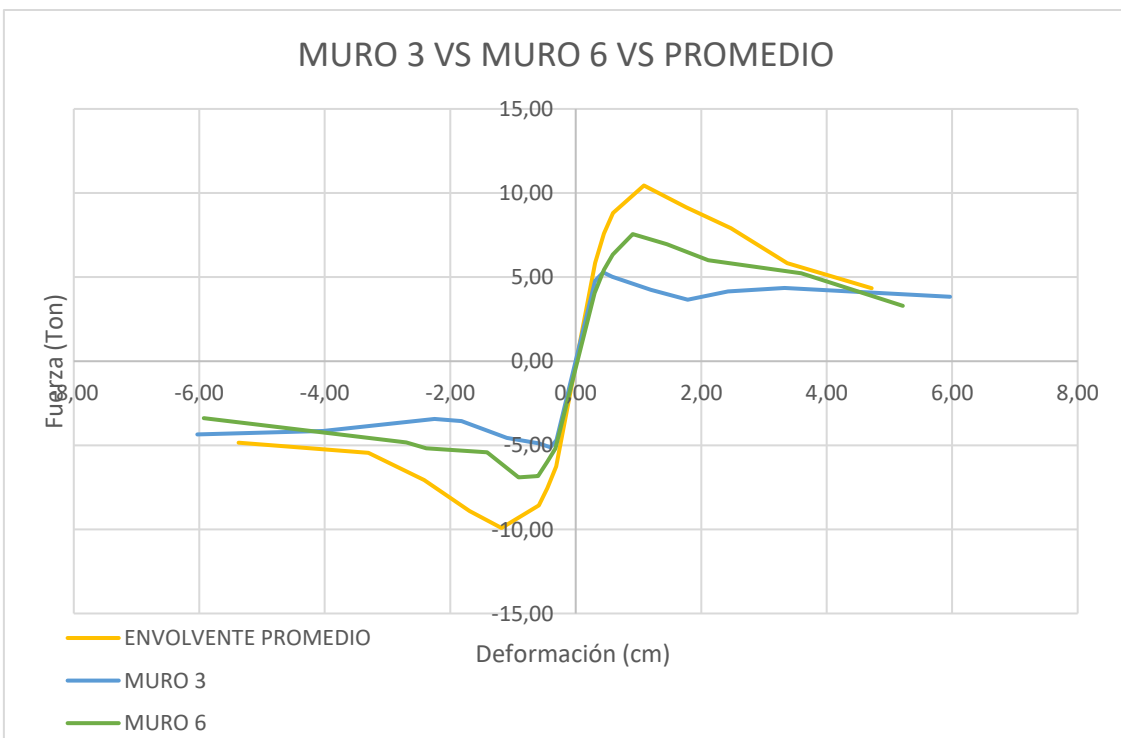
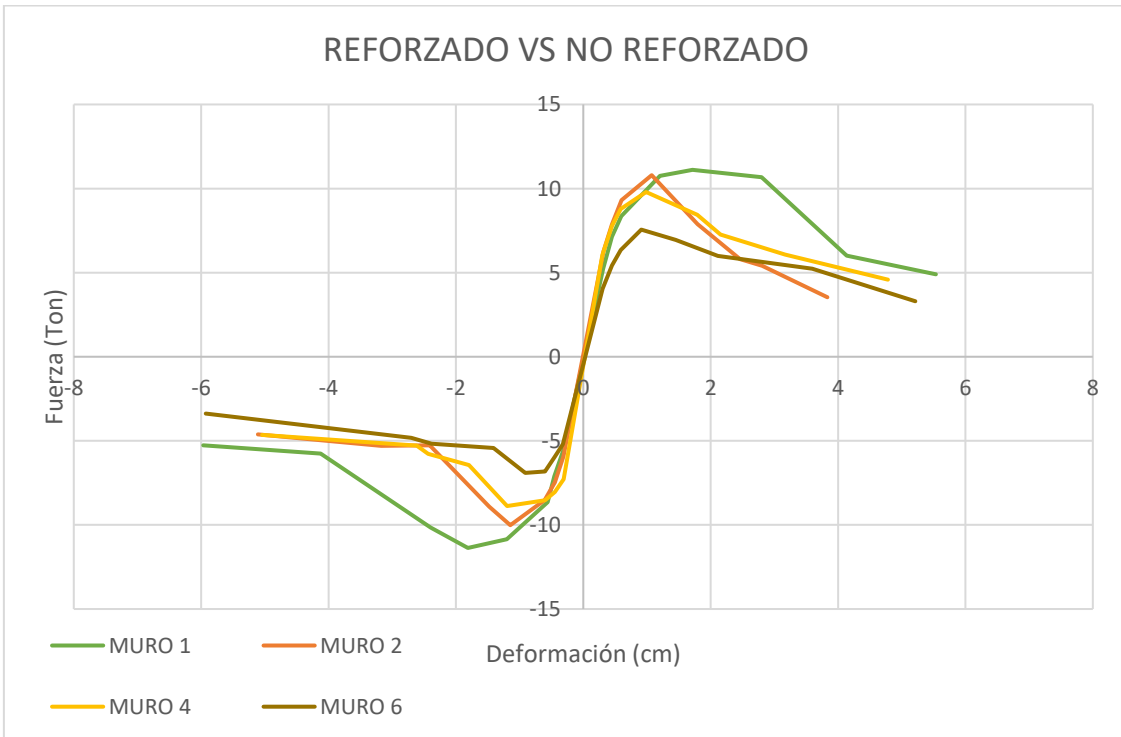












## **ANEXO 4**

**Fotos de Laboratorio de los Muros y el Pórtico**



**Fotografía 1: Corte de perfiles para el ensamblado de los muros.**



**Fotografía 2: Placas de base para los muros.**



**Fotografía 3: Equipo de suelda.**

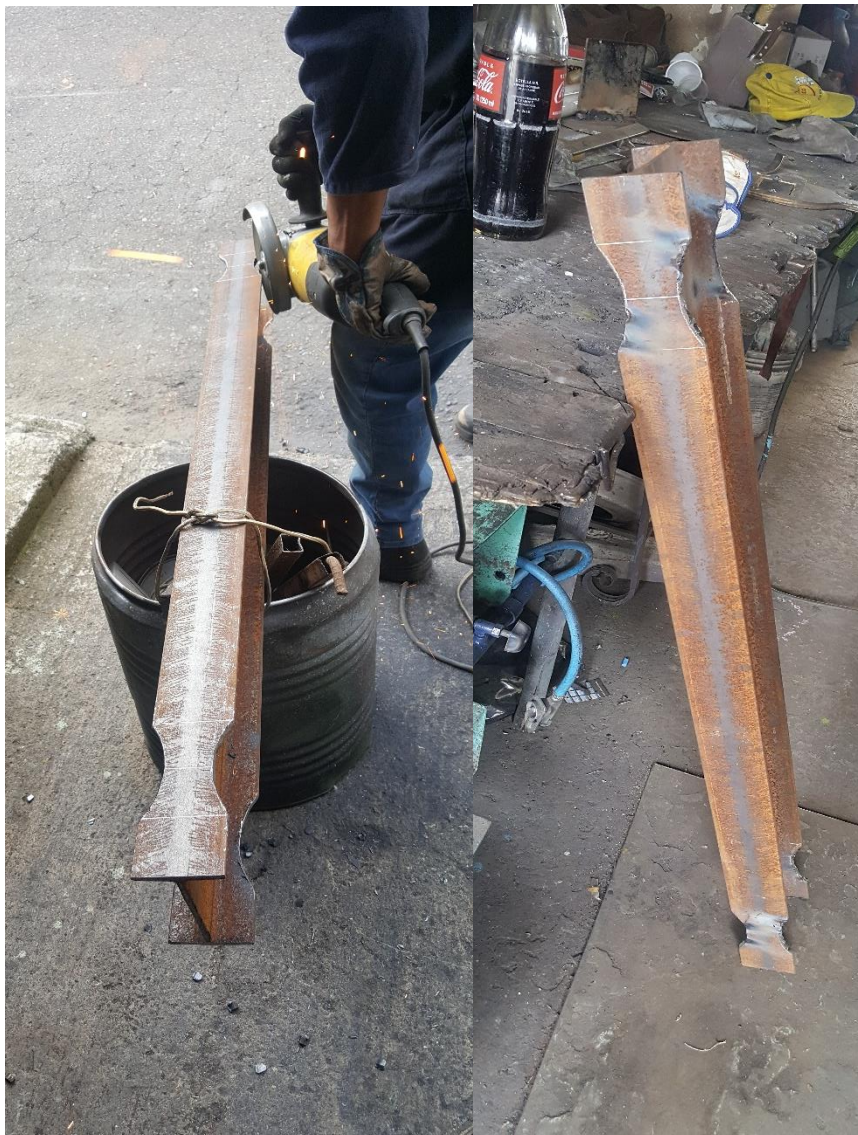




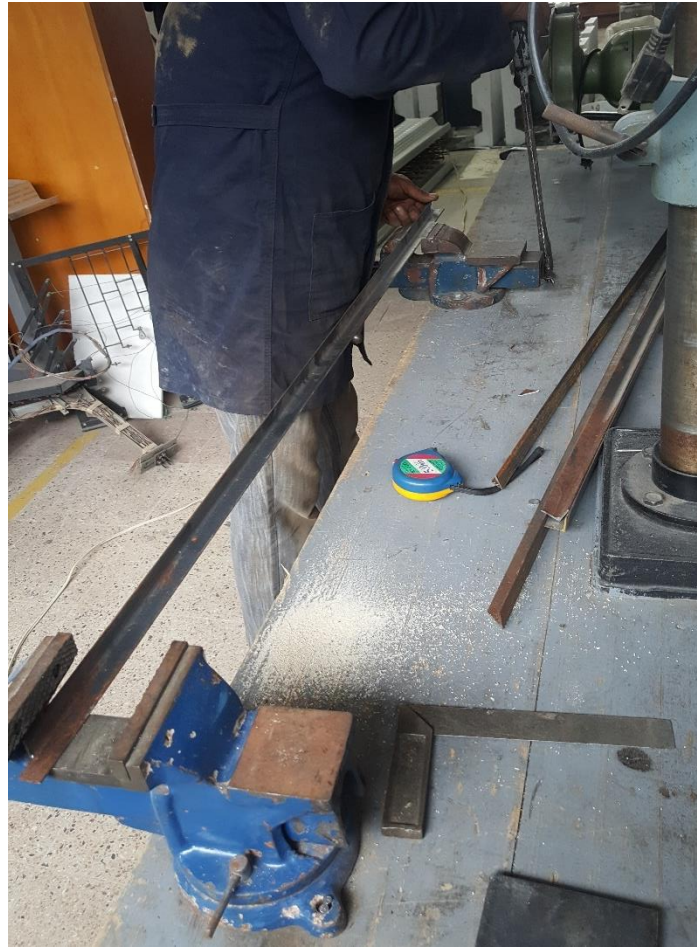
**Fotografía 4: Apoyos listos para la cimentación.**



**Fotografía 5: Moldeado de las secciones RBS.**



**Fotografía 6: Corte de ángulos rigidizadores.**



**Fotografía 7: Armado de las muestras.**

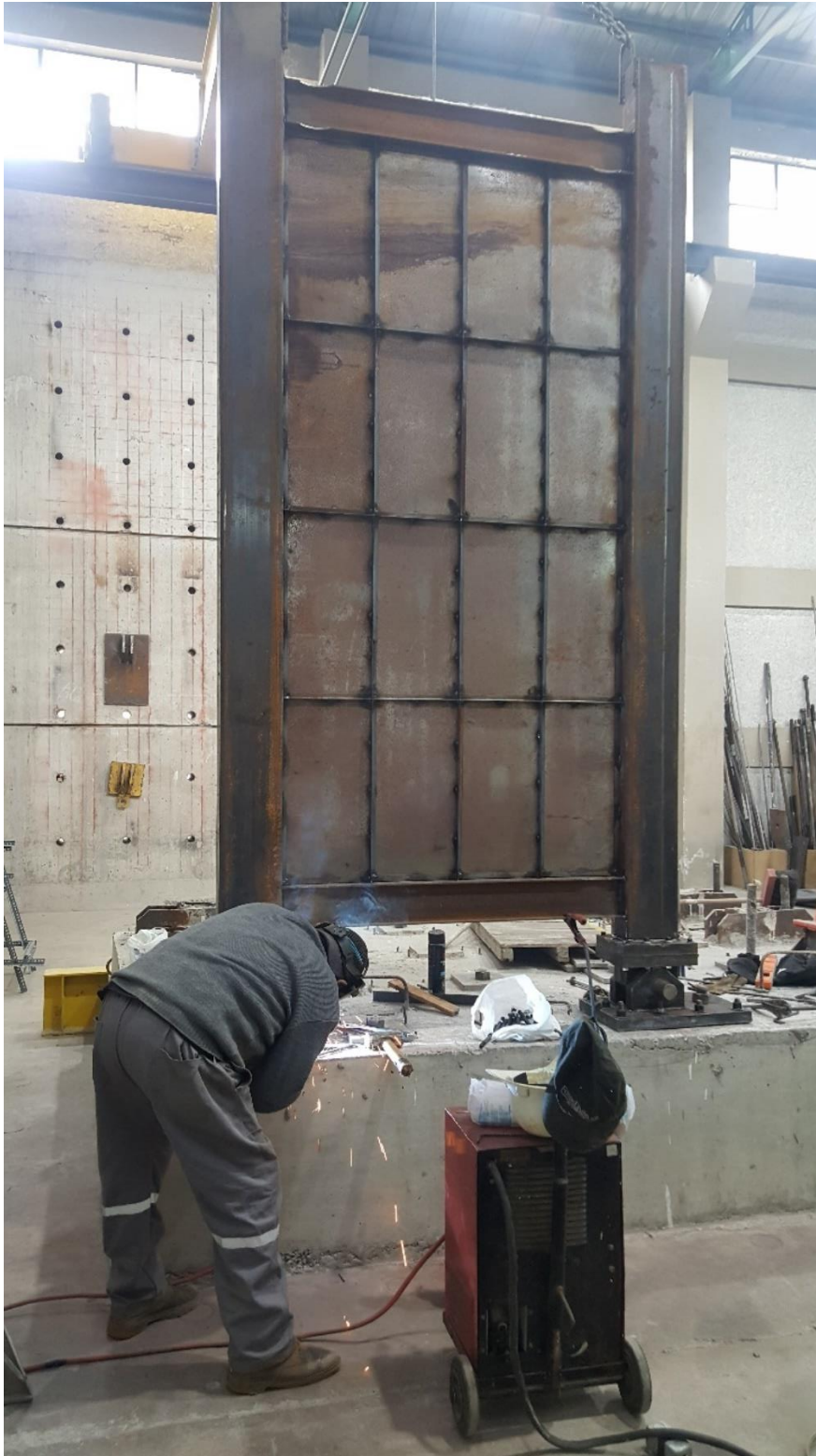




Fotografía 8: Muro con cadena para ser transportado por el puente grúa.



**Fotografía 9: Montaje y centrado del primer muro**





**Fotografía 10: Armado de estructura para soporte de LVDT's.**



**Fotografía 11: Comprobación y posicionamiento del gato hidráulico.**

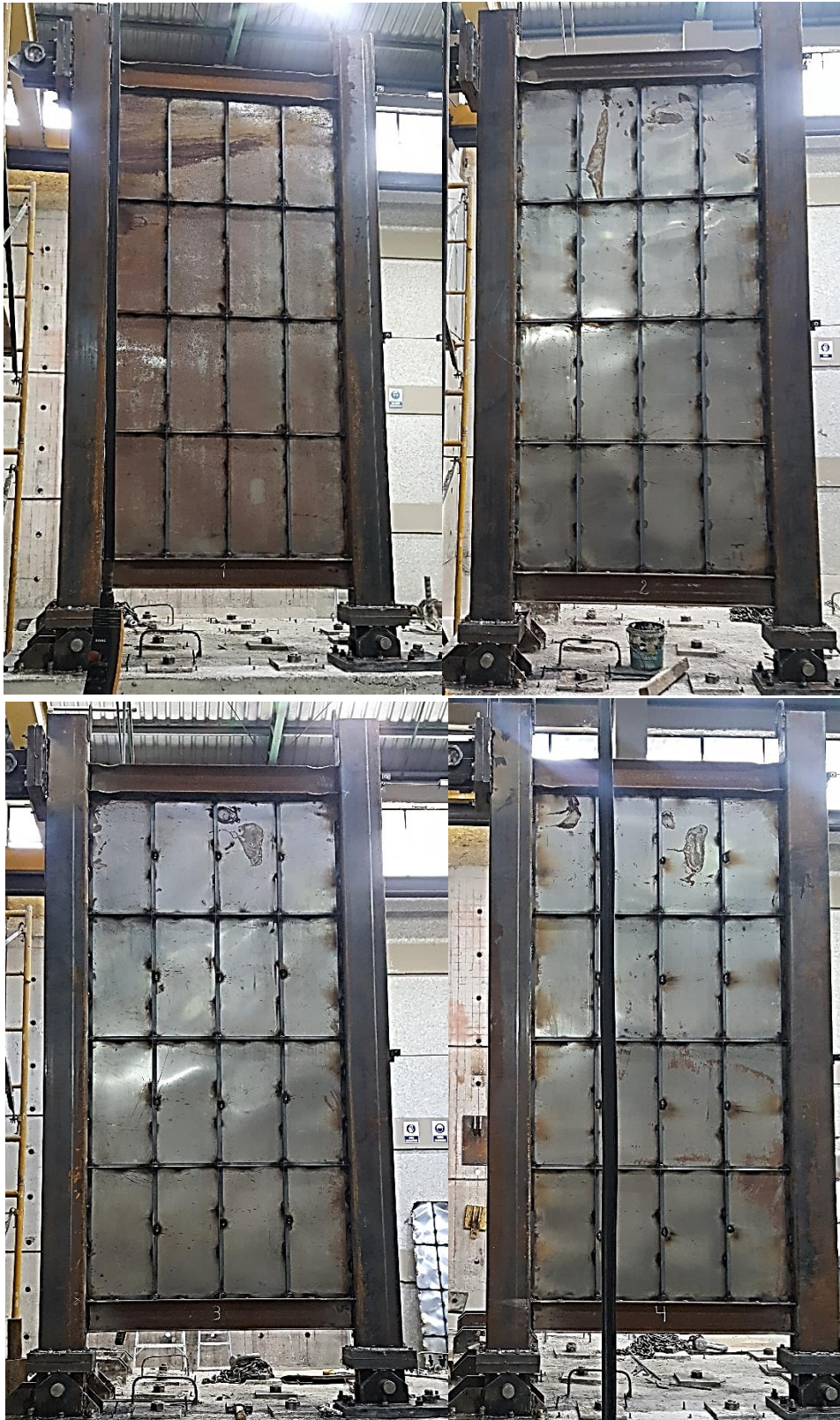


Fotografía 12: Preparación de la zona de ensayo.





Fotografía 13: Réplicas del muro SPSW rigidizado.

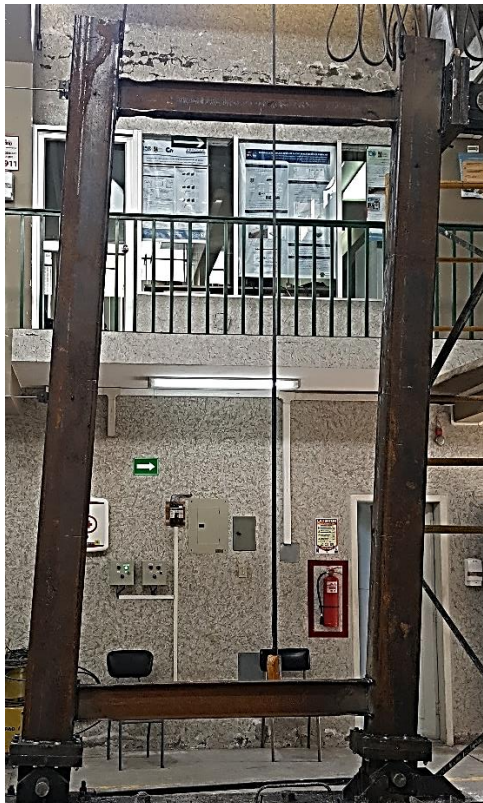




**Fotografía 14: Pórtico y muro SPSW sin rigidizadores.**



**Fotografía 15: Pórtico luego de llegar al límite de desplazamientos**





Fotografía 16: Muros luego del ensayo.





**Fotografía 17: falla por desprendimiento de la suelda en el perímetro de la placa de acero.**

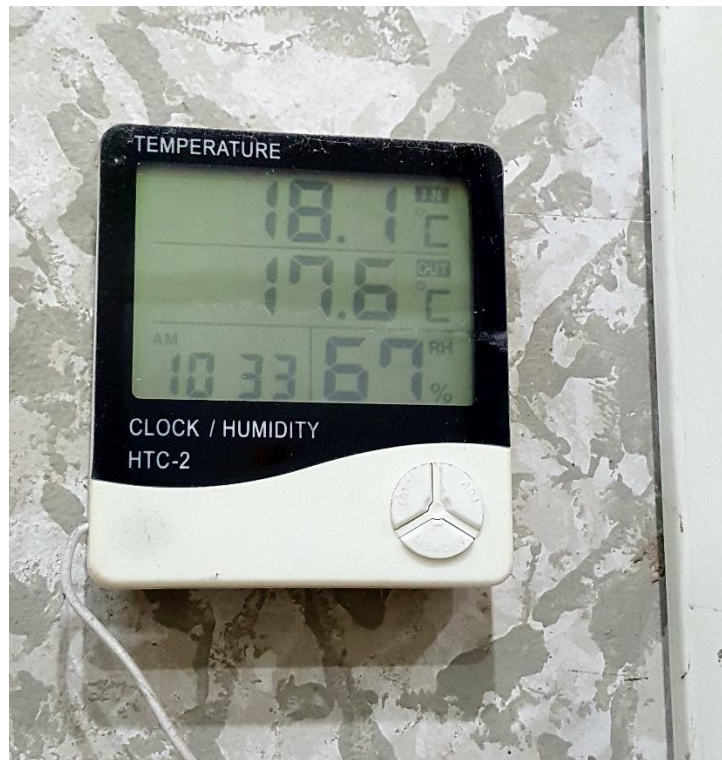


**Fotografía 18: Muros rigidizado y sin rigidizar durante el ensayo de cargas cíclicas.**





**Fotografía 19: Termómetro para comprobación de condiciones ambientales.**



## **ANEXO 5**

### **Definición de Variables y Siglas**

DEFINICIÓN DE SIGLAS Y VARIABLES UTILIZADAS	
Símbolo	Definición
$(\gamma_o)_{max}$	Coeficiente máximo
*a	Distancia entre la cara de la columna y el inicio del corte RBS
*a	Separación entre rigidizadores
*a,b	Dimensiones del espacio de placa analizada
*b	Longitud de corte de la RBS
*bat	Longitud del ala del atiesador
*bat	Separación de atiesadores en base
*c	Profundidad del corte en el centro de la RBS
*h	Peralte del alma de la viga
*h,H	Distancia entre ejes de las vigas (HBE)
*L	Distancia entre ejes de las columnas (VBE)
*L, l	longitud del elemento
*t	Espesor del alma de la viga
*tw	Espesor del alma
*tw, tpl	Espesor de la placa de acero
$\mu$	Coeficiente de Poisson del acero
Aat	Área de la sección transversal del rigidizador
Ab	Área del perfil de las vigas
AC	Corriente Alterna
Ac	Área del perfil de las columnas
Ag	Área bruta del perfil o elemento
AISC	Sociedad Americana de la Construcción en Acero
AISI	Instituto Americano del Hierro y el Acero
ANSI	Instituto Nacional Americano de Estándares
Apl	Área transversal del espesor de la placa
ASTM	Sociedad Americana de Ensayos y Materiales
aw	Base de la nueva sección
AWS	Sociedad Americana de Soldadura
bbf	Ancho del patín de la viga
bf	longitud de los patines
bw	Altura de la nueva sección
CFST	Tubos de Acero Rellenos de Hormigón
Cpr	Factor de conexión
CR	Muro de placa de acero de esquinas recortadas
d	Peralte del perfil de la viga
DC	Corriente Continua
E	Módulo de Young
e	Longitud de conexión
Eat	Módulo de Young del atiesador
Ec	Módulo de Young de las columnas
Ep	Módulo de Young de la placa de acero
Et	Módulo de Young tangencial o instantáneo
Ev	Módulo de Young de la viga

Fcr	Esfuerzo crítico de falla del elemento
FEMA	Agencia Federal Emergente de Control
Fu	Resistencia última del acero
Fy, $\sigma_y$	Esfuerzo de fluencia del acero
fyat	Esfuerzo de fluencia del atiesador
fyp	Esfuerzo de fluencia de la placa de acero
Gk	Factor de restricción del nudo
hat	Separación de atiesadores en altura
HBE	Elemento de Borde Horizontal
Hcf	Separación entre las caras internas de las vigas
hhinge	Distancia entre el eje de la viga inferior y las rótulas plásticas de las columnas
hw	Altura del alma
I	Inercia del elemento
Ib	Momento de inercia de la viga (HBE)
Ic	Momento de inercia de la columna (VBE)
Io	Inercia mínima del rigidizador
k	longitud efectiva del elemento
kat	Factor de placa del atiesador
kp	Factor de placa
kpr	Factor de placa por los rigidizadores
l/r	relación de esbeltez
Lat	Longitud del atiesador
Lcf	Longitud libre entre las caras internas de las columnas
Lh	Distancia entre las rotulas plásticas de la viga
MIG o GMAW	Soldadura de Metal por Arco protegido con Gas
Mp	Momento flector plástico de la viga en las conexiones
Mpr	Momento e plastificación probable en las rótulas plásticas
n	numero de fajas o divisiones del muro
P	Muro de placa de acero perforada
Pe	Carga de Euler
Pn	Capacidad nominal del elemento a compresión
P-SPSW	Muros SPSW de placa perforada
r	Radio de giro del elemento
R	Radio de la curva de la sección RBS
RBS	Sección Reducida de la Viga
RC	Muros de acero-concreto
RF	Marcos Oscilantes
R-SPSW	Muros SPSW de placa reforzada
rx, ry	radio de giro respecto a los ejes x o y
Ry	Relación de límites elásticos (AISC)
S2	Muro de placa de acero
SC-SPSW	Muros SPSW Autocentrantes
SF	Fusibles Estructurales
SMAW	Soldadura de Metal por Arco Protegido

SPSW	Muro de corte de placa de acero (Steel Plate Shear Wall)
t/a ; t/b	relación grosor-longitud (a o b)
tat, eat	Espesor del atiesador
tbf	Espesor del patín de la viga
TEBF's	Arriostramientos diagonales excéntricos
tf	Espesor de los patines
TIG o GTAW	Soldadura de Tungsteno por Arco protegido con Gas
tw	Espesor de la placa de acero
V	Carga de corte aplicada en una viga
VBE	Elemento de Borde Vertical
Vn	Capacidad nominal al corte del muro SPSW rigidizado
Vnb	Capacidad nominal al corte por flexión de la viga en las conexiones
Vnp	Capacidad nominal al corte de la placa de acero
V'np	Capacidad nominal corregida de la placa de acero al corte
Vnt	Capacidad nominal aportada por los rigidizadores
Vp	Corte de plastificación de la viga
Vt	Carga absorbida por el aporte de los rigidizadores
Vu	Carga última de corte obtenida de las condiciones externas
Vv	Carga absorbida netamente por la viga
ZRBS	Módulo plástico en el centro de la sección RBS
Zx	Módulo plástico del perfil respecto al eje x
$\alpha$	Ángulo de trabajo de la placa de acero
$\alpha_p$	Relación de aspecto a/b o Lcf/Hcf
$\alpha_{pr}$	Relación de aspecto por los rigidizadores
$\beta$	Relación de módulos plásticos
$\gamma_o$	Coefficiente para inercia mínima del rigidizador
$\delta$	Relación entre áreas Aat/Apl
$\eta$	Coefficiente de relación entre Et y E
$\theta$	Constante de ecuación
$\lambda$	Factor de esbeltez del elemento
$\lambda_b$	Relación Lh/L
$\rho$	Relación de aspecto del muro general
$\sigma, \tau$	Esfuerzos
$\sigma_{cr}$	Esfuerzo crítico de pandeo de una placa de acero por compresión
$\sigma_h$	Esfuerzo crítico hipotético de falla
$\sigma_t$	Esfuerzo de tensión distribuido en los espacios de los rigidizadores
$\tau_{cr}$	Esfuerzo crítico de pandeo de una placa de acero por cortante
$\tau_{crat}$	Esfuerzo crítico de corte del atiesador
$\tau_{crr}$	Esfuerzo crítico por los rigidizadores
$\tau_h$	Esfuerzo crítico hipotético por corte
$\tau_y$	Esfuerzo de fluencia del acero por corte
$\phi$	Factor de reducción

Nota: las variables con "\*" se duplican, para lo que hay que tener en cuenta la fórmula donde se aplica para su correspondiente definición.

RELACIÓN ENTRE VARIABLES Y CODIGOS DE MATLAB		
Variable	Código	Descripción
a	a	Distancia entre la cara del patin interno de la columna y la RBS
-	A	Numerador para el cálculo el ángulo "α"
α <sub>p</sub> (x)	alf	Relación de aspecto: placa completa (principal)
α <sub>p</sub>	alfak	Relación de aspecto (concepto general)
α <sub>p</sub> (r)	alfr	Relación de aspecto: nueva sección (placa rigidizada)
α <sub>p</sub> (y)	alfy	Relación de aspecto: placa completa (secundaria)
α (rad.)	alpha	Ángulo de trabajo de la placa de acero (radianes)
α (grad.)	alpha1	Ángulo de trabajo de la placa de acero (grados)
b	b	Longitud de corte de la RBS
-	B	Denominador para el cálculo del ángulo "α"
β	beta	Relación entre Z <sub>RBS</sub> y Z <sub>x</sub>
c	c	Profundidad del corte de la RBS
-	C	Relación A/B para el ángulo "α"
-	cdtbx	Factor de reducción por conexión rígida en vigas (sentido x de la columna)
-	cdtby	Factor de reducción por conexión rígida en vigas (sentido y de la columna)
-	cond	Límite: evaluación de rango de trabajo para columnas
-	Cons(1,3)	$cons1 = (\pi^2 E) / (12(1 - \mu^2))$
-	cons2	$cons2 = (bt_w^3) / (12(1 - \mu^2))$
-	dln	Dimensión del vector "alfak"
δ (x)	dx	Relación: área del aitezador y área lateral de la placa (ec. 3.36)
δ (y)	dy	Relación: área del aitezador y área lateral de la placa (ec. 3.36)
-	E	Vector de propiedades (tabla 24)
-	f	Condición de pregunta (sí o no)
-	fac	Discriminante para clasificación general de las columnas
-	facx	Discriminante: clasificación de los lados cortos de la columna
-	facy	Discriminante: clasificación de los lados largos de la columna
F <sub>cr</sub> (x)	fcrx	Esfuerzo crítico: análisis de pandeo en sentido x de la columna
F <sub>cr</sub> (y)	fcry	Esfuerzo crítico: análisis de pandeo en sentido y de la columna
F <sub>e</sub> (x)	fex	Esfuerzo de Euler: análisis de pandeo en sentido x de la columna
F <sub>e</sub> (y)	fey	Esfuerzo de Euler: análisis de pandeo en sentido y de la columna
(γ <sub>o</sub> ) <sub>máx</sub> (x)	gamomx	Coeficiente máximo: análisis en sentido x (ec. 3.39)
(γ <sub>o</sub> ) <sub>máx</sub> (y)	gamomy	Coeficiente máximo: análisis en sentido y (ec. 3.39)
γ <sub>o</sub> (x)	gamox	Coeficiente: inercia mínima del atiesador en sentido x
γ <sub>o</sub> (y)	gamoy	Coeficiente: inercia mínima del atiesador en sentido y
G <sub>A</sub> (x)	Gax	Factor de restricción: nudo inferior en sentido x
G <sub>A</sub> (y)	Gay	Factor de restricción: nudo inferior en sentido y
G <sub>B</sub> (x)	Gbx	Factor de restricción: nudo superior en sentido x
G <sub>B</sub> (y)	Gby	Factor de restricción: nudo superior en sentido y
Hcf	Hcf	Separación entre las caras de los patines internos de las vigas
-	i	Contador

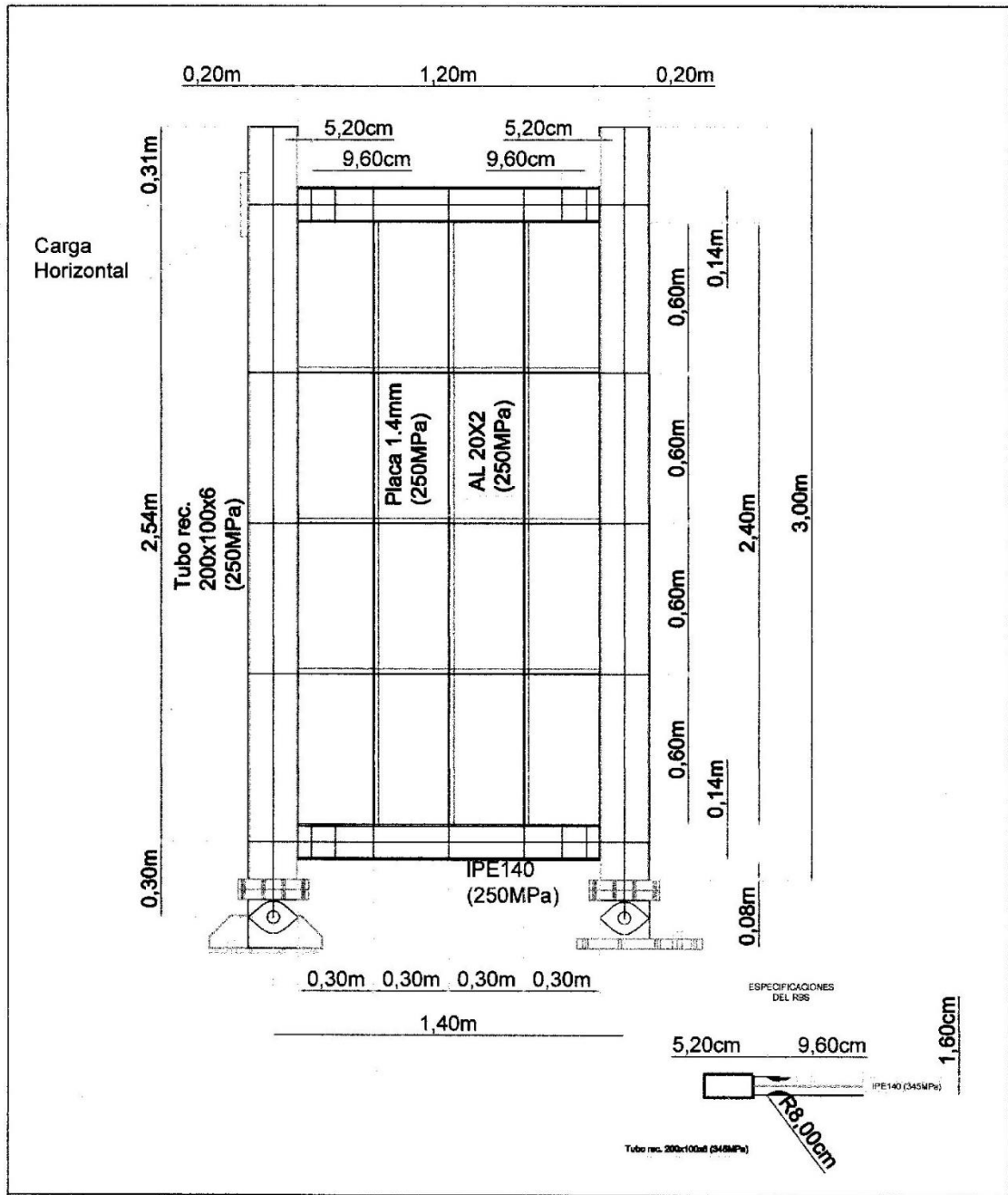


-	Ir	Inercia del atiesador doble	
Io (x)	Irxmin	Inercia mínima del atiesador para la placa: sentido x	
Io (y)	Irymin	Inercia mínima del atiesador para la placa: sentido y	
k <sub>p</sub>	ka1	Factor de placa: ecuación 3.29 (concepto general)	
k <sub>p</sub>	ka2	Factor de placa: ecuación 3.30 (concepto general)	
k <sub>p</sub>	ka3	Factor de placa: ecuación 3.31 (concepto general)	
k <sub>p</sub> (at)	kat	Factor de placa: atiesador	
k <sub>p</sub> (at,inf)	kat1	Factor de placa: atiesador (límite inferior)	
k <sub>p</sub> (at,sup)	kat2	Factor de placa: atiesador (límite superior)	
k <sub>p</sub> (pl)	kf	Factor de placa: plancha de acero	
k <sub>p</sub> (pl,inf)	kf1	Factor de placa: plancha de acero (ec. 3.29)	
k <sub>p</sub> (pl,int)	kf2	Factor de placa: plancha de acero (ec. 3.31)	
k <sub>p</sub> (pl,sup)	kf3	Factor de placa: plancha de acero (ec. 3,32)	
k <sub>p</sub> (pr)	kfr	Factor de placa: plancha rigidizada	
k <sub>p</sub> (pr,inf)	kfr1	Factor de placa: plancha rigidizada (ec. 3.29)	
k <sub>p</sub> (pr,int)	kfr2	Factor de placa: plancha rigidizada (ec. 3.31)	
k <sub>p</sub> (pr,sup)	kfr3	Factor de placa: plancha rigidizada (ec. 3,32)	
k <sub>p</sub>	kr	Factor de placa: ecuación 3.32 (concepto general)	
k (x)	kx	Longitud efectiva de la columna: análisis en x	
k (y)	ky	Longitud efectiva de la columna: análisis en v	
λ <sub>p</sub> (x)	lambp1	Límite tabulado: secciones compactas o no compactas (en x)	
λ <sub>p</sub> (y)	lambp2	Límite tabulado: secciones compactas o no compactas (en y)	
λ <sub>ps</sub> (x)	lambps1	Límite tabulado: sec. compactas o sísmicamente compactas (en x)	
λ <sub>ps</sub> (y)	lambps2	Límite tabulado: sec. compactas o sísmicamente compactas (en y)	
λ <sub>r</sub> (x)	lambr1	Límite tabulado: secciones no compactas o esbeltas (en x)	
λ <sub>r</sub> (y)	lambr2	Límite tabulado: secciones no compactas o esbeltas (en y)	
λ (x)	lambx	Relación de esbeltez (sentido x)	
λ (y)	lamby	Relación de esbeltez (sentido y)	
λ <sub>c</sub> (x)	lambxc	$\lambda_c = \sqrt{F_y/F_e}$	Cálculo en x
λ <sub>c</sub> (y)	lambyc		Cálculo en y
-	lim1	Límite inferior basado en kf1	
-	lim2	Límite superior basado en kf3	
-	limat1	Límite inferior basado en kat1	
-	limat2	Límite superior basado en kat2	
-	limr1	Límite inferior basado en kfr1	
-	limr2	Límite superior basado en kfr3	
M <sub>p</sub>	Mp	Momento flector plástico de la viga en las conexiones	
n (L)	nbat	número de divisiones por los rigidizadores en la base	
n (H)	nhat	número de divisiones por los rigidizadores en altura	
-	opcx	elección del proceso de estimación de la longitud efectiva en x	
-	opcy	elección del proceso de estimación de la longitud efectiva en y	
P <sub>d</sub> (x)	Pdx	Capacidad efectiva de la columna en x	
P <sub>d</sub> (y)	Pdy	Capacidad efectiva de la columna en y	
V <sub>u</sub> (S)	PhVn	Capacidad efectiva del muro no rigidizado	

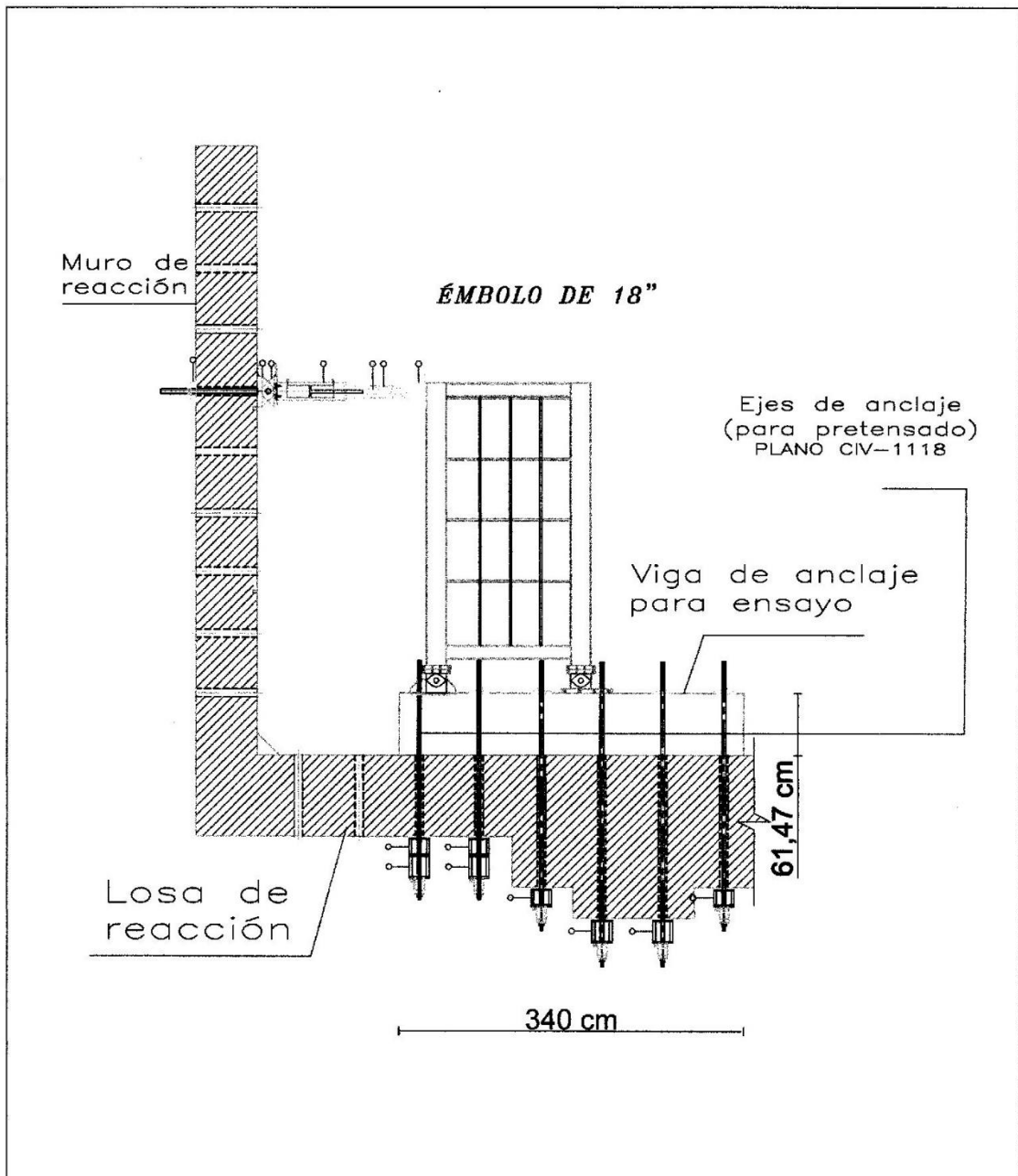
$V_u (R)$	PhVnr	Capacidad efectiva del muro rigidizado
$\pi$	pi	Valor de "pi": 3,14159265...
$P_n (x)$	Pnx	Capacidad nominal de la columna en x
$P_n (y)$	Pny	Capacidad nominal de la columna en y
$\lambda_b$	psi	Relación entre la separación de las "RBS" y $L_{cf}$
-	q	contador
$b/t$	rel1	Relación entre la base de la columna y su espesor
$d/t$	rel2	Relación entre el peralte de la columna y su espesor
$\rho$	rho	Relación entre la altura y la base del pórtico
-	tam	Dimensión del vector "kf"
-	tamat	Dimensión del vector "kat"
-	tamr	Dimensión del vector "kfr"
$\tau_{cr} (pl)$	taocr	Esfuerzo crítico de la placa sin rigidizar
$\tau_{cr} (at)$	taocrat	Esfuerzo crítico del atiesador
$\tau_{cr} (pr)$	taocr	Esfuerzo crítico de la placa rigidizada
$\tau_h (pl)$	taoe	Esfuerzo crítico hipotético de la placa no rigidizada
$\tau_h (pr)$	taoer	Esfuerzo crítico hipotético de la placa rigidizada
$\tau_h (at)$	taoeat	Esfuerzo crítico hipotético del atiesador
$\tau_{lp} (pl,pr)$	taolp	Esfuerzo límite: rango de trabajo de la placa antes y después de rigidizar
$\tau_{lp} (at)$	taolpat	Esfuerzo límite: evaluación del rango de trabajo del atiesador
$\tau_y (at)$	taoyat	Esfuerzo de fluencia por corte del atiesador
$\tau_y (pl,pr)$	taoyp	Esfuerzo de fluencia por corte de la placa antes y después de rigidizar
$V'_{np}$	V1yp	Corte nominal de la placa de acero, corregido por las rótulas
$V_n (S)$	Vn	Corte nominal del muro sin rigidizar
$V_n (R)$	Vnr	Corte nominal del muro rigidizado
$V_{nt}$	Vt	Corte nominal aportado por el uso de rigidizadores
$V_{nb}$	Vyf	Corte nominal de la viga por las RBS
$V_{np}$	Vyp	Corte nominal de la placa de acero
$Z_{RBS}$	Zrbs	Módulo plástico en la sección reducida de la viga RBS

## **ANEXO 6**

### **Planos del Muro SPSW rigidizado**



1	Escuela Politécnica Nacional	FICA
		Carlos Gallegos
		Tesis
		Dr. Luis Hernández
		Escala: 1:20      Fecha:



2	Escuela Politécnica Nacional	FICA	
		Carlos Gallegos	
		Tesis	
		Dr. Luis Hernández	
		Perspectiva	Fecha: