



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO PRÁCTICO
PROPUESTA DE REPARACIÓN DE VIVIENDAS DAÑADAS POR SUBSIDENCIA**

**PRESENTA
Shirley Jeanette Nieto Torres
PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN INGENIERÍA CIVIL**

**TUTOR
Dr. Mario Eduardo Zermeño de León**

**INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORAL
Dr. José Ángel Ortiz Lozano
M. en Ing. Miguel Ángel Romero Navarro**

Aguascalientes, Ags, 26 de noviembre de 2025

**DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL
DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCION
M. en ING. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
P R E S E N T E**

Por medio del presente como **DIRECTOR** designado del estudiante **SHIRLEY JEANETTE NIETO TORRES** con **ID 190247** quien realizó trabajo práctico titulado: **PROPUESTA DE REPARACIÓN DE VIVIENDAS DAÑADAS POR SUBSIDENCIA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en la fracción IX del Artículo 43 del Reglamento General de Posgrados, doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda 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.

A T E N T A M E N T E
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 1 de diciembre de 2025.

DIRECTOR DE TRABAJO PRÁCTICO


DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN

c.c.p.- SHIRLEY JEANETTE NIETO TORRES
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado

**DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL
DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCION
M. en ING. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
P R E S E N T E**

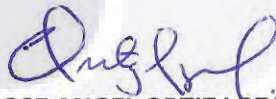
Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **SHIRLEY JEANETTE NIETO TORRES** con **ID 190247** quien realizó trabajo práctico titulado: **PROPUESTA DE REPARACIÓN DE VIVIENDAS DAÑADAS POR SUBSIDENCIA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en la fracción IX del Artículo 43 del Reglamento General de Posgrados, doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda 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.

A T E N T A M E N T E
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 1 de diciembre de 2025.

ASESOR DE TRABAJO PRÁCTICO



DR. JOSE ANGEL ORTIZ LOZANO

c.c.p.- SHIRLEY JEANETTE NIETO TORRES
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado

**DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL
DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCION
M. en ING. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA
P R E S E N T E**

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **SHIRLEY JEANETTE NIETO TORRES** con **ID 190247** quien realizó trabajo práctico titulado: **PROPUESTA DE REPARACIÓN DE VIVIENDAS DAÑADAS POR SUBSIDENCIA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en la fracción IX del Artículo 43 del Reglamento General de Posgrados, doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda 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 1 de diciembre de 2025.

ASESOR DE TRABAJO PRÁCTICO



M. en ING. MIGUEL ÁNGEL ROMERO NAVARRO

c.c.p.- SHIRLEY JEANETTE NIETO TORRES
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado

Fecha de dictaminación (dd/mm/aaaa): 01/12/2025

NOMBRE: SHIRLEY JEANETTE NIETO TORRES ID 190247

PROGRAMA: MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL LGAC (del posgrado): ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCION

MODALIDAD DEL Tesis () *Tesis por artículos () **Tesis por Patente () Trabajo Práctico (X)
PROYECTO DE GRADO: Tradicional científicos

TÍTULO: PROPUESTA DE REPARACIÓN DE VIVIENDAS DAÑADAS POR SUBSIDENCIA

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado):

El número de viviendas dañadas por subsidencia se está incrementando año con año, mientras continua la extracción de aguas subterráneas sus efectos en la superficie se reflejarán precisamente en daños en infraestructura y en viviendas, por lo que la propuesta de este trabajo de reparación de casas aporta una forma de mitigar el daño estructural del patrimonio de familias para las que representa una inversión de toda la vida. La propuesta de reparación que se presenta intenta ser lo más económica, para prolongar la vida útil de las casas dañadas.

INDICAR SEGÚN CORRESPONDA: SI, NO, NA (No Aplica)

Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:	
SI	El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI	La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI	Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI	Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI	Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI	El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI	Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
NO	Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI	Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
El egresado cumple con lo siguiente:	
SI	Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Posgrados
SI	Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc.)
SI	Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial
NA	Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario (En caso de que corresponda)
SI	Coincide con el título y objetivo registrado
SI	Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI	Tiene el CVU de la SECHTI actualizado
NA	Tiene el o los artículos aceptados o publicados y cumple con los requisitos institucionales (en caso de que proceda)
*En caso de Tesis por artículos científicos publicados (completar solo si la tesis fue por artículos)	
NA	Aceptación o Publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto según el nivel del programa
NA	El (la) estudiante es el primer autor(a)
NA	El (la) autor(a) de correspondencia es el Director (a) del Núcleo Académico
NA	En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
NA	Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
**En caso de Tesis por Patente	
NA	Cuenta con la evidencia de solicitud de patente en el Departamento de Investigación (anexarla al presente formato)

Con base en estos criterios, se autoriza continuar con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

SI X
No

Elaboró:

*NOMBRE Y FIRMA DEL(LA) CONSEJERO(A) SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCION:

Dr MIGUEL ANGEL SOTO ZAMORA

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NA de la LGAC correspondiente distinto al director o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano.

NOMBRE Y FIRMA DEL COORDINADOR DE POSGRADO:

Dr MARIO EDUARDO ZERMENO DE LEÓN

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr MARIO ESPARZA DIAZ DE LEON

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

M en ING-Ma GUADALUPE LIRA PERALTA

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 24 fracción V del Reglamento General de Posgrado, que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: Proponer criterios y mecanismos de selección, permanencia, egreso y titulación de estudiantes para asegurar la eficiencia terminal y la titulación y el Art. 28 fracción IX, atender, asesorar y dar el seguimiento del estudiantado desde su ingreso hasta su titulación.

AGRADECIMIENTOS

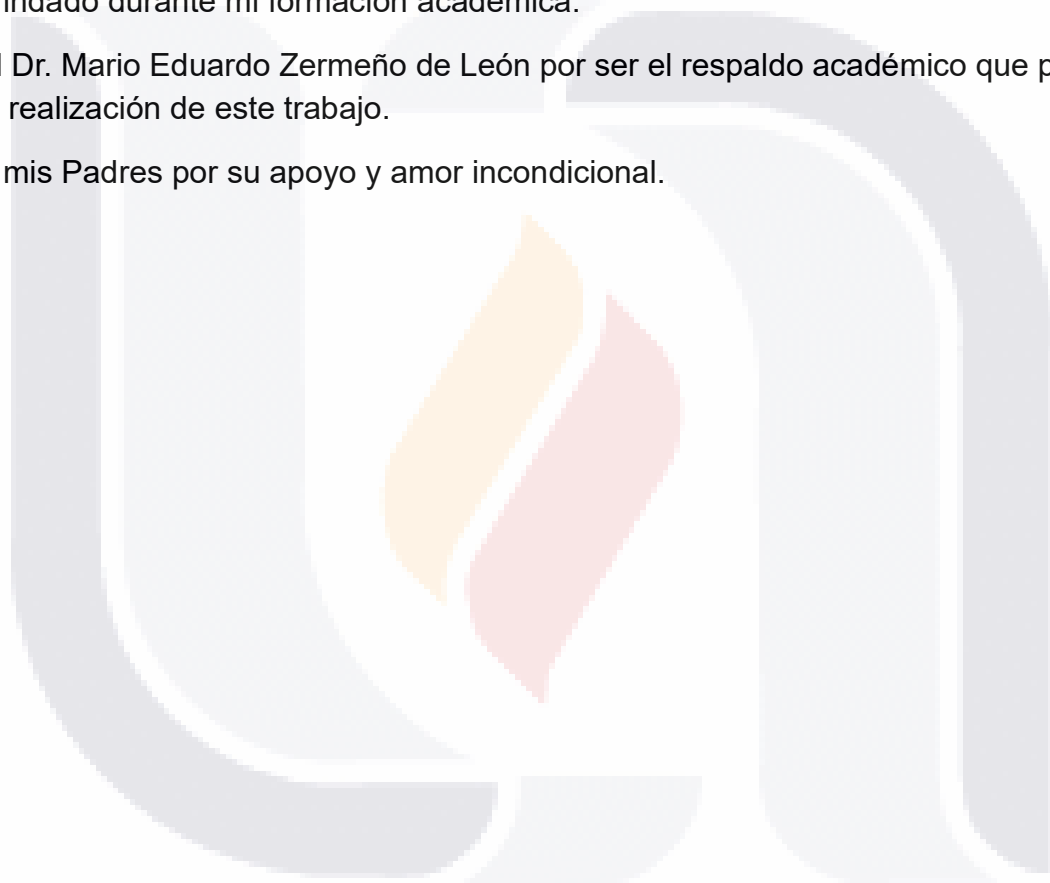
Agradezco al Centro Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONHACYT), por el financiamiento otorgado, cuyo respaldo fue pieza clave en la culminación de mi trabajo.

Mi gratitud a la Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes, por brindarme el espacio académico necesario para la realización de mi trabajo.

Al Centro de Ciencias del Diseño y la Construcción por el apoyo administrativo brindado durante mi formación académica.

Al Dr. Mario Eduardo Zermeño de León por ser el respaldo académico que permitió la realización de este trabajo.

A mis Padres por su apoyo y amor incondicional.



DEDICATORIAS

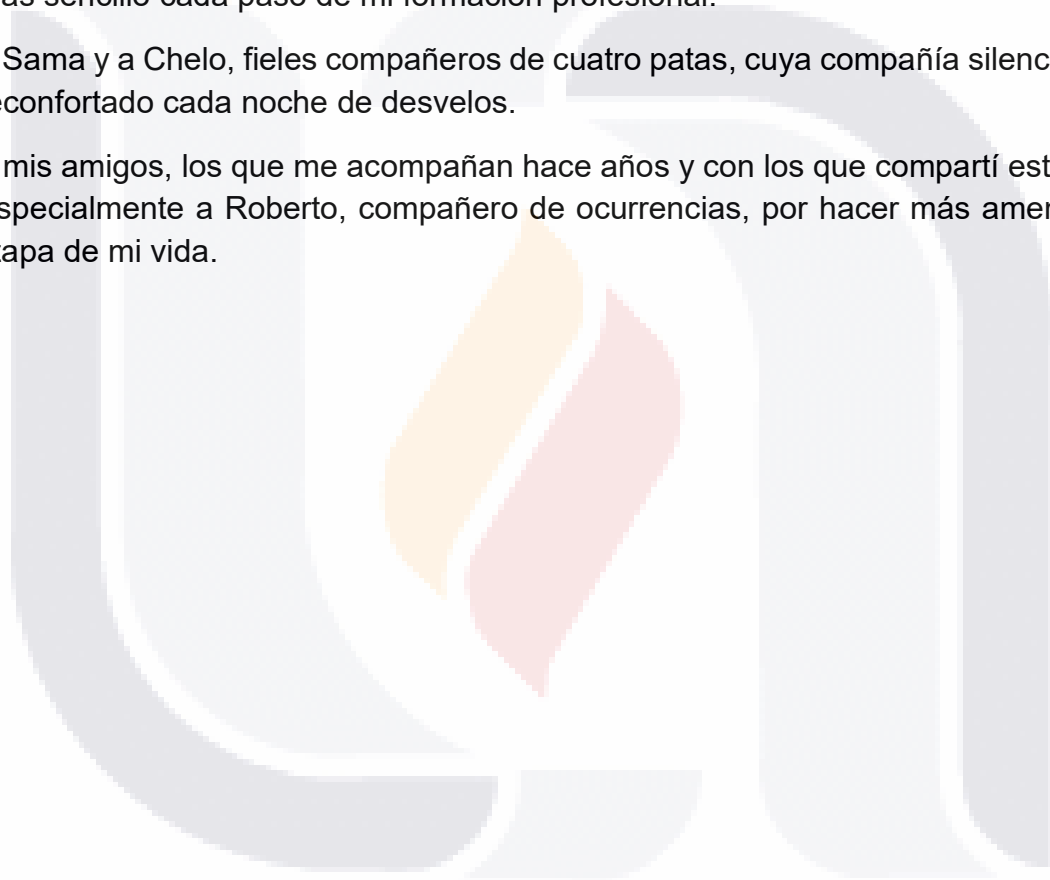
Dedico este trabajo a mis padres, por la confianza brindada a lo largo de estos años, por ser una guía en mi camino profesional y por siempre motivarme a cumplir mis objetivos.

A mis hermanas, compañeras de juegos y de sueños, cuya complicidad ha acompañado mi formación académica.

A mis sobrinos, por ser la alegría de la casa, que con su espontaneidad han hecho más sencillo cada paso de mi formación profesional.

A Sama y a Chelo, fieles compañeros de cuatro patas, cuya compañía silenciosa ha reconfortado cada noche de desvelos.

A mis amigos, los que me acompañan hace años y con los que compartí este viaje. Especialmente a Roberto, compañero de ocurrencias, por hacer más amena esta etapa de mi vida.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	1
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE GRÁFICAS Y FIGURAS	5
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Descripción	10
1.2. Delimitación	11
1.3. Definición	11
1.4. Planteamiento	12
1.5. Hipótesis	12
1.6. Objetivo general.....	12
1.7. Objetivos específicos	13
1.8. Antecedentes	13
1.9. Justificación.....	14
2. ESTADO DEL ARTE	17
3. MARCO TEÓRICO	24
3.1. Mampostería.....	24
3.1.1. <i>Historia</i>	24
3.1.2. <i>Tipos de muros</i>	25
3.1.3. <i>Propiedades mecánicas de la mampostería</i>	27
3.2. Tipos de falla en muros de mampostería no reforzada.....	28
3.2.1. <i>Falla de corte por deslizamiento</i>	28
3.2.2. <i>Falla de corte</i>	28
3.2.3. <i>Falla por flexión</i>	28
3.2.4. <i>Falla por aplastamiento por compresión diagonal</i>	28
3.3. Subsistencia.....	29
3.3.1. <i>Casos en México</i>	29
3.4. Hundimientos diferenciales	30

3.5.	Rotula plástica	31
3.6.	Estados limite	32
3.7.	Diagonal equivalente	32
3.8.	Presfuerzo exterior	33
3.8.1.	¿Qué es?.....	33
3.8.2.	Componentes	34
3.8.3.	Proceso de instalación	34
3.8.4.	Uso de gatos hidráulicos.....	35
3.8.5.	Ventajas	36
3.8.6.	Normativa aplicable	36
3.8.7.	Recomendaciones técnicas.	36
3.9.	SAP2000	36
3.9.1.	Rotula plástica.....	36
3.9.2.	Hundimientos	39
3.9.3.	Presfuerzo en SAP2000	39
4.	PLANTEAMIENTO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL	46
4.1.	Selección de la muestra	46
4.2.	Dimensión de la muestra.....	47
4.3.	Recolección de información	47
4.4.	Diseño de la investigación	47
4.4.1.	Análisis de posibles casos de estudios	47
4.4.2.	Recolección de datos de viviendas	48
4.4.3.	Análisis del modelo en SAP2000	48
4.4.4.	Alternativas de presfuerzo	49
4.4.5.	Aspectos constructivos.....	49
4.4.6.	Propuesta de reparación estructural	49
4.4.7.	Análisis de resultados	49
4.4.8.	Análisis de costos.....	49
5.	RESULTADOS	52
5.1.	Caso de estudio	52
5.2.	Modelado en Sap2000	55
5.2.1.	Sobre el trazo del proyecto	56

5.2.2.	<i>Rotulas plásticas.....</i>	59
5.2.3.	<i>Configuración del hundimiento.....</i>	60
5.2.4.	<i>Verificación de resultados.....</i>	63
5.3.	Primera alternativa de presfuerzo	66
5.3.1.	<i>Restitución del nivel del inmueble.....</i>	67
5.3.2.	<i>Detalles constructivos</i>	68
5.3.3.	<i>Costo de la reparación.....</i>	68
5.4.	Segunda alternativa de presfuerzo.....	68
5.4.1.	<i>Restitución del nivel del inmueble.....</i>	70
5.4.2.	<i>Detalles constructivos</i>	70
5.4.3.	<i>Costo de la reparación.....</i>	71
5.5.	Tercera alternativa de presfuerzo	71
5.5.1.	<i>Restitución del nivel del inmueble.....</i>	73
5.5.2.	<i>Detalles constructivos</i>	73
5.5.3.	<i>Costo de la reparación.....</i>	73
6.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	76
7.	CONCLUSIONES	79
8.	REFERENCIAS	81
9.	ANEXO	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Componentes del presfuerzo 34

Tabla 2 Datos de gato k100 (Freyssinet, 2024) 35

Tabla 3 Datos de gato M23 (Freyssinet, 2024)..... 35

Tabla 4. Significado del color en cada rotula plástica. Tabla creada por el autor (SAP 2000 v24.2). 38

Tabla 5Planteamiento de la campaña experimental 46

Tabla 6 Costo primera propuesta de reparación..... 68

Tabla 7 Segunda propuesta de reparación 71

Tabla 8 Tercera propuesta de reparación 74



ÍNDICE DE GRÁFICAS Y FIGURAS

Figura 1 Rejas metálicas en la parte superior interna de la “Torre Grossa” en San Gimignano (Preciado, et al, 2015).....	17
Figura 2 Ejemplo de reforzamiento CAM, en escala 2:3 para pruebas en mesa vibratoria a) Vista interna, b) Vista externa (Ferretti & Pascale, 2019).	18
Figura 3 Patrones de carga de las tiras CFRP, (a) Vista en sección transversal de la correa longitudinal a la izquierda (sin escala); (b) Vista en sección transversal de la correa longitudinal derecha (sin escala); (c) secuencia del esquema a-b, en la muestra sujeto por correas. (Ferretti, 2019).	19
Figura 4 Vista frontal del edificio con la geomalla aplicada (Martins et al., 2020).	20
Figura 5 Técnicas de rehabilitación aplicadas en estructuras de tierra compactada (Baeza et al., 2023).....	20
Figura 6 Desplazamiento seccional (Meshram, 2024).	21
Figura 7 Gatos hidráulicos de la gama F de Freyssinet. A la izquierda el modelo k100 y a la derecha el M23 (Freyssinet, 2024).	22
Figura 8 Muro diafragma (SMIE, 2019).	26
Figura 9 Muro confinado (SMIE, 2019).	26
Figura 10 muro reforzado interiormente (SMIE, 2019).	27
Figura 11 Falla por deslizamiento (Moreno et al., sf.).	29
Figura 12 Falla por tensión diagonal (Moreno et al., sf.).	29
Figura 13 Falla por flexocompresión (Moreno et al., sf.).	29
Figura 14 Hundimiento tipo “sagging mode” Imagen tomada del artículo (Ozer, I. E, et al., 2021).	30
Figura 15 Hundimiento tipo “Hogging mode”, imagen tomada del artículo (Ozer, I. E, et al., 2021).	31
Figura 16 Representación gráfica rotula plástica. Imagen creada por el autor.	31
Figura 17 Geometría de la diagonal equivalente, imagen tomada de las NTC.....	33
Figura 18 Definiendo una rotula plástica (SAP 2000 v24.2).	37
Figura 19 Tipos de rotulas plásticas (SAP 2000 v24.2).	38
Figura 20 Grafica momento rotación. Imagen creada por el autor.	39
Figura 21 Viga definida en SAP2000, imagen del autor (SAP 2000 v24.2).	40
Figura 22 Eliminar el load case “Dead”, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	40
Figura 23 Load pattern de tipo presfuerzo, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	40
Figura 24 A la izquierda, presfuerzo modelado por carga y a la derecha por elemento, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	41
Figura 25 Datos del tendón, Imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	41
Figura 26 Definir cargas del tendón, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	41
Figura 27 Añadir sección, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	42
Figura 28 Status del load case Modal, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	42
Figura 29 Desplazamiento en viga, producido por la carga de presfuerzo de una tonelada, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	42
Figura 30 Diagramas de carga axial y torsión (1 ton), imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	43

Figura 31	Dezplazamiento en viga, producido por la carga de presfuerzo de cinco toneladas, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	43
Figura 32	Diagramas de carga axial y torsión (5 ton), imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	44
Figura 33	Croquis tomado de Google Maps. Ubicación del sitio	52
Figura 34	Croquis del inmueble, creado por el autor	53
Figura 35	Vista 3D Inmueble, imagen creada por el autor (Revit 2026).	53
Figura 36	Daño del inmueble, fotografías tomas del sitio.	54
Figura 37	Curvas de Nivel, datos tomados del sitio.	55
Figura 38	Croquis de hundimientos del inmueble, imagen creada por el autor.	55
Figura 39	Estructura del modelo, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).	56
Figura 40	Definiendo los parámetros del concreto (SAP 2000 v24.2).	57
Figura 41	Definiendo los parámetros de la mampostería (SAP 2000 v24.2).	57
Figura 42	Definiendo secciones (SAP 2000 v24.2).	58
Figura 43	Trazo de diagonales equivalentes en el modelo (SAP 2000 v24.2).	58
Figura 44	Rotula plástica P-M2 (SAP 2000 v24.2).	59
Figura 45	Rotula plástica P-M3 (SAP 2000 v24.2).	60
Figura 46	Rotula plástica de carga axial (SAP 2000 v24.2).	60
Figura 47	Definiendo el Load Pattern "Hundimiento" (SAP 2000 v24.2).	61
Figura 48	Definiendo el "Load Case" Hundimiento (SAP 2000 v24.2).	61
Figura 49	Definiendo el Load Pattern "Hundimiento2" (SAP 2000 v24.2).	62
Figura 50	Definiendo el Load case "Hundimiento2" (SAP 2000 v24.2).	62
Figura 51	Asignando el hundimiento (SAP 2000 v24.2).	63
Figura 52	Hundimiento sobre la fachada de la vivienda (SAP 2000 v24.2).	63
Figura 53	Primera propuesta de reparación (vista del modela) (SAP 2000 v24.2).	66
Figura 54	Vista 3D del modelo (Revit 2026).	67
Figura 55	Restitución del nivel (SAP 2000 v24.2).	67
Figura 56	Segunda propuesta de reparación (vista modelo) (SAP 2000 v24.2).	69
Figura 57	Vista 3D segunda propuesta (Revit 2026).	69
Figura 58	Restitución del nivel, segunda propuesta. (SAP 2000 v24.2).	70
Figura 59	Tercera propuesta (vista modelo) (SAP 2000 v24.2).	72
Figura 60	Vista 3D tercer propuesta (Revit 2026).	72
Figura 61	Restitución del nivel, tercera propuesta (SAP 2000 v24.2).	73

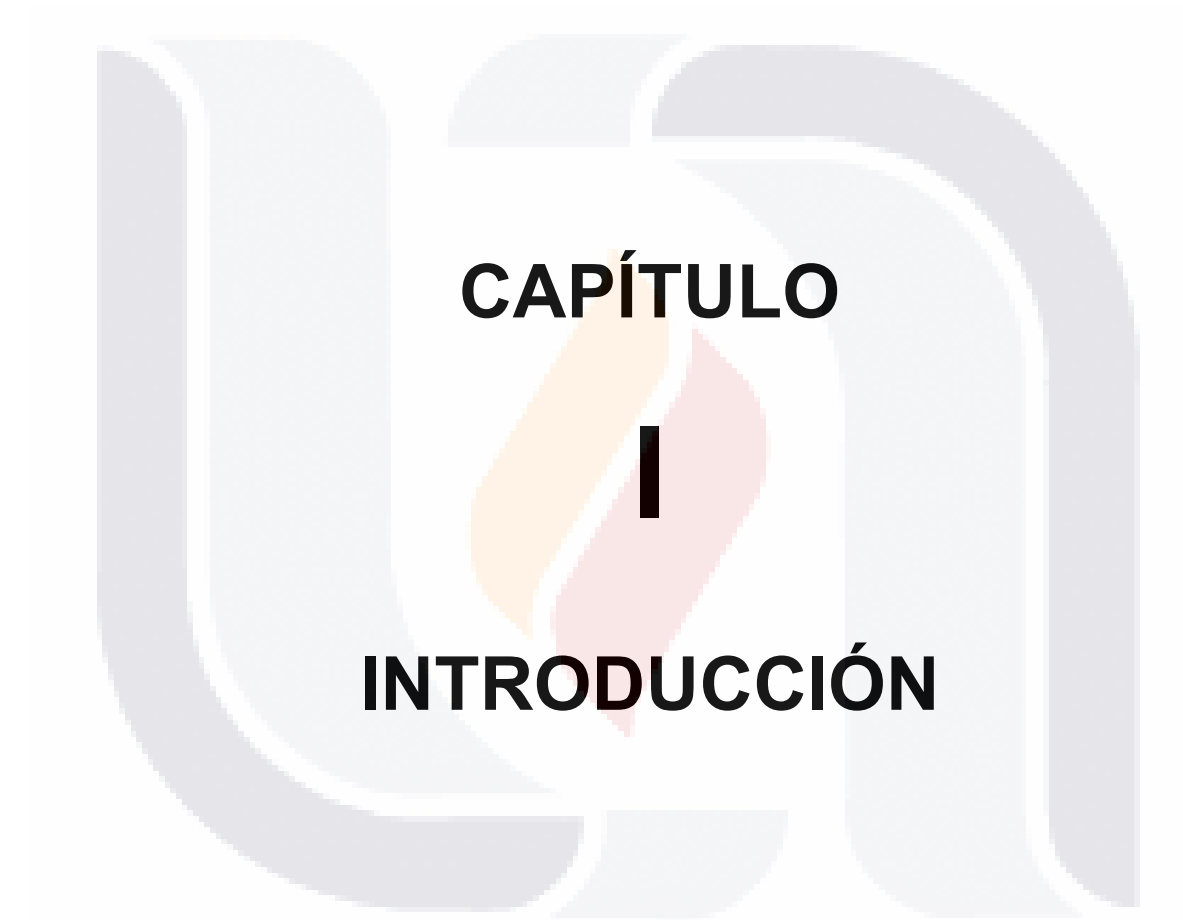
RESUMEN

El presfuerzo exterior como alternativa para reparar estructuras, es una técnica empleada con diferentes fines. Este trabajo propone usarlo con el fin de restaurar el nivel de un inmueble de mampostería confinada, afectado por subsidencia en el Valle de Aguascalientes. Una alternativa de refuerzo que muestra una opción accesible y de rápida ejecución a los problemas de asentamientos en cientos de viviendas del estado.

Los resultados de este trabajo se resumen en tres soluciones a un mismo problema, cada una con pros y contras que llevan al cuestionamiento sobre ¿cuál es la mejor alternativa? Pero concluyendo en cada alternativa, que es posible reparar estructuras dañadas por el efecto de la subsidencia haciendo uso del presfuerzo exterior en combinación con otros métodos de reparación estética.

ABSTRACT

External prestressing as an alternative for repairing structures is a technique used for different purposes. This work proposes using it to restore the level of a confined masonry building affected by subsidence in the Aguascalientes Valley. It is a reinforcement alternative that offers an accessible and quick solution to the settlement problems affecting hundreds of homes in the state. The results of this work are summarized in three solutions to the same problem, each with pros and cons that lead to the question: Which is the best alternative? However, each alternative concludes that it is possible to repair structures damaged by the effects of subsidence by using external prestressing in combination with other aesthetic repair methods.



CAPÍTULO
I
INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción

El problema de subsidencia por extracción de aguas subterráneas en el valle de Aguascalientes aunado a las grietas y fallas del terreno representa una pérdida económica muy alta para el gobierno del Estado y sobre todo para las personas que cuyo patrimonio se ha visto afectado por la creciente intensidad del problema y no es raro toparse con viviendas abandonadas a lo largo de las zonas donde el fenómeno es más evidente.

Según datos establecidos por el INEGI en Aguascalientes 66 fallas conviven directamente con asentamientos humanos, en los cuales se encuentran censados 2528 inmuebles. De ellos 1864 son afectados directamente por alguna falla, 306 de forma indirecta y tan solo 358 inmuebles se encuentran sin daño.

Los daños debidos al hundimiento en las construcciones dependen de la configuración de los asentamientos diferenciales y de los materiales que constituyen cada una de las viviendas. Es imposible estimar los daños o clasificarlos de acuerdo con un tipo de material, ya que dependen en gran medida de la variación de las propiedades del suelo. Sin embargo, un porcentaje considerable de las viviendas afectadas están constituidas por muros de carga de mampostería de ladrillo.

La mampostería es el sistema constructivo más usado en el valle de Aguascalientes; esto debido a su bajo costo, facilidad de manejo y durabilidad. Sin embargo, esta práctica rara vez recae en un control ingenieril lo que lo vuelve las viviendas altamente vulnerables a los efectos de cargas laterales y asentamientos diferenciales, derivados de la sobreexplotación de acuíferos.

Regularmente los muros construidos con mampostería confinada tienden a mejorar su comportamiento, pero un mal confinamiento hace que las grietas producidas por las fallas a tensión y compresión en muros se extiendan a los castillos y dadas que

confinan los muros. Por otro lado, es también común ver muros sin confinar en los que es normal ver los estragos de las fallas a tensión y compresión en muros, provocando las fallas a compresión incluso el desprendimiento de partes del muro.

Es preciso conocer el daño en los muros de las viviendas que conviven directamente con la subsidencia, conocer un aproximado de las viviendas elaboradas con mampostería, analizar principalmente los muros de carga de estas viviendas.

1.2. Delimitación

El problema se desarrolla en el valle de Aguascalientes, principalmente dentro de la ciudad, pero alcanzando una extensión por fuera de los límites de esta, afectando los municipios de San Francisco de los Romo, Jesús María, Pabellón de Arteaga, Rincón de Romos y Cosío.

En 1985 Los hermanos Aranda realizaron estudios topográficos tras detectar indicios de desplazamientos diferenciales verticales. Posteriormente la UAA dio seguimiento detectando hundimientos aproximadamente 4 cm/año. Los estudios prosiguieron en 1993 con el INEGI instalando estaciones de medición GPS permanente que registraron de manera continua el hundimiento diferencial. Finalmente, en el 2003 se sentó la base del estudio que hoy conocemos con la UAA motivando al INEGI a realizar mediciones GPS de manera regular en varios puntos de la ciudad logrando construir el primer mapa de hundimientos.

1.3. Definición

En 1985 se detectaron indicios de desplazamientos diferenciales verticales en el Valle de Aguascalientes, Qué en la actualidad afectan a 1864 viviendas según datos del INEGI. Los daños en las estructuras de los inmuebles dependen en gran medida de la configuración de los asentamientos diferenciales, aunados a la falta de control ingenieril, representando una pérdida económica muy grande.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Es imposible evitar la construcción en zonas del valle dañadas por subsidencia, no hay garantía de que la zona no se extenderá y reubicar a todas las familias con inmuebles afectados representa un costo económico muy grande y sobre todo hace evidente la falta de espacio en el territorio del Estado. Por tal motivo es inminente aprender a convivir con el problema, para ello es preciso buscar soluciones eficientes para la reparación de viviendas dañadas por subsidencia.

1.4. Planteamiento

¿Hasta dónde es factible reparar un inmueble que convive con los estragos de los asentamientos diferenciales?

¿Qué características debe tener un inmueble para considerar prolongar su vida útil mediante la reparación del daño en su estructura?

¿Qué materiales son más convenientes para realizar la reparación?

1.5. Hipótesis

Es posible restaurar la integridad estructural de una construcción de mampostería confinada afectada por subsidencia, haciendo uso de una combinación de métodos de reparación tales como el presfuerzo exterior y una caja disipadora de hundimientos diferenciales.

1.6. Objetivo general

Analizar métodos de reparación de viviendas en los que se combine, el uso de métodos de presfuerzo exterior con materiales complementarios, verificando la respuesta estructural mediante la utilización de software que permitan simular de las diferentes alternativas de reparación.

1.7. Objetivos específicos

- Detallar las características del inmueble a trabajar.
- Realizar un análisis detallado de una vivienda para establecer la factibilidad de su reparación de acuerdo con el daño.
- Presentar por lo menos tres alternativas de presfuerzo.

1.8. Antecedentes

En Aguascalientes se ha convivido directamente con los asentamientos diferenciales provocados por la extracción de agua subterránea, los cuales han desplazado a varias familias de sus hogares. Muchas de las familias desplazadas son personas de bajos recursos cuyas posibilidades de adquirir un nuevo inmueble son escasas. Es ilógico pensar en dar por perdidos todos los inmuebles afectados por el aumento en los hundimientos diferenciales ya que corresponden a un gran porcentaje de la población del estado, además dejar olvidadas estas zonas muchas veces propicia a la ocupación ilegal de las viviendas. Siendo, un punto crítico en el incremento del crimen organizado. Ante esta problemática surge la idea de varios ingenieros de dar una solución practica a las personas cuyo patrimonio se encuentra dentro de la zona afectada, principalmente al construir nuevos inmuebles. Pero ¿qué hacer con los inmuebles ya contruidos?

Los escasos trabajos existentes centran su interés en relacionar el daño de las estructuras con la distorsión angular o relacionar la cantidad de daño con el agrietamiento en muros, sin embargo, el objeto de esta investigación es la reparación por lo que los estudios sobre medición de daño basado en la cantidad de reparación que necesita un edificio son el interés principal.

En cuanto a la reparación, la mayoría de las propuestas de reparación a edificios se enfocan en mejorar su comportamiento ante cargas laterales, mostrando la variedad de alternativas de reparación de construcciones de mampostería bajo estas

condiciones. Aunque con la limitante de que tienen un enfoque directamente a edificios históricos. Sin embargo, autores como R. Meli y O. Hernández en su trabajo “Efectos de hundimientos diferenciales en construcciones a base de muros de mampostería” realizaron estudios experimentales para determinar el daño por hundimientos diferenciales en estructuras de mampostería, realizando ensayos en muros y muretes. Obteniendo una relación entre la distorsión angular y el ancho de las grietas, en diferentes periodos de tiempo entre diez minutos y dos meses, sin embargo, no realizaron estudios en casos reales, aunque lograr establecer una propuesta de estado límite de servicio en estructuras dañadas por subsidencia simulando las condiciones del suelo en la Ciudad de México.

1.9. Justificación

Actualmente existen, varias investigaciones enfocadas a reparar estructuras de mampostería dañadas sobre todo en edificios históricos que se han sometido a cargas laterales. Dejando de lado aquellas construcciones sin valor histórico para la sociedad, y aún más las que también se encuentran en contacto con problemas de hundimientos verticales progresivos. Por lo que es necesario ofrecer una alternativa de reparación atendiendo al sector vulnerable ante las condiciones del fenómeno de la subsidencia.

La finalidad del proyecto es extrapolar el conocimiento sobre reparación de estructuras de mampostería combinando varias técnicas que incluyen el uso de concreto presforzado y otras alternativas de reparación y analizar su comportamiento ante esfuerzos verticales diferenciales. Para lograr ofrecer la mejor opción de reparación y permitir prolongar la vida de las estructuras de mampostería.

Con esto se mitigan las pérdidas económicas generadas por la baja ocupación de los inmuebles dañados, además de ofrecer una alternativa de prevención a los inmuebles ubicados en las zonas susceptibles al daño.

La principal exigencia al elaborar el trabajo es evaluar distintas alternativas de reparación que permitan localizar la mejor alternativa en una relación calidad-costos, esto se logrará con un análisis dinámico de la estructura utilizando programas de libre uso y código abierto.





2. ESTADO DEL ARTE

Aunque el presfuerzo exterior no se ha documentado en la reparación de estructuras sometidas a hundimientos diferenciales, si ha sido documentado en la reparación de estructuras de concreto y mampostería dañada por los efectos de cargas laterales. Teniendo un gran impacto sobre todo en la recuperación de edificios históricos, pues ofrece una alternativa que va más allá de la reparación estética. El presfuerzo exterior se ha convertido en una solución prometedora en la reparación de edificaciones históricas de mampostería, por su capacidad de adaptación y su sensibilidad patrimonial.

En el año 2015; Preciado, Bartoli y Budelmann analizan la evolución del presfuerzo exterior como técnica de reforzamiento sísmico en construcciones históricas de mampostería. Proponiendo el uso de materiales inteligentes y dispositivos compatibles para aplicar el presfuerzo exterior sin comprometer la integridad patrimonial. En el artículo: “The Use of Prestressing Through Time as Seismic Retrofitting of Historical Masonry Constructions: Past, Present and Future Perspective”. El presfuerzo consiste en aplicar una fuerza de compresión a los elementos de mampostería mediante tendones que compensan la resistencia a la tracción. En las primeras intervenciones con este método utilizaban barras metálicas para conectar las paredes y estabilizar los arcos, pero tenían problemas de corrosión y concentración de tensiones. Mientras que en la actualidad se utilizan tendones de alta resistencia en orificios perforados para mejorar la estabilidad, la resistencia y la ductilidad, al tiempo que permite la reversibilidad.



Figura 1 Rejas metálicas en la parte superior interna de la “Torre Grossa” en San Gimignano (Preciado, et al, 2015).

En febrero de 2019, Elena Ferretti y Giovanni Pascale analizan técnicas activas de reforzamiento haciendo uso los sistemas “Active Confinement of Masonry (CAM)” y “ Φ system”, permitiendo una optimización en el proceso de mejorar el comportamiento estructural ante cargas sísmicas. Logrando evaluar su eficacia y compatibilidad con estructuras históricas en el artículo: “Some of the Latest Active Strengthening Techniques for Masonry Buildings: A Critical Analysis”. En el caso del sistema CAM, su principal objetivo es añadir una carga hidrostática de tensión que en teoría aumenta la resistencia general de la estructura al evitar la propagación de grietas y mejorar la ductilidad de la mampostería. Consiste en una red de cordones de acero de presfuerzo que forman bucles horizontales y verticales que pasan a través de orificios transversales en la mampostería. Los cordones se tensan para proporcionar un confinamiento activo, «apretando» eficazmente la mampostería e induciendo un estado de compresión triaxial. Por su parte el Φ system se centra en aplicar una tensión de forma transversal a la mampostería mediante un sistema de refuerzo continuo que consiste en cordones que imponen una carga transversal. El sistema modifica el campo de tensión principalmente a lo largo de la dirección transversal y está diseñado para resistir mejor las cargas fuera del plano, aumentando así la capacidad de carga lateral.



Figura 2 Ejemplo de reforzamiento CAM, en escala 2:3 para pruebas en mesa vibratoria a) Vista interna, b) Vista externa (Ferretti & Pascale, 2019).

También en 2019, Elena Ferretti, presenta en su artículo “Wire Ropes and CFRP Strips to Provide Masonry Walls with Out-Of-Plane Strengthening” una técnica innovadora de reforzamiento de muros, frente a cargas externas, principalmente sísmicas. Dicha propuesta combina cables de acero (wire ropes) y tiras de polímero reforzado con fibras de carbono, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer); para crear una estructura tridimensional que mejore la ductilidad y resistencia del muro (Ferretti, 2019). La técnica de refuerzo consiste en cables de acero en forma de lazos cerrados que se tensan mediante turnbuckles (tornillos tensores), posteriormente las tiras CFRP se colocan verticalmente en ambas caras del muro. En conjunto, se genera un sistema que trabaja como viga tipo I, donde las tiras de CFRP funcionan como los patines de la viga. Como resultado, el refuerzo aumenta significativamente la carga del muro, mejora la rigidez y su capacidad de desplazamiento antes del colapso. El sistema, previene el colapso total en caso de que la edificación sufra un daño severo.

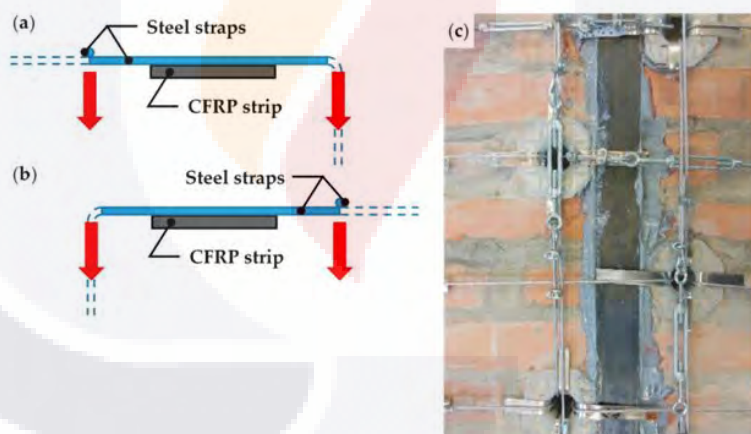


Figura 3 Patrones de carga de las tiras CFRP, (a) Vista en sección transversal de la correa longitudinal a la izquierda (sin escala); (b) Vista en sección transversal de la correa longitudinal derecha (sin escala); (c) secuencia del esquema a-b, en la muestra sujeto por correas. (Ferretti, 2019).

En el 2020 en la “12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC)”, se dio a conocer el artículo “Seismic Retrofitting of Historical Masonry Heritage Structures: A Case Study of an Adobe Masonry Building in Lima, Peru”. Un estudio que analiza el reforzamiento sísmico del Fortín de Santa Catalina,

una edificación de adobe ubicada en Lima, Perú. Destacando los desafíos que implica intervenir edificaciones históricas: la necesidad de que la intervención sea mínima, que exista reversibilidad y sobre todo una compatibilidad con los materiales originales (Martins et al., 2020). Esto se consigue, a grandes rasgos, en tres pasos, el primero la caracterización del edificio; el segundo, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y, por último, una propuesta de soluciones de reforzamiento.

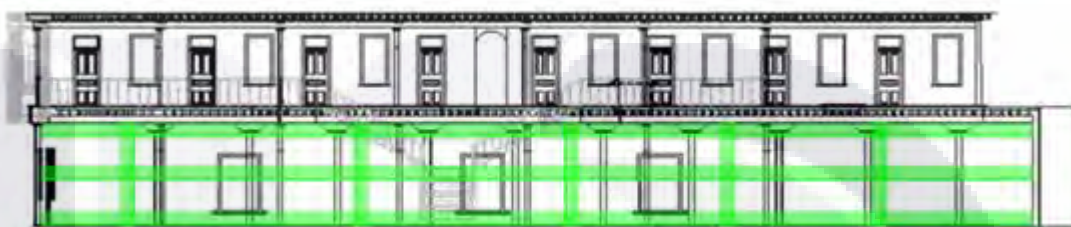


Figura 4 Vista frontal del edificio con la geomalla aplicada (Martins et al., 2020).

En el 2023, Baeza, Estevan e Iborra, analizaron técnicas actuales y futuras para mejorar el comportamiento sísmico de estructuras construidas con tapias y mampostería sin comprometer su valor histórico en el artículo “Seismic Retrofitting of Heritage Structures: Actual Techniques and Future Challenges for Earth and Masonry Constructions” su objetivo: mejorar conexiones, estabilizar elementos estructurales, permitir colapsos parciales y contrarrestar cargas horizontales; todo esto gracias a la aplicación de la técnica TRM (Textil Reinforced Mortars), que se ha demostrado eficaz en muros de mampostería, mejorando su resistencia a la compresión, corte y ductilidad. Mejorando el comportamiento mecánico incluso después de la exposición al fuego. Sin embargo, dejando dudas sobre la forma de resolver los requerimientos de anclaje.

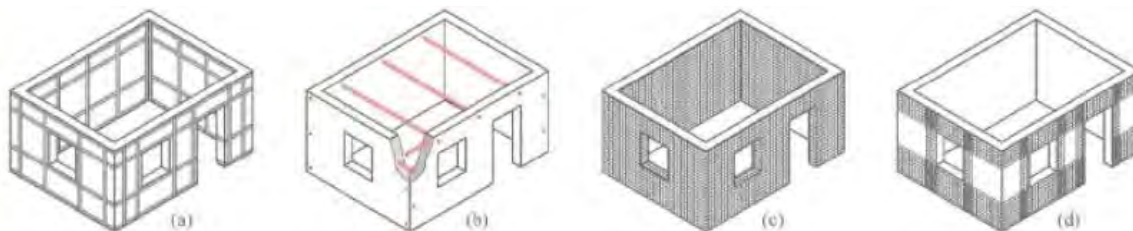


Figura 5 Técnicas de rehabilitación aplicadas en estructuras de tierra compactada (Baeza et al., 2023).

En 2024, Sanguita S. Meshram, abordó el reforzamiento de edificios de concreto reforzado (RCC), mediante técnicas de presfuerzo, con el objetivo de mejorar su comportamiento ante sismos y extender su vida útil. Se propone el uso de vigas de concreto presforzado con el fin de mejorar la resistencia a flexión cortante y torsión de los elementos estructurales. Así como aumentar la rigidez, ductilidad y durabilidad de los elementos estructurales. Concluye que el presfuerzo no solo mejora el desempeño estructural, sino que también ofrece una solución eficiente para rehabilitar edificaciones existentes.

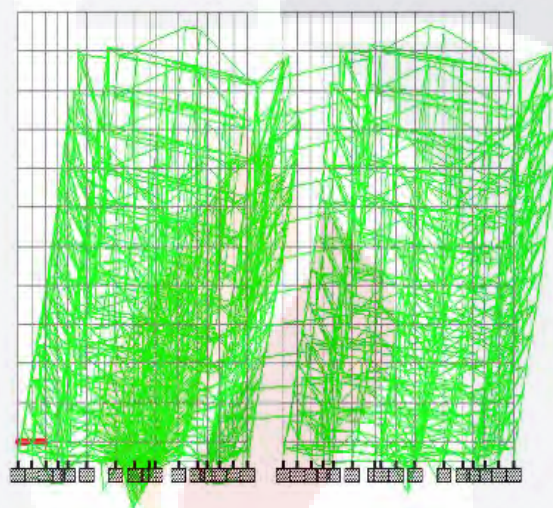


Figura 6 Desplazamiento seccional (Meshram, 2024).

También en 2024, Freyssinet México, actualizo su información sobre el presfuerzo exterior en el documento “El pretensado Freyssinet”, en la que sintetiza información a cerca de su tecnología en el área. Destaca sus principios, componentes y técnicas para garantizar la durabilidad y seguridad de las estructuras. Describe operaciones de tensado y anclaje precisas que garantizan un presfuerzo eficaz y duradero, mostrando de forma detallada la gama de gatos hidráulicos usados en el presfuerzo exterior, principalmente los monotorón usados en la gama F que puedes trabajar sobre el cable completo (a la izquierda Figura 2.7), o bien torón a torón (a la derecha).

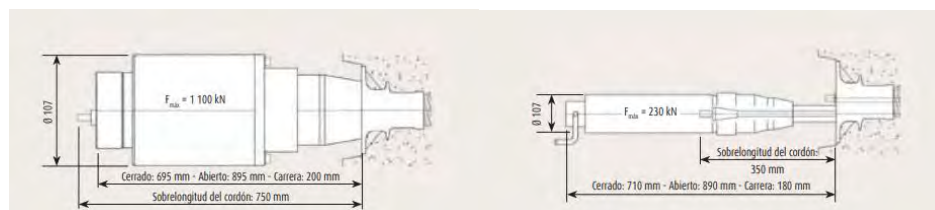


Figura 7 Gatos hidráulicos de la gama F de Freyssinet. A la izquierda el modelo k100 y a la derecha el M23 (Freyssinet, 2024).

En conclusión, la evolución del presfuerzo exterior como técnica de conservación patrimonial, refleja una convergencia entre la ingeniería estructural y la sensibilidad patrimonial. Abriendo un camino que demuestra a los investigadores, que es posible reparar sin destruir. La clave: la compatibilidad, la reversibilidad y el respeto por la memoria arquitectónica. Está claro que aún queda camino por avanzar, en cuestión de conservar estructuras sin importar su relevancia patrimonial, pero las bases se establecieron. Queda a criterio de esta y futuras investigaciones el proponer un método eficaz que permita la reparación estructural de edificaciones; no solo ante cargas laterales, si no también ante los vestigios de la subsidencia y fallas geológicas.



CAPÍTULO
III
MARCO TEÓRICO

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Mampostería

En México alrededor del 90% de vivienda unifamiliar y multifamiliar, está construida a base de muros de carga de mampostería(SMIE, 2019).

3.1.1. Historia

La humanidad, a lo largo de su historia, siempre ha buscado la manera de protegerse, haciendo uso de los materiales de su entorno y buscando aumentar su comodidad. Con el paso del tiempo estos materiales se han vuelto cada vez más complejos y han tomado en cuenta características del entorno hasta desarrollar la mampostería que conocemos actualmente.

La mampostería pudo haber sido inventada hace más de 15 mil años cuando el ser humano aún era nómada; esto se logró apilando piedras y usándolas como protección. Posteriormente a esas piedras se le añadió un mortero a base de barro, lo que permitió que alcanzaran una altura superior y las construcciones fueran más duraderas, dando origen a las primeras aldeas.

Posteriormente los sumerios, entre sus múltiples inventos, crearon moldes que les permitieron la producción de piedras artificiales de un mismo tamaño “el adobe”. El cual era una mezcla de barro y paja que dio origen a la arquitectura monumental.

Por su parte, las culturas mesoamericanas lograron un avance significativo en la construcción, fundamentado por sus creencias religiosas y la organización social. Con el uso de la puzolana crearon cementantes duraderos y resistentes que les permitieron crear losas, muros de contención, muelles, etc.

Por otro lado, en Egipto y Grecia las construcciones más importantes eran de piedra rectilínea, lo que limitaba las posibilidades espaciales en el interior, pues la materia prima con la que contaban tenía una baja resistencia a la tensión.

En Roma, usaban piedra importada y la tecnología sumeria del ladrillo, dándole un toque propio, un mortero de cemento y el uso del concreto. Vitruvio, describió la composición del concreto: Un aglomerante hidráulico, agregado grueso y agua; lo que permitió construcciones resistentes incluso bajo el agua. Las innovaciones romanas permitieron cimentaciones más competentes, muros simplificados, libertad en el diseño de arcos y bóvedas, y aberturas en muros

Después de los romanos, los avances tecnológicos en mampostería se detuvieron, llegando incluso a perderse la tecnología del cemento y concreto romano. En el siglo XII, el arco apuntado gótico y la bóveda de crucería transformaron la estructuración, sustituyendo muros gruesos por esbeltos y ventanas pequeñas por grandes.

Más tarde, en las ciudades medievales, se utilizó la mampostería para controlar incendios en la época medieval y se utilizó en diversas partes del mundo, como en la muralla china.

En 1825, Brunel propuso el refuerzo de mampostería con barras de hierro forjado, aplicándolo en la construcción del túnel bajo el Támesis. Construyó accesos verticales al túnel reforzados con pernos de hierro y zunchos circunferenciales. Y, con ayuda de Pasley ensayaron vigas de mampostería reforzada.

3.1.2. Tipos de muros

- Muros diafragma

Un muro diafragma, es un muro contenido dentro de trabes y columnas de un marco estructural, al que proporcionan rigidez ante la acción de cargas laterales (SMIE, 2019). Los muros diafragma pueden ser confinados, reforzados interiormente o no reforzados, siempre que su espesor sea mayor a 10 cm. Se construye ligado al marco estructural y contribuye a la estabilidad estructural.

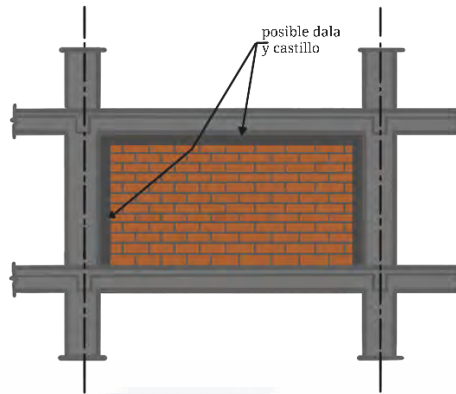


Figura 8 Muro diafragma (SMIE, 2019).

- Muros confinados

Un muro confinado, es un muro reforzado con castillos y dalas, como elemento de refuerzo en el perímetro de todo hueco cuya dimensión sea mayor a la cuarta parte de la longitud del muro en la misma dirección (SMIE, 2019).

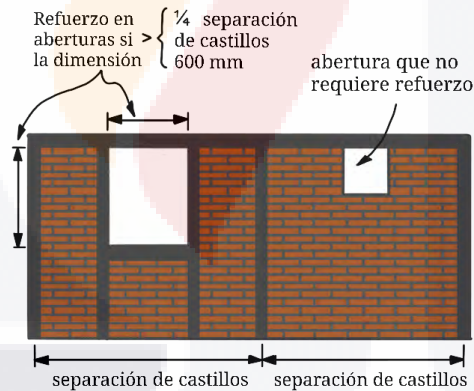


Figura 9 Muro confinado (SMIE, 2019).

- Muros reforzados interiormente

Son muros reforzados con barras o alambres corrugados de acero, distribuidos horizontal y verticalmente, colocados en las celdas de las piezas huecas, en ductos o en las juntas.

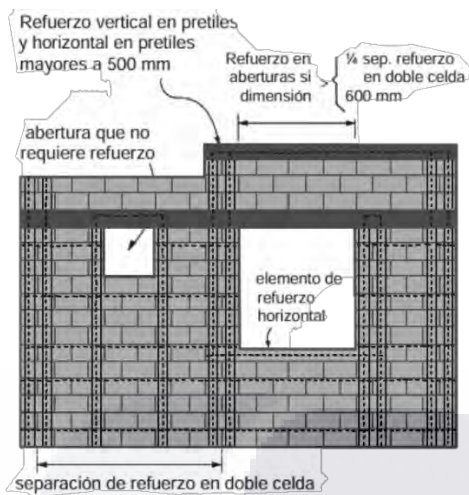


Figura 10 muro reforzado interiormente (SMIE, 2019).

- Muros no reforzados

Un muro no reforzado, es aquel cuya área de acero, no cumple con el requisito mínimo establecido en alguna de las categorías anteriores.

3.1.3. Propiedades mecánicas de la mampostería

Las propiedades mecánicas de la mampostería dependen de la interacción entre el mortero y la pieza de concreto o arcilla; así como de la calidad de los materiales, la disposición geográfica y la calidad del refuerzo y confinamiento.

- Compresión

La resistencia a la compresión es la propiedad más importante en el diseño estructural, alcanzando valores que rondan entre los 15 kg/cm² y los 30 kg/cm² valores en los que influye principalmente, la calidad del mortero, la geometría de las piezas y el refuerzo horizontal y vertical.

- Resistencia al corte y compresión diagonal

Esta propiedad es de gran relevancia al momento de analizar una edificación ante cargas sísmicas. Con valores reportados entre los 5 y 6 kg/cm² para compresión diagonal y entre 0.5 y 1 kg/cm² en resistencia al corte.

- *Adherencia*

Esta propiedad depende básicamente de la plasticidad del mortero y su interacción con la rugosidad de la pieza.

3.2. Tipos de falla en muros de mampostería no reforzada

A falta de un adecuado confinamiento o un refuerzo nulo o insuficiente, se han detectado cuatro patrones de fallas en muros (Moreno et al., s. f.)

3.2.1. *Falla de corte por deslizamiento*

Este tipo de falla se distingue porque el agrietamiento se presenta a lo largo de la junta horizontal de mortero como consecuencia de una falla de adherencia por corte en la junta, ocasionada por la poca adhesión entre las unidades y el mortero.

3.2.2. *Falla de corte*

El agrietamiento por corte se puede presentar en forma de escalera siguiendo la junta de mortero, caracterizada por su forma diagonal a lo largo del muro y es consecuencia de las tensiones de tracción diagonal o esfuerzos de corte que se producen en el mismo.

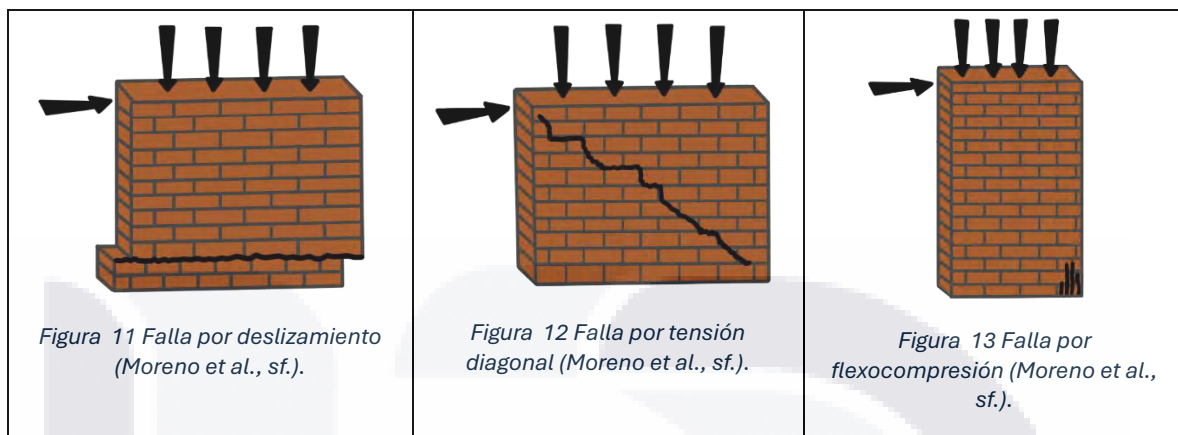
3.2.3. *Falla por flexión*

El agrietamiento se presenta en forma vertical en las esquinas y el centro, que puede presentarse en muros esbeltos, y produce una falla de compresión por flexión en el talón comprimido del muro.

3.2.4. *Falla por aplastamiento por compresión diagonal*

Esta falla es producto del efecto de puntal que se produce cuando se separa el cuerpo del muro de los elementos de confinamiento, situación que genera grandes tensiones de compresión en las esquinas del muro, las que pueden provocar la falla

por aplastamiento de la zona cuando la mampostería es de baja calidad o cuando se usan unidades del tipo rejilla de paredes delgadas.



3.3. Subsistencia

La subsistencia es el hundimiento progresivo del terreno, generalmente ocasionado por causas naturales como la disolución de rocas o actividad tectónica; o actividades antropogénicas como la sobreexplotación de los mantos acuíferos, la minería o las obras subterráneas.

3.3.1. Casos en México.

- Aguascalientes.

Existen registros de hace más de 25 años y se asocia al abatimiento de los mantos acuíferos. Además de un sistema de fallas y grietas que afectan la infraestructura urbana y rural del valle de Aguascalientes. Concentrando el daño principalmente al poniente de la ciudad.

- Querétaro.

La subsistencia en el estado de Querétaro tiene un registro histórico de más de 60 años, con hundimientos que en la actualidad superan más de los 120 cm, en zonas específicas como la Av. De la Luz. Y hundimientos anuales de entre 3 y 12 cm/año.

Esto se ha conocido gracias a la realización de estudios con modelos multicapa y análisis gravimétrico para simular esfuerzos y deformaciones.

- *Ciudad de México.*

Por su parte el caso de la Ciudad de México es uno de los más extremos a nivel mundial, con zonas donde se alcanzan hasta los 40cm/año. El 70% del suelo de la capital es vulnerable con zonas que se proyectan inhabitables en la próxima década. Se debe al igual que los anteriores casos a la sobreexplotación de los mantos acuíferos, sin embargo, a esto se le añade el peso de las edificaciones sobre un suelo lacustre. Ocasionando fracturas, inundaciones y demás daños “irreparables” en edificios y monumentos históricos.

3.4. Hundimientos diferenciales

El hundimiento diferencial a lo largo de un edificio puede causar distintos tipos de daño (Ozer, I. E, et al., 2021). Los modos de deformación más probables son:

- El modo «curvo» en el que los lados del edificio se asientan más que la media

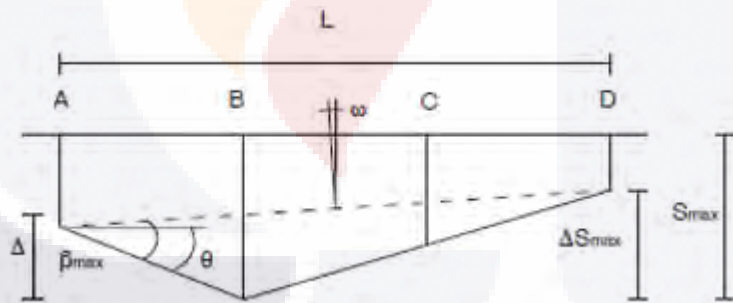


Figura 14 Hundimiento tipo “sagging mode” Imagen tomada del artículo (Ozer, I. E, et al., 2021).

- Y el modo «decreciente» en el que el centro del edificio es el que más se asienta.

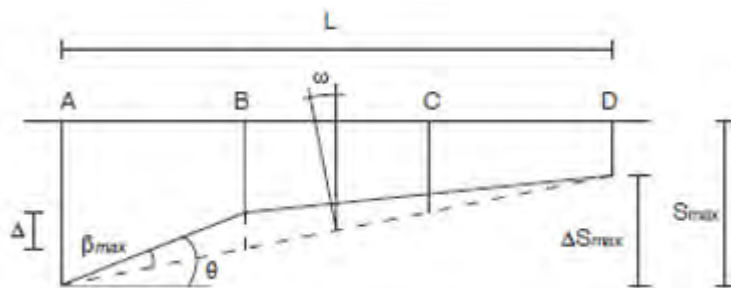


Figura 15 Hundimiento tipo “Hogging mode”; imagen tomada del artículo (Ozer, I. E, et al., 2021).

3.5. Rotula plástica

Una rotula plástica es el termino usado en la ingeniería estructural para describir la formación de una articulación plástica, es decir cuando las fibras de un elemento estructural alcanzan un estado plástico.

La formación de una rotula plástica en una viga simple crece hasta que se alcanza un momento de fluencia en las fibras externas sometidas a un esfuerzo. Posteriormente la plastificación se extiende a fibras fuera de la sección.

Aun cuando el efecto de la articulación plástica se extiende a lo largo del elemento estructural, se asume que la articulación está concentrada en un solo punto para propósitos del análisis.

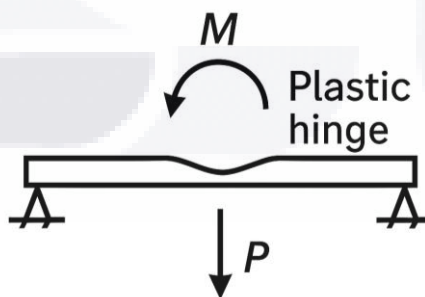


Figura 16 Representación gráfica rotula plástica. Imagen creada por el autor.

Este enfoque es bastante útil en estructuras reforzadas con técnicas como el presfuerzo exterior, donde la redistribución de esfuerzos y la disipación de energía deben ser cuidadosamente evaluadas. La correcta definición de rótulas plásticas

permite simular el comportamiento real de los elementos y validar la eficacia de las intervenciones propuestas (Chopra, 2017; Moehle, 2014).

3.6. Estados limite

Un estado límite de comportamiento en una estructura, se alcanza cuando se presenta una combinación de fuerzas, desplazamientos, niveles de fatiga o varios de ellos. Determina el inicio de un comportamiento inaceptable en la construcción. De acuerdo con las normas técnicas complementarias, se pueden clasificar en dos grupos: estados límite de falla y estados límite de servicio.

- *Estado límite de falla.*

Se presenta cuando la estructura alcanza su capacidad máxima de carga y puede sufrir daños irreversibles o colapsar.

- *Estado Limite de servicio.*

Este estado se presenta cuando la estructura alcanza cierta deformación, agrietamientos, vibraciones, etc. que, pese a no ser catastróficos, impiden que la estructura funcione correctamente.

3.7. Diagonal equivalente

La diagonal equivalente, es un método de modelado estructural donde un muro de mampostería se representa como una viga inclinada, para simplificar su análisis ante diversas cargas (principalmente ante cargas laterales).

- *Geometría de la diagonal equivalente*

El principal aspecto por definir en la geometría de la diagonal equivalente es la anchura. Para su cálculo, se estableció la siguiente formula:

$$b_d = \frac{1}{2} \sqrt{l_c^2 + l_v^2} \leq \frac{l_d}{4}$$

Ec. 3.7. 1 Ecuación para determinar la anchura de la diagonal equivalente.

Donde las longitudes l_c , l_v y l_d se calculan de la siguiente manera:

$$l_c = \frac{\pi}{2} \left(\frac{4E_f I_c H}{E_m t \sin 2\theta_d} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Ec. 3.7. 2 Calculo de l_c

$$l_v = \pi \left(\frac{4E_f I_v L}{E_m t \sin 2\theta_d} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Ec. 3.7. 3 Calculo de l_v

$$l_d = \sqrt{H^2 + L^2}$$

Ec. 3.7. 4 Calculo de l_d

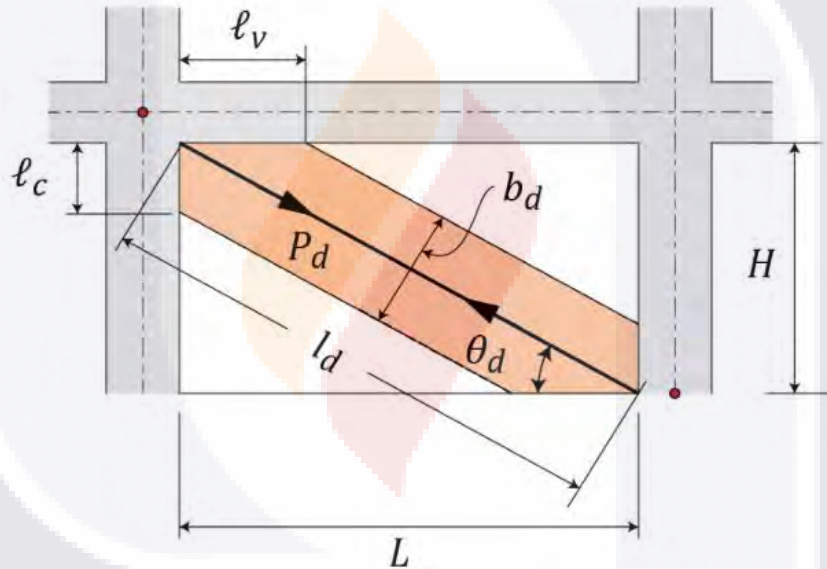


Figura 17 Geometría de la diagonal equivalente, imagen tomada de las NTC

3.8. Presfuerzo exterior

3.8.1. ¿Qué es?

Es una técnica de refuerzo estructural en la que se utilizan cables de acero fuera del concreto, sin adherencia directa, cuya configuración permite el tensado, inspección y remplazo sin afectar la estructura (Freyssinet, 2024).

3.8.2. Componentes



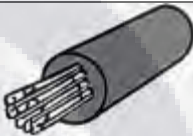

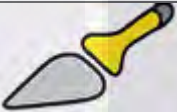

Componente	Descripción técnica	
Torones de acero	Transmiten la fuerza de compresión.	
Anclajes Activos	Permiten aplicar la tensión inicial con ayuda de gatos hidráulicos.	
Anclajes pasivos	Reciben y mantienen la fuerza sin mantenimiento posterior.	
Ductos	Conducen los cables. Pueden ser plásticos o metálicos.	
Grasa o cera	Protegen los cables contra la corrosión.	
Mortero de recubrimiento	Protege el sistema y mejora la estética.	

Tabla 1 Componentes del presfuerzo

3.8.3. Proceso de instalación

- Diseño de la trayectoria del cable.* Se define el perfil de la carga.
- Colocación de ductos.* Se fijan sobre la estructura con soportes.
- Instalación de los cables.* Se colocan placas o cuñas en los extremos.
- Tendido de cables.* Se introducen torones dentro de los ductos.
- Tensado.* Se aplica fuerza con gatos hidráulicos a partir del anclaje activo.
- Fijación en anclaje pasivo.* Se bloquea la tensión con cuñas.
- Protección final.* Se aplica grasa/cera y se recubre con mortero.

3.8.4. **Uso de gatos hidráulicos**

Durante el proceso de tensado, se utilizan gatos hidráulicos con bloqueo hidráulico, lo que permite que, una vez alcanzada la presión de tensado, el gato mantiene la carga sin permitir retroceso gracias a válvulas de retención internas.

En el caso de la gama de gatos de Freyssinet, un ejemplo de gatos hidráulicos para el presfuerzo exterior, son el k100 y el M23, cuyas características se muestran a continuación:

GATO K100

Parámetro	Descripción
Capacidad de tensado	Hasta 100 toneladas.
Presión de trabajo	-700 bar
Compatibilidad	Anclajes de la gama C y F
Medición de carga	Manómetro calibrado integrado.
Peso aproximado	Entre 35 y 40kg
Certificaciones	ETA 06/0226, ETAG 013, Marcado CE
Uso típico	Tensado de torones de presfuerzo exterior e interior.

Tabla 2 Datos de gato k100 (Freyssinet, 2024)

GATO M23

Parámetro	Descripción
Capacidad de tensado	23 toneladas
Presión de trabajo	-700 bar
Compatibilidad	Anclajes de la gama F (1- 4 torones)
Medición de carga	Manómetro integrado.
Peso aproximado	Entre 15 y 20kg
Certificaciones	ETA 06/0226, ETAG 013, Marcado CE
Uso típico	Tensado de elementos finos, estructuras ligeras y mampostería tradicional.

Tabla 3 Datos de gato M23 (Freyssinet, 2024)

3.8.5. Ventajas

- **Inspección y remplazo sencillo.** Sin demoler la estructura.
- **Menor rigidez inicial.** Ideal en estructuras donde se busca compatibilidad.
- **Mayor control de tensiones.** Durante la vida útil del sistema.

3.8.6. Normativa aplicable

- N-CTR-CAR-1-02-007-01 (México)
- ASTM A416 (torones)
- ACI 318 (concreto estructural)
- ASCE/SEI 41-17 (evaluación sísmica)
- FEMA 356 (modelación no lineal)

3.8.7. Recomendaciones técnicas.

- Ideal para refuerzo sísmico en muros de mampostería con baja ductilidad.
- Puede combinarse con sistemas de monitoreo estructural.
- Requiere personal capacitado y equipo especializado para tensado.

3.9. SAP2000

3.9.1. Rotula plástica

En SAP2000 las rotulas plásticas se utilizan como puntos de plasticidad concentrada, donde la “no linealidad” se concentra en puntos específicos (las rotulas), mientras que el resto del modelo se considera elástico.

Para definir las se sigue la ruta: **Define> Section properties> Hinge properties.**

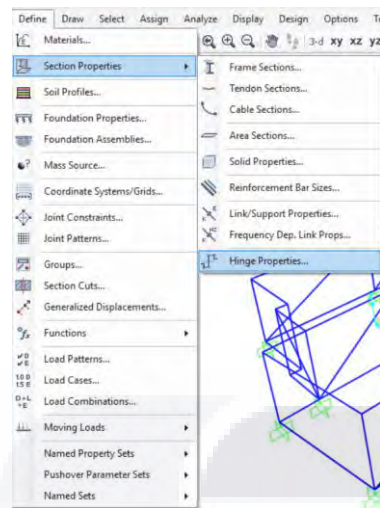


Figura 18 Definiendo una rotula plástica (SAP 2000 v24.2).

Se elige el tipo de rotula que se desea utilizar de acuerdo con el material en cuestión como acero y concreto, o se permite que el usuario defina el tipo de rotula con el que desea trabajar.

Para esto se puede utilizar una deformación controlada, o una fuerza controlada. Ambas opciones dejan trabajar con una lista de tipos de rotulas con distinto comportamiento y uso. Como: flexión biaxial con carga axial (P-M2-M3), flexión simple (M3), carga axial, etc. cada una con diferentes usos.

SAP2000, permite el uso de rotulas predefinidas basados en normas como ASCE/SEI 41-17, o definir rotulas personalizadas de acuerdo con una curva momento rotación específica o cálculos analíticos (American Society of Civil Engineers, 2017),

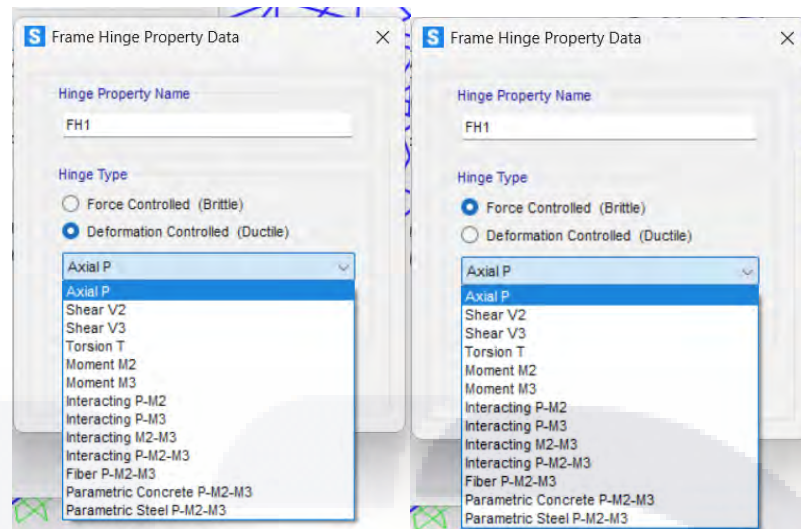


Figura 19 Tipos de rotulas plásticas (SAP 2000 v24.2).

Para asignar rutas en el modelo se sigue la siguiente ruta: Assign> Frame> Hinges.

Ubicación de la rótula:

Las rotulas se ubican al 5 y 95% de la longitud del elemento estructural, donde se espera ocurra la plastificación.

Propiedades de la rótula:

Las rotulas plásticas en SAP2000 se definen mediante una curva momento rotación en la que se señalan cinco puntos clave A, B, C, D y E (establecido por FEMA 356) que forman cuatro regiones que se pueden visualizar mediante una escala de colores.

A	0
A-B	Comportamiento elástico
B-C	Plastificación estable
C-D	Ablandamiento
D-E	Falla inminente

Tabla 4. Significado del color en cada rotula plástica. Tabla creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Dicha escala permite localizar los mecanismos de colapso, permitiendo conocer la ductilidad global de la estructura (Arburo, 2023).

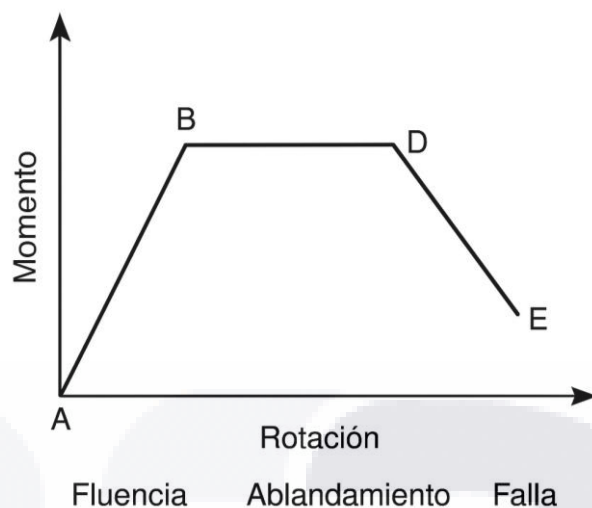


Figura 20 Grafica momento rotación. Imagen creada por el autor.

3.9.2. Hundimientos

Para asignar hundimientos en SAP2000, se deben seguir los siguientes pasos:

Paso 1:

Modelar la estructura. Definir secciones, apoyos y geometría.

Paso 2:

Asignar cargas relevantes para el modelo, como el peso propio.

Paso 3:

Define los casos de carga y añadir valores de hundimiento.

Paso 4:

Correr el análisis

Paso 5:

Visualizar los hundimientos.

3.9.3. Presfuerzo en SAP2000

Existen dos formas de calcular el presfuerzo en SAP2000, que serán descritas a continuación:

Paso 1:

Crear una viga de concreto y definirla como “simplemente apoyada”.



Figura 21 Viga definida en SAP2000, imagen del autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 2:

En la ventana de “Define load cases” eliminar el load case correspondiente a carga muerta (dead).

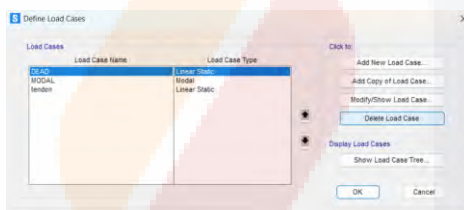


Figura 22 Eliminar el load case “Dead”, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 3:

Definir un nuevo “load pattern” para el presfuerzo en los tendones.

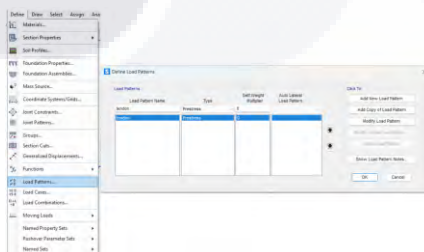


Figura 23 Load pattern de tipo presfuerzo, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 4:

Definir el presfuerzo en el tendón, puede ser por carga o por elemento. Ambas se comportan de forma similar, pero las perdidas en una y otra son distintas.

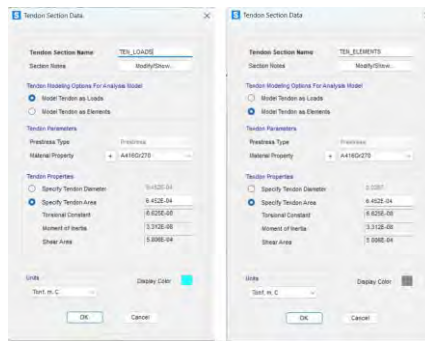


Figura 24 A la izquierda, presfuerzo modelado por carga y a la derecha por elemento, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 5:

Definir datos del tendón.



Figura 25 Datos del tendón, Imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 6:

Definir la carga en el tendón.

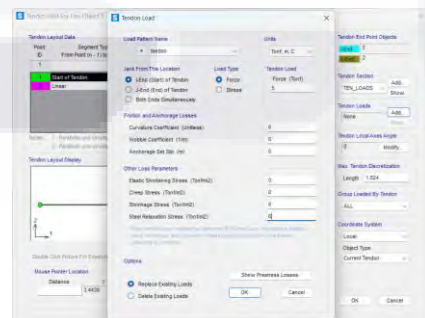


Figura 26 Definir cargas del tendón, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 7:

Añadir la sección del tendón.

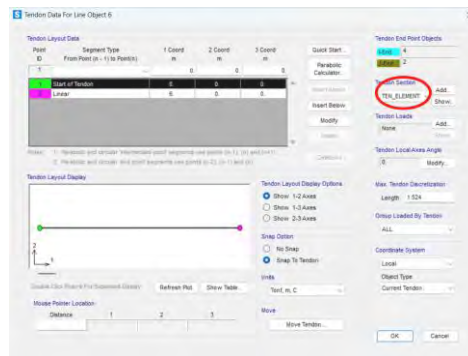


Figura 27 Añadir sección, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 8:

Cambiar el status del load case “Modal” de “Run” a “Do not run”.

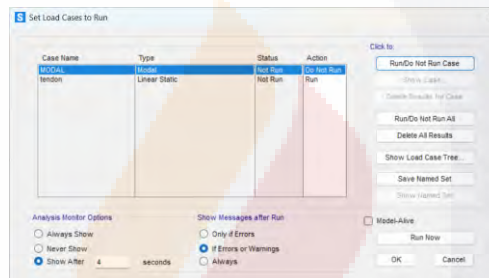


Figura 28 Status del load case Modal, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 9:

Revisar el desplazamiento, en la dirección del presfuerzo, al añadir una carga de una tonelada.

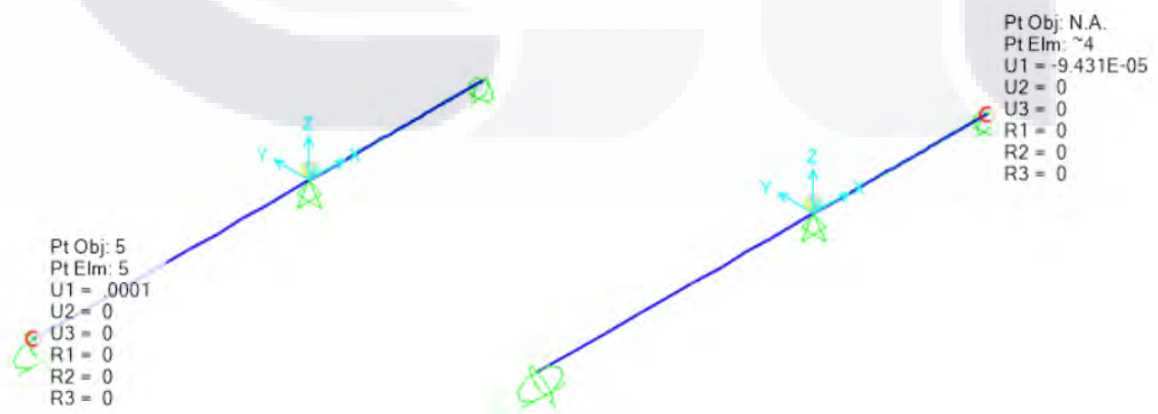


Figura 29 Desplazamiento en viga, producido por la carga de presfuerzo de una tonelada, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 10:

Revisar las pérdidas de carga en los tendones, los tendones definidos por carga experimentan una menor pérdida que los definidos por elemento.

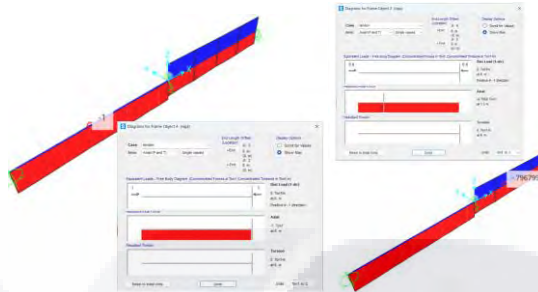


Figura 30 Diagramas de carga axial y torsión (1 ton), imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 11:

Realizar un ajuste de carga de una tonelada a cinco toneladas y revisar el desplazamiento.

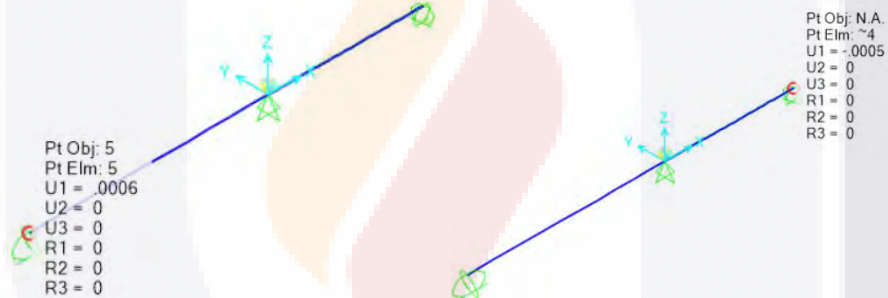


Figura 31 Desplazamiento en viga, producido por la carga de presfuerzo de cinco toneladas, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 12:

Revisar la pérdida de carga para cinco toneladas.

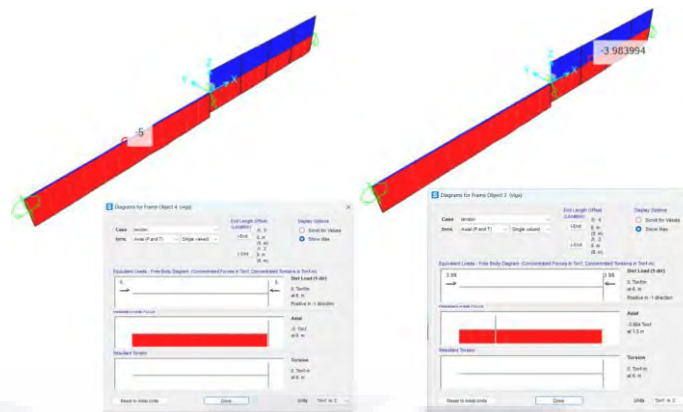


Figura 32 Diagramas de carga axial y torsión (5 ton), imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).



CAPÍTULO

IV

PLANTEAMIENTO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

4. PLANTEAMIENTO DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

A continuación, se describe el proceso a seguir para alcanzar los objetivos en este trabajo de investigación. Realizado en ocho etapas que serán descritas a lo largo de este capítulo.

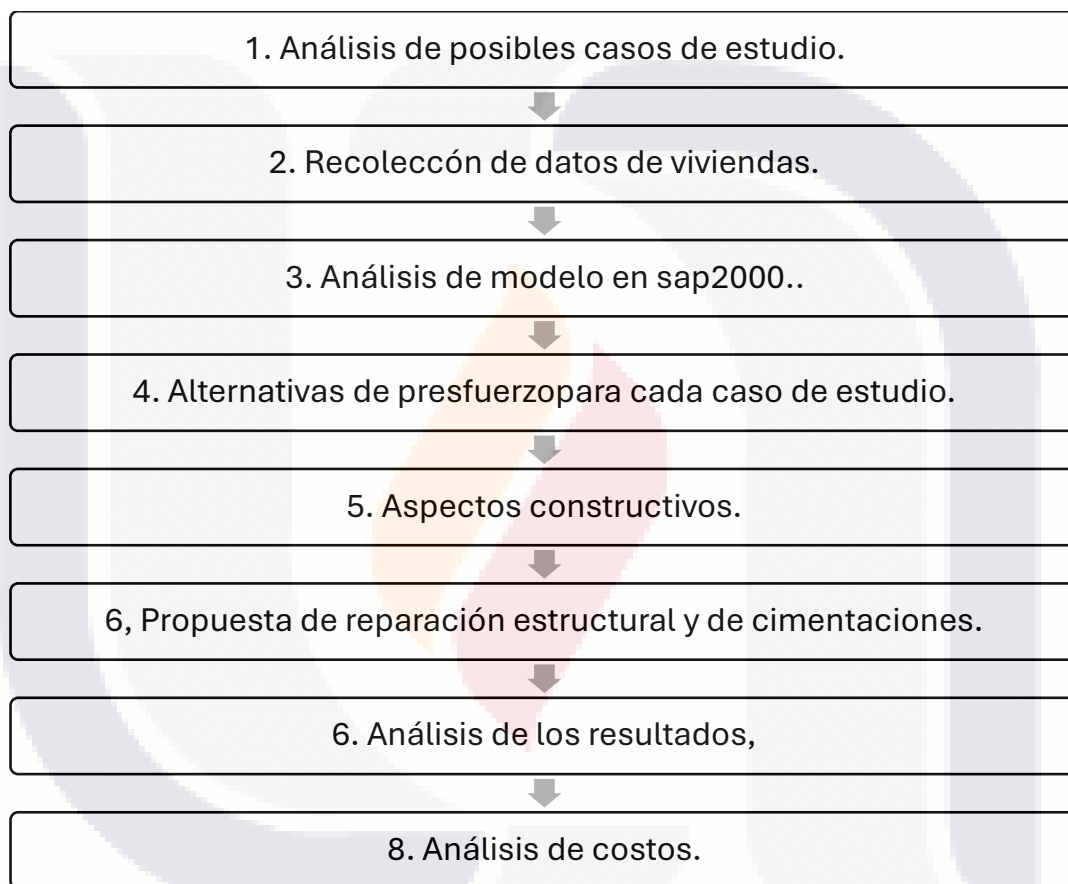


Tabla 5 Planteamiento de la campaña experimental

4.1. Selección de la muestra

Para elegir el objeto de estudio en esta investigación se estableció contacto con los propietarios de viviendas dentro del área de afectación de alguna falla geológica y se creó un acuerdo de convivencia que permitiera la recolección de datos de un

inmueble seleccionado. Además de hacer uso del repositorio de tesis de la universidad, del que se tomaron datos ya existentes de construcciones dañadas por subsidencia.

4.2. Dimensión de la muestra

Esta investigación tiene como muestra una vivienda de mampostería, que se analizó a detalle, y en la cual se verificaron los objetivos de este escrito, para posteriormente extrapolar los resultados a SAP2000, donde se elaboraron tres configuraciones para el presfuerzo exterior y se realizó una comparativa. Lo que permitió establecer que el método no se basa un objeto o configuración particular y se puede aplicar a cualquier caso de estudio futuro.

4.3. Recolección de información

Se creó un contacto directo con el propietario de una vivienda directamente afectada por subsidencia. El cual permitió la toma de información cualitativa del inmueble, creando una base de datos de las patologías ocasionadas por su cercanía y convivencia con el fenómeno. Permitiendo su clasificación y estudio.

4.4. Diseño de la investigación

4.4.1. Análisis de posibles casos de estudios

Durante esta parte de la investigación se contactó con los propietarios de algunas viviendas dañadas por los efectos de los hundimientos verticales diferenciales, para seleccionar una y trabajar directa y detalladamente en ella. Así mismo se tomaron datos de casos de estudio previamente analizados para tomarlos como casos de estudio secundarios.

4.4.2. Recolección de datos de viviendas

A través de trabajo en campo, se obtuvieron datos de la topografía del inmueble, detallando la configuración de los hundimientos diferenciales; datos de los agrietamientos y desplomes en muros; descuadres en ventanas y puertas, así como agrietamientos en piso y otras patologías observadas.

4.4.3. Análisis del modelo en SAP2000

Paso 1:

Con los datos obtenidos de campo se elaboró un plano arquitectónico y posteriormente uno estructural, apoyado en un análisis de las normas y reglamentos de construcción vigentes en la época en que se construyó el inmueble.

Paso 2:

Se agregó al modelo la configuración de los hundimientos verticales diferenciales, mediante el uso de resortes y se observó el daño en cada elemento estructural.

Paso 3:

Se añadieron alternativas de reparación en cimentaciones y se comparó el cambio en los hundimientos.

Paso 4:

Se añadió estratégicamente el presfuerzo exterior.

Paso 5:

Se comparó y analizo el cambio en el desplazamiento vertical, tratando de mitigarlo completamente.

4.4.4. Alternativas de presfuerzo

Atendiendo al daño el caso de estudio, se revisaron diversas alternativas para la configuración del presfuerzo, eligiendo la que brindara la solución con mayor eficiencia.

4.4.5. Aspectos constructivos

Una vez seleccionada la alternativa más eficiente, se realizó un análisis detallado del cómo llevar a cabo la reparación, considerando la cercanía con otras construcciones, las limitaciones espaciales y el equipo necesario para realizar el trabajo.

4.4.6. Propuesta de reparación estructural

Considerando los aspectos constructivos se ofrece una propuesta de reparación real, para el primer caso de estudio, en la que se detalla la forma de tratar con cada una de las patologías observadas en la vivienda.

4.4.7. Análisis de resultados

Se realizó un recuento de los hallazgos encontrados en el caso de estudio principal, identificando patrones de comportamiento con los casos de estudio secundarios al realizar una comparativa entre ellos, entendiendo la relevancia del estudio y planteando la perspectiva para futuras investigaciones.

4.4.8. Análisis de costos

Se realizó un recuento de los hallazgos encontrados en el caso de estudio principal, identificando patrones de comportamiento con los casos de estudio secundarios al

realizar una comparativa entre ellos, entendiendo la relevancia del estudio y planteando la perspectiva para futuras investigaciones.





CAPÍTULO
V
RESULTADOS

5. RESULTADOS

5.1. Caso de estudio

Ubicación:

El inmueble se encuentra ubicado en el fraccionamiento El dorado, Primera sección, en Granada #137, Aguascalientes, Ags.

- **Al noreste:** Fachada frontal del inmueble, sobre la calle Granada.
- **Al suroeste:** Fachada posterior del inmueble, colinda con otra vivienda del fraccionamiento.
- **Al noroeste:** Colinda con otra vivienda del fraccionamiento.
- **Al sureste:** Colinda con otra vivienda del fraccionamiento.



Figura 33 Croquis tomado de Google Maps. Ubicación del sitio

Descripción del inmueble:

Cuenta con un área aproximada de 61.6 m². Es de uso habitacional, con un nivel en el que se distribuyen tres recamaras, una sala de TV, una sala-comedor, dos baños, cocina, cochera y un patio.



Figura 34 Croquis del inmueble, creado por el autor

Sistema constructivo:

- Mampostería confinada. Muros de ladrillo de barro rojo recocido, confinados por castillos y dalas de concreto armado.
- Una losa de vigueta y bovedilla.
- Cimentación de mampostería de piedra braza.

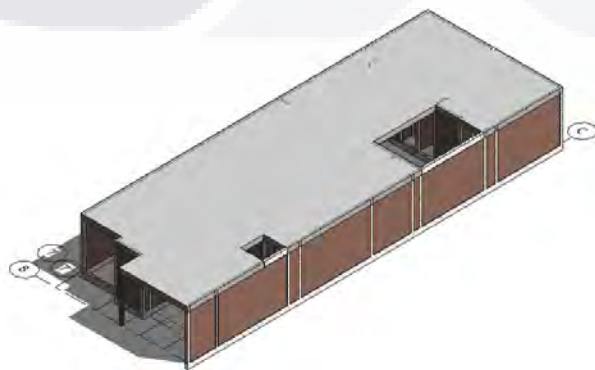


Figura 35 Vista 3D Inmueble, imagen creada por el autor (Revit 2026).

Descripción del daño:

La vivienda presenta una gran cantidad de agrietamientos, desplomes, desprendimiento de piezas cerámicas, descuadres en marcos de puertas y ventanas producto de su interacción con la “falla el dorado”.

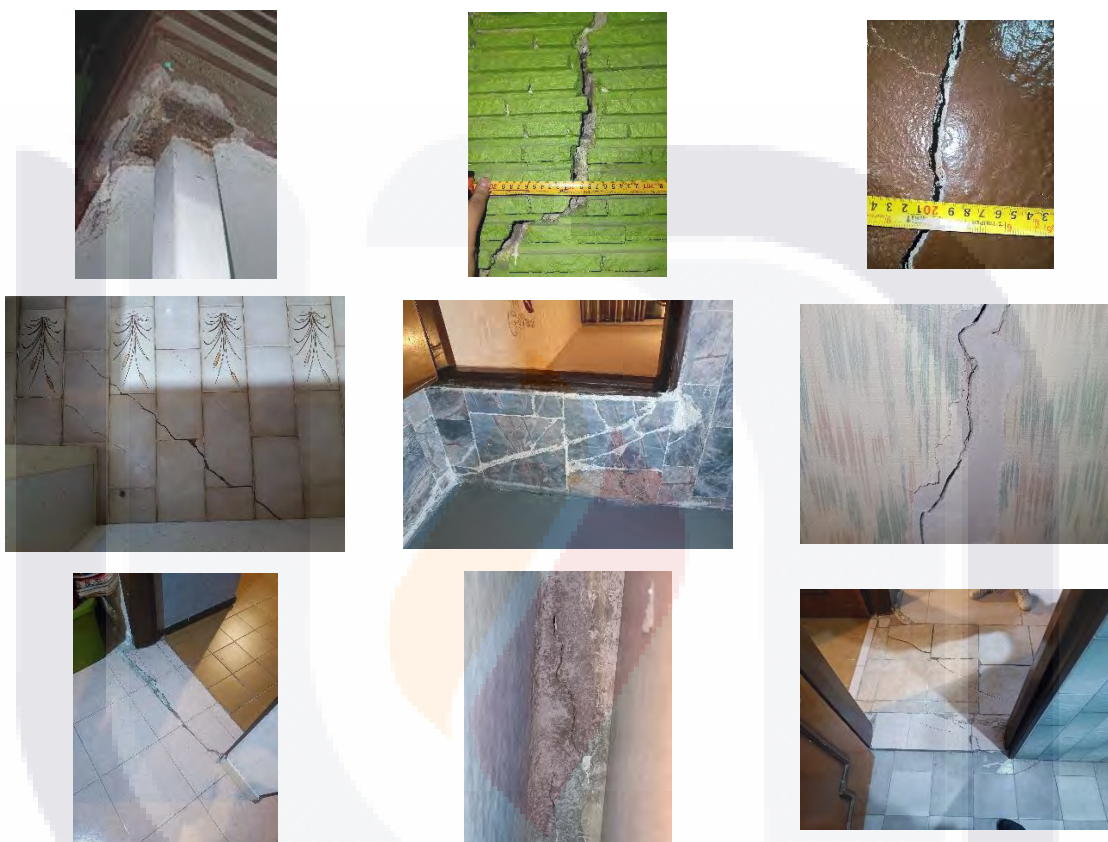


Figura 36 Daño del inmueble, fotografías tomas del sitio.

Configuración topográfica:

El inmueble presenta un desnivel producto de los hundimientos diferenciales ocasionados por la falla “el dorado”. A continuación, se presenta la configuración topográfica.



Figura 37 Curvas de Nivel, datos tomados del sitio.

Configuración del hundimiento:

El inmueble se encuentra en contacto directo con la “falla el dorado” por lo que presenta un desnivel considerable en algunas zonas. A continuación, se detalla un croquis de los hundimientos en zonas estratégicas para el análisis estructural.



Figura 38 Croquis de hundimientos del inmueble, imagen creada por el autor.

5.2. Modelado en Sap2000

Con el fin de replicar el comportamiento de la vivienda se optó por modelar la estructura en el programa SAP2000.

5.2.1. Sobre el trazo del proyecto

Paso 1:

En base a los datos obtenidos en campo se trazó la estructura de la casa, en sap2000.

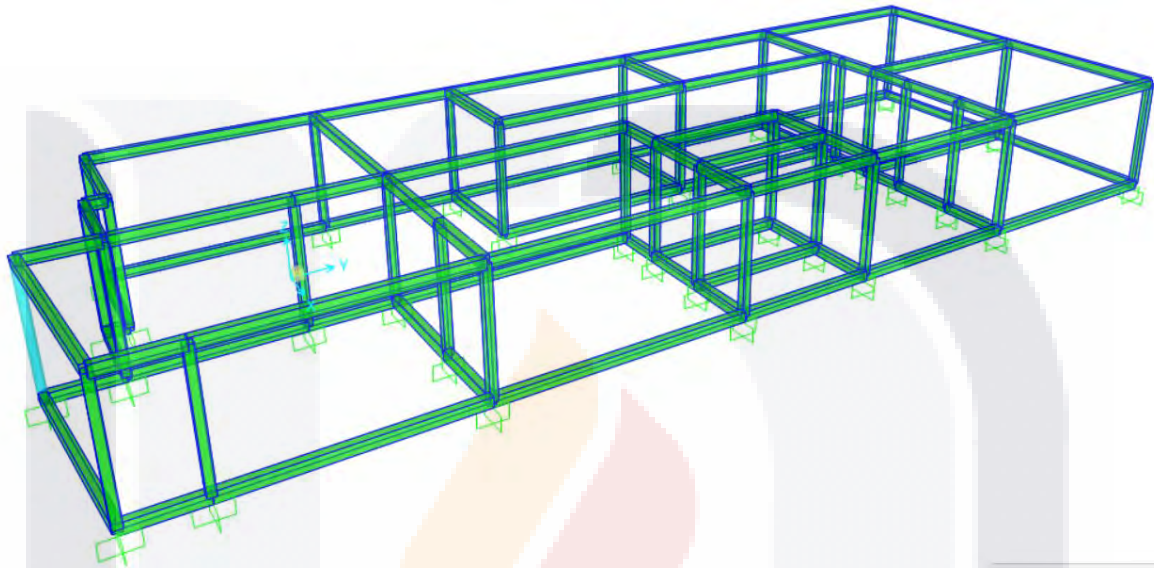


Figura 39 Estructura del modelo, imagen creada por el autor (SAP 2000 v24.2).

Paso 2:

Se definieron los materiales necesarios para la elaboración del proyecto:

- *Concreto.*

Dada la antigüedad de la estructura se optó por trabar con un concreto $f'c=150\text{kg/cm}^2$.



Figura 40 Definiendo los parámetros del concreto (SAP 2000 v24.2).

- Mampostería.

Para la mampostería se trabajó con mampostería de ladrillo rojo recocido con las características definidas a continuación:



Figura 41 Definiendo los parámetros de la mampostería (SAP 2000 v24.2).

Paso 3:

Se definieron las secciones correspondientes a castillo y cadena de cerramiento y desplante.

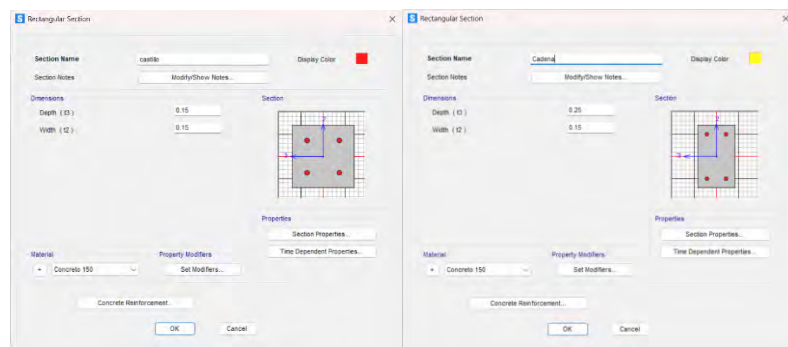


Figura 42 Definiendo secciones (SAP 2000 v24.2).

Paso 4:

Se trazo en Sap2000 el modelo de diagonales equivalentes, obtenidas de acuerdo con lo establecido en las NTC. Y se definió una sección para cada muro de la vivienda.

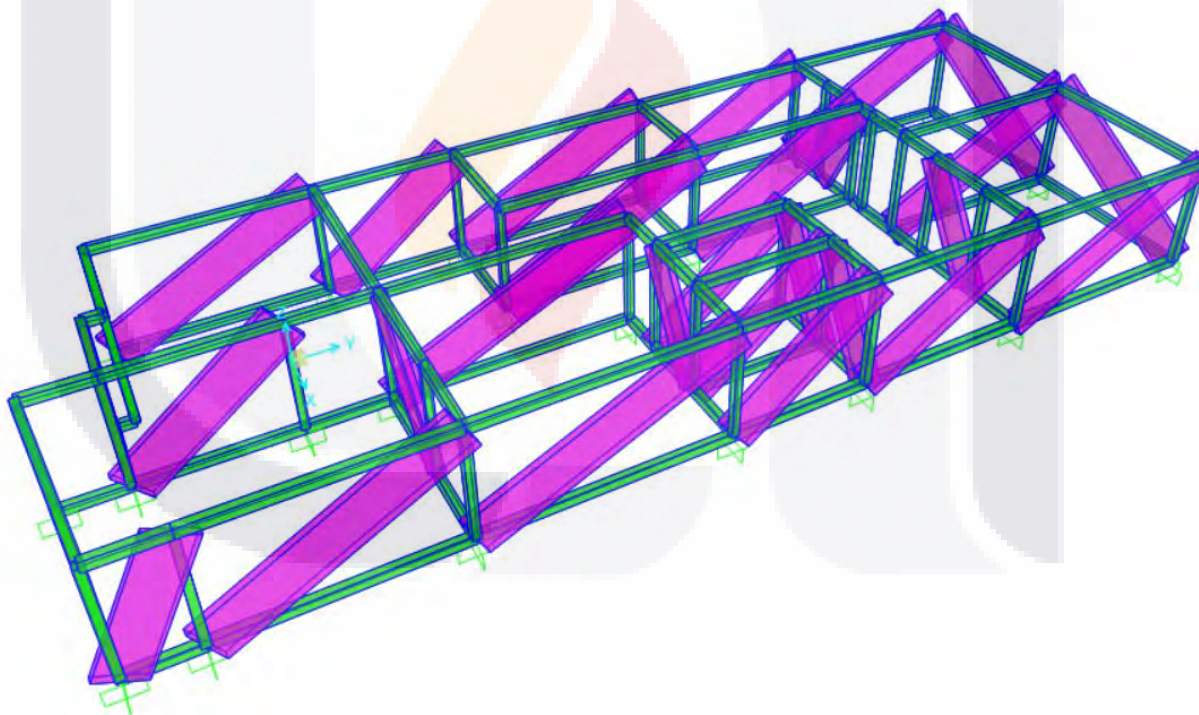


Figura 43 Trazo de diagonales equivalentes en el modelo (SAP 2000 v24.2).

5.2.2. Rotulas plásticas

Paso 5:

Rotula plástica para castillos.

Se trata de una rotula plástica de “Interacting P-M2” que representa una interacción entre carga axial y momento flector en un plano. Esto permite la interpretación realista de elementos sujetos a compresión en el plano vertical.

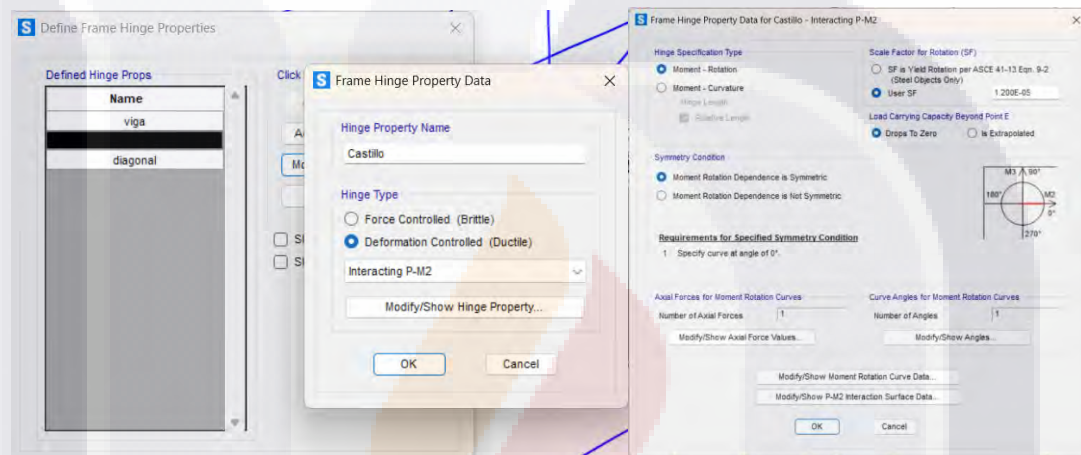


Figura 44 Rotula plástica P-M2 (SAP 2000 v24.2).

Paso 6:

Rotula plástica para cadenas.

Se trata de una rotula plástica de “Interacting P-M3” que representa una interacción entre carga axial y momento flector en un plano. Esto permite la interpretación realista de elementos sujetos a momento flector en el plano horizontal.

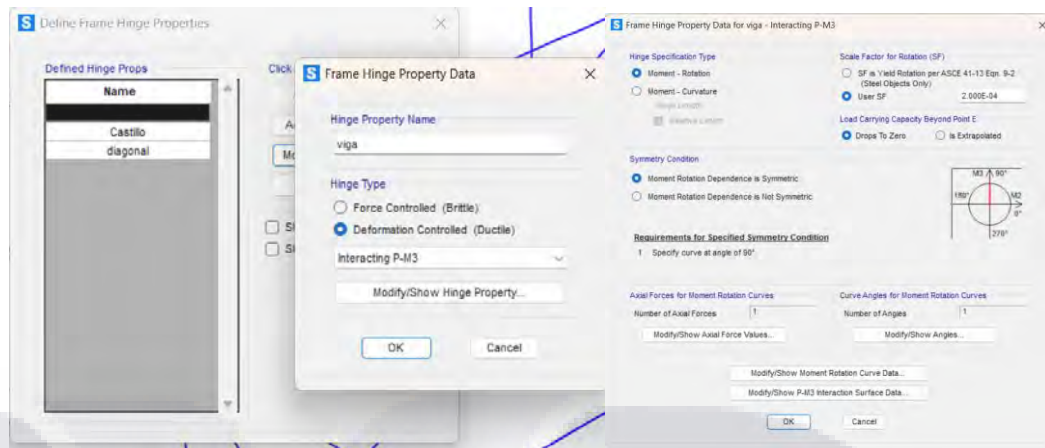


Figura 45 Rotula plástica P-M3 (SAP 2000 v24.2).

Paso 7:

Rotula plástica para muros.

Como se mencionó en la sección anterior, los muros se definieron con una diagonal equivalente. Para esta diagonal se definió una rotula plástica en carga axial con fuerza o desplazamiento controlado.

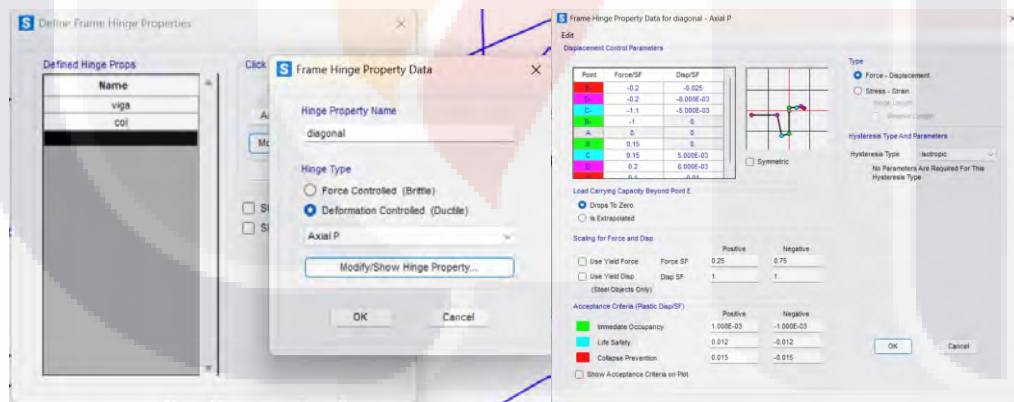


Figura 46 Rotula plástica de carga axial (SAP 2000 v24.2).

5.2.3. Configuración del hundimiento

La configuración del hundimiento en el modelo se realizó de la siguiente manera:

Paso 8:

Definiendo un nuevo patrón de carga: *Define>Load patterns*, de tipo “settlement” y nombrarla.

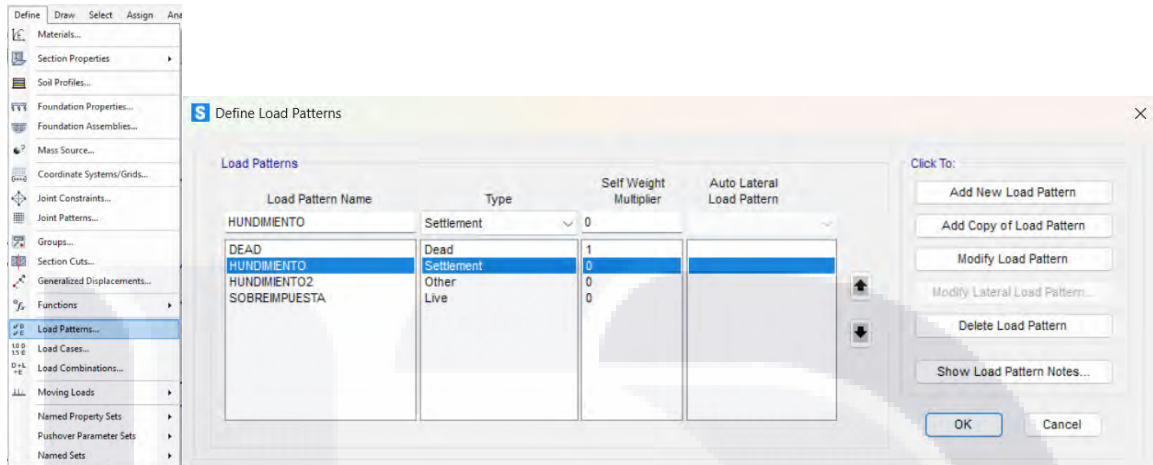


Figura 47 Definiendo el Load Pattern "Hundimiento" (SAP 2000 v24.2).

Paso 9:

Definiendo un caso de carga, para el patrón de carga antes definido.

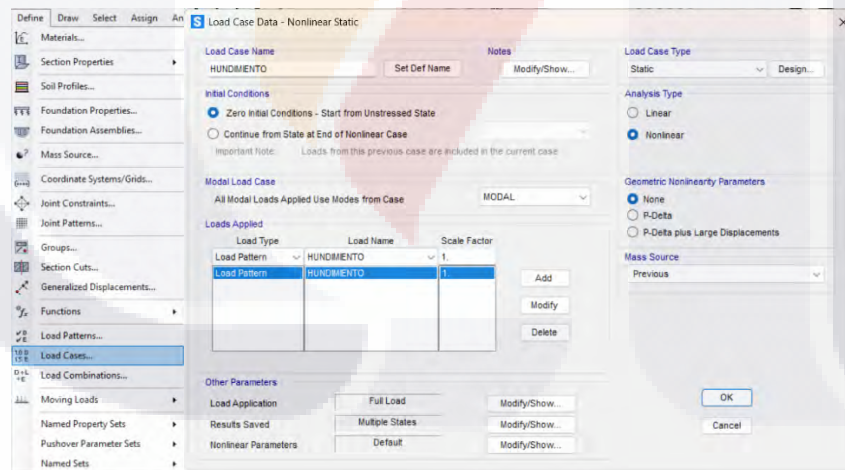


Figura 48 Definiendo el "Load Case" Hundimiento (SAP 2000 v24.2).

Paso 10:

Definiendo otro patrón de carga de tipo “other” y nombrarla una secuencia de la anterior.

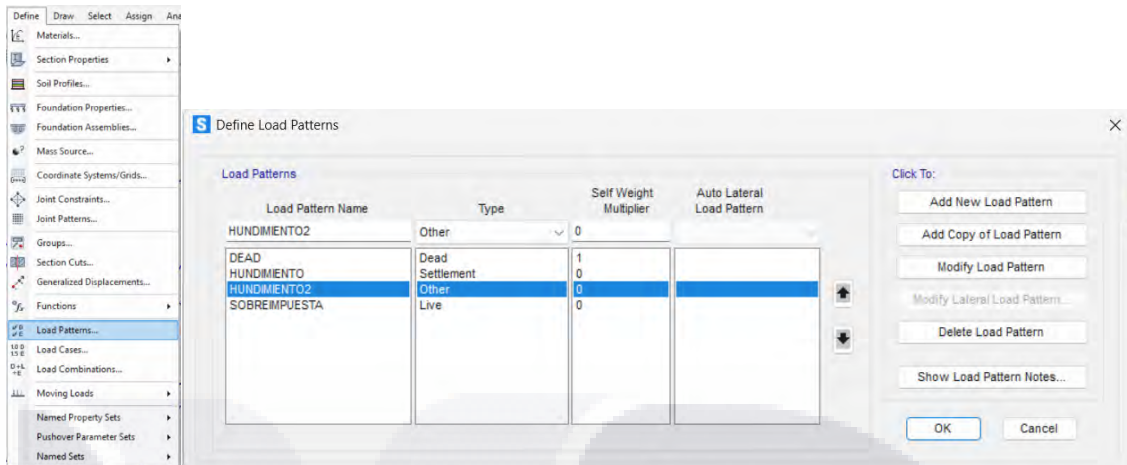


Figura 49 Definiendo el Load Pattern “Hundimiento2” (SAP 2000 v24.2).

Paso 11:

Definiendo un caso de carga, para el nuevo patrón definido.

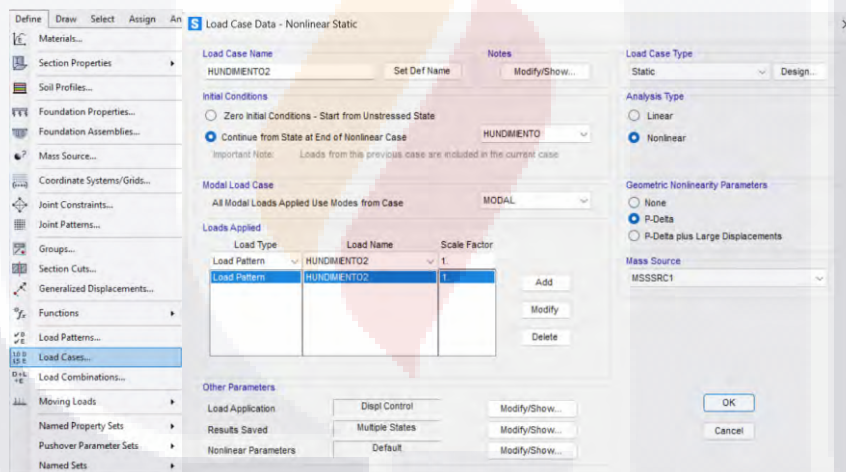


Figura 50 Definiendo el Load case “Hundimiento2” (SAP 2000 v24.2).

Paso 12:

Asignar desplazamiento. Seleccionando un nodo, y con el patrón de hundimientos previamente definido en AutoCAD seguir la siguiente ruta.

Assign>Join Loads>Displacements

Seleccionar el patrón de carga “Hundimiento” y asignar una traslación global en Z, con el valor del hundimiento.

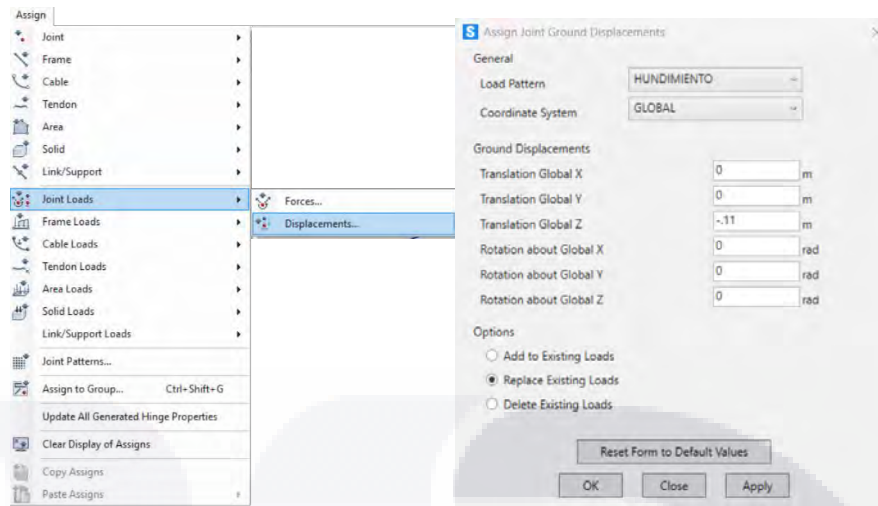


Figura 51 Asignando el hundimiento (SAP 2000 v24.2).

Paso 13:

Finalmente se corrió el modelo.

5.2.4. Verificación de resultados

Después de correr el modelo, se corroboró que el hundimiento coincidiera con el que se asignó en cada uno de los nudos.

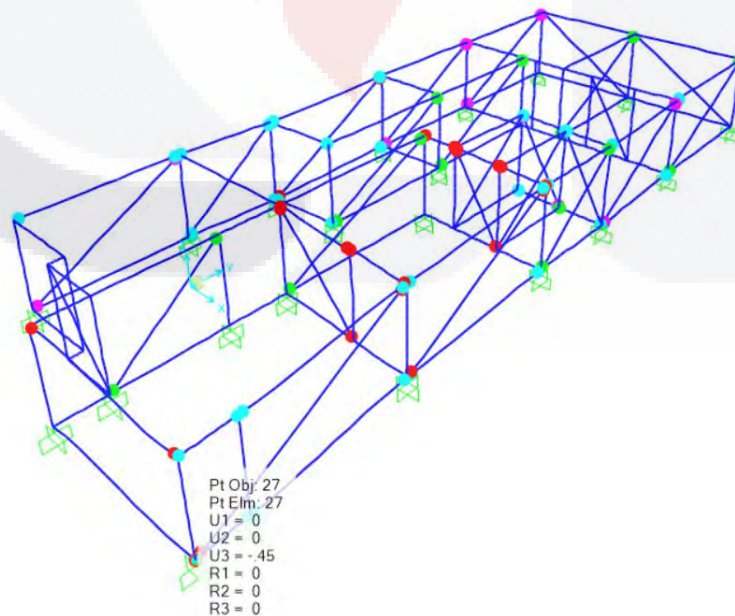


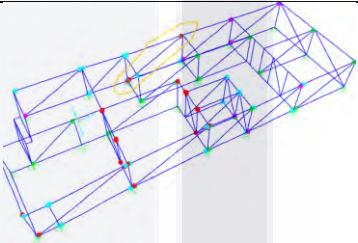


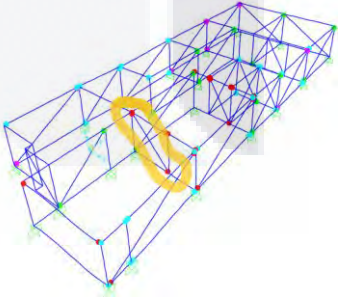

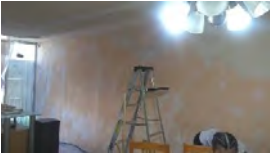
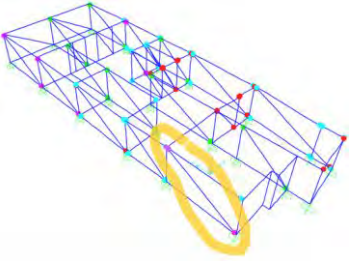


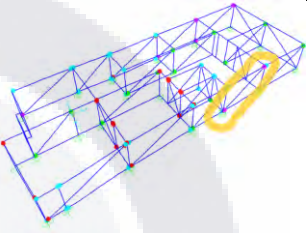


Figura 52 Hundimiento sobre la fachada de la vivienda (SAP 2000 v24.2).

Una vez que se corroboró que el hundimiento coincide, es preciso identificar que los resultados del análisis arrojan resultados similares a los encontrados en la vida real. Para esto, y haciendo uso de la escala de colores mostrada en la sección 3.9.1 de este escrito se revisaron los muros cuyas rotulas alcanzaron un nivel de plastificación estable, ablandamiento o falla. Representados gráficamente por la siguiente escala de colores:

	Plastificación estable	Ablandamiento	Falla
Estado de la rotula	Croquis	Fotografía	Ubicación en el modelo
	<p>Muro en el eje A, entre los ejes 3-5.</p> 		
	<p>Muro en el eje 6</p> 		

Estado de la rotula	Croquis	Fotografía	Ubicación en el modelo
	<p>Muro en el eje A, entre los ejes 6-7.</p> 		
	<p>Muro en el eje C, entre 2-3</p> 		

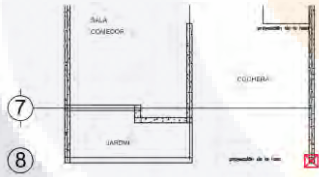

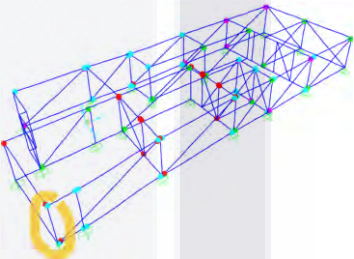
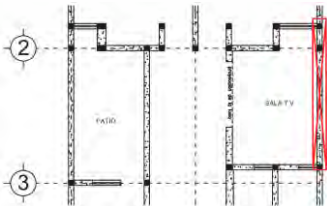

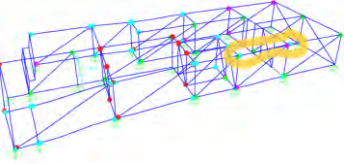
Estado de la rotula	Croquis	Fotografía	Ubicación en el modelo
	<p>Castillo en el eje C y 8.</p> 		
	<p>Cadena en el eje C, entre 2-3</p> 		

Tabla 5. 1 Descripción del daño.

Tras comprobar resultados se concluyó que el comportamiento de la estructura corresponde con el del comportamiento modelo (los resultados del análisis se expresan en los anexos).

Posterior al análisis se realizaron tres propuestas de reparación estructural con presfuerzo exterior con la finalidad de restablecer el nivel del inmueble y poder identificar la que ofrezca un mejor comportamiento en contraste con el tiempo de ejecución de la reparación y la dificultad de acceso al momento de restablecer el nivel de la estructura.

5.3. Primera alternativa de presfuerzo

La primera alternativa de presfuerzo consiste en colocar extensiones a base de acero estructural a tres castillos preexistentes, sobre el eje central de la vivienda y conectar un tendón al eje externo (derecho) del inmueble. Una alternativa poco invasiva al interior del inmueble, ya que los tendones fueron estratégicamente colocados con la intención de manipular la losa existente en la menor medida posible.

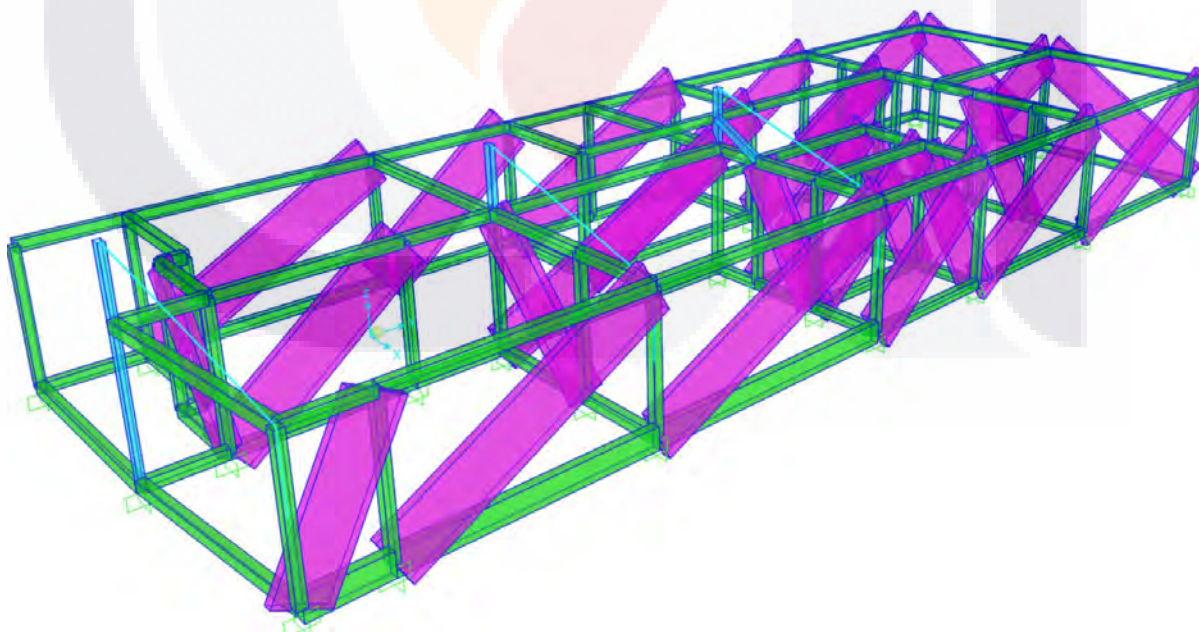


Figura 53 Primera propuesta de reparación (vista del modelo) (SAP 2000 v24.2).

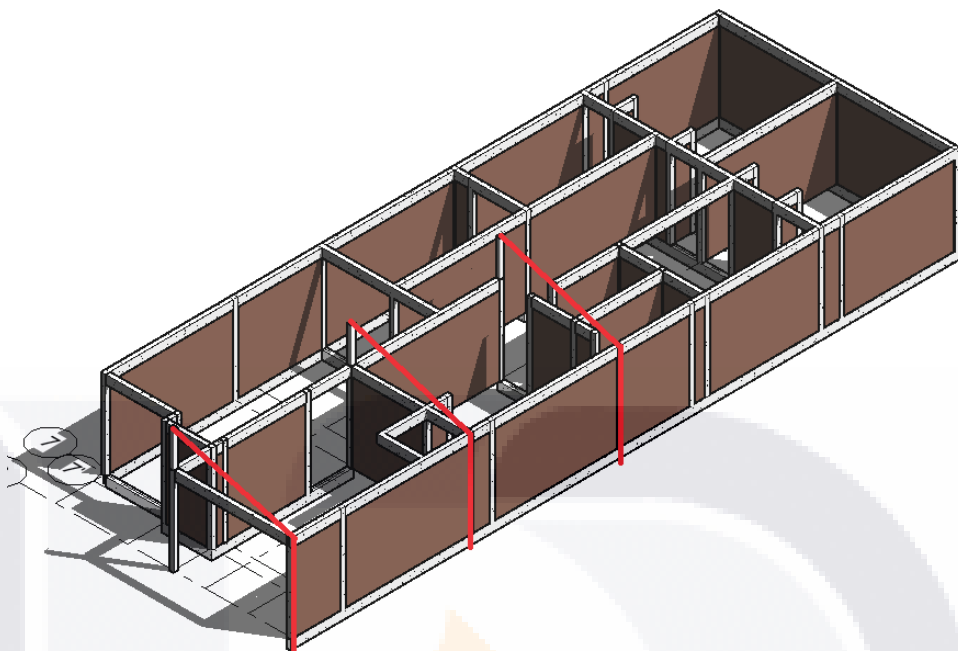


Figura 54 Vista 3D del modelo (Revit 2026)

5.3.1. Restitución del nivel del inmueble

Esta alternativa permite la restitución del **95%** en el nivel de la vivienda haciendo uso de una combinación de acero estructural, presfuerzo y las reparaciones estéticas necesarias.

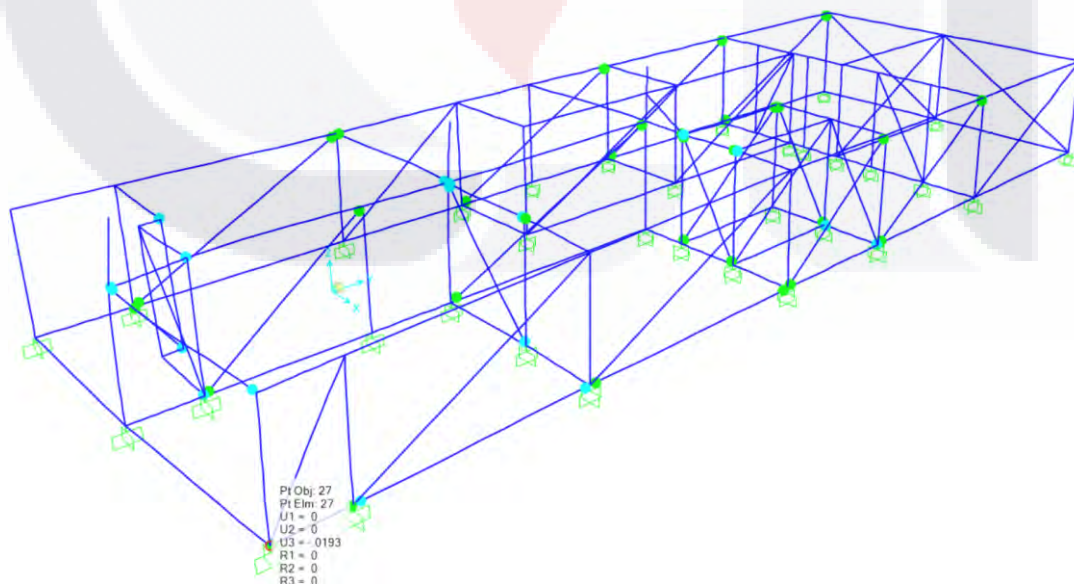


Figura 55 Restitución del nivel (SAP 2000 v24.2).

5.3.2. *Detalles constructivos*

La propuesta presenta una alternativa de refuerzo estructural bastante cómoda en cuestión de acceso al interior de la vivienda, ya que se establecieron dos de los ejes de aplicación del presfuerzo en los límites de la losa de azotea. La aplicación del presfuerzo se centra en los ejes B y C.

5.3.3. *Costo de la reparación*

La propuesta tiene un costo de **72,044.29** pesos en los que se incluye la reparación de los muros y firme dañados, además de la integración del presfuerzo, sin embargo, no incluye costos de acabados finales en muros, pisos o pintura.

Trabajo realizado	Importe
Suministro y colocación de torón de presfuerzo de 0.5" y todos los componentes necesarios en la propuesta	\$42,411.64
Reparación de fisuras en elementos estructurales (muros, castillos, cadenas).	\$19,407.06
Sustitución de firme dañado	\$10,225.59
Total:	\$72,044.29

Tabla 6 Costo primera propuesta de reparación.

5.4. *Segunda alternativa de presfuerzo*

La segunda alternativa de presfuerzo ofrece una solución similar a la anterior, solo que arrastra los tendones de un extremo a otro del inmueble en el eje transversal. Permitiendo reducir la altura de las columnas que lo delimitan. Aproximadamente a la mitad de la altura agregada con la propuesta anterior.

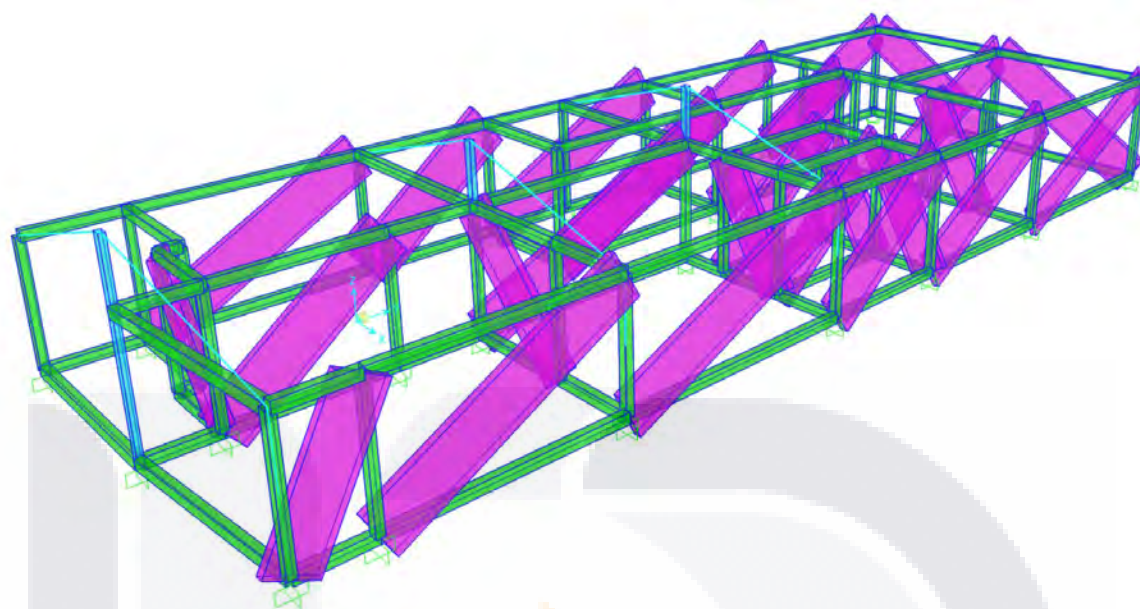


Figura 56 Segunda propuesta de reparación (vista modelo) (SAP 2000 v24.2).

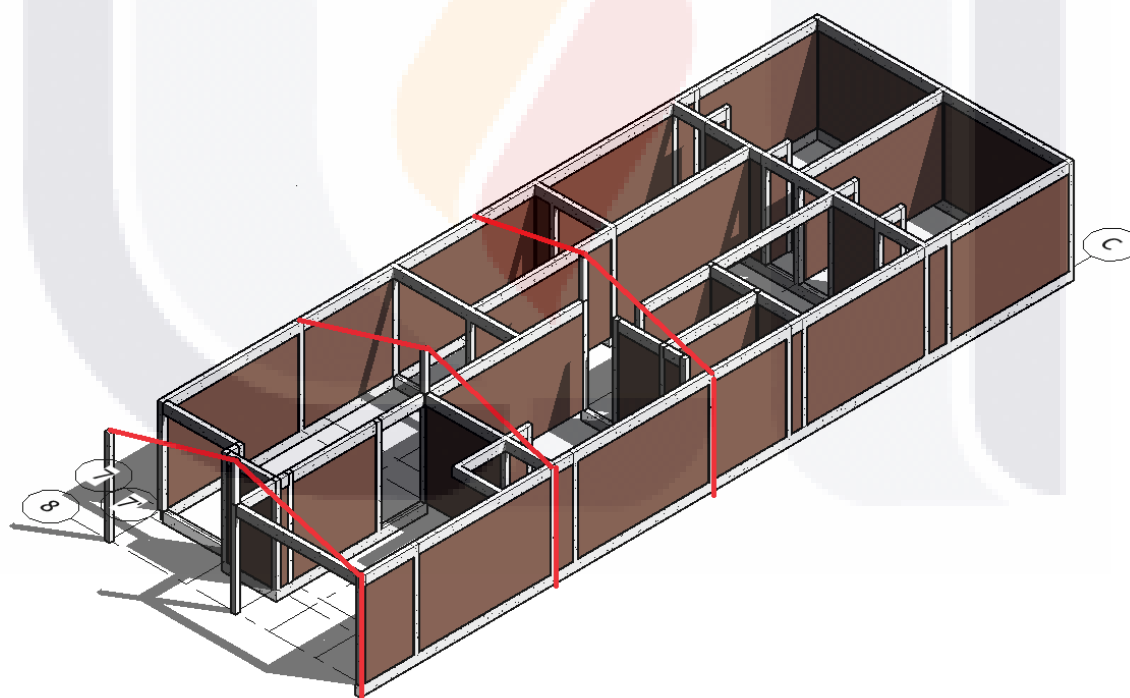


Figura 57 Vista 3D segunda propuesta (Revit 2026).

5.4.1. **Restitución del nivel del inmueble**

La segunda alternativa nos muestra una restauración del nivel de la casa de **99%**, En una combinación entre acero de refuerzo, presfuerzo y las reparaciones estéticas necesarias.

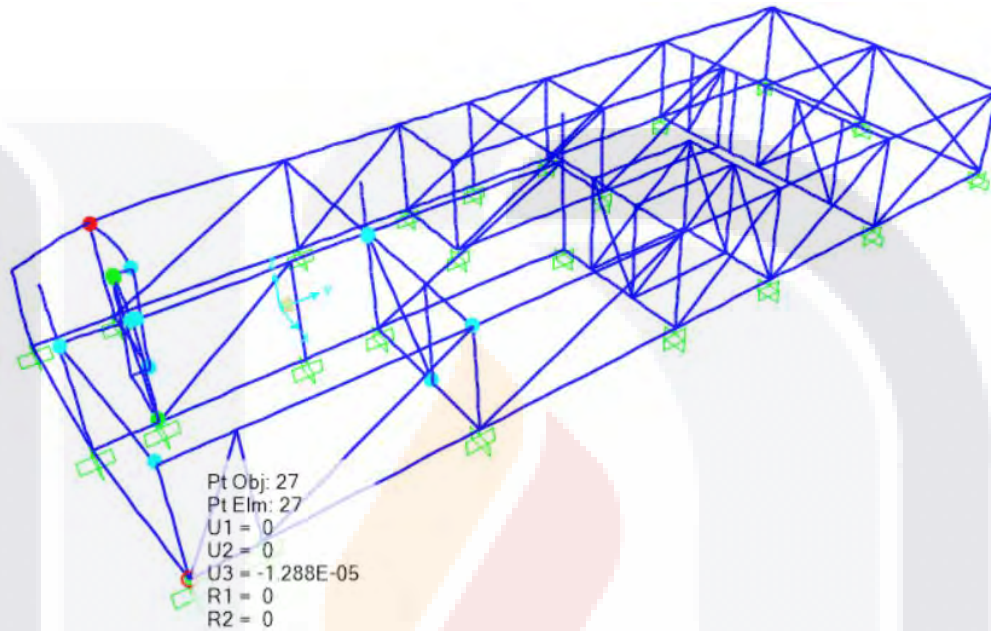


Figura 58 Restitución del nivel, segunda propuesta. (SAP 2000 v24.2).

5.4.2. **Detalles constructivos**

Para realizar esta propuesta es necesario, realizar una perforación en la losa en el tercer eje de aplicación de presfuerzo. El eje uno y dos se encuentran en los límites de la losa de azotea por lo que solo se requiere adaptar el sistema.

También es importante habilitar la contratrabe en el eje C entre los ejes 6 y 8, con la finalidad de facilitar el anclaje, y una trabe que proporcione rigidez en el tercer punto de apoyo del presfuerzo. Generando una conexión de los ejes A-B. A si mismo es necesario recurrir a usar el castillo en el eje (A,8) con la finalidad de dar soporte a la estructura.

El acero estructural consta de un perfil HSS, además de optar por cambiar la columna de acero preexistente por este mismo perfil.

5.4.3. Costo de la reparación

La propuesta tiene un costo de **85,303.96** pesos en los que se incluye la reparación de los muros y firme dañados, además de la integración del presfuerzo, sin embargo, no incluye costos de acabados finales en muros, pisos o pintura.

Trabajo realizado	Importe
Suministro y colocación de torón de presfuerzo de 0.5" y todos los componentes necesarios en la propuesta	\$55,671.31
Reparación de fisuras en elementos estructurales (muros, castillos, cadenas).	\$19,407.06
Sustitución de firme dañado	\$10,225.59
Total:	\$85,303.96

Tabla 7 Segunda propuesta de reparación

5.5. Tercera alternativa de presfuerzo

La tercera alternativa, al igual que la primera, muestra una extensión de tres castillos en el eje central del inmueble con un tendón que sube desde el extremo “derecho” de la vivienda, pasa por la columna de acero estructural y termina en el extremo “izquierdo” de la vivienda.

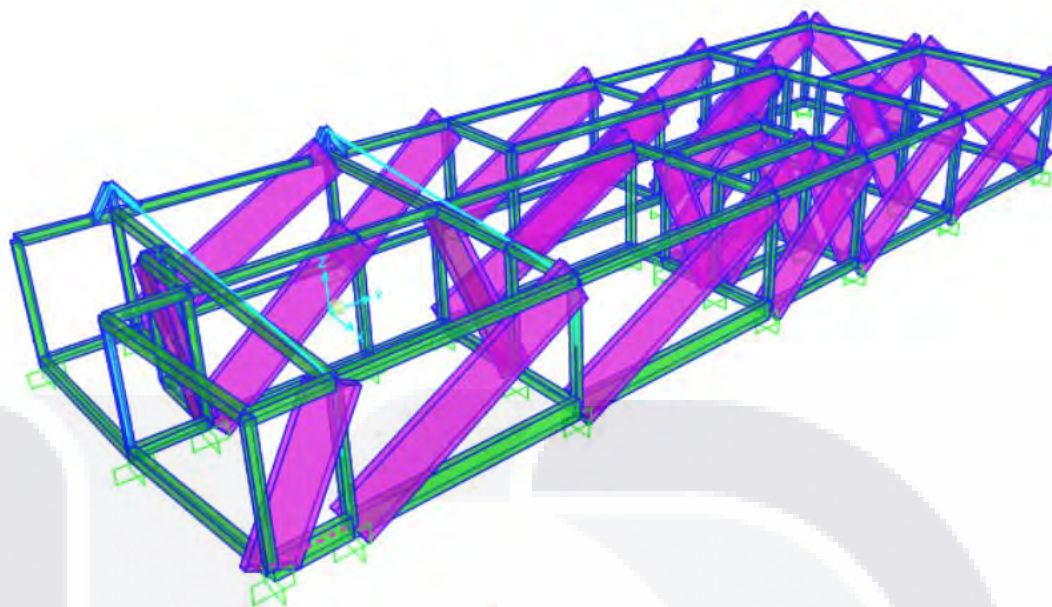


Figura 59 Tercera propuesta (vista modelo) (SAP 2000 v24.2).

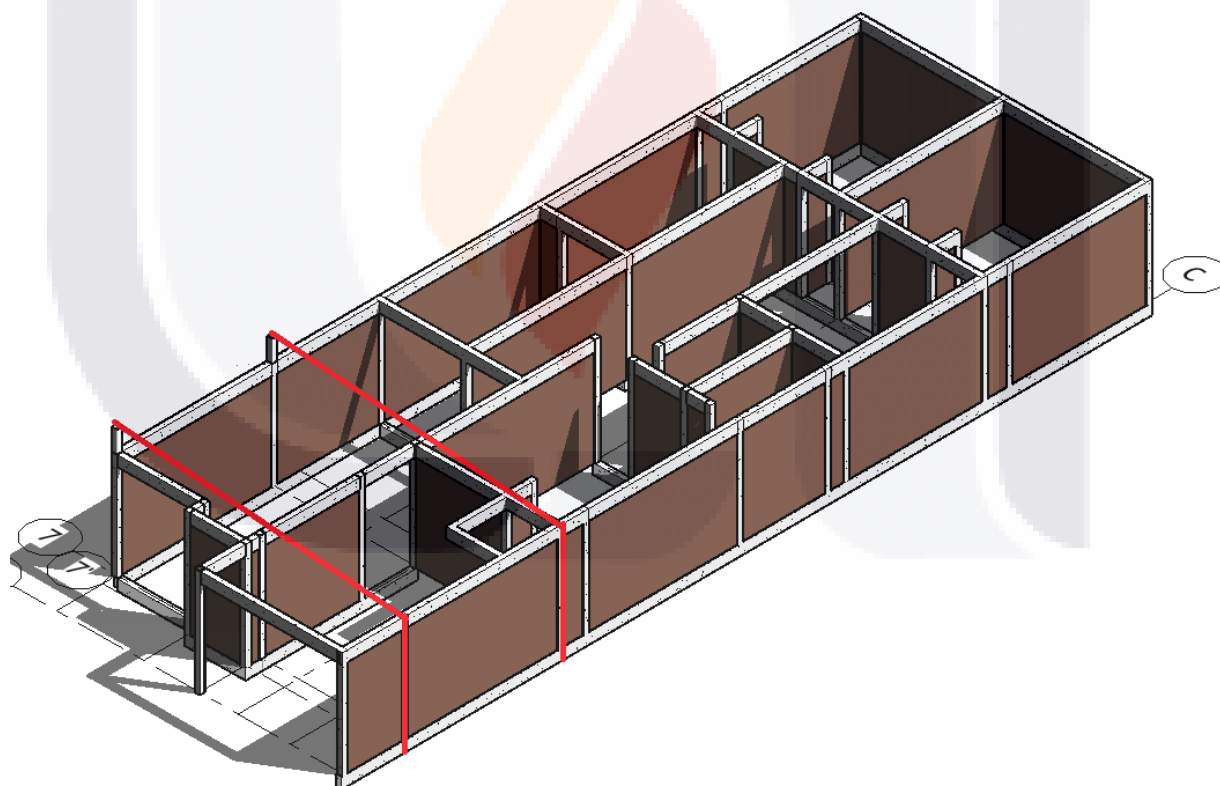


Figura 60 Vista 3D tercer propuesta (Revit 2026).

5.5.1. *Restitución del nivel del inmueble*

Esta propuesta ofrece una restitución del **100%** del hundimiento del inmueble. En una combinación entre acero de refuerzo, presfuerzo y las reparaciones estéticas necesarias.

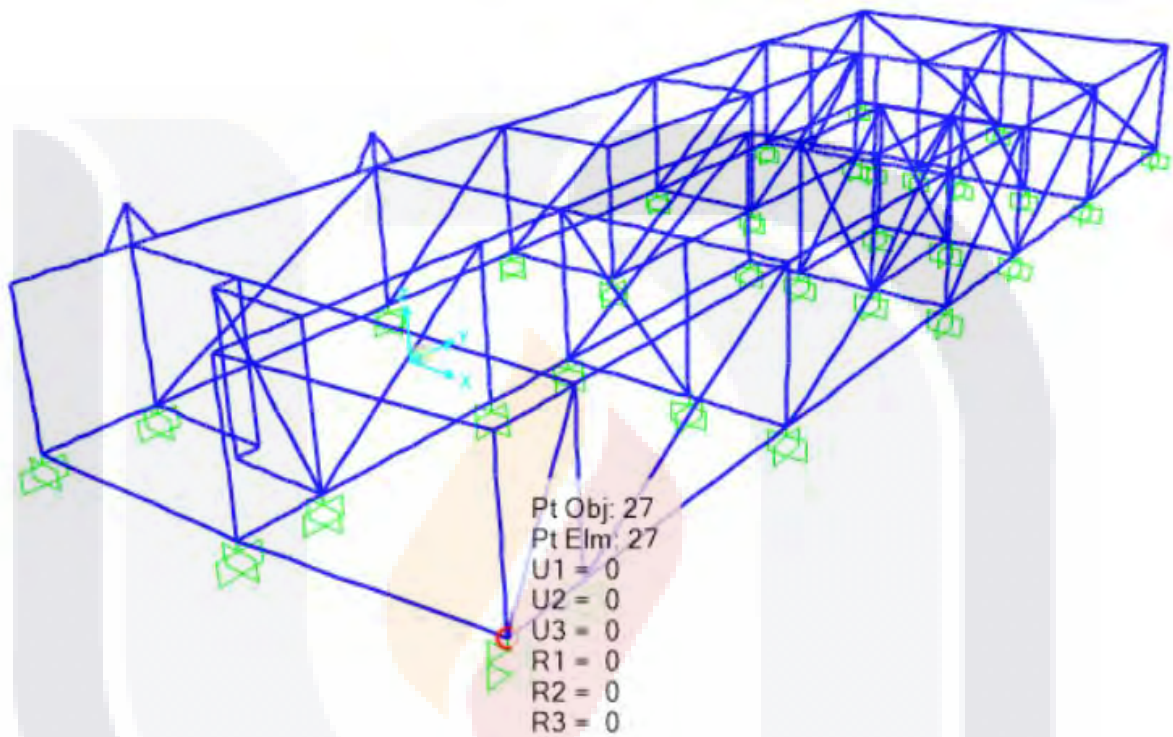


Figura 61 Restitución del nivel, tercera propuesta (SAP 2000 v24.2).

5.5.2. *Detalles constructivos*

La tercera propuesta constructivamente es la que conlleva un menor tiempo de ejecución, ya que los cables de presfuerzo solo se distribuyen en dos ejes. es necesario realizar una pequeña perforación en la losa para el paso del presfuerzo en el eje 7.

5.5.3. *Costo de la reparación*

La propuesta tiene un costo de **76,095.28** pesos en los que se incluye la reparación de los muros y firme dañados, además de la integración del presfuerzo, sin embargo, no incluye costos de acabados finales en muros, pisos o pintura.

Trabajo realizado	Importe
Suministro y colocación de torón de presfuerzo de 0.5" y todos los componentes necesarios en la propuesta	\$46,462.63
Reparación de fisuras en elementos estructurales (muros, castillos, cadenas).	\$19,407.06
Sustitución de firme dañado	\$10,225.59
Total:	\$85,303.96

Tabla 8 Tercera propuesta de reparación



CAPÍTULO
VI
DISCUSIÓN DE LOS
RESULTADOS

6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

El daño en inmuebles debido a los asentamientos diferenciales producidos por la subsidencia por la extracción de aguas subterráneas es un problema que concierne a todo el valle de Aguascalientes. El objetivo de este trabajo fue analizar métodos de reparación de estructuras de mampostería, en los que se convine el presfuerzo exterior con otros métodos de reparación estética.

Mediante el análisis de la estructura de mampostería, con el cual se desarrolló este proyecto, se demostró el cumplimiento de la hipótesis “Es posible restaurar la integridad estructural de una construcción de mampostería confinada afectada por subsidencia, haciendo uso de una combinación de métodos de reparación tales como el presfuerzo exterior y una caja disipadora de hundimientos diferenciales”, ya que las tres propuestas ofrecen en mayor o menor medida restaurar la integridad estructural de la vivienda.

Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Restitución del nivel del 95%	Restitución del nivel del 99%	Restitución del nivel del 100%
Costo de \$72,044.29	Costo de \$85,303.96	Costo de \$76,095.28
Plastificación estable en algunas rotulas.	Falla inminente en uno de los castillos del inmueble	Redistribución de esfuerzos sin alcanzar los límites establecidos en ninguna rotula

La propuesta tres, ofrece una restitución del 100% en el nivel de la vivienda, con un costo de \$76,095.28 demostrando ser la mejor opción ante la configuración del hundimiento.

Esta aplicación del presfuerzo exterior, permite prolongar la vida útil de la vivienda, permite la inspección y el remplazo de cables cuando sea necesario. Evitando las demoliciones complejas y reconstrucción total del inmueble, reduciendo los tiempos de ejecución de obra y los costos asociados. La estructura, después de la aplicación de torones de acero de alta resistencia, puede soportar esfuerzos mayores y reducir la aparición de fisuras.

La principal limitación del método es que es un sistema complejo que debe adaptarse a las necesidades específicas de una obra, por lo que no se puede generalizar el análisis. Sin embargo, abre la posibilidad de la utilización del presfuerzo exterior en estructuras sometidas a hundimientos diferenciales o que convivan con fallas geológicas.



CAPÍTULO
VII
CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo fue analizar métodos de reparación de estructuras, en los que se implemente el presfuerzo exterior con materiales complementarios. Como se muestra en el desarrollo del proyecto, se encontraron diversas alternativas de reparación estructural para un mismo sistema. Y se seleccionó la que ofrece la mejor alternativa.

La primera propuesta de reparación ofrece una restitución del 95% del nivel de la vivienda.

Mientras que la segunda propuesta restituye el nivel en un 99% sin embargo, la redistribución de esfuerzos ocasionó que elementos estructurales en buen estado, se plastificaran.

Y la tercera propuesta ofrece una restitución del 100% del nivel de la vivienda, sin aparente sin plastificaciones visibles en ningún punto de control.

La propuesta seleccionada, la tercera, ofrece los mejores resultados en cuanto a facilidad de construcción, costo y respuesta estructural.

Demostrando que es posible restaurar la integridad estructural de una construcción de mampostería confinada afectada por subsidencia, haciendo uso de una combinación de métodos de reparación en la que el presfuerzo exterior es la base fundamental del sistema de reparación.

La principal limitación del sistema es la accesibilidad del equipo, al momento de realizar la reparación, ya que las construcciones colindantes limitan el espacio de trabajo. Sin embargo, es un método que permite restaurar la integridad estructural de la mampostería.

Es recomendable el uso del presfuerzo exterior en la reparación de viviendas de interés social, ya que, comparado con otras alternativas de reparación, es mucho menos invasiva y ofrece la posibilidad de una reparación continua, adaptándose al hundimiento constante al que está expuesta la vivienda.

En futuras investigaciones se podría abordar el uso de presfuerzo exterior como método preventivo ante la exposición a hundimientos diferenciales, en zonas de riesgo como es el caso del Valle de Aguascalientes; además de seguir explorando su uso en viviendas de interés social y edificios históricos, tratando de mitigar las deformaciones sufridas por los elementos estructurales al ser sometidos a la magnitud de tensión del acero.



CAPÍTULO
VIII
REFERENCIAS

8. REFERENCIAS

- Preciado, A., Bartoli, G., & Budelmann, H. (2015). The use of prestressing through time as seismic retrofitting of historical masonry constructions: past, present and future perspective. *Ciencia Ergo-Sum*, 22(3), 242–252.
- Martins, T., García, J., Ferrández, A., Tarque, N., & Fernández, J. (2020). Seismic Retrofitting of Historical Masonry Heritage Structures: A Case Study of an Adobe Masonry Building in Lima, Peru. *SAHC 2020*.
- Meshram, S. S. (2024). Seismic Retrofitting of RCC Buildings Using Prestressing Techniques. Yeshwantrao Chavan College of Engineering.
- Baeza, F. J., Estevan, L., & Ivorra, S. (2023). Seismic Retrofitting of Heritage Structures: Actual Techniques and Future Challenges for Earth and Masonry Constructions. *SAHC 2023*.
- Ozer, I. E., & Geurts, C. P. W. (2021). Effects of subsidence on buildings (TNO report R12073).
- Ferretti, E. (2019). Wire Ropes and CFRP Strips to Provide Masonry Walls with Out-Of-Plane Strengthening. *Materials*, 12(17), 2712.
<https://doi.org/10.3390/ma12172712>
- Martins, T., García, J., Ferrández, A., Tarque, N., & Fernández, J. (2020). Seismic Performance Assessment and Retrofitting Recommendations for a Historic Masonry Building: The Case of Amasya Çilehane Complex. *SAHC 2020*, 12.
- Moreno, D. F. P., Rojas, S. X. P., & Gutiérrez, C. A. M. (s. f.). ALTERNATIVA ESTRUCTURAL DE REFUERZO HORIZONTAL EN MUROS DE MAMPOSTERÍA. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14.

SMIE. (2019). *Edificaciones de mampostería para la vivienda*. LIMUSA.

Freyssinet. (2024). El pretensado Freyssinet, Freyssinet México.



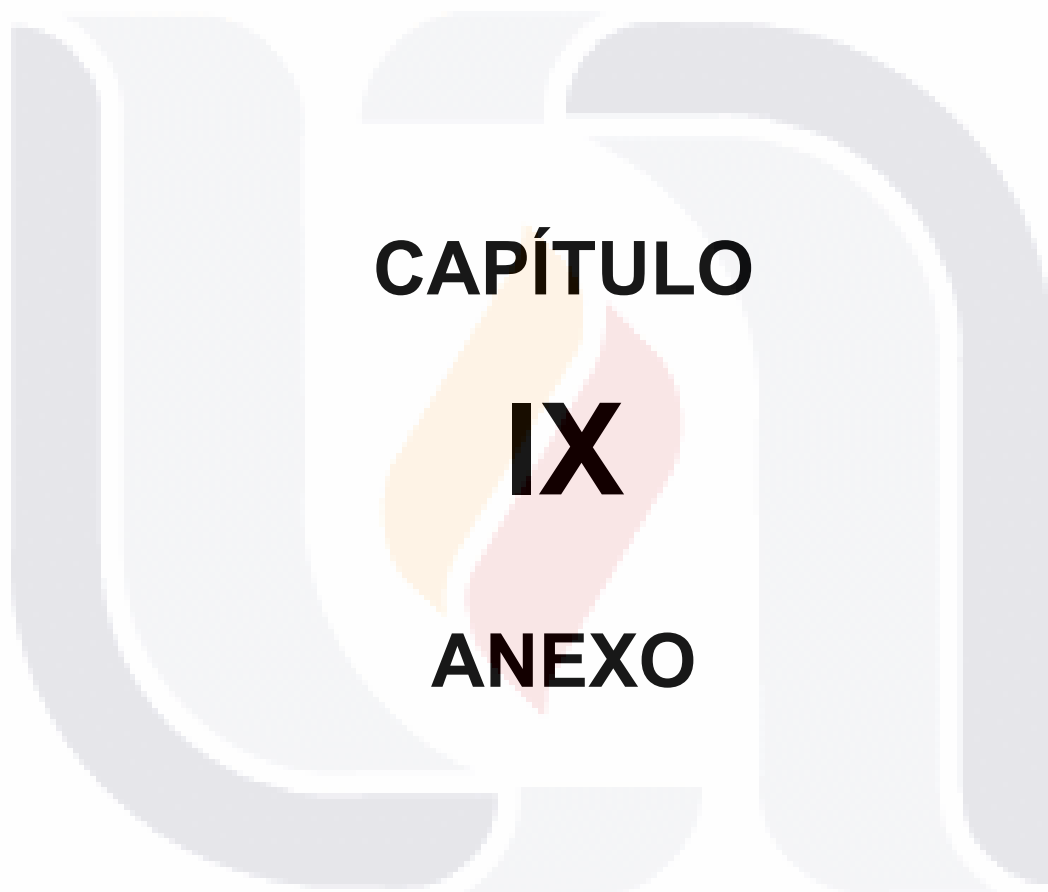
TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS



CAPÍTULO

IX

ANEXO

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

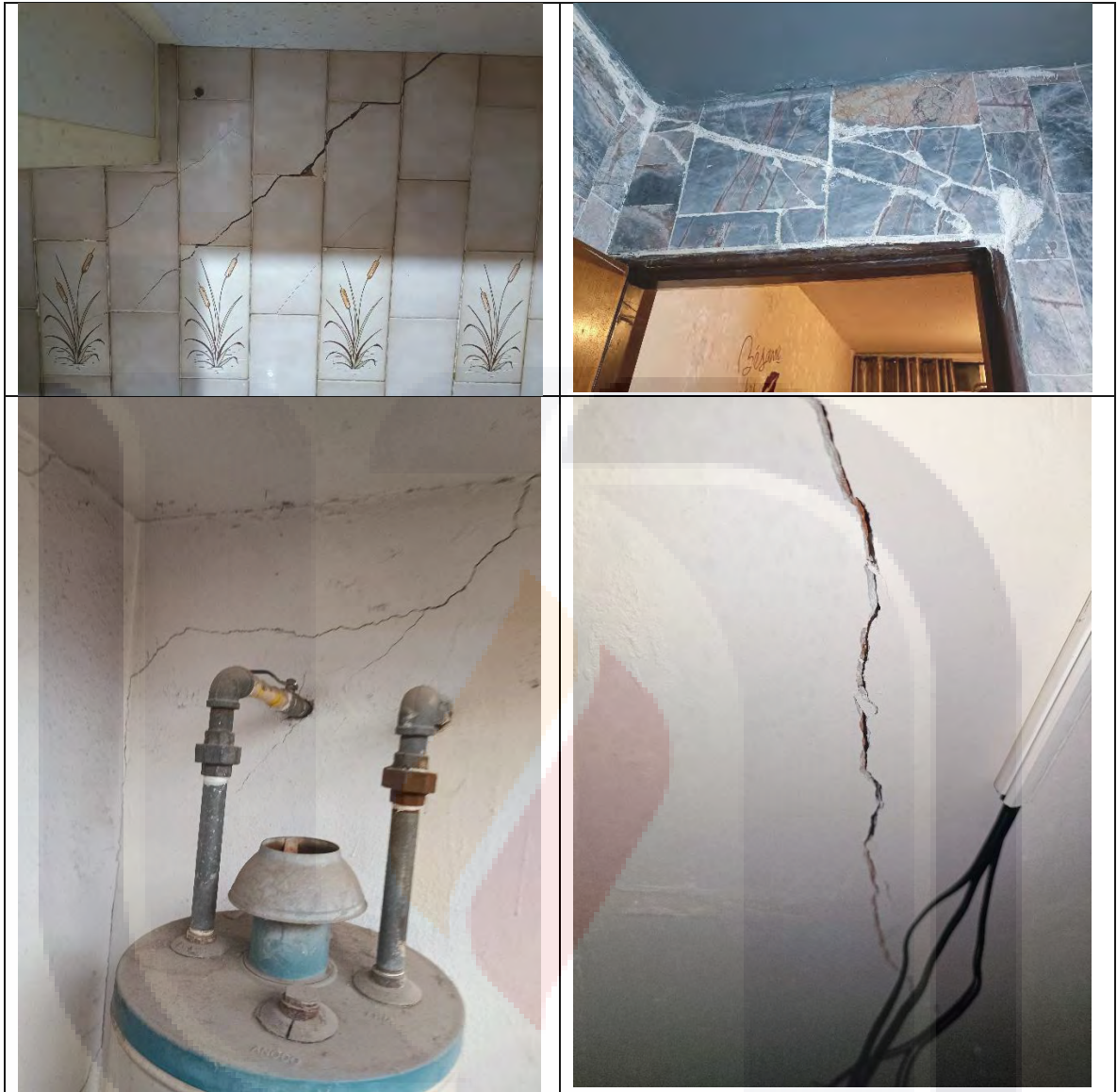
9. ANEXO

- A. Memoria fotográfica**
- B. Resultados del modelo**
- C. Resultados propuesta 1**
- D. Resultados propuesta 2**
- E. Resultados propuesta 3**



A. Memoria fotográfica.

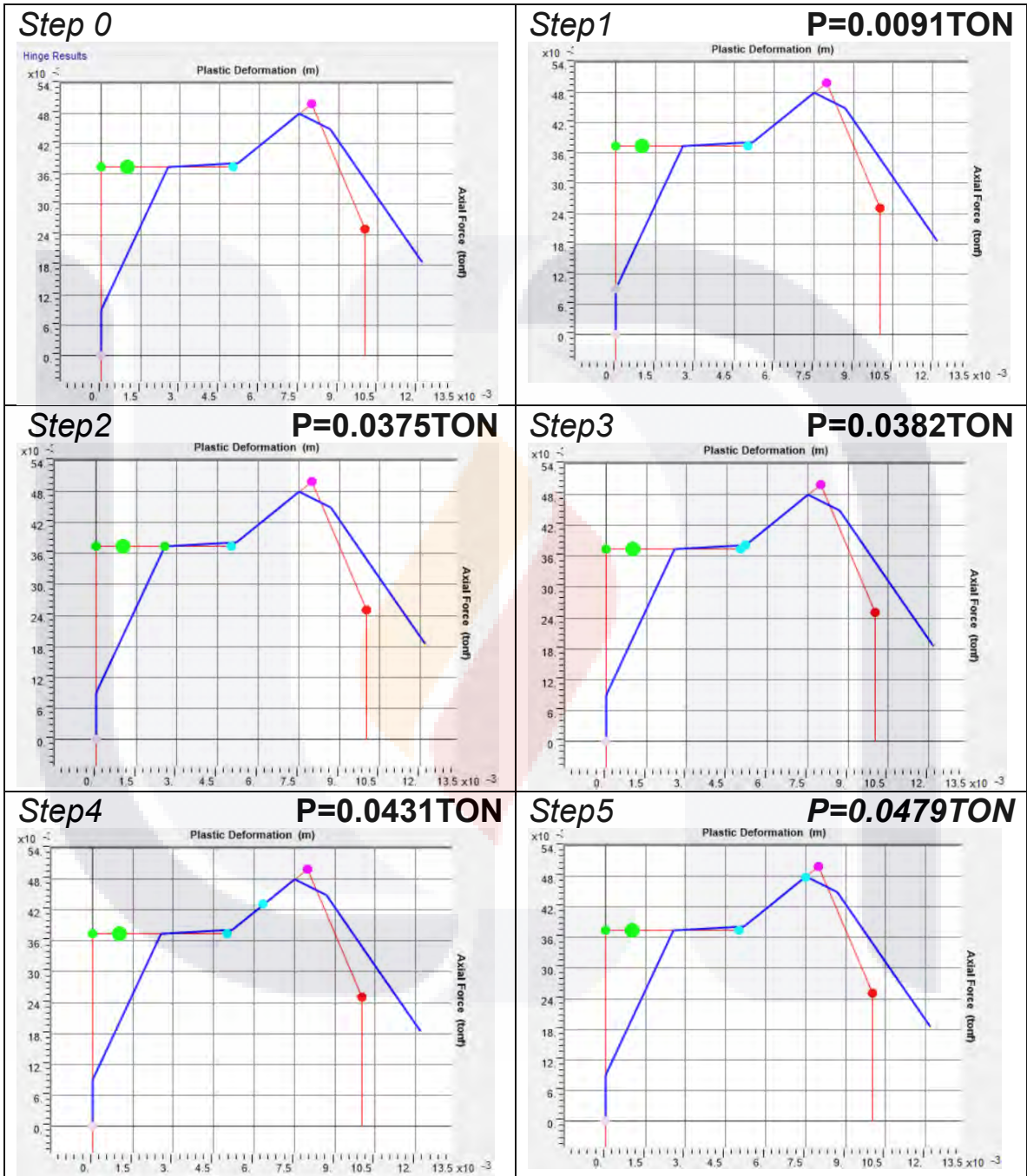




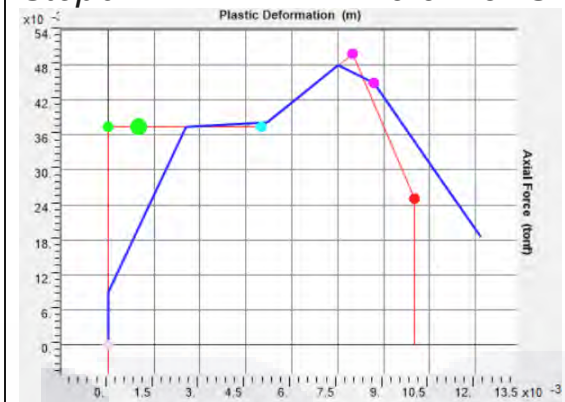


B. Resultados modelo.

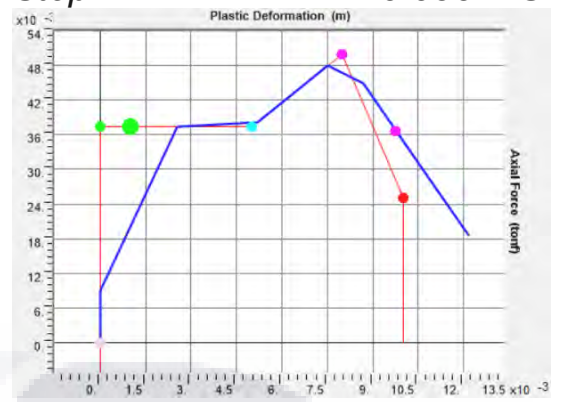
1. Ejemplo plastificación de una rotula de Carga axial.



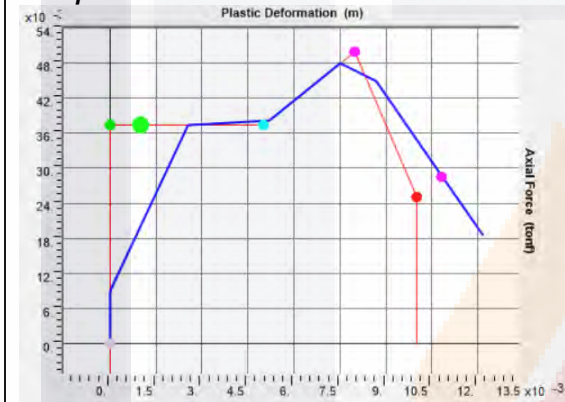
Step6 **P=0.0449TON**



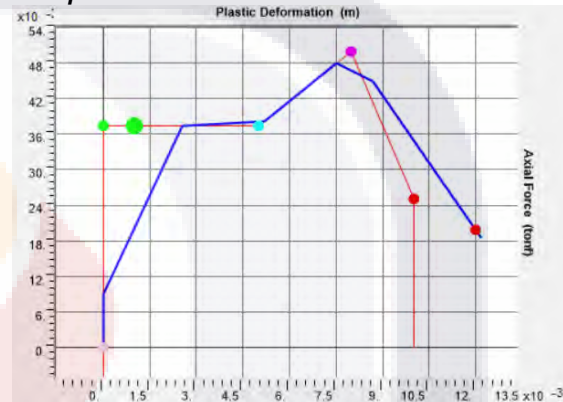
Step7 **P=0.0367TON**



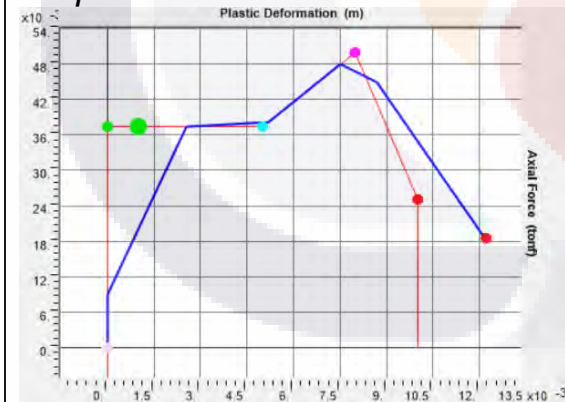
Step8 **P=0.0286TON**



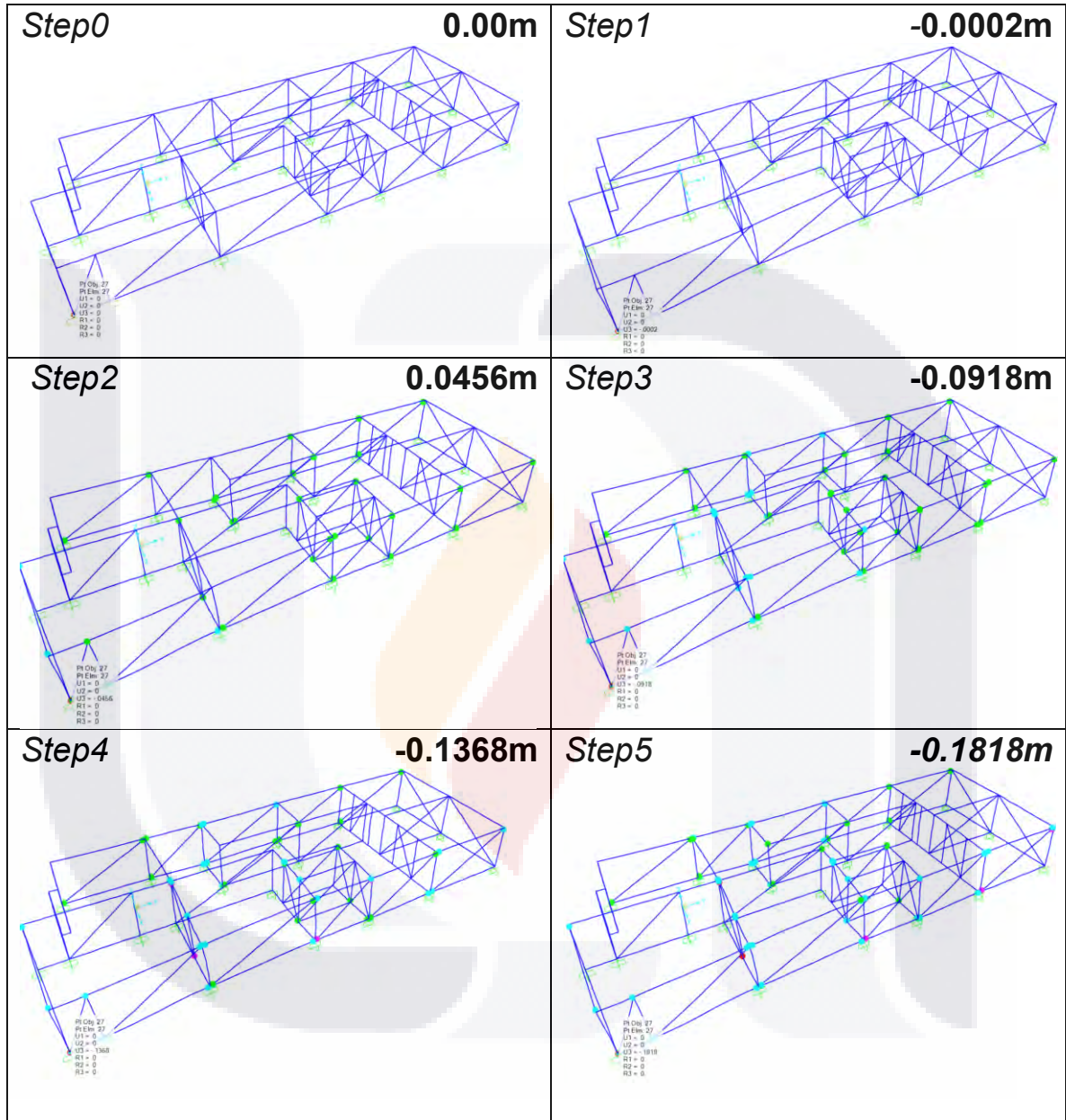
Step **9P=0.0198TON**

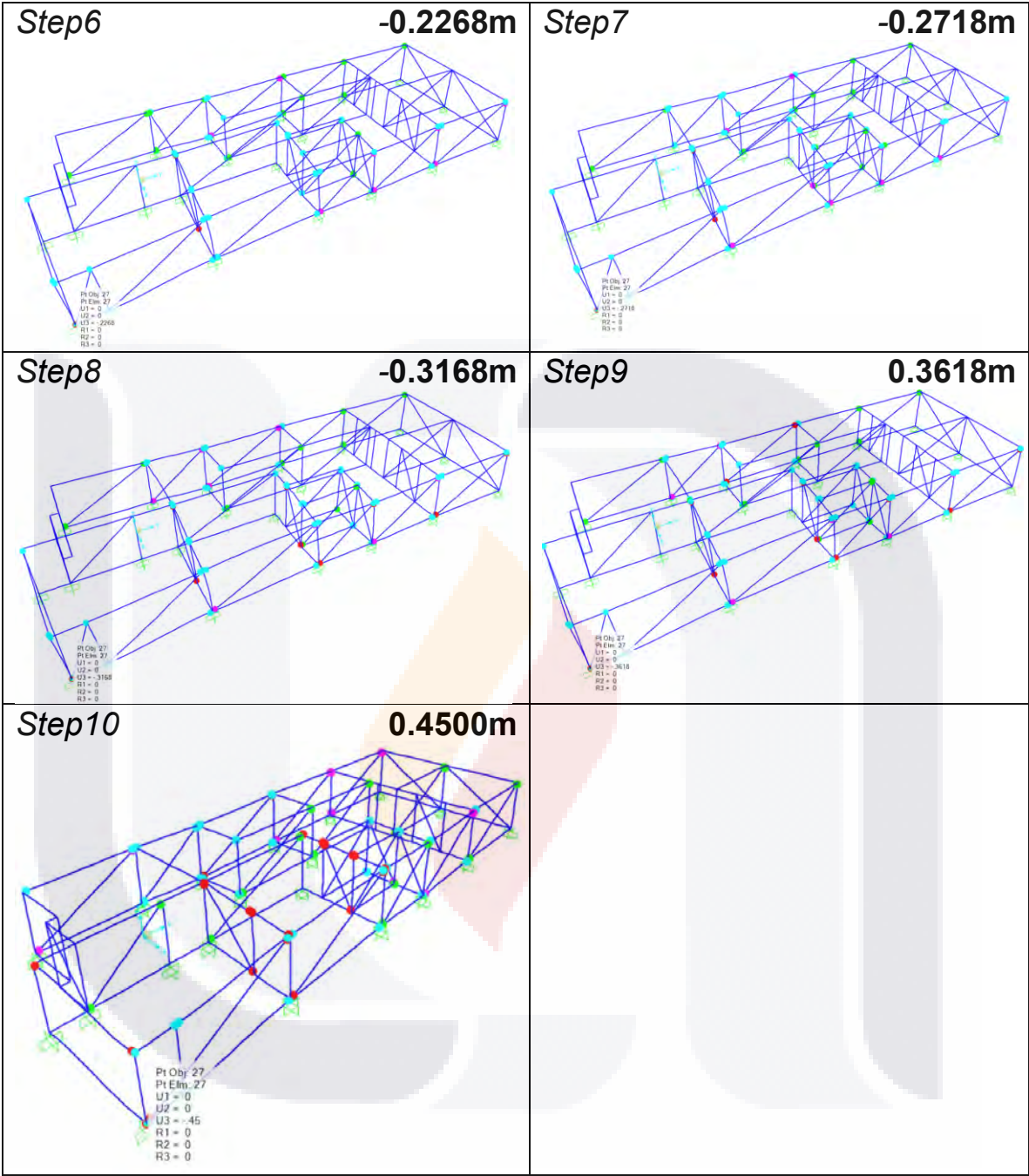


Step10 **P=0.0185TON**



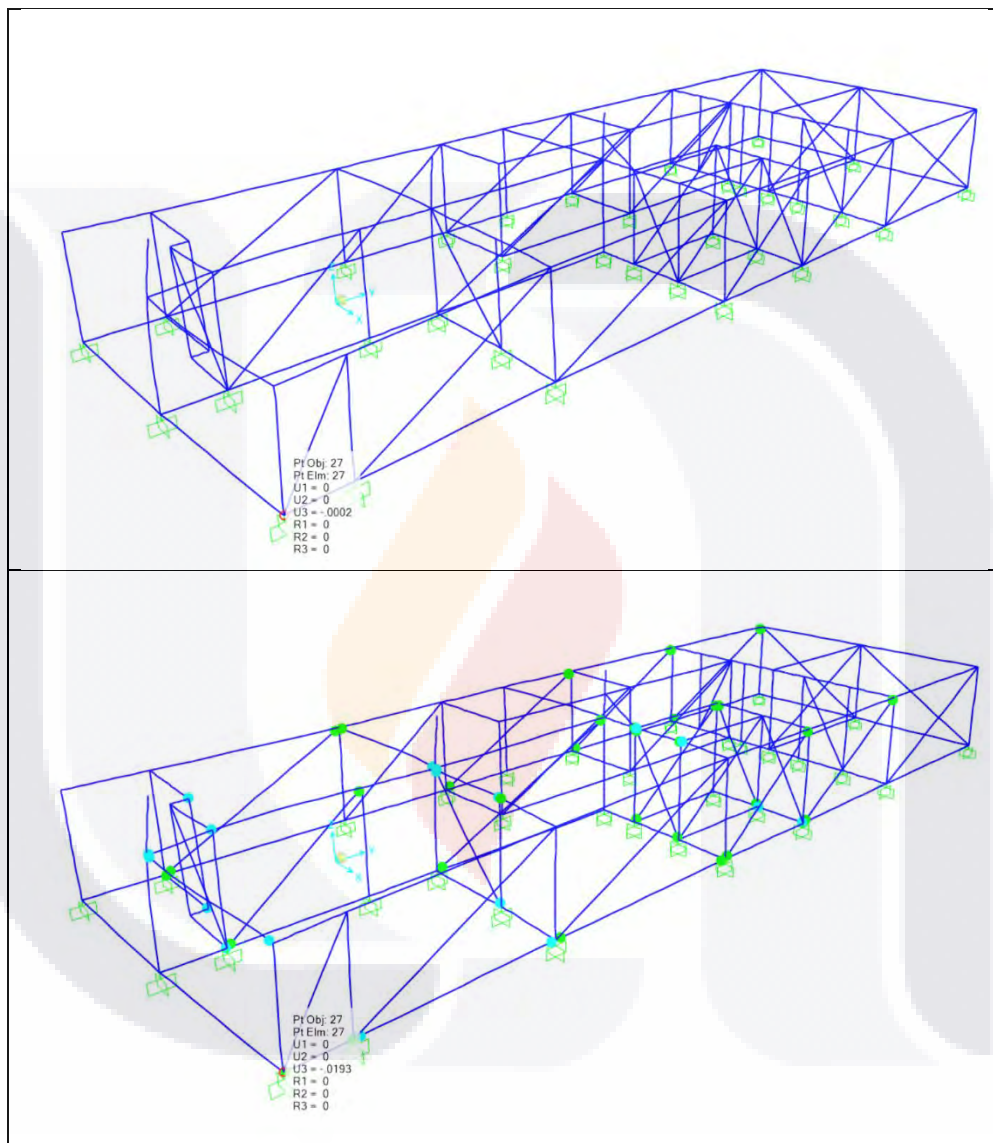
2. Desplazamientos



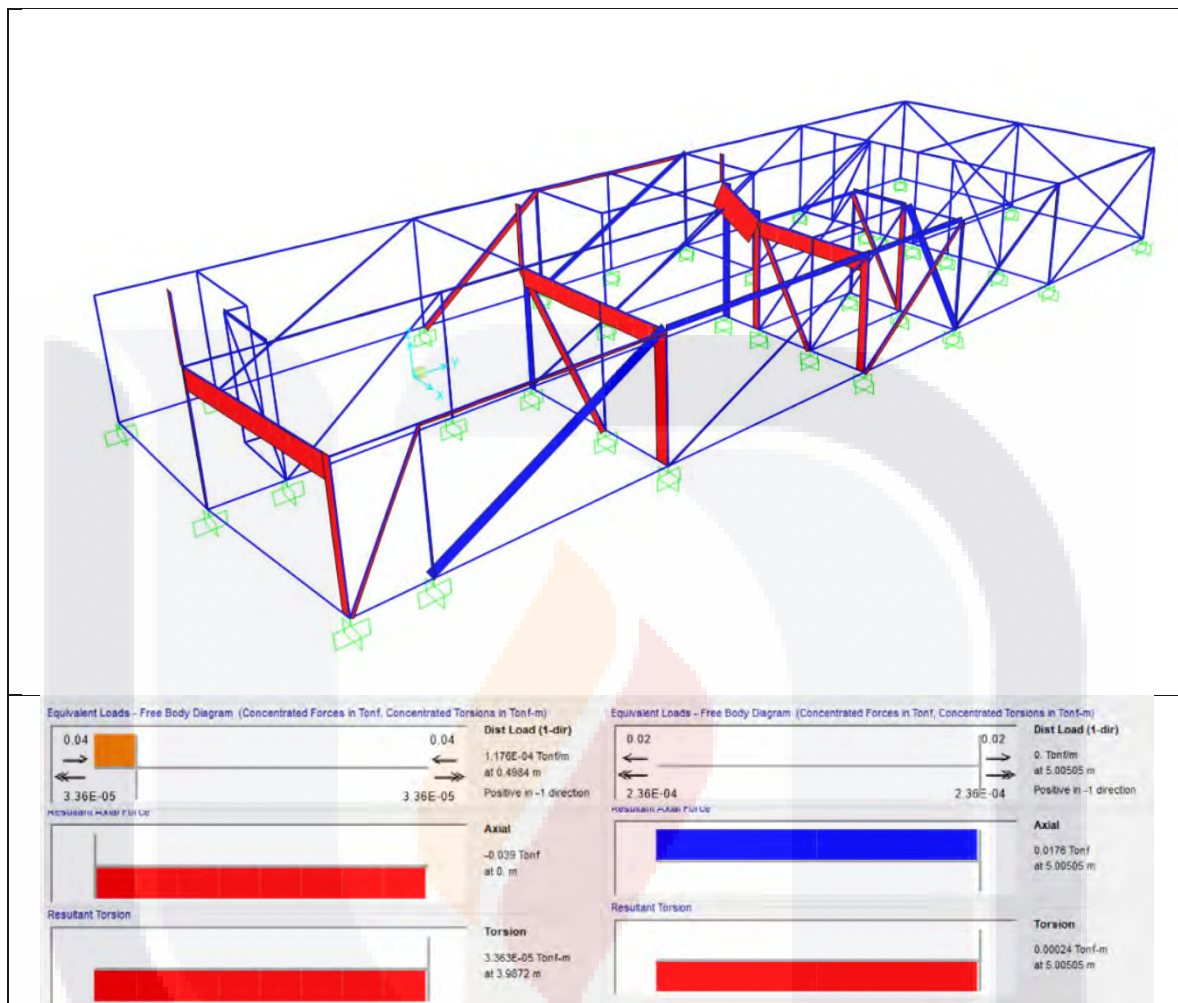


C. Resultados propuesta 1.

➤ *Desplazamientos máximos y mínimos en punto crítico.*

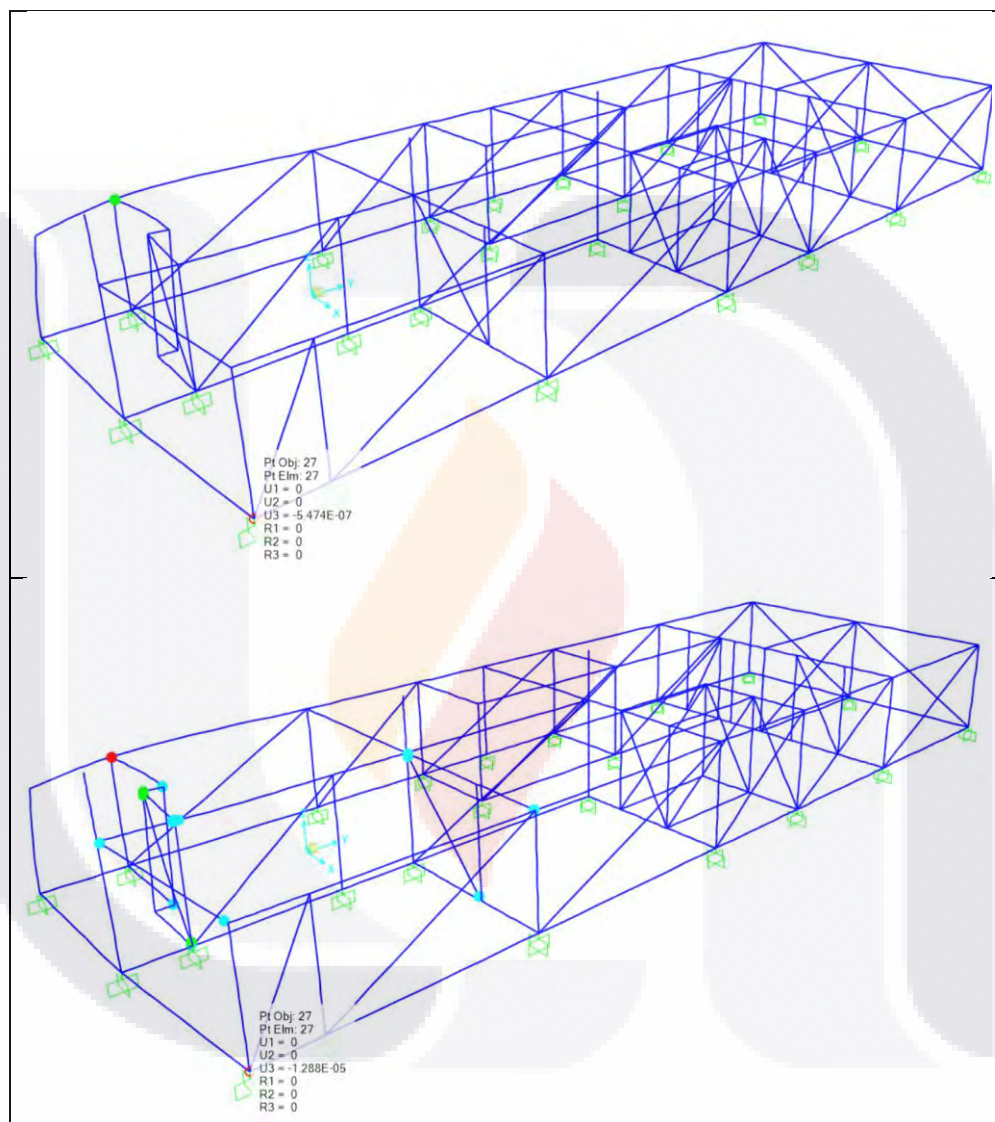


➤ *Carga axial en elementos (ejemplo)*

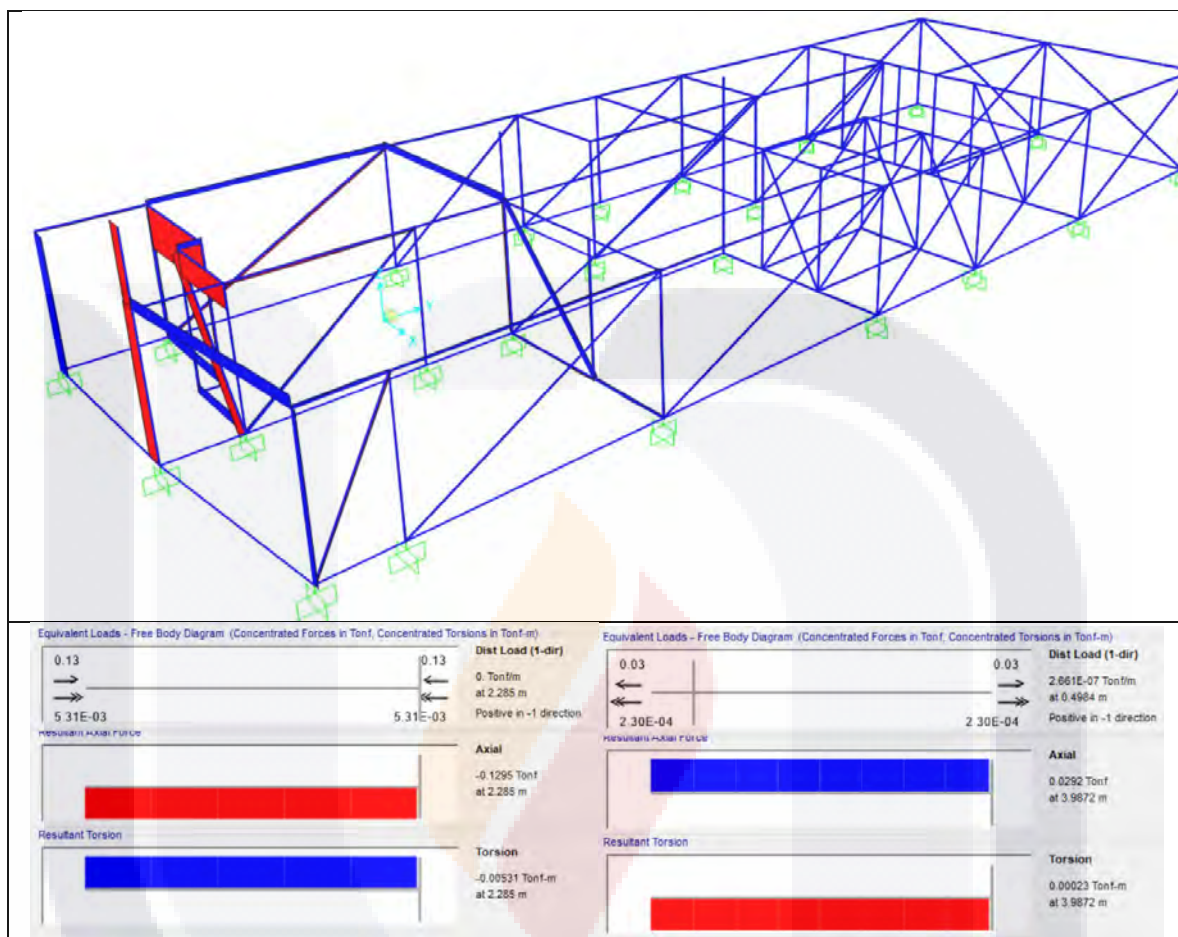


D. Resultados propuesta 2.

➤ *Desplazamientos máximos y mínimos en punto crítico.*

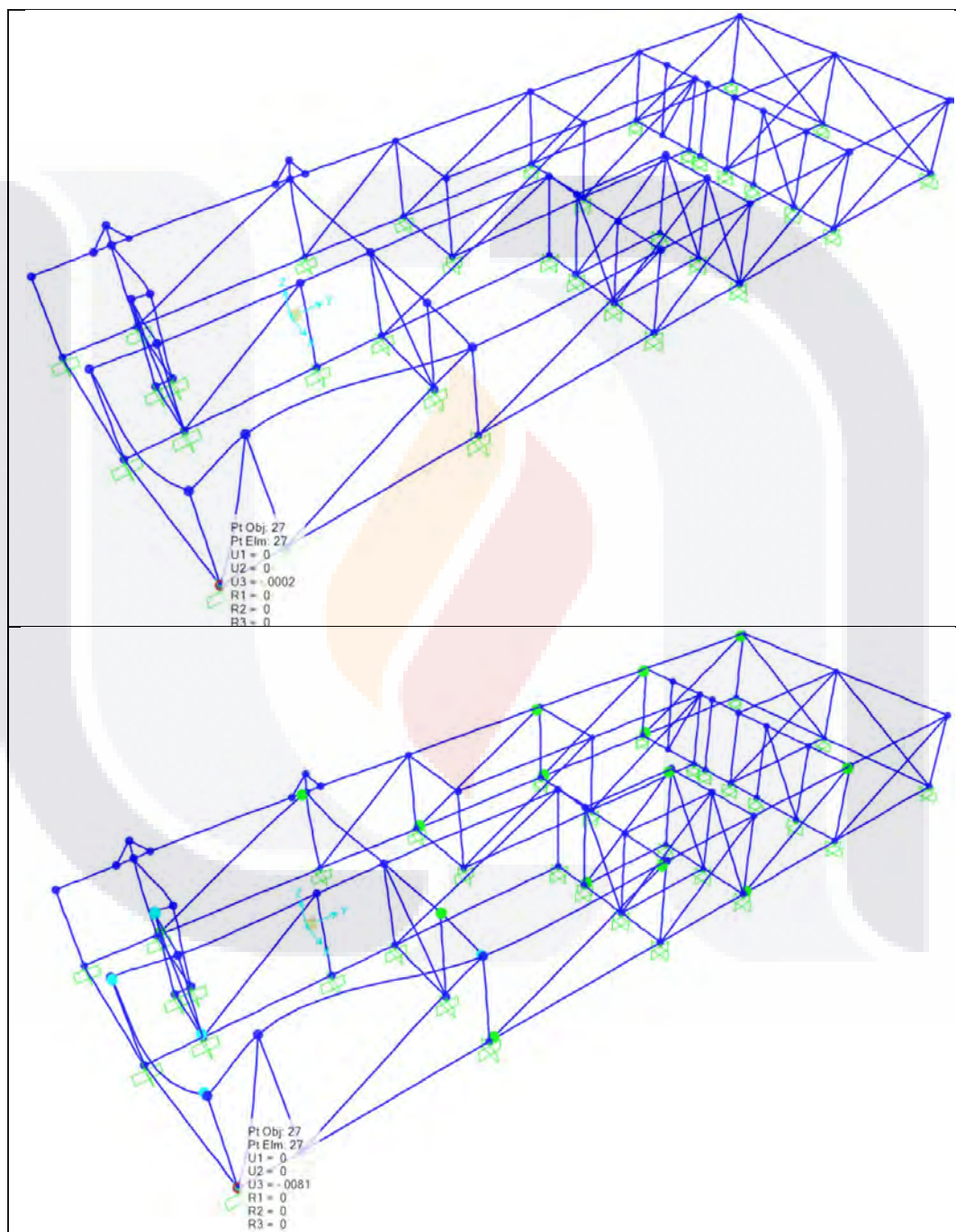


➤ *Carga axial en elementos (ejemplo)*



E. Resultados propuesta 3.

➤ *Desplazamientos máximos y mínimos en punto crítico.*



➤ *Carga axial en elementos (ejemplo)*

