



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS**

**TESIS  
SIMULACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE ESTRUCTURAS  
DE ACERO ROLADO EN FRIO POR HUNDIMIENTOS  
DIFERENCIALES ASOCIADOS AL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA**

**PRESENTA**

**Ing. Jorge Ramos Ruiz Flores**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL  
EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS**

**TUTOR**

**Dr. José Ángel Ortiz Lozano**

**COMITÉ TUTORAL**

**Dr. Mario Eduardo Zermeño de León**

**Dr. Jesús Pacheco Martínez**

**Aguascalientes, Ags. a 17 de Septiembre de 2013**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño  
y de la Construcción

No. Oficio: CCDC-D-224-12

Asunto: Integración de Comité Tutorial  
programada de Maestría en Ingeniería Civil

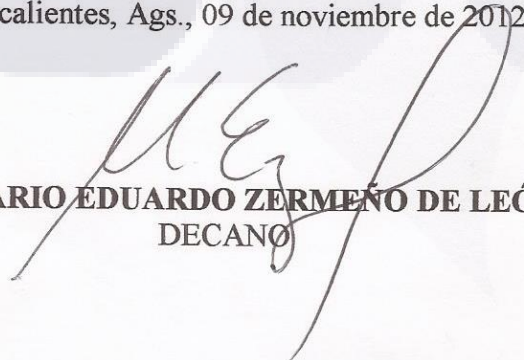
**ING. JORGE RAMOS RUÍZ FLORES**  
P R E S E N T E

Con fundamento en el Artículo 105-G Sección 2 del Capítulo XI del Reglamento General de Docencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, me permito designar como tutor al DR. JOSÉ ÁNGEL ORTIZ LOZANO y como asesores al DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN y al DR. JESÚS PACHECO MARTÍNEZ del proyecto de tesis titulado "SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ESTRUCTURAS DE ACERO ROLADO EN FRÍO SUJETAS A HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES ASOCIADOS AL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA" en el marco del programa de posgrado de la Maestría en Ingeniería Civil con salida en estructuras, durante el periodo del 23 de Julio del 2012 al 30 de Junio del 2013.

Esta asignación de comité tutorial sustituye a cualquier otra realizada con fecha anterior. Sin otro particular lo exhorto a que continúe trabajando con esmero y dedicación para que pueda obtener el grado en el tiempo y forma establecidos en nuestra legislación vigente.

**A T E N T A M E N T E**  
**"SE LUMEN PROFERRE"**

Aguascalientes, Ags., 09 de noviembre de 2012.

  
**DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN**  
DECANO

c.c.p. Dr. Jesús Pacheco Martínez- Coordinador del programa de Maestría en Ingeniería Civil.

c.c.p. Archivo

JPM/cgm.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES  
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

**DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEON**  
**DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO**  
**Y DE LA CONSTRUCCIÓN**  
**P R E S E N T E**

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **JORGE RAMOS RUIZ FLORES** con ID **68147** quien realizó la tesis titulada: **SIMULACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE ESTRUCTURAS DE ACERO ROLADO EN FRIO POR HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES ASOCIADOS AL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 7 de octubre de 2013.

Dr. José Angel Ortiz Lozano  
Tutor de tesis

Dr. Jesus Pacheco Martínez  
Asesor de tesis

10-oct-2013

Recibi Original

V. B.

- c.c.p.- Interesado
- c.c.p.- Secretaría de Investigación y Posgrado
- c.c.p.- Jefatura del Depto. De Construcción y Estructuras
- c.c.p.- Consejero Académico
- c.c.p.- Minuta Secretario Técnico

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES  
09 OCT. 2013  
CENTRO DE  
Y DE LA

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Ma. de Jesús y J. Guadalupe, por su apoyo incondicional para lograr mis objetivos y por ser un gran ejemplo de vida que siempre me ha motivado a superarme profesionalmente y como persona.

A mi novia Saira, por su comprensión, por su amor y cariño, porque siempre está conmigo y me motiva a seguir adelante.

A mi Tutor, Dr. José Ángel Ortiz Lozano, por ser el primero en instruirme en el área del Análisis y Diseño de Estructuras, primero como maestro de la licenciatura, después como colega y ahora como Tutor y amigo. Por invitarme a realizar esta maestría y dejarme participar en este proyecto de tesis que forma parte de muchos otros que se complementan con un mismo objetivo.

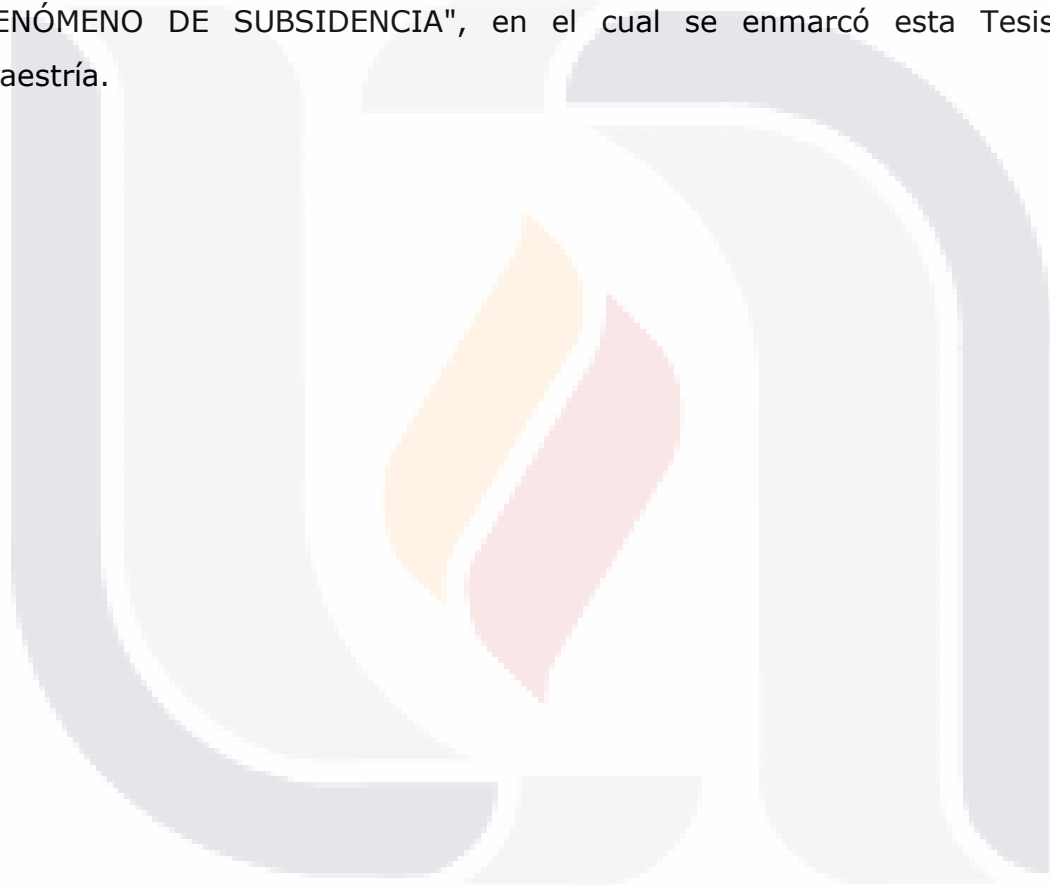
Al comité tutorial, Dr. Mario Eduardo Zermeño de León y Dr. Jesus Pacheco Martínez, por sus comentarios para la mejora de este trabajo y por ser un gran ejemplo académico y profesional.

A todos los maestros del posgrado, porque con la mayoría he tenido la oportunidad de interactuar fuera del aula y he podido aprender de ellos en el campo laboral.

A mis compañeros y amigos, Miguel, Roberto, Carlos y Orlando por colaborar en diversas actividades y aportar grandes ideas al trabajo realizado.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes, por dejarnos disponer de las instalaciones del laboratorio de estructuras en todos los ensayos realizados.

Al Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico para el Fomento de la Producción y Financiamiento de Vivienda y el Crecimiento del Sector Habitacional CONAVI-CONACYT por el financiamiento del proyecto de investigación (clave 105212) titulado "ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVO-ESTRUCTURALES A BASE DE ACERO ROLADO EN FRÍO (LIGHT GAUGE STEEL FRAMING) PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS EN ZONAS AFECTADAS POR AGRIETAMIENTOS ASOCIADOS AL FENÓMENO DE SUBSIDENCIA", en el cual se enmarcó esta Tesis de Maestría.



**DEDICATORIAS**



*Para mi novia Saira,*

*para mis padres, Ma. De Jesus y J. Guadalupe,*

*y para mis hermanos, Rocio y Alexis.*

**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE GENERAL**..... 1

**ÍNDICE DE TABLAS**..... 4

**ÍNDICE DE GRÁFICAS O FIGURAS**..... 6

**RESUMEN**..... 13

**ABSTRACT** ..... 15

**INTRODUCCIÓN**..... 17

**Definición del Problema** ..... 17

**Objetivo General**..... 19

**Objetivos Específicos** ..... 19

**Alcances del Trabajo a Desarrollar**..... 20

**Metodología** ..... 20

**1. CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS** ... 22

**1.1. Hundimientos Diferenciales**..... 22

**1.2. El fenómeno de la Subsistencia** ..... 24

**1.3. Tipo de Subsistencia** ..... 27

**1.3.1. Subsistencia por Extracción de Agua Subterránea**..... 28

**1.3.2. Subsistencia por Extracción de Petróleo y Gas**..... 29

**1.3.3. Subsistencia por Hidrocompactación**..... 30

**1.3.4. Subsistencia por Disolución** ..... 31

**1.3.5. Subsistencia por Actividad Minera** ..... 32

**1.4. El Agrietamiento en la Ciudad de Aguascalientes** ..... 33

**1.5. Estructuras de Acero Rolado en Frio (Steel Framing)**..... 34

**1.5.1. Introducción**..... 34

**1.5.2. Características del Steel Framing**..... 35

**1.5.3. Desarrollo del Sistema Steel Framing**..... 37

**1.5.4. Ventajas del Steel Framing** ..... 40

**1.5.5. Estudios Realizados del Comportamiento de Estructuras con Perfiles de Acero Rolado en Frio**..... 41

1.6.	<b>Conceptos Empleados de Análisis Estructural .....</b>	44
1.6.1.	<b>Generalidades del Método de los Elementos Finitos.....</b>	44
1.6.2.	<b>Análisis Pushover.....</b>	47
1.6.3.	<b>Análisis Pulldown.....</b>	48
2.	<b>CAPÍTULO 2 SIMULACIÓN Y ENSAYES DE PROBETAS DE ACERO ROLADO EN FRIO.....</b>	50
2.1.	<b>Ensayes .....</b>	50
2.1.1.	<b>Metodología de Ensayes.....</b>	50
2.1.2.	<b>Resultados de Ensayes.....</b>	52
2.2.	<b>Simulaciones .....</b>	54
2.2.1.	<b>Metodología de Simulaciones .....</b>	55
2.2.2.	<b>Resultados de Simulaciones .....</b>	57
3.	<b>CAPÍTULO 3 ENSAYE DE PANELES DE MURO CON PERFILES DE ACERO ROLADO EN FRIO ANTE CARGA LATERAL. ....</b>	63
3.1.	<b>Objetivo Específico.....</b>	63
3.2.	<b>Características de los Paneles.....</b>	63
3.3.	<b>Metodología .....</b>	64
3.4.	<b>Análisis de Resultados .....</b>	66
4.	<b>CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN DE PANELES DE MURO CON PERFILES DE ACERO ROLADO EN FRIO POR HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES.....</b>	68
4.1.	<b>Objetivo Específico.....</b>	68
4.2.	<b>Características de los Modelos.....</b>	68
4.3.	<b>Metodología .....</b>	69
4.4.	<b>Resultados Obtenidos.....</b>	76
4.5.	<b>Curvas de Fragilidad.....</b>	83
5.	<b>CAPITULO 5 SIMULACIÓN Y ENSAYE DE VIVIENDA TIPO A ESCALA REAL, ESTRUCTURADA CON PERFILES DE ACERO ROLADO EN FRIO .....</b>	89
5.1.	<b>Objetivo.....</b>	89
5.2.	<b>Prototipo de Vivienda .....</b>	89
5.3.	<b>Características del Modelo de Simulación.....</b>	91



<b>5.4. Acciones</b> .....	93
<b>5.5. Desarrollo de la Simulación</b> .....	93
<b>5.4.1 Hundimiento Diferencial Reproducido</b> .....	94
<b>5.4.2 Metodología de simulación</b> .....	95
<b>5.4.3 Resultados Pulldown Aplicado a Prototipo De Vivienda</b> ....	99
<b>5.4.4 Comportamiento de los Studs de la Fachada Principal</b> .....	104
<b>5.4.5 Comportamiento de los Studs de la Fachada Lateral</b> .....	108
<b>5.5 Desarrollo de Ensayo</b> .....	111
<b>5.5.1 Características del Modelo de Ensayo</b> .....	111
<b>5.5.2 Plataforma de Ensayo</b> .....	112
<b>5.4.1 Metodología de Ensayo</b> .....	113
<b>5.4.2 Resultados de Ensayo</b> .....	114
<b>CONCLUSIONES</b> .....	117
<b>GLOSARIO</b> .....	120
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	122
<b>ANEXO "A"</b> .....	125

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1.- Resultados de esfuerzos y deformaciones en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente de forma lineal..... 57

Tabla 2.- Resultados de esfuerzos y deformaciones en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente cóncava hacia arriba. .... 58

Tabla 3.- Resultados de esfuerzos y deformaciones en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente cóncava hacia abajo. .... 59

Tabla 4.- Características de los paneles sometidos a hundimientos diferenciales mediante análisis pulldown en software de elementos finitos. Los modelos 1 al 25 son retomados de los ensayos realizados por (Xuhong & Yu, 2006), (Chi-Ling, 2011), (Eray & Cagatay, 2012) y (Nithyadharan, 2012). ..... 73

Tabla 5.- Distorsión asociada a cada nivel de daño obtenido del análisis pulldown del ANEXO A y valor de su logaritmo natural, media y desviación estándar para la obtención de las curvas de fragilidad. .... 84

Tabla 6.- Tabla de resultados del comportamiento de los Studs 450, 447, 444, 410, 576, 398, 147 y 148 que son los que sufren las principales afectaciones en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. .... 99



**ÍNDICE DE GRÁFICAS O FIGURAS**

Imagen 1.- Torre de Pisa afectada por hundimientos diferenciales del terreno en que se desplanta. (Anónimo) ..... 22

Imagen 2.- Vivienda con Estructura de Perfiles de Acero Rolado en Frio ..... 36

Imagen 3.- Fijación Perfiles de Acero Rolado en Frio Mediante Tornillos ..... 36

Imagen 4.- Prototipo de Residencia n Light Steel Framing en la Exposición Mundial de Chicago en 1933 (Sarmanho & Moraes, 2007) ..... 38

Imagen 5.- Estructura Típica del Sistema Steel Framing. (Sarmanho & Moraes, 2007) ..... 40

Imagen 6.- Formación de rótulas plásticas en un edificio por la aplicación de carga monotónica lateral en el análisis Pushover. (Applied Technology Council, 1996) ..... 47

Imagen 7.- Geometría de las probetas de acero ensayadas con variación de la velocidad de aplicación de la carga. Especificaciones ASTM A-370..... 51

Imagen 8.- Probetas de acero para ensaye con variación de la velocidad de aplicación de la carga. Especificaciones ASTM A-370 ..... 51

Imagen 9.- Ensaye a tensión de probeta de acero en maquina universal de pruebas..... 52

Imagen 10.- Gráfica Resumen de ensayos de probetas de acero a tensión con variación en la velocidad de aplicación de la carga. .... 53

Imagen 11.- Modelo de probeta de acero en software de elementos finitos sometida a tensión a diferentes velocidades de aplicación de la carga. .... 54

Imagen 12.- Trayectorias de carga en función del tiempo usadas en los modelos de simulación de probetas de acero sometidas a tensión. .... 55

Imagen 13.- Diagrama de flujo para simulación de probetas de acero sometidas a tensión con variación de la velocidad de aplicación de carga en software de elementos finitos. .... 56

Imagen 14.- Comparación de esfuerzos obtenidos en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente de formas: lineal, cóncava ascendente, y cóncava descendente, para diferentes tiempos de duración hasta alcanzar un esfuerzo de un cuarto de  $f_y$ . .... 60

Imagen 15.- Comparación de esfuerzos obtenidos en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente de formas: lineal, cóncava ascendente, y cóncava descendente, para diferentes tiempos de duración hasta alcanzar un esfuerzo de la mitad de  $f_y$ . .... 60

Imagen 16.- Comparación de esfuerzos obtenidos en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente de formas: lineal, cóncava

ascendente, y cóncava descendente, para diferentes tiempos de duración hasta alcanzar un esfuerzo de tres cuartos de  $f_y$ . ..... 61

Imagen 17.- Características de los paneles a base de perfiles de acero rolado en frío ensayados por carga lateral..... 64

Imagen 18.- Ensaye por carga lateral en panel de muro construido a base de perfiles de acero rolado con placas de poliestireno. .... 65

Imagen 19.- Curvas carga-desplazamiento que describen de manera general el comportamiento de los paneles de muro formados por perfiles de acero rolado en frío con y sin placas de poliestireno, sometidos a carga lateral..... 66

Imagen 20. Modelo de elementos finitos de panel de muro formado por perfiles de acero rolado en frío, el cual se somete a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown..... 69

Imagen 21.- Asignación de las curvas Momento- Rotación de las secciones del modelo de elementos finitos de panel de muro formado por perfiles de acero rolado en frío, el cual se somete a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown. .... 70

Imagen 22.- Resultados gráficos que muestran la zona de la curva Momento-Rotación en que se encuentran las secciones del modelo de elementos finitos de panel de muro formado por perfiles de acero rolado en frío, el cual se somete a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown..... 71

Imagen 23.- Curvas Carga-Desplazamiento Lateral asociadas a los ensayos realizados y a los retomados de varios autores de acuerdo con la Tabla 4. 74

Imagen 24. Curvas Momento-Rotación asociadas a los ensayos realizados y a los retomados de varios autores de acuerdo con la Tabla 4 y la Imagen 23. .... 75

Imagen 25.- Resultados gráficos que muestran la zona de la curva Momento-Rotación en que se encuentran las secciones del modelo de elementos finitos de panel de muro formado por perfiles de acero rolado en frío, el cual se somete a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown..... 77

Imagen 26.- Gráfica Momento Relativo – Distorsión, que describe el comportamiento de los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero rolado en frío con placas de poliestireno, los cuales se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown, la nomenclatura corresponde a los paneles de la Tabla 4. .... 78

Imagen 27.- Gráfica Momento Relativo - Distorsión, que describe el comportamiento de los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero rolado en frío con placas de yeso, los cuales

se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown, la nomenclatura corresponde a los paneles de la Tabla 4. .... 79

Imagen 28.- Gráfica Momento Relativo – Distorsión, que describe el comportamiento de los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero rolado en frio con placas de silicato de calcio, los cuales se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown, la nomenclatura corresponde a los paneles de la Tabla 4..... 80

Imagen 29.- Gráfica Momento Relativo – Distorsión, que describe el comportamiento de los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero rolado en frio con placas de OSB, los cuales se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown, la nomenclatura corresponde a los paneles de la Tabla 4. .... 81

Imagen 30.- Gráfica que resume el comportamiento típico que presentan los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero rolado en frio con placas de distintos recubrimientos, los cuales se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown..... 82

Imagen 31.- Curvas de fragilidad para paneles de estructura de perfiles de acero rolado en frio con alma de placas de poliestireno. Muestran la probabilidad de que se incurra en una cantidad de daño cuando el panel es sometido a distorsión angular producto de hundimientos diferenciales. .... 85

Imagen 32.- Curvas de fragilidad para paneles de estructura de perfiles de acero rolado en frio con placas de yeso. Muestran la probabilidad de que se incurra en una cantidad de daño cuando el panel es sometido a distorsión angular producto de hundimientos diferenciales..... 86

Imagen 33.- Curvas de fragilidad para paneles de estructura de perfiles de acero rolado en frio con placas de silicato de calcio. Muestran la probabilidad de que se incurra en una cantidad de daño cuando el panel es sometido a distorsión angular producto de hundimientos diferenciales..... 87

Imagen 34.- Curvas de fragilidad para paneles de estructura de perfiles de acero rolado en frio con placas de OSB. Muestran la probabilidad de que se incurra en una cantidad de daño cuando el panel es sometido a distorsión angular producto de hundimientos diferenciales..... 88

Imagen 35.- Planta Arquitectónica del Prototipo de Vivienda Sobre el Cual se Harán los Ensayes y Simulaciones de Hundimientos Diferenciales..... 90

Imagen 36.- De izquierda a derecha, dimensiones de la sección de los studs y tracks, asignadas en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. .... 91

Imagen 37.- Curva momento-rotación asignada a las rótulas plásticas de los studs en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a un análisis estático no lineal con la técnica pulldown..... 92

Imagen 38.- Esquema de la zona de afectación del hundimiento diferencial reproducido en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown..... 94

Imagen 39.- Modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. .... 95

Imagen 40.- Asignación de la rigidez en la interacción de elementos tipo barra en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. .... 96

Imagen 41.- Asignación de las curvas momento-rotación a los elementos tipo barra en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. .... 96

Imagen 42.- Configuración de los parámetros para el análisis estático no lineal (desplazamiento vertical máximo, nudo de control, etc.) en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales mediante la técnica pulldown. .... 97

Imagen 43.- Los Studs 450, 447, 444, 410, 576, 398, 147 y 148 son los que sufren las principales afectaciones en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown..... 98

Imagen 44.- Curva momento rotación de los studs del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown..... 100

Imagen 45.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 8.00cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44. .... 100

Imagen 46.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 11.60cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44. .... 101

Imagen 47.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 15.60cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no

lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.  
 ..... 101

Imagen 48.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 15.60cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.  
 ..... 101

Imagen 49.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 19.70cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.  
 ..... 102

Imagen 50.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 20.10cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.  
 ..... 102

Imagen 51.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 20.01cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.  
 ..... 102

Imagen 52.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 21.10cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.  
 ..... 103

Imagen 53.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 21.10 cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.  
 ..... 103

Imagen 54.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 21.10cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.  
 ..... 103

Imagen 55.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 21.15cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.  
 ..... 104



Imagen 56.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 20.10cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44. .... 104

Imagen 57.- Comportamiento de la parte inferior de los studs 576, 398, 147 y 148 de la fachada principal del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Ver Imagen 38 e Imagen 43. .... 105

Imagen 58.- Comportamiento de la parte superior de los studs 576, 398, 147 y 148 de la fachada principal del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Ver Imagen 38 e Imagen 43. .... 106

Imagen 59.- Comportamiento general de los studs de la fachada principal del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Ver Imagen 38 e Imagen 43. .... 107

Imagen 60.- Comportamiento de la parte inferior de los studs 450, 447, 444 y 410 de la fachada lateral del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Ver Imagen 38 e Imagen 43. .... 108

Imagen 61.- Comportamiento de la parte superior de los studs 450, 447, 444 y 410 de la fachada lateral del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Ver Imagen 38 e Imagen 43. .... 109

Imagen 62.- Comportamiento general de los studs de fachada lateral del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Ver Imagen 38 e Imagen 43. .... 110

Imagen 63 e Imagen 64.- Prototipo de vivienda que se somete a ensaye en plataforma simuladora de hundimientos diferenciales. .... 111

Imagen 65.- Captura del modelo virtual para el diseño de la plataforma de simulación de hundimientos diferenciales a escala real. Se pueden observar las 35 columnas desplantadas sobre dados de concreto reforzado dispuestos en grupos de 5 sobre las zapatas corridas del mismo material. .... 112

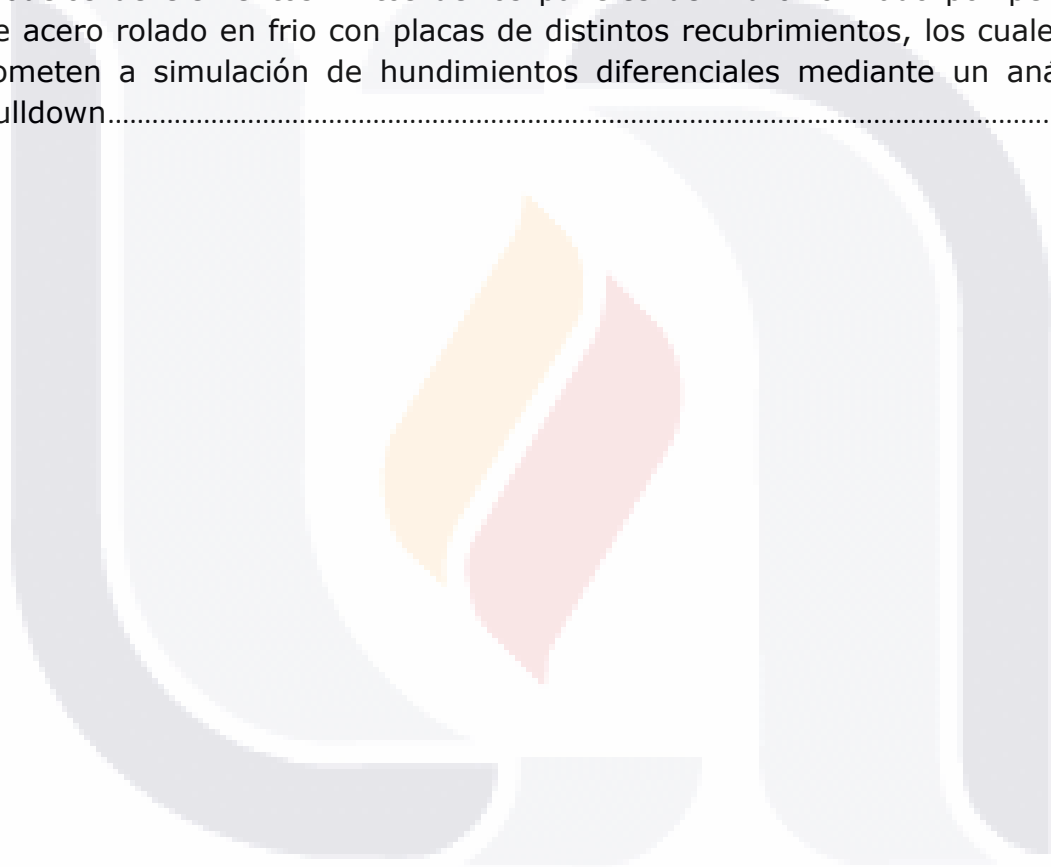
Imagen 66.- Marco móvil que permite desplazamientos en vertical de la estructura de la plataforma en que se asienta el prototipo de vivienda ensayado. .... 113

Imagen 67.- Pistón hidráulico con manómetro que acciona el marco móvil de la Imagen 57 en la plataforma de pruebas. .... 113

Imagen 68 e Imagen 69.- Falla inesperada de la conexión inferior de los studs con los tracks por deslizamiento del bloque de cortante en la sección crítica. .... 114

Imagen 70 e Imagen 71.- Sistema de contravientos del prototipo de vivienda. Durante el ensaye por hundimientos diferenciales se observa que la parte del contraviento a tensión toma el cortante; el brazo de compresión se padea por su baja inercia lateral. .... 116

Imagen 72.- Gráfica que resume el comportamiento típico que presentan los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero rolado en frio con placas de distintos recubrimientos, los cuales se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown..... 118



## RESUMEN

Históricamente el agrietamiento del suelo se ha presentado en la región centro del país desde hace más de 30 años. El aumento en la ocurrencia y en la magnitud de dicho fenómeno es atribuido a la explotación de los mantos acuíferos. El fracturamiento de los terrenos se presenta como un área de oportunidades para buscar una metodología de construcción que permita el aprovechamiento habitacional de los terrenos afectados por fracturas, aprovechando además la depreciación en el valor comercial de los mismos. Por tanto se pretende conocer el comportamiento de las estructuras de acero rolado en frío ante el fenómeno de subsidencia a fin de prolongar la vida útil de viviendas de interés social construidas con este sistema sobre zonas de fracturamiento.

En este trabajo se realizaron múltiples ensayos y simulaciones mediante software de elementos finitos en probetas de acero, paneles de muro y un prototipo de vivienda, aplicando desplazamientos controlados con el propósito de medir su comportamiento estructural. Para las probetas se hicieron pruebas en función de la velocidad de aplicación de la carga; en los paneles de muro, se probaron distintos tipos de recubrimientos: placas de yeso, silicato de calcio, OSB (Oriented strand board) y poliestireno.

Se concluyó que la diferencia de los esfuerzos y deformaciones al final de la prueba en probetas de acero no varía significativamente en función de la velocidad de aplicación de las cargas, puesto que se trata de periodos prolongados de aplicación de las mismas, presentándose las principales diferencias a edades tempranas que finalmente conducen a resultados muy parecidos de los esfuerzos y deformaciones al final del evento.

Para los ensayos y simulaciones realizados a paneles de muro, mediante las gráficas carga-desplazamiento y momento-rotación obtenidas, se concluye que el sistema constructivo con perfiles de acero rolado en frío combinados con placas de poliestireno es el que produce la estructura más dúctil estructuralmente hablando en relación a los otros tipos de recubrimiento probados, ya que permite a la estructura adaptarse fácilmente a las

condiciones de hundimientos diferenciales en su cimentación, sin comprometer de manera significativa el grado de seguridad estructural del sistema.

En cuanto al prototipo de vivienda propuesto a utilizarse en zonas de fracturamiento, se demostró que es necesario reconsiderar las conexiones de los perfiles estructurales con su cimentación para que trabajen de manera conjunta y no ocurran desprendimientos inesperados, lo que permitiría aprovechar la ductilidad demostrada del resto de la estructura formada por paneles de perfiles de acero rolado en frío con placas de poliestireno.



## ABSTRACT

Historically soil cracking has occurred in the central region of the country for more than 30 years. The increase in the occurrence and magnitude of this phenomenon is attributed to the exploitation of the aquifers. The fracturing of the land appears as an area of opportunity to find a methodology for building housing that allows the use of the land affected by fractures, using also the depreciation in the market value of the same. Therefore intends to know the behavior of cold-formed steel structures before the phenomenon of subsidence in order to extend the life of social interest housing built with this system of zones of cracking.

In this work there were multiple test and simulations using software of finite element in specimens of steel, panels of wall and a prototype of housing, applying displacement controlled in order to measure their structural behavior. For the specimens were tests depending on the speed of the load application; wall panels, different types of coatings were tested: plasterboards, silicate of calcium, OSB (Oriented strand board) and polystyrene.

It was concluded that the difference of the stress and deformations at the end of the test specimens of steel not varies significantly depending on the speed of application of loads, since it's long periods of application of the same, presenting the main differences at an early age that finally lead to very similar results of stress and deformations at the end of the event.

For the test and simulations performed to panels of wall, through the graphical load-displacement and bending-rotation obtained, we concluded that the constructive system with cold-formed steel combined with polystyrene plates is which produces the structure more ductile structurally speaking in relation to the other tested coating types, since it allows the structure to easily adapt to the differential in its foundation subsidence conditions without compromising significantly the degree of structural security system.

As for the prototype of housing proposed to be used in zones of cracking, showed that it is necessary to reconsider the connections of your Foundation with structural shapes so that they work together and not occur unexpected failures, which would take advantage of the proven ductility of the rest of the structure formed by cold-formed steel panels with polystyrene plates.



## INTRODUCCIÓN

### Definición del Problema

Históricamente el agrietamiento del suelo se ha presentado en la región centro del país desde hace más de 30 años. El aumento en la ocurrencia de dicho fenómeno se encuentra directamente relacionado con la expansión poblacional y urbana, así como la industrialización.

La presencia de este fenómeno en el valle de Aguascalientes ha crecido exponencialmente debido principalmente, según los expertos en el tema, a la extracción desmedida de agua del subsuelo lo que puede producir hundimientos diferenciales del relleno aluvial, siendo las grietas su expresión más notable. Aunque también existen otras dos hipótesis que tratan de explicar este fenómeno, una de ellas propone que las grietas sean de origen tectónico, es decir, que sean el producto y reflejo del sistema de esfuerzos al que está sometida una amplia región del centro de México; la otra, trata de que existe la posibilidad de que el agrietamiento sea producto del flujo plástico del suelo (creep), impulsado por la gravedad.

Actualmente en el estado se han identificado 322.16 km de Fallas activas las cuales han afectado 3,500.35 km<sup>2</sup> del territorio del estado. Dichas afectaciones ocasionan diversas problemáticas que demeritan la calidad de vida de los habitantes del estado. (Gobierno del Estado de Aguascalientes, 2011)

Entre las principales afectaciones que podemos enfrentar debido a este fenómeno, que tiene componentes naturales y antropogénicas tenemos:

- A. Daños a la infraestructura existente, tales como escalones en las vías de comunicación y falla de tuberías en redes hidráulicas y sanitarias.
- B. Pérdida del patrimonio histórico de la ciudad de Aguascalientes debido a los graves daños en edificios históricos.
- C. Demerito en el valor de los predios en las colonias afectadas y problemática estructural en las viviendas dentro y en las colindancias de las grietas.

Si bien toda la problemática derivada de este fenómeno es importante y afecta de manera directa a la población del estado, es en esta última que encontramos las consecuencias más graves desde todas las perspectivas. En el estado de Aguascalientes tenemos 2500 predios afectados de manera directa o indirecta por el agrietamiento lo que ha ocasionado un daño patrimonial aproximado de \$250, 000,000.00 de pesos solo por el demérito en el valor de los terrenos involucrados, sin tomar en cuenta el valor de las construcciones desplantadas sobre estos ni las pérdidas de valor en terrenos, que si bien no se encuentran afectados pierden valor solo por encontrarse en zonas propensas al agrietamiento, ya que aún no es posible delimitar de manera eficaz que zonas serán afectadas por este fenómeno. (Gobierno del Estado de Aguascalientes, 2011)

Los daños ocasionados a las viviendas han tenido como consecuencia el desalojo preventivo de aproximadamente 800 viviendas ocasionando el desplazamiento de por lo menos 3500 personas a otras zonas de la ciudad lo que ha provocado diversos problemas urbanísticos y sociales. Uno de los grandes problemas que se han generado es la existencia de cientos de predios abandonados en la mancha urbana lo que incrementa el vandalismo y la inseguridad en las colonias afectadas, demeritando aún más el valor de dichos bienes inmuebles. (Gobierno del Estado de Aguascalientes, 2011)

Toda la problemática presentada anteriormente se debe en general a que no se ha propuesto por parte del gobierno ni de las empresas privadas un método que permita un aprovechamiento sin riesgo de los predios afectados. Con respecto a estos edificios dañados por muchos años, las diferentes dependencias gubernamentales han tomados dos políticas claras:

A. Si el edificio se encuentra severamente dañado (tanto que represente un riesgo para la población en general) se debe realizar una demolición total del inmueble afectado a fin de evitar riesgos a la población.

B. Si la edificación a pesar de mostrar daños no representa un riesgo, no se llevan a cabo acciones que prevengan la degeneración del mismo,



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

simplemente se espera a que este llegue a un punto en que represente un riesgo y es entonces demolida.

Lo anterior no presenta una solución viable a la problemática existente, ya que los predios baldíos siguen representado una seria amenaza a la convivencia pacífica dentro del área afectada, por lo tanto se requiere buscar una metodología de construcción que permita el aprovechamiento habitacional de los terrenos más afectados y cuyo valor comercial sea muy bajo, logrando generar vivienda de bajo costo en zonas de buena plusvalía, creando así una mejor integración social y un menor impacto ambiental, lo que mejora la calidad de vida, facilitando el acceso a los servicios y acercando a la población a sus centros de trabajo reduciendo así de manera indirecta problemáticas tan fuertes como la insuficiencia del transporte público.

### **Objetivo General**

Conocer el comportamiento de las estructuras de acero rolado en frío ante hundimientos diferenciales debidos al fenómeno de subsidencia a fin de prolongar la vida útil de viviendas de interés social construidas con este sistema en zonas vulnerables a este fenómeno.

### **Objetivos Específicos**

- Conocer el comportamiento de perfiles de acero rolado en frío sujetos a fuerzas y/o deformaciones en función del tiempo.
- Comprobar la variación de los esfuerzos y deformaciones admisibles en los perfiles de acero rolado en frío sujetos a deformaciones en función de la velocidad de deformación.
- Comprobar la eficiencia del sistema constructivo con perfiles de acero rolado en frío para viviendas de interés social sujetas a hundimientos diferenciales.

- Realizar modelación con software y ensaye a escala real de vivienda con estructura a base de perfiles ligeros de acero rolado en frio sujeta a hundimientos diferenciales.

### **Alcances del Trabajo a Desarrollar**

- En los alcances de este trabajo se analizará la factibilidad de implementar el sistema constructivo de acero rolado en frio para casas habitación de interés social vulnerables a hundimientos diferenciales del terreno, mediante la modelación con software y ensaye a escala real de un prototipo de vivienda.
- En ningún momento se considera la posibilidad de proponer métodos de reparación de las viviendas que están actualmente afectadas y construidas con la mampostería tradicional.
- No se considera dentro de los alcances de este trabajo el diseño del dispositivo de ensaye para la vivienda con estructura de acero rolado en frio a escala real.

### **Metodología**

Este trabajo se lleva a cabo mediante métodos experimentales y simulaciones en software.

Con la parte experimental se pretende evaluar el efecto del tiempo en los esfuerzos inducidos en las estructuras de acero rolado en frio, así como el comportamiento estructural de este sistema constructivo cuando es sometido a distorsiones de los paneles que conforman la estructura por efecto de fuerzas laterales y/o desplazamientos verticales derivados de la subsidencia. Además se obtienen los parámetros suficientes para llevar a cabo simulaciones en software de estos mismos fenómenos.

Los ensayos y simulaciones se llevan a cabo en tres diferentes categorías: probetas de acero, paneles de muro conformados por perfiles de pared

delgada con placas de poliestireno, yeso, silicato de calcio u OSB y un prototipo de vivienda.

La simulación se realiza para complementar los ensayos y realizar más variedades de los mismos con las condiciones requeridas y que sirven para predecir el comportamiento y evaluar las condiciones de interés en la estructura real.

El orden que se sigue es el siguiente:

1. Ensaye de probetas de acero con variación en la velocidad de aplicación de carga.
2. Simulación de ensaye de probetas de acero con variación en la velocidad de aplicación de carga en software de elementos finitos.
3. Ensayes de paneles de muro con perfiles de pared delgada sometidos a carga lateral.
4. Simulación de paneles de muro con perfiles de pared delgada sometidos a carga lateral y desplazamiento vertical en software de elementos finitos.
5. Simulación de prototipo de vivienda conformada por paneles de muro a base de perfiles de acero de pared delgada sometida a hundimientos diferenciales en software de elementos finitos.
6. Ensaye de prototipo de vivienda conformada por paneles de muro a base de perfiles de acero de pared delgada sometida a hundimientos diferenciales.

## 1. CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1. Hundimientos Diferenciales

Se conoce como hundimiento diferencial el proceso mediante el cual debido a diversas causas (consolidación, subsidencia, etc.) el terreno que da soporte a una estructura comienza a deformarse a diferentes velocidades en diferentes puntos del mismo. Lo anterior puede deberse a la presencia de estructuras geológicas, lentes de arcillas expansivas, flujo plástico acelerado del suelo, o la existencia de oquedades del terreno, las cuales al aumentarse la carga, comienzan a ceder lentamente produciendo efectos de hundimiento diferencial en el suelo que yace sobre ellos.

Los hundimientos provocan fuerzas internas en una estructura, sólo si ésta es hiperestática y sus apoyos tienen movimientos distintos (Hundimientos Diferenciales). Sin embargo, los hundimientos excesivos deben evitarse aun cuando sean uniformes, ya que si bien no afectan a la estructura, interfieren con el correcto funcionamiento de la construcción.

La magnitud de los hundimientos de los apoyos de una estructura debido a las cargas que en ella actúan, depende de las características del subsuelo y de las rigideces relativas entre estructura, cimentación y suelo. Su cálculo requiere consideraciones conjuntas de la teoría de las estructuras y de mecánica de suelos.



**Imagen 1.- Torre de Pisa afectada por hundimientos diferenciales del terreno en que se desplanta. (Anónimo)**

Si se conocen los hundimientos que van a sufrir los apoyos, la cuantificación de los efectos en la estructura es un problema estándar de análisis, cuando puede suponerse un comportamiento elástico de la misma. Sin embargo, debido a que los hundimientos ocurren en general muy lentamente en el tiempo, se producen efectos no lineales que modifican radicalmente los resultados que se obtendrían de un análisis elástico resuelto empleando las mismas propiedades de rigidez de la estructura usadas en el análisis por cargas gravitacionales.

Hay que tener bien claro, al estudiar estos problemas, que a diferencia de lo que sucede para las cargas impuestas, los efectos de las deformaciones impuestas tienden a disiparse a medida que se deforma más la estructura; por tanto, fenómenos como agrietamiento y flujo plástico en estructuras de concreto y giros locales en juntas de acero, pueden liberar total o parcialmente la estructura de los efectos de los movimientos diferenciales en sus apoyos.

Por lo anterior, en general no se revisa la estructura para los efectos de los hundimientos diferenciales, sino que se diseña su cimentación apropiadamente de manera que los hundimientos se mantengan dentro de los límites tales que sus esfuerzos puedan ser disipados por deformaciones inelásticas de la estructura.

Cuando los hundimientos lleguen a exceder de dichos límites, y cuando se trate de construcciones particularmente sensibles a los movimientos diferenciales, debe entonces realizarse un análisis estructural de sus efectos. Debe en esos casos considerarse una rigidez reducida de la estructura para considerar que su rigidez es menor cuando los movimientos se imponen muy lentamente. Por ejemplo el RCDF (Reglamento de Construcción del Distrito Federal) especifica para estructuras de concreto que las deformaciones a largo plazo se determinen como las calculadas para cargas de corta duración multiplicadas por el factor:

$$\frac{2}{1 + 50p'}$$

Donde  $p'$  es la cuantía de refuerzo de compresión. Esto equivale a que en secciones simplemente armadas ( $p'=0$ ) las deformaciones diferenciales son

el doble de las de corto plazo y que para el análisis ante cargas de larga duración se debe emplear un módulo de elasticidad de un tercio del que se emplea en el análisis de cargas de corta duración. Las fuerzas internas que resultan por efectos de hundimientos diferenciales deben considerarse como efectos de acciones permanentes. Por ello, deben intervenir tanto en las combinaciones de acciones comunes como en las excepcionales. Sin embargo, el factor de carga para sus efectos puede tomarse como la unidad. La superposición de los efectos de hundimientos diferenciales y los de cargas laterales como las de viento o sismo, es particularmente crítica, ya que ambos tipos de acción inducen distorsiones en la estructura que dan lugar a distribuciones de fuerzas internas semejantes y aditivas.

### **1.2. El fenómeno de la Subsistencia**

El termino subsistencia es descrito por la Real Academia de la lengua Española como "el Hundimiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones mineras." Para fines técnicos y particularmente para los fines de este trabajo, una definición más precisa de subsistencia será: "El fenómeno que tiene lugar debido a la extracción de sólidos (minerales) o fluidos (gas, petróleo, vapor, agua) del subsuelo, que se manifiesta en hundimientos paulatinos o súbitos de la superficie y en la generación de agrietamientos en la masa del relleno granular." (Pacheco, 2007)

Desde el surgimiento de la era industrial se ha generado un crecimiento acelerado de todas las actividades humanas tales como la agricultura, la industria y el comercio lo que ha generado una importante explosión demográfica concentrada principalmente en las zonas urbanas. Esto ha ocasionado el crecimiento descontrolado de las ciudades, las cuales incluso han ocupado áreas que en otro momento fueron zonas agrícolas y ganadera obligando a los productores agropecuarios a ocupar zonas anteriormente inactivas. Como consecuencia, se generó un aumento en la demanda del abastecimiento del agua para satisfacer las necesidades básicas tanto de la

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

población, de la industria y del riego de los campos de cultivo. Al agotarse las fuentes de agua superficiales naturales (lagunas, lagos y manantiales) y al rebasar la capacidad de aprovisionamiento de los cuerpos de agua artificiales (represas, presas y bordos), se recurrió a la explotación del agua del subsuelo mediante la perforación de pozos.

Las zonas con mayor potencial para la explotación del agua del subsuelo, y por tal razón las que presentan un mayor desarrollo y crecimiento, son los valles formados en cuencas que en un proceso de millones de años han sido cubiertas por materiales granulares, usualmente de origen aluvial y lacustre, los cuales son un excelente medio para la formación de depósitos de agua susceptibles de ser aprovechados.

Cuando la cantidad de agua que se extrae del subsuelo es más grande que la cantidad de agua que entra al acuífero por infiltración, se dice que el acuífero está siendo sobreexplotado. La sobreexplotación del acuífero de una cuenca que contiene rellenos granulares, aluviales y lacustres con potencial de ser consolidado, tiene como consecuencia la generación de hundimientos, asentamientos y acomodamientos graduales de los rellenos, y la generación de grietas en la superficie del terreno. (Pacheco, 2007)

La subsidencia, el hundimiento de la superficie del terreno como consecuencia de cambios ocurridos en profundidad, es un proceso generalmente lento que ha sido la causa directa de cuantiosas pérdidas materiales ocurridas en distintos sitios del mundo.

Dado que existe una componente natural en su ocurrencia, este fenómeno es considerado como un verdadero peligro geológico, el cual se ve generalmente acelerado por actividades humanas inapropiadas. Entre las causas más comunes de subsidencia del terreno relacionada a la actividad del hombre, se destacan: extracción de agua subterránea, petróleo y gas de reservorios subterráneos, disolución de rocas calizas y sales, colapso de minas subterráneas, drenaje de suelos orgánicos, humedecimiento inicial de

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

suelos áridos (Hidrocompactación) y desarrollo de tuberías subterráneas en materiales geológicamente susceptibles (Piping).

La subsidencia se puede clasificar, en función de la profundidad de ocurrencia del mecanismo causativo, en:

1. Subsidencia Profunda
2. Subsidencia Superficial

La primera ocurre a una profundidad variable entre varios centenares de metros hasta unos pocos kilómetros, y está fundamentalmente asociada a la extracción de petróleo y gas. La subsidencia superficial, por otro lado, tiene lugar cerca de la superficie del terreno, generalmente entre algunas decenas y unos pocos cientos de metros de profundidad. Esta última clase está relacionada a diversos mecanismos de generación, entre los que se destacan extracción de agua subterránea, hidrocompactación, disolución de rocas o sales, oxidación de materia orgánica y actividad minera.

La subsidencia causada por la extracción de fluidos es un problema muy extendido, que puede afectar tanto a la circulación de fluidos como a la distribución de sedimentos en y debajo de la superficie del terreno.

Desde el punto de vista del mecanismo causativo de la subsidencia del terreno, podemos subdividirla en los siguientes tipos:

- Subsidencia por extracción de agua subterránea
- Subsidencia por extracción de petróleo o gas
- Subsidencia por hidrocompactación
- Subsidencia por disolución de rocas o sales
- Subsidencia por actividad minera.



En las regiones sísmicas, por otro lado, la licuefacción de suelos constituye otra forma de subsidencia. Esta ocurre súbitamente gatillada por el sacudimiento sísmico del terreno, en condiciones geológicas e hidrogeológicas muy particulares.

Dado que la licuefacción produce innumerables pérdidas materiales durante la ocurrencia de terremotos de magnitudes medias a altas, este peligro geológico secundario asociado a terremotos fue históricamente analizado desde el punto de vista de los efectos geológicos superficiales que produce sobre las estructuras ingenieriles, pero nunca ha sido tratado como un posible iniciador de subsidencia múltiple a mediano o largo plazo.

Si bien el valle de San Joaquín (California) es el sitio del planeta que ha experimentado la mayor subsidencia por extracción de agua subterránea (9 m en 52 años) y por consiguiente unos de los sectores mejor estudiados del mundo en este aspecto, no se conoce realmente si la licuefacción de suelos (superficial y/o subsuperficial) asociada a terremotos históricos pudo haber contribuido al desarrollo de piping, como así también haber afectado o alterado las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos explotados.

### **1.3. Tipo de Subsidencia**

Desde el punto de vista del mecanismo causativo de la subsidencia del terreno, podemos subdividirla en los siguientes tipos:

- Subsidencia por extracción de agua subterránea
- Subsidencia por extracción de petróleo o gas
- Subsidencia por hidrocompactación
- Subsidencia por disolución de rocas o sales
- Subsidencia por actividad minera.

En las regiones sísmicas, por otro lado, la licuefacción de suelos constituye otra forma de subsidencia. Esta ocurre súbitamente gatillada por el sacudimiento sísmico del terreno, en condiciones geológicas e hidrogeológicas muy particulares.

Dado que la licuefacción produce innumerables pérdidas materiales durante la ocurrencia de terremotos de magnitudes medias a altas, este peligro geológico secundario asociado a terremotos fue históricamente analizado desde el punto de vista de los efectos geológicos superficiales que produce sobre las estructuras ingenieriles, pero nunca ha sido tratado como un posible iniciador de subsidencia múltiple a mediano o largo plazo.

Si bien el valle de San Joaquín (California) es el sitio del planeta que ha experimentado la mayor subsidencia por extracción de agua subterránea (9 m en 52 años) y por consiguiente unos de los sectores mejor estudiados del mundo en este aspecto, no se conoce realmente si la licuefacción de suelos (superficial y/o subsuperficial) asociada a terremotos históricos pudo haber contribuido al desarrollo de piping, como así también haber afectado o alterado las condiciones hidrogeológicas de los acuíferos explotados.

### **1.3.1.Subsidencia por Extracción de Agua Subterránea**

Este mecanismo de subsidencia es el más extendido, severo y costoso a nivel mundial. El bombeo del fluido, desde una profundidad determinada hacia el exterior, reduce la presión de poros que ayuda a soportar los depósitos sobre yacentes. El material sedimentario remanente se reacomodará compactándose en un volumen menor, en respuesta al incremento de esfuerzos, lo cual producirá un efecto irreversible. La causa principal de subsidencia es, por lo tanto, la compactación de sedimentos de grano fino (fundamentalmente arcillas) en el sistema de acuífero sometido a una severa extracción por un largo período de tiempo, en donde el ritmo de extracción excede al de recarga.

La cantidad de subsidencia en un área dada está relacionada directamente a la magnitud de la declinación del nivel de agua, al porcentaje de estratos arcillosos constituyentes del acuífero y al período de tiempo durante el cual dicha declinación fue mantenida. El caso más severo a nivel mundial lo constituye, sin lugar a dudas, el valle de San Joaquín (California), el cual sufre subsidencia desde la década del 20. El registro máximo correspondió al período 1925 – 1977, alcanzando un valor de 9 m.

Un efecto geológico superficial asociado a subsidencia de regiones sometidas a una sobreexplotación prolongada de acuíferos, tal como ocurre en el suroeste de los Estados Unidos, es la formación de profundas grietas en la superficie del terreno. Una de estas grietas alcanzó una profundidad de aproximadamente 30 m y una longitud extraordinaria de 16 km en Arizona central.

### **1.3.2.Subsidencia por Extracción de Petróleo y Gas**

Este proceso de subsidencia ocurre casi de la misma manera que aquel relacionado a la extracción de agua. La presión de poros es reducida por extracción de fluidos, mientras que la carga de la roca sobre yacente es gradualmente transferida a las rocas del reservorio (principalmente estratos de arcillas y pizarras), produciendo su compactación.

El hundimiento diferencial es el efecto superficial más común relacionado a este proceso, el cual tiene origen prácticamente en el centro del Área de Producción, adquiriendo una forma similar a una cubeta poco profunda. El agrietamiento de la superficie del terreno, en respuesta al hundimiento diferencial, es un efecto superficial poco observado en el mundo, siendo el más conocido aquel ocurrido en 1963 en California, el cual causó (indirectamente) la destrucción de la presa de tierra del reservorio de agua Baldwin Hills.

El ejemplo más dramático de subsidencia relacionada a la extracción de petróleo ha tenido lugar en Wilmington, en las cercanías de Long Beach, en donde se alcanzó el máximo registro mundial (8.7 m) para el período 1928 – 1972. Valores más comunes de subsidencia, para un período de tiempo aproximadamente similar al anterior, son comparables al registrado en Baldwin Hills (California) el cual alcanzó un máximo de 1.5 m entre 1911 y 1964.

La subsidencia relacionada exclusivamente a la extracción de gas, aparentemente no alcanza magnitudes comparables a aquella asociada a la extracción de petróleo. Esta podría ser la razón por la cual dicho proceso de subsidencia no es ampliamente conocido.

### **1.3.3.Subsidencia por Hidrocompactación**

Este proceso es causado por la saturación rápida de depósitos finos y pobremente compactados, en estado inicial no saturado. La adición de agua facilita la reorientación de las partículas del suelo, produciendo una neta reducción en volumen. En este contexto, los suelos pierden su capacidad de soporte y consolidan bajo su propio peso.

Este proceso, el cual ocurre por encima de la zona de saturación, es muy común en ambientes desérticos, aunque también hay algunos registros en regiones semiáridas. Los materiales más susceptibles a la hidrocompactación son los limos arenosos (entre 0.0039 a 0.0625 mm en diámetro) depositados por acción del viento (Loess) y los depósitos algo arcillosos distales de abanicos aluviales.

La saturación de este tipo de depósitos sedimentarios por actividad humana, tal como irrigación, construcción de carreteras y desarrollo de pequeños reservorios superficiales de agua (artificiales), ha contribuido enormemente

a la inducción del peligro geológico referido. Se conocen valores máximos variables entre 1 y 4.5 m en los márgenes S y W del valle de San Joaquín.

#### **1.3.4. Subsistencia por Disolución**

Este proceso tiene lugar donde existen rocas sólidas solubles (subsuperficiales), las cuales son disueltas lentamente por el agua natural circulante en o bajo la superficie. El agua de lluvia, en combinación con el CO<sub>2</sub> de la atmósfera, constituye un medio ácido que tiene la propiedad de disolver ciertos tipos de rocas, fundamentalmente las compuestas por carbonatos.

Las principales rocas involucradas en este proceso de disolución, son las calizas (CO<sub>3</sub>Ca) y dolomías ([CO<sub>3</sub>]<sub>2</sub> CaMg), las cuales desarrollan un paisaje característico de disolución denominado Karst. El yeso (SO<sub>4</sub>Ca.2H<sub>2</sub>O), está generalmente presente en el proceso kárstico.

Las geo formas más características de los paisajes kársticos son las cavernas y los sumideros además de la frecuente interrupción del sistema de drenaje debido a la pérdida de agua superficial y su migración hacia la subsuperficie.

Los problemas ambientales en los relieves kársticos se pueden agrupar en dos categorías: la polución del agua subterránea y los problemas ingenieriles de cimentación. Entre los últimos, se destacan: asentamiento diferencial, piping (un tipo de erosión subsuperficial) y colapso de la superficie del terreno dentro de las cavidades subterráneas, el cual se conoce como Sumidero de Colapso.

El sumidero de colapso se forma casi súbitamente cuando la superficie del terreno colapsa dentro de los vacíos o cavidades subterráneas, produciendo una forma superficial bastante circular, con sus lados o paredes

marcadamente abruptas. Una vez formada, esta manifestación de subsidencia puede incrementar su tamaño. Si bien el Winter Peak Sinkhole (30 m en 72 horas) ocurrido en Florida (1981) no ha sido el de mayor tamaño y profundidad, fue uno de los que produjo mayores pérdidas materiales hasta el presente

### **1.3.5.Subsidencia por Actividad Minera**

La subsidencia provocada por este mecanismo generalmente afecta a muy pocas personas y tiene un carácter local. En el contexto de la minería subterránea, este peligro geológico representa al colapso de materiales rocosos consolidados y/o no consolidados, dentro de las galerías subterráneas. La subsidencia minera es controlada por numerosos factores, entre los que se destacan: espesor del material sobre yacente a la excavación minera, ancho del techo minero no estabilizado con soportes, hidrología, dimensión de los pilares, densidad y dimensión de fracturas y tiempo.

La componente vertical de la subsidencia minera es proporcional a la altura del área de extracción. Este proceso es frecuentemente afectado por la circulación de agua o por la fluctuación de su nivel en la mina. De hecho, el agua circulante en una mina subterránea puede deteriorar los soportes del techo o a la roca que lo constituye. De la misma manera, la probabilidad de ocurrencia de subsidencia minera se ve incrementada donde las fracturas intersectan al techo de la mina, ya que estas forman verdaderos planos de debilidad que controlarán la ocurrencia del colapso.

Uno de los casos más asombrosos de subsidencia minera se encuentra en el estado de Ohio (USA), en donde la mayoría de las 6.000 minas subterráneas abandonadas son minas de carbón, las cuales han estado provocando problemas de subsidencia al menos desde 1923. Este proceso ha provocado daños tanto a las cimentaciones de edificios, como a cañerías subterráneas

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

y carreteras, además de representar un peligro potencial para el hombre. Recientemente, el colapso sufrido por la carretera interestatal 70 en el condado de Guernsey (Ohio), mantuvo cerrado dicho medio de transporte por varios meses, y produjo un costo total de reparación de unos 3.8 millones de dólares.

#### **1.4. El Agrietamiento en la Ciudad de Aguascalientes**

La ciudad de Aguascalientes, es la ciudad más grande del estado del mismo nombre, se encuentra en la región centro-norte del país. Hasta mediados de los años 70 la ciudad de Aguascalientes era una ciudad pequeña, pero entonces se dio una gran explosión demográfica que tiene como razón la inmigración interna principalmente de los vecinos estados de Jalisco, Zacatecas, San Luis Potosí y Durango, frente a la prosperidad aguascalentense. Así como miles de familias que huyendo del sismo de 1985 en la Ciudad de México, eligieron la paz y seguridad de Aguascalientes.

Sin embargo este crecimiento poblacional acelerado trajo consigo una gran problemática, pues la infraestructura básica resultaba claramente deficiente para atender las crecientes necesidades de una población cada vez mayor. Lo anterior dio como resultado la creación de políticas públicas aceleradas y faltas de planeación adecuada, lo que podría resumirse en la idea "Si se requieren más recursos, extrae más recursos" lo cual representa la génesis de la problemática actual que experimenta la ciudad de Aguascalientes.

El estado de Aguascalientes, al encontrarse en una zona semiárida de México presenta precipitaciones muy someras, lo que ocasiona que no exista en el estado cuerpos superficiales naturales de agua perenes, que puedan satisfacer la demanda de las crecientes necesidades de consumo de agua para uso doméstico, agrícola o industrial. Hasta hace algunos años lo anterior se ve subsanado en parte por la presencia de acuíferos subterráneos someros los cuales permitían a la población obtener agua

mediante la perforación de pozos o norias de poca profundidad (menores a 5m), sin embargo el crecimiento poblacional de la década de los ochenta ocasionó una extracción superior a la recarga con que podían contar los acuíferos del valle de Aguascalientes ocasionando un descenso en los niveles freáticos. Este problema es de tal magnitud que en la actualidad la extracción de agua potable se realiza a través de pozos con profundidades que llegan hasta los 450 m de profundidad. (CAASA, 2011)

Esta sobre explotación tan grande de los acuíferos subterráneos ocasionó hundimientos en todo el valle de Aguascalientes, lo cual en general se acepta como la teoría más aceptada para la aparición de fallas geológicas en el valle de Aguascalientes, sin ser este el único motivo posible del origen de dichas fallas (Aranda, 1989)

## **1.5. Estructuras de Acero Rolado en Frio (Steel Framing)**

### **1.5.1.Introducción**

El hierro se encuentra en grandes cantidades en la corteza terrestre formando parte de diversos minerales (óxidos, minerales, hidratados, carbonatos, sulfuros, silicatos, etc.). Desde tiempos prehistóricos, el hombre ha aprendido a preparar y procesar estos minerales por medio de operaciones de lavado, triturado y clasificado, separación de la ganga, calcinado, sinterizado y granulado, para fundir los minerales y obtener hierro y acero. A lo largo de la historia, muchos países han desarrollado una próspera industria siderúrgica basada en los suministros locales de mineral y en la proximidad de bosques para obtener carbón vegetal como combustible.

Actualmente en la industria de la construcción como en muchas otras, se dispone de una diversidad de tipos y presentaciones del acero. En forma de



placas, perfiles ensamblados y perfiles laminados de distintas propiedades mecánicas.

### **1.5.2. Características del Steel Framing**

La interpretación de la expresión inglesa "Steel Framing", "Steel = acero" y "framing" que deriva de "frame = estructura, esqueleto, disposición, construcción, puede ser definida como: Proceso por el que se compone un esqueleto estructural en acero formado por diversos elementos individuales unidos entre sí, que así funcionan en conjunto para resistir las cargas que solicitan al edificio y a la estructura y le dan su forma. Así, el sistema SF no sólo está restringido a su estructura. Como un sistema destinado a la construcción de edificios, abarca varios componentes y "subsistemas". Estos subsistemas incluyen además el estructural, aislación termo acústica, de cierres interno y externos y de instalaciones eléctricas e hidráulicas.

Como resumen, el sistema contempla la integración de tres conceptos:

- La estructura; realizada a partir de perfilería de acero galvanizado conformada en frío y unida mediante tornillos auto taladrantes. Debido al proceso de conformado de los perfiles es posible utilizar infinidad de secciones diferentes, optimizando la estructura y permitiendo de esa forma todo tipo de configuraciones arquitectónicas sin limitaciones de forma.
- Las particiones interiores; realizadas con la tecnología de la placa de yeso sobre esqueleto metálico, solución sobradamente conocida por sus altas prestaciones y calidad de acabados.
- El acabado exterior o envolvente; realizada con paneles hidrófugos sobre los que es posible aplicar cualquier tipo de acabado tradicional.



**Imagen 2.- Vivienda con Estructura de Perfiles de Acero Rolado en Frio (Sarmanho & Moraes, 2007)**



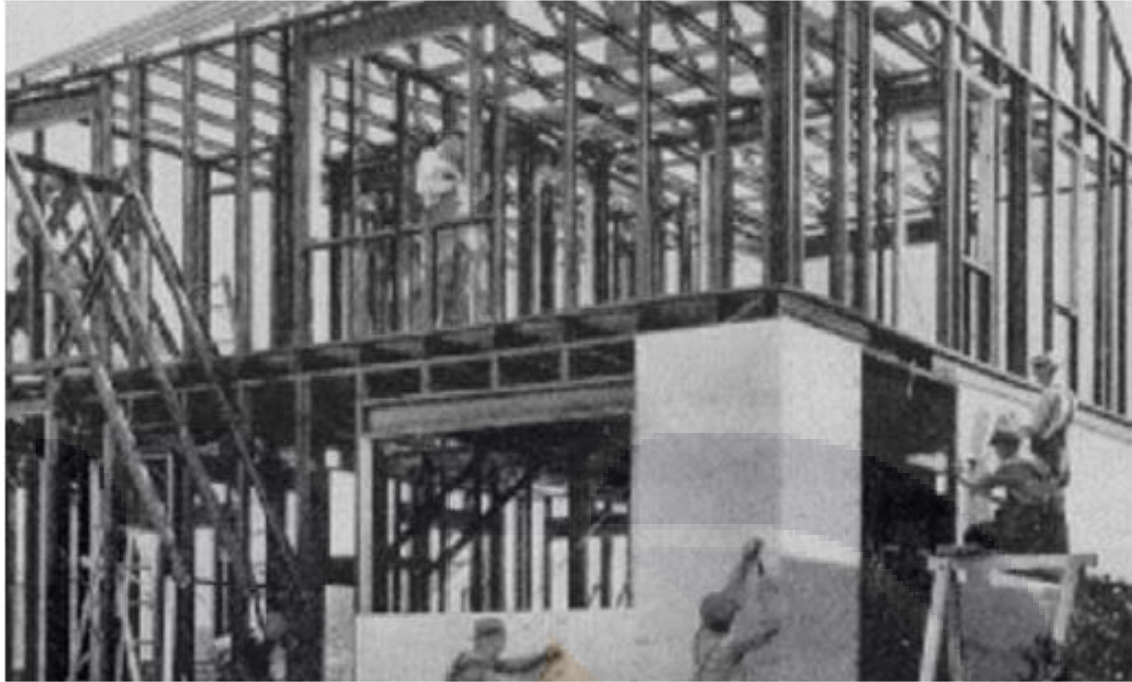
**Imagen 3.- Fijación Perfiles de Acero Rolado en Frio Mediante Tornillos (Sarmanho & Moraes, 2007)**

### **1.5.3.Desarrollo del Sistema Steel Framing**

A pesar de ser considerada como una tecnología nueva, el origen del Steel Framing se remonta al inicio del siglo XIX. De hecho, históricamente se inicia con las casas de madera construidas por los colonizadores en el territorio norteamericano en esa época. Para atender el crecimiento de la población hubo que recurrir a métodos más rápidos y productivos en la construcción de viviendas, utilizando los materiales disponibles en la región, en este caso la madera. Ese método consistía en una estructura compuesta de piezas de madera aserrada de pequeña sección transversal, lo que se conoció como Balloon Framing

A partir de ahí, las construcciones en madera, conocidas como "Wood Frame", se convirtieron en la tipología residencial más común en los Estados Unidos. Aproximadamente un siglo más tarde, en 1933, producto del gran desarrollo de la industria del acero en los Estados Unidos, se lanzó en la Feria Mundial de Chicago el prototipo de una residencia en Steel Framing que utilizó perfiles de acero en lugar de la estructura de madera (Sarmanho & Moraes, 2007)

El crecimiento de la economía norteamericana y la abundante producción de acero en el período post-Segunda Guerra contribuyó al desarrollo de los procesos de fabricación de perfiles conformados en frío, y el uso de los perfiles de acero en sustitución de los de madera, que ofrecían las ventajas de la mayor resistencia y eficiencia estructural del acero y la capacidad de la estructura de resistir a catástrofes naturales, tales como terremotos y huracanes. En la década de los años 90, las fluctuaciones en el precio y en la calidad de la madera para construcción civil estimularon el uso de los perfiles de acero en la edificación residencial. Se estima que hasta el final de la década 90, un 25% de la edificación residencial en Estados Unidos se basó en el sistema del SF (Bateman, 1997)



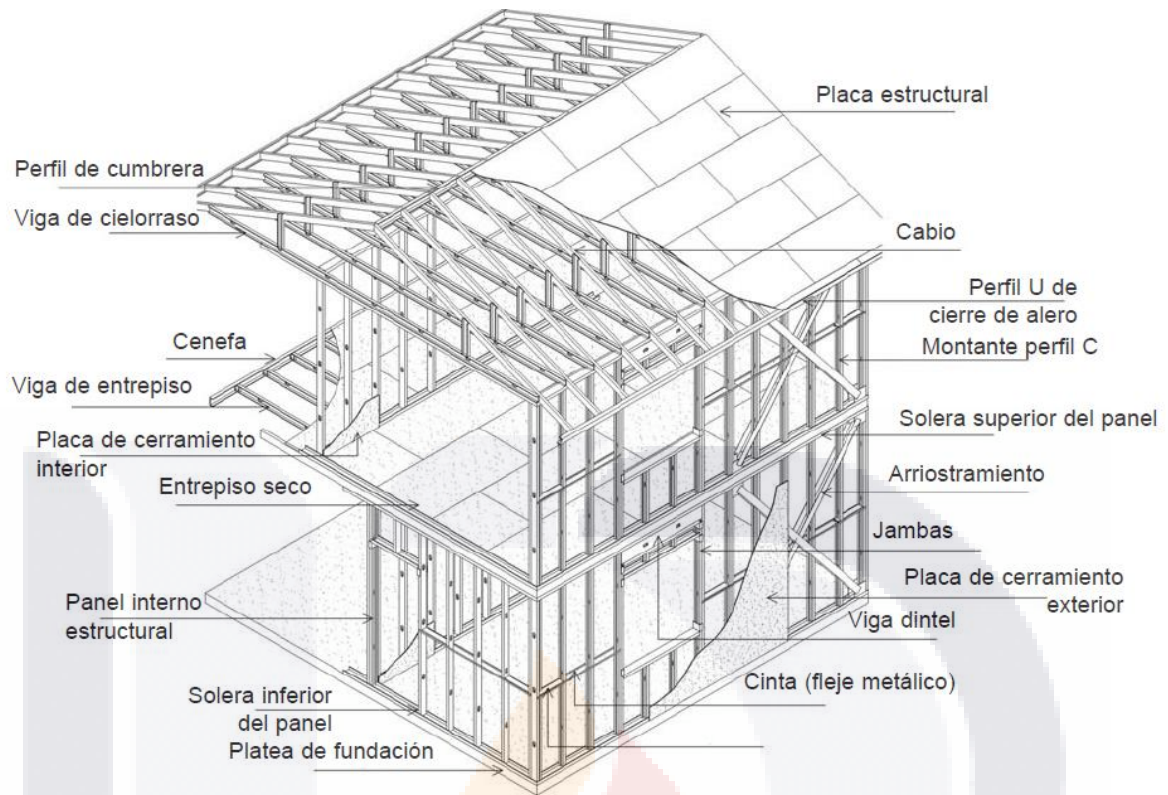
**Imagen 4.- Prototipo de Residencia n Light Steel Framing en la Exposición Mundial de Chicago en 1933 (Sarmanho & Moraes, 2007)**

En Japón, las primeras construcciones en SF comenzaron a aparecer después de la Segunda Guerra Mundial cuando hubo que reconstruir cuatro millones de viviendas destruidas por los bombardeos. La madera, material usado en la estructura de las casas, había sido un factor agravante de los incendios que se propagaron durante los ataques. Luego el gobierno japonés restringió el uso de la madera en construcciones auto-portantes a fin de proteger los recursos forestales que de otro modo se habrían podido agotar y también para promover la construcción con materiales no inflamables.

La industria japonesa del acero, viendo en esas restricciones un nicho de mercado, comenzó a producir perfiles livianos de acero para la construcción como un sustituto de los productos estructurales de madera. En consecuencia, Japón presenta un mercado y una industria altamente desarrollados en lo que respecta a la construcción con perfiles livianos de acero.

A pesar de que el SF es un sistema de construcción bastante usado en países donde la construcción civil es predominantemente industrializada, en la mayoría de los países de América Latina donde prevalece el método artesanal, aún es poco conocido. Así en primera instancia para ayudar a visualizar el sistema LSF vamos a recurrir al tabique en seco (Drywall), que es ampliamente utilizado en los tabiques interiores en la región, que a pesar de no tener una función estructural, utiliza perfiles galvanizados para componer un esqueleto en el que se fijan las placas de cerramiento. Sin embargo, hasta aquí no más llega la semejanza, ya que el sistema SF, como ya se explicó, es un sistema mucho más amplio, capaz de integrar todos los componentes necesarios para construir un edificio cuya estructura es fundamental.

La siguiente ilustración permite visualizar esquemáticamente la estructura y los subsistemas de una vivienda en SF. La estructura del SF está básicamente compuesta por paredes, pisos y techo, que en conjunto posibilitan la integridad estructural del edificio, con la debida resistencia a los esfuerzos a los que está expuesta la estructura.



**Imagen 5.- Estructura Típica del Sistema Steel Framing. (Sarmanho & Moraes, 2007)**

#### **1.5.4. Ventajas del Steel Framing**

Se pueden enumerar una gran lista de ventajas que ofrece la versatilidad de este método, pues los productos que constituyen el sistema son estandarizados de tecnología avanzada, los elementos constructivos son producidos industrialmente y la materia prima, las características técnicas y de acabado pasan por rigurosas inspecciones, además de que el acero es un material de comprobada resistencia y con mayor precisión dimensional en los perfiles que se presenta, lo cual influye en un mejor desempeño de la estructura. También existe por lo general gran facilidad en el suministro de los perfiles conformados en frío que sean de producción estándar por la industria local.

La durabilidad y vida útil de la estructura está garantizada gracias al proceso de galvanización de las chapas a partir de las que se obtienen los perfiles; existe facilidad de montaje, manejo y transporte gracias al bajo peso de los elementos; construcción en seco, lo que minimiza el uso de recursos naturales y los desperdicios; Los perfiles perforados previamente y la utilización de los paneles de yeso cartón facilitan las instalaciones eléctricas e hidráulicas; mejores niveles de desempeño termo-acústico, que se logran mediante la combinación de materiales de cerramiento y aislamiento; facilidad de ejecución de las uniones; y rapidez de construcción, ya que el terreno se transforma en el sitio de montaje.

Sumado a lo anterior, el acero es un material incombustible que puede ser reciclado muchas veces sin perder sus propiedades, lo cual garantiza el un aprovechamiento más sustentable de los recursos naturales.

#### **1.5.5. Estudios Realizados del Comportamiento de Estructuras con Perfiles de Acero Rolado en Frio**

Como ya se ha dicho anteriormente, la técnica de construcción basada en el uso de perfiles de acero con sección delgada rolados en frio (Steel framing) es usada desde inicios del siglo XIX, sin embargo su comportamiento estructural es estudiado más a fondo recientemente con las nuevas técnicas y tecnologías disponibles.

En 2006 Zhou Xuhong realiza pruebas y emplea el método de los elementos finitos para estudiar la resistencia a la fuerza cortante de paneles formados por perfiles de acero rolado en frio con secciones de pared delgada y recubrimiento, en estructuras residenciales de baja altura. En primer lugar, pone a prueba la resistencia a cortante de paneles con recubrimiento de yeso, OSB o combinaciones de ambos. También realiza simulaciones con elementos finitos utilizando el programa ANSYS, donde los recubrimientos eran simulados como elementos tipo área, los studs y los tracks se suponían simplemente conectados.

Los resultados de las pruebas y análisis de elementos finitos muestran que los materiales de revestimiento contribuyen en gran parte a la resistencia al corte del panel. La resistencia del acero tiene una menor influencia sobre la resistencia al cizallamiento de los paneles. A medida que se disminuye la separación de postes, la altura del panel y el espaciamiento entre los tornillos en el perímetro, la capacidad de carga lateral de los paneles aumenta.

En 2010 Chi-Ling Pan realizó una investigación que se centra en el estudio experimental de la resistencia estructural de los marcos de perfiles de acero rolando en frío con revestimiento, bajo carga cortante monótona. Utilizó dos relaciones de aspecto para los paneles 1.0 y 2.0, así como tres diferentes tipos de material de revestimiento: placas de yeso, placas de silicato de calcio, y OSB, al igual que diferentes espesores de pared para los perfiles, de 9 y 12 mm. La resistencia a la rotura, la rigidez, la absorción de energía, y la relación de ductilidad se estudiaron para cada muestra ensayada.

Posteriormente en 2012 Eray Baran realizó un estudio experimental en el mismo tipo de paneles de muro ante carga lateral estática para investigar su comportamiento. Los resultados experimentales revelaron que la geometría de la unión utilizada en la base de los paneles para transferir las fuerzas de tensión tiene un efecto importante en el comportamiento general de los mismos. Se observó daño considerable en los sujetadores de la fijación y, en parte del perfil inferior adyacente a la sujeción (track), lo cual impidió a los paneles desarrollar la rigidez asociada con la carga principal. Otro modo de falla observado se presentó como una inclinación de los tornillos que conectan el recubrimiento a los elementos del bastidor, así como la separación del revestimiento del bastidor. También demostró que la capacidad de carga lateral de los paneles se puede predecir con una precisión aceptable utilizando las ecuaciones de diseño disponibles en la literatura.



De igual forma en 2012 M. Nithyadharan presentó los resultados de un estudio experimental sobre el comportamiento y la resistencia de paneles de perfiles de acero formados en frío con recubrimientos de placas de silicato de calcio, cuando se someten a una carga creciente que es aplicada y retirada de forma cíclica lateralmente.

Los estudios que se han venido realizando de manera reciente solo se enfocan a evaluar el comportamiento de los paneles ante cargas laterales, las cuales se presentan durante eventos extraordinarios como sismos; sin embargo, ninguno de estos estudios se enfoca en contemplar la diferencia del comportamiento ante hundimientos diferenciales, que es el caso que se estudia en el presente trabajo. Ya que, aunque bien sabemos los hundimientos diferenciales se asocian con diagonales de cortante en los muros de cualquier edificación, como en el caso de las cargas laterales, éstos podrían presentar particularidades en su comportamiento estructural ya que se trata del mismo efecto, pero no de las mismas acciones que lo provocan.

## **1.6. Conceptos Empleados de Análisis Estructural**

### **1.6.1. Generalidades del Método de los Elementos Finitos**

Gran parte de los problemas que se presentan en la ingeniería resultan de una gran complejidad matemática, cuya solución por métodos exactos de análisis, aun después de hacer algunas hipótesis simplificadoras, no se logra, solo para ciertos problemas de geometría, condiciones de contorno y/o sistemas de carga muy particulares. Por esto, se debe recurrir a los métodos numéricos, los cuales permiten elaborar análisis y diseños con un alto grado de sofisticación y precisión. El método de los elementos finitos es uno entre una gran gama de métodos numéricos que se han venido desarrollando y usando exitosamente, en la solución de muchos problemas en distintas áreas de la ciencia. Aun cuando todos estos métodos constituyen una muy poderosa herramienta matemática, no dejan de ser métodos aproximados, debiéndose tener por lo tanto un especial cuidado en su utilización, ya que la calidad de las soluciones que se obtengan depende de varios factores, entre los cuales se pueden destacar la distribución de la discretización espacial de la región en estudio, el tipo de discretización en el tiempo en los problemas no permanentes, la aplicación apropiada de las condiciones de contorno, la correcta inclusión en el modelo de las propiedades físicas de los materiales que intervienen en el problema, etc.

“La idea general del método de los elementos finitos es la división de un medio continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones algebraicas, lineales o no.” (Otero, 2006)

Hasta la llegada del Método de los Elementos Finitos (MEF), los sistemas continuos se abordaban analíticamente, pero por esa vía sólo es posible obtener solución para sistemas con geometría muy sencilla, y/o con condiciones de contorno simples.

En una estructura discreta, su deformación viene definida por un número finito de parámetros (deformaciones y/o giros), que juntos conforman el vector de deformaciones  $\Delta$ , y la estructura tiene tantas formas de deformarse como términos tenga dicho vector. Un medio continuo tiene infinitas formas posibles de deformarse, independientes unas de otras, ya que cada punto puede desplazarse manteniendo fijos cualquier número finito de los puntos restantes, por grande que sea este último. Por lo tanto la configuración deformada de la estructura no puede venir dada por un vector finito  $\Delta$  como el anterior, sino que es una función vectorial y si éste está bien planteado, cumplirá las condiciones de contorno impuestas, pero en principio no puede asegurarse que esta función  $u$  tenga una expresión analítica manejable, ni siquiera que pueda calcularse. Por lo tanto la función  $u$  no podrá conocerse en general.

Para resolver este problema, el Método de los Elementos Finitos recurre a la hipótesis de discretización, que se basa en lo siguiente:

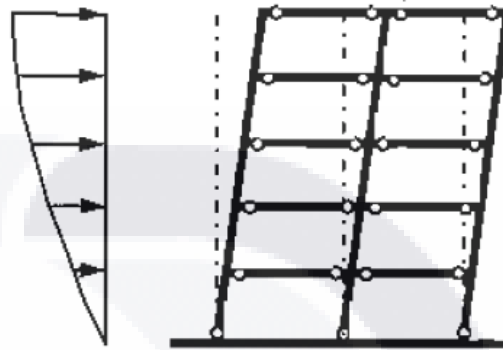
- El objeto continuo se divide por medio de líneas o superficies imaginarias en una serie de regiones contiguas y disjuntas entre sí, de formas geométricas sencillas y normalizadas, llamadas elementos finitos.
- Los elementos finitos se unen entre sí en un número finito de puntos, llamados nudos.
- Los desplazamientos de los nudos son las incógnitas básicas del problema, y éstos determinan unívocamente la configuración deformada de la estructura. Sólo estos desplazamientos nodales se consideran independientes.

- El desplazamiento de un punto cualquiera, viene unívocamente determinado por los desplazamientos de los nudos del elemento al que pertenece el punto. Para ello se definen para cada elemento, unas funciones de interpolación que permiten calcular el valor de cualquier desplazamiento interior por interpolación de los desplazamientos nodales. Estas funciones de interpolación serán de tal naturaleza que se garantice la compatibilidad de deformaciones necesaria en los contornos de unión entre los elementos.
- Las funciones de interpolación y los desplazamientos nodales definen unívocamente el estado de deformaciones unitarias en el interior del elemento. Éstas, mediante las ecuaciones constitutivas del material definen el estado de esfuerzos en el elemento y por supuesto en sus bordes.
- Para cada elemento, existe un sistema de fuerzas concentradas en los nudos, que equilibran a los esfuerzos existentes en el contorno del elemento, y a las fuerzas exteriores sobre él actuantes.
- Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente.

### 1.6.2. Análisis Pushover

El análisis Pushover es aquel en el que el modelo de la estructura, se somete a una carga horizontal monotónica, previamente definida, la cual se va incrementando hasta que se alcance la deformación máxima considerada o que la estructura falle. El

propósito del análisis Pushover, es evaluar el desempeño estructural estimando la resistencia y capacidades de deformación usando un análisis estático no lineal, y comparando estas capacidades con las demandas en los niveles de desempeño correspondiente. (Kalavagunta & Naganathan, 2012). Aunque el análisis estático no lineal de



**Imagen 6.- Formación de rótulas plásticas en un edificio por la aplicación de carga monotónica lateral en el análisis Pushover. (Applied Technology Council, 1996)**

estructuras ha sido recientemente incluido en las provisiones de diseño para la construcción de nuevos edificios, el procedimiento como tal no es nuevo y se ha utilizado desde hace varios años en investigaciones y aplicaciones de diseño. Viene a ser un método más simple ya que da una evaluación directa de la respuesta de estructuras ante los desplazamientos horizontales debidos a sismos de magnitud considerable y puede ser una buena alternativa en relación con otros procedimientos más complejos de análisis. (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2003)

Este procedimiento utiliza técnicas simplificadas no lineales para estimar la deformación estructural. Por el contrario el procedimiento dinámico no lineal, comúnmente conocido como análisis no lineal historia-tiempo, requiere un juicio considerable y experiencia para realizarlo, y puede ser usado sólo dentro de las limitaciones que se describen en las especificaciones. (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2000)

El análisis Pushover se representa por medio de la curva de capacidad de la estructura, la cual es una curva fuerza-desplazamiento en la que se representa la fuerza cortante horizontal y el desplazamiento en el extremo superior de la estructura. La capacidad de una estructura depende de la resistencia y capacidades de deformación de los componentes de la estructura. (Applied Technology Council, 1996)

### **1.6.3. Análisis Pulldown**

El efecto de Pulldown en una estructura es considerado cuando alguno de los apoyos sufre un desplazamiento vertical. Este tipo de análisis resulta ser similar al que ocurre cuando se realiza un análisis estático no lineal conocido como Pushover. La diferencia estriba en la dirección en que se evalúan los desplazamientos. Mientras que en el análisis Pushover se evalúan los desplazamientos horizontales, en el análisis pulldown se revisan los desplazamientos verticales los cuales pueden generarse por diferentes causas. Una característica importante en este tipo de asentamiento vertical, es la velocidad de los desplazamientos, que depende del tipo de deslizamiento del suelo que afecte a la estructura. En el presente caso de estudio los desplazamientos considerados son los provocados por la subsidencia regional, la cual se desarrolla lentamente a lo largo de los años. La mayor dificultad para lograr resultados confiables para deslizamientos de tierra en comparación a otras amenazas naturales, como sismos o inundaciones, es debido a la complejidad de modelización del deslizamiento, en la identificación de los parámetros relevantes de intensidad y en la evaluación de la vulnerabilidad de una manera cuantitativa.

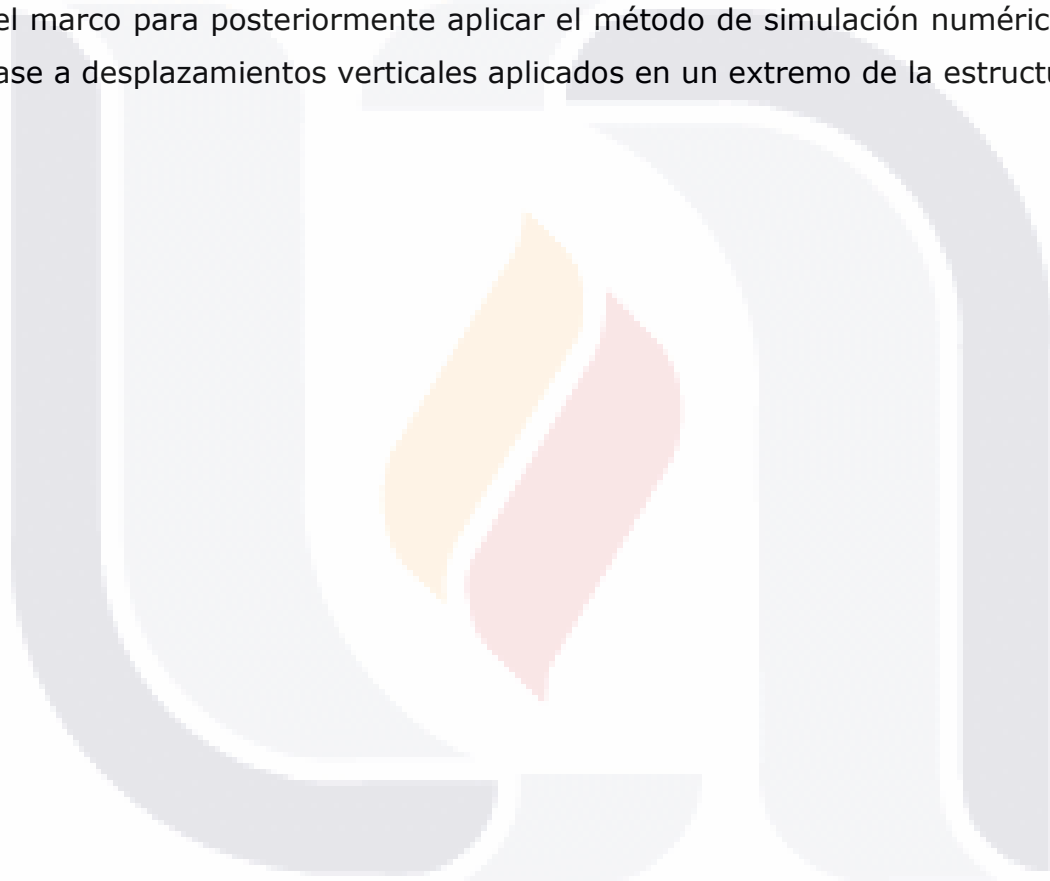
De acuerdo con Negulescu, 2010, existen tres métodos generales para predecir daños en estructuras debido a movimientos y asentamientos de la cimentación:

- Métodos empíricos (Skempton y Mc Donald, 1956; Polshin y Tokar, 1957; Sowers, 1962; Bjerrum, 1963; Rusch and Mayer, 1964; Beeby y

Miles, 1969) los cuales establecen criterios de serviciabilidad para relacionar la deformación observada de mediciones de campo con el daño.

- Métodos usando los principios de la ingeniería estructural (Burland y Wroth, 1974; Boscardin y Cording, 1989; Boone, 1996; Finno et al., 2005; Bird et al., 2005).
- Métodos basados en modelación numérica (Burd et al., 2000).

En el presente caso de estudio de marcos de acero rolado en frío de pared delgada se aplicó una etapa experimental para determinar datos de rigidez del marco para posteriormente aplicar el método de simulación numérica en base a desplazamientos verticales aplicados en un extremo de la estructura.



## **2. CAPÍTULO 2 SIMULACIÓN Y ENSAYES DE PROBETAS DE ACERO ROLADO EN FRIO**

Dado que la subsidencia es un fenómeno que se desarrolla de manera gradual a lo largo del tiempo, la aplicación de la carga que se desarrolla debido a este hecho es a su vez paulatina, por lo que existen pues razones para creer que el análisis de este tipo de acciones que bien pudieran ser consideradas como del tipo "permanente" no puede simplemente tomarse como un análisis estático, sino que el factor de tiempo influye de alguna manera, volviéndolo por lo tanto un análisis dinámico.

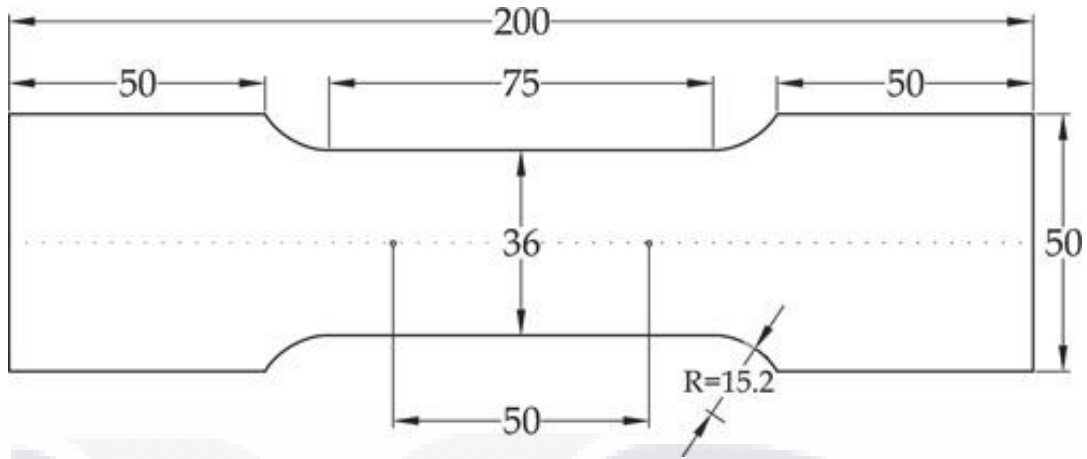
Es esto lo que llevó a hacer una serie de pruebas mediante ensayos y simulaciones para ver la forma en que el factor de tiempo o velocidad de aplicación de las cargas o desplazamientos, influye en el desarrollo de los esfuerzos generados.

### **2.1. Ensayes**

#### **2.1.1. Metodología de Ensayes**

- Se elaboraron múltiples probetas de acero mediante lámina obtenida de los perfiles usados como "studs" en los paneles de muro para este método constructivo, cuyo espesor es de calibre 22. Las probetas cumplen con las especificaciones marcadas en las especificaciones ASTM A-370 de la American Society for Testing and Materials:





**Imagen 7.- Geometría de las probetas de acero ensayadas con variación de la velocidad de aplicación de la carga. Especificaciones ASTM A-370**



**Imagen 8.- Probetas de acero para ensaye con variación de la velocidad de aplicación de la carga. Especificaciones ASTM A-370**

- Se llevaron a cabo los ensayos a tensión mediante la máquina universal de pruebas, se toma como variable la velocidad de aplicación de la deformación para evaluar el comportamiento de la curva esfuerzo deformación. Los ensayos de ajustaron a la capacidad de operación de la máquina, teniendo múltiples ensayos a velocidades de 0.8, 1, 3 y 5mm/seg de velocidad de deformación.



**Imagen 9.- Ensaye a tensión de probeta de acero en maquina universal de pruebas.**

- Se realizó el procesamiento de datos para obtener las curvas esfuerzos deformación, así como los valores de esfuerzo de fluencia y esfuerzo último.
- Se obtuvieron los resultados y se analizó el comportamiento a lo largo de la gráfica esfuerzo- deformación.

### **2.1.2.Resultados de Ensayes**

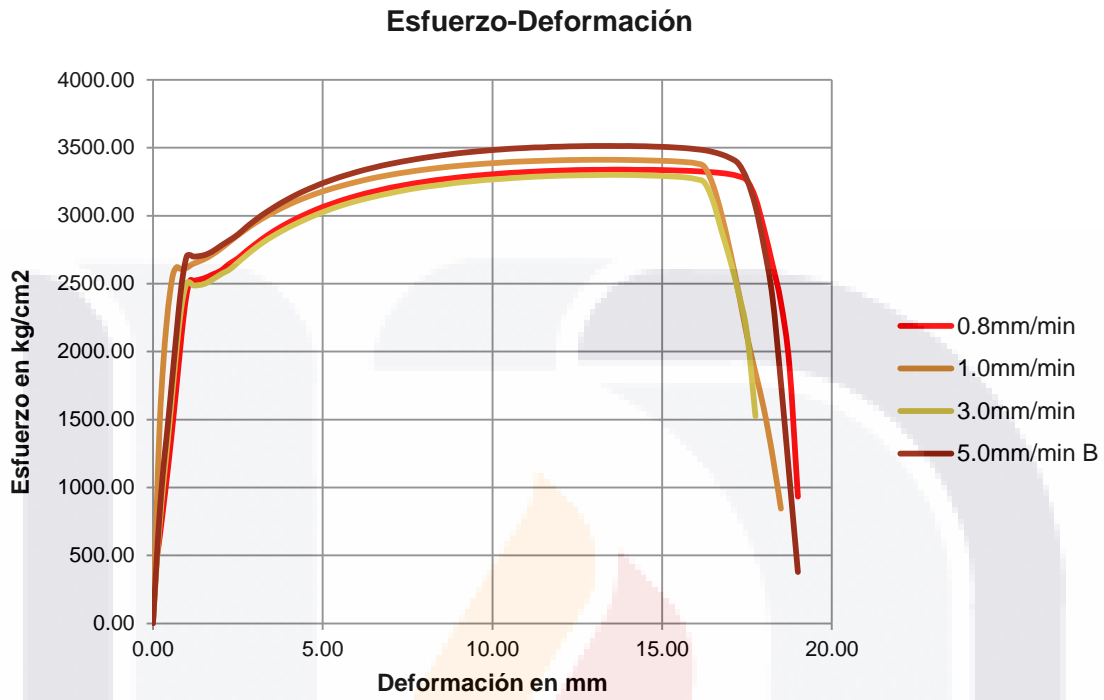
- De los parámetros de esfuerzo de fluencia y esfuerzo último se obtuvieron los siguientes valores:

VALORES  
OBTENIDOS  
Fy=2660kg/cm<sup>2</sup>  
Fu=3419kg/cm<sup>2</sup>

VALORES  
ESPECIFICADOS  
Fy=2320kg/cm<sup>2</sup>  
Fu=3164kg/cm<sup>2</sup>

- Los valores obtenidos para la fluencia y resistencia última resultan aceptables, el acero cumple con valores más altos que los de las especificaciones para este tipo de acero.

- El comportamiento de los esfuerzos y las deformaciones a lo largo de las pruebas se puede resumir en la siguiente gráfica.



**Imagen 10.- Gráfica Resumen de ensayos de probetas de acero a tensión con variación en la velocidad de aplicación de la carga.**

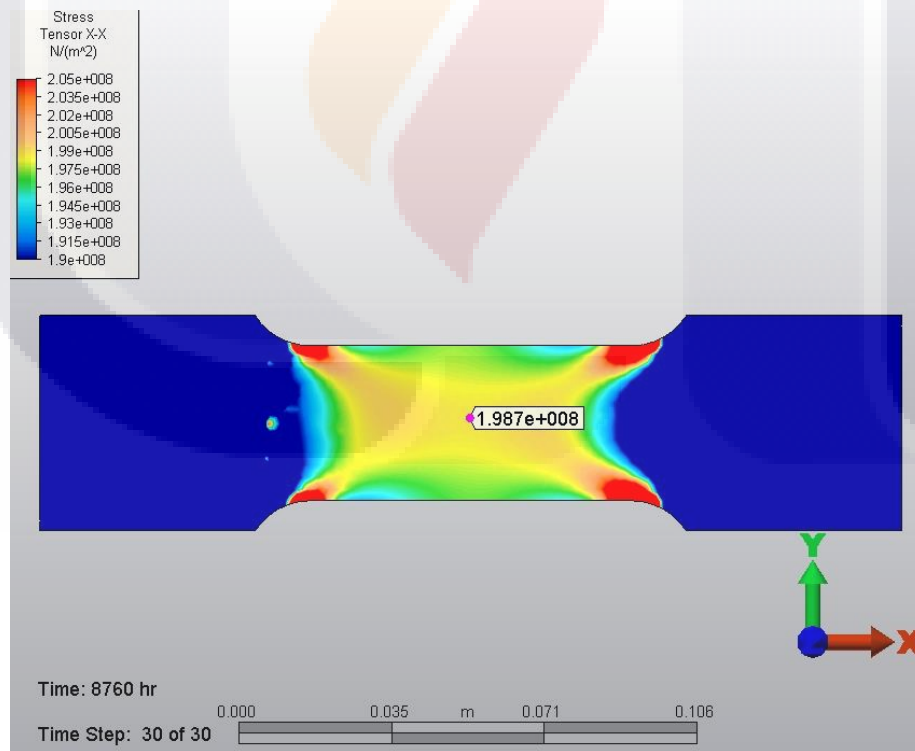
Se puede observar que la gráfica tiene el comportamiento típico para un acero, partiendo del origen se muestra una línea ascendente de pendiente relativamente constante, al llegar al punto de fluencia la deformación aumenta de manera considerable para después entrar en la fase de endurecimiento que se manifiesta con el aumento de pendiente para después seguir deformándose gracias a la ductilidad, finalmente se llega al esfuerzo último y viene la caída de pendiente al momento de la rotura del acero.

En estas curvas la diferencia de comportamientos entre las diferentes velocidades de aplicación de la deformación parece imperceptible, e incluso se puede atribuir a la misma desviación estándar o variabilidad de los ensayos y no tanto a la influencia de la velocidad de aplicación de la deformación. Este ensayo se ve limitado a las especificaciones técnicas de la máquina de ensayo, no siendo posible trabajar ensayos a velocidades de

aplicación de deformación menor, como sucede en los hundimientos diferenciales por subsidencia que se presentan en magnitudes de cm/año,

## 2.2. Simulaciones

En vista de la limitante física para la aplicación de la deformación en las probetas de acero, no es posible atribuir el efecto de la velocidad de aplicación de la deformación a la variabilidad de los ensayos realizados anteriormente, ya que la variación es poco apreciable y se puede atribuir a la variación propia de una serie de ensayos que se realicen a la misma velocidad. Por tanto se procederá a realizar una serie de simulaciones con software especializado en donde se pueda reproducir estos ensayos a velocidades de deformación de menor magnitud y prolongarlas en el orden de años.



**Imagen 11.- Modelo de probeta de acero en software de elementos finitos sometida a tensión a diferentes velocidades de aplicación de la carga.**

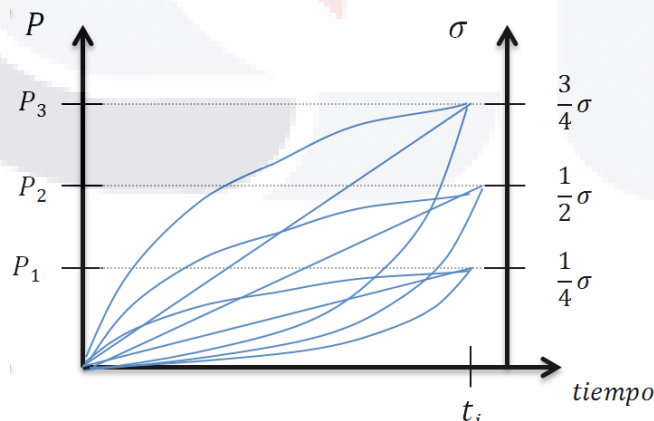
### 2.2.1. Metodología de Simulaciones

A partir de la fórmula:  $\sigma = \frac{P}{A}$ , se obtuvo el valor de la fuerza necesaria P que de acuerdo a la expresión anterior se requiere para conseguir esfuerzos iguales a  $\frac{1}{4}F_y$ ,  $\frac{1}{2}F_y$  y  $\frac{3}{4}F_y$  (Análisis elásticos con modulo de elasticidad y otras propiedades teóricas del material<sup>1</sup>).

Luego, para cada uno de los valores de carga axial anteriores, se obtuvo una ecuación característica que de manera gradual respecto al tiempo permitiera alcanzar tal nivel de esfuerzo al cabo de tiempos iguales a 1seg, 5seg, 10seg, 30seg, 1min, 15min, 1Hr, 1 día, 1 mes, 1 año, 5 años y 20 años.

Lo anterior para 3 formas distintas de alcanzar tales valores de fuerza para los distintos lapsos de tiempo:

- ✓ Forma lineal  $P = (m * tiempo) \quad m = \frac{P_{m\acute{a}x}}{TiempoDePrueba}$
- ✓ Forma cóncava hacia arriba  $P = (a * tiempo^3) \quad a = \frac{P_{m\acute{a}x}}{TiempoDePrueba^3}$
- ✓ Forma cóncava hacia abajo  $P = (b * tiempo^{\frac{1}{3}}) \quad b = \frac{P_{m\acute{a}x}}{TiempoDePrueba^{\frac{1}{3}}}$

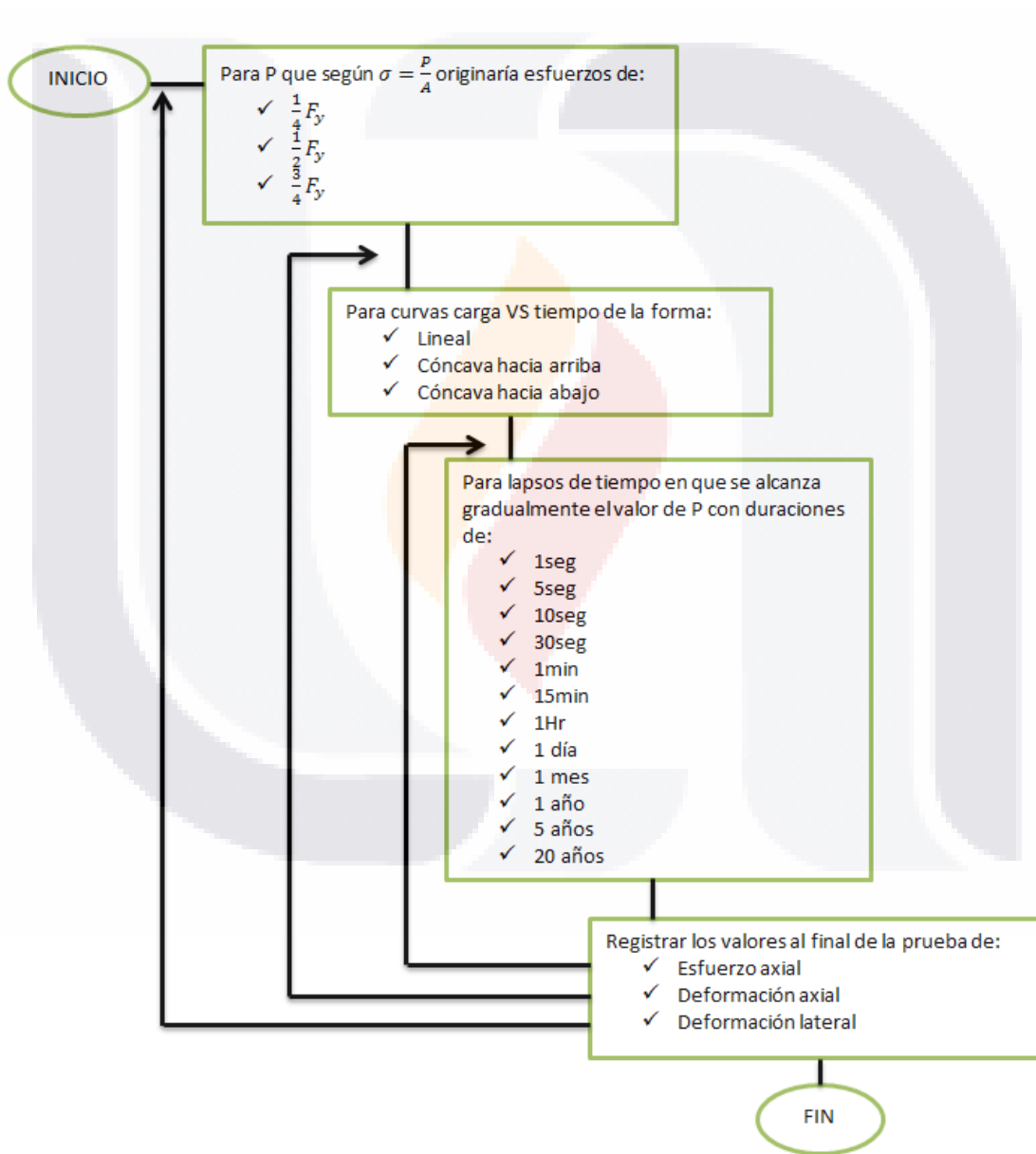


**Imagen 12.- Trayectorias de carga en función del tiempo usadas en los modelos de simulación de probetas de acero sometidas a tensión.**

<sup>1</sup> El valor Fy se considera ser el obtenido a partir de las pruebas experimentales a tensión de las probetas (37.8 KSI=261MPa)

Se registraron los valores de "Esfuerzo axial", "deformación axial" y "deformación lateral" a largo de la prueba para cada una de las velocidades y aceleraciones de la deformación.

Estos resultados han sido graficados a fin de poder visualizar la influencia de la velocidad de aplicación de la carga en el comportamiento de los esfuerzos a lo largo de la prueba.



**Imagen 13.- Diagrama de flujo para simulación de probetas de acero sometidas a tensión con variación de la velocidad de aplicación de carga en software de elementos finitos.**

## 2.2.2. Resultados de Simulaciones

Esfuerzos y Deformaciones con Desarrollo de Carga Lineal Respecto al Tiempo						
Tipo de carga	Esfuerzo teórico	Tiempo (Hr)	Esfuerzo axial (Mpa)	Deformación axial	Deformación lateral	Variación respecto al valor teórico
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	1-s	66.00	0.0003250000	0.0000982000	1.26%
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	5-s	66.00	0.0003250000	0.0000982000	1.26%
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	10-s	66.00	0.0003250000	0.0000982000	1.26%
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	30-s	66.00	0.0003250000	0.0000982000	1.26%
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	1-Min	66.00	0.0003250000	0.0000982000	1.26%
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	15-Min	65.80	0.0003240000	0.0000980000	0.95%
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	1-Hr	65.80	0.0003240000	0.0000980000	0.95%
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	1-Día	66.20	0.0003260000	0.0000985000	1.57%
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	1-Mes	66.20	0.0003260000	0.0000986000	1.57%
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	1-Año	66.20	0.0003260000	0.0000986000	1.57%
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	5-Años	66.40	0.0003270000	0.0000988000	1.87%
Lineal	1/4F <sub>y</sub>	20-Años	66.50	0.0003270000	0.0000990000	2.03%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	1-s	131.90	0.0006492000	0.0001965000	1.18%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	5-s	131.90	0.0006492000	0.0001965000	1.18%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	10-s	131.90	0.0006492000	0.0001965000	1.18%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	30-s	131.90	0.0006492000	0.0001965000	1.18%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	1-Min	131.90	0.0006492000	0.0001965000	1.18%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	15-Min	131.70	0.0006480000	0.0001961000	1.03%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	1-Hr	131.70	0.0006480000	0.0001961000	1.03%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	1-Día	132.30	0.0006511000	0.0001970000	1.49%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	1-Mes	132.50	0.0006519000	0.0001973000	1.64%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	1-Año	132.50	0.0006519000	0.0001973000	1.64%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	5-Años	132.70	0.0006532000	0.0001977000	1.80%
Lineal	1/2F <sub>y</sub>	20-Años	133.00	0.0006545000	0.0001981000	2.03%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	1-s	198.00	0.0009740000	0.0002950000	1.26%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	5-s	197.90	0.0009738000	0.0002947000	1.21%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	10-s	197.90	0.0009738000	0.0002947000	1.21%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	30-s	197.90	0.0009738000	0.0002947000	1.21%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	1-Min	197.90	0.0009738000	0.0002947000	1.21%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	15-Min	197.50	0.0009720000	0.0002941000	1.00%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	1-Hr	197.50	0.0009720000	0.0002941000	1.00%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	1-Día	198.50	0.0009767000	0.0002956000	1.52%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	1-Mes	198.70	0.0009778000	0.0002959000	1.62%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	1-Año	198.70	0.0009778000	0.0002959000	1.62%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	5-Años	199.10	0.0009797000	0.0002965000	1.82%
Lineal	3/4F <sub>y</sub>	20-Años	199.50	0.0009818000	0.0002971000	2.03%

**Tabla 1.- Resultados de esfuerzos y deformaciones en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente de forma lineal.**

Esfuerzos y Deformaciones con Desarrollo de Carga Cóncava Ascendente Respecto al Tiempo						
Tipo de carga	Esfuerzo teórico	Tiempo (Hr)	Esfuerzo axial (Mpa)	Deformación axial	Deformación lateral	Variación respecto al valor teórico
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	1-s	63.80	0.0003140000	0.0000951000	-2.12%
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	5-s	63.80	0.0003140000	0.0000951000	-2.12%
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	10-s	63.80	0.0003140000	0.0000951000	-2.12%
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	30-s	63.80	0.0003140000	0.0000951000	-2.12%
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	1-Min	63.80	0.0003140000	0.0000951000	-2.12%
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	15-Min	64.70	0.0003180000	0.0000963000	-0.73%
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	1-Hr	64.70	0.0003180000	0.0000963000	-0.73%
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	1-Día	65.40	0.0003220000	0.0000974000	0.34%
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	1-Mes	65.60	0.0003230000	0.0000977000	0.65%
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	1-Año	65.60	0.0003230000	0.0000977000	0.65%
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	5-Años	66.00	0.0003250000	0.0000983000	1.26%
Cóncava hacia arriba	1/4F <sub>y</sub>	20-Años	66.40	0.0003270000	0.0000989000	1.87%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	1-s	127.70	0.0006282000	0.0001901000	-2.04%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	5-s	127.70	0.0006282000	0.0001901000	-2.04%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	10-s	127.70	0.0006282000	0.0001901000	-2.04%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	30-s	127.70	0.0006282000	0.0001901000	-2.04%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	1-Min	127.70	0.0006282000	0.0001901000	-2.04%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	15-Min	129.40	0.0006368000	0.0001927000	-0.73%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	1-Hr	129.40	0.0006368000	0.0001927000	-0.73%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	1-Día	130.80	0.0006435000	0.0001947000	0.34%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	1-Mes	131.20	0.0006457000	0.0001954000	0.65%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	1-Año	131.20	0.0006457000	0.0001954000	0.65%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	5-Años	132.00	0.0006490000	0.0001970000	1.26%
Cóncava hacia arriba	1/2F <sub>y</sub>	20-Años	132.80	0.0006534000	0.0001977000	1.87%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	1-s	191.50	0.0009424000	0.0002852000	-2.06%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	5-s	191.50	0.0009424000	0.0002852000	-2.06%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	10-s	191.50	0.0009424000	0.0002852000	-2.06%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	30-s	191.50	0.0009424000	0.0002852000	-2.06%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	1-Min	191.50	0.0009424000	0.0002852000	-2.06%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	15-Min	194.10	0.0009552000	0.0002890000	-0.73%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	1-Hr	194.10	0.0009552000	0.0002890000	-0.73%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	1-Día	196.10	0.0009652000	0.0002921000	0.29%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	1-Mes	196.80	0.0009686000	0.0002931000	0.65%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	1-Año	196.80	0.0009686000	0.0002931000	0.65%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	5-Años	198.00	0.0009741000	0.0002948000	1.26%
Cóncava hacia arriba	3/4F <sub>y</sub>	20-Años	199.20	0.0009802000	0.0002966000	1.87%

**Tabla 2.- Resultados de esfuerzos y deformaciones en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente cóncava hacia arriba.**



Esfuerzos y Deformaciones con Desarrollo de Carga Cóncava Descendente Respecto al Tiempo						
Tipo de carga	Esfuerzo teórico	Tiempo (Hr)	Esfuerzo axial (Mpa)	Deformación axial	Deformación lateral	Variación respecto al valor teórico
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	1-s	68.20	0.0003360000	0.0001020000	4.64%
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	5-s	68.20	0.0003360000	0.0001020000	4.64%
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	10-s	68.20	0.0003360000	0.0001020000	4.64%
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	30-s	68.20	0.0003360000	0.0001020000	4.64%
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	1-Min	68.20	0.0003360000	0.0001020000	4.64%
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	15-Min	65.80	0.0003240000	0.0000981000	0.95%
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	1-Hr	65.90	0.0003240000	0.0000981000	1.11%
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	1-Día	66.50	0.0003270000	0.0000990000	2.03%
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	1-Mes	66.50	0.0003270000	0.0000990000	2.03%
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	1-Año	66.50	0.0003270000	0.0000990000	2.03%
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	5-Años	66.50	0.0003270000	0.0000990000	2.03%
Cóncava hacia abajo	1/4F <sub>y</sub>	20-Años	66.50	0.0003270000	0.0000991000	2.03%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	1-s	136.40	0.0006712000	0.0001020000	4.64%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	5-s	136.40	0.0006713000	0.0001020000	4.64%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	10-s	136.40	0.0006713000	0.0001020000	4.64%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	30-s	136.40	0.0006713000	0.0001020000	4.64%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	1-Min	136.40	0.0006712000	0.0001020000	4.64%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	15-Min	131.70	0.0006481000	0.0000981000	1.03%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	1-Hr	131.70	0.0006481000	0.0000981000	1.03%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	1-Día	132.90	0.0006542000	0.0000990000	1.95%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	1-Mes	132.90	0.0006541000	0.0000990000	1.95%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	1-Año	133.00	0.0006540000	0.0000990000	2.03%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	5-Años	133.00	0.0006544000	0.0000990000	2.03%
Cóncava hacia abajo	1/2F <sub>y</sub>	20-Años	133.10	0.0006549000	0.0000991000	2.10%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	1-s	204.60	0.0010070000	0.0003047000	4.64%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	5-s	204.60	0.0010070000	0.0003047000	4.64%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	10-s	204.60	0.0010070000	0.0003047000	4.64%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	30-s	204.60	0.0010070000	0.0003047000	4.64%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	1-Min	204.60	0.0010070000	0.0003047000	4.64%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	15-Min	197.50	0.0009721000	0.0002942000	1.00%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	1-Hr	197.50	0.0009721000	0.0002942000	1.00%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	1-Día	199.40	0.0009813000	0.0002969000	1.98%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	1-Mes	199.40	0.0009811000	0.0002969000	1.98%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	1-Año	199.00	0.0009810000	0.0002970000	1.77%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	5-Años	199.50	0.0009816000	0.0002971000	2.03%
Cóncava hacia abajo	3/4F <sub>y</sub>	20-Años	199.60	0.0009823000	0.0002973000	2.08%

**Tabla 3.- Resultados de esfuerzos y deformaciones en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente cóncava hacia abajo.**

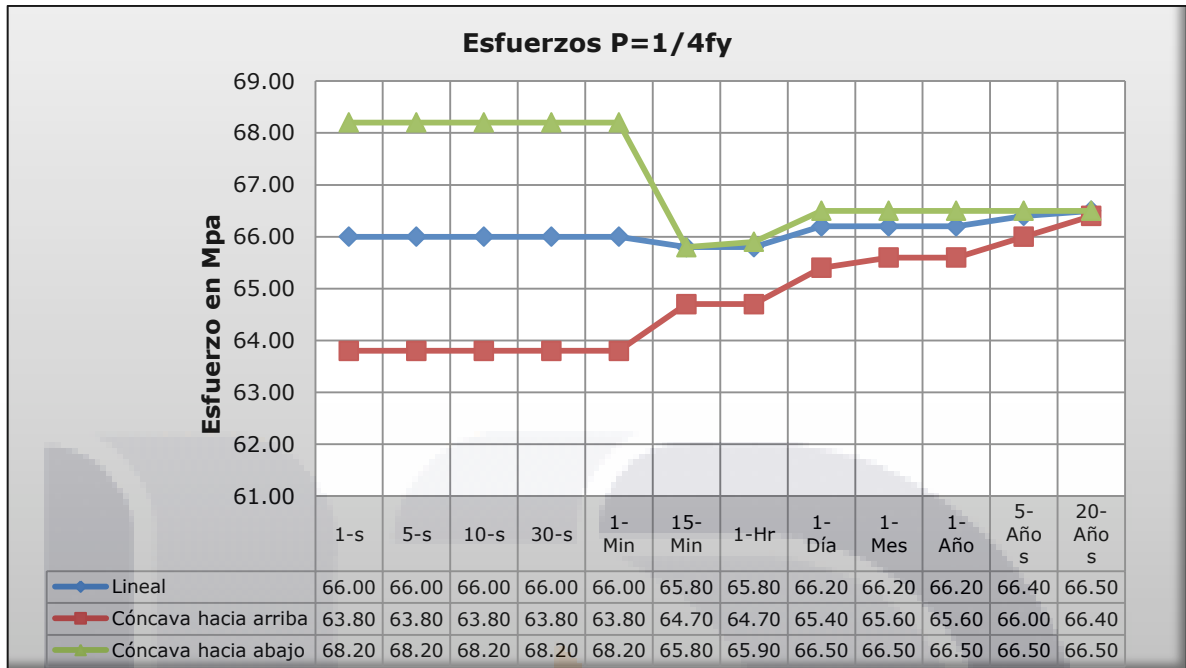


Imagen 14.- Comparación de esfuerzos obtenidos en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente de formas: lineal, cóncava ascendente, y cóncava descendente, para diferentes tiempos de duración hasta alcanzar un esfuerzo de un cuarto de fy.

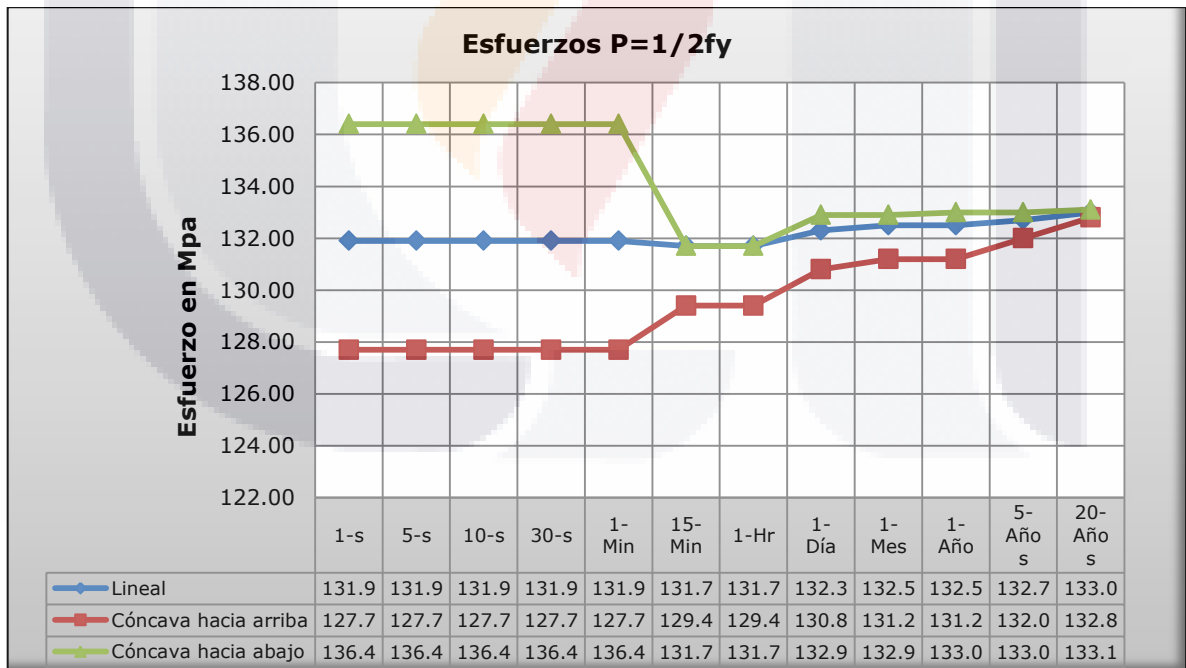
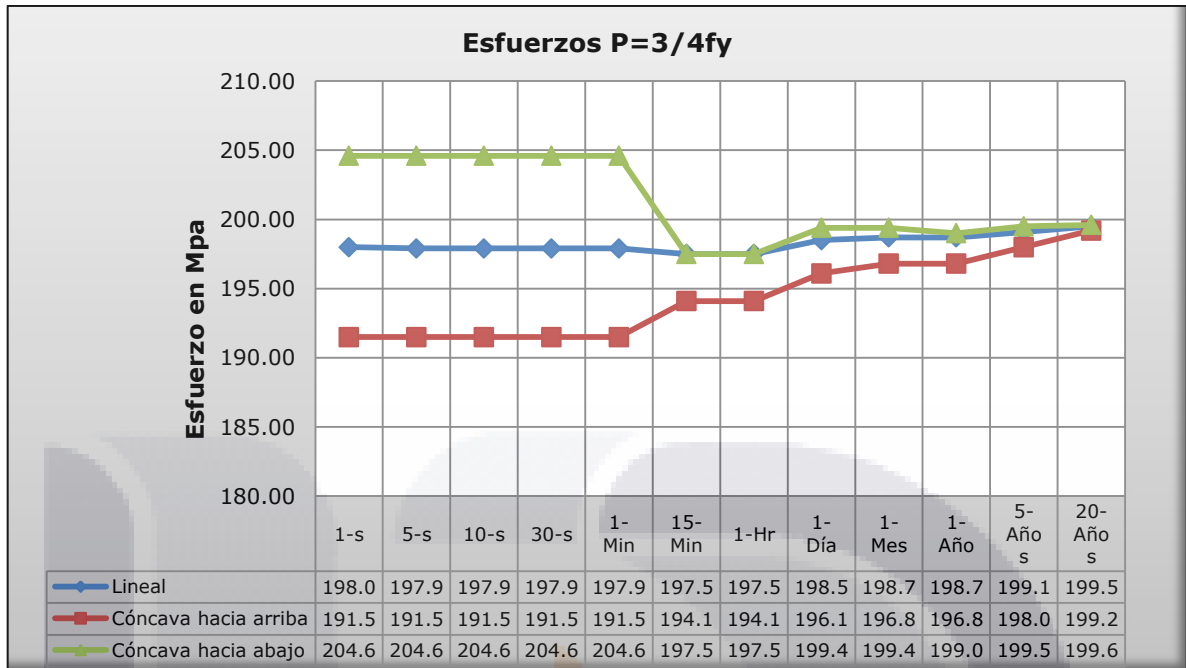


Imagen 15.- Comparación de esfuerzos obtenidos en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente de formas: lineal, cóncava ascendente, y cóncava descendente, para diferentes tiempos de duración hasta alcanzar un esfuerzo de la mitad de fy.



**Imagen 16.- Comparación de esfuerzos obtenidos en simulaciones de pruebas a tensión, realizadas a probetas de acero mediante software de elementos finitos con patrón de carga ascendente de formas: lineal, cóncava ascendente, y cóncava descendente, para diferentes tiempos de duración hasta alcanzar un esfuerzo de tres cuartos de fy.**

A partir de los gráficos se observa que la forma de los mismos resulta ser prácticamente igual, lo cual indica que la proporción en que ocurren los esfuerzos y deformaciones se conserva, por lo que se puede decir entonces que el fenómeno de la variación respecto al tiempo no se traduce en una irregularidad que altera de alguna manera las variables que intervienen el proceso del desarrollo de esfuerzos, sino que es el tiempo y la forma en que se consigue alcanzar una cierta carga a lo largo de éste que se consigue como tal la variación respecto a los valores teóricos, conservándose la proporcionalidad entre deformación lateral y deformación axial, y la paridad entre el esfuerzo y la deformación.

Lo anterior encuentra como analogía más cercana la *curva de compresibilidad* de los suelos, en la que se distingue un valor de carga de pre consolidación PC que el suelo podrá ser capaz de resistir sin problemas la próxima ocasión que sea puesto a trabajar. A su vez es el tiempo quien determina la pauta para que los vacíos y porosidades aminoren y se

consigan las deformaciones que los llevan hacia un estado más compacto y como tal más resistente.

Si bien la relación que se menciona está lejos de relacionarse con el caso del metal en estudio, es claro que la forma de la curva significa un factor importante, pues se entiende como el tiempo por el cual el material ha estado sometido a la acción de la carga; y las contrastantes diferencias entre los casos cóncavo hacia arriba y cóncavo hacia abajo hablan del efecto que tiene dicha "trayectoria de carga", y es a partir de éste *historial* y consecuentemente del *tiempo* que se puede proponer el término de "trayectoria".

Se propone profundizar un poco más el estudio para lograr establecer factores más seguros que los indicados en el apéndice de este reporte, en los que se considere una extrapolación probabilística que agudice la rigurosidad de los mismos a fin cubrir con una amplia confiabilidad los factores de tiempo y forma de una manera tal que se garantice nunca llegar a sobrepasarlos como en los casos de las cargas accidentales para los diseños por viento y sismo; o los periodos de retorno de las precipitaciones, etc.

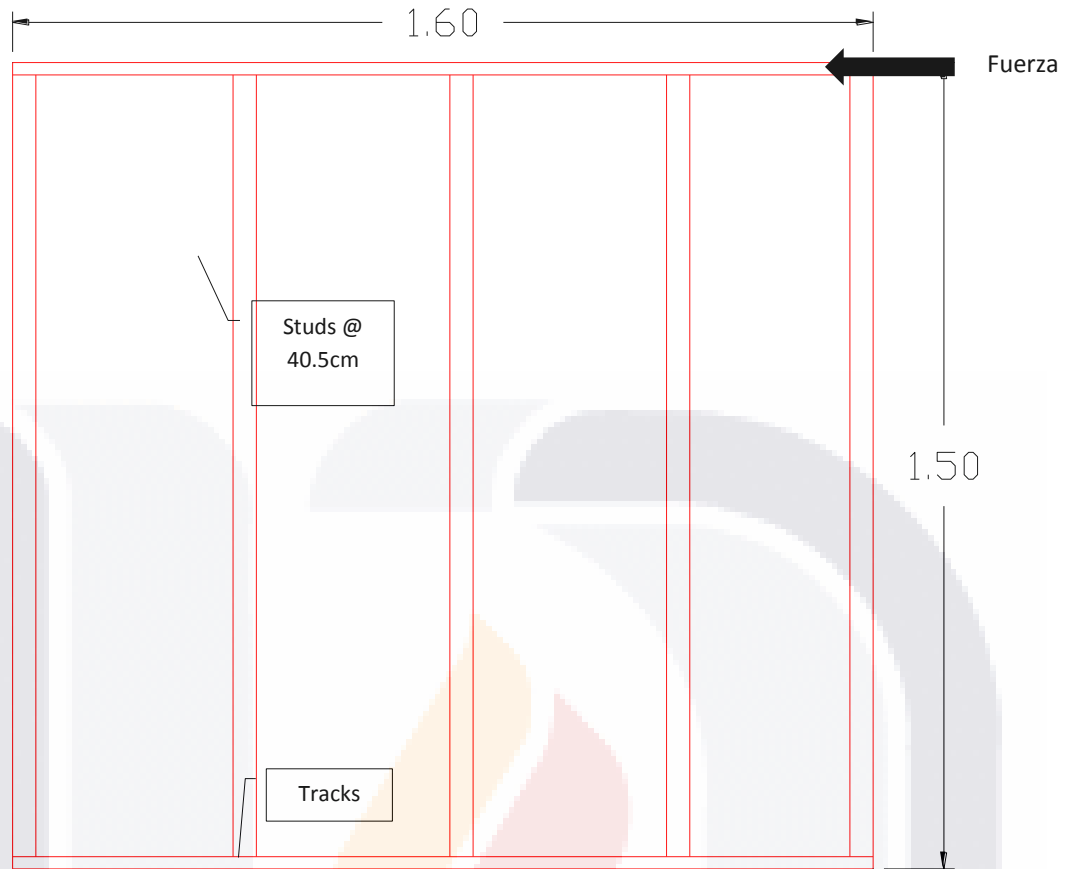
### **3. CAPÍTULO 3 ENSAYE DE PANELES DE MURO CON PERFILES DE ACERO ROLADO EN FRIO ANTE CARGA LATERAL.**

#### **3.1. Objetivo Específico**

Conocer el comportamiento de los paneles de acero rolado en frío cuando se someten a una distorsión angular causada por el efecto de la carga lateral, el cual es análogo al efecto de hundimientos diferenciales, ya que también ocasiona distorsiones angulares en los mismos. Con la realización de estos ensayos se obtendrán los parámetros de rigidez de las conexiones entre perfiles y la colaboración del sistema de recubrimiento o relleno entre perfiles a la rigidez total del panel, necesarios para calibrar los modelos en computadora que se presentan en el Capítulo 5.

#### **3.2. Características de los Paneles**

Los paneles de muro ensayados están formados por 5 studs verticales C88.70x43.20x11.1x0.9 a cada 40.5cm y 1 track horizontal U88.7x22.8x0.70 en la parte superior e inferior y miden 1.60m de largo por 1.50m de alto. Se evaluaron paneles formados solo por los perfiles y otros que además presentan placas de poliestireno de 7.5cm de espesor entre ellos, las cuales sirven como aislante térmico-acústico pero se pretende evaluar su aportación mecánica en el comportamiento del panel.



**Imagen 17.- Características de los paneles a base de perfiles de acero rolado en frío ensayados por carga lateral**

### **3.3. Metodología**

La metodología adoptada para el ensaye de los paneles consiste en:

1. Se montaron los paneles en el marco de pruebas cuidando su alineación y plomeo para evitar excentricidades en la aplicación de la carga lateral.
2. Se colocaron instrumentos de medición en los puntos de interés así como referencias visuales para evaluar la deformación de los paneles en 20 puntos distribuidos uniformemente ( 4 puntos por stud)
3. Se aplicó la carga lateral en una esquina superior del panel de manera gradual de forma apreciablemente continua para cada intervalo de carga de 200 kg.

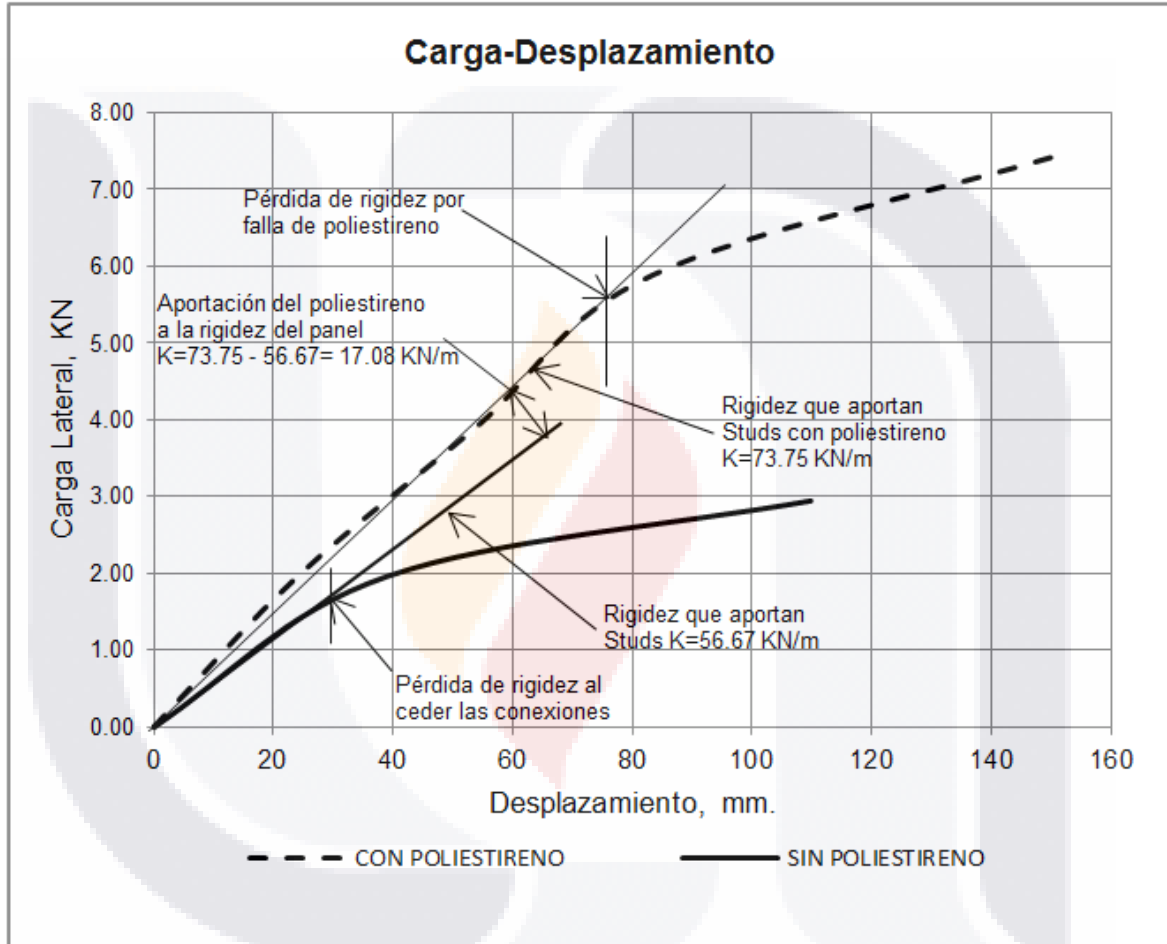
4. Entre cada intervalo de carga se registraron las deformaciones presentadas para cada uno de los 20 puntos analizados en el panel.
  5. Al alcanzar el desplazamiento lateral máximo regido por la capacidad del equipo de aplicación, se procedió con el retiro paulatino de la fuerza lateral de la misma manera en que se aplicó (intervalos de 200kg).
  6. Finalmente se analizan los resultados obtenidos para obtener los datos de interés que sirvieron para la calibración de modelos de computadora que se presentan en el capítulo 5.
- Los ensayos se realizaron para paneles de muro con y sin poliestireno.



**Imagen 18.- Ensaye por carga lateral en panel de muro construido a base de perfiles de acero rolad con placas de poliestireno.**

### 3.4. Análisis de Resultados

En la Imagen 19 se presenta de manera clara y precisa los resultados obtenidos de los ensayos llevados a cabo, las curvas corresponden a la media del comportamiento de los paneles:



**Imagen 19.- Curvas carga-desplazamiento que describen de manera general el comportamiento de los paneles de muro formados por perfiles de acero rolado en frío con y sin placas de poliestireno, sometidos a carga lateral.**

Para los paneles sin poliestireno se puede observar una primer recta de ascenso que representa la rigidez del panel ante la deformación lateral igual a  $K=56.67 \text{ kN/m}$ , posteriormente se presenta la pérdida de rigidez por la cedencia de las conexiones entre track y studs. La segunda pendiente menor



de la curva corresponde a la rigidez deteriorada del panel cuando las conexiones ya cedieron.

Por otro lado, para los **paneles con poliestireno** podemos observar que la presencia de las placas de poliestireno **mejora la rigidez lateral** del panel en un **30%** aproximadamente ( $17.08/56.67=0.3013$ ), permitiendo alcanzar desplazamientos y por tanto deformaciones angulares más grandes, que se traducen en una resistencia y ductilidad mejorada del panel ante las cargas de cortante diagonal, logrando deformaciones hasta un 260% mayores, aun estando en el rango lineal ( $76\text{mm}/29\text{mm}=2.62$ ). Posteriormente viene la pérdida de rigidez por la falla a cortante diagonal de las placas de poliestireno, obsérvese que la pendiente del segundo tramo de ambas curvas (con y sin poliestireno) tiene pendientes prácticamente iguales, ya que en este momento están trabajando solamente los studs y tracks con sus conexiones ya deterioradas.

De lo anterior, observando la gráfica vemos que la deformación máxima de los paneles con poliestireno en el rango lineal es de 76mm y la altura de los mismos es de 1500mm, por lo que podemos obtener su rigidez angular como el cociente de  $(5.6\text{kN})/(76\text{mm})\times(1500\text{mm})=110.52\text{kN/rad}$ . Y para los paneles sin poliestireno es de  $(1.7\text{kN})/(29\text{mm})\times(1500\text{mm})=87.93\text{kN/rad}$  con lo cual tenemos un **aumento en la rigidez angular** del  $(110.52)/(87.93)=$ **25.70 %** por la presencia del poliestireno.

## **4. CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN DE PANELES DE MURO CON PERFILES DE ACERO ROLADO EN FRIO POR HUNDIMIENTOS DIFERENCIALES.**

### **4.1. Objetivo Específico**

Elaborar modelos de simulación de paneles de muro a partir de los ensayos relativos al capítulo 5, así como retomando varios ensayos realizados por diversos autores: (Xuhong & Yu, 2006), (Chi-Ling, 2011), (Eray & Cagatay, 2012) y (Nithyadharan, 2012). Estos diversos ensayos son calibrados en un modelo de computadora en SAP2000, por su comportamiento ante carga lateral, para después ser sometidos a un hundimiento diferencial mediante Pulldown. El pulldown de manera análoga al Pushover es la técnica que se refiere a jalar una estructura mediante una carga monotónica incremental, de manera que las deformaciones verticales aumenten hasta llegar a un comportamiento no lineal, formándose articulaciones plásticas y eventualmente ocasionando el colapso del panel. A partir de estas simulaciones se evalúa el comportamiento que brindan los paneles ante la distorsión angular que sufren a causa de los hundimientos diferenciales.

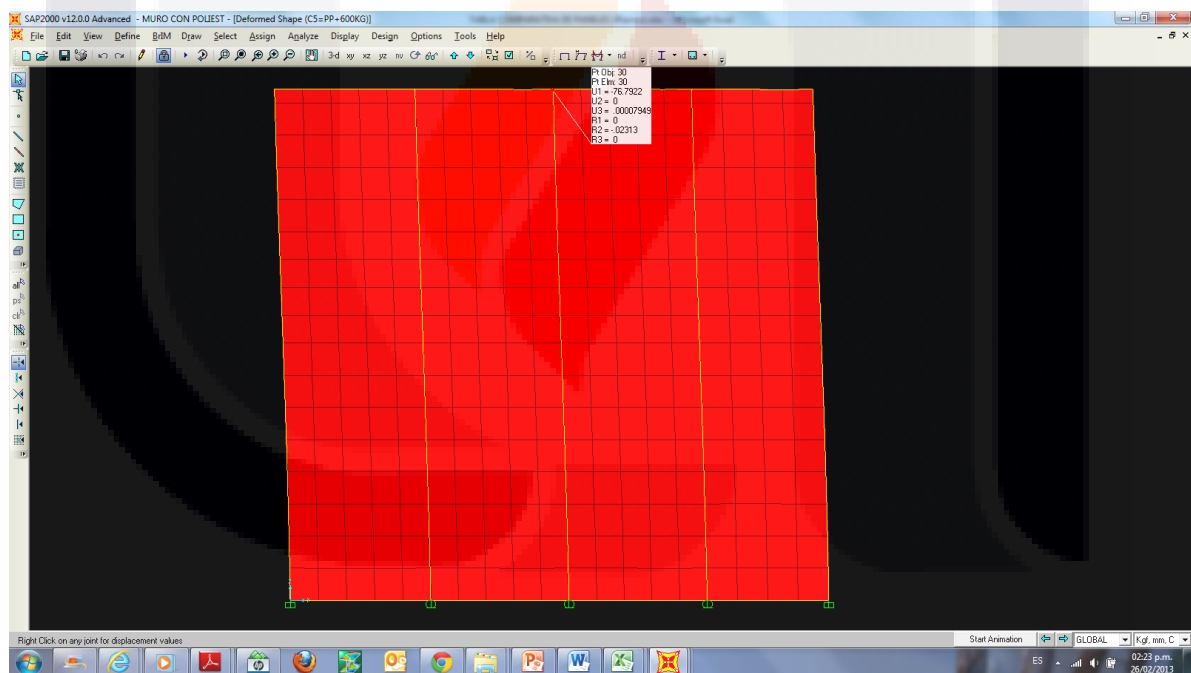
### **4.2. Características de los Modelos**

Los modelos de computadora utilizados para estas simulaciones están formados por elementos tipo barra y tipo área: barra para studs y tracks; y área para recubrimientos ya sea yeso, silicato de calcio, OSB o poliestireno. Los elementos tipo área se discretizaron en tamaños máximos de 10cm. La conectividad entre elementos se considera semirrígida ya que se le asignó un resorte con rigidez rotacional cuyo valor fue obtenido mediante los ensayos del capítulo 4.

### 4.3. Metodología

La metodología adoptada para la simulación paneles consiste en:

1. Elaboración del modelo esquelético de los paneles en el software de elementos finitos.
2. Asignación de propiedades: material, sección, cargas, estados de carga.
3. Calibración de los modelos para asemejar el comportamiento de los paneles ante carga lateral de acuerdo a los ensayos realizados en el capítulo 4 y con las curvas carga-desplazamiento, obtenidas por (Xuhong & Yu, 2006), (Chi-Ling, 2011), (Eray & Cagatay, 2012) y (Nithyadharan, 2012).



**Imagen 20. Modelo de elementos finitos de panel de muro formado por perfiles de acero rolado en frío, el cual se somete a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown.**

4. Asignación de las curvas momento-rotación en los extremos de los studs para simular la formación de articulaciones plásticas.

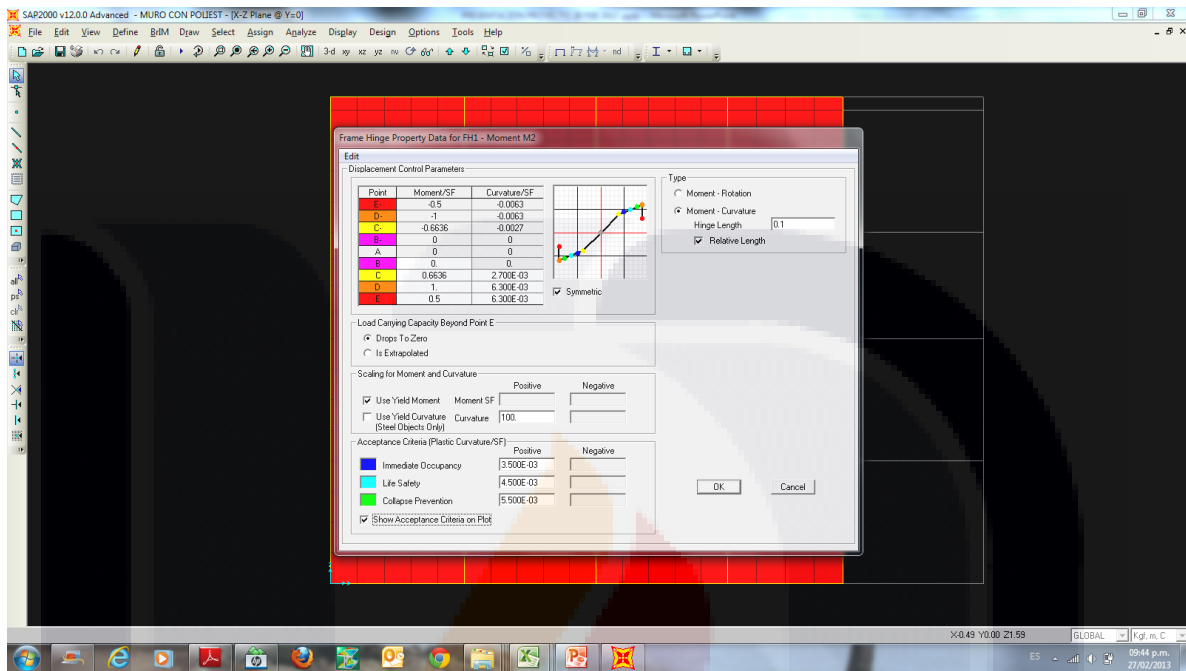
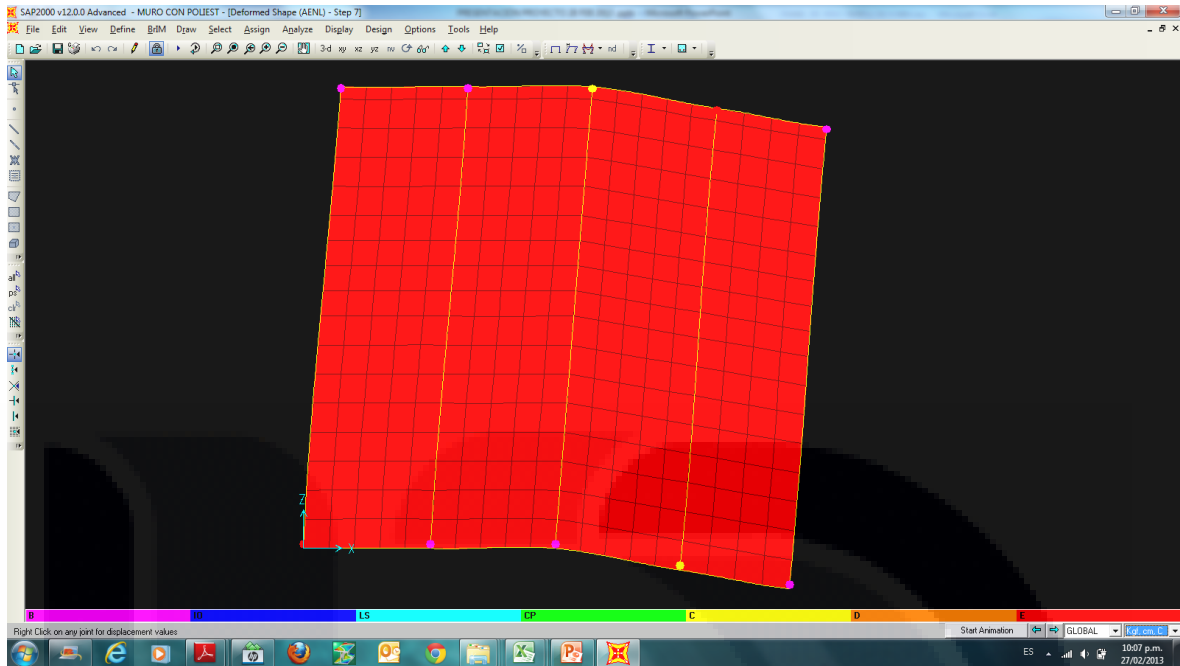


Imagen 21.- Asignación de las curvas Momento- Rotación de las secciones del modelo de elementos finitos de panel de muro formado por perfiles de acero rolando en frio, el cual se somete a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown.

5. Configurar los parámetros del análisis pulldown: desplazamiento máximo, nudo de control, etc.
6. Correr el análisis y recuperar los resultados para procesarlos.



**Imagen 22.- Resultados gráficos que muestran la zona de la curva Momento-Rotación en que se encuentran las secciones del modelo de elementos finitos de panel de muro formado por perfiles de acero rolado en frío, el cual se somete a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown.**

En la siguiente tabla se muestran las características de los paneles de muros tomados de los ensayos realizados por (Xuhong & Yu, 2006), (Chi-Ling, 2011), (Eray & Cagatay, 2012) y (Nithyadharan, 2012). Se consideran 4 tipos de placas de recubrimiento: placas de yeso, de silicato de calcio, de OSB y de Poliestireno.

La columna k1 corresponde a la pendiente de la parte recta de la gráfica partiendo desde el origen y siguiendo la tendencia de la curva hasta donde se tienen fuerzas y desplazamientos proporcionales; es decir, dentro del rango lineal.

Este valor de K1 sirvió para calibrar los modelos de simulación ya que corresponde a la rigidez total del panel ante carga lateral. Por medio de ello se verificaron los modelos para que la fuerza aplicada en ellos correspondiera a los desplazamientos obtenidos en la realidad. De esta manera se consiguieron los modelos representativos, para llevar a cabo la simulación y obtener las curvas características de Momento Flexionante en los Perfiles, asociadas a la distorsión angular del panel.

Lo anterior evaluando el desempeño estructural de los paneles estimando su resistencia y capacidad de deformación, mediante un análisis estático no lineal, y comparando estas capacidades con las demandas en los niveles de desempeño correspondientes.



#	TIPO DE RECUBRIMIENTO	ASPECTO	STUDS-CANAL-SEPARACIÓN	OBSERVACIONES	AUTOR	NOMENCLATURA	M máx	K1 (KN-	P(MAX ) KN	DEFORMACIÓ N (mm)
<b>PANEL DE POLIESTIRENO</b>										
A	PANEL CON POLIESTIRENO	1.60x1.50	C88.70x43.20x11.1x0.9, U88.7x22.8x0.70 , S-	100 mm/200 mm	UAA	UAA C/POL	2.24	31.82	7.46	151.90
B	PANEL SIN POLIESTIRENO	1.60x1.50	C88.70x43.20x11.1x0.9, U88.7x22.8x0.70 , S-	100 mm/200 mm	UAA	UAA S/POL	0.84	22.57	2.94	109.82
<b>PANEL DE YESO</b>										
1	Panel de yeso (Simple)	3 x 2.40 m	C89X44.5X12X1, U92x40x1 S-600mm	Doble stud en extremo	Zhou	SSG	5.40	3,240.0	9.12	55.00
2	Panel de yeso (Doble Y-Osb)	3 x 2.40 m	C89X44.5X12X1, U92x40x1 S-600mm	Doble stud en extremo	Zhou	DSGO	20.9	6,480.0	34.99	60.00
3	Panel de yeso (Simple)9mm	2.40 x 2.40	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-G09-FO	5.76	905.15	16.81	50.00
4	Panel de yeso (Simple)12mm	2.40 x 2.40	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-G12-FO	6.29	864.00	18.48	72.00
5	Panel de yeso (Doble)9mm	2.40 x 2.40	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-G09-FT	9.69	1,039.4	28.55	52.00
6	Panel de yeso (Doble)12mm	2.40 x 2.40	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-G12-FT	12.5	994.31	36.69	78.00
7	Panel de yeso (Doble)12mm	2.40 x 1.20	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-G12-HT	7.35	510.00	12.31	75.00
<b>SILICATO DE CALCIO</b>										
8	Panel S. Calcio (simple) 9	2.40 x 2.40	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-C09-FO	13.7	1,193.1	40.29	38.00
9	Panel S. Calcio (simple) 9	1.22x2.44	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-C09-HO	8.65	504.01	14.41	120.00
1	Panel S. Calcio (simple) 12	2.40 x 2.40	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-C12-FO	14.3	1,193.1	42.60	54.00
1	Panel S. Calcio (doble) 9 mm	1.22x2.44	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-C09-HT	12.5	684.02	21.25	114.00
1	Panel S. Calcio (simple) 12	1.22x2.44	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-C12-H0	8.78	504.01	14.64	120.00
1	Panel S. Calcio (doble) 12	1.20 x 2.40	C100X50X20X1.2, U103x50x1.2 S-600mm	150 mm/300 mm	Nithyadhara	WP-12/M/25A	13.4	1,843.2	28.00	30.00
1	Panel S. Calcio (doble) 10	1.20 x 2.40	C100X50X20X1.2, U103x50x1.2 S-600mm	150 mm/300 mm	Nithyadhara	WP-10/M/25A	11.4	1,843.2	24.00	32.00
1	Panel S. Calcio (doble) 8 mm	1.20 x 2.40	C100X50X20X1.2, U103x50x1.2 S-600mm	150 mm/300 mm	Nithyadhara	WP-08/M/25A	11.0	1,612.8	23.00	30.00
1	Panel S. Calcio (doble) 10	1.20 x 2.40	C100X50X20X1.2, U103x50x1.2 S-600mm	150 mm/300 mm	Nithyadhara	WP-10/M/10A	9.60	1,843.2	20.00	20.00
1	Panel S. Calcio (doble) 10	2p 0.6x2.4	C100X50X20X1.2, U103x50x1.2 S-600mm	150 mm/300 mm	Nithyadhara	WP-10/M/10B	9.12	1,555.2	19.00	34.00
<b>PANEL OSB</b>										
1	Panel OSB (Simple)	3 x 2.40 m	C89X44.5X12X1, U92x40x1 S-600mm	Doble stud en extremo	Zhou	SSO	16.1	4,500.0	26.84	50.00
1	Panel OSB (Simple)9mm	2.40 x 2.40	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-009-FO	15.0	1,110.8	43.86	60.00
2	Panel OSB (Simple)12mm	2.40 x 2.40	C92X65X12X1.6, U95.2x45x1.6 S-400mm	100 mm/200 mm	Chi-Ling	FFM-012-FO	17.0	1,193.1	50.35	78.00
2	Panel OSB (Simple)11mm	1.22 x 2.44	C140X47X12X0.8, U140x47x0.8 S-600mm	Doble stud en extremo	Baran	C140-11-15-E	6.72	220.85	14.50	96.00
2	Panel OSB (Simple)11mm	1.22 x 2.44	C90X47X12X0.8, U90x47x0.8 S-600mm	Doble stud en extremo	Baran	C90-11-15-E	7.20	249.65	14.10	75.00
2	Panel OSB (Simple)11mm	1.22 x 2.44	C90X47X12X0.8, U90x47x0.8 S-600mm	Doble stud en extremo	Baran	C90-11-30-E	4.61	299.54	9.60	50.00
2	Panel OSB (Simple)18mm	1.22 x 2.44	C90X47X12X0.8, U90x47x0.8 S-600mm	Doble stud en extremo	Baran	C90-18-15-E	8.16	345.62	16.00	96.00
2	Panel OSB (Simple)18mm	1.22 x 2.44	C90X47X12X0.8, U90x47x0.8 S-600mm	Doble stud en extremo	Baran	C90-18-30-E	5.76	334.10	12.30	65.00

**Tabla 4.- Características de los paneles sometidos a hundimientos diferenciales mediante análisis pulldown en software de elementos finitos. Los modelos 1 al 25 son retomados de los ensayos realizados por (Xuhong & Yu, 2006), (Chi-Ling, 2011), (Eray & Cagatay, 2012) y (Nithyadharan, 2012).**

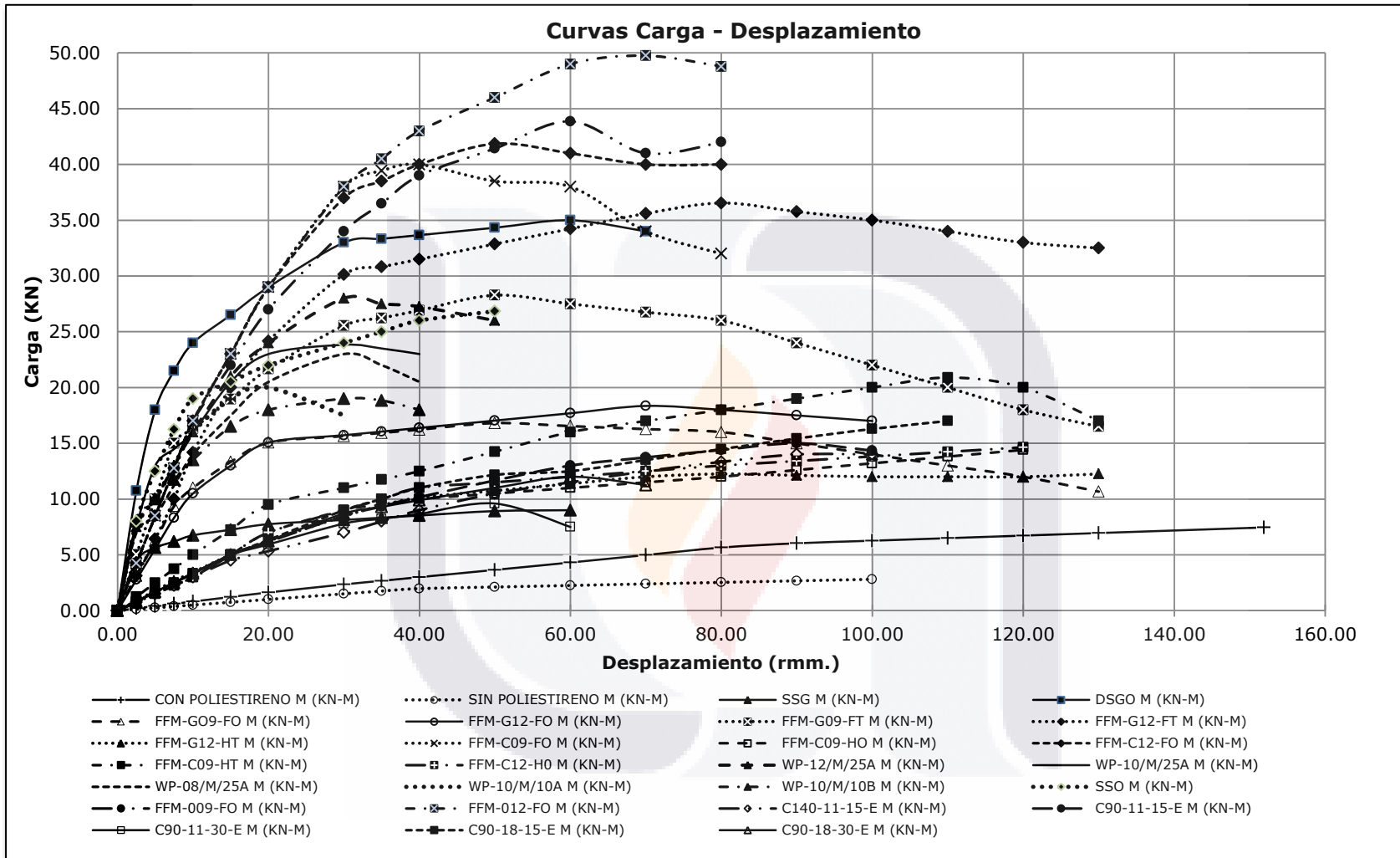
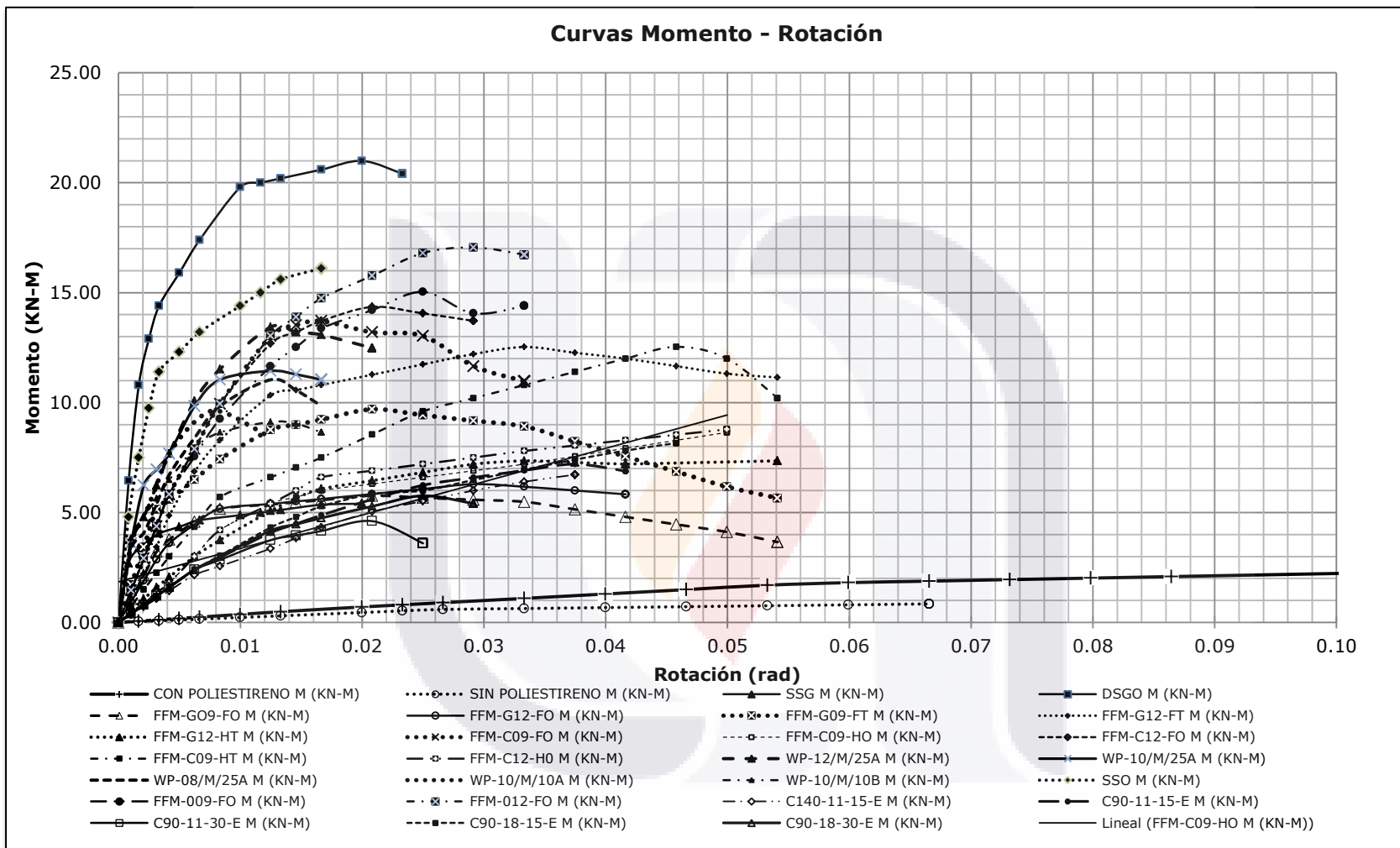


Imagen 23.- Curvas Carga-Desplazamiento Lateral asociadas a los ensayos realizados y a los retomados de varios autores de acuerdo con la Tabla 4.





**Imagen 24. Curvas Momento-Rotación asociadas a los ensayos realizados y a los retomados de varios autores de acuerdo con la Tabla 4 y la Imagen 23.**

#### 4.4. Resultados Obtenidos

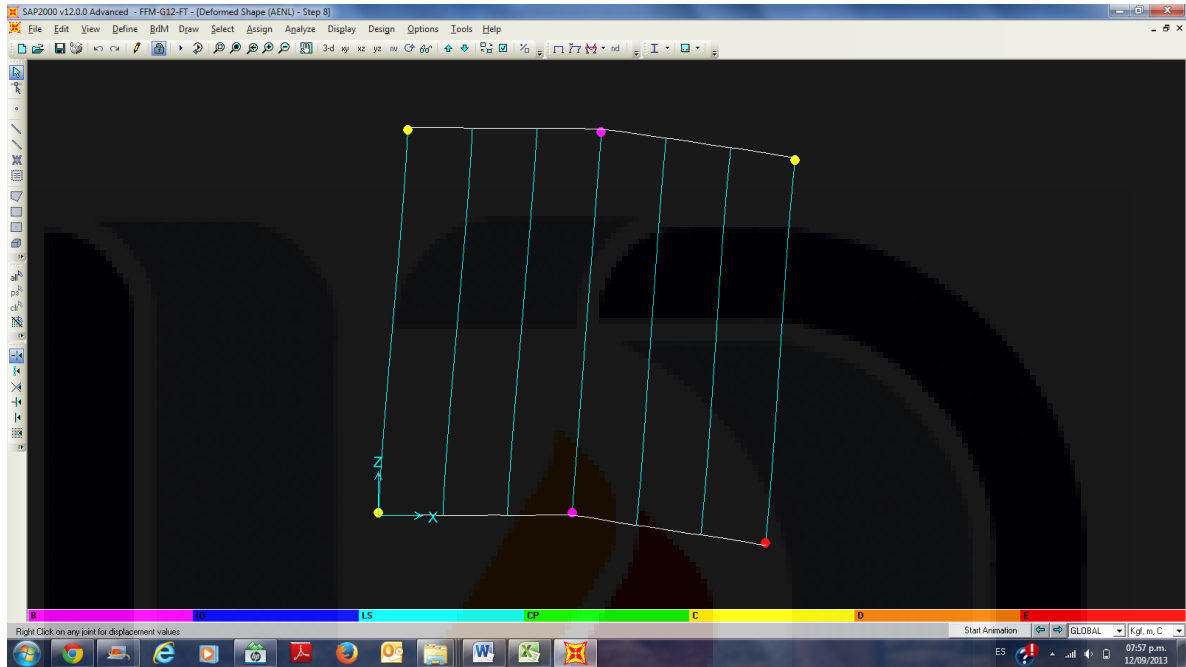
Realizado el análisis estático no lineal en todos los modelos retomados de autores diversos y considerando nuevas variantes de estos modelos (espesor de placas de recubrimiento, diferentes perfiles, etc.) se procedió a filtrar los resultados para su procesamiento.

En la tabla del ANEXO A se concentran los valores obtenidos de los elementos mecánicos y deformaciones que sufren los studs de cada panel en el proceso de pulldown. Para esto se considera como nomenclatura la numeración de los studs de izquierda a derecha, y se muestran los valores del momento flexionante y la rotación de la sección del stud en el extremo superior y extremo inferior, que son las zonas donde se concentran los esfuerzos mayores. De igual forma se muestran los mismos valores de forma relativa al máximo soportado por la sección,  $M_p$  (momento de plastificación, que para este estudio en particular corresponde al momento máximo soportado por la sección antes de su pandeo distorsional, con lo cual estamos dentro del rango de seguridad ya que el pandeo local ocurre a valores del momento ligeramente mayores y solo para casos particulares de esbeltez o condiciones de extremo. Obsérvese que los valores de  $M_p$  y  $M_u$  son iguales ya que la sección no puede alcanzar su Momento Último  $M_u$  porque se presentaría primero una falla distorsional o local)

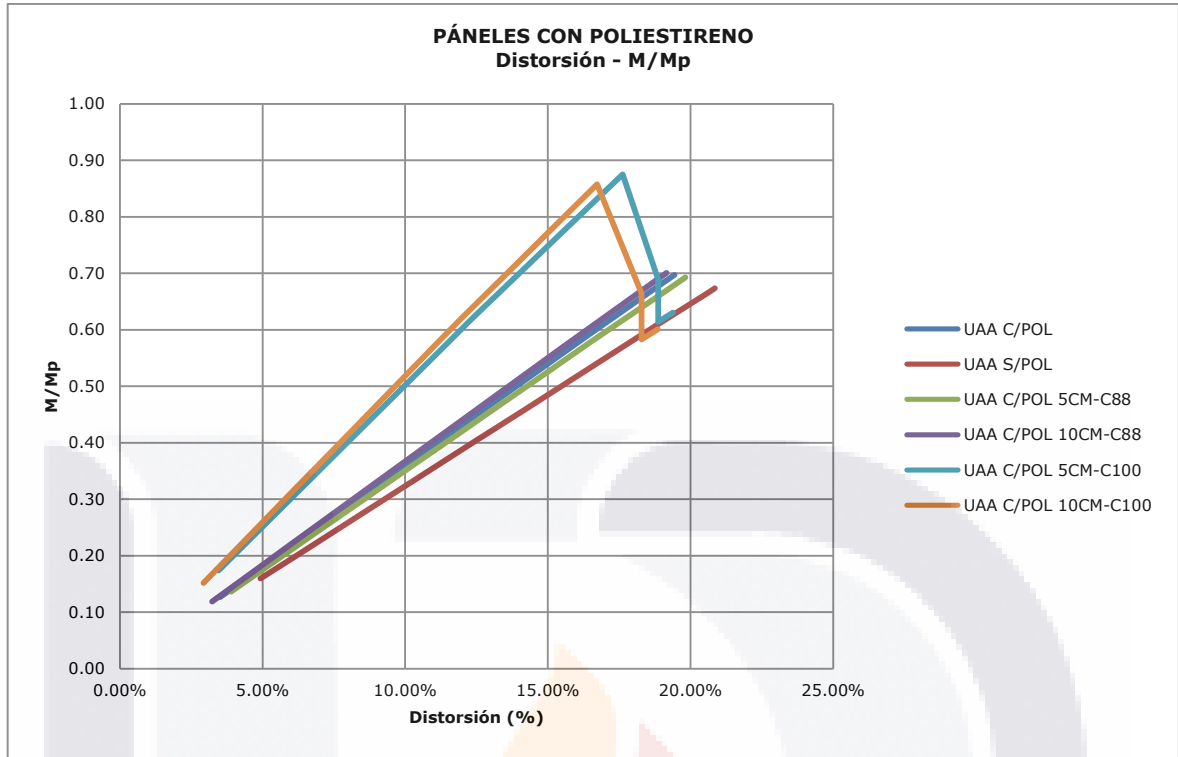
En el caso de la distorsión asociada a cada paso del pulldown o nivel de hundimiento, corresponde al cociente del hundimiento entre la longitud del panel, al tener Distorsión y no Hundimiento; y al tener momento relativo y no absoluto, podemos en un solo gráfico mostrar las diferencias del comportamiento en forma adecuada, ya que al hablar de valores absolutos no podemos comparar paneles de diferentes tamaños o diferentes tipos de perfiles.

En las siguientes gráficas se puede observar el comportamiento que tuvieron los studs durante el ensaye. Los resultados que en las gráficas se muestran corresponden al valor de momento relativo máximo alcanzado en cualquier

perfil del panel para cada nivel de hundimiento expresado como distorsión angular. Resulta importante mencionar que los valores máximos se presentaron normalmente en los studs de los extremos en su parte inferior.

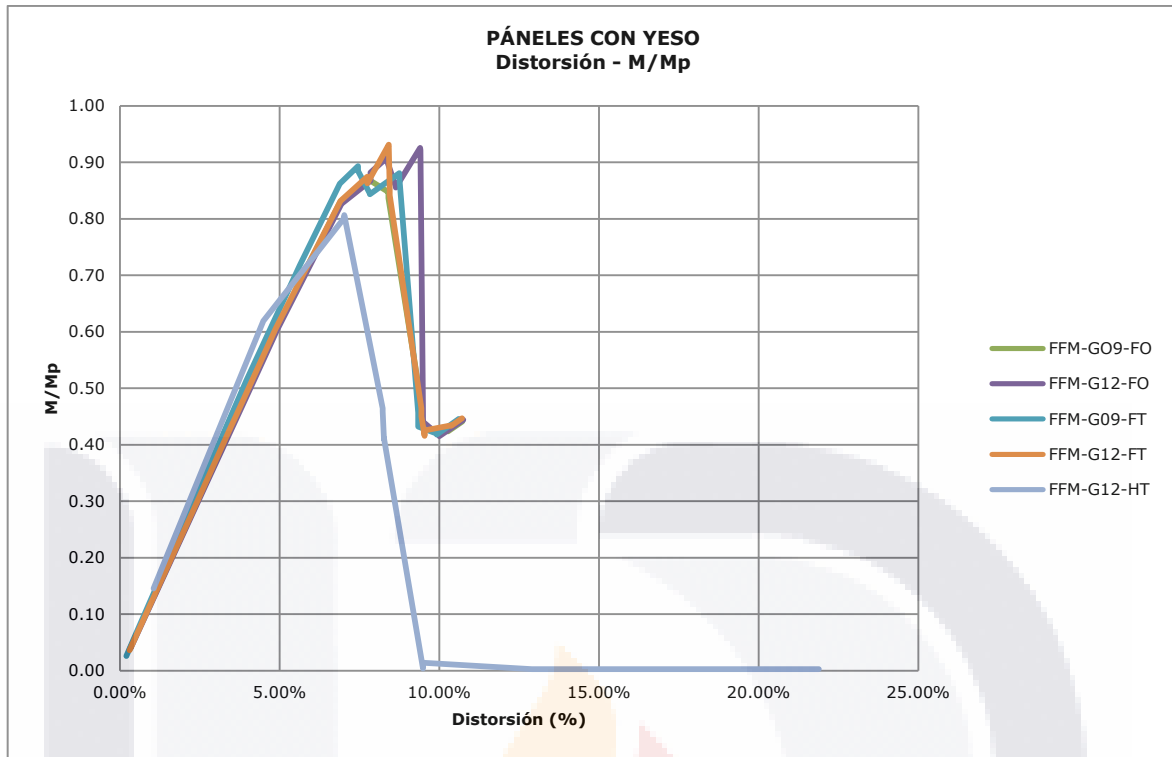


**Imagen 25.- Resultados gráficos que muestran la zona de la curva Momento-Rotación en que se encuentran las secciones del modelo de elementos finitos de panel de muro formado por perfiles de acero rolado en frío, el cual se somete a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown.**



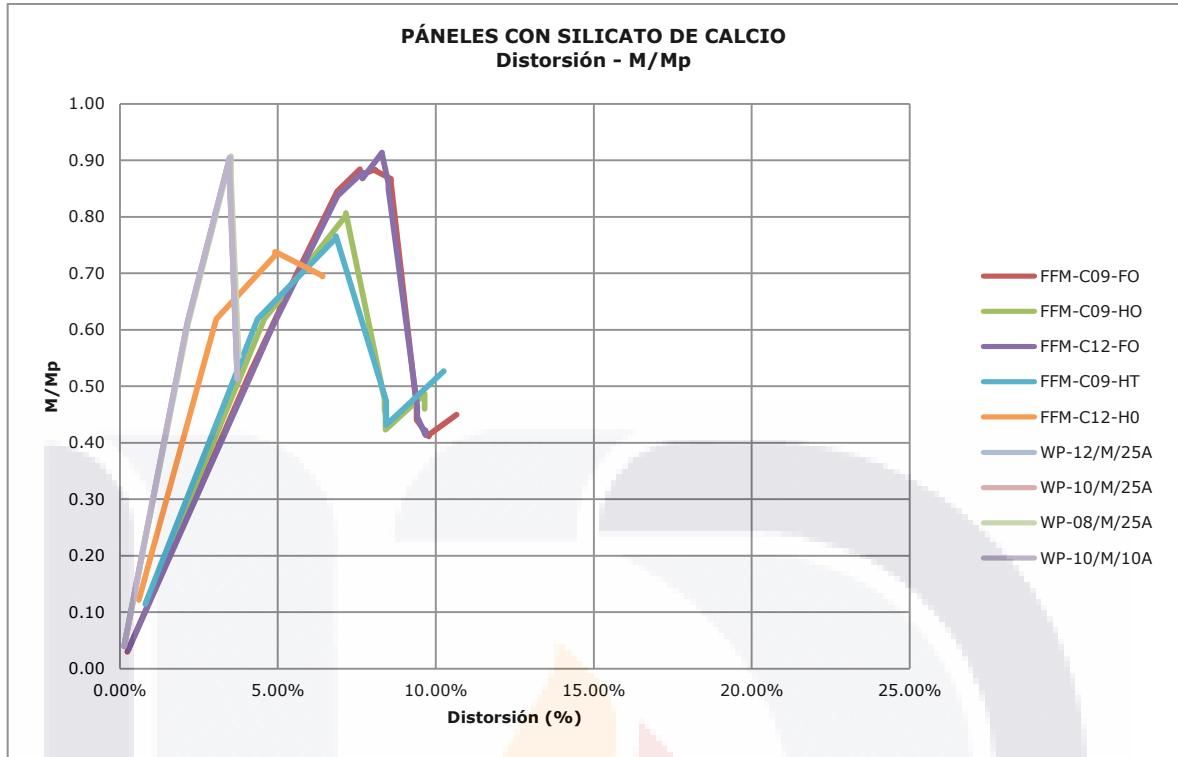
**Imagen 26.- Gráfica Momento Relativo - Distorsión, que describe el comportamiento de los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero rolado en frío con placas de poliestireno, los cuales se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown, la nomenclatura corresponde a los paneles de la Tabla 4.**

Los paneles con poliestireno presentan un comportamiento muy dúctil, con distorsiones laterales de los paneles del 18% aproximadamente con apenas 70% de la capacidad de los perfiles, solo en el caso de dos simulaciones se alcanzan valores del momento relativo de hasta un 85% los cuales corresponden a los paneles elaborados con los perfiles más rígidos



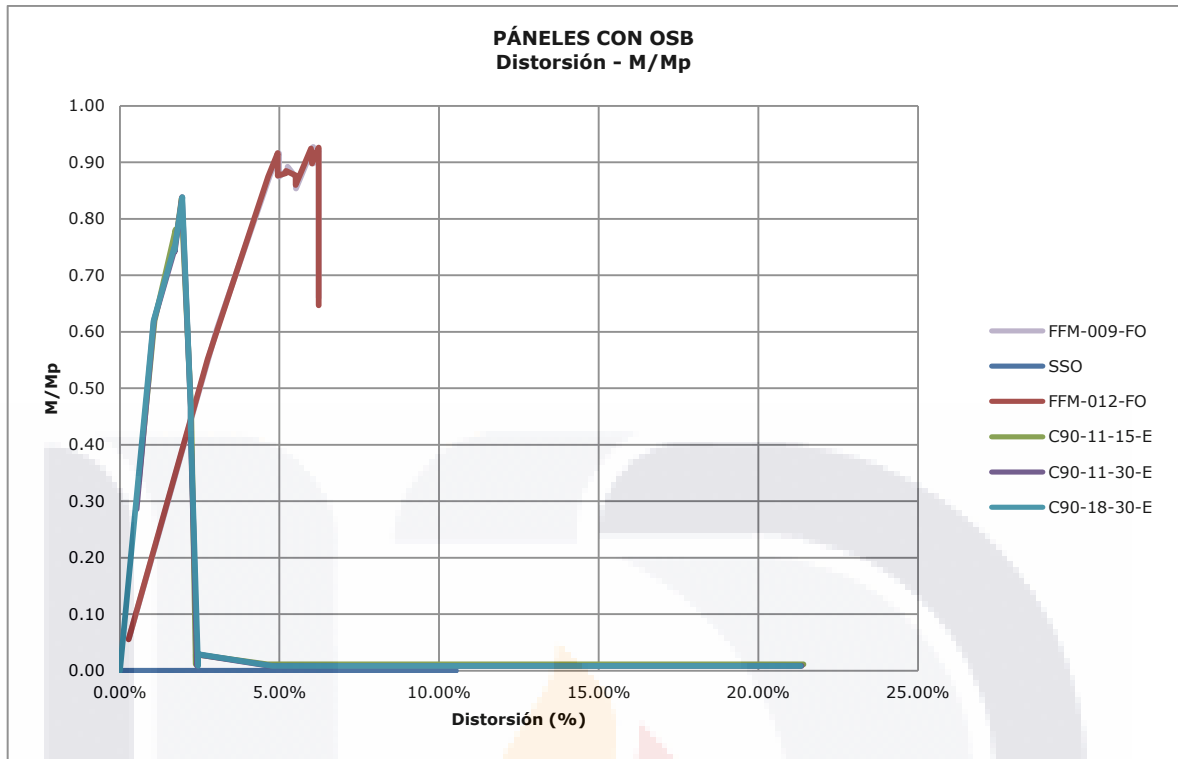
**Imagen 27.- Gráfica Momento Relativo - Distorsión, que describe el comportamiento de los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero rolado en frío con placas de yeso, los cuales se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown, la nomenclatura corresponde a los paneles de la Tabla 4.**

En el caso de los paneles de yeso solo se llega a valores de la distorsión del 8% aproximadamente, ya que se trata de elementos ligeramente más rígidos. Se observa que las diferentes simulaciones tuvieron un comportamiento muy semejante, alcanzando valores del momento relativo del 85%



**Imagen 28.- Gráfica Momento Relativo - Distorsión, que describe el comportamiento de los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero rolado en frío con placas de silicato de calcio, los cuales se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown, la nomenclatura corresponde a los paneles de la Tabla 4.**

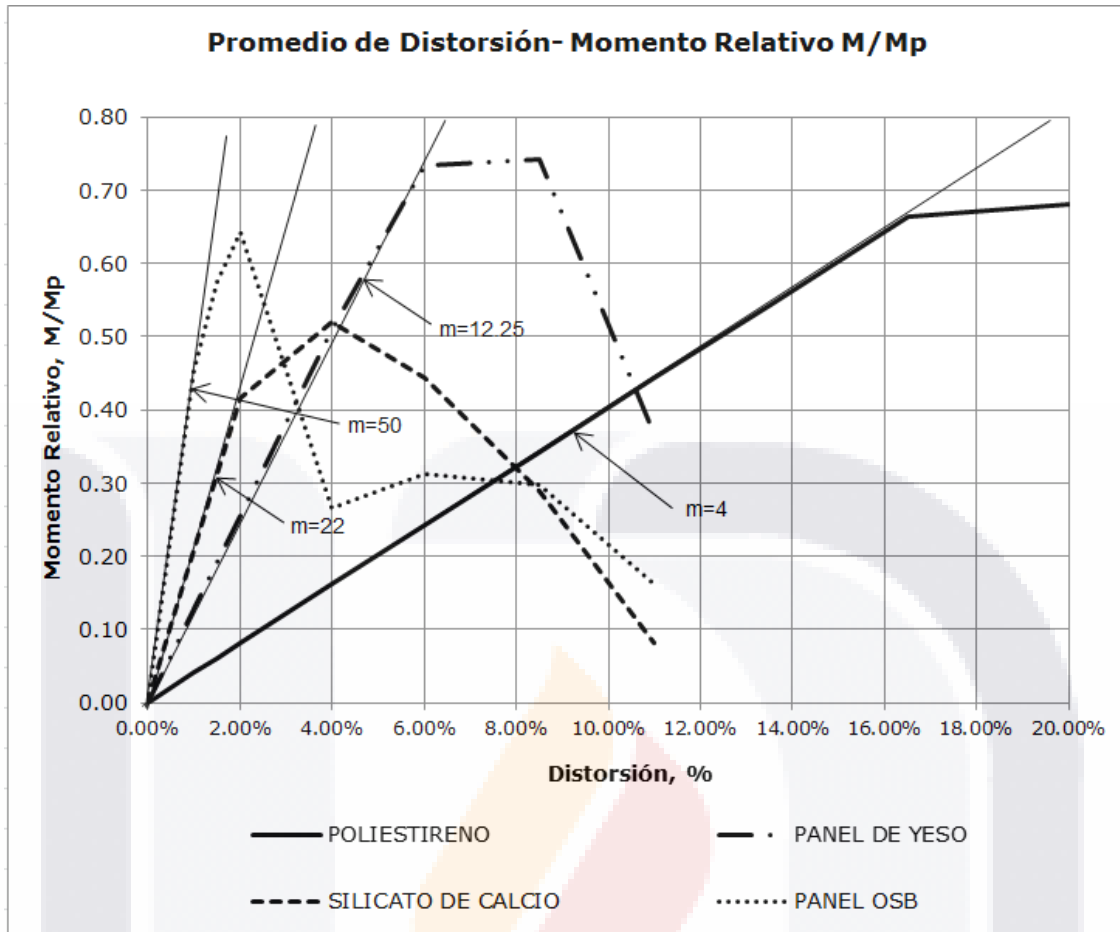
Los paneles con recubrimiento de hojas de silicato de calcio, tienen un comportamiento muy semejante a las de yeso con valores de distorsión del 8% y momento relativo del 80%, solo que en este caso se presenta una dispersión de los datos ligeramente mayor.



**Imagen 29.- Gráfica Momento Relativo - Distorsión, que describe el comportamiento de los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero rolado en frío con placas de OSB, los cuales se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown, la nomenclatura corresponde a los paneles de la Tabla 4.**

Los paneles con recubrimiento de OSB presentan el comportamiento más rígido de los aquí estudiados, la mayoría de los paneles simulados tiene un comportamiento muy parecido, casi igual, con valores de distorsión del 6% y momentos relativos del 90%. Solo una de las simulaciones se salió de la tendencia con valores de rigidez más altos.

Finalmente en la siguiente gráfica resume el comportamiento típico que presentan los paneles ante el efecto de pulldown con cada tipo de recubrimiento.



**Imagen 30.- Gráfica que resume el comportamiento típico que presentan los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero rolado en frío con placas de distintos recubrimientos, los cuales se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown**

Del resultado de estas simulaciones todo apunta nuevamente a que el sistema de perfiles de acero rolado en frío combinado con placas de poliestireno, es el que tiene el comportamiento más dúctil sin comprometer la resistencia propia de la estructura, lo cual nos lleva determinar que de los casos aquí estudiados el más apropiado para implementarse en la construcción sobre terreno agrietados o susceptibles al agrietamiento es este último.



#### 4.5. Curvas de Fragilidad

Las curvas de fragilidad se usarán para determinar la probabilidad de que un determinado sistema de paneles de muros incurrirá en una cantidad dada de daño cuando se somete a una distorsión angular producto de los hundimientos diferenciales.

Se elaboraron en base una **distribución de probabilidad logaritmo normal** cuya función de densidad corresponde a la siguiente expresión:

$$F(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{1}{X} \exp\left(-\frac{(\ln X - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad ; X \geq 0$$

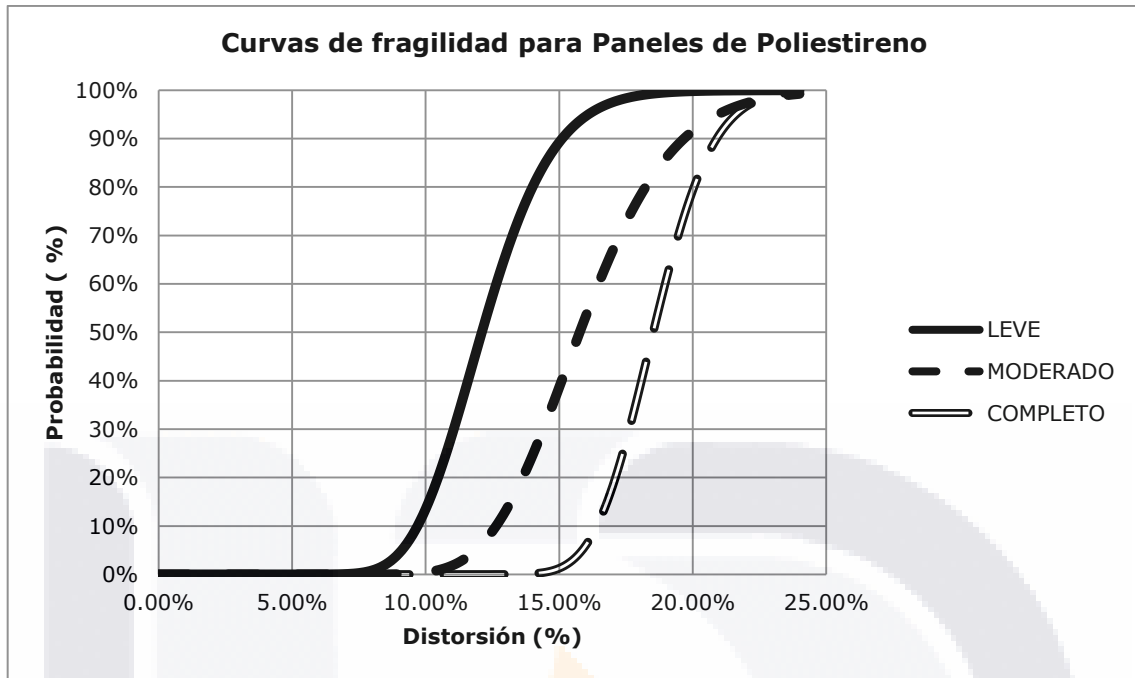
Donde  $\mu$  y  $\sigma$  son la media y la desviación estándar del logaritmo natural de la variable X.

De los resultados del análisis Pulldown se tomaron los valores máximos de momento relativo para cada nivel de distorsión (o nivel de hundimiento) y se determinaron las distorsiones asociadas a 0.5, 0.65 y el máximo momento relativo, los cuales se proponen en este caso como los niveles de daño leve, moderado y completo respectivamente.

Para estos datos se calculó el logaritmo natural y se obtuvieron la media y la desviación estándar considerando por separada cada tipo de panel según su alma o recubrimiento (poliestireno, yeso, silicato de calcio u OSB) y con ello se graficaron las curvas de fragilidad correspondientes mediante la aplicación de la expresión mostrada líneas atrás, como se muestra a continuación:

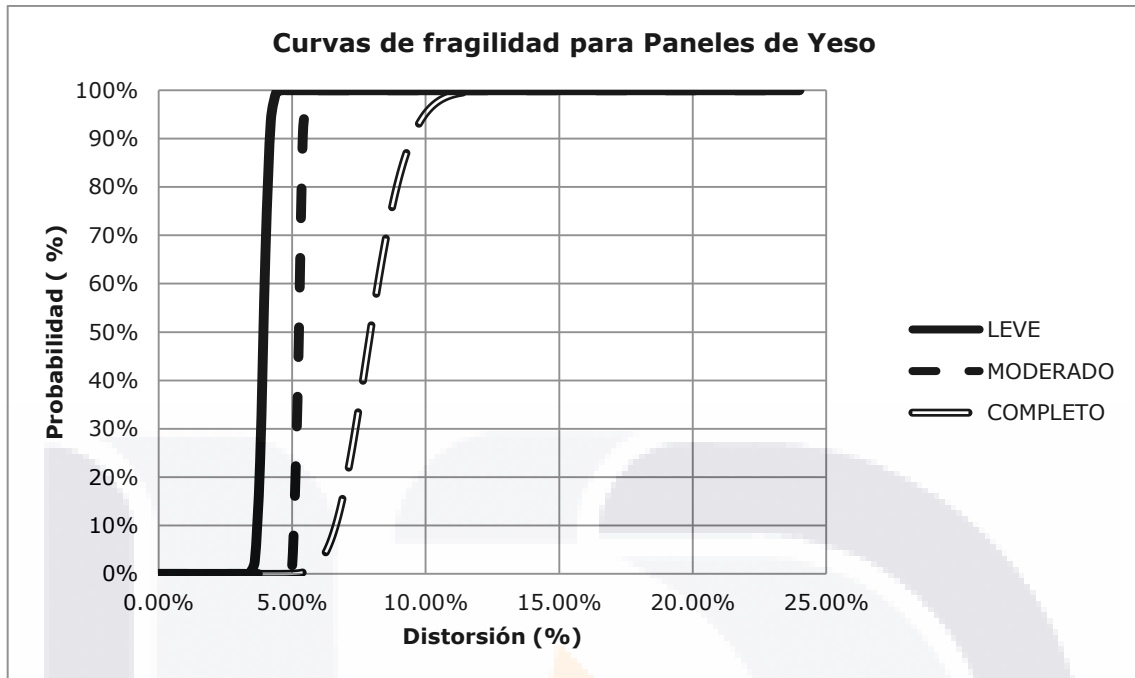
MODELO	% Distorsión asociada a:			Ln(%) Distorsión asociada a:		
	0.5 Mp	0.65 Mp	Mmax/Mp	0.5 Mp	0.65 Mp	Mmax/Mp
<b>PANEL DE POLIESTIRENO</b>						
UAA C/POL	13.90%	18.10%	20.00%	-1.97339	-1.70937	-1.60944
UAA C/POL 5CM-C88	14.27%	18.59%	20.00%	-1.94699	-1.68275	-1.60944
UAA C/POL 10CM-C88	13.63%	17.75%	20.00%	-1.99323	-1.72892	-1.60944
UAA C/POL 5CM-C100	9.96%	12.98%	16.50%	-2.30681	-2.04187	-1.80181
UAA C/POL 10CM-C100	9.65%	12.58%	16.50%	-2.33866	-2.07330	-1.80181
Media ( $\mu$ )	0.123	0.160	0.186	-2.11182	-1.84724	-1.68639
Desviación estándar ( $\sigma$ )	0.020	0.026	0.017	0.17313	0.17266	0.09424
<b>PANEL DE YESO</b>						
FFM-GO9-FO	4.04%	5.32%	8.50%	-3.20817	-2.93312	-2.46510
FFM-G12-FO	4.09%	5.37%	8.50%	-3.19764	-2.92345	-2.46510
FFM-G09-FT	3.86%	5.09%	8.50%	-3.25553	-2.97766	-2.46510
FFM-G12-FT	4.03%	5.31%	8.50%	-3.21074	-2.93520	-2.46510
FFM-G12-HT	3.62%	5.12%	6.00%	-3.31746	-2.97291	-2.81341
Media ( $\mu$ )	0.039	0.052	0.080	-3.23791	-2.94847	-2.53477
Desviación estándar ( $\sigma$ )	0.002	0.001	0.010	0.04446	0.02230	0.13932
<b>SILICATO DE CALCIO</b>						
FFM-C09-FO	3.94%	5.20%	8.50%	-3.23454	-2.95710	-2.46510
FFM-C09-HO	3.69%	5.21%	6.00%	-3.29927	-2.95403	-2.81341
FFM-C12-FO	3.99%	5.26%	8.50%	-3.22158	-2.94468	-2.46510
FFM-C09-HT	3.52%	5.12%	6.00%	-3.34749	-2.97205	-2.81341
FFM-C12-H0	2.70%	3.80%	8.50%	-3.61293	-3.26904	-2.46510
WP-12/M/25A	1.75%	2.27%	2.00%	-4.04625	-3.78358	-3.91202
WP-10/M/25A	1.75%	2.27%	2.00%	-4.04605	-3.78341	-3.91202
WP-08/M/25A	1.77%	4.54%	4.00%	-4.03260	-3.09284	-3.21888
WP-10/M/10A	1.75%	2.27%	2.00%	-4.04638	-3.78374	-3.91202
Media ( $\mu$ )	0.028	0.040	0.053	-3.65412	-3.28227	-3.10856
Desviación estándar ( $\sigma$ )	0.010	0.013	0.027	0.36351	0.36722	0.61148
<b>PANEL OSB</b>						
FFM-009-FO	2.56%	3.38%	6.00%	-3.66502	-3.38594	-2.81341
FFM-012-FO	2.54%	3.37%	6.00%	-3.67206	-3.39055	-2.81341
C90-11-15-E	0.88%	1.27%	2.00%	-4.73656	-4.36960	-3.91202
C90-11-30-E	0.86%	1.26%	2.00%	-4.75437	-4.37355	-3.91202
C90-18-15-E	0.85%	1.26%	2.00%	-4.76730	-4.37343	-3.91202
C90-18-30-E	0.85%	1.26%	2.00%	-4.76386	-4.37286	-3.91202
Media ( $\mu$ )	0.014	0.020	0.033	-4.39320	-4.04432	-3.54582
Desviación estándar ( $\sigma$ )	0.008	0.010	0.019	0.51251	0.46392	0.51789

**Tabla 5.- Distorsión asociada a cada nivel de daño obtenido del análisis pulldown del ANEXO A y valor de su logaritmo natural, media y desviación estándar para la obtención de las curvas de fragilidad.**



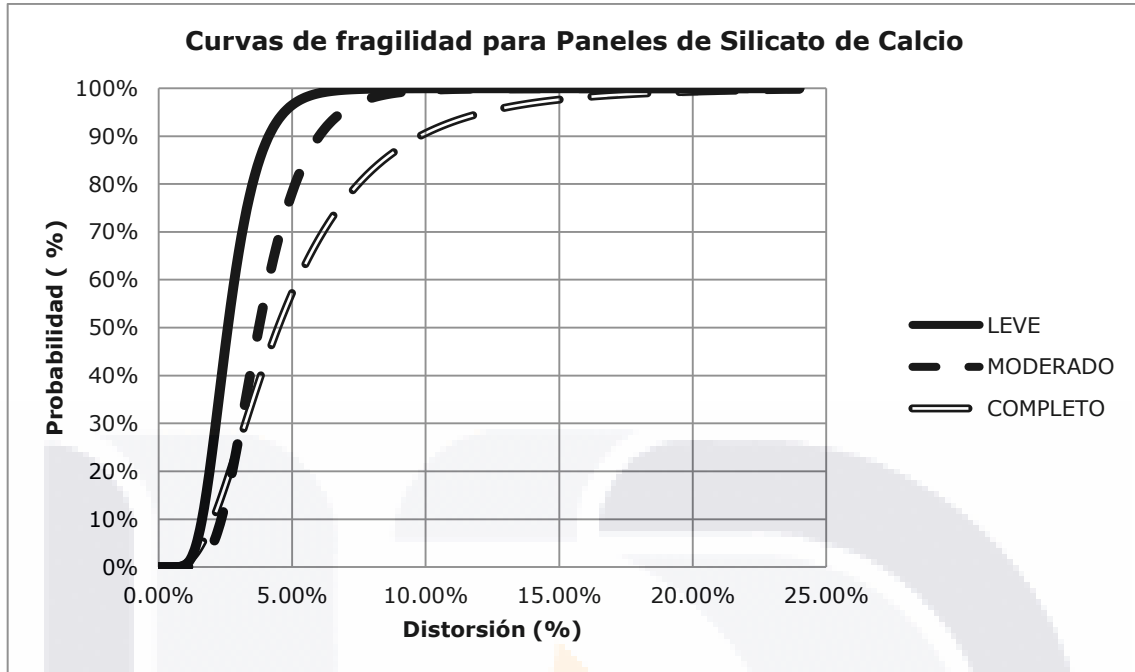
**Imagen 31.- Curvas de fragilidad para paneles de estructura de perfiles de acero rolando en frío con alma de placas de poliestireno. Muestran la probabilidad de que se incurra en una cantidad de daño cuando el panel es sometido a distorsión angular producto de hundimientos diferenciales.**

En las curvas de fragilidad para paneles de poliestireno se puede observar que son capaces de soportar distorsiones angulares de hasta un 7.5% con probabilidad de daño prácticamente nula ya que se trata de un sistema muy dúctil; los daños moderados comienzan a presentarse en distorsiones del 10% y los daños completos en distorsiones del 14% con probabilidades muy bajas. Las probabilidades de daño por encima del 90% se presentan en distorsiones angulares del 15% para daño leve; 19% para daño moderado y 21% para daños completos. Los niveles de daño están asociados a la relación entre el momento flexionante actuante y el momento plástico: 0.5, 0.65 y Max para daños leves, moderados y completos respectivamente.



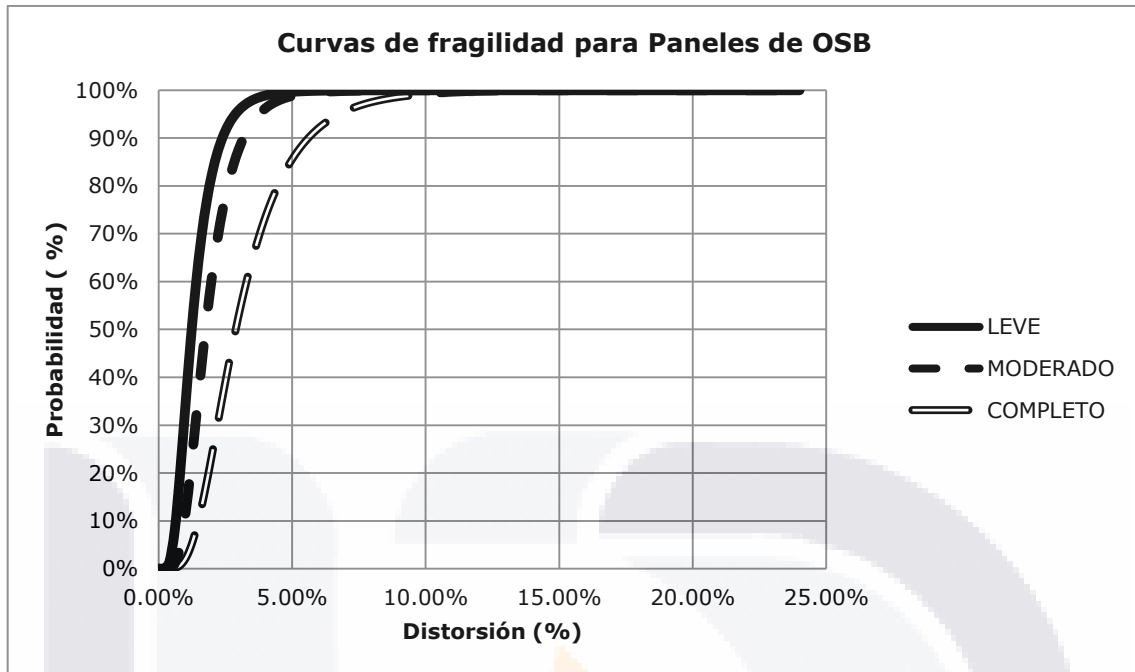
**Imagen 32.- Curvas de fragilidad para paneles de estructura de perfiles de acero rolando en frío con placas de yeso. Muestran la probabilidad de que se incurra en una cantidad de daño cuando el panel es sometido a distorsión angular producto de hundimientos diferenciales.**

En las curvas de fragilidad para paneles con placas de yeso se puede observar que son capaces de soportar distorsiones angulares de hasta un 3.5% con probabilidad de daño prácticamente nula; los daños moderados comienzan a presentarse en distorsiones del 5% y los daños completos en distorsiones del 6% con probabilidades muy bajas. Las probabilidades de daño por encima del 90% se presentan en distorsiones angulares del 4% para daño leve; 5.5% para daño moderado y 9% para daños completos. Los niveles de daño están asociados a la relación entre el momento flexionante actuante y el momento plástico: 0.5, 0.65 y Max para daños leves, moderados y completos respectivamente.



**Imagen 33.- Curvas de fragilidad para paneles de estructura de perfiles de acero rolado en frío con placas de silicato de calcio. Muestran la probabilidad de que se incurra en una cantidad de daño cuando el panel es sometido a distorsión angular producto de hundimientos diferenciales.**

En las curvas de fragilidad para paneles con placas de silicato de calcio se puede observar que son capaces de soportar distorsiones angulares de hasta un 1.5% con probabilidad de daño prácticamente nula; los daños moderados comienzan a presentarse en distorsiones del 2% y los daños completos en distorsiones del 2.5% con probabilidades muy bajas. Las probabilidades de daño por encima del 90% se presentan en distorsiones angulares del 4% para daño leve; 6% para daño moderado y 10% para daños completos. Los niveles de daño están asociados a la relación entre el momento flexionante actuante y el momento plástico: 0.5, 0.65 y Max para daños leves, moderados y completos respectivamente.



**Imagen 34.- Curvas de fragilidad para paneles de estructura de perfiles de acero rolado en frío con placas de OSB. Muestran la probabilidad de que se incurra en una cantidad de daño cuando el panel es sometido a distorsión angular producto de hundimientos diferenciales.**

En las curvas de fragilidad para paneles con placas de OSB se puede observar que son capaces de soportar distorsiones angulares de solo un 0.5% con probabilidad de daño prácticamente nula ya que se trata de un sistema más rígido respecto a los anteriores; los daños moderados comienzan a presentarse en distorsiones del 0.75% y los daños completos en distorsiones del 1% con probabilidades muy bajas. Las probabilidades de daño por encima del 90% se presentan en distorsiones angulares del 2.5% para daño leve; 3% para daño moderado y 6% para daños completos. Los niveles de daño están asociados a la relación entre el momento flexionante actuante y el momento plástico: 0.5, 0.65 y Max para daños leves, moderados y completos respectivamente.

## **5. CAPITULO 5 SIMULACIÓN Y ENSAYE DE VIVIENDA TIPO A ESCALA REAL, ESTRUCTURADA CON PERFILES DE ACERO ROLADO EN FRIO**

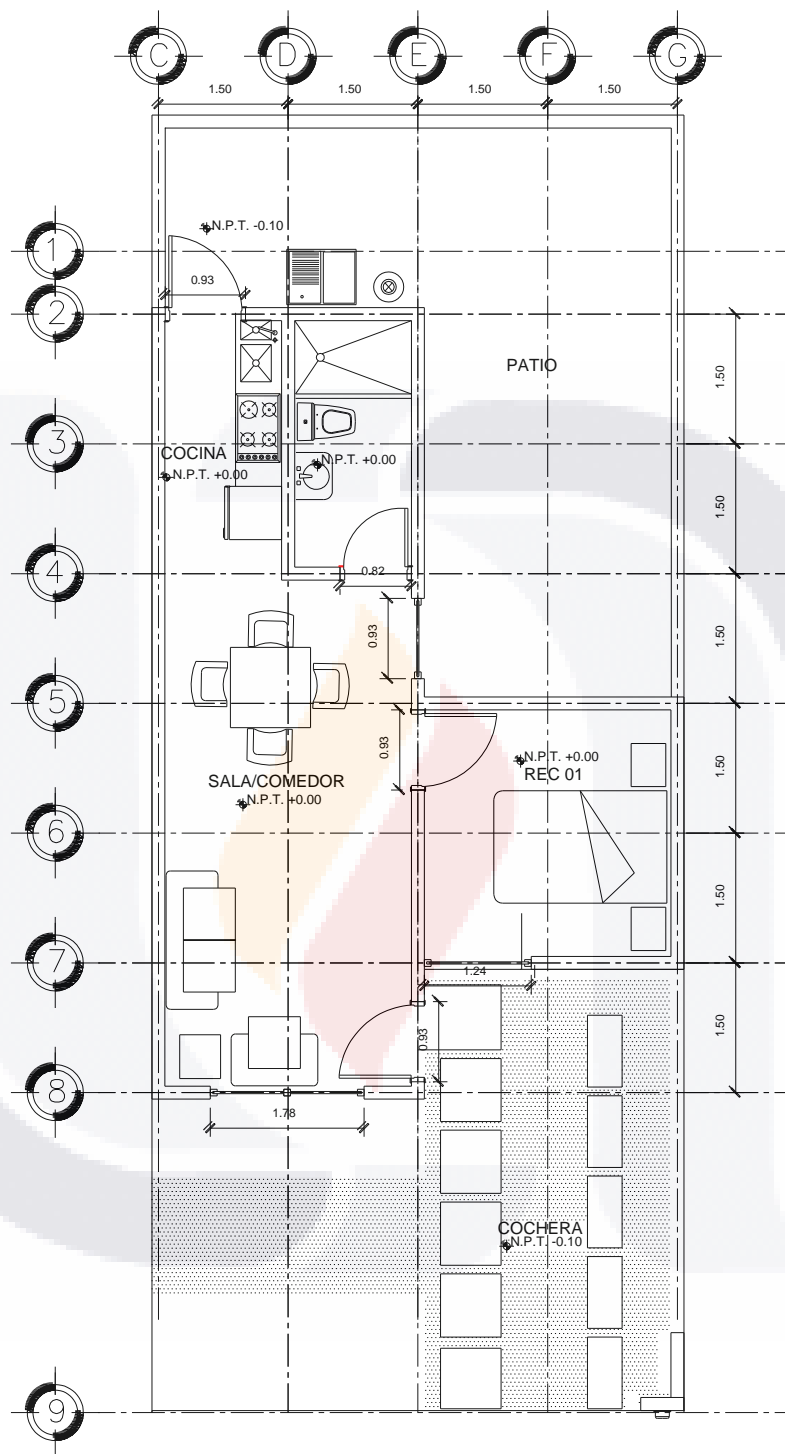
### **5.1. Objetivo**

Se pretende evaluar el comportamiento estructural del prototipo de vivienda sometido a hundimientos diferenciales característicos del fenómeno de la subsidencia. Para ello se hará de manera previa una simulación en software de elementos finitos, en el cual se someterá la estructura a un análisis estructural estático no lineal mediante la técnica de Pulldown considerando que algunos de los apoyos sufren un hundimiento. Se tomarán algunos puntos de control para monitorear su comportamiento hasta llegar al eventual colapso de la estructura. Para complementar y corroborar los resultados obtenidos se llevará a cabo el ensaye en escala uno a uno sobre la plataforma de pruebas.

### **5.2. Prototipo de Vivienda**

El prototipo consiste en una vivienda unifamiliar de interés social de una planta, adaptada para su construcción sobre terreno de 6.00mts. x 15.00mts.

Alberga el espacio mínimo para sala-comedor, baño completo, cocina, una recamara, patio y cochera para un auto, con posibilidad de crecimiento hacia la parte posterior. Será construida mediante el sistema de perfiles de acero rolado en frio mediante mano de obra especializada de una empresa contratada para tal fin. En la siguiente imagen se muestra la planta arquitectónica propuesta:

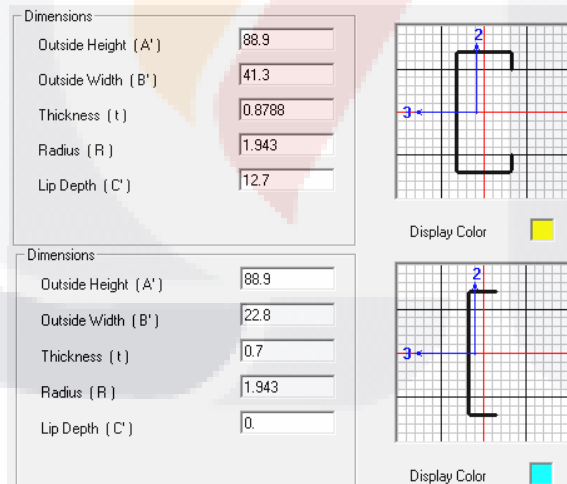


**Imagen 35.- Planta Arquitectónica del Prototipo de Vivienda Sobre el Cual se Harán los Ensayos y Simulaciones de Hundimientos Diferenciales.**

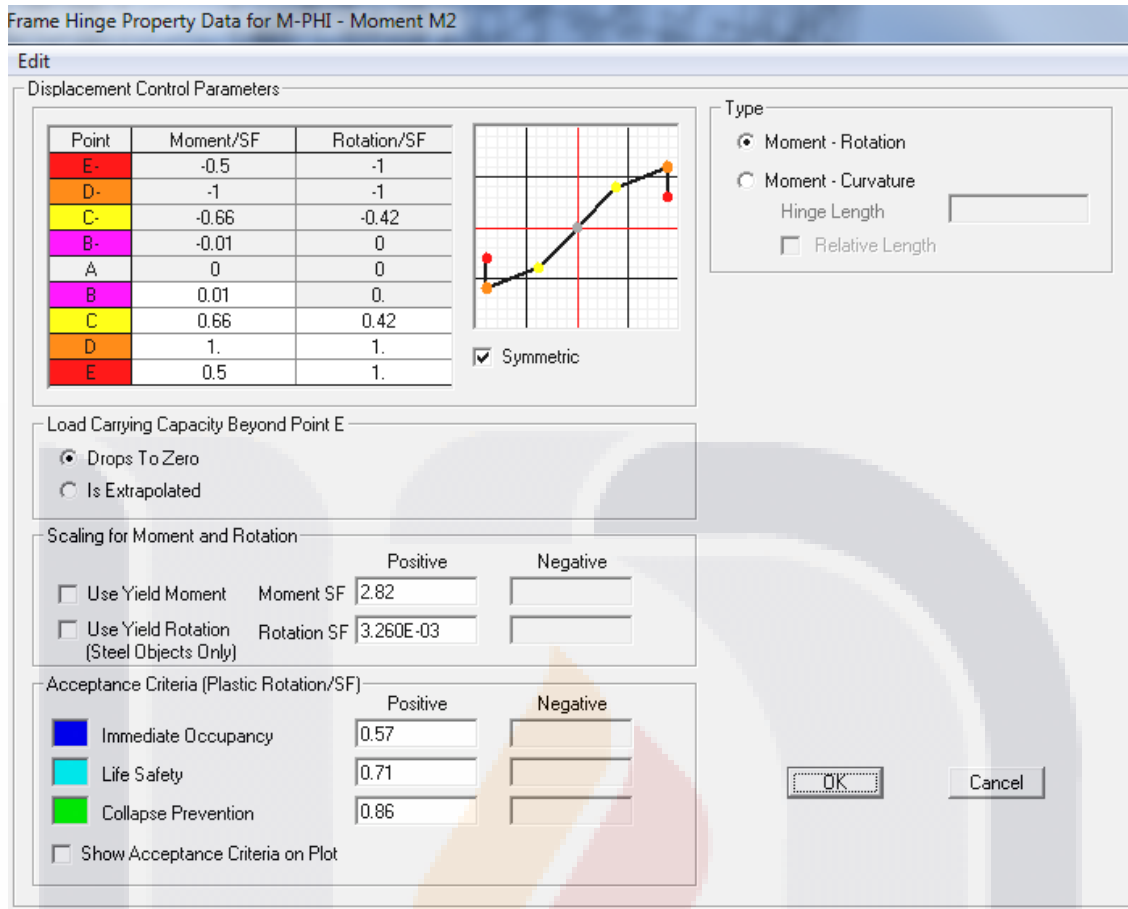


### 5.3. Características del Modelo de Simulación

El modelo de simulación está formado por elementos tipo barra para representar los studs y tracks, cuyas características se observan en la Imagen 36; y con elementos tipo área para el alma de poliestireno de los paneles que forman la vivienda. La conexión entre studs y tracks es una conexión semirrígida con los valores obtenidos en los ensayos realizados con anterioridad en el capítulo 4; de igual manera se le asignan las propiedades mecánicas del poliestireno así como las propiedades de las articulaciones plásticas a los studs en el modelo de acuerdo con la Imagen 37. Es importante aclarar que para las condiciones de los perfiles utilizados en esta simulación y ensaye es más probable que se presente falla por pandeo distorsional y no por pandeo local, debido a que la curva teórica de comportamiento para este tipo de pandeo admite menos magnitud de momento flexionante, por tanto es la que se emplea en la asignación de rótulas plásticas para el análisis estático no lineal.



**Imagen 36.- De izquierda a derecha, dimensiones de la sección de los studs y tracks, asignadas en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a un análisis estático no lineal con la técnica pulldown.**



**Imagen 37.- Curva momento-rotación asignada a las rótulas plásticas de los studs en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a un análisis estático no lineal con la técnica pulldown.**

Las curvas momento-rotación utilizadas en este trabajo fueron obtenidas de manera teórica mediante el método propuesto por Schafer en 2012 mediante el cual la curva momento-rotación se aproxima mediante una serie de rectas. Este método fue obtenido mediante un intenso análisis por elemento finito y múltiples ensayos elaborados por el autor, con lo que llega a proponer las ecuaciones que rigen las curvas características de los estados límite de pandeo local o pandeo distorsional de perfiles de pared delgada. Este tema se aborda más a fondo en la Tesis "Herramienta de Ayuda para Revisión y Diseño de Elementos de Acero Rolado en Frio y Curvas Momento Rotación" elaborada por el Ing. Roberto Fernández Pacheco, la cual forma parte de este mismo proyecto de investigación.

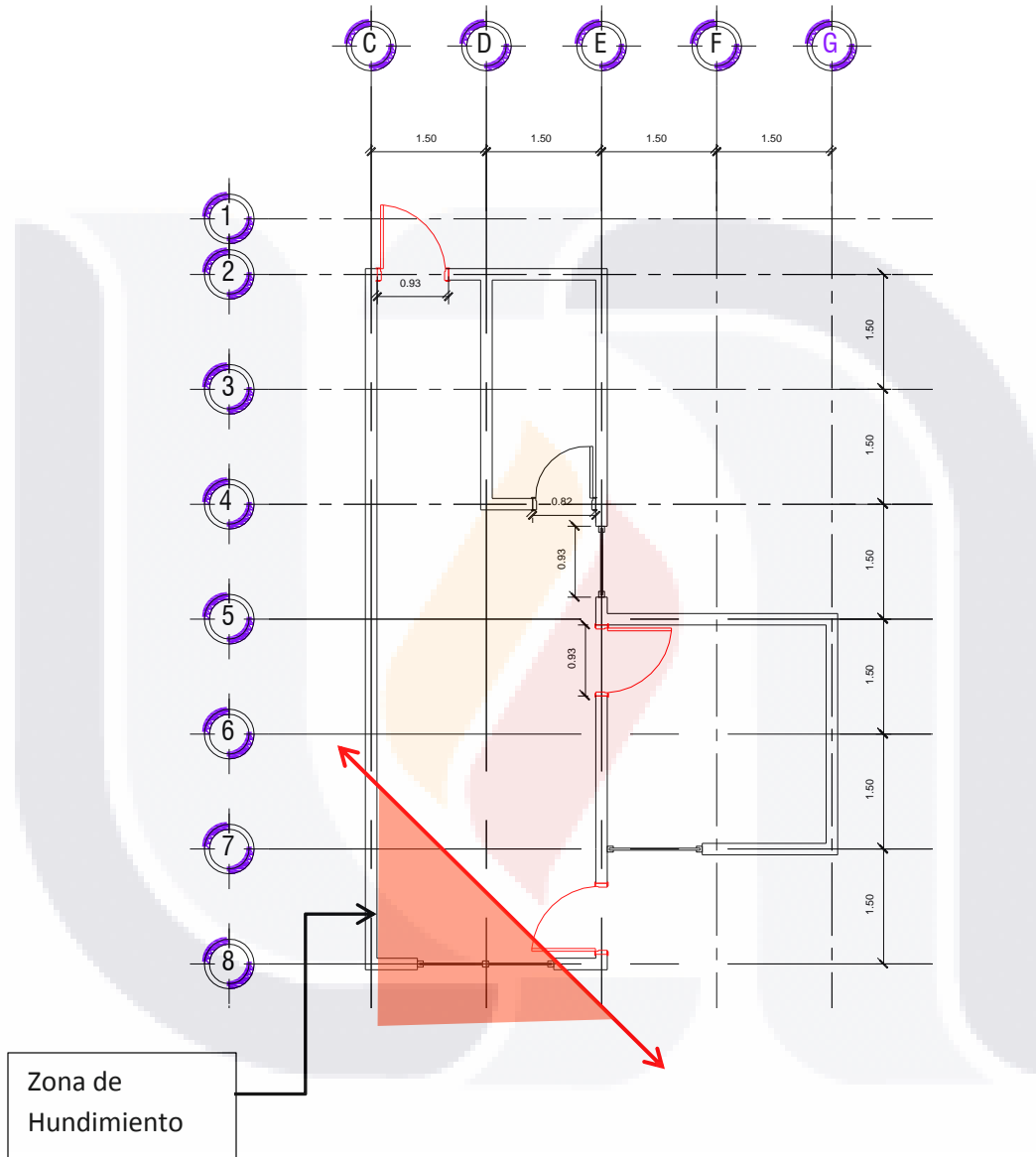
#### **5.4. Acciones**

En el desarrollo de esta simulación y ensaye solo se toman en cuenta dos tipos de acciones: el peso propio y los hundimientos diferenciales. Con ello pueden ser comparables los resultados ya que sería complicado representar al 100% la carga viva, el sismo y/o el viento en el ensaye a escala real y por tanto no estaría en las mismas condiciones el modelo de simulación y el ensaye. Más aún no se consideran factores de amplificación de carga o reducción de resistencia de ningún tipo.

#### **5.5. Desarrollo de la Simulación**

En este caso la simulación representa un hundimiento diferencial en la esquina izquierda del frente de la casa de acuerdo con la Imagen 38, con lo que se presenta el descenso de toda la zona aladaña, provocando que los studs cercanos presenten rotaciones relativamente grandes y eventualmente lleguen a su capacidad máxima al ocurrir la distorsión angular de los paneles de muros.

### 5.4.1 Hundimiento Diferencial Reproducido

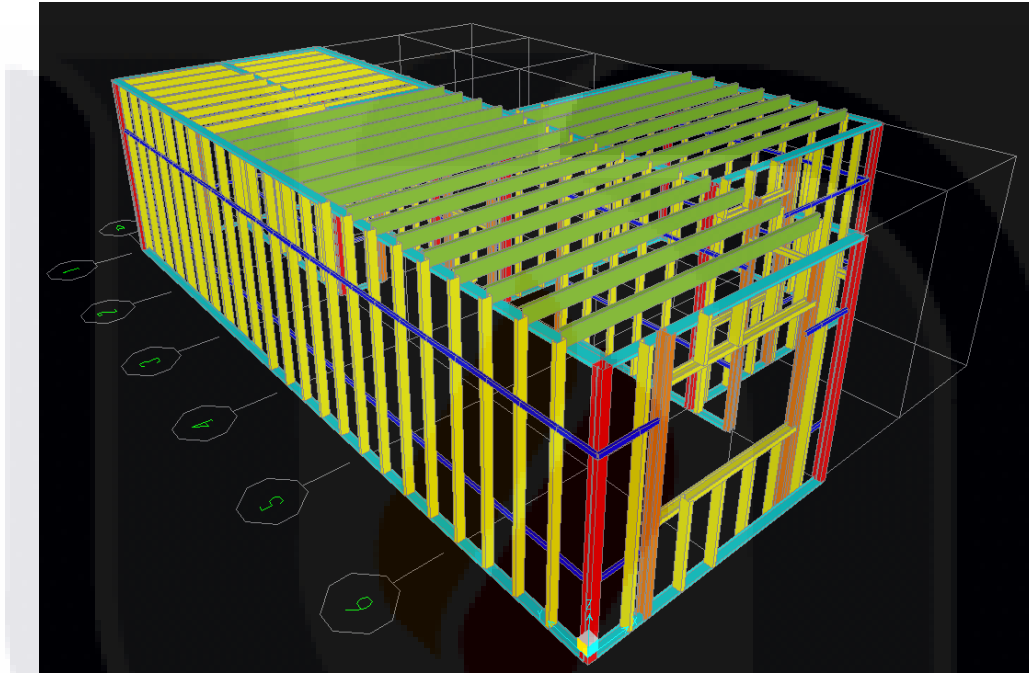


**Imagen 38.-** Esquema de la zona de afectación del hundimiento diferencial reproducido en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown.

### 5.4.2 Metodología de simulación

La metodología adoptada para la simulación del prototipo de vivienda consiste en:

1. Elaboración del modelo esquelético de los paneles en el software de elementos finitos.



**Imagen 39.- Modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pull-down.**

2. Asignación de propiedades: material, sección, cargas, estados de carga.
3. Asignación de las propiedades de rigidez en la interacción entre elementos tipo barra.

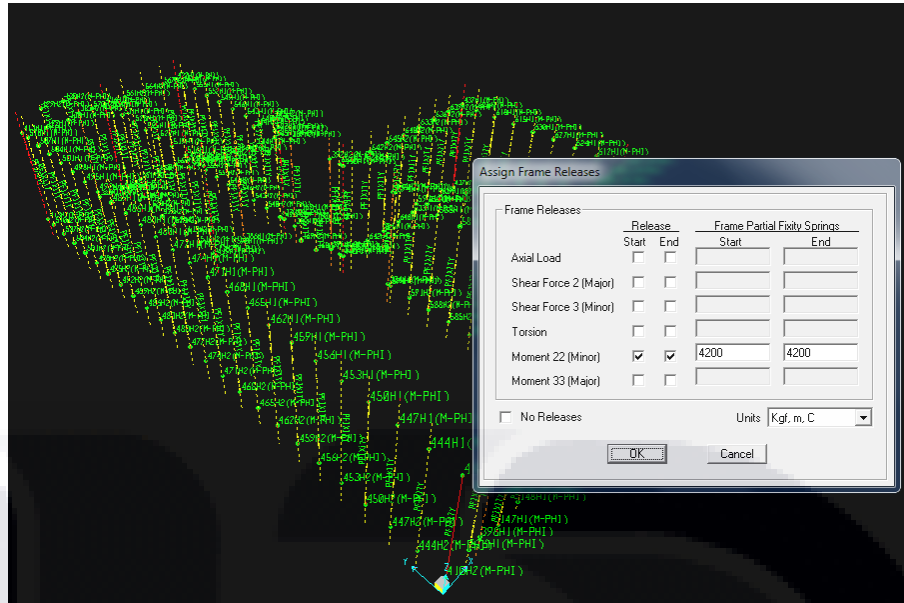


Imagen 40.- Asignación de la rigidez en la interacción de elementos tipo barra en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown.

4. Asignación de las curvas momento-rotación en los extremos de los studs para simular la formación de articulaciones plásticas.

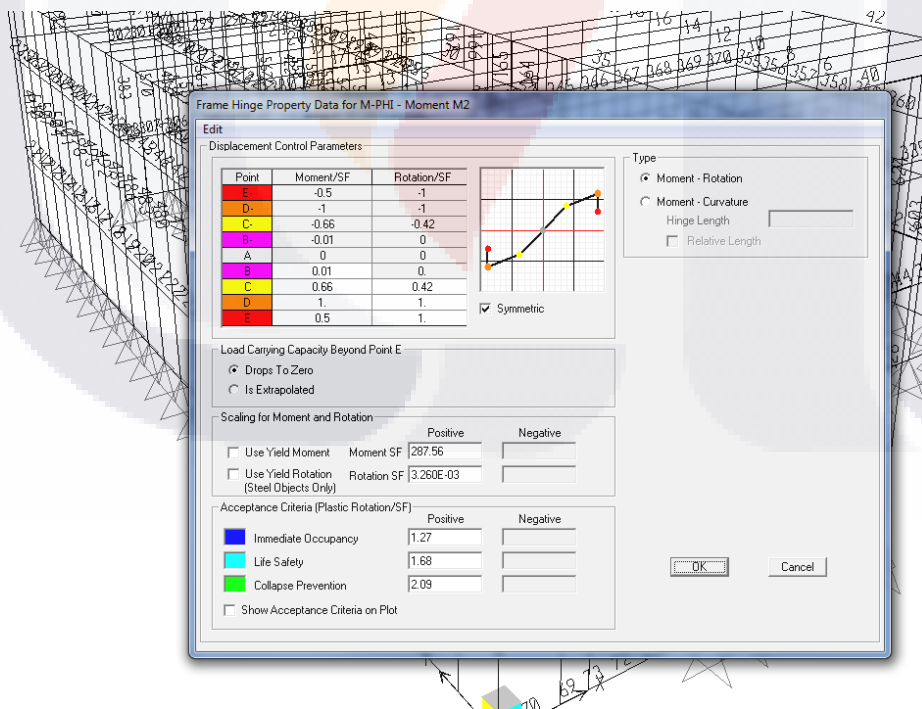
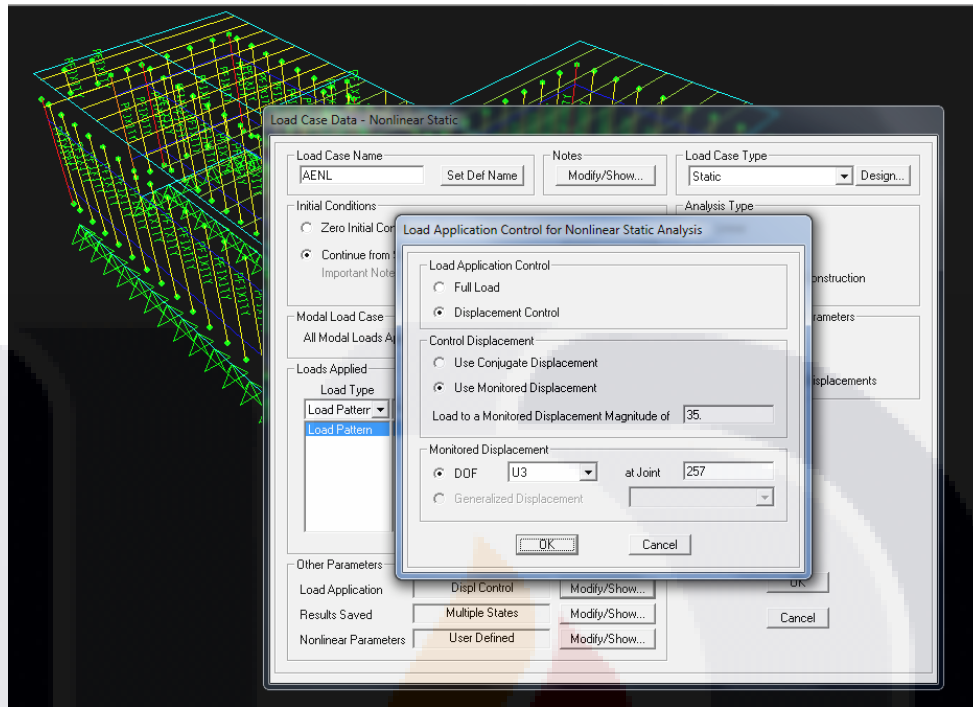


Imagen 41.- Asignación de las curvas momento-rotación a los elementos tipo barra en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown.

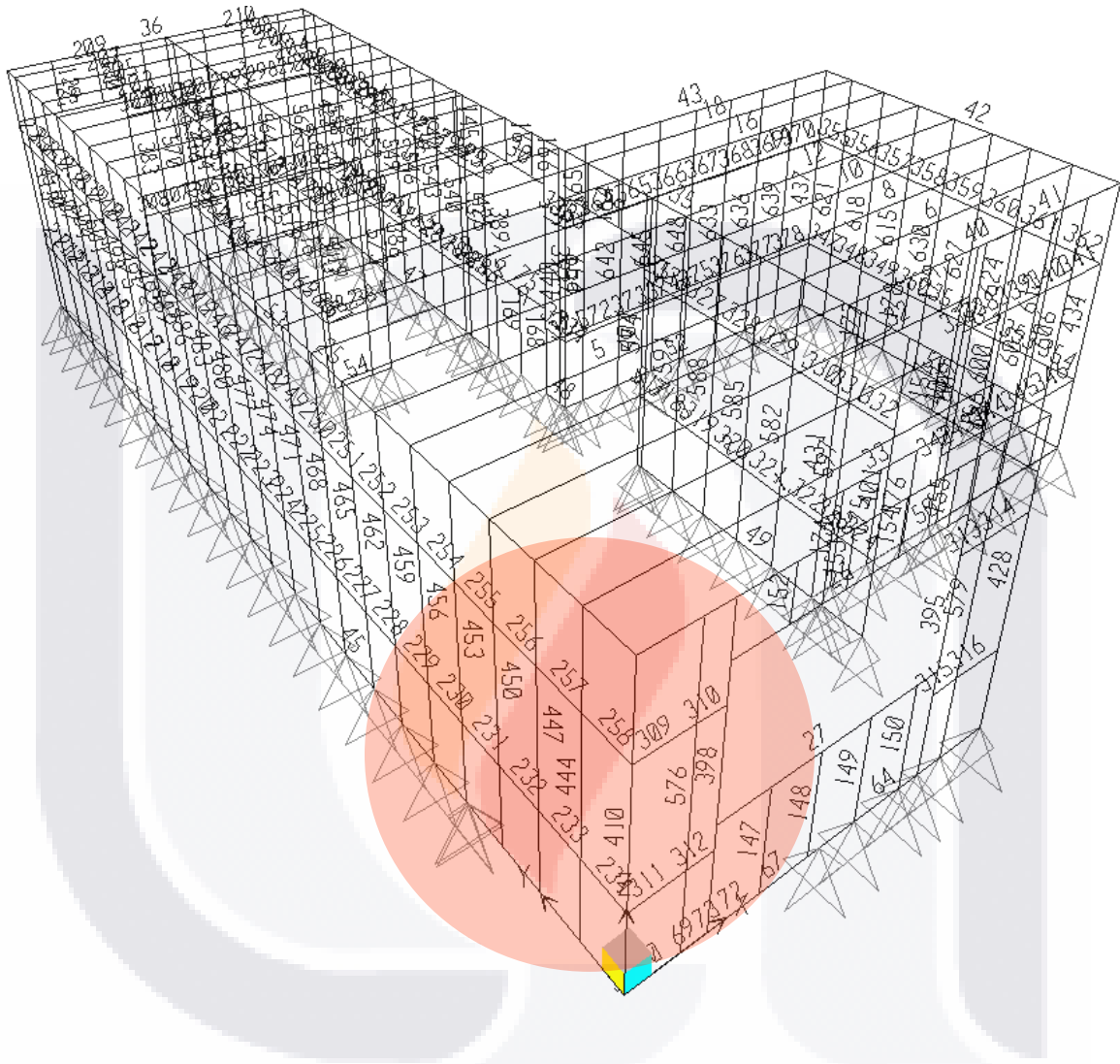
5. Configurar los parámetros del análisis pulldown: desplazamiento vertical máximo, nudo de control, etc.



**Imagen 42.- Configuración de los parámetros para el análisis estático no lineal (desplazamiento vertical máximo, nudo de control, etc.) en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales mediante la técnica pulldown.**

6. Correr el análisis y recuperar los resultados para procesarlos.
7. Finalmente se analizan los resultados obtenidos.

Se analizara lo ocurrido en la estructura de la vivienda en la zona aledaña al hundimiento. En la Imagen 43 de la página siguiente se muestran los studs que fueron analizados y en la Tabla 6 de la página 99, los elementos mecánicos actuantes en los mismos para los diferentes pasos del pulldown.



**Imagen 43.- Los Studs 450, 447, 444, 410, 576, 398, 147 y 148 son los que sufren las principales afectaciones en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown.**



### 5.4.3 Resultados Pulldown Aplicado a Prototipo De Vivienda

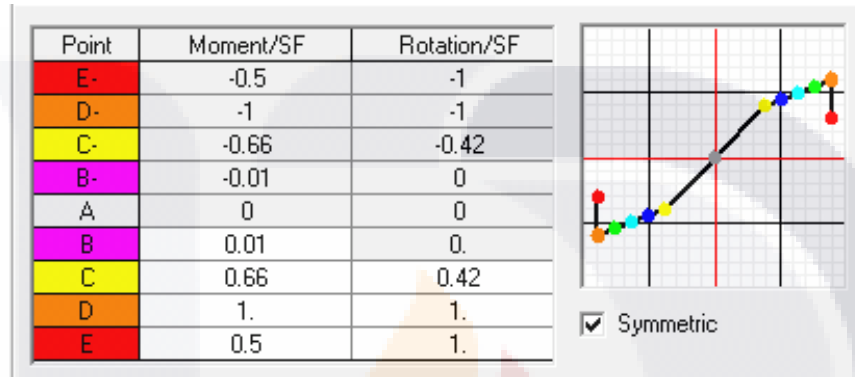
PASO	HUND.	LONG.	DIST.	STUDS EN MURO DE FACHADA PRINCIPAL																																							
				STUD								576								398								147								148							
				EXTREMO			INFERIOR				SUPERIOR				INFERIOR				SUPERIOR				INFERIOR				SUPERIOR				INFERIOR				SUPERIOR								
				Mp	Mu	Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry					
m	m	%	N-m	N-m	rad	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry						
-	0.000	1.50	0.00%	2820	2820	3.26E-03	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00					
0	-0.077	1.50	5.13%	2820	2820	3.26E-03	-1,040	-7.6E-04	0.37	0.23	623	4.4E-04	0.22	0.14	-1,395	-1.0E-03	0.49	0.31	463	3.3E-04	0.16	0.10	-895	-6.5E-04	0.32	0.20	969	7.1E-04	0.34	0.22	-969	-7.1E-04	0.34	0.22	658	4.7E-04	0.23	0.14					
1	-0.080	1.50	5.33%	2820	2820	3.26E-03	-1,082	-7.9E-04	0.38	0.24	648	4.6E-04	0.23	0.14	-1,451	-1.1E-03	0.51	0.33	482	3.4E-04	0.17	0.10	-930	-6.7E-04	0.33	0.21	1,008	7.4E-04	0.36	0.23	-1,007	-7.4E-04	0.36	0.23	684	4.9E-04	0.24	0.15					
2	-0.116	1.50	7.74%	2820	2820	3.26E-03	-1,570	-1.2E-03	0.56	0.35	940	6.8E-04	0.33	0.21	-2,096	-1.9E-03	0.74	0.57	700	5.1E-04	0.25	0.16	-1,351	-9.9E-04	0.48	0.30	1,463	1.1E-03	0.52	0.33	-1,463	-1.1E-03	0.52	0.33	994	7.2E-04	0.35	0.22					
3	-0.156	1.50	10.40%	2820	2820	3.26E-03	-2,106	-1.9E-03	0.75	0.57	1,262	9.2E-04	0.45	0.28	-1,386	-3.2E-03	0.49	1.00	941	6.9E-04	0.33	0.21	-1,815	-1.3E-03	0.64	0.41	1,964	1.6E-03	0.70	0.50	-1,964	-1.6E-03	0.70	0.50	1,336	9.8E-04	0.47	0.30					
4	-0.156	1.50	10.40%	2820	2820	3.26E-03	-2,176	-2.0E-03	0.77	0.61	1,261	9.2E-04	0.45	0.28	-1,394	-5.0E-02	0.49	15.21	940	6.9E-04	0.33	0.21	-1,854	-1.4E-03	0.66	0.43	1,997	1.7E-03	0.71	0.51	-1,991	-1.6E-03	0.71	0.50	1,364	1.0E-03	0.48	0.31					
5	-0.197	1.50	13.11%	2820	2820	3.26E-03	-2,751	-3.1E-03	0.98	0.96	1,588	1.2E-03	0.56	0.36	-1,393	-7.5E-02	0.49	22.89	1,185	8.7E-04	0.42	0.27	-2,335	-2.4E-03	0.83	0.72	2,515	2.7E-03	0.89	0.83	-2,508	-2.7E-03	0.89	0.82	1,725	1.3E-03	0.61	0.39					
6	-0.201	1.50	13.40%	2820	2820	3.26E-03	-1,403	-3.3E-03	0.50	1.00	1,623	1.2E-03	0.58	0.37	-1,393	-7.7E-02	0.49	23.71	1,211	8.9E-04	0.43	0.27	-2,387	-2.5E-03	0.85	0.75	2,571	2.8E-03	0.91	0.86	-2,564	-2.8E-03	0.91	0.85	1,794	1.3E-03	0.63	0.40					
7	-0.201	1.50	13.40%	2820	2820	3.26E-03	-1,068	-9.1E-02	0.38	27.77	1,623	1.2E-03	0.58	0.37	-1,393	-8.2E-02	0.49	25.02	1,210	8.9E-04	0.43	0.27	-2,443	-2.5E-03	0.87	0.77	2,624	2.9E-03	0.93	0.89	-2,593	-2.8E-03	0.92	0.87	1,796	1.3E-03	0.64	0.41					
8	-0.211	1.50	14.03%	2820	2820	3.26E-03	-1,070	-9.7E-02	0.38	29.88	1,700	1.3E-03	0.60	0.38	-1,392	-8.8E-02	0.49	26.91	1,267	9.3E-04	0.45	0.29	-2,560	-2.7E-03	0.91	0.84	2,750	3.2E-03	0.98	0.97	-2,716	-3.1E-03	0.96	0.94	1,882	1.4E-03	0.67	0.44					
9	-0.211	1.50	14.04%	2820	2820	3.26E-03	-1,070	-9.7E-02	0.38	29.83	1,702	1.3E-03	0.60	0.39	-1,392	-8.8E-02	0.49	26.85	1,265	9.3E-04	0.45	0.29	-2,556	-2.8E-03	0.91	0.85	2,747	3.2E-03	0.97	0.97	-2,703	-3.1E-03	0.96	0.94	1,872	1.4E-03	0.66	0.44					
10	-0.211	1.50	14.04%	2820	2820	3.26E-03	-1,070	-9.7E-02	0.38	29.78	1,707	1.3E-03	0.61	0.39	-1,393	-8.7E-02	0.49	26.78	1,264	9.3E-04	0.45	0.29	-2,552	-2.8E-03	0.91	0.85	2,743	3.2E-03	0.97	0.97	-2,691	-3.1E-03	0.95	0.94	1,861	1.4E-03	0.66	0.44					
11	-0.215	1.50	14.35%	2820	2820	3.26E-03	-1,071	-1.0E-01	0.38	30.83	1,745	1.3E-03	0.62	0.40	-1,392	-9.0E-02	0.49	27.72	1,293	9.5E-04	0.46	0.29	-2,610	-2.9E-03	0.93	0.88	1,396	3.2E-03	0.50	1.00	-2,752	-3.1E-03	0.98	0.97	1,904	1.5E-03	0.68	0.45					
12	-0.201	1.50	13.42%	2820	2820	3.26E-03	-1,069	-9.4E-02	0.38	28.74	1,626	1.3E-03	0.58	0.40	-1,393	-8.4E-02	0.49	25.72	1,207	9.5E-04	0.43	0.29	-2,067	-2.6E-03	0.73	0.80	1,092	1.0E-01	0.39	30.52	-2,585	-3.1E-03	0.92	0.97	1,779	1.5E-03	0.63	0.45					

PASO	HUND.	LONG.	DIST.	STUDS EN MURO DE FACHADA LATERAL																																							
				STUD								450								447								444								410							
				EXTREMO			INFERIOR				SUPERIOR				INFERIOR				SUPERIOR				INFERIOR				SUPERIOR				INFERIOR				SUPERIOR								
				Mp	Mu	Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	M	R	M/Mp	R/Ry	
m	m	%	N-m	N-m	rad	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry	N-m	rad	M/Mp	R/Ry		
-	0.000	1.50	0.00%	2820	2820	3.26E-03	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00	0	0.0E+00	0.00	0.00					
0	-0.077	1.50	5.13%	2820	2820	3.26E-03	951	6.9E-04	0.34	0.21	-1,080	-7.9E-04	0.38	0.24	1,037	7.6E-04	0.37	0.23	-1,043	-7.6E-04	0.37	0.23	938	6.8E-04	0.33	0.21	-982	-7.1E-04	0.35	0.22	584	4.2E-04	0.21	0.13	-634	-4.5E-04	0.22	0.14					
1	-0.080	1.50	5.33%	2820	2820	3.26E-03	989	7.2E-04	0.35	0.22	-1,122	-8.2E-04	0.40	0.25	1,078	7.9E-04	0.38	0.24	-1,085	-7.9E-04	0.38	0.24	976	7.1E-04	0.35	0.22	-1,022	-7.4E-04	0.36	0.23	608	4.3E-04	0.22	0.13	-660	-4.7E-04	0.23	0.14					
2	-0.116	1.50	7.74%	2820	2820	3.26E-03	1,433	1.1E-03	0.51	0.32	-1,626	-1.2E-03	0.58	0.37	1,565	1.2E-03	0.55	0.35	-1,574	-1.2E-03	0.56	0.35	1,418	1.0E-03	0.50	0.32	-1,485	-1.1E-03	0.53	0.33	885	6.4E-04	0.31	0.20	-960	-7.0E-04	0.34	0.21					
3	-0.156	1.50	10.40%	2820	2820	3.26E-03	1,923	1.5E-03	0.68	0.46	-2,178	-2.0E-03	0.77	0.61	2,099	1.9E-03	0.74	0.57	-2,111	-1.9E-03	0.75	0.57	1,907	1.5E-03	0.68	0.45	-1,995	-1.6E-03	0.71	0.50	1,190	8.7E-04	0.42	0.27	-1,292	-9.4E-04	0.46	0.29					
4	-0.156	1.50	10.40%	2820	2820	3.26E-03	1,921	1.5E-03	0.68	0.47	-2,176	-2.0E-03	0.77	0.62	2,098	-1.9E-03	0.74	0.57	-2,110	-1.9E-03	0.75	0.58	1,906	1.5E-03	0.68	0.46	-1,994	-1.7E-03	0.71	0.51	1,190	8.7E-04	0.42	0.27	-1,291	-9.5E-04	0.46	0.29					
5	-0.197	1.50	13.11%	2820	2820	3.26E-03	2,412	2.5E-03	0.86	0.77	-2,732	-3.1E-03	0.97	0.96	2,635	-2.9E-03	0.93	0.90	-2,651	-3.0E-03	0.94	0.91	2,395	2.5E-03	0.85	0.76	-2,506	-2.7E-03	0.89	0.82	1,500	1.1E-03	0.53	0.34	-1,627	-1.2E-03	0.58	0.37					
6	-0.201	1.50	13.40%	2820	2820	3.26E-03	2,465	2.6E-03	0.87	0.80	-1,382	-3.3E-03	0.49	1.00	2,693	3.1E-03	0.96	0.94	-2,709	-3.1E-03	0.96	0.95	2,448	2.6E-03	0.87	0.79	-2,561	-2.8E-03	0.91	0.86	1,533	1.1E-03	0.54	0.35	-1,663	-1.2E-03	0.59	0.38					
7	-0.201	1.50	13.40%	2820	2820	3.26E-03	2,539	2.7E-03	0.90	0.84	-1,111	-1.3E-01	0.39	38.74	2,678	3.1E-03	0.95	0.94	-2,600	-3.1E-03	0.92	0.95	2,359	2.6E-03	0.84	0.79	-2,540	-2.8E-03	0.90	0.86	1,478	1.1E-03	0.52	0.35	-1,640	-1.2E-03	0.58	0.38					
8	-0.211	1.50	14.03%	2820	2820	3.26E-03	2,660	3.0E-03	0.94	0.91	-1,114	-1.4E-01	0.40	41.70	1,393	3.3E-03	0.49	1.00	-2,721	-3.1E-03	0.97	0.95	2,470	2.6E-03	0.88	0.79	-2,659	-3.0E-03	0.94	0.92	1,548	1.1E-03	0.55	0.35	-1,717	-1.3E-03	0.61	0.39					
9	-0.211	1.50	14.04%	2820	2820	3.26E-03	2,562	3.0E-03	0.91	0.91	-1,114	-1.4E-01	0.39	41.40	1,104	1.3E-01	0.39	39.44	-1,379	-3.3E-03	0.49	1.00	2,375	2.6E-03	0.84	0.79	-2,650																

La Imagen 45 a la Imagen 56 muestran el comportamiento anterior de manera gráfica de acuerdo a la curva momento rotación de los studs de la Imagen 44, en la que por colores podemos identificar el nivel de trabajo mecánico en el que se encuentran los studs para cada nivel de hundimiento:

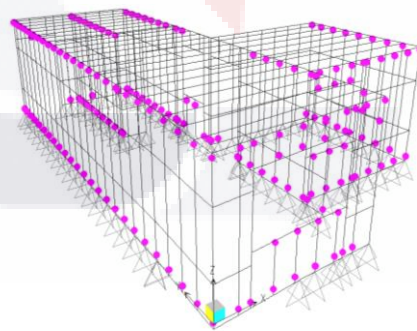
**Curva Momento Rotación de Studs**



**Imagen 44.-** Curva momento rotación de los studs del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown.

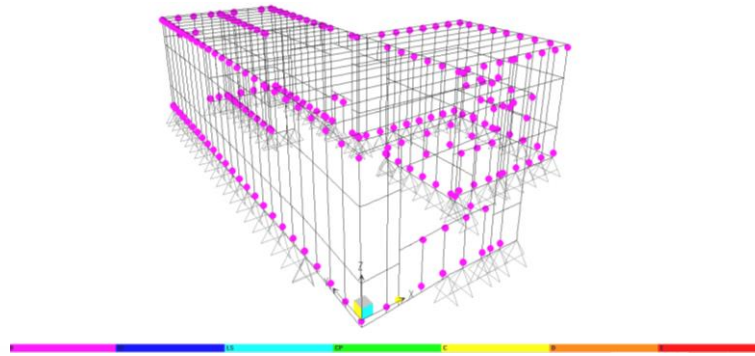
**Pulldown Paso a Paso**

**Paso 1 Hundimiento = 8.00cm**



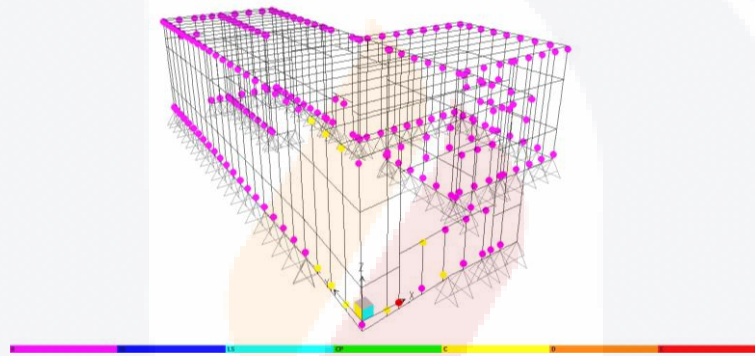
**Imagen 45.-** Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 8.00cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.

**Paso 2 Hundimiento = 11.60cm**



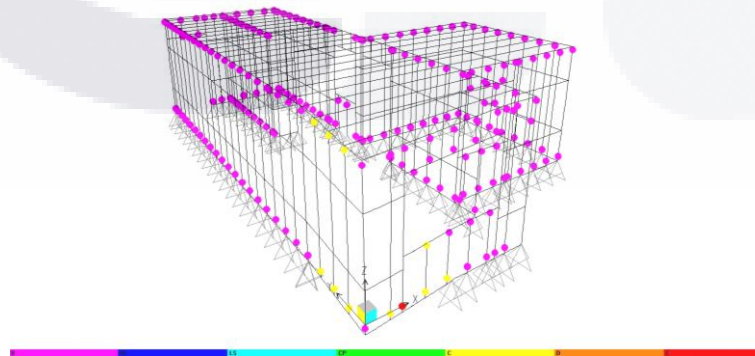
**Imagen 46.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 11.60cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.**

**Paso 3 Hundimiento = 15.60cm**



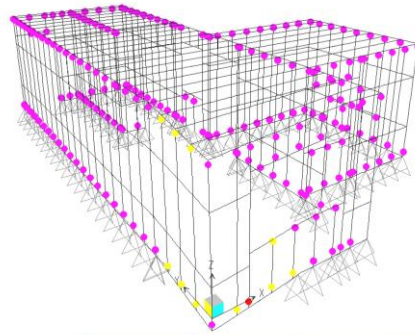
**Imagen 47.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 15.60cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.**

**Paso 4 Hundimiento = 15.60cm**



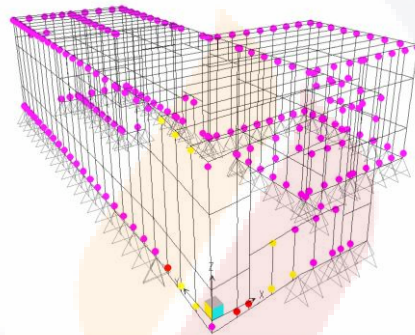
**Imagen 48.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 15.60cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.**

**Paso 5 Hundimiento = 19.70cm**



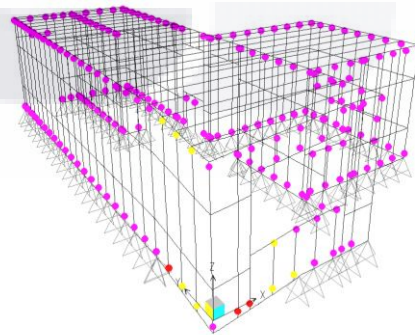
**Imagen 49.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 19.70cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.**

**Paso 6 Hundimiento = 20.10c**



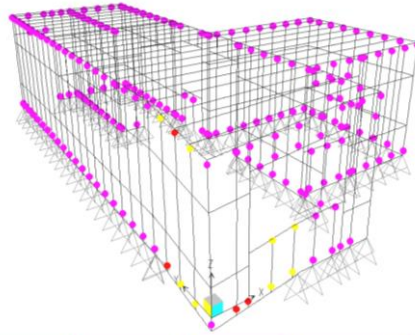
**Imagen 50.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 20.10cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.**

**Paso 7 Hundimiento = 20.01cm**



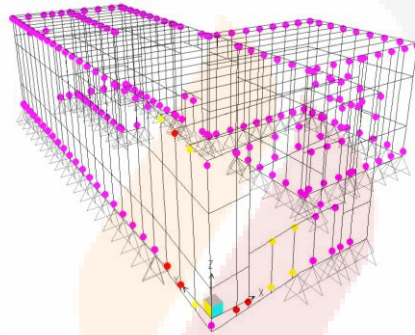
**Imagen 51.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 20.01cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.**

**Paso 8 Hundimiento = 21.10cm**



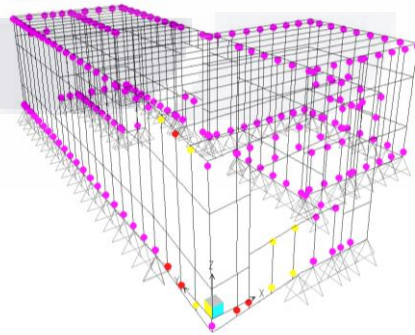
**Imagen 52.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 21.10cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.**

**Paso 9 Hundimiento = 21.10cm**



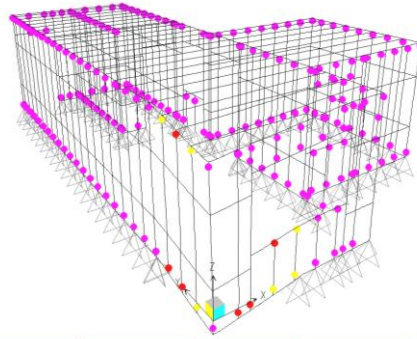
**Imagen 53.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 21.10 cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.**

**Paso 10 Hundimiento = 21.10cm**



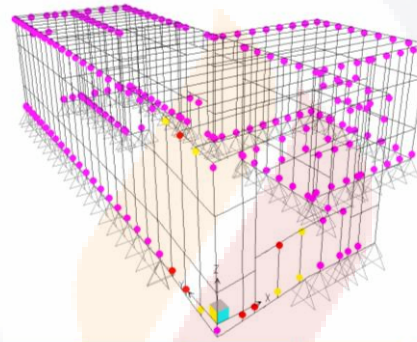
**Imagen 54.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 21.10cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.**

**Paso 11 Hundimiento = 21.15cm**



**Imagen 55.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 21.15cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.**

**Paso 12 Hundimiento = 20.10cm**



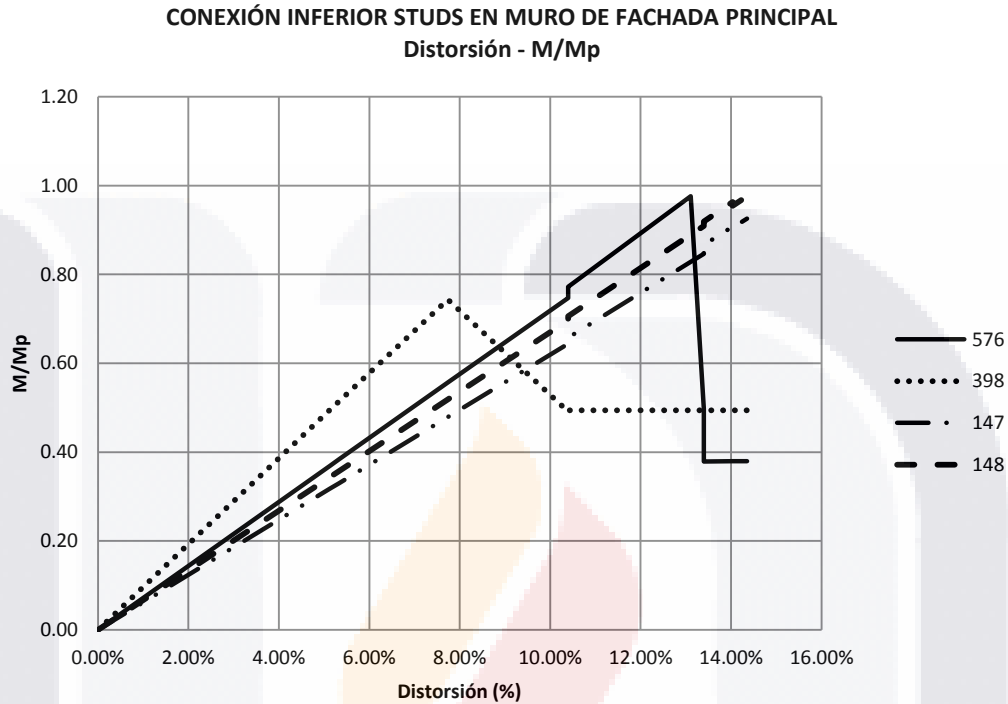
**Imagen 56.- Niveles de trabajo de los studs para un hundimiento máximo de 20.10cm en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Colores asociados a la curva de la Imagen 44.**

**5.4.4 Comportamiento de los Studs de la Fachada Principal**

En la Imagen 45 a la Imagen 56 y en la Tabla 6 de la página 99 se puede observar el comportamiento de los studs en la fachada principal, en general se presentan más daños en la parte inferior de los studs que en su superior, el 75% de los studs trabajan a más del 80% de su capacidad en la parte inferior, mientras que en la parte superior estos mismos studs solo trabajan al 60%.

El stud 398 aledaño al hueco de la ventana (ver Imagen 43 ) es el que manifiesta menos trabajo mecánico, llegando apenas al 75% en su parte

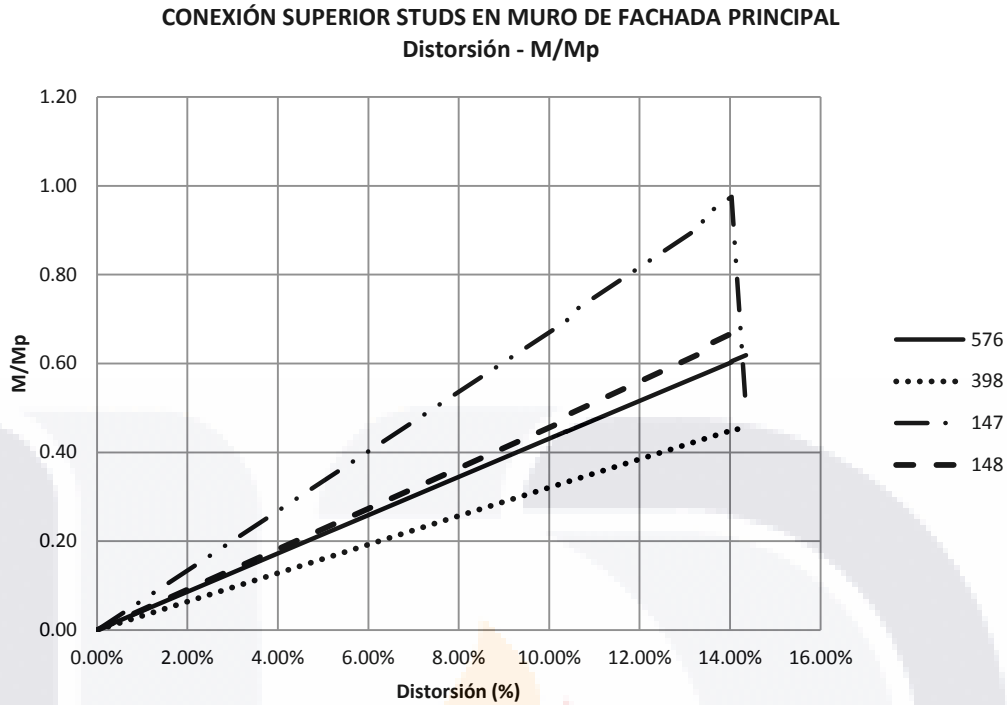
inferior (Imagen 57) y 45% en su parte superior (Imagen 58), esto se puede deber a que la zona es menos rígida por la presencia del hueco de la ventana.



**Imagen 57.- Comportamiento de la parte inferior de los studs 576, 398, 147 y 148 de la fachada principal del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pull-down. Ver Imagen 38 e Imagen 43.**

La capacidad máxima de los studs es alcanzada para una distorsión local del muro de aproximadamente el 14%, representando en este caso un hundimiento máximo de 21cm en la esquina de la vivienda.

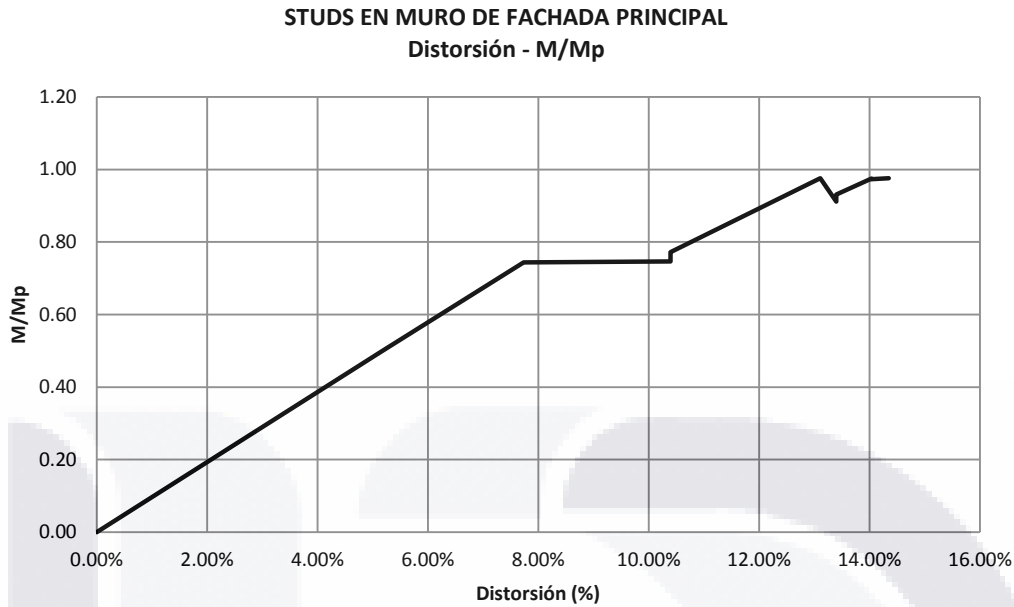
Para el caso de la conexión inferior (Imagen 57), los studs 147 y 148 localizados en la parte baja del hueco de ventana, tienen un comportamiento muy similar, desarrollando casi el 95% de su capacidad. Solo el stud 576 desarrolla el 100% de su capacidad, llegando a ceder totalmente para una distorsión aproximada del 13%.



**Imagen 58.- Comportamiento de la parte superior de los studs 576, 398, 147 y 148 de la fachada principal del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Ver Imagen 38 e Imagen 43.**

Para el caso de la conexión superior de los studs de la fachada principal (Imagen 58), el stud 398 es el que presenta menos demanda mecánica nuevamente, siendo su localización en el paño del hueco de ventana (ver Imagen 43). Los studs 148 y 576 tienen un comportamiento similar desarrollando el 60% de su capacidad de forma lineal a la distorsión. El stud 147 desarrolla el 100% de su capacidad al localizarse muy próximo a la zona límite del hundimiento diferencial.



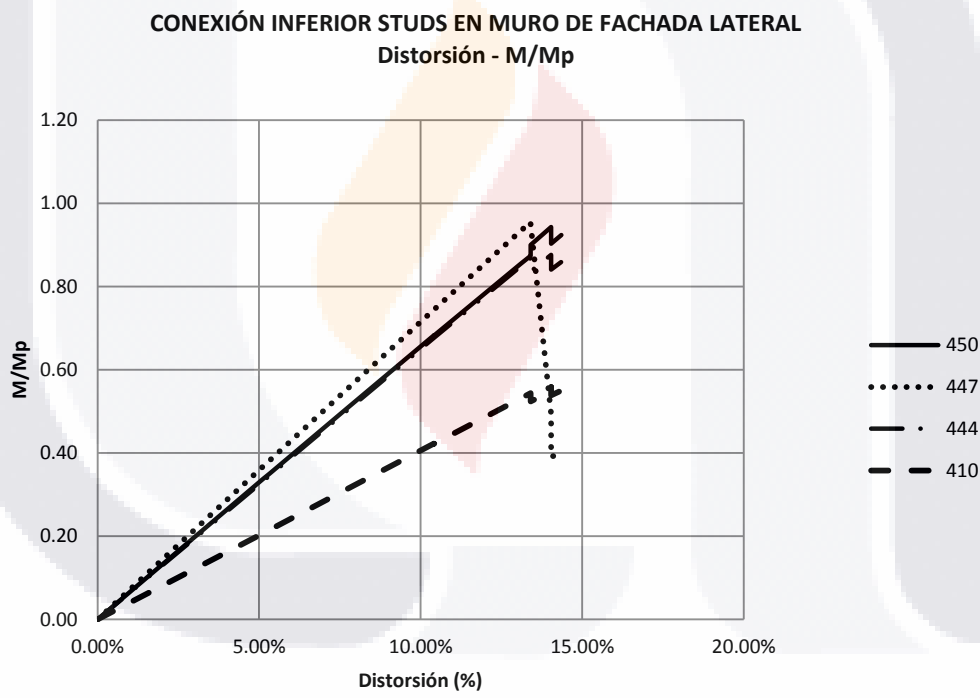


**Imagen 59.- Comportamiento general de los studs de la fachada principal del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Ver Imagen 38 e Imagen 43.**

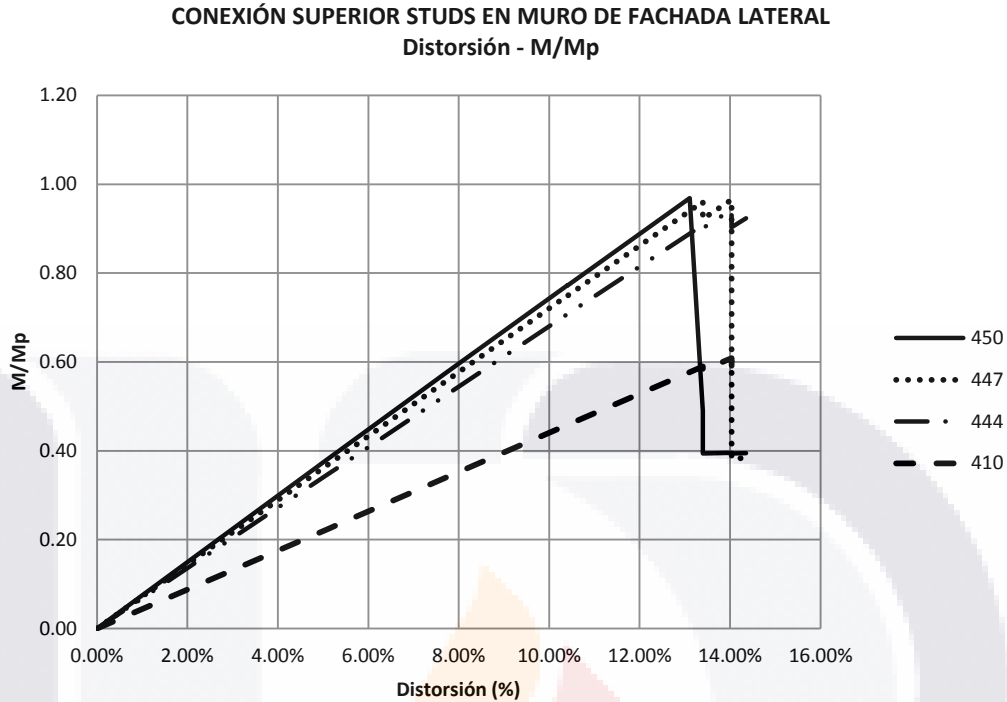
La gráfica anterior resume el comportamiento de los studs de la fachada principal, muestra el valor del momento máximo que se presenta en cualquiera de los studs ya sea en su parte superior o inferior. La curva siempre es ascendente y al inicio proporcional a la distorsión y por tanto al hundimiento; sin embargo, al llegar a una distorsión aproximada del 8% se mantiene, lo cual se atribuye a la redistribución de momentos entre los studs, posteriormente sigue en aumento, al alcanzar el máximo momento en una distorsión aproximada del 13%, algunos perfiles ceden, lo que provoca una redistribución de momentos que ayuda a mantener los niveles de deformación con una estructura estable. En este último tramo (del 13 al 14% de distorsión) se observa la tendencia del comportamiento dúctil, en el cual los studs con menor trabajo mecánico entran a retomar las fuerzas de los studs que van cediendo. Este proceso se repetiría hasta formarse un mecanismo de falla por la formación de un número elevado de articulaciones plásticas que le resten estabilidad a la estructura.

### 5.4.5 Comportamiento de los Studs de la Fachada Lateral

Para el caso de los studs de la fachada lateral se puede observar un comportamiento más homogéneo entre la parte superior (Imagen 60) e inferior (Imagen 61) de los studs, para ambos casos los studs trabajan al máximo de su capacidad para una distorsión de aproximadamente 13%. El comportamiento más homogéneo se debe a que en este caso no se presentan discontinuidades en el muro ya que no existen ventanas ni puertas en la zona; Sin embargo, es de notarse que el perfil de la esquina (stud 410) es el que menos trabajo mecánico realiza, llegando apenas al 55% de su capacidad.



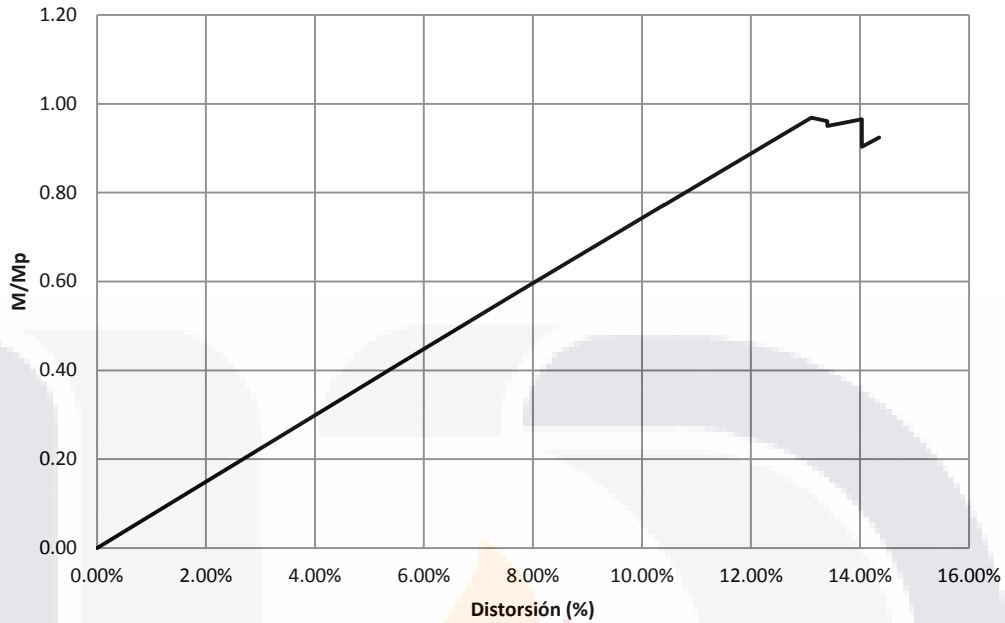
**Imagen 60.- Comportamiento de la parte inferior de los studs 450, 447, 444 y 410 de la fachada lateral del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pull-down. Ver Imagen 38 e Imagen 43.**



**Imagen 61.- Comportamiento de la parte superior de los studs 450, 447, 444 y 410 de la fachada lateral del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pull-down. Ver Imagen 38 e Imagen 43.**

Los studs 450, 447 y 444 tienen un comportamiento muy similar tanto en su parte superior (Imagen 60) como en su parte inferior (Imagen 61). Conservan un comportamiento lineal entre el momento mecánico que toman y la distorsión asociada, hasta llegar al máximo momento admisible que es entonces cuando ceden. La misma homogeneidad del comportamiento mecánico provoca que al final de la curva prácticamente todos los perfiles lleguen a su máximo en un mismo valor de la distorsión, lo cual no sucede en la fachada principal. (Imagen 57 e Imagen 58).

STUDS EN MURO DE FACHADA LATERAL  
Distorsión - M/Mp



**Imagen 62.- Comportamiento general de los studs de fachada lateral del modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda que se somete a hundimientos diferenciales, realizando un análisis estático no lineal con la técnica pulldown. Ver Imagen 38 e Imagen 4343.**

La diferencia del comportamiento mecánico de los perfiles de cada fachada se puede apreciar en la tercer gráfica de ambas fachadas (Imagen 59 e Imagen 62), en las cuales se presenta para cada nivel de distorsión el momento máximo presentado en cualquiera de los studs. Se puede observar que para la fachada lateral el incremento de los niveles de fuerzas internas asociadas a la distorsión sigue un comportamiento lineal uniforme, mientras que para la fachada principal este comportamiento es menos uniforme debido a la presencia del hueco de ventana.

## 5.5 Desarrollo de Ensaye

### 5.5.1 Características del Modelo de Ensaye

El modelo de ensayo consiste en un prototipo de vivienda formado por el sistema constructivo de paneles de perfiles de acero rolado en frío interactuando con un alma de poliestireno, sobre la cual se coloca el recubrimiento de acabado. Los studs y los tracks tienen las características geométricas de la Imagen 36 y corresponden a las mismas utilizadas en el modelo de simulación.

El modelo fue construido sobre una plataforma de prueba que fue diseñada para desarrollar ensayos en los que el objetivo principal sea reproducir a escala real los hundimientos diferenciales del terreno característicos de la subsidencia.

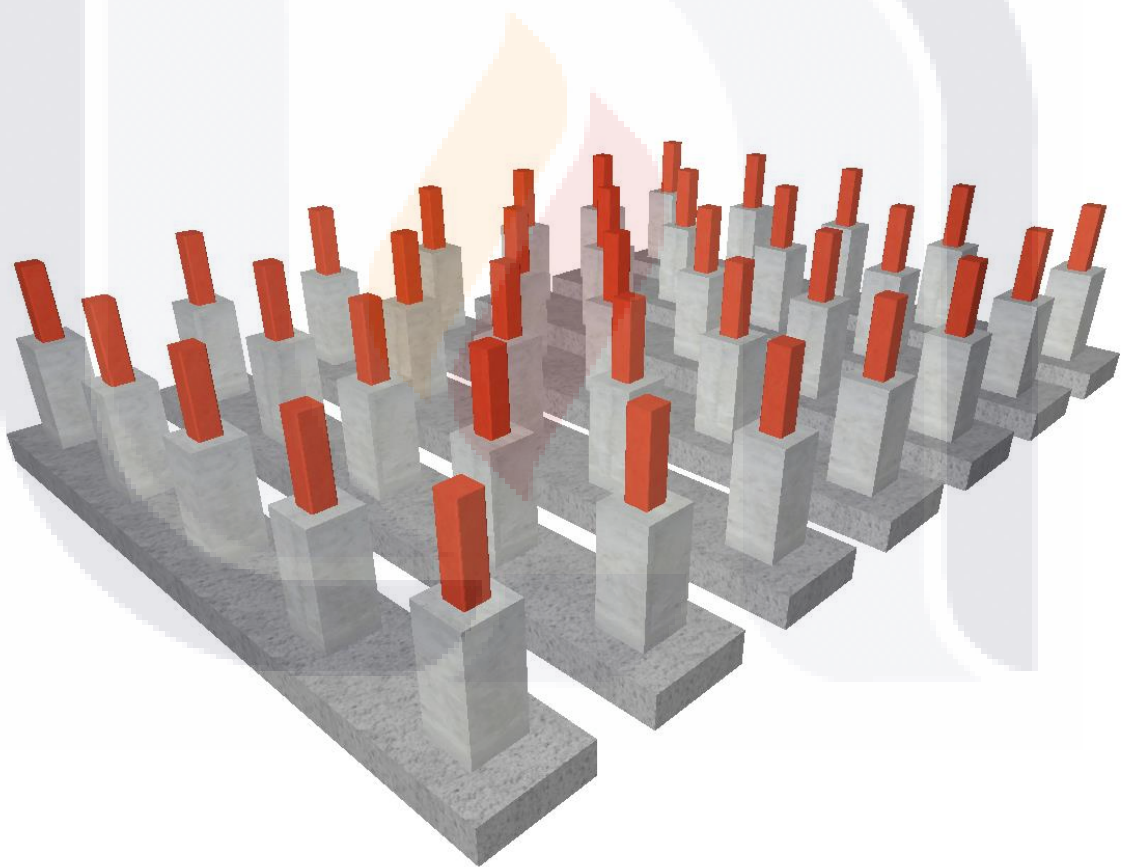


**Imagen 63 e Imagen 64.- Prototipo de vivienda que se somete a ensayo en plataforma simuladora de hundimientos diferenciales.**

### 5.5.2 Plataforma de Ensaye

La plataforma de pruebas está compuesta por 35 columnas de acero desplantadas sobre zapatas corridas de concreto reforzado, sobre las cuales se sostienen una serie de pequeños marcos fijos y un marco móvil de acero que se desplaza de forma vertical mediante la acción de un pistón hidráulico que cuenta con un manómetro para medir la fuerza aplicada al desplazamiento.

Este dispositivo fue objeto de la tesis denominada "Diseño, Construcción e Instrumentación de Plataforma Simuladora de Hundimientos Diferenciales a Escala Real" desarrollada por el Ing. Miguel Ángel Soto Zamora, que a su vez forma parte del mismo proyecto de investigación del presente trabajo.



**Imagen 65.-** Captura del modelo virtual para el diseño de la plataforma de simulación de hundimientos diferenciales a escala real. Se pueden observar las 35 columnas desplantadas sobre dados de concreto reforzado dispuestos en grupos de 5 sobre las zapatas corridas del mismo material.



**Imagen 66.- Marco móvil que permite desplazamientos en vertical de la estructura de la plataforma en que se asienta el prototipo de vivienda ensayado.**

**Imagen 67.- Pistón hidráulico con manómetro que acciona el marco móvil de la Imagen 66 en la plataforma de pruebas.**

#### **5.4.1 Metodología de Ensaye**

La metodología del ensaye consiste en:

1. El primer paso consistió de forma previa tanto al ensaye como a la simulación, en el diseño de un prototipo de vivienda que cumple con requerimientos mínimos de espacio y seguridad estructural propios de los reglamentos y códigos de construcción aplicables.
2. Una vez contando con el diseño del mismo se procedió a la elaboración del proyecto ejecutivo para contratar su construcción mediante los procedimientos de licitación de obra propios de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.
3. Se construyó la vivienda sobre la plataforma de pruebas, sin incluir los acabados, cancelerías, instalaciones, etc. Solo se considera la estructura formada por muros y losas.
4. Se trazó una cuadrícula sobre los muros aledaños a la zona que se somete a hundimientos diferenciales, con el objeto de apreciar de mejor manera el comportamiento geométrico durante el ensaye.
5. Se marcaron puntos de control sobre los muros, sobre los cuales se toman las mediciones correspondientes durante el desarrollo de la prueba.

6. Se colocó el marco móvil en la posición indicada para provocar los hundimientos de acuerdo con la Imagen 38.
7. Se procedió con la aplicación de los hundimientos mediante la acción del pistón hidráulico, haciendo pausas para tomar mediciones sobre los puntos de control.
8. Se llegó al máximo desplazamiento posible y se procedió a retirar la fuerza del pistón hidráulico sobre la estructura, así como con la toma de los datos finales de deformación permanente.

#### 5.4.2 Resultados de Ensaye

El ensaye de la vivienda se realizó hasta alcanzar un hundimiento diferencial máximo de 8.5cm, el cual representa una distorsión angular del 5.67%. No se pudo ir más allá debido que se presentaron fallas inesperadas en la conexión inferior de los tracks con los studs, la conexión falló por deslizamiento del bloque de cortante en la sección crítica, donde el área neta del track resulta menor por la presencia de los agujeros de los tornillos de conexión.



**Imagen 68 e Imagen 69.- Falla inesperada de la conexión inferior de los studs con los tracks por deslizamiento del bloque de cortante en la sección crítica.**

Aunado a lo anterior la estructura de la vivienda es relativamente liviana comparado contra la rigidez en el plano de los paneles que forman los muros, con lo cual el peso propio del sistema aunque está a favor del



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

hundimiento, aporta muy poco al descenso de los muros junto con la cimentación (en este caso, junto con el track inferior), con lo cual la fuerza que se genera al jalar hacia abajo la vivienda durante el ensaye la toman en su mayor parte los tornillos que conectan los tracks con lo studs.

Lo anterior es prueba de que el track no está diseñado para trabajar de esa manera, lo que implica que una mejora muy importante para la adaptación de este sistema constructivo a terrenos susceptibles a los hundimientos diferenciales, sería el reemplazo del track inferior por un elemento de mayor capacidad mecánica, al igual que el rediseño de la conexión inferior de los studs.

Por otro lado, antes de llegar a la falla inesperada se observó un comportamiento satisfactorio del resto de la estructura, no habiéndose presentado ningún tipo de falla para estos niveles de distorsión (un poco menores al 5.67%) que en el caso de los muros de mampostería del sistema tradicional de construcción, indudablemente el hundimiento inducido en este caso hubiera colapsado a los mismos por tratarse de un sistema altamente rígido y menos dúctil.

Se puede observar que la mayor parte de la fuerza cortante en el plano de los muros la tomaron los contravientos, que a final de cuentas están diseñados para realizar este trabajo de manera adecuada, en la Imagen 70 e Imagen 70 se observa que solo toman las fuerzas de tensión diagonal y que no trabajan a compresión, ya que son elementos de muy baja inercia lateral. En caso de haberse presentado la falla de los contravientos, solo se trata de una falla local, ya que los paneles de muro por si mismos son capaces de absorber fuerzas de tensión diagonal en su plano, como quedó demostrado en los ensayos realizados con anterioridad por carga lateral, presentados en el Capítulo 3.



**Imagen 70 e Imagen 71.- Sistema de contravientos del prototipo de vivienda. Durante el ensaye por hundimientos diferenciales se observa que la parte del contraviento a tensión toma el cortante; el brazo de compresión se pandea por su baja inercia lateral.**

Se llevará a cabo el mejoramiento local de las estructura de la vivienda para permitir desarrollar el ensayé hasta más altos niveles de distorsión angular y comprobar lo que con los demás ensayes y simulaciones venimos suponiendo: que el sistema constructivo de paneles de muro formados por perfiles de acero rolado en frio brinda una estructura resistente y dúctil, que es capaz de absorber los hundimientos diferenciales sin implicar una reducción importante de su capacidad estructural.

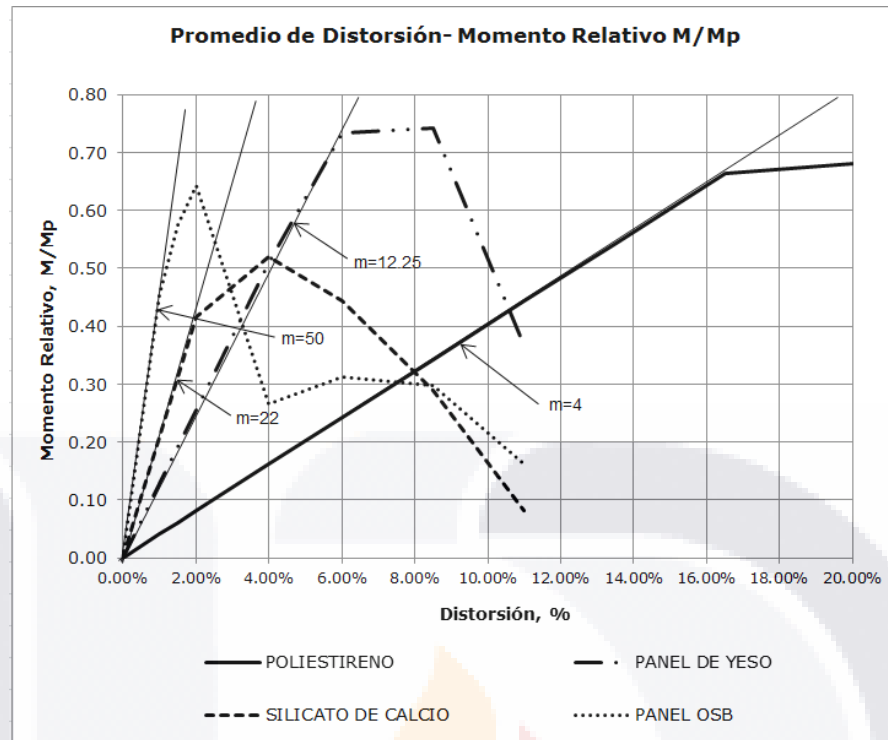
## CONCLUSIONES

Se concluyó que la diferencia de los esfuerzos y deformaciones al final de las prueba en probetas de acero no varía significativamente en función de la velocidad de aplicación de las cargas, puesto que para el caso en estudio se trata de periodos grandes de aplicación de las mismas, del orden de años.

Las principales diferencias entre los esfuerzos y las deformaciones en los ensayos de probetas de acero, se presentan a edades tempranas, que finalmente conducen a resultados muy parecidos de los esfuerzos y deformaciones al final del evento.

Para los ensayos y simulaciones realizados a paneles de muro, mediante las gráficas carga-desplazamiento y momento-rotación obtenidas, se concluye que el sistema constructivo con perfiles ligeros de acero rolado en frio combinados con placas de poliestireno es el que produce la estructura más dúctil estructuralmente hablando en relación a los otros tipos de recubrimiento probados: placas de yeso, de silicato de calcio y OSB, ya que permite a la estructura adaptarse fácilmente a las condiciones de hundimientos diferenciales en su cimentación, sin comprometer de manera significativa el grado de seguridad estructural del sistema.

Como se observa en la imagen 72, los paneles de muro formados por perfiles ligeros de acero rolado en frio combinados con placas de OSB (Oriented Strand Board), son los más rígidos, seguidos de los paneles combinados con placas de silicato de calcio, después el de placas de yeso y finalmente el de placas de poliestireno como se mencionó en el párrafo anterior.



**Imagen 72.- Gráfica que resume el comportamiento típico que presentan los modelos de elementos finitos de los paneles de muro formado por perfiles de acero roloado en frío con placas de distintos recubrimientos, los cuales se someten a simulación de hundimientos diferenciales mediante un análisis pulldown**

En cuanto a los paneles formados por perfiles ligeros de acero roloado en frío combinados con placas de poliestireno, que finalmente se escogieron para construir el prototipo de vivienda a utilizarse en terrenos fracturados por tratarse del sistema más dúctil, se demostró que interactuando entre sí en el prototipo de vivienda, ante la presencia de una ventana se produce una distribución de fuerzas internas entre los perfiles no uniforme cuando la misma es afectada por un hundimiento diferencial, ocasionando que los perfiles que se encuentran en el paño de la ventana sean lo que menos solicitaciones mecánicas presentan. Esto se debe a que la conexión entre el stud del paño lateral de la ventana con el track del paño superior e inferior de la misma, posee una conexión muy simple que se puede considerar articulada, por tanto permite la distorsión angular de la ventana y las solicitaciones recaen sobre el resto de los perfiles que se encuentran confinados por ambos lados en el plano del muro por las placas de

poliestireno. Situación contraria a los muros tradicionales de mampostería o concreto, que son sistemas más rígidos y las principales solicitaciones se encuentran en el perímetro de los huecos ante una distorsión angular.

Se demostró que en los muros sin huecos en el prototipo de vivienda, ante la presencia de hundimientos diferenciales la distribución de solicitaciones mecánicas en los studs de los mismos sucede de manera muy uniforme tanto en la conexión con los tracks inferiores como con los superiores; sin embargo, el stud que se encuentran en la esquina de los muros afectados por el hundimiento diferencial, es el que menos solicitación mecánica presenta.

Se concluye que es necesario reconsiderar las conexiones de los studs con su cimentación (tracks de la parte inferior de los muros) para que trabajen de manera conjunta y no ocurran desprendimientos inesperados, lo que permitiría aprovechar la ductilidad demostrada del resto de la estructura formada por paneles de perfiles de acero rolado en frío con placas de poliestireno sin presentarse aberturas en los muros.

Finalmente, se observó experimental y numéricamente el muy adecuado comportamiento estructural desde el punto de vista de ductilidad de las estructuras de acero rolado en frío de lámina delgada, ya que dichos sistemas son capaces de soportar adecuadamente grandes distorsiones angulares (debidas a hundimientos diferenciales) sin sufrir daños apreciables, y con una capacidad portante muy adecuada, medida en base a la relación entre el momento actuante y el momento plástico, por pandeo local o pandeo distorsional de los perfiles. Por tal motivo, la utilización de este sistema constructivo-estructural sería muy adecuado para reducir daños y garantizar la seguridad estructural en viviendas construidas en zonas afectadas por hundimientos diferenciales debidos a agrietamientos del suelo asociados el fenómeno de subsidencia.

**GLOSARIO**

**OSB.** Placa de madera que significa por sus siglas en inglés “Oriented Strand Board” y corresponde a una placa hecha de láminas finas y largas de madera, orientadas en una misma dirección y unidas mediante aglomerantes aplicando presión y altas temperaturas

**Pushover.** Técnica de análisis estructural en la que el modelo de la estructura se somete a una carga horizontal monotónica, previamente definida, la cual se va incrementando hasta que se alcance la deformación máxima considerada o que la estructura falle por la formación de un mecanismo inestable por articulaciones plásticas. El propósito del análisis Pushover, es evaluar el desempeño estructural estimando la resistencia y capacidades de deformación usando un análisis estático no lineal, y comparando estas capacidades con las demandas en los niveles de desempeño correspondiente

**Pulldown.** Es una técnica de análisis estructural análoga al Pushover y se refiere a jalar una estructura mediante una carga monotónica incremental, de manera que las deformaciones verticales aumenten hasta llegar a un mecanismo de colapso por la presencia de articulaciones plásticas.

**Distorsión Angular** Deformación lateral de un cuerpo causada por un esfuerzo cortante, que se define como la tangente del ángulo de distorsión de la deformación.

**Studs.** Cada uno de los elementos verticales que forman los paneles de muro del Sistema Constructivo Steel Framing. Se trata de perfiles de sección abierta en “C” con cejas y de pared delgada, formados de láminas roladas en frío.

**Tracks.** Cada uno de los elementos horizontales que forman los paneles de muro del Sistema Constructivo Steel Framing. Se trata de perfiles de sección abierta en “C” y pared delgada, formados de láminas roladas en frío. Estos forman el apoyo o alineamiento de los elementos verticales “Studs”

**ANSYS.** Empresa que desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación por elementos finitos para

predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real.

**Articulaciones Plásticas.** Para efectos de este trabajo, se entenderá como rótula plástica a la zona de la estructura que ha alcanzado esfuerzos más allá del límite elástico del material, con lo cual se pierde gran parte de la rigidez de la sección y tiende a seguir deformándose o rotando sin el aumento de los esfuerzos o fuerzas que la llevaron al límite elástico.



## BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2007). *ASTM A370 - 07a Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. Conshohocken, PA.
- Anónimo. (s.f.). *Vive Toscana*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2013, de <http://www.vivetoscana.com/la-torre-de-pisa-historia-y-curiosidades-de-uno-de-los-monumentos-mas-famosos-de-toscana/>
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40)*. Redwood City, California: California Seismic Safety Commission.
- Aranda, J. J. (1989). Geología Preliminar del Graven de Aguascalientes. *Revista del Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México*, 22-32.
- Arroyo, C. M. (2004). *El agrietamiento en Aguascalientes : causas y efectos*. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Bateman, B. W. (1997). Light-Gauge Steel Verses Conventional Wood Framing In Residential Construction. *Journal of Construction Education*, 99-108.
- Cabello, S. B. (2007). Comportamiento de Relajación de Esfuerzos en un Acero SAE 1065, en Condiciones de Tasa de Deformación Variable Durante la Aplicación del Pre-Esfuerzo. *8o. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*.
- Calvillo, P., & Atxaga, G. (2001). Estudio del Comportamiento a Fluencia de un Acero Tipo P91. *ANALES DE MECÁNICA DE LA FRACTURA*.
- Celigüeta, J. T. (2011). *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural*. San Sebastián - Gipuzkoa: UNICOPIA C.B.
- Chi-Ling, P. (2011). Monotonic Shear Tests of Cold-Formed Steel Wall Frames With Sheathing. *Thin Walled Structures*, 363-370.
- Eray, B., & Cagatay, A. (2012). Behavior of Cold-Formed Steel Wall Panels Under Monotonic Horizontal Loading. *Thin Walled Structures*, 1-8.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2000). *PRESTANDARD AND COMMENTARY FOR THE SEISMIC REHABILITATION OF*



*BUILDINGS (FEMA 356)*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2003). *NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES (FEMA 450)*. Washington, D.C.: BUILDING SEISMIC SAFETY COUNCIL NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES.

Gobierno del Estado de Aguascalientes. (Octubre de 2011). *Sistema de Información de Fallas Geológicas y Grietas*. Obtenido de <http://www.aguascalientes.gob.mx/sop/sifagg/web/mapa.asp>

Grummel, A. (2010). *Development of Fragility Curves for Cold-Formed Steel Light-Framed Structural Systems: a Two-Pronged Approach*. Washington: Washington State University.

Hughes, T. J. (1994). *Recent developments in finite element analysis : a book dedicated to Robert L. Taylor*. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering.

Kalavagunta, S., & Naganathan, S. (2012). Pushover Analysis for Cold Formed Storage Rack Structures . *Jordan Journal of Civil Engineering*, 489-500.

Moro, L., & Saggio, M. C. (1999). Estudio Comparativo de Parámetros que Permiten Predecir Propiedades al Creep de un Acero. *Anales SAM*.

Nithyadharan, M. (2012). Behaviour of Cold-Formed Steel Shear Wall Panels Under Monotonic and Reversed Cyclic Loading. *Thin Walled Structures*, 12-23.

Otero, P. L. (2006). Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos. *Ediciones MECANICA.*, 7-17.

Pacheco, M. J. (2007). *Modelo de Subsistencia del Valle De Querétaro y Predicción de Agrietamientos Superficiales*. Queretaro: Universidad Nacional Autónoma de México Campus Juriquilla.

Sang-Wook, B., & LaBoube, R. A. (2008). Progressive collapse of cold-formed steel framed structures. *Thin Walled Structures*, 706-719.

Sarmanho, F. A., & Moraes, d. C. (2007). *Steel Framing: Arquitectura*. Santiago de Chile: Instituto Latinoamerica del Fierro y el Acero-ILAFA.

Schafer, B. (2012). Moment-Rotation Characterization of Cold-Formed Steel Beams Depending on Cross-Section Slenderness. *15th World Conference on Earthquake Engineering*, 24-28.

Xuhong, Z., & Yu, S. (2006). Study on Shear Resistance of Cold-Formed Steel Stud Walls in Residential Structure. *Advances in Engineering Structures, Mechanics & Construction*, 423-435.





**ANEXO A. RESULTADOS DEL ANÁLISIS PULLDOWN DEL CAPÍTULO 4**

MODELO	PASO	HUND.	LONG.	DIST.	STUD			1				2				3				4				5				6				7				
					EXTREMO			INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		
					Mp	Mu	Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	
					N-m	N-m	rad																													
PANEL DE POLIESTIRENO UAA C/POL	0	-0.055240	1.57	-3.52%	2820	2820	3.26E-03	0.13	0.12	0.05	0.05	0.08	0.07	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.10	0.10	0.10	0.06	0.06	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1	-0.079226	1.57	-5.05%	2820	2820	3.26E-03	0.18	0.18	0.08	0.07	0.11	0.11	0.13	0.13	0.01	0.00	0.01	0.00	0.15	0.15	0.15	0.14	0.09	0.08	0.09	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	-0.110253	1.57	-7.02%	2820	2820	3.26E-03	0.25	0.25	0.11	0.10	0.16	0.15	0.18	0.18	0.01	0.00	0.01	0.00	0.21	0.21	0.20	0.20	0.12	0.12	0.12	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	-0.135253	1.57	-8.61%	2820	2820	3.26E-03	0.31	0.31	0.13	0.13	0.19	0.19	0.22	0.22	0.01	0.00	0.01	0.00	0.26	0.26	0.25	0.25	0.15	0.15	0.15	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	-0.160253	1.57	-10.21%	2820	2820	3.26E-03	0.37	0.37	0.15	0.15	0.23	0.23	0.27	0.26	0.01	0.01	0.01	0.01	0.31	0.31	0.30	0.30	0.18	0.18	0.17	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	-0.185253	1.57	-11.80%	2820	2820	3.26E-03	0.42	0.43	0.18	0.17	0.26	0.26	0.31	0.31	0.01	0.01	0.01	0.01	0.36	0.36	0.34	0.34	0.21	0.20	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	6	-0.210253	1.57	-13.39%	2820	2820	3.26E-03	0.48	0.49	0.20	0.20	0.30	0.30	0.35	0.35	0.02	0.01	0.01	0.01	0.41	0.41	0.39	0.39	0.24	0.23	0.23	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	7	-0.235253	1.57	-14.98%	2820	2820	3.26E-03	0.54	0.54	0.23	0.22	0.34	0.34	0.39	0.39	0.02	0.01	0.02	0.01	0.46	0.46	0.43	0.44	0.26	0.26	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	8	-0.260253	1.57	-16.58%	2820	2820	3.26E-03	0.60	0.60	0.25	0.25	0.37	0.37	0.43	0.43	0.02	0.01	0.02	0.01	0.50	0.51	0.48	0.48	0.29	0.29	0.28	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	9	-0.292536	1.57	-18.63%	2820	2820	3.26E-03	0.67	0.77	0.28	0.28	0.42	0.42	0.49	0.49	0.02	0.02	0.02	0.01	0.57	0.57	0.54	0.54	0.33	0.33	0.32	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
10	-0.305240	1.57	-19.44%	2820	2820	3.26E-03	0.70	0.85	0.29	0.29	0.44	0.44	0.51	0.51	0.02	0.02	0.02	0.02	0.59	0.60	0.56	0.57	0.34	0.34	0.33	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
UAA S/POL	0	-0.077429	1.57	-4.93%	2820	2820	3.26E-03	0.16	0.15	0.08	0.07	0.11	0.11	0.12	0.12	0.00	0.00	0.01	0.00	0.15	0.14	0.14	0.14	0.09	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	1	-0.097017	1.57	-6.18%	2820	2820	3.26E-03	0.20	0.20	0.10	0.09	0.14	0.14	0.15	0.15	0.01	0.00	0.01	0.00	0.19	0.18	0.18	0.17	0.11	0.10	0.11	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	2	-0.122017	1.57	-7.77%	2820	2820	3.26E-03	0.25	0.25	0.12	0.12	0.18	0.18	0.19	0.19	0.01	0.00	0.01	0.00	0.23	0.23	0.23	0.22	0.14	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	3	-0.147017	1.57	-9.36%	2820	2820	3.26E-03	0.30	0.30	0.15	0.14	0.22	0.21	0.23	0.23	0.01	0.00	0.01	0.01	0.28	0.28	0.27	0.27	0.16	0.16	0.16	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	4	-0.172017	1.57	-10.96%	2820	2820	3.26E-03	0.35	0.35	0.17	0.17	0.25	0.25	0.27	0.27	0.01	0.00	0.01	0.01	0.33	0.33	0.32	0.31	0.19	0.19	0.19	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	5	-0.197017	1.57	-12.55%	2820	2820	3.26E-03	0.41	0.40	0.20	0.19	0.29	0.29	0.31	0.31	0.01	0.01	0.02	0.01	0.38	0.37	0.36	0.36	0.22	0.22	0.21	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	6	-0.222017	1.57	-14.14%	2820	2820	3.26E-03	0.46	0.46	0.22	0.22	0.33	0.33	0.35	0.35	0.01	0.01	0.02	0.01	0.42	0.42	0.41	0.41	0.25	0.24	0.24	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	7	-0.247017	1.57	-15.73%	2820	2820	3.26E-03	0.51	0.51	0.24	0.24	0.37	0.36	0.39	0.39	0.02	0.01	0.02	0.01	0.47	0.47	0.46	0.45	0.28	0.27	0.27	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	8	-0.272017	1.57	-17.33%	2820	2820	3.26E-03	0.56	0.56	0.27	0.27	0.40	0.40	0.43	0.43	0.02	0.01	0.02	0.02	0.52	0.52	0.50	0.50	0.30	0.30	0.30	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	9	-0.297017	1.57	-18.92%	2820	2820	3.26E-03	0.61	0.61	0.29	0.29	0.44	0.44	0.47	0.47	0.02	0.01	0.03	0.02	0.57	0.57	0.55	0.55	0.33	0.33	0.32	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	10	-0.323697	1.57	-20.62%	2820	2820	3.26E-03	0.67	0.74	0.32	0.32	0.48	0.48	0.51	0.51	0.02	0.01	0.03	0.02	0.62	0.62	0.60	0.60	0.36	0.36	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
11	-0.327429	1.57	-20.86%	2820	2820	3.26E-03	0.67	0.76	0.32	0.32	0.48	0.48	0.52	0.52	0.02	0.01	0.03	0.02	0.63	0.64	0.60	0.60	0.37	0.36	0.36	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
UAA C/POL 5CM-C88	0	-0.061176	1.57	-3.90%	2820	2820	3.26E-03	0.14	0.13	0.06	0.05	0.09	0.08	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.11	0.11	0.11	0.07	0.06	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	1	-0.077906	1.57	-4.96%	2820	2820	3.26E-03	0.17	0.17	0.08	0.07	0.11	0.11	0.13	0.12	0.01	0.00	0.01	0.00	0.15	0.15	0.14	0.14	0.09	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	2	-0.109290	1.57	-6.96%	2820	2820	3.26E-03	0.24	0.24	0.11	0.10	0.16	0.15	0.18	0.18	0.01	0.00	0.01	0.00	0.21	0.21	0.20	0.20	0.12	0.12	0.12	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	3	-0.134290	1.57	-8.55%	2820	2820	3.26E-03	0.30	0.30	0.13	0.13	0.19	0.19	0.22	0.22	0.01	0.00	0.01	0.00	0.26	0.26	0.25	0.25	0.15	0.15	0.15	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	4	-0.159290	1.57	-10.15%	2820	2820	3.26E-03	0.36	0.36	0.15	0.15	0.23	0.23	0.26	0.26	0.01	0.01	0.01	0.01	0.31	0.31	0.29	0.29	0.18	0.17	0.17	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	5	-0.184290	1.57	-11.74%	2820	2820	3.26E-03	0.41	0.41	0.18	0.18	0.26	0.26	0.30	0.30	0.01	0.01	0.01	0.01	0.36	0.36	0.34	0.34	0.21	0.20	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	6	-0.209290	1.57	-13.33%	2820	2820	3.26E-03	0.47	0.47	0.20	0.20	0.30	0.30	0.34	0.34	0.01	0.01	0.02	0.01	0.40	0.40	0.39	0.39	0.23	0.23	0.23	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	7	-0.234290	1.57	-14.92%	2820	2820	3.26E-03	0.52	0.53	0.23	0.22	0.34	0.34	0.39	0.39	0.02	0.01	0.02	0.01	0.45	0.45	0.43	0.44	0.26	0.26	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	8	-0.259290	1.57	-16.52%	2820	2820	3.26E-03	0.58	0.58	0.25	0.25	0.37	0.37	0.43	0.43	0.02	0.01	0.02	0.01	0.50																





MODELO	PASO	HUND.	LONG.	DIST.	STUD			1				2				3				4				5				6				7			
					EXTREMO			INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR	
					Mp	Mu	Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry		
					N-m	N-m	rad																												
FFM-C09-HO	1	-0.023146	2.40	-0.96%	3890	3890	4.50E-03	0.12	0.11	0.10	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12	0.11	0.10			
	2	-0.048146	2.40	-2.01%	3890	3890	4.50E-03	0.24	0.24	0.21	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	0.22	0.22			
	3	-0.073146	2.40	-3.05%	3890	3890	4.50E-03	0.37	0.37	0.32	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.39	0.34	0.33			
	4	-0.098146	2.40	-4.09%	3890	3890	4.50E-03	0.50	0.50	0.43	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	0.52	0.45	0.45			
	5	-0.133961	2.40	-5.58%	3890	3890	4.50E-03	0.67	0.77	0.59	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.85	0.61	0.62			
	6	-0.165124	2.40	-6.88%	3890	3890	4.50E-03	0.81	1.14	0.71	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84	1.24	0.74	0.96			
	7	-0.182361	2.40	-7.60%	3890	3890	4.50E-03	0.88	1.35	0.78	1.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	1.46	0.81	1.15			
	8	-0.182364	2.40	-7.60%	3890	3890	4.50E-03	0.87	1.35	0.77	1.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	8.43	0.84	1.19			
	9	-0.193855	2.40	-8.08%	3890	3890	4.50E-03	0.46	1.46	0.82	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	8.98	0.88	1.32			
	10	-0.193858	2.40	-8.08%	3890	3890	4.50E-03	0.34	8.11	0.82	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	8.90	0.88	1.32			
	11	-0.206102	2.40	-8.59%	3890	3890	4.50E-03	0.36	8.64	0.87	1.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	9.48	0.46	1.46			
	12	-0.206104	2.40	-8.59%	3890	3890	4.50E-03	0.36	8.62	0.86	1.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	9.70	0.36	8.47			
	13	-0.225475	2.40	-9.39%	3890	3890	4.50E-03	0.40	9.45	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	10.64	0.39	9.28			
	14	-0.225477	2.40	-9.39%	3890	3890	4.50E-03	0.40	9.45	0.36	8.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	10.62	0.39	9.22			
	15	-0.234691	2.40	-9.78%	3890	3890	4.50E-03	0.41	9.85	0.37	8.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.98	0.41	9.60			
	16	-0.234694	2.40	-9.78%	3890	3890	4.50E-03	0.41	9.78	0.37	8.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	16.60	0.41	9.78			
	17	-0.255759	2.40	-10.66%	3890	3890	4.50E-03	0.44	10.68	0.40	9.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.12	0.45	10.68			
FFM-C12-FO	0	-0.012502	1.20	-1.04%	3890	3890	4.50E-03	0.14	0.14	0.12	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	1	-0.037502	1.20	-3.13%	3890	3890	4.50E-03	0.42	0.42	0.36	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.19	0.18	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	2	-0.054862	1.20	-4.57%	3890	3890	4.50E-03	0.62	0.62	0.52	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.28	0.27	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	3	-0.085852	1.20	-7.15%	3890	3890	4.50E-03	0.46	1.46	0.80	1.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.44	0.42	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	4	-0.085854	1.20	-7.15%	3890	3890	4.50E-03	0.40	9.09	0.81	1.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.44	0.41	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	5	-0.100547	1.20	-8.38%	3890	3890	4.50E-03	0.46	10.98	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.45	0.48	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	6	-0.100549	1.20	-8.38%	3890	3890	4.50E-03	0.46	10.98	0.41	9.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.45	0.43	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	7	-0.100951	1.20	-8.41%	3890	3890	4.50E-03	0.00	10.98	0.41	9.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.45	0.43	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	8	-0.100953	1.20	-8.41%	3890	3890	4.50E-03	0.02	17.32	0.41	9.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.45	0.42	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	9	-0.115760	1.20	-9.65%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	10.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.47	0.49	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	10	-0.115762	1.20	-9.65%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.01	17.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.47	0.45	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	11	-0.155458	1.20	-12.95%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.62	0.62	0.61	0.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	12	-0.182392	1.20	-15.20%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.89	0.72	0.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	13	-0.207392	1.20	-17.28%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	1.13	0.81	1.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	14	-0.232392	1.20	-19.37%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.91	1.38	0.91	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	15	-0.238607	1.20	-19.88%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	1.44	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	16	-0.238610	1.20	-19.88%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	10.35	0.44	10.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	17	-0.250419	1.20	-20.87%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	10.98	0.00	10.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	18	-0.250422	1.20	-20.																															

MODELO	PASO	HUND.	LONG.	DIST.	STUD			1		2		3		4		5		6		7																		
					EXTREMO			INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR																
					Mp	Mu	Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry													
					N-m	N-m	rad																															
		m	m	%																																		
FFM-C09-HT	0	-0.009629	1.20	-0.80%	3890	3890	4.50E-03	0.11	0.11	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	1	-0.034629	1.20	-2.89%	3890	3890	4.50E-03	0.41	0.41	0.33	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.17	0.17	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	2	-0.052279	1.20	-4.36%	3890	3890	4.50E-03	0.62	0.62	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.27	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	3	-0.082058	1.20	-6.84%	3890	3890	4.50E-03	0.46	1.46	0.76	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.42	0.39	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	4	-0.082060	1.20	-6.84%	3890	3890	4.50E-03	0.39	8.69	0.77	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.42	0.38	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	5	-0.101208	1.20	-8.43%	3890	3890	4.50E-03	0.00	10.98	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.46	0.47	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	6	-0.101211	1.20	-8.43%	3890	3890	4.50E-03	0.02	16.87	0.39	8.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.46	0.43	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	7	-0.123100	1.20	-10.26%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	10.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	0.52	0.53	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	8	-0.123102	1.20	-10.26%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.01	17.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	0.52	0.50	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	9	-0.153193	1.20	-12.77%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	0.71	0.62	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	10	-0.178193	1.20	-14.85%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.98	0.71	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	11	-0.203193	1.20	-16.93%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	1.26	0.80	1.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	12	-0.221863	1.20	-18.49%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	1.46	0.87	1.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	13	-0.221866	1.20	-18.49%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	9.24	0.91	1.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	14	-0.228704	1.20	-19.06%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	9.55	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	15	-0.228707	1.20	-19.06%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	9.94	0.40	9.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	16	-0.252063	1.20	-21.01%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.98	0.44	10.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	17	-0.252066	1.20	-21.01%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	17.63	0.45	10.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
18	-0.259629	1.20	-21.64%	3890	3890	4.50E-03	0.00	20.38	0.00	20.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	18.20	0.00	10.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
FFM-C12-H0	0	-0.007179	1.20	-0.60%	3890	3890	4.50E-03	0.12	0.12	0.09	0.09	0.04	0.04	0.04	0.03	0.08	0.08	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	1	-0.032179	1.20	-2.68%	3890	3890	4.50E-03	0.54	0.54	0.41	0.41	0.18	0.18	0.17	0.17	0.35	0.35	0.27	0.27	0.32	0.32	0.29	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	2	-0.036672	1.20	-3.06%	3890	3890	4.50E-03	0.62	0.62	0.47	0.47	0.21	0.20	0.20	0.20	0.40	0.40	0.31	0.31	0.36	0.37	0.34	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	-0.058958	1.20	-4.91%	3890	3890	4.50E-03	0.47	1.46	0.73	0.94	0.34	0.34	0.32	0.32	0.63	0.67	0.49	0.49	0.58	0.59	0.54	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	-0.058961	1.20	-4.91%	3890	3890	4.50E-03	0.31	6.12	0.74	0.94	0.47	0.46	0.32	0.32	0.54	0.63	0.49	0.49	0.51	0.57	0.53	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	-0.076925	1.20	-6.41%	3890	3890	4.50E-03	0.38	8.20	0.46	1.46	0.61	0.61	0.42	0.42	0.70	0.82	0.64	0.66	0.67	0.74	0.68	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	6	-0.076928	1.20	-6.41%	3890	3890	4.50E-03	0.38	8.23	0.31	6.35	0.62	0.62	0.56	0.56	0.69	0.82	0.55	0.62	0.67	0.74	0.62	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	7	-0.099930	1.20	-8.33%	3890	3890	4.50E-03	0.00	10.90	0.38	8.43	0.76	1.01	0.71	0.86	0.86	1.27	0.70	0.85	0.84	1.20	0.79	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8	-0.099932	1.20	-8.33%	3890	3890	4.50E-03	0.04	14.13	0.38	8.45	0.83	1.19	0.71	0.86	0.79	1.24	0.70	0.85	0.79	1.20	0.79	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	9	-0.113223	1.20	-9.44%	3890	3890	4.50E-03	0.02	16.17	0.42	9.65	0.47	1.46	0.78	1.07	0.90	1.36	0.78	1.05	0.89	1.34	0.88	1.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	10	-0.113226	1.20	-9.44%	3890	3890	4.50E-03	0.02	17.20	0.42	9.67	0.26	5.71	0.80	1.10	0.75	1.20	0.77	1.05	0.81	1.28	0.89	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	11	-0.118138	1.20	-9.84%	3890	3890	4.50E-03	0.01	17.99	0.43	10.12	0.27	5.98	0.83	1.18	0.78	1.25	0.80	1.13	0.85	1.34	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	12	-0.118141	1.20	-9.85%	3890	3890	4.50E-03	0.01	17.96	0.42	9.68	0.28	6.07	0.74	1.08	0.78	1.24	0.92	1.43	0.88	1.34	0.30	6.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	13	-0.119985	1.20	-10.00%	3890	3890	4.50E-03	0.01	18.26	0.43	9.84	0.28	6.17	0.75	1.10	0.79	1.26	0.47	1.46	0.89	1.36	0.31	6.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	14	-0.119987	1.20	-10.00%	3890	3890</																																



MODELO	PASO	HUND.	LONG.	DIST.	STUD			1				2				3				4				5				6				7			
					EXTREMO			INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR	
					Mp	Mu	Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry		
					N-m	N-m	rad																												
WP-10/M/25A	7	-0.086739	1.20	-7.23%	2820	2820	3.26E-03	0.32	13.47	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	13.15	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	8	-0.086741	1.20	-7.23%	2820	2820	3.26E-03	0.32	13.48	0.17	6.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	13.16	0.17	6.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	9	-0.111741	1.20	-9.31%	2820	2820	3.26E-03	0.40	17.43	0.21	8.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	17.02	0.21	8.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	10	-0.128243	1.20	-10.69%	2820	2820	3.26E-03	0.00	19.97	0.24	9.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	19.57	0.24	9.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	11	-0.128245	1.20	-10.69%	2820	2820	3.26E-03	0.02	23.07	0.24	9.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	19.43	0.24	9.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	12	-0.131780	1.20	-10.98%	2820	2820	3.26E-03	0.02	23.71	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.97	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	13	-0.131782	1.20	-10.98%	2820	2820	3.26E-03	0.02	23.55	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	23.09	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	14	-0.156782	1.20	-13.07%	2820	2820	3.26E-03	0.01	28.06	0.29	12.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	27.52	0.29	12.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	15	-0.181782	1.20	-15.15%	2820	2820	3.26E-03	0.01	32.58	0.33	13.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	31.95	0.33	13.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	16	-0.206782	1.20	-17.23%	2820	2820	3.26E-03	0.00	37.10	0.37	15.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.38	0.37	15.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	17	-0.243650	1.20	-20.30%	2820	2820	3.26E-03	0.00	38.48	0.43	18.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.48	0.43	18.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	18	-0.251635	1.20	-20.97%	2820	2820	3.26E-03	0.00	38.48	0.45	19.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.48	0.45	19.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	0	-0.001648	1.20	-0.14%	2820	2820	3.26E-03	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	1	-0.025740	1.20	-2.15%	2820	2820	3.26E-03	0.61	0.62	0.30	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.60	0.30	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	2	-0.041723	1.20	-3.48%	2820	2820	3.26E-03	0.46	1.46	0.48	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	1.41	0.48	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	3	-0.041725	1.20	-3.48%	2820	2820	3.26E-03	0.18	6.58	0.48	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.87	1.38	0.48	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	4	-0.044671	1.20	-3.72%	2820	2820	3.26E-03	0.19	7.06	0.51	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	1.46	0.51	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	5	-0.044674	1.20	-3.72%	2820	2820	3.26E-03	0.18	6.83	0.51	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	6.67	0.51	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
6	-0.078565	1.20	-6.55%	2820	2820	3.26E-03	0.29	12.18	0.85	1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	11.89	0.85	1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
7	-0.086658	1.20	-7.22%	2820	2820	3.26E-03	0.32	13.45	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	13.14	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
8	-0.086661	1.20	-7.22%	2820	2820	3.26E-03	0.32	13.46	0.16	6.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	13.15	0.16	6.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
9	-0.111661	1.20	-9.31%	2820	2820	3.26E-03	0.40	17.41	0.21	8.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	17.01	0.21	8.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
10	-0.128242	1.20	-10.69%	2820	2820	3.26E-03	0.00	19.97	0.24	9.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	19.57	0.24	9.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
11	-0.128245	1.20	-10.69%	2820	2820	3.26E-03	0.02	23.07	0.24	9.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	19.43	0.24	9.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
12	-0.131779	1.20	-10.98%	2820	2820	3.26E-03	0.02	23.71	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.97	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
13	-0.131781	1.20	-10.98%	2820	2820	3.26E-03	0.02	23.55	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	23.09	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
14	-0.156781	1.20	-13.07%	2820	2820	3.26E-03	0.01	28.06	0.28	12.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	27.52	0.28	12.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
15	-0.181781	1.20	-15.15%	2820	2820	3.26E-03	0.01	32.58	0.33	13.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	31.95	0.33	13.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
16	-0.206781	1.20	-17.23%	2820	2820	3.26E-03	0.00	37.10	0.37	15.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.38	0.37	15.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
17	-0.243644	1.20	-20.30%	2820	2820	3.26E-03	0.00	38.48	0.43	18.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.48	0.43	18.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
18	-0.251648	1.20	-20.97%	2820	2820	3.26E-03	0.00	38.48	0.45	19.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.48	0.45	19.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
WP-08/M/25A	0	-0.001803	1.20	-0.15%	2820	2820	3.26E-03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	1	-0.026096	1.20	-2.17%	2820	2820	3.26E-03	0.61	0.62	0.32	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.61	0.32	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	2	-0.042204	1.20	-3.52%	2820	2820	3.26E-03	0.46	1.46	0.51	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.91	1.42	0.51	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
	3	-0.042206	1.20	-3.52%	2820	2820	3.26E-03	0.18	6.76	0.52	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0																			

MODELO	PASO	HUND.	LONG.	DIST.	STUD			1				2				3				4				5				6				7			
					EXTREMO			INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR		INFERIOR		SUPERIOR	
					Mp	Mu	Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry	M/Mp	R/Ry
					N-m	N-m	rad																												
PANEL OSB SSO	4	-0.044671	1.20	-3.72%	2820	2820	3.26E-03	0.19	7.06	0.51	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	1.46	0.51	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	5	-0.044674	1.20	-3.72%	2820	2820	3.26E-03	0.18	6.83	0.51	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	6.67	0.51	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	6	-0.078565	1.20	-6.55%	2820	2820	3.26E-03	0.29	12.18	0.85	1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	11.89	0.85	1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	7	-0.086658	1.20	-7.22%	2820	2820	3.26E-03	0.32	13.45	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	13.14	0.46	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	8	-0.086661	1.20	-7.22%	2820	2820	3.26E-03	0.32	13.46	0.16	6.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	13.15	0.16	6.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	9	-0.111661	1.20	-9.31%	2820	2820	3.26E-03	0.40	17.41	0.21	8.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	17.01	0.21	8.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	10	-0.128242	1.20	-10.69%	2820	2820	3.26E-03	0.00	19.97	0.24	9.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	19.57	0.24	9.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	11	-0.128245	1.20	-10.69%	2820	2820	3.26E-03	0.02	23.07	0.24	9.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	19.43	0.24	9.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	12	-0.131779	1.20	-10.98%	2820	2820	3.26E-03	0.02	23.71	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.97	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	13	-0.131781	1.20	-10.98%	2820	2820	3.26E-03	0.02	23.55	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	23.09	0.24	10.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	14	-0.156781	1.20	-13.07%	2820	2820	3.26E-03	0.01	28.06	0.28	12.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	27.52	0.28	12.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	15	-0.181781	1.20	-15.15%	2820	2820	3.26E-03	0.01	32.58	0.33	13.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	31.95	0.33	13.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	16	-0.206781	1.20	-17.23%	2820	2820	3.26E-03	0.00	37.10	0.37	15.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.38	0.37	15.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	17	-0.243644	1.20	-20.30%	2820	2820	3.26E-03	0.00	38.48	0.43	18.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.48	0.43	18.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	18	-0.251648	1.20	-20.97%	2820	2820	3.26E-03	0.00	38.48	0.45	19.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.48	0.45	19.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	FFM-009-FO	0	-0.002801	2.40	-0.12%	1870	1870	2.17E-03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		1	-0.027801	2.40	-1.16%	1870	1870	2.17E-03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
		2	-0.052801	2.40	-2.20%	1870	1870	2.17E-03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
3		-0.077801	2.40	-3.24%	1870	1870	2.17E-03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
4		-0.102801	2.40	-4.28%	1870	1870	2.17E-03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
5		-0.127801	2.40	-5.33%	1870	1870	2.17E-03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
6		-0.152801	2.40	-6.37%	1870	1870	2.17E-03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
7		-0.177801	2.40	-7.41%	1870	1870	2.17E-03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
8		-0.202801	2.40	-8.45%	1870	1870	2.17E-03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
9		-0.227801	2.40	-9.49%	1870	1870	2.17E-03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

Hoja 7 de 9 que muestra los resultados del análisis estático no lineal con la técnica pulldown en el modelo de elementos finitos del prototipo de vivienda, relativo al Capítulo 4.



