



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES

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

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS**

**CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL DE CONSTRUCCIONES DE MAMPOSTERÍA  
CONFINADA SOMETIDAS A SUBSIDENCIA**

**PRESENTA**

I.C. Enrique Ramírez Arteaga

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

**TUTOR**

Dr. Mario Eduardo Zermeño de León

**COMITÉ TUTORIAL**

Dra. Silvia Rodríguez Narciso

Dr. Julio César López González

Aguascalientes, Ags. a 24 de noviembre de 2025

CARTA DE VOTO APROBATORIO

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA  
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

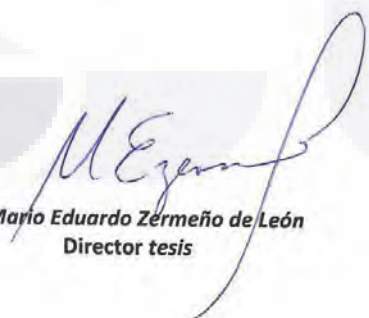
PRESENTE

Por medio del presente como **DIRECTOR** designado del estudiante **ENRIQUE RAMÍREZ ARTEAGA** con ID **188387** quien realizó la tesis titulada: **CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL DE CONSTRUCCIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA SOMETIDAS A 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 él 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 12 de noviembre de 2025.

  
Dr. Mario Eduardo Zermeno de León  
Director tesis

c.c.p.- Interesado  
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.  
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión Integral.  
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07  
Actualización: 02  
Emisión: 13/08/25

## CARTA DE VOTO APROBATORIO

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA  
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **ENRIQUE RAMÍREZ ARTEAGA** con ID **188387** quien realizó la tesis titulada: **CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL DE CONSTRUCCIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA SOMETIDAS A 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 él 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 12 de noviembre de 2025.



**Dra. Silvia Rodríguez Narciso**  
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado  
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.  
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestión Integral.  
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FO-07  
Actualización: 02  
Emisión: 13/08/25

CARTA DE VOTO APROBATORIO

MTRA. EN ING. AMB. MA. GUADALUPE LIRA PERALTA  
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

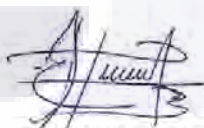
PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **ENRIQUE RAMÍREZ ARTEAGA** con ID **188387** quien realizó la tesis titulada: **CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL DE CONSTRUCCIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA SOMETIDAS A 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 él 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 12 de noviembre de 2025.



Dr. Julio César López González  
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado  
c.c.p.- Coordinación del Programa de Posgrado

Elaborado por: Depto. Apoyo al Posgrado.  
Revisado por: Depto. Control Escolar/Depto. Gestion Integral.  
Aprobado por: Depto. Control Escolar/ Depto. Apoyo al Posgrado.

Código: DO-SEE-FQ-07  
Actualización: 02  
Emisión: 13/08/25



Fecha de dictaminación (dd/mm/aaaa): 13 de Noviembre del 2025

**NOMBRE:** Enrique Ramirez Arteaga **ID** 188387

<b>PROGRAMA:</b>	Maestría en Ingeniería Civil	<b>ESPECIALIDAD (posgrado):</b>	Estructuras y Construcción
------------------	------------------------------	---------------------------------	----------------------------

MODALIDAD DEL PROYECTO DE GRADO: Tesis ( ☒ ) \*Tesis por artículos científicos ( ☐ ) \*\*Tesis por Patente ( ☐ ) Trabajo Práctico ( ☐ )

Confiabilidad Estructural de construcciones de mampostería confinada sometidas a subsidencia

**TITULO:** \_\_\_\_\_

**IMPACTO SOCIAL** (señalar el impacto logrado): Los resultados de la tesis permiten determinar la seguridad, a partir de herramientas de la confiabilidad, de las viviendas de mampostería sometidas a subsidencia.

**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
NA.	Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI.	Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<b>El egresado cumple con lo siguiente:</b>	
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 SECHITI actualizado
NA.	Tiene el o los artículos aceptados o publicados y cumple con los requisitos institucionales (en caso de que proceda)
<b>*En caso de Tesis por artículos científicos publicados (completar solo si la tesis fue por artículos)</b>	
	Aceptación o Publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto según el nivel del programa
	El (la) estudiante es el primer autor(a)
	El (la) autor(a) de correspondencia es el Director (a) del Núcleo Académico
	En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
	Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en el que fueron publicados
<b>**En caso de Tesis por Patente</b>	
	Cuenta con la evidencia de solicitud de patente en el Departamento de Investigación (anexar 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. JOSÉ ÁNGEL ORTIZ LOZANO

\* 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 ZERMEÑO DE LEÓN

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

DR. MARIO ERNESTO ESPARZA DÍAZ DE LEÓN

**Autorizó:**

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

MTRA. EN LING. AMB. TIA. 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.

Elaborado por: D. Apoyo al Posg.  
Revisado por: D. Control Escolar/D. Gestión de Calidad  
Aprobado por: D. Control Escolar/ D. Apoyo al Posg.

Código: DO-SEE-FO-15  
Actualización: 02  
Emisión: 12/08/25

## AGRADECIMIENTOS

La culminación de este trabajo de tesis representa la conclusión de una etapa fundamental en mi formación académica. Este logro no habría sido posible sin el apoyo, la guía y la contribución de diversas personas e instituciones, a quienes deseo expresar mi más profundo y sincero agradecimiento.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes, por la oportunidad de cursar este posgrado y por el respaldo brindado durante el transcurso del mismo. De igual forma, al CONAHCyT, por el apoyo financiero otorgado que hizo posible mi dedicación de tiempo completo a este programa.

Al Dr. Mario Eduardo Zermeño de León, mi tutor, por su invaluable guía, su disposición para resolver mis dudas, su orientación en los temas de ingeniería civil y la minuciosa revisión que enriqueció este documento.

A mi asesora interna, la Dra. Silvia Rodríguez Narciso, por su crucial asesoramiento en los temas de probabilidad y estadística, así como por su tiempo dedicado a la corrección de este trabajo.

Al Dr. Julio César López González, mi asesor externo, por el tiempo dedicado a la revisión y por sus valiosas observaciones.

Mi gratitud al Sr. Josué y la Sra. Brenda, por permitir el estudio de su vivienda, por la información proporcionada y por su invaluable hospitalidad durante el trabajo de campo.

A mis compañeros, Shirley y Francisco, por su indispensable colaboración y apoyo durante la recolección de datos que sirvió de base para esta investigación.

Finalmente, y de la manera más especial, dedico este logro a mis padres. Gracias por apoyar incondicionalmente mi decisión de continuar con mis estudios de posgrado, por su confianza inquebrantable en mi capacidad para culminarlos y por motivarme cada día a ser una mejor persona y profesional. Su amor y ejemplo son mi mayor inspiración.

DEDICATORIAS

A mis padres,

Por su amor incondicional, por su fe en mis capacidades y por enseñarme que con esfuerzo y dedicación, cualquier meta es alcanzable.

Este logro es tan suyo como mío.

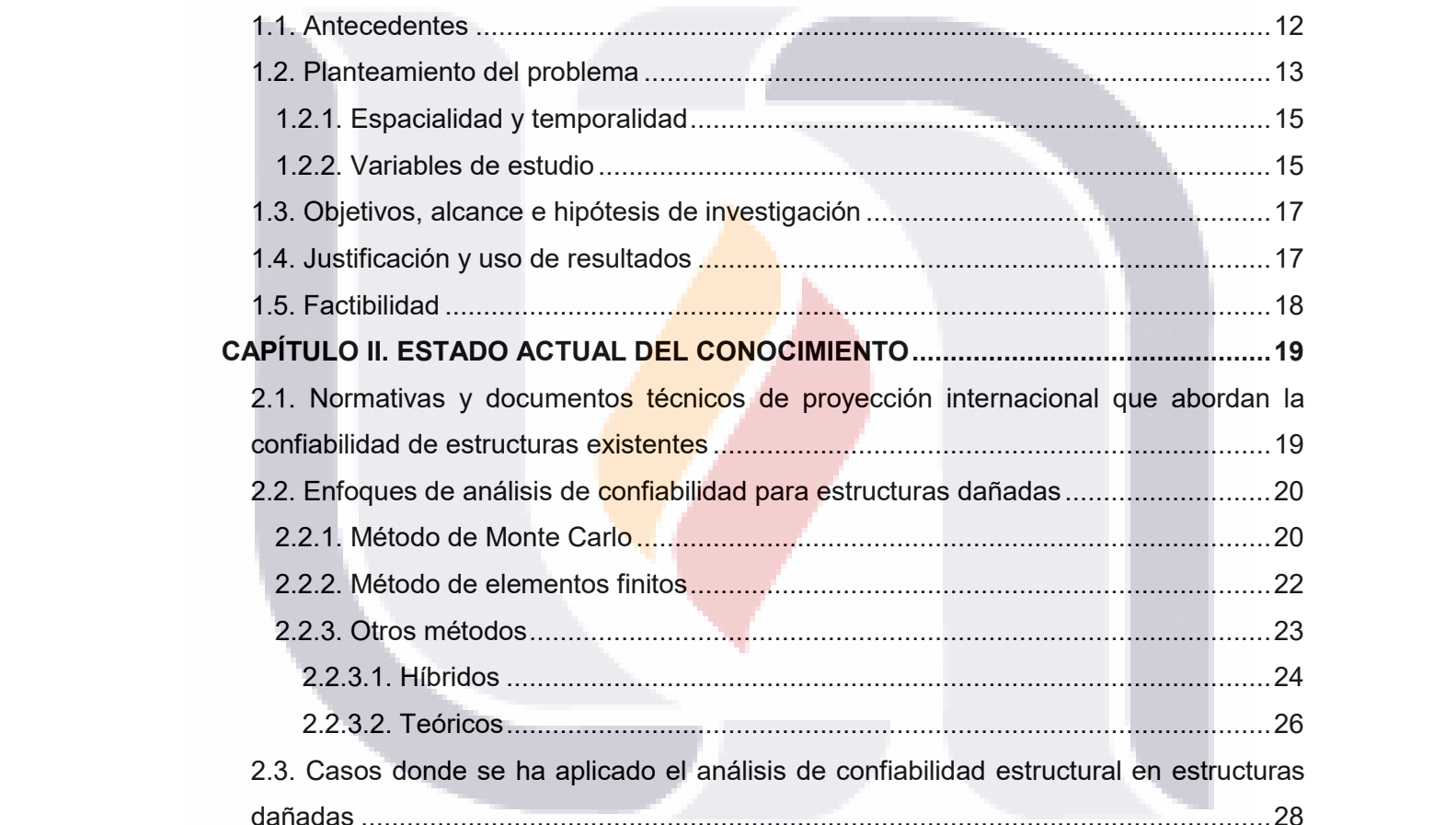


TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS





**ÍNDICE GENERAL**

**ÍNDICE GENERAL..... 1**

**ÍNDICE DE TABLAS..... 5**

**ÍNDICE DE FIGURAS ..... 6**

**RESUMEN ..... 10**

**ABSTRACT ..... 11**

**CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN ..... 12**

1.1. Antecedentes ..... 12

1.2. Planteamiento del problema ..... 13

1.2.1. Espacialidad y temporalidad..... 15

1.2.2. Variables de estudio ..... 15

1.3. Objetivos, alcance e hipótesis de investigación ..... 17

1.4. Justificación y uso de resultados ..... 17

1.5. Factibilidad ..... 18

**CAPÍTULO II. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO ..... 19**

2.1. Normativas y documentos técnicos de proyección internacional que abordan la confiabilidad de estructuras existentes ..... 19

2.2. Enfoques de análisis de confiabilidad para estructuras dañadas ..... 20

2.2.1. Método de Monte Carlo ..... 20

2.2.2. Método de elementos finitos..... 22

2.2.3. Otros métodos..... 23

2.2.3.1. Híbridos ..... 24

2.2.3.2. Teóricos..... 26

2.3. Casos donde se ha aplicado el análisis de confiabilidad estructural en estructuras dañadas ..... 28

2.3.1. Estructuras de mampostería..... 28

2.3.1.1. Mampostería no confinada..... 28

2.3.1.2. Mampostería confinada..... 30

**CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO ..... 32**

3.1. Definición de muros de mampostería confinada ..... 32

3.2. Fallas en muros de mampostería confinada ..... 33

3.2.1. Definición de una falla y su clasificación..... 33

3.2.2. Lesiones comunes en muros de mampostería ..... 33

3.2.2.1. Generales .....	34
3.2.2.2. Por asentamientos diferenciales .....	36
3.3. Comportamiento mecánico de muros de mampostería .....	38
3.3.1. Modos de falla globales .....	38
3.3.1.1. Tensión diagonal pura .....	38
3.3.1.2. Compresión .....	39
3.3.2. Respuesta ante carga monotónica en muros de mampostería confinada .....	40
3.4. Predicción del nivel de daño en estructuras de mampostería mediante el uso del ángulo de distorsión por subsidencia .....	44
3.4.1. Definición .....	44
3.4.2. Método de cálculo .....	44
3.4.3. Criterios establecidos para el límite de distorsión angular en edificaciones para evitar daños por subsidencia .....	45
3.5. Estado actual de la estructura sometida a subsidencia desde el punto de vista estructural (revisión de daños) .....	47
3.6. Teoría de errores en levantamientos topográficos .....	48
3.6.1. Tipos de mediciones .....	49
3.6.2. Tipos y causas de errores en mediciones topográficas .....	50
3.7. Determinación del índice de confiabilidad .....	51
3.7.1. Fallas y estados límite .....	51
3.7.2. Definición de la probabilidad de falla .....	51
3.7.3. Variables reducidas .....	54
3.7.4. Definición del índice de confiabilidad .....	55
3.7.5. Determinación del índice de confiabilidad por métodos FORM .....	56
3.7.5.1. Procedimiento exacto para estados límite en función lineal de variables aleatorias independientes con distribución normal .....	57
3.7.5.2. Procedimiento de primer orden, segundo momento centrado en valores medios .....	58
3.7.6. Confiabilidad en sistemas perfectamente dúctiles en paralelo .....	58
3.7.7. Análisis de sensibilidad .....	60
<b>CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>63</b>
4.1. Fase 1: identificación y caracterización del caso de estudio .....	63
4.1.1. Identificación del caso de estudio .....	63

4.1.2. Levantamiento de la zona cercana al caso de estudio.....	63
4.1.3. Inspección del inmueble .....	64
4.1.4. Creación de mapas de representación digital de la casa .....	66
4.2. Fase 2: exploración, modelado, análisis numérico y determinación de la confiabilidad .....	67
4.2.1. Exploración de alternativas de análisis de confiabilidad .....	67
4.2.2. Determinación de la confiabilidad por el método exacto a partir de las distorsiones angulares de muros.....	68
4.2.2.1. Determinación de la confiabilidad considerando el estado límite último (ELU) y el estado límite de servicio (ELS).....	68
4.2.2.1.1. Deducción de la ecuación de estado límite.....	68
4.2.2.1.2. Distribuciones de las variables involucradas en las ecuaciones de estado límite .....	70
4.2.2.1.3. Determinación de la confiabilidad individual de muros.....	72
4.2.2.1.4. Determinación de la confiabilidad de la vivienda .....	73
4.2.2.1.5. Análisis de sensibilidad para la confiabilidad de la vivienda a partir de las variables de las ecuaciones de estado límite .....	74
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
5.1. Identificación del caso de estudio .....	76
5.1.1. Levantamiento en la zona cercana al caso de estudio.....	76
5.1.2. Inspección del inmueble .....	79
5.1.2.1. Información básica.....	80
5.1.2.1.1. Generalidades .....	80
5.1.2.1.2. Distribución de muros y aberturas .....	80
5.1.2.1.3. Caracterización de los materiales y sistemas constructivos presentes.....	82
5.1.2.1.3.1. Muros de mampostería .....	82
5.1.2.1.3.2. Castillos .....	83
5.1.2.1.3.3. Dalas .....	84
5.1.2.2. Datos sobre patologías .....	85
5.1.2.2.1. Hundimientos .....	86
5.1.2.2.2. Agrietamientos .....	93
5.1.2.2.3. Desplomes .....	107
5.1.2.2.4. Descuadres .....	108

5.1.2.2.5. Desprendimientos.....	110
5.2. Determinación de la confiabilidad por el procedimiento de primer orden, segundo momento centrado en valores medios a partir de las distorsiones angulares de muros .....	114
5.2.1. Estado límite último .....	114
5.2.1.1. Confiabilidad de muros y de la vivienda .....	114
5.2.1.2. Análisis de sensibilidad .....	116
5.2.1.2.1. Escenario optimista: completa independencia entre muros .....	116
5.2.1.2.2. Escenario pesimista: completa dependencia entre muros .....	117
5.2.2. Estado límite de servicio.....	118
5.2.2.1. Confiabilidad de muros y de la vivienda .....	118
5.2.2.2. Análisis de sensibilidad .....	120
5.2.2.2.1. Escenario optimista: completa independencia entre muros .....	120
5.2.2.2.2. Escenario pesimista: completa dependencia entre muros .....	122
<b>CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>124</b>
<b>CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES .....</b>	<b>130</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>135</b>
<b>APÉNDICE A. Deducción analítica de las ecuaciones generales de estado límite y confiabilidad por distorsiones angulares en muros .....</b>	<b>144</b>
A.1. Estado límite último (ELU).....	147
A.1.1. Ecuación de desempeño.....	147
A.1.2. Índice de confiabilidad y probabilidad de falla de muros individuales mediante el procedimiento de primer orden, segundo momento centrado en valores medios ....	149
A.2. Estado límite de servicio (ELS) .....	153
A.2.1. Ecuación de desempeño.....	153
A.2.2. Índice de confiabilidad y probabilidad de falla de muros individuales mediante el procedimiento de primer orden, segundo momento centrado en valores medios ....	156
<b>APÉNDICE B. Determinación de las distribuciones de probabilidad para cada una de las variables presentes en las ecuaciones de estado límite .....</b>	<b>161</b>
B.1. Distancias horizontales con cinta métrica.....	162
B.2. Cotas de elevaciones de puntos visados con estación total .....	166
<b>APÉNDICE C. Simulación numérica de muros de mampostería.....</b>	<b>172</b>
C.1. Simulación numérica por el método de la diagonal equivalente .....	173

C.1.1. Proceso de modelado .....	173
C.1.1.1. Geometría y restricciones de apoyo .....	173
C.1.1.2. Materiales.....	175
C.1.1.3. Secciones.....	175
C.1.1.4. Imposición de desplazamientos diferenciales .....	176
C.1.1.5. Configuraciones adicionales para análisis .....	176
C.1.2. Determinación del cortante actuante en muros .....	176
C.1.3. Resultados obtenidos .....	177
C.2. Simulación numérica por elementos finitos no lineales .....	179
C.2.1 Creación del modelo numérico .....	179
C.2.1.1 Dimensionalidad.....	180
C.2.1.2 Características del enmallado .....	180
C.2.1.3 Restricciones en los apoyos.....	181
C.2.1.4. Cargas impuestas .....	182
C.2.1.5. Desplazamientos impuestos.....	182
C.2.1.6. Definición del modelo mecánico .....	183
C.2.2. Resultados obtenidos .....	184

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros empleados en el modelo de Flores (1995).....	42
Tabla 2. Daño y deterioro de las propiedades estructurales en muros de mampostería confinada acorde a Ruiz et al. (1998).....	47
Tabla 3. Estados límite para muros de mampostería confinada acorde a Astroza & Schmidt (2004).....	47
Tabla 4. Índice de confiabilidad $\beta$ y probabilidad de falla $p_f$ .....	56
Tabla 5. Datos sobre la distribución de probabilidad de todas las variables involucradas en la ecuación de desempeño.....	71
Tabla 6. Datos de identificación de la falla El Dorado (SIFAGG, s/f) .....	78
Tabla 7. Resumen de la cantidad de registros recabados por categoría y por subcategoría de lesión.....	85
Tabla 8. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de hundimientos registrados .....	87

Tabla 9. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de distorsión angular en muros .....89

Tabla 10. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de longitud de agrietamientos en muros por subcategoría de agrietamiento .....95

Tabla 11. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de espesor de agrietamientos en muros por subcategoría de agrietamiento .....96

Tabla 12. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de inclinación de agrietamientos en muros por subcategoría de agrietamiento .....97

Tabla 13. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de la longitud de las separaciones de los desprendimientos por subcategoría de desprendimiento..... 110

Tabla 14. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos del ancho de las separaciones de los desprendimientos por subcategoría de desprendimiento..... 110

Tabla 15. Valor del índice de confiabilidad  $\beta$  y de la probabilidad de falla asociada  $p_f$  para cada uno de los muros identificados del inmueble estudiado, bajo la consideración de variables independientes en la ecuación de desempeño..... 115

Tabla 16. Valor del índice de confiabilidad  $\beta$  y de la probabilidad de falla asociada  $p_f$  para cada uno de los muros identificados del inmueble estudiado, bajo las consideraciones de variables independientes en la ecuación de desempeño..... 120

Tabla 17. Resumen de los parámetros de los materiales empleados para la creación del modelo elastoplástico..... 183

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Ejemplo de vivienda dañada por subsidencia diferencial, ubicada en la localidad de Pabellón de Hidalgo, Aguascalientes (México) ..... 14

Figura 2. Grietas debidas a asientos .....37

Figura 3. Representación gráfica del modo de falla por tensión diagonal pura .....39

Figura 4. Representación gráfica del modo de falla por compresión .....40

Figura 5. Evolución del daño estructural en muros de mampostería confinada .....41

Figura 6. Envolvente para mampostería confinada según Flores (1995) .....42

Figura 7. Fórmulas para calcular el gradiente de subsidencia en los sentidos “X” y “Y”, y el ángulo de deformación del terreno, a partir del método de Horn (1981).....45

Figura 8. Esquematización de la probabilidad de falla .....52



Figura 9. Dominio seguro y dominio de falla en un estado espacial en dos dimensiones y representación tridimensional de la función de probabilidad conjunta  $f_{RQ}$  ..... 54

Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología de este trabajo de investigación..... 63

Figura 11. Vista frontal de la vivienda a estudiar ..... 76

Figura 12. Mapa de las discontinuidades geológicas más cercanas a la vivienda estudiada ..... 77

Figura 13. Mapa de subsidencia en la zona cercana a la vivienda estudiada ..... 78

Figura 14. Mapa de distorsión angular por subsidencia registrada en la zona cercana a la vivienda estudiada..... 79

Figura 15. Mapa arquitectónico del caso de estudio junto con la traza aproximada de la falla geológica presente según SIFAGG ..... 81

Figura 16. Porcentaje de registros por categoría de lesión..... 86

Figura 17. Histograma y polígono de frecuencias de los registros de hundimiento en la vivienda..... 88

Figura 18. Histograma y polígono de frecuencias de los registros de distorsión angular en muros..... 90

Figura 19. Vista general del hundimiento existente en la cochera ..... 91

Figura 20. Curvas de nivel obtenidas, mediante el procesamiento de los datos topográficos en CivilCAD 2015, a cada 5 cm..... 92

Figura 21. Agrietamiento de muro sin considerar los bordes sobre eje 9 transversal, ubicada en la cochera..... 98

Figura 22. Agrietamiento de muro paralelo al suelo en la intersección entre el ejes 2 transversal y D longitudinal, ubicada en el dormitorio 2..... 99

Figura 23. Agrietamiento de muro paralelo al castillo en la intersección entre el ejes 6 transversal y A longitudinal, ubicada en el dormitorio 2 ..... 100

Figura 24. Agrietamiento en muro paralelo a la losa en el eje longitudinal I, ubicado en la cochera ..... 101

Figura 25. Agrietamiento vertical por separación entre predios sobre el eje longitudinal I, en la colindancia derecha de la vivienda estudiada..... 102

Figura 26. Agrietamiento en suelo en la intersección entre los ejes 6 transversal y H longitudinal, ubicada entre el dormitorio 1 y baño 1..... 103

Figura 27. Vista en planta del modelo 3D del caso de estudio con la traza aproximada de la falla geológica presente según SIFAGG..... 104

Figura 28. Vista rotada 1 del modelo 3D del caso de estudio con la traza aproximada de la falla geológica presente según SIFAGG..... 105

Figura 29. Vista rotada 2 del modelo 3D del caso de estudio con la traza aproximada de la falla geológica presente según SIFAGG..... 105

Figura 30. Visualización de los agrietamientos de piso, según el registro de la base de datos ..... 106

Figura 31. Desplome de muro sobre el eje longitudinal A, ubicado en el dormitorio 2 .... 107

Figura 32. Descuadre de puerta ubicada entre el dormitorio 1 y baño 1 ..... 108

Figura 33. Descuadre de ventana ubicado entre el dormitorio 2 y el patio..... 109

Figura 34. Descuadre de abertura ubicado entre el pasillo y la sala de estar 2 ..... 109

Figura 35. Desprendimiento de herrería de marco ventana ubicado entre el dormitorio 3 y la sala de estar 2..... 112

Figura 36. Desprendimiento de herrería de marco de abertura ubicado entre el pasillo y la sala de estar 2..... 113

Figura 37. Desprendimiento de zoclo sobre el eje longitudinal I, ubicado en el dormitorio 1 ..... 113

Figura 38. Gráfico de evolución de la probabilidad de falla de la vivienda conforme el aumento porcentual de las variables presentes en la ecuación de desempeño bajo el escenario optimista de análisis, considerando el estado límite último ..... 116

Figura 39. Gráfico de evolución de la probabilidad de falla de la vivienda conforme el aumento porcentual de las variables presentes en la ecuación de desempeño bajo el escenario pesimista de análisis, considerando el estado límite último..... 118

Figura 40. Gráfico de evolución de la probabilidad de falla de la vivienda conforme el aumento porcentual de las variables presentes en la ecuación de desempeño bajo el escenario optimista de análisis, considerando el estado límite de servicio ..... 121

Figura 41. Gráfico de evolución de la probabilidad de falla de la vivienda conforme el aumento porcentual de las variables presentes en la ecuación de desempeño bajo el escenario pesimista de análisis, considerando el estado límite de servicio ..... 123

Figura 42. Representación frontal y de perfil de muros de mampostería confinada con sus respectivas variables ..... 145

Figura 43. Visualización del marco creado con el trazo de la dala inferior..... 174

Figura 44. Visualización de la edición del marco creado para el análisis de la diagonal equivalente..... 175

Figura 45. Visualización de ejemplo de carga axial máxima en el elemento de la diagonal equivalente, una vez analizado el modelo numérico en SAP2000.....	177
Figura 46. Gráfica de distorsiones angulares contra fuerzas cortantes máximas absolutas mediante la simulación por diagonal equivalente en el software SAP2000.....	178
Figura 47. Dimensionalidad de los muros de mampostería analizados para simulación numérica .....	180
Figura 48. Enmallado considerado para la simulación numérica de los muros de mampostería .....	181
Figura 49. Restricciones de los apoyos considerados en la simulación numérica de la mampostería .....	181
Figura 50. Cargas verticales impuestas en los todos los nodos del enmallado del muro de mampostería simulado numéricamente.....	182
Figura 51. Desplazamientos considerados en los nodos del enmallado de los muros de mampostería simulados numéricamente .....	183
Figura 52. Esfuerzos normales en la dirección X para un hundimiento diferencial de 10 cm .....	184
Figura 53. Esfuerzos normales en la dirección Y para un hundimiento diferencial de 10 cm .....	185
Figura 54. Esfuerzos normales en la dirección Z para un hundimiento diferencial de 10 cm .....	185
Figura 55. Esfuerzos cortantes en la dirección XY para un hundimiento diferencial de 10 cm.....	186
Figura 56. Gráfica de hundimientos diferenciales contra esfuerzos cortantes máximos absolutos en la dirección XY mediante la simulación por elementos finitos en el software CAST3M .....	187

## RESUMEN

La subsidencia diferencial es un fenómeno geomecánico que induce daños significativos en construcciones de mampostería confinada, un sistema constructivo predominante en México y otras partes del mundo. La presente investigación se enfoca en el desarrollo y aplicación de una metodología probabilística para evaluar la confiabilidad estructural de estas edificaciones cuando son sometidas a asentamientos diferenciales.

El método propuesto se fundamenta en el análisis de los estados límite último (ELU) y de servicio (ELS) por cortante. Se dedujeron las ecuaciones de desempeño a partir del modelo de curva trilineal de Flores (1995), utilizando la distorsión angular —obtenida de mediciones topográficas directas— como la variable principal de demanda estructural. Esta aproximación permite una evaluación práctica sin requerir complejas simulaciones numéricas.

La metodología se validó mediante su aplicación a un caso de estudio real: una vivienda unifamiliar de un nivel en Aguascalientes, México, afectada por una falla geológica activa. Se determinó el índice de confiabilidad ( $\beta$ ) y la probabilidad de falla ( $p_f$ ) para cada muro individualmente y para la vivienda como un sistema estructural dúctil en paralelo, considerando escenarios de independencia y dependencia total entre sus elementos.

Los resultados indican que, si bien muchos muros presentan una alta probabilidad de falla a nivel individual, la confiabilidad del sistema en conjunto es significativamente mayor, evidenciando el papel crucial de la redundancia y la ductilidad que aporta el confinamiento. Adicionalmente, un análisis de sensibilidad reveló que el hundimiento diferencial y la longitud de los paños de mampostería son las variables más influyentes en el desempeño estructural. Este trabajo concluye con una herramienta práctica para el diagnóstico de la seguridad en edificaciones existentes y ofrece recomendaciones para mejorar su resiliencia.

**Palabras clave:** confiabilidad estructural, mampostería confinada, subsidencia, estados límite, análisis de sensibilidad.

## ABSTRACT

Differential subsidence is a geomechanical phenomenon that induces significant damage in confined masonry structures, a prevalent building system in Mexico and other parts of the world. This research focuses on the development and application of a probabilistic methodology to assess the structural reliability of these buildings when subjected to differential settlements.

The proposed method is based on the analysis of the ultimate limit state (ULS) and serviceability limit state (SLS) for shear. Performance equations were derived from the trilinear model by Flores (1995), using angular distortion—obtained from direct topographical measurements—as the primary structural demand variable. This approach allows for a practical evaluation without requiring complex numerical simulations.

The methodology was validated through its application to a real-world case study: a single-story, single-family home in Aguascalientes, Mexico, affected by an active geological fault. The reliability index ( $\beta$ ) and probability of failure ( $p_f$ ) were determined for each wall individually and for the house as a ductile parallel structural system, considering scenarios of total independence and dependence among its elements.

The results indicate that while many individual walls exhibit a high probability of failure, the overall system reliability is significantly higher, highlighting the crucial role of redundancy and ductility provided by the confinement. Additionally, a sensitivity analysis revealed that differential settlement and the length of the masonry panels are the most influential variables in the structural performance. This work concludes by offering a practical tool for diagnosing the safety of existing buildings and provides recommendations to enhance their resilience.

**Keywords:** structural reliability, confined masonry, subsidence, limit states, sensitivity analysis.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

Debido a que los problemas relacionados con la subsidencia diferencial han impactado socioeconómicamente tanto a los habitantes como a las entidades públicas y privadas en el Valle de Aguascalientes, los científicos de la Universidad Autónoma de Aguascalientes relacionados con las líneas de investigación de construcción y estructuras de la ingeniería civil han dedicado sus esfuerzos en tratar de entender las causas generales de la subsidencia, así como de su efecto en las construcciones realizadas por el hombre.

Hasta 2021, la Universidad Autónoma de Aguascalientes registró un total de 19 tesis de maestría y doctorado relacionados con el fenómeno de subsidencia. A pesar de ello, sólo en dos de estas se han empleado métodos probabilísticos: una de ellas analiza el desempeño de estructuras afectadas por subsidencia por el método probabilístico, y en la otra, se predice la subsidencia empleando métodos probabilísticos en la ciudad de Aguascalientes (Dueñas, 2021; Escobedo, 2016).

Además de las tesis que se mencionaron previamente, este trabajo se inspiró en otros proyectos de investigación destacados, como los titulados "Estudio de Vulnerabilidad Estructural de las Construcciones ante Fracturamientos por Subsidencia" y "Modelación del Comportamiento Estructural del Templo de San Antonio para Diferentes Estados de Degradación del Material", presentados por De Lira y Gaxiola (2016 & 2018), respectivamente.

En el primero, se detallan los elementos necesarios para desarrollar una metodología destinada a evaluar las estructuras típicas de la ciudad de Aguascalientes en respuesta a fracturas y subsidencia. Se utilizaron técnicas de monitoreo de desplazamiento en una parte de la Falla Oriente ubicada en la Ciudad de Aguascalientes, así como técnicas de monitoreo de patologías en una construcción específica objeto de estudio. Posteriormente, se llevó a cabo una simulación numérica del edificio en estudio con el fin de determinar sus condiciones de seguridad y estabilidad frente a asentamientos diferenciales.

En el segundo, se llevó a cabo un análisis numérico por el método de elementos finitos del Templo de San Antonio en Aguascalientes, en el que se analizaron los modos de vibrar de dicho edificio y se simularon diferentes niveles de degradación por efecto de cristalización de sales.



En la revisión bibliográfica de estas cuatro tesis, se ha identificado un vacío en el estado actual del conocimiento, en el que no se ha determinado hasta la fecha una metodología que permita determinar la probabilidad de falla ni las variables que intervienen en la confiabilidad estructural de construcciones de mampostería confinada para vivienda reales afectadas por los efectos inducidos debido a la subsidencia diferencial.

Aunado a lo anterior, los estudios efectuados no han establecido o explorado alguna ruta concreta para el análisis de confiabilidad de un caso práctico de viviendas elaboradas con mampostería confinada; siendo que para SMIE (2019), la mampostería “sigue siendo el material predominante en la vivienda unifamiliar y, además, su uso se está extendiendo a edificios de cada vez mayor altura, sobre todo por la densificación de la población en los grandes centros urbanos”.

## 1.2. Planteamiento del problema

Uno de los fenómenos que puede inducir la aparición de daños paulatinos en las estructuras es la subsidencia diferencial. Para Kireeva et al. (2021), la subsidencia diferencial causa daños a las estructuras porque conduce a deformaciones como pendientes, curvatura y torsión, lo que puede debilitar los elementos de carga de la estructura. La subsidencia del terreno ha cobrado relevancia mundial recientemente debido a sus importantes impactos socioeconómicos y a la necesidad de estrategias efectivas de manejo y mitigación (Bokhari et al., 2023).

Sólo en México, hay más de 20 ciudades donde se ha registrado el fenómeno de subsidencia, siendo 9 de ellas (incluyendo la ciudad de Aguascalientes, Aguascalientes) que tienen una velocidad máxima de subsidencia mayor a 10 centímetros por año (Figuerola-Miranda et al., 2018).

Los daños a la vivienda por hundimiento en México han sido un tema importante en varias ciudades, entre ellas la Ciudad de México, San Luis Potosí y Aguascalientes. En la Ciudad de México, 15.43% de la población, que corresponde a 1'358,873 habitantes, vive en zonas de riesgo intermedio, alto y muy alto de hundimiento del suelo, haciéndolas vulnerables a daños en la estructura habitacional (Fernández-Torres et al., 2020). En la Zona Metropolitana de Soledad de Graciano Sánchez (San Luis Potosi), 27% de las propiedades afectadas por subsidencia experimentaron daños bajos, 33% moderados, 21% altos, 15%

severos y 4% fueron demolidos (Julio-Miranda et al., 2012). En Aguascalientes, los daños a la vivienda por subsidencia aumentaron con el tiempo, con al menos 2% de las áreas urbanas de alto riesgo en 2003-2010 (afectando aproximadamente a 39,000 personas) y 6% en alto riesgo en 2015-2020 (afectando aproximadamente a 85,200 personas) (Cigna & Tapete, 2021).

Algunos de los daños estructurales específicos que la subsidencia diferencial produce en las viviendas los mencionan Figueroa-Miranda et al. (2018), como se muestran a continuación:

- Desprendimiento de concreto y pintura en elementos de concreto reforzado
- Grietas diagonales en muros de carga
- Fisuras, inclinaciones y desniveles en suelos y techos
- Deformación en marcos de ventanas y puertas
- Asentamiento diferencial en muros de carga
- Separación entre elementos estructurales



*Figura 1. Ejemplo de vivienda dañada por subsidencia diferencial, ubicada en la localidad de Pabellón de Hidalgo, Aguascalientes (México).*

Una de las acciones que Pacheco-Martínez et al. (2013) recomiendan emprender para mitigar los impactos económicos relacionados con los problemas asociados con la

subsidencia, es mediante la actualización de los códigos y la mejora en los diseños de construcción para hacerlos más resilientes a los efectos de la deformación del suelo. La mejora en la resiliencia, para el caso de construcciones afectadas por subsidencia, implicaría tener un mejor entendimiento del desempeño de las estructuras ante las solicitaciones externas inducidas por la subsidencia diferencial (Romero, 2021).

Una alternativa que se puede emplear para mejorar los sistemas estructurales es mediante el análisis por medio de la teoría de confiabilidad estructural. Para Dueñas (2021), la confiabilidad estructural ha sido gradualmente adoptada en el análisis estructural general por permitir establecer modelos probabilísticos que permiten mejorar, analizar, evaluar y predecir el comportamiento y desempeño de las estructuras sujetas a las incertidumbres inherentes al diseño, ejecución y mantenimiento bajo distintas solicitaciones externas. Según lo indicado por Gómez Soberón (2017), la evaluación de la confiabilidad estructural aporta información adicional al entendimiento del comportamiento del sistema, lo que facilita la toma de decisiones más informadas en los procesos de análisis y diseño.

Para abordar esta problemática general de forma acotada, esta investigación se delimita de la siguiente manera:

#### ***1.2.1. Espacialidad y temporalidad***

Para esta investigación se estudiará una vivienda real en el Estado de Aguascalientes de uno o dos niveles tipo construida con mampostería confinada y que esté actualmente afectada por fallas o fracturamientos por subsidencia; ya sea de un caso previamente estudiado según la bibliografía, u otro diferente.

Se planea que el caso de estudio posea un daño por subsidencia moderado, a mediano plazo desde su construcción. La vivienda a estudiar podrá haber sido estudiada previamente por la bibliografía, o podrá ser alguna que no se haya trabajado aún.

#### ***1.2.2. Variables de estudio***

En el análisis estructural de la vivienda (considerando un comportamiento no lineal), la incertidumbre se encuentra representada como variables de solicitación a cortante de la mampostería:

- Hundimiento diferencial relativo en el muro ( $\Delta S$ ), que a su vez depende de:
  - Hundimiento registrado en el centro del castillo del extremo derecho del muro confinado ( $S_{der}$ ).
  - Hundimiento registrado en el centro del castillo del extremo izquierdo del muro confinado ( $S_{izq}$ ).
- Distancia de la abertura  $i$ -ésima del muro paralela a la longitud de la mampostería ( $L_{Ai}$ ).

Y respecto a las variables de resistencia a cortante de la mampostería:

- Longitud de muro, de centro a centro de castillo ( $L$ ). Esta depende a su vez de:
  - Dimensión de sección del castillo del extremo derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_{cd}$ ).
  - Dimensión de sección del castillo del extremo izquierdo del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_{ci}$ ).
  - Longitud de la mampostería, sin considerar los castillos de confinamiento ( $L_m$ ).

A partir de esta descripción y delimitación, el problema de investigación se define como el hecho de que la subsidencia, un fenómeno mundialmente presente, induce daños en la vivienda de mampostería confinada por efecto de las deformaciones en el suelo, generando un impacto económico en sus residentes. Una forma para hacer frente a esta problemática es mediante el aumento de la resiliencia en las estructuras frente a dichas deformaciones inducidas, y para la evaluación de los códigos y diseños estructurales empleados en su construcción se puede emplear la confiabilidad estructural.

De esta definición se desprenden las siguientes preguntas que guiarán el desarrollo del trabajo:

- ¿Cómo se determina la probabilidad de falla en una vivienda “tipo” construida con base a materiales y técnicas de mampostería confinada, y que se encuentra afectada por las fallas geológicas y/o fracturamientos provocados por subsidencia?

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- ¿Cuáles son las principales variables estructurales que afectan el grado de confiabilidad de una vivienda de mampostería sometida a subsidencia?

### 1.3. Objetivos, alcance e hipótesis de investigación

Para dar respuesta a las preguntas planteadas, la investigación gira en torno a dos objetivos principales:

- Establecer una metodología para evaluar la probabilidad de falla en viviendas “tipo” construidas con base a técnicas y materiales de mampostería confinada, y que se encuentran afectadas por las fallas geológicas y/o fracturamientos del terreno debido al fenómeno de subsidencia.
- Evaluar las diferentes variables que intervienen en la resistencia de una vivienda de mampostería, y medir su efecto en el grado de confiabilidad de toda la estructura.

Debido a que será el primer acercamiento para entender la confiabilidad estructural de las estructuras de mampostería confinada para vivienda sometida a subsidencia, el alcance de esta investigación es exploratorio.

En línea con estos objetivos y su naturaleza, se formula la siguiente hipótesis como respuesta tentativa a las preguntas de investigación:

- Es posible determinar o establecer una metodología que permita conocer el margen de confiabilidad de viviendas dañadas por subsidencia.

### 1.4. Justificación y uso de resultados

Lo que se pretende con esta investigación es consolidar una metodología concreta para la determinación de la probabilidad de falla de las viviendas elaboradas por mampostería y que se encuentran afectadas por la subsidencia diferencial. Esto con el propósito de proporcionar una base científica que contribuya a la mejora de los reglamentos y diseños estructurales para las futuras edificaciones con estas características; lo que mejoraría la resiliencia estructural de las nuevas construcciones habitacionales ante la deformación del suelo, y de este modo, se mitiguen los daños generados en estas obras de ingeniería, minimizando así los futuros impactos económicos asociados en sus usuarios. Asimismo,

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

otra intención que se busca con este estudio es que el método propuesto se encuentre al alcance del ingeniero de la práctica, de manera que se familiarice con ella y la aplique en los casos correspondientes.

La visión final de este trabajo es proponer un proceso de cálculo que permita determinar el margen de seguridad y que dicho proceso sea aplicable en códigos y reglamentos de construcción, específicamente diseñado para su implementación en viviendas de mampostería afectadas por subsidencia.

Para ello se estudiará un caso de estudio, cuyos resultados podrían aplicarse a cualquier construcción con características similares. Estos productos se difundirán en un artículo de la revista científica de la Universidad Autónoma de Aguascalientes y se divulgarán en el Colegio de Ingenieros Civiles de Aguascalientes.

Esta investigación está relacionada con las prioridades del país y de la región, puesto que los objetivos expresados previamente giran en torno al mejoramiento de la resiliencia de las viviendas afectadas por subsidencia diferencial, esto alinea a esta tesis con el Programa Nacional Estratégico de vivienda del CONAHCyT, siendo entonces considerada prioritaria para el desarrollo de México. Además, este trabajo se alinea con el principio de resiliencia del Programa Municipal De Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial, Aguascalientes 2045; ya que servirá de apoyo para mitigar los impactos de las condiciones naturales del territorio en la planeación urbana, en este caso, del fenómeno de la subsidencia diferencial. Por último, este estudio también concuerda con los objetivos de la línea de investigación y generación del conocimiento de estructuras y construcción de la Maestría en Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, siendo de interés para los investigadores de dicha institución y que se encuentran relacionadas con la ingeniería civil.

#### **1.5. Factibilidad**

Se considera que la investigación es posible, debido principalmente a que se trabajará con software para llevar a cabo simulaciones numéricas y tratamientos probabilísticos de datos, por lo que no implica la programación de uso de laboratorio para la realización de especímenes ni de la realización de distintas pruebas físicas para obtención de información.



## CAPÍTULO II. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

### 2.1. Normativas y documentos técnicos de proyección internacional que abordan la confiabilidad de estructuras existentes

La evaluación de la seguridad en estructuras existentes representa un desafío distinto al diseño de estructuras nuevas, lo que ha motivado el desarrollo de diferentes marcos normativos internacionales específicos.

El documento fundamental a nivel internacional es la norma ISO 2394:1998, "Principios generales sobre la confiabilidad de las estructuras". Aunque de carácter general, su Cláusula 10 está dedicada explícitamente a la evaluación de estructuras existentes. En ella se establece la filosofía de que la confiabilidad debe evaluarse actualizando el conocimiento sobre las variables básicas (propiedades de materiales, geometría, acciones) a través de inspecciones y pruebas en sitio. El objetivo final es actualizar las propiedades y las estimaciones de confiabilidad de la estructura; y esta última, ya sea mediante la probabilidad de falla o mediante factores parciales, en caso de estructuras dañadas. De manera crucial, la norma reconoce que los costos de intervención en estructuras existentes son significativamente mayores, justificando la adopción de niveles de confiabilidad objetivo distintos y, a menudo, menores que los exigidos para estructuras nuevas, siempre que se garantice un nivel de seguridad adecuado (ISO, 1998).

Para llevar estos principios a la práctica, han surgido documentos técnicos especializados. Un referente para estructuras de concreto reforzado destacado es el Boletín 80 de la fib, "Métodos de factores parciales para estructuras de concreto existentes". Este documento traduce los principios de la norma ISO en una metodología aplicable. Propone procedimientos, como el Método del Valor de Diseño (DVM) y el Método de los Factores Parciales Ajustados (APFM), para recalibrar los factores de seguridad utilizados en la verificación estructural. Dicho ajuste se realiza en función de tres aspectos clave: 1) un nuevo nivel de confiabilidad objetivo, 2) el periodo de vida útil remanente de la estructura (periodo de referencia), y 3) la información actualizada obtenida de las investigaciones de campo, que reduce la incertidumbre de las variables (fib, 2016).

## 2.2. Enfoques de análisis de confiabilidad para estructuras dañadas

El principal enfoque utilizado para el análisis por confiabilidad de las estructuras dañadas es principalmente a través del modelado y la simulación mediante software, empleando en la mayoría de los casos el método de simulación de Monte Carlo en combinación con el método de elementos finitos.

### 2.2.1. Método de Monte Carlo

El método de Monte Carlo constituye una técnica especializada que permite la generación de resultados numéricos sin requerir la realización de pruebas físicas directas. A partir de datos obtenidos en pruebas previas o mediante información adicional, se establecen las distribuciones de probabilidad de las características clave en el problema en cuestión. Estas distribuciones se utilizan entonces para generar muestras de datos numéricos (Nowak & Collins, 2000).

Para Gómez Soberón (2017), la aplicación del Método de Monte Carlo es adecuada cuando:

- Se presentan problemas complejos para los cuales no existe solución cerrada o ésta es muy difícil.
- Se requiere resolver problemas complejos, en los cuales plantear ciertas suposiciones de simplificación llevaría a soluciones con mala aproximación.
- Se deben comprobar los resultados obtenidos con otras técnicas de solución.

No obstante, Song & Kawai (2023) señalan que la principal limitación de este método es que requiere recursos computacionales y herramientas de software especializadas, y en el contexto del cálculo de confiabilidad, para probabilidades de falla muy pequeñas podría requerir altos costos computacionales.

En cuanto a la aplicación del método de Monte Carlo, se podría citar el elaborado por Kala (2007), en el cual aplicó un análisis de los factores de seguridad parciales sobre la confiabilidad de los miembros de acero. Además, llevó a cabo una evaluación probabilística de la confiabilidad basada en las características geométricas y del material, y el método de Monte Carlo se empleó para simulaciones de las distintas variables. En el artículo se menciona que la utilización del análisis probabilístico requiere la asignación de información

estadística exclusivamente objetiva, que a menudo no está disponible; sugiriendo que la implementación efectiva de todos los métodos disponibles de la teoría general de la incertidumbre es factible en el análisis de confiabilidad.

Por otra parte, Pereira Junior et al. (2023) realizaron un análisis de confiabilidad en pórticos de hormigón armado sometidos a asentamientos post-construcción con base en este método, considerando incertidumbres en las acciones permanentes y de uso, así como en la resistencia del acero y el concreto. Esto les llevó a concluir que los asentamientos de apoyo post-construcción pueden tener un impacto significativo en la confiabilidad de los pórticos de concreto reforzado. No obstante, la limitación principal del estudio es que se supusieron valores arbitrarios de asentamientos en los pórticos realizados (lo que podría no ser realista); y además, sólo se tomaron en cuenta los asentamientos existentes como única condición en el proyecto, despreciando, por ejemplo, la corrosión del refuerzo en el cálculo de la confiabilidad estructural del sistema.

Otro estudio que también empleó el método de Monte Carlo fue el realizado por Skrzypczak et al. (2017), en el que se utilizó para calcular el índice de confiabilidad de un miembro de mampostería no reforzada con dintel. Se establecieron la función de estado límite, los parámetros y el tipo de distribución de las variables para el miembro analizado. Luego, se aplicó el método de Monte Carlo junto con otros métodos como FORM (*First Order Reliability Method*) y SORM (*Second Order Reliability Method*) para obtener el índice de confiabilidad basado en la función de estado límite analizada. No obstante, este artículo menciona que existen limitaciones en la recopilación de datos, mencionando la falta de suficientes pruebas realizadas en estructuras de mampostería y la falta de información sobre los coeficientes de variación y parámetros de distribución (lo que afecta a la generalización de las conclusiones); además, se simplificaron las variables debido a dicha limitación en la disponibilidad de datos (ya que se usaron variables básicas adoptadas para el modelo probabilístico, no representando la variabilidad real en la estructura de mampostería analizada).

Asimismo, en su investigación, García Manjarrez & De León Escobedo (2021) se centraron en la reparación eficiente de escuelas afectadas por daños sísmicos mediante el empleo de técnicas de confiabilidad estructural. Su enfoque incluyó un análisis detallado de los costos y el ciclo de vida, con el propósito de ofrecer recomendaciones prácticas sobre el tipo de refuerzo necesario para los límites de resistencia y servicio. Para calcular las

probabilidades de fallo de los elementos con sus propiedades originales, utilizaron el método de Monte Carlo. El artículo presenta limitaciones importantes, como el análisis de solo dos escuelas, lo que podría limitar la generalización de los resultados; además, se observa un posible sesgo en la selección de técnicas de reparación y la falta de consideración de factores como la disponibilidad de los recursos locales; también hay deficiencias en la evaluación de la confiabilidad y la ausencia de comparaciones con otros enfoques. Estas limitaciones cuestionan la validez y aplicabilidad de los resultados en contextos más amplios.

### ***2.2.2. Método de elementos finitos***

Acorde a (Lourenço, 1996), el método de elementos finitos implica la partición de una estructura en elementos más pequeños, cada uno con sus propias características materiales. Se establecen relaciones entre las fuerzas que actúan en los nodos y los desplazamientos asociados a cada elemento. Estos elementos se ensamblan teniendo en cuenta las cargas externas y las condiciones de contorno, dando lugar a un conjunto de ecuaciones que describen el equilibrio de la estructura. Este conjunto de ecuaciones se resuelve para determinar los desplazamientos nodales. A partir de estos desplazamientos, se pueden calcular las deformaciones y tensiones en los puntos de integración, suponiendo que la matriz de rigidez de cada elemento se integra numéricamente. No obstante, la principal limitación de este método radica en que conforme se busque más precisión en los resultados de simulación, se requiere aumentar la cantidad de estas particiones, lo que podría conducir a un uso más intensivo de la memoria computacional y de un mayor tiempo de procesamiento.

En cuanto a la aplicación del método de elementos finitos, Asad et al. (2022) utilizaron esta técnica para simular muros de mampostería reforzada sometidos a compresión axial, esto para investigar el comportamiento estructural de los muros de mampostería reforzada, considerando diferentes configuraciones y condiciones de carga. No obstante, algunas limitaciones de este artículo radican en determinar si los resultados obtenidos son aplicables a diversas situaciones y configuraciones de muros de mampostería reforzada o si están limitados a casos específicos; además, el estudio sólo se limitó al análisis de mampostería bajo carga axial (donde podrían tomarse en consideración otros efectos, como

el cortante o el momento) y sólo no se llevó a cabo un análisis de confiabilidad considerando las incertidumbres de los distintos parámetros de capacidad y carga.

Por otra parte, Gennadyevich et al. (2019) propusieron un criterio para la evaluación de la estabilidad de elementos de varilla comprimidos en sistemas estructurales operados en condiciones geotécnicas peligrosas. Para ello, los autores llevaron a cabo cálculos estáticos de modelos de elementos finitos utilizando el software SCAD y determinaron los parámetros críticos para el fragmento de marco de edificio más cargado. Las dos limitaciones más importantes del artículo radican en que el estudio se centra en condiciones geológicas específicas y en un caso de estudio particular en Rusia, lo que limita la generalización de los resultados a otras regiones con diferentes condiciones geológicas; y aunque se mencionan técnicas de análisis de confiabilidad y se llevan a cabo cálculos estáticos, no se proporciona una descripción detallada de la metodología utilizada, lo que dificulta la replicabilidad del estudio por parte de otros investigadores.

Con la misma técnica de simulación, García (2011) elaboró un modelo numérico de muros de mampostería confinada con y sin refuerzo horizontal con ayuda del software Cast3m 2000, empleando modelos constitutivos (como el modelo de daño de Mazars, el modelo constitutivo para el acero de refuerzo y el modelo constitutivo para las juntas de mortero) en dicho modelo numérico y calibrando dicho modelo numérico (tomando en consideración el acero de refuerzo, el concreto de dalas y castillos, las piezas de arcilla recocida, las juntas de mortero y la respuesta carga lateral-distorsión). Esto finalmente le llevó a presentar varios análisis paramétricos importantes para los muros de mampostería confinada con y sin refuerzo horizontal, y a hacer comentarios finales y recomendaciones respecto a la cuantía del refuerzo horizontal, la relación de aspecto de los muros y la distribución del refuerzo en el panel. No obstante, el trabajo realizado por el autor no detalla explícitamente el código empleado para la simulación numérica a través de este software, lo que dificulta la replicabilidad de los resultados por parte de otros investigadores.

### **2.2.3. Otros métodos**

En este rubro se pueden incluir los de metodología híbrida y los teóricos. En el primero, se pueden incluir los estudios que han combinado más de dos metodologías de análisis ya existentes en las estructuras dañadas, mientras que en los segundos, suelen realizar

análisis mediante la creación de nuevas expresiones matemáticas o nuevos métodos que incorporen consideraciones novedosas.

#### **2.2.3.1. Híbridos**

Un ejemplo de investigaciones en las que se emplea un método híbrido es la realizada por Dubourg et al. (2013), en el que introducen el concepto de modelos sustitutivos, como Kriging, para reemplazar los costosos modelos computacionales (como el modelo de elementos finitos) en aras de la eficiencia. Estos autores proponen un enfoque híbrido que combina los sustitutos del Kriging y el muestreo por importancia para estimar de manera eficiente las probabilidades de fracaso, centrándose en las técnicas de metamodelado adaptativo; mostrando que su método formulado puede manejar problemas que presentan un número razonablemente alto de variables aleatorias y múltiples puntos de diseño.

Por otra parte, también se puede mencionar al trabajo elaborado por Papadrakakis & Lagaros (2002), en la que exploraron el uso de las redes neuronales (NN) en la optimización estructural con la simulación de Monte Carlo. Se probó la eficacia de este enfoque al probarla en un elemento 3D de una determinada estructura, mostrando un diseño estructural óptimo y realista con márgenes de seguridad controlados; y una reducción del tiempo de cálculo en casi dos órdenes de magnitud. Como análisis al trabajo realizado, la complejidad y el tamaño del modelo de redes neuronales utilizadas pueden afectar la interpretación de los resultados y la escalabilidad del enfoque propuesto, por lo que se debe considerar la posibilidad de sobreajuste y la necesidad de una validación rigurosa del modelo; además, es importante evaluar la capacidad de generalización de las redes neuronales entrenadas en diferentes conjuntos de datos y escenarios estructurales.

También podría incluirse en esta categoría la investigación conducida por Momeni et al. (2021), que al combinar el método de elementos finitos con la simulación de Monte Carlo, presentaron un nuevo método de cálculo, basado en el análisis de confiabilidad estructural, para calcular la menor distancia de escalado (por sus siglas en inglés, SSD) para columnas de acero ante cargas dinámicas de impacto, probando que su método propuesto posee buena eficiencia y precisión al predecir la probabilidad de daño de estos elementos estructurales. Si bien el estudio trata varias condiciones de carga de impacto, es posible que se centre en un enfoque específico o en un conjunto limitado de estas, lo que podría



limitar la generalización de los resultados a diferentes escenarios de cargas dinámicas de impacto. Además de lo anterior, aunque se mencionan estudios experimentales anteriores en el campo, la falta de una validación experimental directa de los resultados del enfoque de confiabilidad utilizado en este estudio podría plantear interrogantes sobre la robustez de la metodología propuesta. Aunado a esto, aunque se proponga un enfoque eficiente para evaluar la distancia segura a escala de columnas de acero, la implementación práctica de este enfoque en el diseño y la ingeniería estructural real podría requerir consideraciones adicionales que no se aborden en detalle en el artículo (como por ejemplo el estado de las conexiones entre elementos de acero).

Un estudio realizado que también combina el método de elementos finitos con la simulación de Monte Carlo, solo que aplicado a mampostería ya existente, fue el elaborado por Ávila et al. (2020), centrados en evaluar el daño sísmico en la iglesia de San Justo y Pastor en Granada (España) utilizando el análisis probabilístico de confiabilidad y considerando una distribución probabilística log-normal para las propiedades de los materiales, estableciendo finalmente una metodología para evaluar la confiabilidad estructural de edificios de albañilería bajo sismos. El estudio se centra en un caso específico, la iglesia de San Justo y Pastor en Granada, lo que limita la generalización de los resultados a otras estructuras de mampostería, por lo que sería beneficioso incluir un análisis de múltiples casos para una mayor validez externa de los hallazgos; por otra parte, aunque se aborda la incertidumbre en las propiedades de los materiales mediante una distribución probabilística, existen otras variables importantes, como la calidad de la construcción, la interacción suelo-estructura, y la presencia de patologías estructurales, que podrían influir en la evaluación de la confiabilidad estructural y que no se abordan en profundidad en el estudio. Aunque se realizan análisis detallados, la validación de los resultados con datos de campo o pruebas experimentales adicionales podría fortalecer la robustez de las conclusiones obtenidas a partir del modelo de elementos finitos y el análisis de Monte Carlo.

Otro estudio con metodología híbrida enfocada a mampostería podría ser el de Stewart & Lawrence (2002). Con base a la información sobre datos de campo de muros de mampostería sin confinar crearon un modelo probabilista sobre la variabilidad de la resistencia al corte de unidad a unidad y la variabilidad de las cargas laterales, y realizaron el análisis considerando la primera fisuración, la redistribución de esfuerzos, la posible fisuración adicional y el colapso. Además de emplear la recolección de datos de campo, se

llevó simulación por método de Monte Carlo. Esto finalmente les sirvió para el desarrollo de un método para calcular la confiabilidad estructural de muros de albañilería en flexión. Es importante mencionar que la aplicabilidad práctica de estos resultados puede ser limitada debido a la complejidad del enfoque de simulación de Monte Carlo y la necesidad de datos detallados de carga y propiedades de los materiales, que pueden no estar fácilmente disponibles en todos los casos de diseño de estructuras de albañilería.

Por último, se puede analizar el estudio llevado a cabo por Vargas et al. (2013). Aquí se describió una metodología probabilista para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificios de concreto reforzado con losa reticular. Además de emplear el método de Monte Carlo, también llevaron a cabo análisis dinámico no lineal. Al combinar los dos métodos, obtuvieron una distribución de probabilidad de la capacidad y fragilidad sísmica de la estructura, así como del daño esperado en diferentes niveles de intensidad sísmica. Como limitaciones, el estudio se centra en la evaluación de la vulnerabilidad de las estructuras utilizando enfoques probabilísticos, sin abordar las posibles limitaciones de estos métodos, como las suposiciones formuladas y las simplificaciones introducidas. Los autores enfatizan la importancia de considerar las incertidumbres en cuanto a las propiedades de los materiales y las acciones sísmicas. Sin embargo, no explican en detalle cómo se cuantifican estas incertidumbres ni el posible impacto de los diferentes niveles de incertidumbre en los resultados de la evaluación. Por último, el estudio parte del supuesto de que las variables de entrada tienen coeficientes de variación relativamente pequeños, lo que podría subestimar las incertidumbres presentes en las estructuras que no están diseñadas de acuerdo con criterios de resistencia sísmica, lo que plantea dudas sobre la generalización de los hallazgos a estructuras con mayores incertidumbres.

#### 2.2.3.2. Teóricos

Un ejemplo de esto sería el estudio realizado por Echard et al. (2011), en el que combina la simulación de Kriging y Monte Carlo para evaluar la confiabilidad de una determinada estructura, proponiendo así el método iterativo de aprendizaje activo llamado AK-MCS. Para probar su robustez, se empleó este método con varios ejemplos de la literatura y se encontró que este método propuesto es eficiente para problemas con una alta no linealidad y dimensionalidad, comparando su desempeño frente a otros métodos de simulación, siendo superior a la gran mayoría de estos, y reduciendo la demanda computacional para

el procesamiento. Si bien el estudio menciona la eficacia del método AK-MCS para problemas complejos, carece de análisis detallados o estudios de casos sobre el rendimiento del método en aplicaciones de ingeniería reales, que podrían proporcionar información más práctica; además, no profundiza en la complejidad computacional o la escalabilidad del método AK-MCS, que podrían ser factores cruciales a la hora de aplicar este método a problemas de confiabilidad estructural a gran escala.

Por otra parte, Nichols et al. (2019) desarrollaron un programa para análisis de confiabilidad estructural para estructuras de mampostería sujetas a cargas muertas, vivas, ambientales, térmicas y sísmicas, aplicable a varios sistemas estructurales. El modelo incluye programas estructurales no lineales, análisis de árboles de fallas, estadísticas bayesianas y monitoreo de datos de vibraciones en tiempo real, utilizando para este último caso las cargas sísmicas que se encuentran en Italia. El hecho de basarse en la historia sísmica de Italia como ejemplo principal puede limitar la generalización de los hallazgos a regiones con diferentes características sísmicas (como por ejemplo la que se encuentra en México); además, el artículo no analiza en profundidad la validación del modelo comparándolo con datos del mundo real o estudios de casos ni tampoco en los aspectos computacionales del desarrollo del modelo, lo que podría plantear dudas sobre su eficacia en aplicaciones prácticas y dejar lagunas en la comprensión de los detalles técnicos de la implementación.

Por último, Tolentino López et al. (2011) proponen un criterio para evaluar la confiabilidad estructural, teniendo en cuenta la acumulación de daño sísmico a lo largo del tiempo. La formulación se basa en una expresión matemática que contempla la variación temporal de la capacidad estructural y de la demanda sísmica para una intensidad específica. En la metodología, se tienen en cuenta las incertidumbres epistémicas relacionadas con la capacidad y la demanda, así como la aleatoriedad de los eventos sísmicos y de la respuesta estructural. El estudio se centra principalmente en la confiabilidad estructural teniendo en cuenta los daños acumulados a lo largo del tiempo, pero podría resultar útil analizar las implicaciones de factores externos, como las condiciones ambientales o las prácticas de mantenimiento, sobre la integridad estructural. Además, El artículo podría mejorarse proporcionando una comparación más completa con la literatura existente o estudios similares para resaltar la novedad y la contribución de la investigación.

### 2.3. Casos donde se ha aplicado el análisis de confiabilidad estructural en estructuras dañadas

En la literatura científica se tiene constancia que se ha aplicado el análisis por confiabilidad estructural en construcciones dañadas de mampostería, concreto reforzado y acero.

#### 2.3.1. Estructuras de mampostería

En cuanto a construcciones de mampostería, se pueden dividir los casos de aplicación para las estructuras confinadas y no confinadas.

No obstante, hay algunos estudios en los que no se especifica explícitamente el tipo de confinamiento que existe en la mampostería analizada, implicando que los resultados obtenidos no pueden ser generalizables a edificaciones destinadas a viviendas.

Tal es el caso del estudio elaborado por los ya mencionados Ávila et al. (2020). En este último, si bien se analizó mampostería de un monumento histórico con daños existentes (como lo es la iglesia de San Justo y Pastor) y se llevó a cabo un procedimiento probabilístico para el análisis de confiabilidad asociado, lo cierto es que se desconoce si este puede generalizarse a la mampostería de uno o dos niveles.

En la misma línea, el estudio ya citado de Skrzypczak et al. (2017) si bien menciona que se llevó a cabo el análisis para mampostería con dintel reforzado, debería analizarse más a profundidad si los muros construidos en México están planteados con características similares a como se especificó en el caso de estudio de esta investigación, y si debería considerarse la presencia o no de castillos o dadas de confinamiento en las aberturas para los casos de estudio en dicho país.

Por último, los también señalados Nichols et al. (2019) desarrollaron un programa para el cálculo estructural de mampostería, aunque no especifican si el programa considera o no el confinamiento existente en los muros.

##### 2.3.1.1. Mampostería no confinada

En esta categoría, se podría mencionar la investigación previamente mencionada de Stewart & Lawrence (2002). Como en este estudio se estudió la confiabilidad considerando la flexión en la mampostería no confinada, los autores consideraron que una de las variables

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

más importantes a considerar fueron las fuerzas de unión por flexión. Se llevó a cabo la recolección de datos de las fuerzas de unión por flexión a partir de 19 construcciones en Melbourne (Australia), y en base a los datos se hizo un modelo probabilístico en donde se llevó a cabo una simulación por Monte Carlo para evaluar la probabilidad de fallo considerando la primera fisuración, la redistribución de esfuerzos, la posible fisuración adicional y el colapso. Debe resaltarse que aunque el estudio se basa en el código de estructuras de mampostería australiano AS3700-1998, se menciona que los principios generales también se aplican a códigos en otras partes del mundo, sin embargo la generalización de los resultados a nivel global puede no ser adecuada debido a las variaciones en los códigos de construcción y prácticas de diseño en diferentes regiones. Si bien se discuten las variabilidades de resistencia de unión a flexión de los materiales, no se menciona una validación experimental exhaustiva de los resultados teóricos presentados, por lo que la falta de datos experimentales puede limitar la robustez de las conclusiones alcanzadas en el estudio.

También podría incluirse en esta categoría la realizada por Montazerolghaem & Jäger (2015). Este estudio se centra en la caracterización de la incertidumbre en la verificación de muros de cizallamiento de mampostería no reforzados comparando los valores pronosticados según el modelo DIN EN 1996-1-1NA con los resultados de las pruebas para obtener la desviación y proponer la distribución que mejor se ajustara al modelo de incertidumbre. La metodología empleada en esta investigación puede generalizarse a las construcciones de vivienda con cautela, ya que las estructuras de las viviendas pueden tener diferentes consideraciones de diseño y propiedades materiales, por lo que es necesario ajustar la metodología para una aplicación precisa. Además, debe tomarse en cuenta las propiedades y condiciones propias de la infraestructura en México, y compararse con las que se tomaron en cuenta en dicha investigación para saber si puede extrapolarse dicha metodología.

Y para terminar este subcapítulo, se puede retomar el estudio anteriormente referido de Brehm (2011), en el que se llevó a cabo el análisis de confiabilidad para muros de refuerzo de mampostería no confinada, considerando la presencia de las cargas más comunes, sin tomar en cuenta la distribución de esfuerzos en el muro y sin tener una determinación realista de los efectos de carga en el mismo, lo que podría afectar a la generalización de los resultados y conclusiones para los muros de mampostería sin confinamiento.

### 2.3.1.2. Mampostería confinada

De esta categoría podría mencionarse el estudio ya mencionado de García Manjarrez & De León Escobedo (2021), donde llevó a cabo el análisis de confiabilidad estructural (para obtener el factor beta de confiabilidad) de las trabes y de las columnas de dos escuelas dañadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017 en el Estado de Morelos (México). Dichas escuelas se componen de un sistema estructural de marcos rígidos de concreto reforzado y muros de mampostería. Se hizo la evaluación de la confiabilidad estructural (determinando el factor beta de confiabilidad) y de la relación costo/beneficio de 3 alternativas de reparación en los elementos más críticos o con probabilidad de falla mayor: encamisados de concreto, encamisado con ángulos y soleras de acero, y muros de concreto. Finalmente encontraron que la reparación óptima de la escuela Yautepec fue con perfiles de acero, mientras que con la escuela Tlatenchi fue con la introducción de muros de concreto de 15 cm de espesor.

La metodología desarrollada en el artículo científico sobre la reparación óptima de escuelas con muros de mampostería y marcos de concreto con daños sísmicos podría tener aplicabilidad en el contexto de viviendas de mampostería confinada, aunque con algunas consideraciones y adaptaciones necesarias. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las viviendas de mampostería confinada pueden presentar características y desafíos específicos que difieren de las escuelas con muros de mampostería y marcos de concreto. Por lo tanto, sería necesario adaptar la metodología, considerando las particularidades de las viviendas y realizando estudios adicionales para validar su aplicabilidad en este contexto específico.

Algunos puntos de cómo se podría adaptar la metodología llevada a cabo por este estudio para aplicarla al análisis de viviendas de mampostería confinada en lugar de escuelas son las siguientes:

- *Características estructurales específicas.* Es importante considerar las diferencias en las características estructurales entre las escuelas y las viviendas de mampostería confinada. Las viviendas pueden tener dimensiones y configuraciones diferentes, así como sistemas estructurales únicos que deben tenerse en cuenta en el análisis.
- *Evaluación de daños sísmicos.* Dado que las viviendas de mampostería confinada pueden verse afectadas de manera diferente por eventos sísmicos en comparación



con las escuelas, es crucial realizar una evaluación detallada de los daños sísmicos específicos que pueden ocurrir en este tipo de estructuras.

- *Consideración de materiales y técnicas de construcción.* Las viviendas de mampostería confinada pueden estar construidas con materiales y técnicas de construcción distintas a las utilizadas en las escuelas analizadas en el estudio. Por lo tanto, es fundamental adaptar la metodología para tener en cuenta estas diferencias.
- *Análisis de costos y recursos locales.* Al evaluar las opciones de reparación, es importante considerar los costos de los materiales y la disponibilidad de recursos locales para llevar a cabo las obras de refuerzo en viviendas de mampostería confinada, lo cual puede variar significativamente en comparación con las escuelas.
- *Validación y calibración.* Antes de aplicar la metodología a viviendas de mampostería confinada, se debe validar y calibrar el enfoque utilizando datos y casos de estudio específicos de este tipo de estructuras para garantizar su eficacia y precisión en este contexto.

Al realizar estas adaptaciones y consideraciones específicas, la metodología desarrollada en el artículo científico podría ser generalizada y aplicada de manera más efectiva al análisis de viviendas de mampostería confinada, contribuyendo así a mejorar la seguridad sísmica de este tipo de estructuras.

Además del ámbito telúrico, se pueden tomar en consideración otras acciones presentes en las estructuras analizadas, como por ejemplo la presencia de daños al concreto o acero del confinamiento por cuestión del intemperismo, o inclusive, la presencia de asentamientos diferenciales en la estructura. No obstante, deben evaluarse estos nuevos parámetros y ajustarlo al método propuesto por estos autores en el contexto de los muros de mampostería confinados empleados para vivienda.



## CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

### 3.1. Definición de muros de mampostería confinada

Acorde a las definiciones establecidas por SMIE (2019):

- *Muro*. Obra o conjunto formado por piezas de mampostería, levantada a plomo, de sección rectangular, que sirve para construir una edificación, aislar un espacio o dividirlo. Desde el punto de vista de su función estructural, los muros se clasifican en tres tipos:
  - *Muros portantes*. Son los que se emplean como elementos estructurales para soportar todo tipo de solicitaciones, verticales y horizontales, tanto contenidas en su plano como perpendiculares a él.
  - *Muros no portantes*. Son aquellos que no soportan carga vertical, con excepción de su propio peso, tales como las bardas, los pretilos, los parapetos y los tabiques divisorios. Las solicitaciones a las que se ven sometidos estos muros son básicamente perpendiculares a su plano, como las inducidas por viento o sismo.
  - *Muros diafragma*. Son los que se colocan dentro de los vanos de estructuras esqueléticas, de concreto reforzado y de acero estructural, con el objetivo de resistir las fuerzas horizontales e incrementar su rigidez lateral. Pueden ser de mampostería confinada, mampostería reforzada interiormente, mampostería no reforzada o mampostería de piedras naturales.
- *Mampostería*. Material estructural compuesto, integrado por piezas de origen pétreo, naturales o artificiales, unidas entre sí por un mortero aglutinante.
- *Mampostería confinada*. Sistema constructivo a base de muros en los que el acero de refuerzo se concentra dentro de elementos de concreto, de sección transversal relativamente pequeña, de dimensiones típicamente iguales al espesor del muro, que lo rodean o lo confinan. En México, los elementos confinantes verticales y horizontales reciben el nombre de castillos y dalas, respectivamente. En este sistema constructivo, los castillos, o porciones de ellos, se cuelan una vez construido el muro o la parte de él. Además, es posible incorporar refuerzo embebido en algunas de las juntas horizontales de mortero entre hiladas.

### 3.2. Fallas en muros de mampostería confinada

#### 3.2.1. Definición de una falla y su clasificación

Acorde a SMIE (2019), una falla es:

Cualquier defecto, disfunción, anomalía o imperfección que ocurra durante la vida de una estructura y que da origen a un comportamiento o desempeño que no concuerda con las expectativas previstas en el proyecto original, incapacitándola para desempeñar satisfactoriamente las funciones a las que estaba destinada. Usualmente conduce a llevar a cabo intervenciones para rehabilitarla en mayor o menor grado. Una falla no necesariamente implica un acontecimiento catastrófico.

Las fallas, acorde a Birolini (2007), se clasifican según su:

- *Modo*. Que representa el síntoma (efecto local) por el cual se observa la falla, como por ejemplo, agrietamientos, aberturas, fatiga de los componentes mecánicos, etcétera.
- *Causa*. Dividiéndose en dos tipos: intrínseca (debido a debilidades en el objeto y/o desgaste) o extrínseco (debido a errores, mal uso o mal manejo durante el diseño, producción o uso).
- *Efecto*. Refiriéndose a las consecuencias producidas por la falla. Una clasificación habitual es: no relevante, parcial, completo y crítico. Dado que una falla también puede causar fallas adicionales, es importante distinguir entre falla primaria y secundaria.
- *Mecanismo*. Es el proceso físico, químico o de otro tipo que resulta en una falla.

#### 3.2.2. Lesiones comunes en muros de mampostería

Acorde a Broto (2005), una patología constructiva se puede definir como “cualquier problema constructivo de una edificación que se presenta posterior a su ejecución”. Por otra parte, este mismo autor define una lesión como: “Cada una de las manifestaciones de un problema constructivo, es decir, el síntoma final del proceso patológico”.

### 3.2.2.1. Generales

Las lesiones en la mampostería, según su origen, se pueden clasificar en tres categorías (Carrió & Ramos, 2001):

- *Lesiones físicas.* Que incluyen todas las lesiones producto de un proceso patológico derivado de algún fenómeno físico del ambiente (como la presencia de lluvia, calor, nieve, etc.), solamente afectando el aspecto exterior. En la mampostería, las más importantes de esta categoría incluyen:
  - *Humedades.* Producidas cuando hay una presencia de agua en un porcentaje mayor al considerado como normal, ya sea producto de filtración, condensación, capilaridad del suelo, entre otras.
  - *Suciedad.* Se da cuando existe un depósito de partículas en suspensión sobre una superficie (en este caso, la del muro), ya sea por depósito o lavado diferencial.
  - *Erosión física.* Es la pérdida o transformación superficial del muro, inducido principalmente por meteorización.
- *Lesiones químicas.* Que incluyen todas las lesiones producto de un proceso patológico derivado de algún fenómeno químico del ambiente (como la presencia de sales, ácidos o álcalis), solamente afectando el aspecto exterior. En la mampostería, las más importantes de esta categoría incluyen:
  - *Eflorescencias.* Que se caracteriza por la cristalización de sales en la superficie de la mampostería producto del arrastre al exterior de las sales solubles de los materiales constructivos por la evaporación del agua de una humedad previamente presente.
  - *Organismos.* La presencia de animales y plantas acelera el deterioro de la mampostería. Por ejemplo, algunas plantas, como líquenes, musgos o mohos pueden llegar a tener raíces que se introduzcan en los intersticios o llevar a cabo ataques químicos contra los materiales de los muros. Los animales, por otra parte, pueden agregar más peso a la mampostería al hacer nidos y atacar químicamente las superficies y acabados con sus excrementos.

- *Erosiones químicas.* Se caracterizan por llevar a cabo una reacción química entre los componentes de la superficie de la mampostería con otras sustancias, pudiendo producir decementación, costras, patiñas o alveolos.
  
- *Lesiones mecánicas.* Que incluyen todas las lesiones producto de un proceso patológico derivado de algún factor mecánico, generalmente independiente del material constitutivo, que provocan movimientos, desgaste, aberturas o separaciones de materiales o elementos constructivos. En la mampostería, las más importantes de esta categoría incluyen:
  - *Deformaciones.* Que incluyen a todas las lesiones que cambian la geometría inicial del elemento como consecuencia de las cargas aplicadas, sin llegar a romperlo, entre estas:
    - *Desplomes.* Que se dan cuando existe una pérdida de verticalidad del muro como consecuencia de una acción horizontal directa o una excentricidad de la carga vertical que actúa sobre este.
    - *Desniveles.* Es cualquier pérdida de horizontalidad los muros de una edificación, y pueden deberse a la presencia de asientos diferenciales. Una consecuencia directa de este fenómeno es la presencia de descuadres de aberturas presentes en los muros de mampostería.
    - *Giros.* Es un movimiento respecto de un punto o un eje de un elemento provocando su pérdida de nivel y de plomo, provocado por cedimento, asiento o aplastamiento en el muro.
    - *Alabeos.* Estos son desplomes presentes en los muros de mampostería más marcados en ciertos tramos respecto a otros.
    - *Pandeos.* Caracterizados por un abombamiento como consecuencia de una carga vertical excesiva que introduce un esfuerzo de flexión en el tramo central cuya sección no es capaz de soportar.
    - *Flechas.* Son la consecuencia directa de la flexión de elementos horizontales debida a un exceso de cargas verticales o transmitida desde otros elementos horizontales que se encuentran unidos por empotramiento.

- *Roturas.* Que incluyen a todas las lesiones que implican un destrozo del material, entre estas:

- *Agrietamientos.* Tratándose de aberturas longitudinales que afectan a todo el espesor del muro de mampostería. Algunos autores como Florentín & Granada (2009) consideran que además de la condición anterior, una grieta generalmente tiene un espesor de más de un milímetro. Se deben principalmente a excesos de carga o por dilataciones y contracciones higrotérmicas.
- *Fisuras.* Tratándose de aberturas longitudinales que sólo afectan a la superficie o acabado superpuesto de los muros de mampostería, y se consideran una etapa previa a la aparición de las grietas. Florentín & Granada (2009), además de considerar lo anterior, mencionan que una fisura generalmente tiene un espesor menor a un milímetro. Generalmente, son consecuencia del soporte cuando se somete a un movimiento que no puede resistir, o inherentes a la contracción o retracción del propio acabado del muro.
- *Desprendimientos.* Consisten en la falta de adherencia entre el acabado respecto al muro de mampostería, produciendo una pérdida de la masa superficial, y es el resultado de otras lesiones previas, como humedades, deformaciones o grietas.
- *Erosiones mecánicas.* Que se deben principalmente a golpes o rozaduras, y se caracterizan por producir una pérdida de material superficial.

#### 3.2.2.2. *Por asentamientos diferenciales*

Los principales defectos que provocan los agrietamientos en la mampostería estructural suelen estar relacionados con movimientos del terreno, como asentamientos de cimientos o eventos sísmicos. La naturaleza frágil y la baja resistencia a la tensión hacen que la mampostería, especialmente la no reforzada, sea muy propensa a agrietarse incluso con pequeños movimientos (CIB, 2014).

Un asiento se define como un “movimiento de descenso del plano de apoyo de la cimentación de un edificio debido a la deformación del suelo que se encuentra bajo este

plano y que soporta los esfuerzos producidos por el peso del edificio” (Carrió & Ramos, 2001).

Según el lugar de la cimentación donde se produzca el asiento excesivo se pueden distinguir entre asientos generales y asientos puntuales o diferenciales.

- *Asientos generales.* Los cuales se producen en todos los puntos de cimentación del edificio. Si la magnitud de los desplazamientos es la misma o muy uniforme para esta categoría de asientos, entonces se consideran de baja gravedad, ya que no podrán producir lesiones en sus elementos constructivos debido a que todo el edificio se desplaza en conjunto (salvo que la magnitud del asentamiento sea excesiva).
- *Asientos puntuales o diferenciales.* En estos, algunos puntos de la cimentación sufren desplazamientos de mayor magnitud que otros, provocando lesiones en elementos estructurales.

Los asentamientos diferenciales inducen esfuerzos adicionales sobre la estructura, pudiendo provocar fisuras o grietas al superarse la resistencia del material (Florentín & Granada, 2009), tal y como se muestra en la Figura 2.

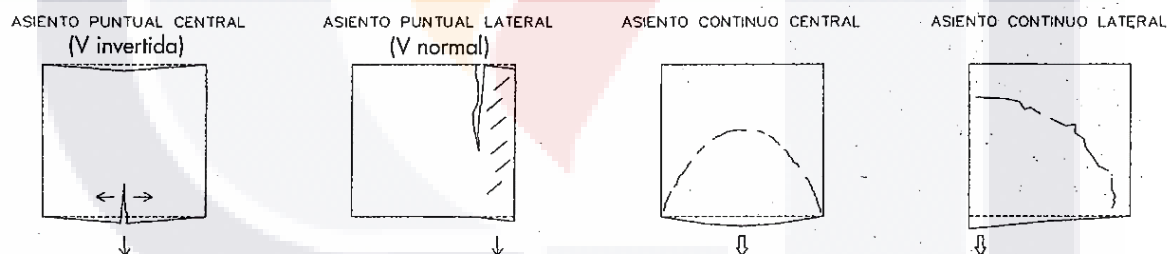


Figura 2. Grietas debidas a asientos. Adaptado de Carrió & Ramos (2001).

Otros síntomas característicos de los asentamientos diferenciales en muros de mampostería, además de las grietas y fisuras, también incluyen giros, desplomes, desniveles y flechas (Carrió & Ramos, 2001).

### 3.3. Comportamiento mecánico de muros de mampostería

#### 3.3.1. Modos de falla globales

Considerando el comportamiento observado en los muros de mampostería en general, el INIFED (2021) explica que “existe una jerarquía de modos de comportamiento que depende de la estructuración, las dimensiones de muros, las propiedades mecánicas de los materiales, la calidad de la construcción y mantenimiento, entre otros elementos”. Esto quiere decir que no hay un único modo en que un muro de mampostería pueda fallar o comportarse, sino que esto depende de una combinación de factores técnicos y prácticos. Por ejemplo, un muro bien construido con materiales de alta resistencia tendrá un mejor desempeño que uno mal ejecutado, incluso si tienen las mismas dimensiones.

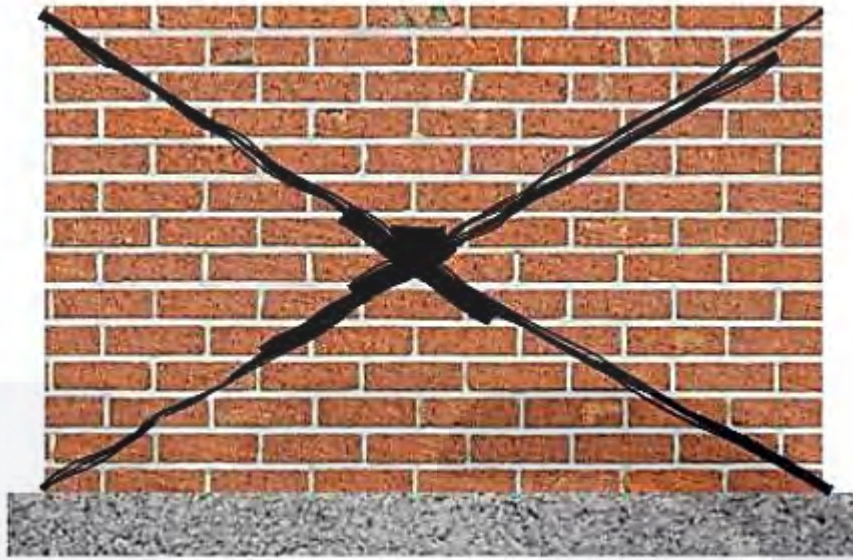
Los modos de falla más comunes que se pueden identificar en los muros de mampostería confinada, acorde a los diferentes modos de comportamiento presentes, se detallan a continuación.

##### 3.3.1.1. Tensión diagonal pura

La falla en muros de mampostería confinada sometidos a tensión diagonal pura se caracteriza por la formación de grietas inclinadas con ángulos que varían entre  $35^\circ$  y  $70^\circ$  respecto a la horizontal, que pasan a través de las piezas y el mortero. Estos agrietamientos, cuyo rango angular depende de factores como los esfuerzos normales aplicados y la geometría del elemento estructural, surgen como consecuencia directa de los esfuerzos de tensión diagonal generados por la acción de fuerzas cortantes (Gobierno de la Ciudad de México, 2023c; Ramírez, 2022).

Las lesiones producidas por este modo de falla se manifiestan mediante una o dos fisuras diagonales de considerable amplitud, acompañadas de compresión y desprendimiento superficial del material en la zona central del muro o segmento afectado. Constituye un modo de falla típico en edificaciones antiguas que carecen de confinamiento adecuado, o sujetas a deformaciones inducidas por asentamientos diferenciales. Generalmente no representan un peligro, salvo que sean exageradas (INIFED, 2021; Soto, 2008).





*Figura 3. Representación gráfica del modo de falla por tensión diagonal pura. Adaptado de Ramírez (2022).*

### **3.3.1.2. Compresión**

Como señala Soto (2008), este tipo de fallo estructural se manifiesta a través de fisuras verticales que atraviesan las piezas de mampostería. El origen de este patrón de agrietamiento radica en un comportamiento mecánico específico: inicialmente se generan deformaciones verticales excesivas, las cuales posteriormente experimentan un incremento progresivo debido a las deformaciones presentes en las juntas de mortero.

Las causas más comunes de este tipo de agrietamientos son las siguientes (Borah et al., 2023; Soto, 2008):

- Presencia de cargas verticales excesivas actuando en el muro
- Uso de muros de mampostería con baja resistencia a la compresión
- La unión de muros debido a cambios de temperatura
- El fraguado desigual de los diversos materiales
- Por existencia de tuberías o elementos de diversas instalaciones embutidas dentro de los muros, las cuales requirieron la ranuración de los mismos

Este modo de fallo es relativamente fácil de encontrar en estructuras ya existentes, presentándose principalmente en las líneas de unión entre el castillo de concreto reforzado

y la mampostería. En algunos casos, las fisuras originadas por la compresión pueden comprometer la estabilidad de los muros y a producir un fallo en los mismos.

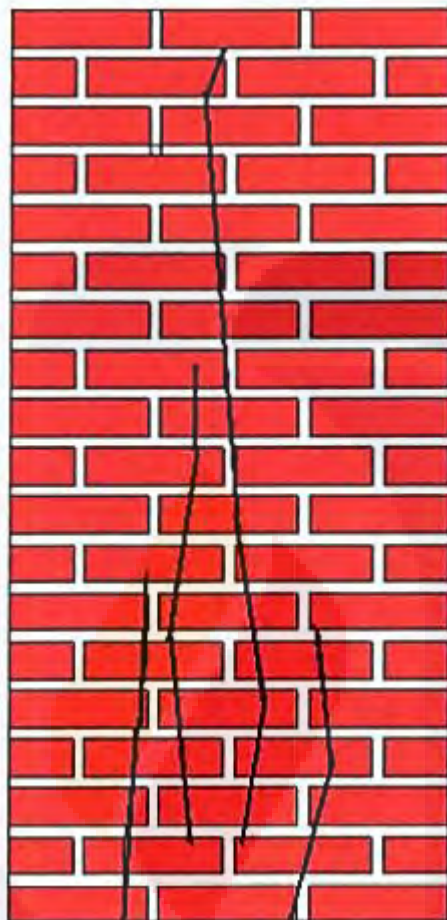


Figura 4. Representación gráfica del modo de falla por compresión. Adaptado de Soto (2008).

### 3.3.2. Respuesta ante carga monotónica en muros de mampostería confinada

La subsidencia, al inducir deformaciones y distorsiones angulares en la mampostería, induce a agrietamientos en el plano del muro. El comportamiento ante carga lateral se puede dividir en cuatro etapas (Figura 5), las cuales se describen a continuación (SMIE, 2008):

- a) *Comportamiento elástico.* A niveles pequeños de desplazamiento y esfuerzo, caracterizados por la ausencia de agrietamiento diagonal, la mampostería exhibe un comportamiento prácticamente elástico.

- b) *Degradación de rigidez.* Después de que se presenta agrietamiento diagonal, los muros de mampostería exhiben una pendiente post-elástica positiva (aunque mucho menor que la que exhibían en su rango elástico de comportamiento), lo que les permite alcanzar una resistencia máxima que es considerablemente mayor a la correspondiente al primer agrietamiento.
- c) *Degradación de rigidez y de resistencia.* Una vez que alcanza su resistencia máxima, la mampostería exhibe una pendiente negativa asociada a una pérdida de resistencia que evoluciona hasta la falla del muro.
- d) *Falla del muro.* En esta etapa, el muro de mampostería ya pierde completamente su capacidad a cortante.

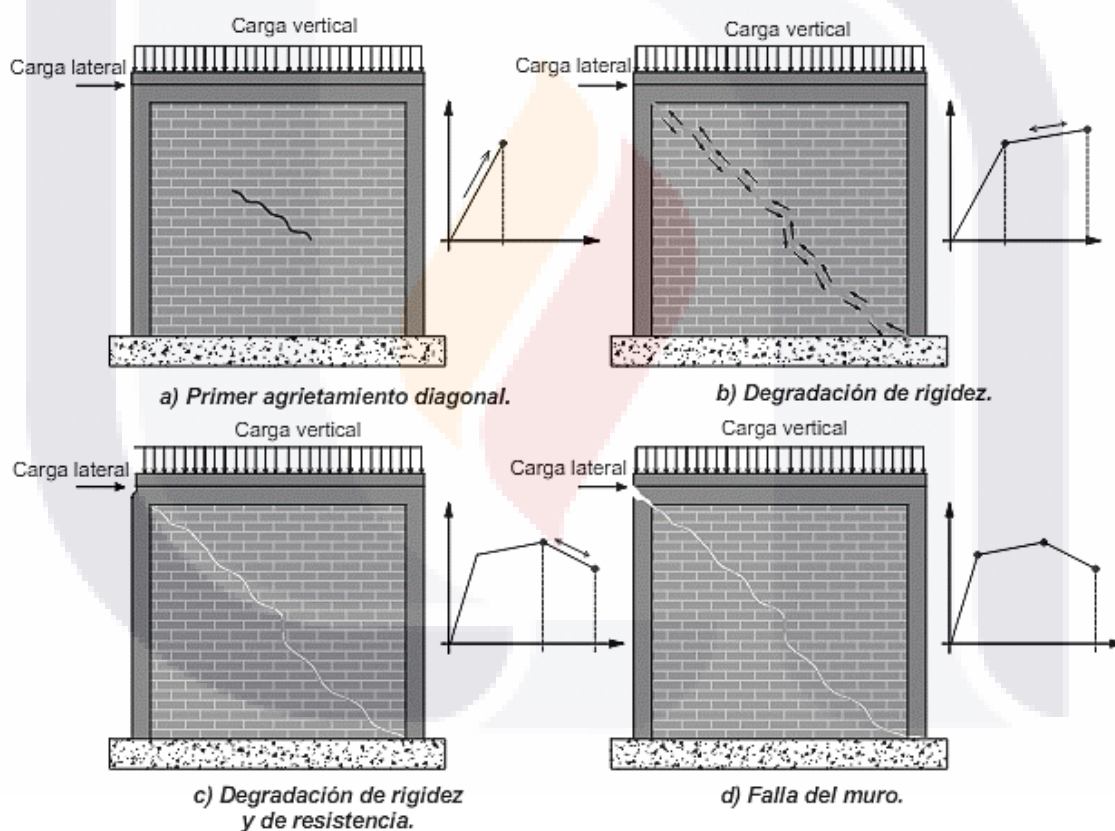


Figura 5. Evolución del daño estructural en muros de mampostería confinada. Adaptado de SMIE (2008).

Para caracterizar la envolvente del ciclo histerético en donde se producen estas cuatro etapas, Flores (1995) ha propuesto el siguiente modelo de curva trilineal para muros de

mampostería confinada hechos de piezas macizas de barro recocido (donde se grafican la distorsión de entrepiso de la mampostería contra el cortante existente a la misma).

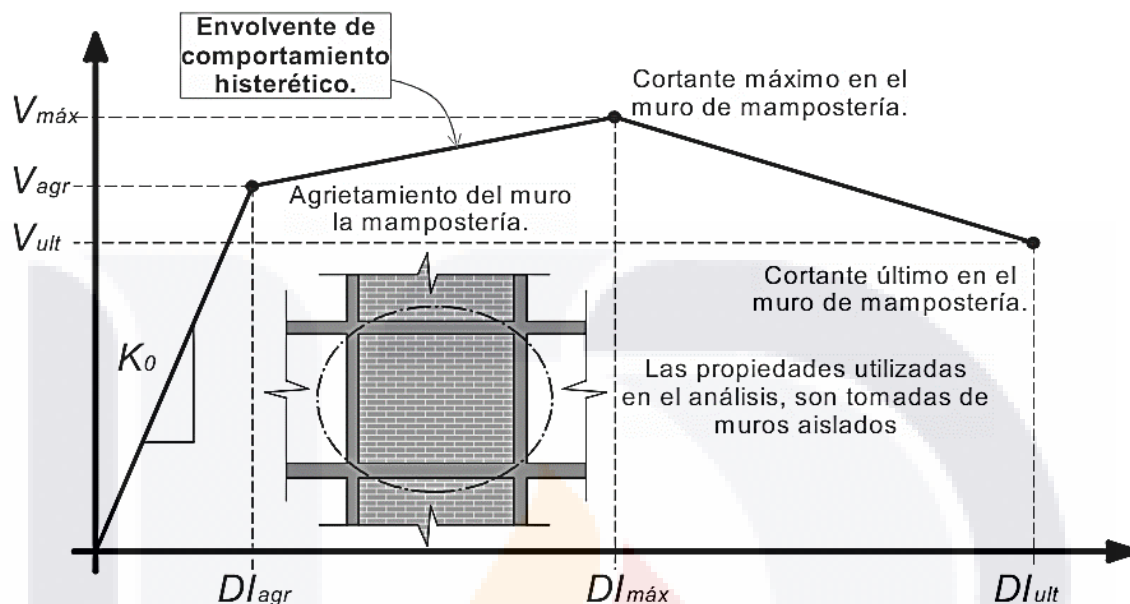


Figura 6. Envolvente para mampostería confinada según Flores (1995). Adaptado de SMIE (2008).

Acorde al modelo anteriormente mostrado, el cálculo de los 6 parámetros anteriores se determina a partir de las fórmulas de la Tabla 1.

Mampostería confinada sin refuerzo horizontal		Mampostería confinada con refuerzo horizontal	
$V_{agr} = V_{RDF}$	$DI_{agr} = \frac{V_{agr}}{K_o H}$	$V_{agr} = V_{RDF}$	$DI_{agr} = \frac{V_{agr}}{K_o H}$
$V_{max} = 1.25V_{agr}$	$DI_{max} = 0.003$	$V_{max} = 1.50V_{agr}$	$DI_{max} = 0.006$
$V_{ult} = 0.80V_{agr}$	$DI_{ult} = 0.005$	$V_{ult} = 1.10V_{agr}$	$DI_{ult} = 0.010$

Tabla 1. Parámetros empleados en el modelo de Flores (1995). Adaptado de SMIE (2008).

Donde:

$V_{agr}$  = Cortante de agrietamiento diagonal de la mampostería

$V_{\max}$  = Cortante máximo en el muro de mampostería

$V_{\text{ult}}$  = Cortante último en el muro de mampostería

$V_{\text{RDF}}$  = Cortante de diseño propuesto por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Mampostería del 2004 (NTCM-2004) del reglamento de construcciones del Distrito Federal, la cual a su vez se calcula con la ecuación (1).

$$V_{\text{RDF}} = F_R (0.5v'_m A_T + 0.3P) \leq 1.5F_R v'_m A_T \quad (1)$$

$F_R$  = Factor de resistencia (en muros sujetos a carga axial, adquiere valor de 0.60 para muros confinados o reforzados interiormente, y 0.30 para muros no confinados ni reforzados interiormente)

$v'_m$  = Resistencia de diseño a compresión diagonal de muretes, sobre área bruta medida a lo largo de la diagonal paralela a la carga, en MPa

$A_T$  = Área bruta de la sección transversal del muro o segmento de muro, que incluye a los castillos, en mm<sup>2</sup>

$P$  = Carga axial total que obra sobre el muro, sin multiplicar por el factor de carga, en N

$DI_{\text{agr}}$  = Distorsión de agrietamiento diagonal de la mampostería

$DI_{\text{max}}$  = Distorsión en el que se alcanza la resistencia máxima a cortante de la mampostería

$DI_{\text{ult}}$  = Distorsión en el que se alcanza el cortante último en la mampostería

$H$  = Altura de entrepiso

$K_o$  = Rigidez elástica obtenida a partir de métodos tradicionales de mecánica de materiales.



### 3.4. Predicción del nivel de daño en estructuras de mampostería mediante el uso del ángulo de distorsión por subsidencia

#### 3.4.1. Definición

Una de los parámetros que correlacionan el daño, y por ende la vulnerabilidad, de la infraestructura civil y la subsidencia diferencial es el ángulo de distorsión angular del terreno producto del gradiente de subsidencia existente en un determinado lugar (Fernández-Torres et al., 2020).

El gradiente de subsidencia se obtiene a partir de los mapas de subsidencia de una zona concreta con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), y se define como la relación de la pendiente que guardan dos píxeles adyacentes a partir de sus valores de subsidencia (Arroyo-Domínguez et al., 2016). Normalmente los valores de gradiente de subsidencia se generan en las direcciones “X” y “Y” del plano de la zona de estudio.

El ángulo de distorsión angular es una magnitud que se deriva de los valores de gradiente de subsidencia, y es un parámetro que toma en consideración los vectores de gradiente de subsidencia en “X” y “Y” anteriormente mencionados en conjunto.

#### 3.4.2. Método de cálculo

La ecuación básica que permite calcular el gradiente de subsidencia entre dos puntos cualesquiera es la ecuación (2).

$$GS = \frac{\Delta_x}{\Delta_y} \quad (2)$$

Donde  $\Delta_x$  es la diferencia de subsidencia entre píxeles adyacentes y  $\Delta_y$  es la distancia de centro a centro en dos píxeles contiguos.

Uno de los métodos más comunes que existen para la creación de mapas de gradiente de subsidencia, es mediante el método basado en diferencias finitas de tercer orden desarrollado por Horn (1981), que a grandes rasgos consiste en realizar un pos procesamiento al mapa de subsidencia de una determinada región geoespacial a través de algún software que pueda integrar sistemas de información geográfica (SIG's), en el que el gradiente de cada píxel de dicho mapa se determina con base a los valores de subsidencia

de los 8 píxeles vecinos. Las ecuaciones que permiten calcular los gradientes de subsidencia y ángulo de distorsión angular con este método se obtienen a partir de las ecuaciones mostradas en la Figura 7.

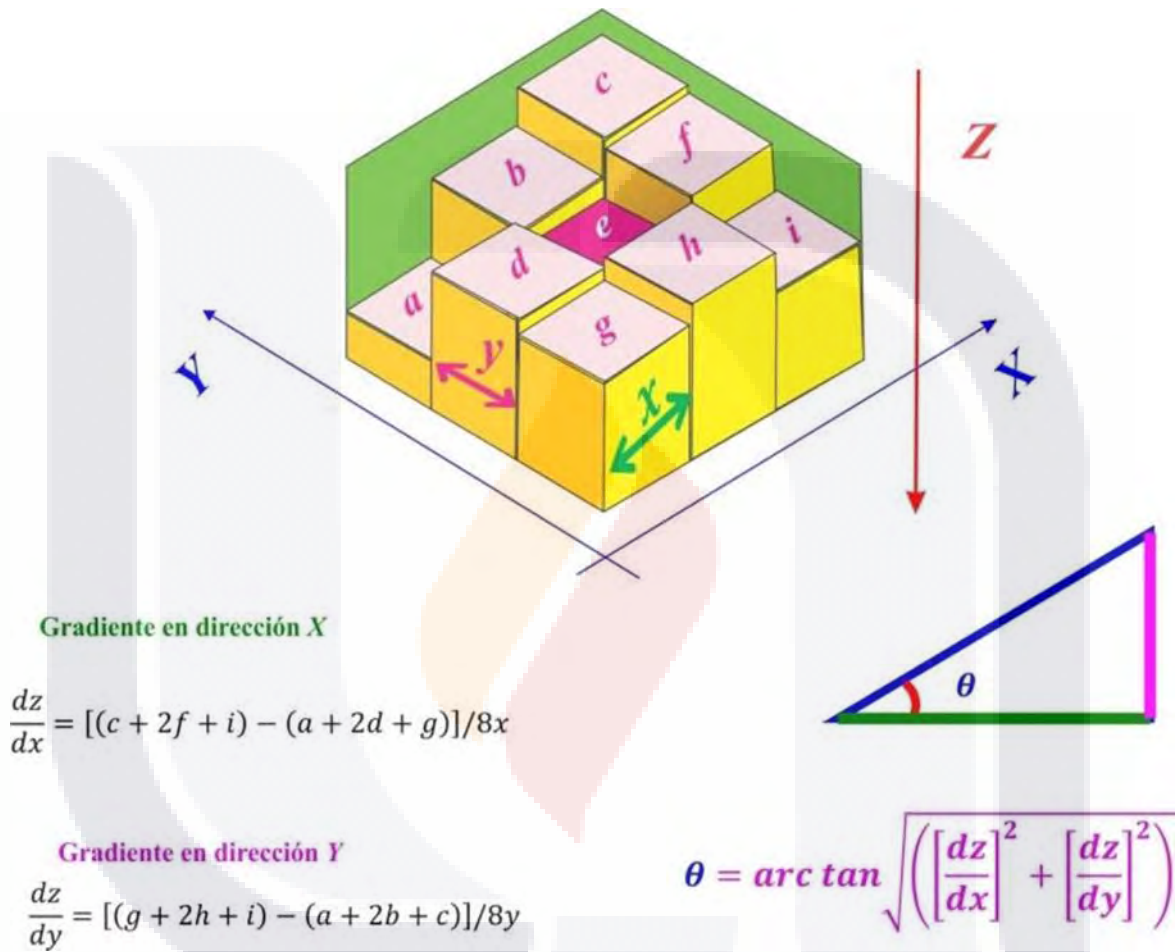


Figura 7. Fórmulas para calcular el gradiente de subsidencia en los sentidos "X" y "Y", y el ángulo de deformación del terreno, a partir del método de Horn (1981). Adaptado de Arroyo-Domínguez et al. (2016).

### 3.4.3. Criterios establecidos para el límite de distorsión angular en edificaciones para evitar daños por subsidencia

Un criterio comúnmente empleado es el desarrollado por Skempton & Macdonald (1956), estableciendo que el límite de distorsión angular seguro para edificios es de 1/500. Mencionan, además, que el agrietamiento se espera que comience para distorsiones



angulares de 1/300, y que se produzcan daños considerables en muros en distorsiones a partir de 1/50.

Otra recomendación ampliamente extendida es la propuesta por Bjerrum (1963), donde especifica que la distorsión angular de 1/150 es el límite seguro para estructuras de acero y de concreto, de 1/300 para estructuras de mampostería y de 1/500 es el límite para construcciones en que no se admite agrietamiento de ningún tipo.

Por último, se puede mencionar la sugerencia de Zhang & Ng (2007), dictaminando que para cimentaciones desplantadas sobre suelos arenosos el rango de distorsión angular límite seguro podría encontrarse entre 1/500 a 7/2000; mientras que para cimentaciones desplantadas sobre suelos arcillosos, entre 23/10000 a 67/10000.

En cualquier caso, se puede observar que las tres referencias anteriores coinciden en que una estructura con una distorsión angular por debajo de 1/500 no sufrirá daños por subsidencia.

El daño y deterioro de las propiedades estructurales de muros de mampostería en cargas laterales cíclicas reversibles de tipo sísmico, acorde a Ruiz et al. (1998), se detallan en la Tabla 2.

Estado de daño observado	Distorsión	Grado de daño
Fisuras horizontales por flexión. Fisuras verticales por flexión cercanas al paño de los castillos.	1/2500	Ligero (I)
Primer agrietamiento por tensión diagonal de la mampostería.	13/10000	Moderado (II y III)
Inicio de la penetración del fisuramiento inclinado en los extremos de los castillos.	1/500	Fuerte (IV)
Agrietamiento en forma de "X" en todos los paneles de mampostería.	23/10000	Fuerte (IV)
Aplastamiento del concreto, agrietamiento horizontal distribuido en la altura de los castillos.	2/625	Fuerte (V)
Concentración de grietas diagonales en los extremos de los castillos. Desconchamiento del recubrimiento del concreto.	21/5000	Grave (V)

Concentración del daño en los extremos inferiores de los castillos. Plegamiento del refuerzo longitudinal (Deformación en "S").	1/200	Grave (no se clasifica)
---	-------	-------------------------

Tabla 2. Daño y deterioro de las propiedades estructurales en muros de mampostería confinada acorde a Ruiz et al. (1998). Adaptado de SMIE (2008)

En muros de mampostería confinada ensayados con carga lateral en una dirección, la distorsión angular requerida para la aparición de la primera grieta diagonal en la zona central del muro varían de aproximadamente de 1/1000 a 3/1000, llegando a tener una distorsión máxima entre aproximadamente 3/1000 a 73/5000 para alcanzar la carga máxima en estos muros (Meli & Salgado, 1969).

En cuanto a los valores específicos de distorsión angular límite para llegar a diferentes estados límite en los muros de mampostería, Astroza & Schmidt (2004), consideran para efectos prácticos los mencionados en la Tabla 3 (considerando una fracción defectuosa del 20%).

Estado límite	Distorsión
Servicio (ELS)	1/2000
Operacional (ELO)	1/1000
Daño Controlado (ELDC)	17/10000
Resistencia (ELR)	11/5000
Último (ELU)	11/2500

Tabla 3. Estados límite para muros de mampostería confinada acorde a Astroza & Schmidt (2004). Adaptado de SMIE (2008)

### 3.5. Estado actual de la estructura sometida a subsidencia desde el punto de vista estructural (revisión de daños)

Para comprender plenamente la confiabilidad estructural de construcciones de mampostería confinada sometidas a subsidencia, es imprescindible realizar una evaluación exhaustiva del estado actual de la estructura bajo estudio. Este análisis debe abarcar tanto los aspectos teóricos como las condiciones físicas reales presentes en la edificación.

La subsidencia, definida como el hundimiento gradual de la superficie de la Tierra provocada por varios factores (Corapcioglu, 1984), puede inducir una variedad de patologías constructivas en las estructuras. La identificación y evaluación de estas

patologías es esencial para formular un diagnóstico preciso y desarrollar estrategias de mitigación adecuadas.

Para complementar la revisión teórica, es necesaria una inspección física presencial de la estructura. Esta inspección debe enfocarse en:

1. *Identificación de patologías constructivas.* Mediante el registro detallado de las grietas, fisuras, asentamientos y cualquier otro signo visible de daño o deterioro.
2. *Medición y documentación.* A través de la utilización de herramientas y técnicas adecuadas para medir la magnitud y extensión de las patologías observadas. Esto puede incluir fotogrametría, escaneo láser, y ensayos no destructivos.
3. *Evaluación de la severidad.* En la que se lleva a cabo el análisis de la severidad de las patologías identificadas, considerando su impacto potencial en la estabilidad y seguridad de la estructura.
4. *Contexto histórico y ambiental.* Donde se deben considerar de factores históricos y ambientales que puedan haber contribuido a la subsidencia y las patologías resultantes, como la naturaleza del suelo, cambios en el nivel freático, y actividades humanas.

Esta inspección presencial permitirá validar y complementar los modelos teóricos desarrollados, proporcionando una base sólida para la evaluación de la confiabilidad estructural de la construcción de mampostería confinada. Además, facilita la formulación de recomendaciones prácticas para la intervención y el refuerzo de las estructuras afectadas.

La integración de la revisión física con el análisis teórico asegura un enfoque integral y riguroso en la evaluación de las estructuras sometidas a subsidencia, contribuyendo al desarrollo de soluciones efectivas y duraderas.

### 3.6. Teoría de errores en levantamientos topográficos

La medición se define como “el proceso mediante el cual se asigna un número a una propiedad (o cualidad) física de cualquier objeto (o conjunto de objetos) con propósitos de comparación” (Medina, 2017).

Llevar a cabo mediciones y realizar los cálculos y análisis correspondientes son actividades esenciales en el trabajo de los topógrafos. Para obtener mediciones precisas, es necesario

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

contar tanto con habilidades técnicas como con el equipo adecuado, y aplicar ambos con criterio. No obstante, sin importar el nivel de precisión con el que se realicen, ninguna medición es completamente exacta y siempre presentará cierto margen de error. Los especialistas en geomática (topógrafos), cuyo desempeño debe cumplir con altos estándares de calidad, deben conocer los distintos tipos de errores, sus causas, las magnitudes que pueden alcanzar en diversas condiciones y la manera en que se propagan. Solo con este conocimiento podrán elegir los instrumentos y métodos más adecuados para minimizar dichos errores dentro de un rango aceptable.

Acorde a INEGI (2002), se puede establecer incondicionalmente que:

1. Ninguna medida es exacta
2. Toda medida contiene errores
3. Nunca se puede conocer el valor verdadero de una medición
4. El error exacto que hay en una medida siempre será desconocido

Asimismo, define los cinco tipos de medición básica en topografía, los cuales mediciones de:

1. Distancias horizontales
2. Distancias verticales
3. Distancias inclinadas
4. Ángulos horizontales
5. Ángulos verticales

El principal objetivo de la teoría de errores, entonces, es garantizar que las mediciones realizadas sean lo más precisas y confiables posible. Esto implica desarrollar métodos para detectar, reducir y cuantificar los errores, permitiendo tomar decisiones informadas en función de la incertidumbre asociada a los datos.

#### **3.6.1. Tipos de mediciones**

En topografía, existen dos tipos de mediciones que efectúan en los levantamientos topográficos: las mediciones directas e indirectas (INEGI, 2002; Medina, 2017; Wolf & Ghilani, 2016).

- Las *mediciones directas* son aquellas en las que el valor de la magnitud se obtiene de manera inmediata con un instrumento de medición, sin necesidad de realizar cálculos adicionales. En este caso, el aparato utilizado proporciona el resultado directamente.
- Por otra parte, las *mediciones indirectas* ocurren cuando el valor de la magnitud no se obtiene directamente del instrumento, sino a través de cálculos basados en otras mediciones directas. Es decir, se mide una o varias cantidades relacionadas y se aplica una ecuación o modelo matemático para obtener el resultado deseado.

### **3.6.2. Tipos y causas de errores en mediciones topográficas**

Acorde a Montes (1989), existen dos tipos de errores que se pueden cometer durante los levantamientos topográficos: sistemáticos y accidentales.

- Los primeros, también llamados “*errores acumulativos*” o “*sesgos*”, se caracterizan por mantenerse constantes cuando las condiciones del trabajo sean fijas. Las condiciones de trabajo incluyen las condiciones del medio ambiente, los instrumentos y al observador.
- Los segundos, también llamados “*errores aleatorios*”, se refieren a los relacionados a factores azarosos fuera del control del observador.

Por otra parte, las causas que provocan los errores en los levantamientos topográficos son tres: naturales, instrumentales y personales (INEGI, 2002; Wolf & Ghilani, 2016).

- Los *errores naturales* se deben a las condiciones externas como oscilaciones térmicas, variaciones en la humedad relativa, fluctuaciones de presión, perturbaciones eólicas, desviaciones magnéticas y fenómenos de refracción lumínica influyen en los resultados.
- Los *errores instrumentales* surgen de defectos en la fabricación o calibración de los equipos, incluyendo componentes desalineados o elementos graduados con marcas imprecisas.
- Los *errores personales* son derivados de las limitaciones en la capacidad sensorial de los operadores, particularmente en percepción visual y coordinación motriz.

### 3.7. Determinación del índice de confiabilidad

#### 3.7.1. Fallas y estados límite

Una falla, en el contexto de la confiabilidad estructural, se define como el resultado producido en una estructura cuando no se desempeña con la función para la cual fue diseñada. En el contexto de la confiabilidad estructural, se emplean los conceptos de estados límite para referirse a los estados de falla a los que podría estar sujeta una determinada estructura y establecer los comportamientos deseados y no deseados en la misma (Nowak & Collins, 2000).

Los dos estados límites principales que se estudian dentro de la confiabilidad estructural son, acorde a Gómez Soberón (2017):

- *Estado Límite Último (ELU)*. Este se asocia con la falla o el colapso parcial o total de la estructura, donde se pierde por completo su capacidad para resistir las cargas aplicadas. Dicha situación puede desencadenarse al superarse la resistencia a la flexión, formándose articulaciones plásticas; por una falla cortante; debido a problemas de inestabilidad; o por la fragmentación del concreto, entre otras causas.
- *Estado Límite de Servicio (ELS)*. Este estado se vincula con el cumplimiento de condiciones funcionales durante el uso de la estructura, afectando aspectos como la durabilidad, el confort de los ocupantes o los gastos de mantenimiento. Por lo general, estos problemas no comprometen la estabilidad global de la construcción. Ejemplos de ello incluyen deformaciones excesivas en losas, la formación de grietas, o vibraciones perceptibles en la superestructura de los puentes.

#### 3.7.2. Definición de la probabilidad de falla

Matemáticamente, en un problema de confiabilidad básico, la probabilidad de falla de un elemento estructural puede expresarse mediante cualquiera de las ecuaciones (3) a (6) (Melchers & Beck, 2018).

$$p_f = P(R \leq Q) \quad (3)$$

$$p_f = P(R - Q \leq 0) \quad (4)$$



$$p_f = P\left(\frac{R}{Q} \leq 1\right) \quad (5)$$

$$p_f = P(\ln R - \ln Q \leq 1) \quad (6)$$

O en forma general, como se muestra en la ecuación (7).

$$p_f = P(g(R, Q) \leq 0) \quad (7)$$

En la cual:

$$g(R, Q) = R - Q \quad (8)$$

Donde “ $p_f$ ” representa la probabilidad de falla, “ $R$ ” es la resistencia (capacidad), “ $Q$ ” representa los efectos de carga actuantes (demanda) y “ $g()$ ” es la función de estado límite que representa la frontera entre la seguridad e inseguridad en dicho elemento.

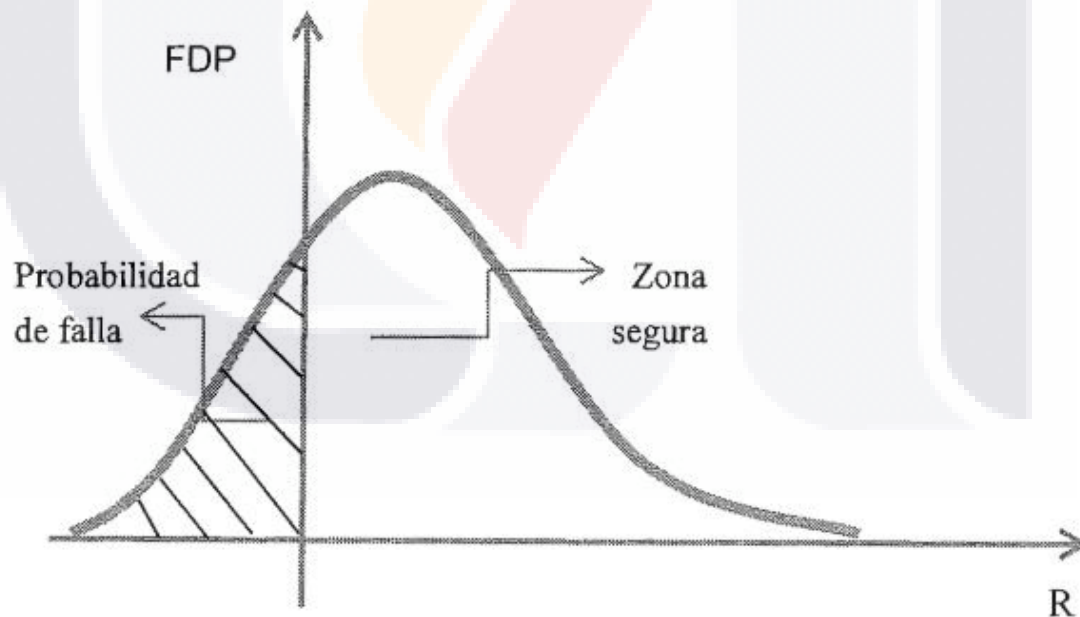


Figura 8. Esquematización de la probabilidad de falla. Adaptado de Gómez Soberón (2017)

Las anteriores ecuaciones parten de la idea de que la falla estructural se produce cuando la resistencia del elemento analizado es inferior a las cargas a las cuales está sometido. Como se estudia la falla en términos probabilísticos, entonces simplemente las variables de resistencia y carga se modelan a través de sus funciones de densidad de probabilidad correspondientes, en lugar de modelarse en términos determinísticos. Se considera entonces que la resistencia y carga de un elemento estructural son variables aleatorias.

Para un cierto dominio D, donde R puede tomar un valor entre r y  $r + \Delta r$ , y Q puede tomar un valor entre q y  $q + \Delta q$ , la probabilidad de falla se define mediante la ecuación (9).

$$p_f = P(R - Q \leq 0) = \iint_D f_{RQ}(r, q) dr dq \quad (9)$$

Donde “ $f_{RQ}(r, q)$ ” es la función de densidad conjunta de las variables R y Q. Si estas variables son independientes, entonces se cumple la expresión de la ecuación (10), donde “ $f_R(r)$ ” y “ $f_Q(q)$ ” son las funciones de densidad de R y Q, respectivamente:

$$p_f = P(R - Q \leq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{q \geq r} f_R(r) f_Q(q) dr dq = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x) F_Q(x) dx \quad (10)$$

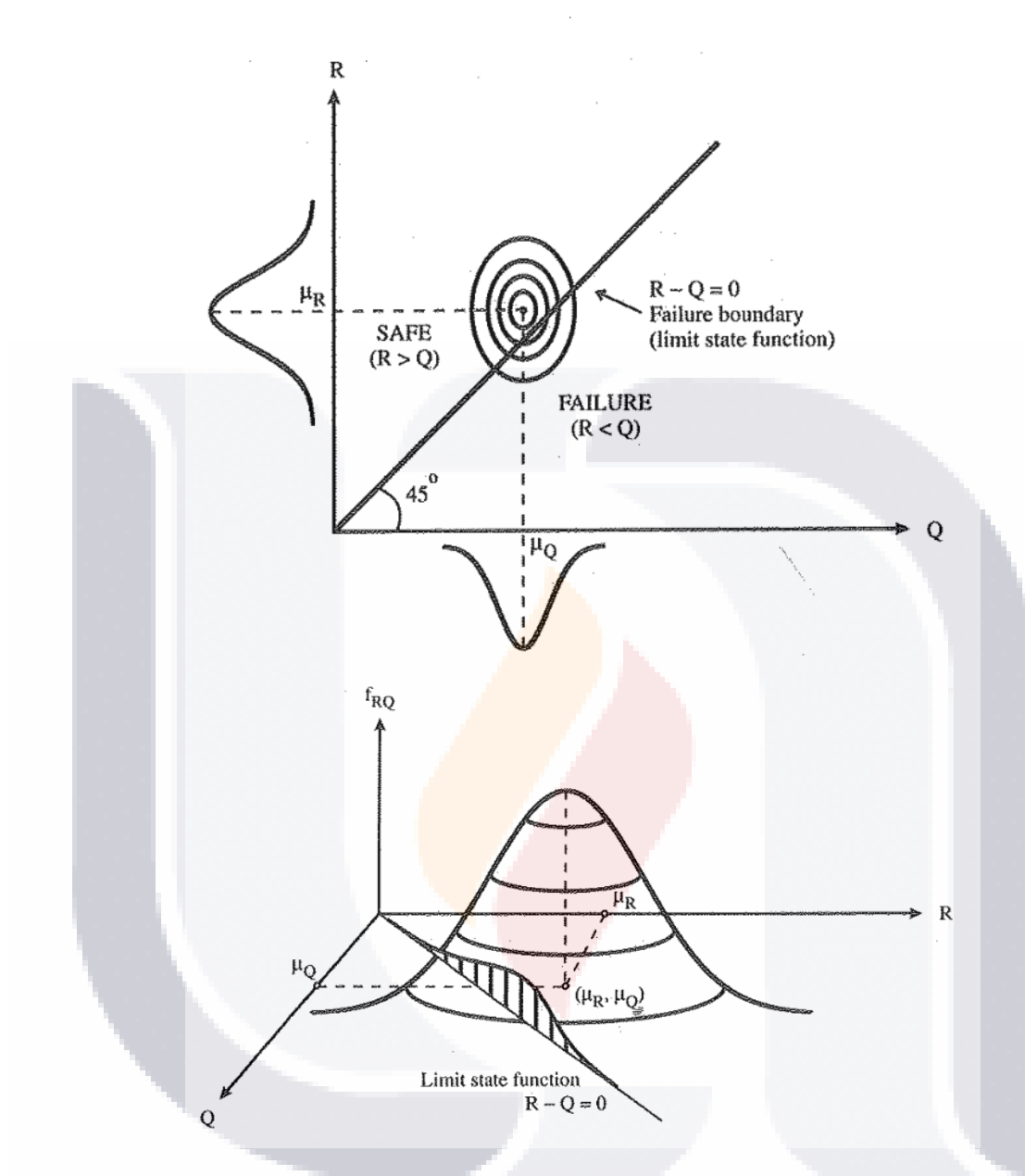


Figura 9. Dominio seguro y dominio de falla en un estado espacial en dos dimensiones (imagen superior) y representación tridimensional de la función de probabilidad conjunta  $f_{RQ}$  (imagen inferior). Adaptado de Nowak & Collins (2000).

### 3.7.3. Variables reducidas

Para el análisis por confiabilidad estructural es conveniente emplear la forma estandarizada de las variables de demanda y resistencia en un elemento estructural, las cuales quedan expresadas mediante las ecuaciones (11) y (12) (Nowak & Collins, 2000).

$$Z_R = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \rightarrow R = \mu_R + Z_R \sigma_R \quad (11)$$

$$Z_Q = \frac{Q - \mu_Q}{\sigma_Q} \rightarrow Q = \mu_Q + Z_Q \sigma_Q \quad (12)$$

A los términos “ $Z_R$ ” y “ $Z_Q$ ” se les llaman a veces variables estandarizadas. Si se sustituyen las expresiones anteriormente obtenidas en la función de estado límite  $g(R, Q) = R - Q$ , entonces la expresión de la función de estado límite en términos de las *variables estandarizadas* se puede expresar como se muestra en la ecuación (13).

$$g(Z_R, Z_Q) = \mu_R + Z_R \sigma_R - \mu_Q - Z_Q \sigma_Q = (\mu_R - \mu_Q) + Z_R \sigma_R - Z_Q \sigma_Q \quad (13)$$

#### 3.7.4. Definición del índice de confiabilidad

El índice de confiabilidad “ $\beta$ ” se define como:

La menor distancia que existe desde el origen del espacio de variables reducidas hasta la línea  $g(Z_R, Z_Q) = 0$  (...), siendo una magnitud adimensional que indica cuan “grande” es la zona insegura del problema de análisis. Un valor del índice de confiabilidad grande indica una distancia grande en el espacio de variables reducidas, menor área no deseable y, por tanto, menor probabilidad de falla. (Gómez Soberón, 2017).

La manera general para calcularlo es mediante el uso de la ecuación (14).

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (14)$$

Donde “ $\beta$ ” es el inverso del coeficiente de variación de la función  $g(R, Q) = R - Q$  cuando “ $R$ ” y “ $Q$ ” no tienen correlación alguna, “ $\mu_R$ ” y “ $\sigma_R^2$ ” son la media y varianza de “ $R$ ”, y “ $\mu_Q$ ” y “ $\sigma_Q^2$ ”, de “ $Q$ ”. Cuando “ $R$ ” y “ $Q$ ” se rigen bajo distribuciones normales y son independientes

entre sí, existe una relación entre el índice de confiabilidad y la probabilidad de falla, tal y como se detalla en la ecuación (15) (Nowak & Collins, 2000).

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f) \leftrightarrow p_f = \Phi^{-1}(-\beta) \quad (15)$$

Algunas probabilidades de falla asociadas a distintos índices de confiabilidad se detallan en la Tabla 4.

$p_f$	$\beta$
$10^{-1}$	1.28
$10^{-2}$	2.33
$10^{-3}$	3.09
$10^{-4}$	3.71
$10^{-5}$	4.26
$10^{-6}$	4.75
$10^{-7}$	5.19
$10^{-8}$	5.62
$10^{-9}$	5.99

Tabla 4. Índice de confiabilidad  $\beta$  y probabilidad de falla  $p_f$ . Adaptado de Nowak & Collins (2000)

Cuando las variables aleatorias de la ecuación de desempeño no siguen una distribución normal o están correlacionadas entre sí, la ecuación (15) no proporciona una relación exacta entre el parámetro  $\beta$  y la probabilidad de falla. Ante estas condiciones, dicha fórmula solo ofrece una estimación aproximada de dicha relación.

### 3.7.5. Determinación del índice de confiabilidad por métodos FORM

Los métodos de primer orden (FORM, por sus siglas en inglés: *First Order Reliability Method*) son técnicas ampliamente utilizadas en el análisis de la confiabilidad estructural, debido a su balance adecuado entre precisión y eficiencia computacional.

Los métodos FORM se basan en una aproximación de primer orden para linealizar la función de estado límite —que define la frontera entre las regiones de seguridad y falla— en un espacio transformado de variables independientes y normalizadas. Este proceso

implica identificar el punto más probable de falla (MPP, *Most Probable Point*), aquel que minimiza la distancia al origen en el espacio normal estándar, conocido como índice de confiabilidad  $\beta$ . La transformación de las variables originales a un dominio normal estándar permite simplificar el problema y abordar sistemas complejos con múltiples fuentes de incertidumbre.

Algunos métodos de primer orden se describirán a continuación.

### 3.7.5.1. Procedimiento exacto para estados límite en función lineal de variables aleatorias independientes con distribución normal

Sea una función de estado límite lineal de la forma expresada en la ecuación (16).

$$g(X_1, X_2, \dots, X_n) = a_0 + a_1X_1 + \dots + a_nX_n = a_0 + \sum_{i=1}^n a_iX_i \quad (16)$$

Donde los términos  $a_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ) son constantes y los términos  $X_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ) son variables aleatorias no correlacionadas. Si se aplica el procedimiento de Hasofer-Lind, el índice de confiabilidad  $\beta$  se puede calcular con la ecuación (17) (Nowak & Collins, 2000).

$$\beta = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i\mu_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i\sigma_{X_i})^2}} \quad (17)$$

Además, sustituyendo la ecuación (17) en la ecuación (15), se puede demostrar que:

$$p_f = \Phi(-\beta) = \Phi\left(-\frac{a_0 + \sum_{i=1}^n a_i\mu_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i\sigma_{X_i})^2}}\right) \quad (18)$$

Donde  $p_f$  es la probabilidad de alcanzar un determinado estado límite y  $\Phi$  es la distribución acumulada de la distribución normal estándar.

Si las variables son completamente independientes entre sí y sus distribuciones de probabilidad son normales, entonces el cómputo de este índice de confiabilidad es exacto,

en el sentido de que  $\beta$  y  $p_f$  están relacionadas. Este método resulta práctico de implementar, ya que computacionalmente es eficiente, siempre y cuando se satisfagan las condiciones anteriores.

### 3.7.5.2. Procedimiento de primer orden, segundo momento centrado en valores medios

En el caso de tener una ecuación de desempeño no lineal con variables aleatorias independientes, donde cada una de estas posee una distribución normal, una manera de aproximar el cómputo del índice de confiabilidad y probabilidad de falla es mediante una linealización de la ecuación de desempeño con base al método delta y los polinomios de la serie de Taylor de primer orden. Sea la ecuación no lineal  $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , una aproximación del índice de confiabilidad sería la mostrada en la ecuación (19).

$$\beta \approx \frac{g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_i^2}} \quad \text{donde } a_i = \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\text{Evaluado en valores medios}} \quad (19)$$

Además, sustituyendo la ecuación (19) en la ecuación (15), se puede demostrar que:

$$p_f \approx \Phi(-\beta) = \Phi\left(-\frac{g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_i^2}}\right) \quad (20)$$

donde  $a_i = \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\text{Evaluado en valores medios}}$

Si bien el procedimiento de primer orden, segundo momento centrado en valores medios es sencillo de usar en la práctica, es importante comentar que este método no es invariante, ya que los resultados que se consiguen son sensibles a la forma específica de la ecuación de estado límite (Nowak & Collins, 2000).

### 3.7.6. Confiabilidad en sistemas perfectamente dúctiles en paralelo

En secciones anteriores se ha mencionado el algoritmo para el cálculo de la confiabilidad de elementos estructurales individuales aislados. Cuando se requiere analizar la probabilidad de falla global de las estructuras, en la que intervienen un gran número de



elementos con diferentes confiabilidades, a menudo conviene clasificarlas dependiendo del tipo de comportamiento del sistema y de los tipos de componentes estructurales.

Un caso ideal de clasificación es el sistema en paralelo, el cual supone que el sistema alcanza el estado límite cuando todos los elementos alcanzan el estado límite a la vez. Un subcaso dentro de la clasificación de los sistemas en paralelo se da cuando los componentes estructurales son dúctiles. En este, una vez que cualquier elemento del sistema alcanza el estado límite, adquiere el estado de fluencia y puede mantener su capacidad de carga al sobrepasar dicho estado límite (Nowak & Collins, 2000).

Si es que existe correlación positiva entre los  $n$  elementos estructurales del sistema, entonces se pueden determinar los límites dentro de los cuales se encuentra la probabilidad de falla del sistema considerando los casos extremos de elementos independientes y elementos totalmente dependientes entre sí como límites inferior y superior, respectivamente. Según el criterio de Nowak & Collins (2000), la probabilidad de falla del sistema se encuentra dentro del intervalo establecido en la ecuación (21).

$$\prod_{i=1}^n p_{f_i} \leq p_{f_{sistema}} \leq \min(p_{f_1}, p_{f_2}, \dots, p_{f_n}) \quad (21)$$

### 3.7.7. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es un método utilizado para evaluar cómo las variaciones en los parámetros de entrada (como propiedades materiales, cargas, dimensiones geométricas o condiciones ambientales) influyen en la probabilidad de falla o en los índices de confiabilidad de una estructura. Su objetivo principal es identificar y cuantificar la importancia relativa de cada variable en el desempeño seguro de la estructura ante incertidumbres.

Los análisis de sensibilidad permiten, entre otras cosas (Saltelli et al., 2004, 2008):

- *Evaluar la importancia relativa de los factores de entrada.* El análisis de sensibilidad permite determinar qué factores de entrada tienen mayor influencia en la incertidumbre o variación de la salida de un modelo. Esto ayuda a identificar los factores críticos que requieren mayor atención y recursos.
- *Simplificar modelos.* El análisis de sensibilidad ayuda a identificar factores no influyentes que pueden ser fijados en un valor determinado sin afectar significativamente la salida del modelo. Esto puede conducir a modelos más simples y parsimoniosos.
- *Priorizar la investigación.* Al identificar los factores más influyentes, el análisis de sensibilidad permite priorizar la investigación y la recopilación de datos en áreas donde la incertidumbre tiene un mayor impacto en la salida del modelo. Esto puede ayudar a optimizar el uso de recursos y a enfocar los esfuerzos en las áreas más relevantes.
- *Verificar la robustez de los modelos.* El análisis de sensibilidad permite evaluar la robustez de las conclusiones obtenidas a partir de un modelo ante diferentes fuentes de incertidumbre. Esto ayuda a identificar posibles debilidades o fragilidades en el modelo y a mejorar su confiabilidad.
- *Corroborar hipótesis.* El análisis de sensibilidad permite corroborar o refutar hipótesis sobre las relaciones entre los factores de entrada y la salida de un modelo. Esto ayuda a comprender mejor los mecanismos subyacentes del sistema modelado.
- *Diagnóstico de modelos.* En la calibración de modelos, el análisis de sensibilidad puede ayudar a identificar qué parámetros influyen más en la bondad del ajuste del modelo a los datos observados. También ayuda a evaluar la capacidad de los

parámetros para ser determinados dados los datos, permitiendo reducir la dimensionalidad de los problemas de estimación.

- *Mapeo de factores (Factor Mapping)*. Permite identificar los factores responsables de producir resultados del modelo en regiones específicas de interés, por ejemplo, resultados aceptables o inaceptables. Este enfoque es útil en problemas de clasificación y diagnóstico.
- *Análisis de incertidumbre*. El análisis de sensibilidad y de incertidumbre idealmente deberían ejecutarse conjuntamente, con el análisis de incertidumbre precediendo la práctica actual, y en algunos casos, el análisis de sensibilidad se utiliza para descomponer la incertidumbre de la salida del modelo en diferentes fuentes de incertidumbre en la entrada.
- *Comunicación de resultados*. El análisis de sensibilidad contribuye a la transparencia en la comunicación de resultados científicos, ya que permite evaluar las suposiciones y los límites de un modelo. También mejora la defendibilidad de los modelos en el contexto de controversias científicas o técnicas.

Nowak & Carr (1985) proponen una clasificación de dos tipos fundamentales de incertidumbre que generan fallos estructurales: las fluctuaciones dentro de los estándares establecidos y las acciones que se apartan de dichos estándares, estas últimas atribuidas al factor humano.

La primera categoría, variaciones dentro de los parámetros aceptados, abarca:

- *Fenómenos naturales*. Eventos climáticos como vientos fuertes, sismos, acumulación de nieve o formación de hielo.
- *Riesgos antropogénicos*. Incendios, explosiones por fugas de gas, impactos vehiculares o situaciones derivadas de conflictos bélicos o ataques terroristas.
- *Discrepancias en materiales*. Diferencias en resistencia, dimensiones físicas o cargas operativas de los componentes.
- *Imprecisiones numéricas*. Errores asociados al redondeo en mediciones o cálculos.

La segunda categoría, vinculada a fallas humanas por desviarse de las normas, incluye causas como:

- Falta de conocimiento técnico.
- Imprudencia o descuido en la ejecución.
- Actos intencionales fraudulentos.

Los errores de esta categoría pueden materializarse mediante:

- Omisión de pasos críticos en procesos.
- Ubicación inadecuada de elementos estructurales.
- Interpretación errónea de planos o instrucciones.
- Comprensión equivocada de requerimientos técnicos.
- Errores numéricos en cálculos estructurales.

El procedimiento general para llevar a cabo un análisis de sensibilidad consiste en los siguientes pasos (Nowak & Collins, 2000):

1. Desarrollar un modelo estructural; identificando los parámetros y las funciones de estado límite.
2. Generar posibles escenarios de errores.
3. Calcular la confiabilidad de cada escenario.
4. Calcular la confiabilidad general (valor esperado).
5. Identificar los parámetros con mayor sensibilidad.

## CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología a emplear en esta tesis se resume en la Figura 10.

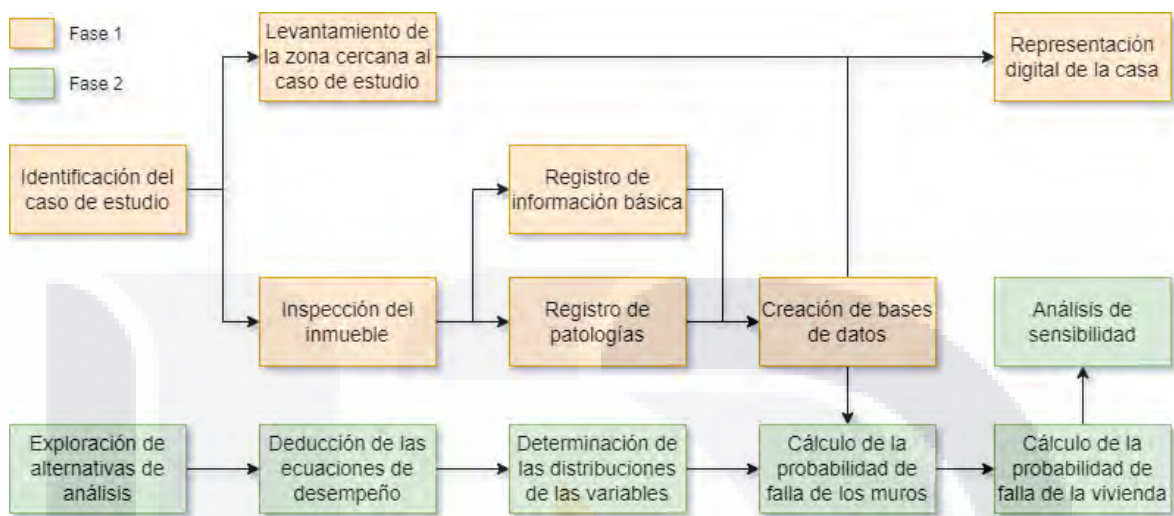


Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología de este trabajo de investigación.

La metodología, a grandes rasgos, consiste en dos fases principales, las cuales se describen a continuación:

### 4.1. Fase 1: identificación y caracterización del caso de estudio

#### 4.1.1. Identificación del caso de estudio

En esta fase, se llevó a cabo la identificación y caracterización del caso de estudio. Para ello, se seleccionó una vivienda de mampostería confinada con apoyo del Sistema de Fallas Geológicas y Grietas (SIFAGG). Este inmueble, afectado por subsidencia diferencial, debe elegirse como objeto de estudio tras obtener los permisos necesarios por parte de los propietarios.

#### 4.1.2. Levantamiento de la zona cercana al caso de estudio

El proceso de levantamiento en la zona cercana a la vivienda consistió en la creación de tres mapas clave utilizando el software QGIS 3.28, abarcando un área aproximada de 60x60 metros alrededor del inmueble. Estos mapas son los de discontinuidades, subsidencia y

distorsión angular, y el procedimiento empleado para obtener cada uno de estos se detalla a continuación:

- Para el primero, se consultó el mapa de fallas y grietas proporcionado por Sistema de Fallas Geológicas y Grietas (SIFAGG) del Gobierno del Estado de Aguascalientes.
- El segundo elaboró a partir de los datos de subsidencia detallados en el mapa ráster “Distribución espacial y magnitud de la subsidencia en el Valle de Aguascalientes en 2019” del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con resolución de 30x30 m.
- El tercer mapa se creó a partir del mapa de subsidencia de la zona de estudio, con el método desarrollado por Horn (1981).

#### **4.1.3. Inspección del inmueble**

Posteriormente, se realizó una inspección detallada del inmueble. Durante la inspección, se recolectaron datos básicos de la construcción, como su fecha de edificación y su composición arquitectónica y estructural.

Para poder evaluar los daños existentes en el caso de estudio y complementar la información de la simulación numérica de los muros, se registraron los datos respecto a las patologías observadas en el caso de estudio. Entre ellas:

- *Hundimientos.* Los hundimientos en la vivienda se registraron cuantitativamente empleando equipo topográfico mediante estación total Sokkia modelo SET630RK. Los datos obtenidos se procesarán, además, mediante el software CivilCAD 2015.
- *Agrietamientos.* Mediante cinta métrica, se llevó a cabo la caracterización cuantitativa de longitudes, inclinaciones, anchos de los agrietamientos en muros y suelos, así como del grosor de las partículas desprendidas por dichos agrietamientos y ubicación inicial y final de los mismos. Cualitativamente, a partir de la observación directa, se registraron las intervenciones realizadas en cada agrietamiento.
- *Desprendimientos.* Mediante observación directa y cinta métrica, se describió cuantitativamente la ubicación y separaciones entre la herrería de los marcos de

- aberturas y zoclos respecto al muro. Cualitativamente, a partir de la observación directa, se registraron las intervenciones realizadas en cada desprendimiento.
- *Desplomes.* El registro de los desplomes de los muros hizo cualitativamente con base al uso de una plomada, exclusivamente para los muros en los que se observó a simple vista un desplome significativo. Se asignó un valor en una escala cualitativa discreta para medir el grado de severidad del desplome en cada muro, siendo el número 1 el valor que indica un daño mínimo, hasta el 4 que indica un daño severo. Además de lo anterior, mediante observación directa se rastrearon cualitativamente las intervenciones realizadas en cada desplome.
  - *Descuadres.* Los descuadres de aberturas se evaluaron de forma cualitativa con base al uso de una plomada sólo para puertas y ventanas donde se observó un descuadre significativo. De forma parecida al registro de desplomes, se asignó un valor en escala cualitativa discreta de 1 a 4 a cada uno de los registros de descuadres, donde 1 representa un grado de daño mínimo, mientras que el 4, un daño severo. Además de lo anterior, mediante observación directa se rastrearon cualitativamente las intervenciones realizadas en cada descuadre.

Además de los registros cuantitativos y cualitativos de las patologías anteriores, se complementó la información anterior con una memoria fotográfica.

Dado que no se contó con información del proyecto constructivo de la vivienda, el dimensionamiento de castillos y dadas se realizó según criterios de experiencia constructiva. La campaña de inspección, por su parte, se limitó a una evaluación visual, sin demoliciones ni el uso de equipos especializados, a excepción de una estación total. Por este motivo, no fue posible obtener información sobre la cimentación ni la losa de azotea.

Toda la información recolectada de la vivienda estudiada quedó plasmada dentro de una base de datos. No obstante, debido a que la campaña de inspección no incluyó la realización de pruebas para determinar las propiedades de los materiales, estos se determinaron a partir de los valores índices detallados en el Código Municipal de Aguascalientes 2024, en las Normas Técnicas Complementarias (NTC) 2023 y en las Normas Mexicanas (NMX) 2013 y 2017 aplicables.

El peso volumétrico de la mampostería ( $\rho_m$ ) tampoco fue posible determinarla durante la caracterización física del inmueble. No obstante, se puede deducir la expresión para su



cálculo a partir de la información presente en las bases de datos de la vivienda, la cual se muestra en la ecuación (22).

$$\rho_m = \frac{a_p \left[ (\rho_p - \rho_j) \left( \frac{L_p h_p}{(L_p + h_j)(h_p + v_j)} \right) + \rho_j \right] + \rho_r (e_{r1} + e_{r2})}{a_p + e_{r1} + e_{r2}} \quad (22)$$

Donde:

$\rho_p$  = Peso volumétrico de las piezas de mampostería

$\rho_j$  = Peso volumétrico del mortero de las juntas de la mampostería

$\rho_r$  = Peso volumétrico del aplanado de yeso/mortero en el muro

$L_p$  = Longitud de soga de las piezas de mampostería

$h_p$  = Longitud del grueso de las piezas de mampostería

$a_p$  = Longitud del tizón de las piezas de mampostería

$h_j$  = Espesor de la junta horizontal entre piezas de mampostería

$v_j$  = Espesor de la junta vertical entre piezas de mampostería

$e_{r1}$  = Espesor del aplanado en la cara frontal del muro

$e_{r2}$  = Espesor del aplanado en la cara posterior del muro

#### **4.1.4. Creación de mapas de representación digital de la casa**

Con base en la información recolectada en anteriores pasos, se procedió a la representación digital del inmueble. Para ello, se crearon 3 tipos de mapas: el plano 2D de la vivienda con la traza de la falla (empleando el software AutoCAD 2016), el plano 3D de la vivienda con la representación de agrietamientos de muro (empleando el software SketchUp 2019) y el plano 2D de la vivienda con el registro de los hundimientos (empleando el software CivilCAD 2015).

## 4.2. Fase 2: exploración, modelado, análisis numérico y determinación de la confiabilidad

### 4.2.1. Exploración de alternativas de análisis de confiabilidad

En la presente etapa metodológica, se exploraron diversos enfoques analíticos para evaluar la confiabilidad estructural de muros de mampostería bajo el modo de falla por cortante inducido por cargas laterales. Tomando como referencia el modelo de curva trilineal propuesto por Flores (1995), se identificaron dos metodologías posibles:

1. Un enfoque basado en la determinación de los cortantes actuantes a partir de las distorsiones angulares registradas en la base de datos de la vivienda analizada
2. Un enfoque alternativo que emplea directamente las distorsiones angulares de los muros, sin requerir la estimación previa de los cortantes.

El primer enfoque, fundamentado en la simulación numérica mediante software especializado (SAP2000 y CAST3M) y cálculos manuales posteriores, enfrentó limitaciones prácticas y teóricas. Por un lado, la ausencia de ensayos físicos de los muros obligó a recurrir a modelados numéricos mediante el método de la diagonal equivalente y elementos finitos, lo que implicó complejidad operativa al requerir la simulación individualizada de cada muro según sus parámetros geométricos y mecánicos. Esta exigencia resultó impráctica debido al tiempo y los recursos necesarios, contradiciendo el objetivo de desarrollar una metodología simplificada aplicable por ingenieros en ejercicio, sin dependencia de herramientas computacionales avanzadas. Adicionalmente, se identificó una limitación teórica crítica: la curva trilineal de Flores (1995) no presenta una relación biyectiva entre el cortante y la distorsión angular, lo que impide asociar un valor único de distorsión a un cortante específico. Esta ambigüedad dificulta determinar si un cortante dado corresponde a una distorsión angular inferior o superior al umbral de un estado límite, invalidando su uso confiable para evaluar la confiabilidad. Los avances parciales obtenidos con este enfoque, incluyendo modelados y cálculos preliminares, se documentan en el apéndice C. de este trabajo.

Ante estas limitaciones, se priorizó el segundo enfoque, basado exclusivamente en el análisis de distorsiones angulares registradas en la base de datos. Este método evita las complicaciones asociadas a la simulación numérica y la ambigüedad de la curva trilineal, al vincular directamente las distorsiones con los umbrales de falla establecidos en la normativa vigente. Su implementación requiere únicamente cálculos manuales, lo que garantiza simplicidad y accesibilidad para profesionales en el ámbito práctico. Por estas razones, este

enfoque se adoptó como eje central de la metodología propuesta, cuyos detalles se desarrollan en las siguientes secciones.

#### ***4.2.2. Determinación de la confiabilidad por el método exacto a partir de las distorsiones angulares de muros***

Con base a la información recabada en la primera fase de este programa experimental, se puede determinar la confiabilidad tanto de los muros individuales como en conjunto de la vivienda tomada como caso de estudio mediante el procedimiento de primer orden, segundo momento centrado en valores medios para estados límite para funciones no lineales de variables aleatorias independientes con distribución normal.

A partir de lo anteriormente mencionado, se puede estimar la probabilidad de falla e índice de confiabilidad considerando diferentes estados límites alcanzados en muros. Para efectos de esta investigación, se consideró el análisis bajo el esquema del estado límite último (ELU) y del estado límite de servicio (ELS) por cortante presente en los muros de mampostería, el cual se describirá en posteriores apartados.

Los registros obtenidos respecto a los desplazamientos debidos a la subsidencia presente en los muros, debido a su naturaleza, se consideraron como acciones de tipo permanente en los elementos analizados, sin la consideración de factores de seguridad.

##### ***4.2.2.1. Determinación de la confiabilidad considerando el estado límite último (ELU) y el estado límite de servicio (ELS)***

###### ***4.2.2.1.1. Deducción de la ecuación de estado límite***

El primer paso consiste en deducir la ecuación de estado límite o de desempeño  $g$  para el ELU y ELS en muros individuales, considerando la frontera entre la seguridad estructural y la falla. Para ello, se empleó el modelo de curva trilineal de Flores (1995). El proceso de deducción de dicha ecuación se detalla en los apéndices A.1.1. y A.2.1.

Para el ELU, la ecuación de desempeño corresponde a la ecuación (28), establecida en este documento:

$$g = 2L_m - \frac{2}{DI_{ult}} |S_{izq} - S_{der}| + B_{ci} + B_{cd} \quad (28)$$

En cambio, para el ELS la ecuación de estado límite es la mostrada en la expresión (53):

$$g = 2L_m - \frac{4G_m}{v'_m} |S_{izq} - S_{der}| + B_{ci} + B_{cd} - \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai} \quad (53)$$

En este caso, las variables aleatorias que intervienen en las ecuaciones de desempeño son:

- $B_{cd}$  = Dimensión de sección del castillo del extremo derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería.
- $B_{ci}$  = Dimensión de sección del castillo del extremo izquierdo del muro paralelo a la longitud de la mampostería.
- $L_m$  = Longitud de la mampostería, sin considerar los castillos de confinamiento.
- $S_{der}$  = Hundimiento registrado en el centro del castillo del extremo derecho del muro confinado.
- $S_{izq}$  = Hundimiento registrado en el centro del castillo del extremo izquierdo del muro confinado.
- $L_{Ai}$  = Distancias de la abertura i-ésimas en el muro, paralelas a la longitud de la mampostería, en caso de existir. El número de aberturas  $n_A$  presentes en un determinado muro especifica la cantidad de variables  $L_{Ai}$  presentes en la ecuación de desempeño.

Los parámetros de la distorsión última para alcanzar el cortante último  $DI_{ult}$ , el módulo de cortante de la mampostería  $G_m$  y de la resistencia a la compresión diagonal de la mampostería  $v'_m$  se tratarán como constantes, independientemente de las propiedades de los materiales y de la geometría específica de los muros. La justificación de la elección de estos parámetros como constantes radica en la limitación respecto a la caracterización de los muros de la vivienda estudiada, ya que no se llevaron pruebas experimentales para estimar analíticamente dichos valores ni de sus respectivas distribuciones de probabilidad; por lo que se tomarán los valores deterministas proporcionados por la bibliografía correspondiente como constantes. Una ventaja de considerar a dichos parámetros como constantes es que permite simplificar las ecuaciones de desempeño y determinar la

confiabilidad de los muros con fórmulas exactas, sin la necesidad de considerar métodos más complejos de análisis, tal y como se mostrará en las secciones subsecuentes.

Respecto a  $DI_{ult}$ , algunos autores proponen que, para el caso de subsidencia en edificaciones, se tome un valor de distorsión angular última de 0.002 radianes (Bjerrum, 1963; Skempton & Macdonald, 1956; Zhang & Ng, 2007); no obstante, para esta investigación se tomará el criterio establecido por Flores (1995) en todos los muros de la vivienda, tomando un valor de distorsión última de 0.005 radianes, estimado para muros de mampostería confinada sin refuerzo horizontal.

Por otra parte, los parámetros de  $G_m$  y  $v'_m$  corresponderán a los mencionados en la NTC-Rehabilitación 2023. Para esta investigación, se utilizaran los siguientes valores como constantes de análisis en todos los muros de la vivienda:

- Módulo de cortante de la mampostería ( $G_m$ ) de 1050 kg/cm<sup>2</sup>.
- Resistencia a la compresión diagonal de la mampostería ( $v'_m$ ) de 2 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 4.2.2.1.2. Distribuciones de las variables involucradas en las ecuaciones de estado límite

Dado que durante la inspección del inmueble se recabó información respecto a las variables anteriormente consideradas en las ecuaciones de estado límite, entonces para cada muro individual  $j$  se pueden considerar las distribuciones de probabilidad y parámetros que se detallan en la Tabla 5, con base a los registros de datos obtenidos mediante la instrumentación en dicho muro.

Variable	Tipo de medición	Distribución de probabilidad	Registro mediante instrumento	Media	Desviación estándar
$L_m$	Distancia horizontal con cinta métrica	Normal	$L_{mj}$	$L_{mj}$	$\sqrt{0.00019601(L_{mj})^2 + 0.00016384 m^2}$
$S_{izq}$	Cota de elevación de punto visado	Normal	$S_{izqj}$	$S_{izqj}$	0.0076 m

	con estación total				
$S_{der}$	Cota de elevación de punto visado con estación total	Normal	$S_{derj}$	$S_{derj}$	0.0076 m
$B_{ci}$	Distancia horizontal con cinta métrica	Normal	$B_{cij}$	$B_{cij}$	$\sqrt{0.00019601 (B_{cij})^2 + 0.00016384 m^2}$
$B_{cd}$	Distancia horizontal con cinta métrica	Normal	$B_{cdj}$	$B_{cdj}$	$\sqrt{0.00019601 (B_{cdj})^2 + 0.00016384 m^2}$
$L_{Ai}$ (i = 1,2,...,n)	Distancia horizontal con cinta métrica	Normal	$L_{Aij}$	Si existe: $L_{Aij}$  Si no existe: 0	Si existe: $\sqrt{0.00019601 (L_{Aij})^2 + 0.00016384 m^2}$  Si no existe: 0

Tabla 5. Datos sobre la distribución de probabilidad de todas las variables involucradas en la ecuación de desempeño. Dado que se supuso que todas las variables tienen distribución normal, las medias son las medidas nominales obtenidas del muro analizado para la respectiva variable, mientras que las desviaciones estándar están en función de las fórmulas obtenidas mediante propagación de error considerando las medidas nominales.

La determinación de las distribuciones de probabilidad, media y desviación estándar de las variables se profundiza en el apéndice B.

Es importante mencionar que en el análisis de confiabilidad para ambos estados límites supondrá completa independencia entre las variables involucradas, ya que se asume que el conocimiento del valor de una de ellas no proporciona información sobre las demás.



#### 4.2.2.1.3. Determinación de la confiabilidad individual de muros

Dadas las consideraciones establecidas previamente en las ecuaciones de desempeño deducidas para el ELU y ELS, se efectuará el análisis de confiabilidad para una función lineal de variables aleatorias independientes con distribución normal. Por tanto, empleando el procedimiento de primer orden, segundo momento centrado en valores medios, se deberá llevar a cabo el cómputo del índice de confiabilidad  $\beta$  y la probabilidad de falla  $p_f$  de cada uno de los muros de forma individual. Las expresiones respectivas para el muro  $j$ -ésimo son las mismas para ambos estados límites, como se muestran en las ecuaciones (41) y (68) de este documento para el cómputo del índice de confiabilidad, y las ecuaciones (30) y (55), para la probabilidad de falla, tal y como se dedujo en los apéndices A.1.2. y A.2.2., es decir:

$$\beta_j \approx \frac{\mu_{X_j} - |\mu_{Y_j}|}{\sqrt{\sigma_{X_j}^2 + \sigma_{Y_j}^2}} \quad (41)$$

$$(68)$$

$$p_{f_j} = \Phi\left(-\frac{\mu_{X_j} - \mu_{Y_j}}{\sqrt{\sigma_{X_j}^2 + \sigma_{Y_j}^2}}\right) + \Phi\left(-\frac{\mu_{X_j} + \mu_{Y_j}}{\sqrt{\sigma_{X_j}^2 + \sigma_{Y_j}^2}}\right) \quad (30)$$

$$(55)$$

Tomando como base las medias y desviaciones estándar de las variables aleatorias “ $X_j$ ” e “ $Y_j$ ” del muro  $j$ -ésimo.

Para el ELU, las variables son  $X_j = 2L_{mj} + B_{cij} + B_{cdj}$  y  $Y_j = \frac{2}{DI_{ultj}}(S_{izqj} - S_{derj})$ , donde el cómputo de los parámetros está determinado mediante las ecuaciones (31) a (34):

$$\mu_{X_j} = 2\mu_{Lmj} + \mu_{Bcij} + \mu_{Bcdj} \quad (31)$$

$$\sigma_{X_j} = \sqrt{4\sigma_{Lmj}^2 + \sigma_{Bcij}^2 + \sigma_{Bcdj}^2} \quad (32)$$

$$\mu_{Y_j} = \frac{2}{DI_{ultj}}(\mu_{Sizqj} - \mu_{Sderj}) \quad (33)$$

$$\sigma_{Y_j} = \left|\frac{2}{DI_{ultj}}\right| \sqrt{\sigma_{Sizqj}^2 + \sigma_{Sderj}^2} \quad (34)$$

En cambio, para el ELS, las variables son  $X_j = 2L_{mj} + B_{cij} + B_{cdj} - \sum_{i=1}^{n_A} L_{Aij}$  y  $Y_j = \frac{4G_{mj}}{v'_{mj}}(S_{izqj} - S_{derj})$ , y el cómputo de los parámetros se muestra en las ecuaciones (56) a (59), respectivamente:

$$\mu_{Xj} = 2\mu_{Lmj} + \mu_{Bcij} + \mu_{Bcdj} - \sum_{i=1}^{n_A} \mu_{L_{Aij}} \quad (56)$$

$$\sigma_{Xj} = \sqrt{4\sigma_{Lmj}^2 + \sigma_{Bcij}^2 + \sigma_{Bcdj}^2 + \sum_{i=1}^{n_A} \sigma_{L_{Aij}}^2} \quad (57)$$

$$\mu_{Yj} = \frac{4G_{mj}}{v'_{mj}}(\mu_{S_{izqj}} - \mu_{S_{derj}}) \quad (58)$$

$$\sigma_{Yj} = \left| \frac{4G_{mj}}{v'_{mj}} \right| \sqrt{\sigma_{S_{izqj}}^2 + \sigma_{S_{derj}}^2} \quad (59)$$

#### 4.2.2.1.4. Determinación de la confiabilidad de la vivienda

Ya determinado el índice de confiabilidad y probabilidad de falla de todos los muros de mampostería de la vivienda estudiada, el siguiente paso consiste en determinar la confiabilidad del sistema.

Considerando que la colección de n muros en la vivienda se comporta como un sistema dúctil en paralelo, los límites inferior y superior para determinar la probabilidad de falla del sistema, considerando una independencia y dependencia total entre muros, se basa en la ecuación (21) previamente mencionada en este documento.

$$\prod_{j=1}^n p_{fj} \leq p_{f_{sistema}} \leq \min(p_{f_1}, p_{f_2}, \dots, p_{f_n}) \quad (21)$$

La justificación de la elección del sistema dúctil en paralelo radica en que todos los muros del sistema tienen elementos de confinamiento (dadas y castillos), los cuales le otorgan ductilidad a los muros, permitiéndoles mantener la capacidad de carga ante distorsiones elevadas (Alcocer, 1997). Por otra parte, dado que los muros perpendiculares están ligados

entre sí por estos elementos de confinamiento, se considera que los muros trabajan monolíticamente y son capaces de redistribuir las cargas entre sí.

Como un análisis exploratorio inicial, se consideró efectuar el análisis tanto para el caso más optimista (considerando una total independencia entre muros) como pesimista (considerando una total dependencia entre muros), dado que no se cuentan con datos relacionados con el grado de correlación entre muros.

#### ***4.2.2.1.5. Análisis de sensibilidad para la confiabilidad de la vivienda a partir de las variables de las ecuaciones de estado límite***

Una vez establecida la metodología para determinar la confiabilidad del sistema bajo diferentes consideraciones de correlación, se procede a llevar a cabo un análisis de sensibilidad de la confiabilidad para las diferentes variables de las ecuaciones de estado límite para el ELU y ELS.

Para esto, se calcula la probabilidad de falla  $p_f$  de la vivienda considerando un aumento de 5, 10, 15, 20, 25 y 30% en los registros de las medidas nominales de cada una de las variables en todos los muros de la vivienda, y posteriormente se grafican los resultados obtenidos.

Cabe mencionar que el análisis de sensibilidad considerará los dos escenarios considerados respecto a la completa independencia y dependencia entre muros (los casos optimista y pesimista), de esta manera se pueden observar las variables que son más importantes en ambos casos.

Para este análisis, no sólo se pueden aplicar estos porcentajes de aumento en variables de forma individual y aislada, sino que también se pueden aplicar a dos o más variables a la vez, lo que permite hacer el análisis de sensibilidad para variables que están en función de dos o más variables de la ecuación de desempeño. En el caso del ELU, además de llevar a cabo el análisis de sensibilidad para las variables de forma aislada, se considerará llevar a cabo el análisis para estas variables:

$$B_T = B_{ci} + B_{cd}$$

$$\Delta S = |S_{izq} - S_{der}|$$

Y para el ELS:

$$B_T = B_{ci} + B_{cd}$$

$$L_{AT} = L_{A1} + L_{A2}$$

$$\Delta S = |S_{izq} - S_{der}|$$

Donde:

$B_T$  = Dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro, paralelo a la longitud de la mampostería. En este caso, para el análisis de sensibilidad se deben aumentar a la vez las variables  $B_{ci}$  y  $B_{cd}$ .

$L_{AT}$  = Longitud total de las aberturas presentes en el muro. En este caso, para el análisis de sensibilidad se deben aumentar a la vez las variables  $L_{A1}$  y  $L_{A2}$ .

$\Delta S$  = Hundimiento diferencial del muro de mampostería. En este caso, para el análisis de sensibilidad se deben aumentar a la vez las variables  $S_{izq}$ , y  $S_{der}$ .

## CAPÍTULO V. RESULTADOS

### 5.1. Identificación del caso de estudio

Mediante el uso del Sistema de Fallas Geológicas y Grietas (SIFAGG), por conveniencia y accesibilidad se optó por investigar una vivienda unifamiliar de mampostería confinada de un nivel, la cual se ubica en el fraccionamiento “El Dorado” (1° Sección), dentro del municipio de Aguascalientes.



*Figura 11. Vista frontal de la vivienda a estudiar. Se puede observar que la falla pasa por en medio de la fachada principal.*

#### 5.1.1. Levantamiento en la zona cercana al caso de estudio

Las discontinuidades presentes en el área cercana a la vivienda investigada se pueden visualizar en la Figura 12.

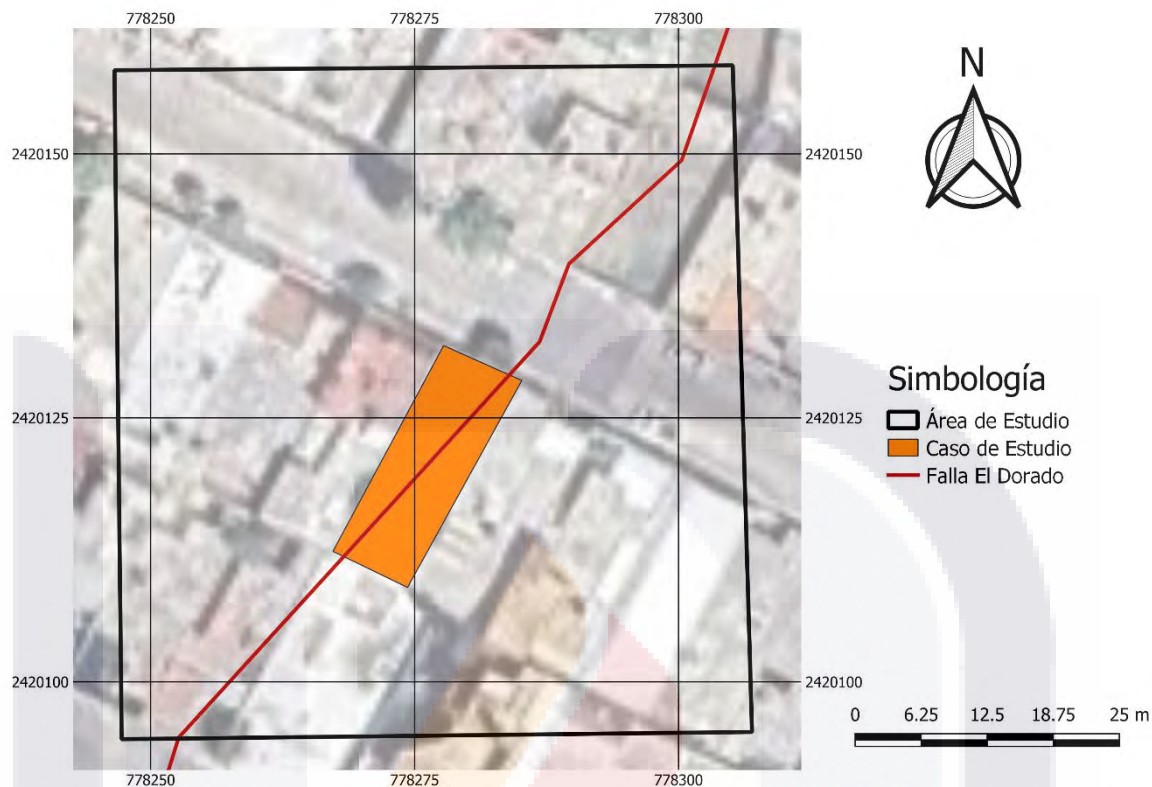


Figura 12. Mapa de las discontinuidades geológicas más cercanas a la vivienda estudiada. La única presente es la Falla El Dorado.

Como puede observarse en la anterior figura, la única discontinuidad presente, y que afecta a la vivienda del caso de estudio, es la falla “El Dorado”, cuyos datos proporcionados por el SIFAGG (consultado el 1° de junio de 2024) son los citados en la Tabla 6:

Características	Valor
ID	213
Fecha de captura GPS	20/11/2019
Precisión	± 3.00 m
Bloque	Poniente
Longitud	1245.54 m
Municipio ubicado	Aguascalientes
Última actualización	20/11/2019



X inicio (UTM)	778055.00 m
Y inicio (UTM)	2419480.00 m
X fin (UTM)	778522.00 m
Y fin (UTM)	2420590.00 m
Clasificación	Traza principal

Tabla 6. Datos de identificación de la falla El Dorado (SIFAGG, s/f).

Por otra parte, la zona de estudio posee subsidencias desde los 37 a 40 mm, tal y como se observa en la Figura 13.

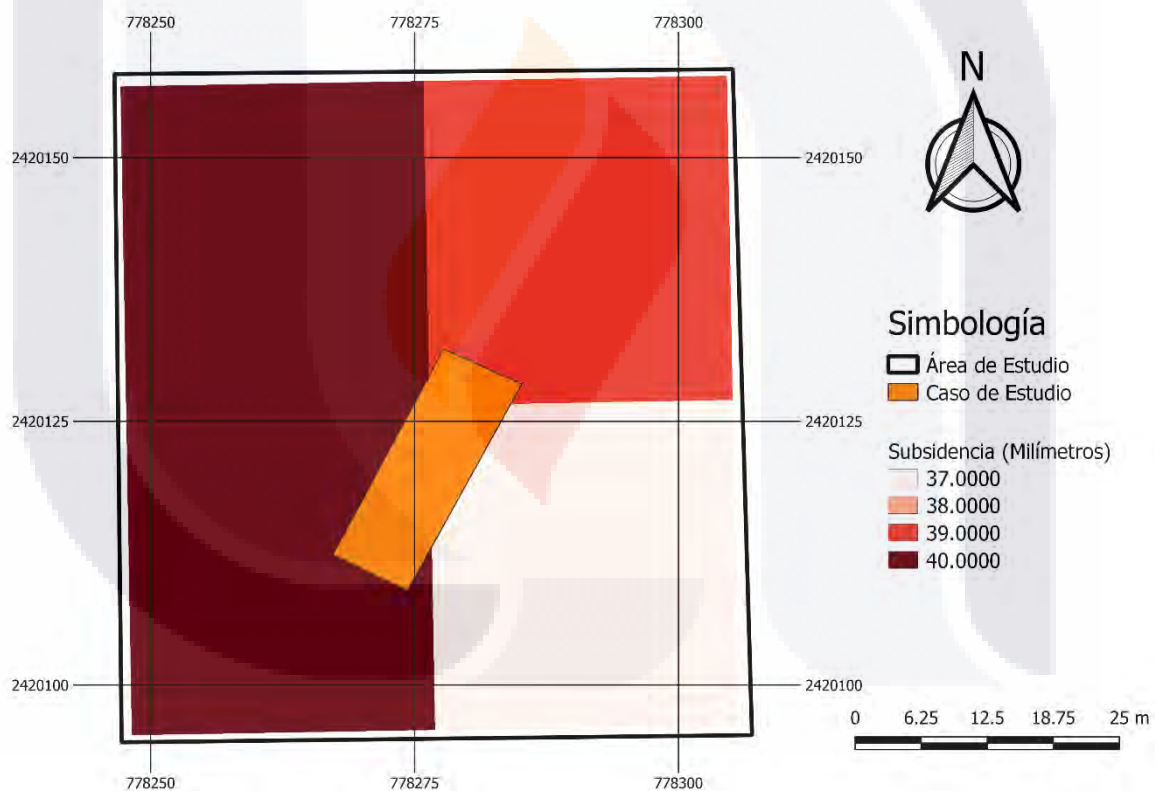


Figura 13. Mapa de subsidencia en la zona cercana a la vivienda estudiada.

Por último, las distorsiones angulares en la zona de estudio varían de aproximadamente de 0.000013 a 0.000062 radianes, como se indica en la Figura 14.

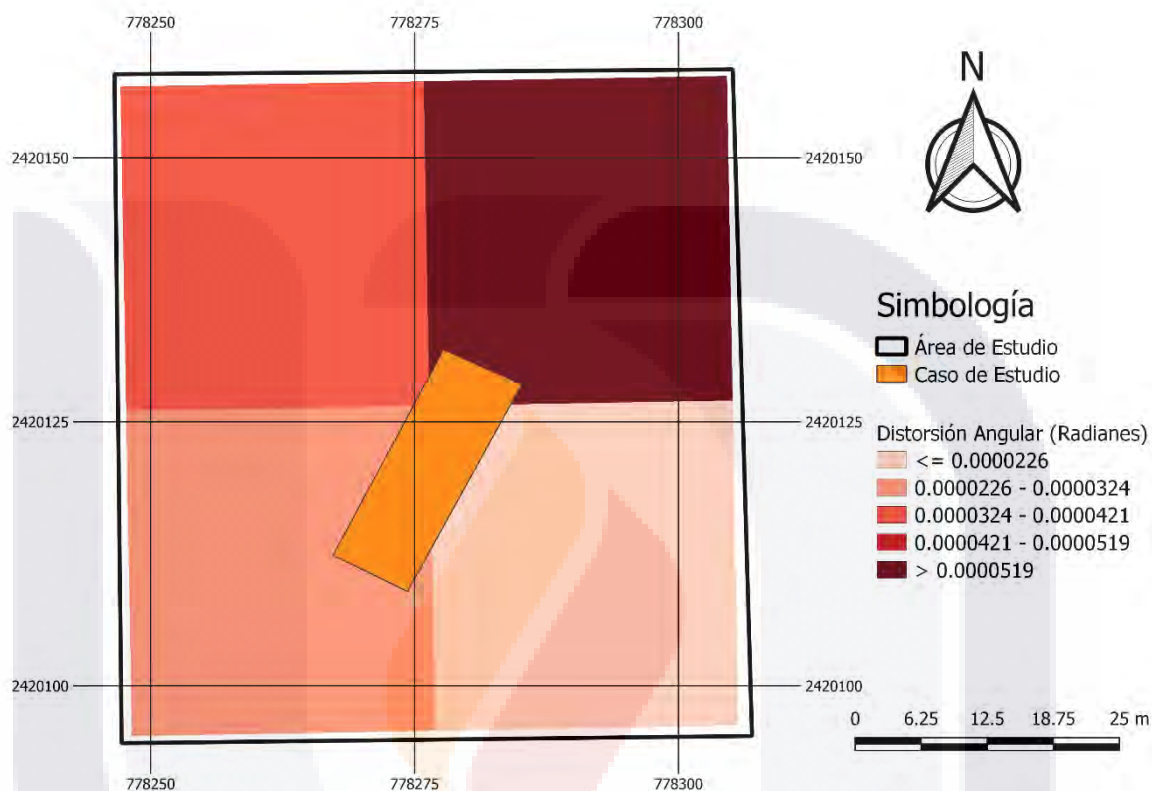


Figura 14. Mapa de distorsión angular por subsidencia registrada en la zona cercana a la vivienda estudiada.

### 5.1.2. Inspección del inmueble

Una vez que se obtuvieron los permisos correspondientes con los dueños de la vivienda, se llevó a cabo el registro de la información básica y de las patologías presentes en la vivienda mediante varias visitas de campo. La información cualitativa y cuantitativa obtenida mediante la inspección se organizó y sistematizó mediante la creación de distintas bases de datos, de manera que se funcione como guía para las fases posteriores del procedimiento experimental.

#### **5.1.2.1. Información básica**

##### **5.1.2.1.1. Generalidades**

Debido a que la vivienda no contaba con información técnica constructiva, se llevó a cabo una serie de visitas para obtener la información relativa a la distribución de los muros y aberturas, y de la caracterización de los sistemas constructivos presentes, entre otras generalidades.

La vivienda unifamiliar estudiada fue edificada en el año 1994, la cual se ubica en el fraccionamiento “El Dorado” (1° Sección), dentro del municipio de Aguascalientes. Este inmueble cuenta con un frente y largo de aproximadamente de 8 y 22 m, respectivamente; contando con una superficie estimada de 184.26 m<sup>2</sup>. La altura desde el nivel de la cochera hasta el nivel de azotea es de aproximadamente 3 m. La vivienda cuenta con total 48 muros, de los cuales 26 se encuentran en sentido longitudinal y 22 en sentido transversal.

La casa se compone de tres dormitorios, dos baños completos, dos salas de estar, una cocina, un comedor, una cochera, un jardín y un patio. La característica más destacable de la vivienda estudiada es que la atraviesa la falla geológica llamada “El Dorado”, cuya traza estimada (acorde a los datos proporcionados por el Sistema de Fallas Geológicas y Grietas (SIFAGG)) sigue una línea recta que se extiende desde aproximadamente 1.25 m desde la colindancia izquierda en la fachada hasta aproximadamente 1.15 m desde la colindancia derecha en el fondo de la vivienda.

Debido a la presencia de la falla geológica en la vivienda, la edificación presenta un gran número de patologías, incluyendo hundimientos diferenciales, agrietamientos en suelos y muros, desplomes de muros, descuadres de puertas y ventanas, entre otros.

##### **5.1.2.1.2. Distribución de muros y aberturas**

Acorde a las mediciones cuantitativas llevadas a cabo mediante cinta métrica, la distribución en planta aproximada de los muros y aberturas (puertas y ventanas) de la vivienda es que se puede visualizar en la Figura 15.

La traza de la falla geológica, según el SIFAGG, afecta directamente a 6 de los 48 muros que componen a la vivienda de estudio.



Figura 15. Mapa arquitectónico del caso de estudio junto con la traza aproximada de la falla geológica presente según SIFAGG.

#### **5.1.2.1.3. Caracterización de los materiales y sistemas constructivos presentes**

Para llevar a cabo este punto, no fue posible contar con planos, bitácoras de obra ni información técnica previa acerca del inmueble estudiado, por lo que las tres fuentes principales que sirvieron para la caracterización de los materiales y sistemas constructivos fueron las entrevistas con los dueños de la vivienda, mediciones in situ y fuentes externas.

Hubo dos sistemas constructivos que no pudieron caracterizarse: la cimentación y la losa de azotea. Para fines prácticos, se asumió que el primero consistía en una cimentación con zapatas corridas de colindancia y corridas; y para el segundo, de losa maciza.

##### **5.1.2.1.3.1. Muros de mampostería**

Todos los muros en la vivienda estudiada son de mampostería confinada. La mayoría de muros están conformados por piezas de tabiques de barro rojo recocido artesanal de 7 cm x 14 cm x 28 cm en sus dimensiones. El peso volumétrico ( $p_p$ ) de dichos tabiques se tomará de 1500 kg/m<sup>3</sup> que, acorde a la tabla del artículo 886 del Código Municipal de Aguascalientes (2024), corresponde al valor máximo de peso volumétrico para tabiques de barro hechos a mano.

La junta empleada para unir dichas piezas está hecha con mortero tipo II, con relación cemento hidráulico – cemento de albañilería – arena de 1:1:6. Los espesores, determinados únicamente determinados para un solo muro, son de 3 cm tanto para la junta vertical como la horizontal. La resistencia a la compresión de la junta ( $f_j$ ) se tomará como 75 kg/cm<sup>2</sup> acorde al valor mínimo admisible para morteros tipo II de la tabla 2.5.3.1. de la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2023).

El acabado, para la mayoría de los muros interiores, es de yeso con espesor promedio por ambos lados del muro de 1.5 cm y, en la mayoría de los muros exteriores, de mortero con espesor promedio por ambos lados del muro de 1.5 cm. Por simplicidad se tomará, tanto de acabado de mortero como de yeso, un valor de peso volumétrico ( $p_r$ ) de 2000 kg/m<sup>3</sup>, que corresponde al único valor compatible para aplanados de yeso o mortero acorde a la tabla del artículo 886 del Código Municipal de Aguascalientes (2024).

En cuanto a la mampostería, la mayor parte de los muros tienen una anchura total promedio (e) de aproximadamente 17 cm (14 cm sin la presencia del acabado), con un peso volumétrico aproximado ( $\rho_m$ ) de 1770 kg/m<sup>3</sup> (derivado de la consideración de los pesos volumétricos de las piezas de mampostería, mortero de las juntas y del acabado). El módulo de Poisson ( $\nu$ ) considerado para todos los muros es 0.25, acorde al artículo 2.8.6.2 de la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2023). Algunas otras propiedades para toda la mampostería se tomaron a partir de los valores históricos recomendados del artículo 3.4.5.8.5 de la Norma Técnica Complementaria para Evaluación y Rehabilitación Estructural de Edificios Existentes (2023), entre ellos:

- Resistencia a la compresión de la mampostería ( $f'_m$ ) de 15 kg/cm<sup>2</sup>
- Módulo de elasticidad ( $E_m$ ) de 350  $f'_m$ , es decir, de 5250 kg/cm<sup>2</sup>
- Módulo de cortante ( $G_m$ ) de 0.2  $E_m$ , es decir, de 1050 kg/cm<sup>2</sup>
- Resistencia a la compresión diagonal del material ( $\nu'_m$ ) de 2 kg/cm<sup>2</sup>

#### **5.1.2.1.3.2. Castillos**

Todos los castillos presentes en la vivienda son exteriores (es decir, que no están ahogados) de armado prefabricado, cuyo refuerzo consiste en acero corrugado laminado en frío grado 60 con peso volumétrico ( $\rho_s$ ) de 7830.95 kg/m<sup>3</sup>, este último estimado a partir del valor de masa unitaria para varillas de calibre 1/4 (6.35 mm de diámetro) de la tabla 1 de la norma NMX-B-072-CANACERO (2017). Acorde a la norma NMX-B-253-CANACERO (2013), los valores de esfuerzo de fluencia ( $F_y$ ) y de esfuerzo último ( $F_u$ ) se tomarán de 6000 y 7000 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Por otra parte, el módulo de elasticidad del acero ( $E_s$ ) adquiere en valor de 2000000 kg/cm<sup>2</sup>, según lo especificado por el artículo 2.7.8. de Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2023).

El concreto a emplearse para la construcción para todos estos elementos será el usado para estructuras pertenecientes al grupo B2, empleando concreto con un módulo de Poisson ( $\nu$ ) de 0.20, y cuya resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) es 150 kg/cm<sup>2</sup>, este último según el artículo 976 del Código Municipal de Aguascalientes (2024). Con base a la tabla 2.2.1. de la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de

Concreto (2023), se determinó que el concreto empleado es del tipo 1A, con peso volumétrico en estado fresco de  $2200 \text{ kg/m}^3$ . Por otra parte, según la tabla 3.4.5.8.2.b de la Norma Técnica Complementaria para Evaluación y Rehabilitación Estructural de Edificios Existentes (2023), para edificaciones construidas en el año 1987 en adelante, y para concretos clase 1, el módulo de elasticidad ( $E_c$ ) se tomará como  $8000 * ((f'_c)^{(1/2)})$ , es decir, de  $97979.59 \text{ kg/cm}^2$ . Asumiendo que el concreto es un material isótropo, el módulo de cortante del concreto ( $G_c$ ) será igual a  $40824.83 \text{ kg/cm}^2$ .

La mayoría de los castillos tienen una sección  $15 \times 15 \text{ cm}$ , de armado prefabricado del tipo 15-15-4 de sección  $10.2 \times 10.2 \text{ cm}$  con 4 varillas en sentido longitudinal calibre 1/4 (6.35 mm de diámetro) y recubrimiento mecánico de aproximadamente 2.4 cm. El confinamiento de estas varillas consiste en estribos a base de varillas de calibre 1/4 (6.35 mm de diámetro), con una separación entre anillos de 25 cm.

#### **5.1.2.1.3.3. Dalas**

En cuanto a las propiedades del concreto y acero de refuerzo para todas las dalas se tomarán iguales a las ya mencionadas para los castillos.

Se considerará que la mayoría de las dalas de la vivienda, al igual que los castillos, se componen de un armado prefabricado de sección  $10.2 \times 10.2 \text{ cm}$  con 4 varillas, resultando en una sección de concreto de  $15 \times 15 \text{ cm}$ . Las características específicas del armado se considerarán iguales que las de los castillos.



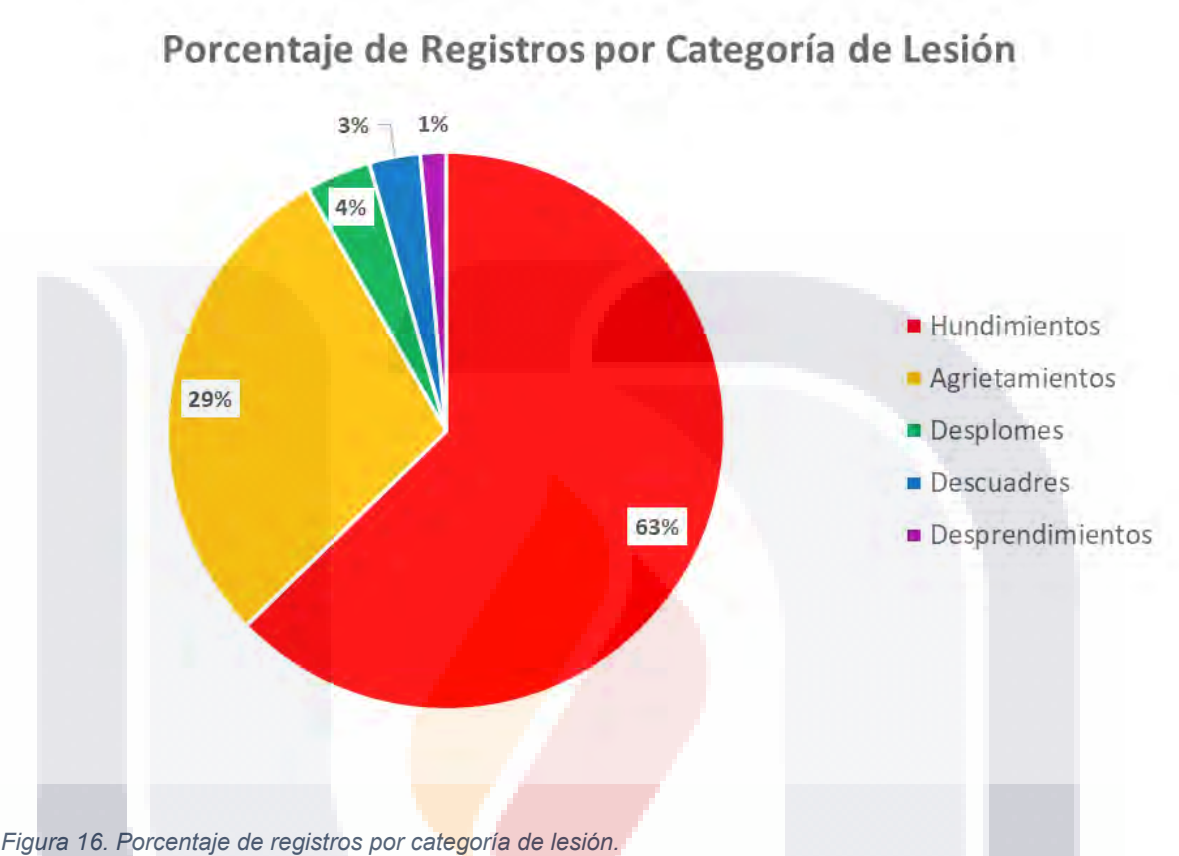
### 5.1.2.2. Datos sobre patologías

En total, se cuentan con 472 registros diferentes de lesiones, las cuales se resumen en la Tabla 7.

Categoría de lesión	Total de registros por categoría	Código	Subtipo de Lesión	Total de registros por subcategoría
Hundimientos	296	H	Hundimientos	296
Agrietamientos	137	AM	Agrietamientos en muros sin considerar los bordes	94
		SSM	Agrietamientos horizontales en muros paralelos al suelo	9
		SMM	Agrietamientos verticales en muros paralelos a los castillos	6
		SLM	Agrietamientos horizontales en muros paralelos la losa	4
		SP	Agrietamientos verticales por separación entre predios	2
		AP	Agrietamientos en pisos	22
Desplomes	18	DM	Desplomes de muros	18
Descuadres	14	DP	Descuadres de puertas	9
		DV	Descuadres de ventanas	4
		DA	Descuadres de aberturas	1
Desprendimientos	7	SVM	Desprendimientos de herrería en marcos de ventanas	2
		SHM	Desprendimientos de herrería en marcos de aberturas	2
		SZM	Desprendimiento de zoclos	3

Tabla 7. Resumen de la cantidad de registros recabados por categoría y por subcategoría de lesión.

Los porcentajes de registros observados por categorías se pueden visualizar en la Figura 16.



Siendo que aproximadamente el 92% de todos los registros recolectados en la vivienda corresponden únicamente a las categorías de hundimiento y agrietamiento.

**5.1.2.2.1. Hundimientos**

Los resultados estadísticos de los hundimientos registrados mediante equipo topográfico pueden resumirse en la Tabla 8.

Hundimientos	
Valor mínimo	99.943 m
Valor máximo	100.451 m
Rango	0.508 m

Media	100.296 m
Mediana	100.300 m
Moda	100.292 m
Desviación estándar	0.075 m
Primer cuartil	100.257 m
Segundo cuartil	100.300 m
Tercer cuartil	100.354 m
Rango intercuartílico	0.097 m
Coeficiente de variación	0.001
Coeficiente de asimetría (sesgo)	-1.331
Coeficiente de curtosis	3.279

*Tabla 8. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de hundimientos registrados.*

Los datos estadísticos registrados sobre los hundimientos muestran que estos se mantienen altamente concentrados en torno a un valor cercano a la cota de 100.30 metros. Esto se evidencia en la cercanía entre la media (100.296 m), la mediana (100.300 m) y la moda (100.292 m), lo que sugiere una distribución central bastante equilibrada y sin desplazamientos importantes hacia ningún extremo.

La variabilidad de los hundimientos es muy baja. El rango total de apenas 0,508 metros, sumado a una desviación estándar de 0,075 metros y a un coeficiente de variación de 0,001, confirma que las diferencias entre los registros son mínimas. Además, el rango intercuartílico, de tan solo 0,097 metros, indica que el 50 % de los valores se concentra en un intervalo sumamente estrecho, reforzando la idea de una gran homogeneidad en los datos.

Respecto a la forma de la distribución (visualizada en la Figura 17), se observa una ligera asimetría negativa, como lo indica el coeficiente de asimetría de  $-1.331$ . Esto implica que existen algunos hundimientos más bajos que se alejan del centro de la distribución, generando una cola más extendida hacia los valores mínimos. Por otro lado, la curtosis, con un valor de 3.279, revela que la distribución es leptocúrtica, es decir, más "picuda" que la distribución normal teórica, con una concentración de datos más marcada en torno a la media y colas ligeramente más pesadas.

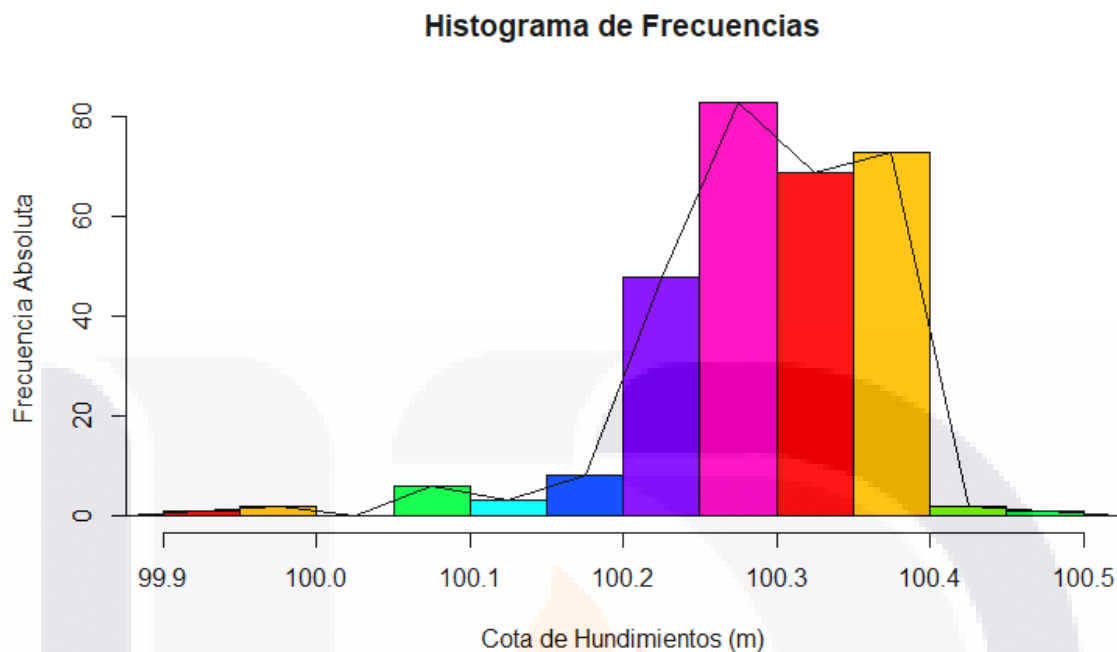


Figura 17. Histograma y polígono de frecuencias de los registros de hundimiento en la vivienda.

Por otra parte, a partir de los datos recabados sobre las cotas de hundimiento se calculó la pendiente generada en la vivienda, la cual transversalmente es de aproximadamente 3.27%, en sentido de la colindancia izquierda hacia la derecha (tomada como base al eje transversal 8). En cambio, longitudinalmente, es de aproximadamente 0.28%, en sentido que va desde el fondo de la vivienda hasta la fachada (tomando como base al eje longitudinal E).

Con base a los datos relativos a las cotas de hundimiento en los extremos en muros (en el centro de los castillos), el hundimiento relativo máximo de un muro es de 18 cm para la vivienda estudiada, y este corresponde al muro en sentido longitudinal ML-21 (el cual se localiza en la cochera).

Considerando la relación entre las cotas de hundimiento de los extremos en muros anterior respecto a la longitud de los muros (medida de centro a centro de castillo), se puede deducir la estadística de los datos respecto a las distorsiones angulares de los muros en la vivienda de estudio, tal y como se muestra en la Tabla 9.

Distorsiones angulares en muros	
Valor mínimo	0.0000 rad
Valor máximo	0.1667 rad
Rango	0.1667 rad
Media	0.0276 rad
Mediana	0.0155 rad
Moda	0.0000 rad
Desviación estándar	0.0336 rad
Primer cuartil	0.0071 rad
Segundo cuartil	0.0155 rad
Tercer cuartil	0.0400 rad
Rango intercuartílico	0.0329 rad
Coeficiente de variación	1.2198
Coeficiente de asimetría (sesgo)	2.1496
Coeficiente de curtosis	5.4707

Tabla 9. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de distorsión angular en muros.

El análisis estadístico de las distorsiones angulares en muros revela información significativa sobre el comportamiento de las estructuras evaluadas. En primer lugar, se observa que la media de las distorsiones es de 0.0276 rad, un valor superior a la mediana de 0.0155 rad, lo que sugiere una distribución sesgada hacia valores mayores. La moda, ubicada en 0.0000 rad, indica que el valor más frecuente registrado corresponde a muros sin distorsión alguna, correspondiendo a 4 de los 48 muros que integran la vivienda. No obstante, el tercer cuartil, con un valor de 0.0400 rad, señala que el 75 % de los datos se encuentra por debajo de este nivel de distorsión, destacando que los valores elevados son relativamente poco comunes.

En términos de variabilidad, el rango total de las distorsiones alcanza los 0.1667 rad, lo cual evidencia la existencia de casos extremos de deformación angular. El muro con la mayor distorsión angular es el muro longitudinal ML-18 (el cual se localiza entre la cochera y el dormitorio 1). La desviación estándar de 0.0336 rad confirma una dispersión considerable en los datos, reforzada por un coeficiente de variación de 1.2198, que indica que la variabilidad relativa es superior al promedio de las distorsiones. Esta alta dispersión sugiere

la necesidad de considerar casos individuales con atención especial, ya que, aunque la mayoría de los muros presentan distorsiones bajas, algunos experimentan deformaciones significativas.

La forma de la distribución (visualizada en la Figura 18) también ofrece información relevante: el coeficiente de asimetría de 2.1496 muestra una marcada inclinación hacia valores positivos, es decir, existen algunos muros con distorsiones mucho mayores que el resto, lo cual eleva la media y la dispersión. A su vez, la curtosis de 5.4707 indica que la distribución es leptocúrtica, caracterizada por una alta concentración de datos en torno a la media, pero también por la presencia de valores extremos más frecuentes de lo que ocurriría en una distribución normal.

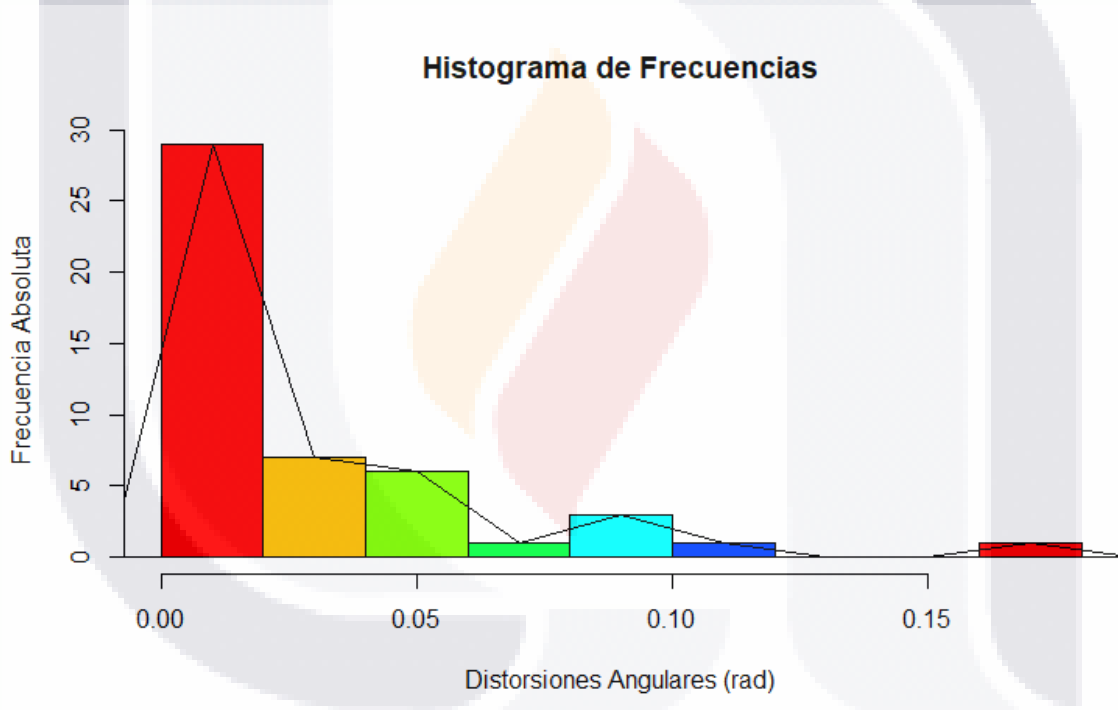


Figura 18. Histograma y polígono de frecuencias de los registros de distorsión angular en muros.

Las curvas de nivel obtenidas con base al registro topográfico mediante estación total se visualizan en la Figura 20.





*Figura 19. Vista general del hundimiento existente en la cochera.*



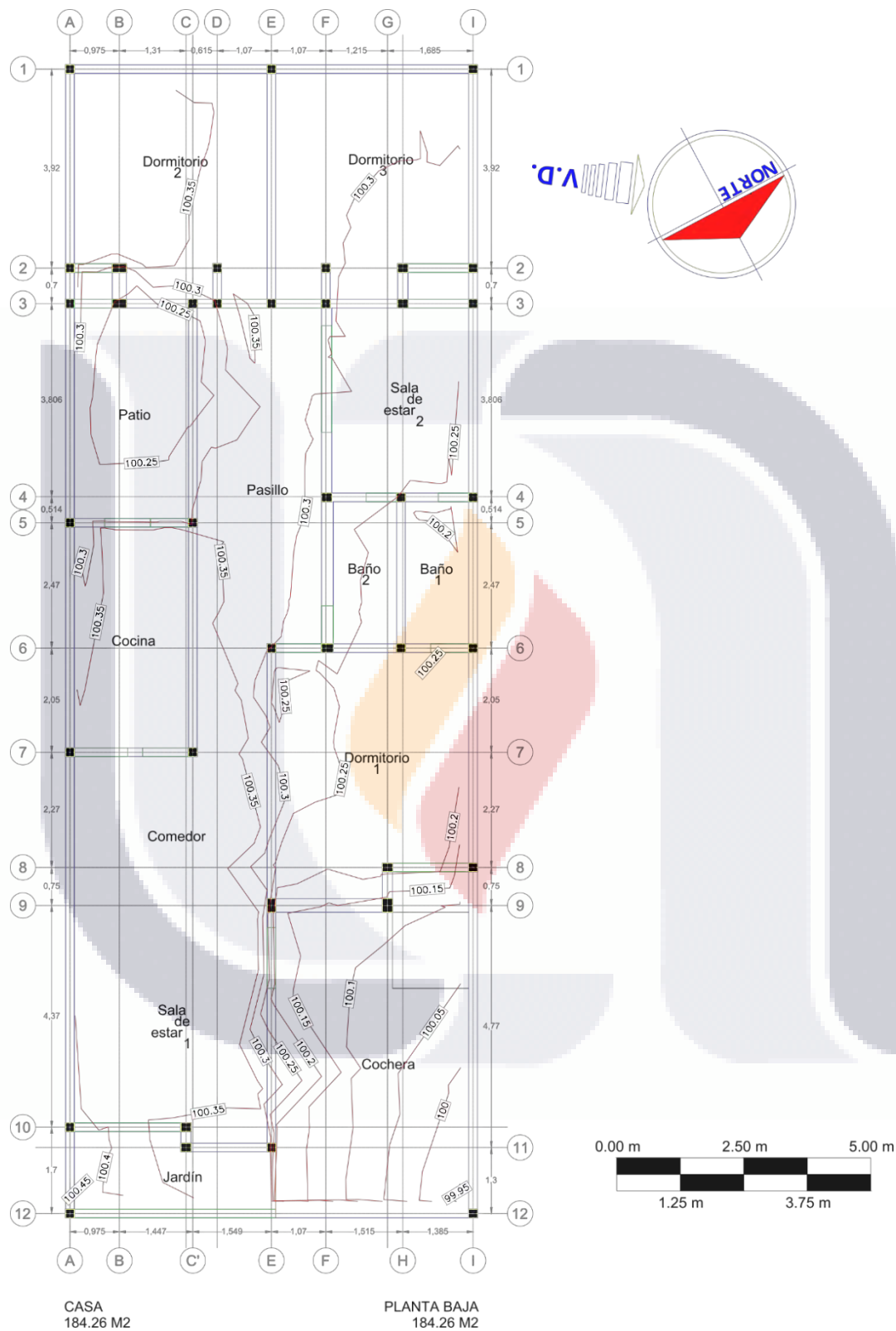


Figura 20. Curvas de nivel obtenidas, mediante el procesamiento de los datos topográficos en CivilCAD 2015, a cada 5 cm.

#### 5.1.2.2.2. Agrietamientos

El análisis estadístico de los datos obtenidos sobre este tipo de lesión, considerando la longitud, el espesor y la inclinación de las grietas según cada subcategoría, se resume en la Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12, respectivamente. Además, de la Figura 21 a Figura 26 se presentan imágenes de las fisuras más destacadas por subcategoría que fueron identificadas en la vivienda.

Los agrietamientos varían en longitud desde los 0.11 m hasta los 8.84 m, con espesores de 0.05 mm a 60 mm.

En el análisis de la longitud de los agrietamientos, se observa que los agrietamientos horizontales en muros paralelos al suelo presentan las mayores longitudes, con un promedio de 3.25 metros y valores que alcanzan hasta 8.84 metros. Además, esta categoría exhibe una alta dispersión en los datos, como lo indican su desviación estándar de 2.49 metros y su amplio rango intercuartílico de 2.45 metros. Esto sugiere una gran variabilidad en el tamaño de estas grietas. De manera similar, los agrietamientos horizontales en muros paralelos a la losa también presentan longitudes considerables, aunque ligeramente menores, con una media de 2.33 metros. En contraste, los agrietamientos verticales en muros paralelos a los castillos y los agrietamientos en pisos muestran longitudes más reducidas, con promedios de 0.98 metros y 0.91 metros respectivamente, además de una variabilidad más controlada, con desviaciones estándar de 0.83 metros y 1.24 metros, respectivamente. Por su parte, los agrietamientos en muros sin considerar los bordes presentan longitudes intermedias (media de 1.21 m) y una distribución relativamente menos dispersa (desviación estándar de 0.87 m).

Respecto al ancho de los agrietamientos, los resultados indican que los agrietamientos horizontales en muros paralelos al suelo son los más gruesos, con un ancho promedio de 16.89 mm y valores máximos de hasta 60 mm. Esta categoría también evidencia una amplia dispersión de los datos, reflejada en su alta desviación estándar (18.47 mm) y un coeficiente de variación cercano a 1.09, lo que denota una notable heterogeneidad en las mediciones. Los agrietamientos en pisos, aunque más delgados en comparación, también presentan anchos considerables (media de 7.59 mm) y alta variabilidad (desviación estándar de 8.29 mm). En contraste, los agrietamientos horizontales en muros paralelos a la losa y los agrietamientos verticales en muros paralelos a castillos muestran anchos medios mucho más reducidos, de 1.25 mm y 2.55 mm respectivamente, y este último presenta una

dispersión significativamente menor, con una desviación estándar 2.34 mm. Cabe destacar que los agrietamientos verticales por separación entre predios presentan un comportamiento más homogéneo, con un ancho medio de 6 mm y muy poca variabilidad (rango de 2 mm).

Finalmente, en relación con la inclinación de los agrietamientos, los datos disponibles corresponden únicamente a agrietamientos en muros sin considerar los bordes. Se identifica una gran variabilidad en las inclinaciones medidas, que oscilan entre 0° (horizontal) y 90° (vertical), con una inclinación media de 39° y una mediana de 42°. La dispersión de los valores, con una desviación estándar de 28.47° y un rango intercuartílico de casi 50°, sugiere que las grietas presentan orientaciones muy diversas, aunque la moda en 0° señala una ligera tendencia hacia grietas horizontales.

Cabe mencionar que cerca del 60% de los registros de los agrietamientos de las paredes corresponden a muros en sentido longitudinal en la vivienda, mientras que aproximadamente el 40% restante se encuentran en muros en sentido transversal. Para una mayor visualización de las patologías registradas de esta subcategoría, se elaboró un modelo 3D de la vivienda con las trazas observadas de agrietamientos, con base al software SketchUp 2019. Las imágenes de dicho modelo se muestran de la Figura 27 a la Figura 29.

En cuanto a los agrietamientos de piso, la traza de cada uno de estos se puede visualizar tal y como se muestra en la Figura 30.

Longitud de agrietamientos					
	Agrietamientos en muros sin considerar los bordes	Agrietamientos horizontales en muros paralelos al suelo	Agrietamientos verticales en muros paralelos a los castillos	Agrietamientos horizontales en muros paralelos a la losa	Agrietamientos en pisos
Valor mínimo	0.11 m	0.17 m	0.30 m	0.63 m	0.13 m
Valor máximo	3.87 m	8.84 m	2.30 m	4.52 m	6.02 m
Rango	3.76 m	8.67 m	2.00 m	3.89 m	5.89 m
Media	1.21 m	3.25 m	0.98 m	2.33 m	0.91 m
Mediana	0.99 m	2.80 m	0.63 m	-	0.59 m
Moda	0.77 m, 0.65 m, 1.31 m, 1.50 m, 3.01 m	2.80 m, 3.75 m	No existe	-	0.20 m
Desviación estándar	0.87 m	2.49 m	0.83 m	-	1.24 m
Primer cuartil	0.59 m	1.50 m	0.32 m	-	0.21 m
Segundo cuartil	0.99 m	2.80 m	0.63 m	-	0.59 m
Tercer cuartil	1.61 m	3.95 m	1.87 m	-	1.06 m
Rango intercuartílico	1.02 m	2.45 m	1.55 m	-	0.85 m
Coefficiente de variación	0.72	0.76	0.84	-	1.36
Coefficiente de asimetría (sesgo)	1.16	1.37	1.05	-	3.62
Coefficiente de curtosis	0.87	3.16	-0.69	-	14.99

Tabla 10. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de longitud de agrietamientos en muros por subcategoría de agrietamiento.

Ancho de agrietamientos						
	Agrietamientos en muros sin considerar los bordes	Agrietamientos horizontales en muros paralelos al suelo	Agrietamientos verticales en muros paralelos a los castillos	Agrietamientos horizontales en muros paralelos a la losa	Agrietamientos verticales por separación entre prelios	Agrietamientos en pisos
Valor mínimo	0.05 mm	1.00 mm	0.50 mm	0.50 mm	5.00 mm	0.50 mm
Valor máximo	20.00 mm	60.00 mm	7.00 mm	2.00 mm	7.00 mm	30.00 mm
Rango	19.95 mm	59.00 mm	6.50 mm	1.50 mm	2.00 mm	29.50 mm
Media	2.22 mm	16.89 mm	2.55 mm	1.25 mm	6.00 mm	7.59 mm
Mediana	1.00 mm	11.00 mm	2.25 mm	-	-	5.00 mm
Moda	1.00 mm	No existe	2.50 mm	-	-	1.00 mm
Desviación estándar	2.82 mm	18.47 mm	2.34 mm	-	-	8.29 mm
Primer cuartil	1.00 mm	3.50 mm	0.73 mm	-	-	1.00 mm
Segundo cuartil	1.00 mm	11.00 mm	2.25 mm	-	-	5.00 mm
Tercer cuartil	2.50 mm	24.00 mm	3.63 mm	-	-	11.50 mm
Rango intercuartílico	1.50 mm	20.50 mm	2.90 mm	-	-	10.50 mm
Coefficiente de variación	1.27	1.09	0.92	-	-	1.09
Coefficiente de asimetría (sesgo)	3.53	1.86	1.73	-	-	1.33
Coefficiente de curtosis	17.15	3.75	3.54	-	-	1.12

Tabla 11. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de espesor de agrietamientos en muros por subcategoría de agrietamiento.

Inclinación de agrietamientos	
	Agrietamientos en muros sin considerar los bordes
Valor mínimo	0.00°
Valor máximo	90.00°
Rango	90.00°
Media	39.13°
Mediana	42.21°
Moda	0.00°
Desviación estándar	28.47°
Primer cuartil	8.64°
Segundo cuartil	42.21°
Tercer cuartil	58.53°
Rango intercuartílico	49.90°
Coeficiente de variación	0.73
Coeficiente de asimetría (sesgo)	0.06
Coeficiente de curtosis	-1.08

Tabla 12. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de inclinación de agrietamientos en muros por subcategoría de agrietamiento.





Figura 21. Agrietamiento de muro sin considerar los bordes sobre eje 9 transversal, ubicada en la cochera. Este agrietamiento destaca por su traza curva prominente.





*Figura 22. Agrietamiento de muro paralelo al suelo en la intersección entre el ejes 2 transversal y D longitudinal, ubicada en el dormitorio 2. Este agrietamiento destaca principalmente por su espesor y porque la dirección de la separación entre el muro y suelo es vertical.*



*Figura 23. Agrietamiento de muro paralelo al castillo en la intersección entre el ejes 6 transversal y A longitudinal, ubicada en el dormitorio 2. Este agrietamiento destaca por su gran espesor.*





*Figura 24. Agrietamiento en muro paralelo a la losa en el eje longitudinal I, ubicado en la cochera. Este agrietamiento destaca por tener el mayor espesor de los agrietamientos de esta subcategoría.*



*Figura 25. Agrietamiento vertical por separación entre predios sobre el eje longitudinal I, en la colindancia derecha de la vivienda estudiada. Este agrietamiento destaca por tener el mayor espesor de los agrietamientos de esta subcategoría.*



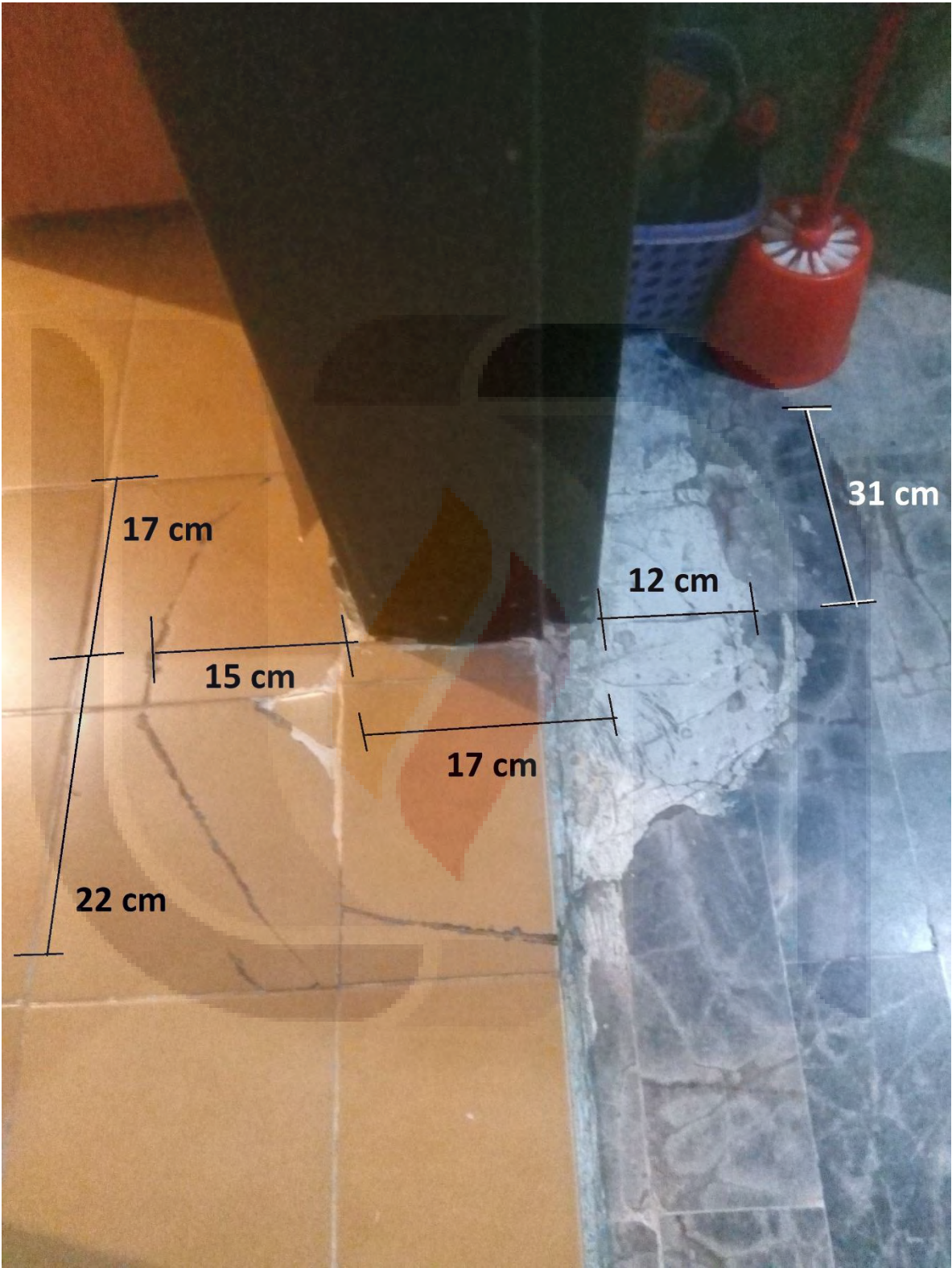


Figura 26. Agrietamiento en suelo en la intersección entre los ejes 6 transversal y H longitudinal, ubicada entre el dormitorio 1 y baño 1. Este agrietamiento destaca debido a su traza circular.

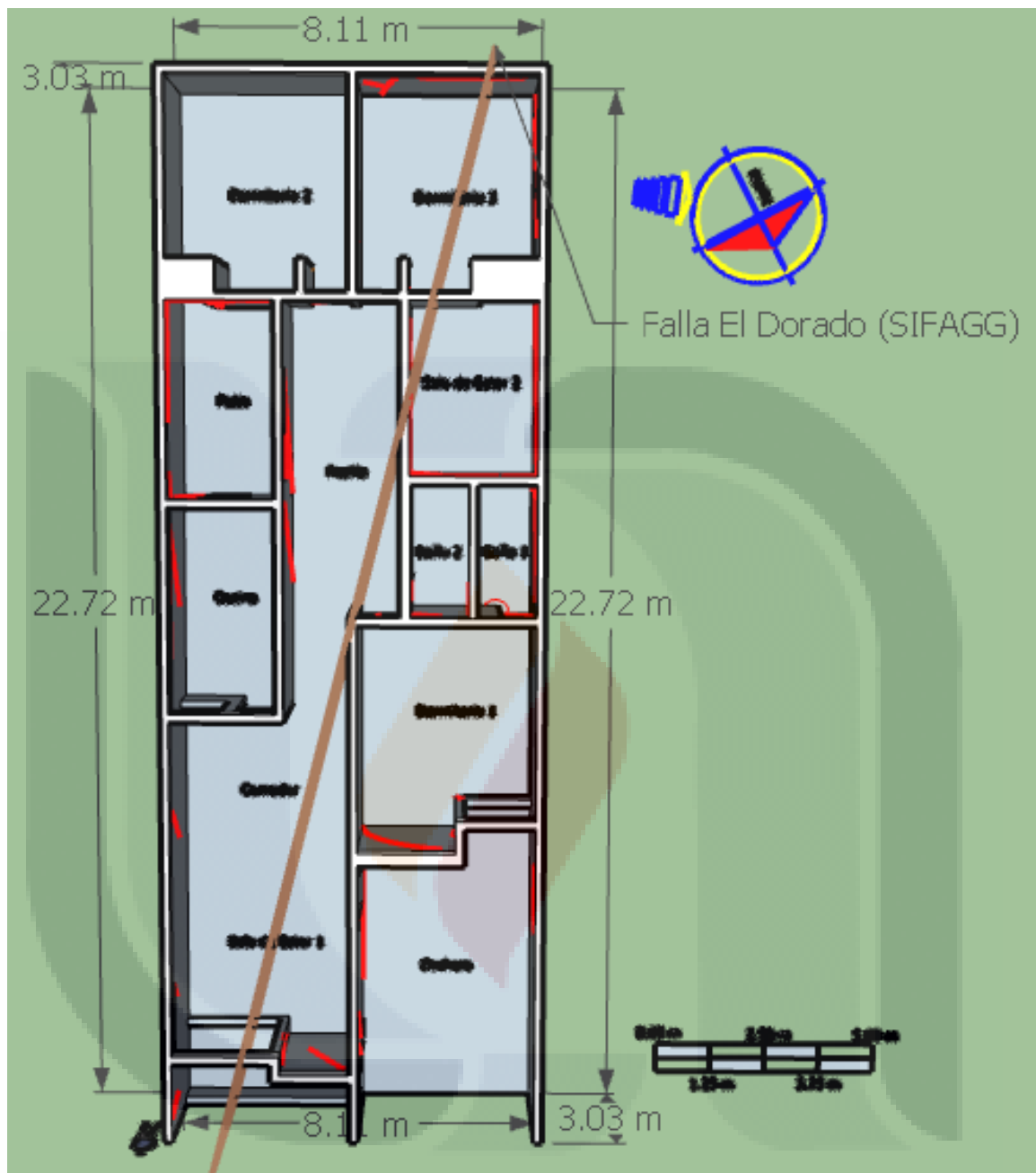


Figura 27. Vista en planta del modelo 3D del caso de estudio con la traza aproximada de la falla geológica presente según SIFAGG.

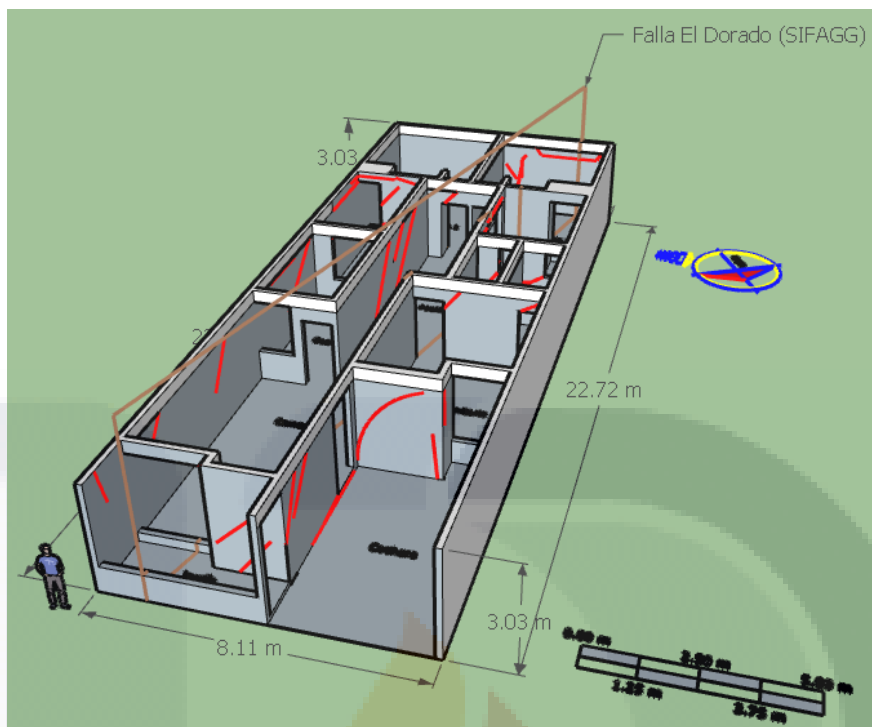


Figura 28. Vista rotada 1 del modelo 3D del caso de estudio con la traza aproximada de la falla geológica presente según SIFAGG.

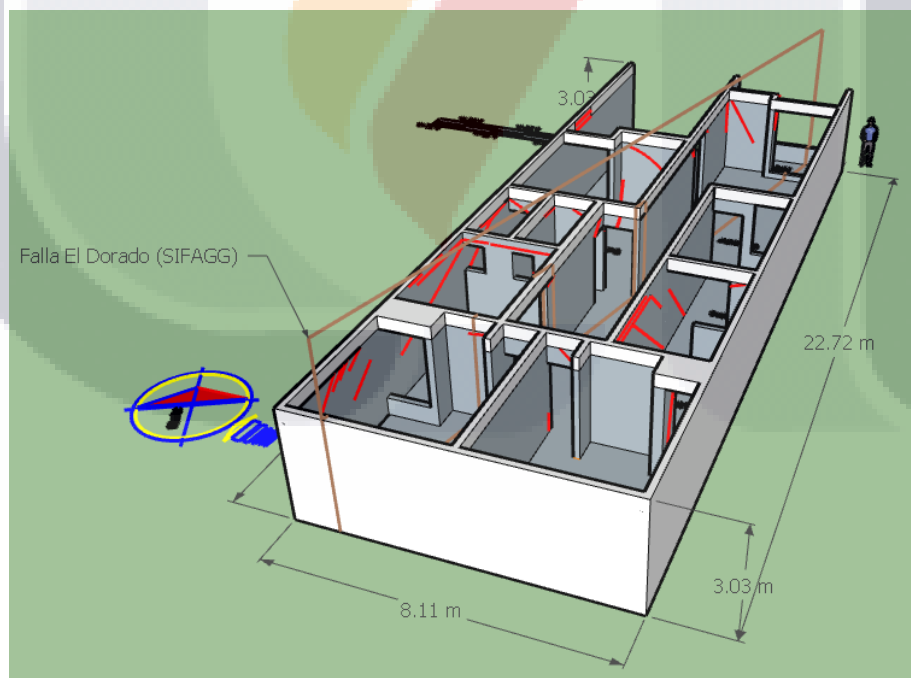


Figura 29. Vista rotada 2 del modelo 3D del caso de estudio con la traza aproximada de la falla geológica presente según SIFAGG.



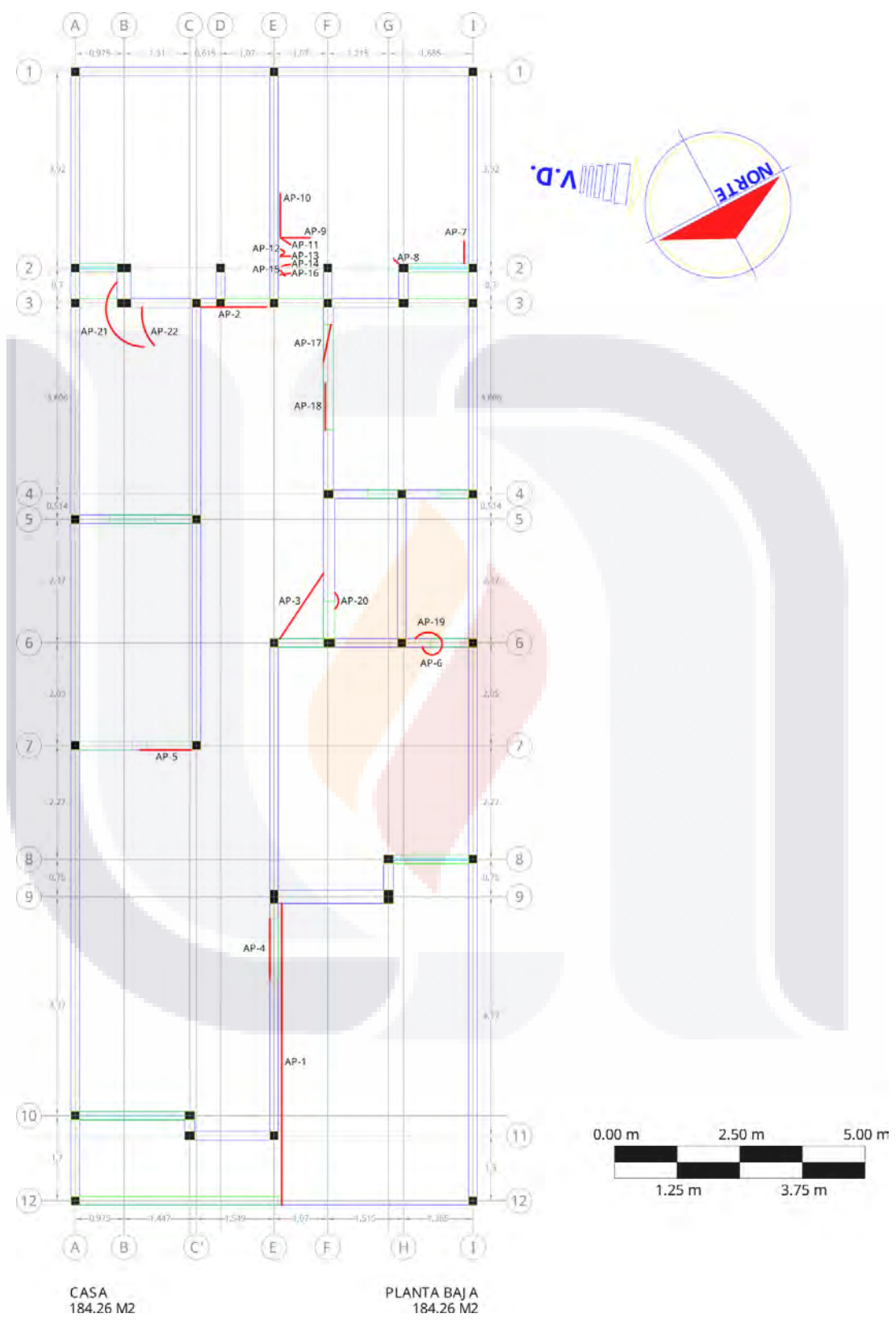


Figura 30. Visualización de los agrietamientos de piso, según el registro de la base de datos.

#### 5.1.2.2.3. Desplomes

Respecto a los datos estadísticos obtenidos sobre los casos registrados de esta patología, el valor más frecuente de clasificación por grado de severidad en los muros inspeccionados es 1, que corresponde a un nivel bajo de daño por desplome.

Por otra parte, el desplome con mayor grado de severidad es el que observa en la Figura 31.



Figura 31. Desplome de muro sobre el eje longitudinal A, ubicado en el dormitorio 2.

#### 5.1.2.2.4. Descuadres

En lo que concierne a los datos recogidos acerca de los casos de esta patología, los valores más frecuentes de clasificación por grado de severidad en las 3 subcategorías de este tipo de lesión (descuadres en puertas, ventanas y aberturas) fueron de 1, correspondientes a un nivel bajo de daño por descuadre. Las máximas clasificaciones de grado de severidad registradas por subcategoría fueron de 2, 3 y 1 para los descuadres de puertas, ventanas y aberturas, respectivamente.

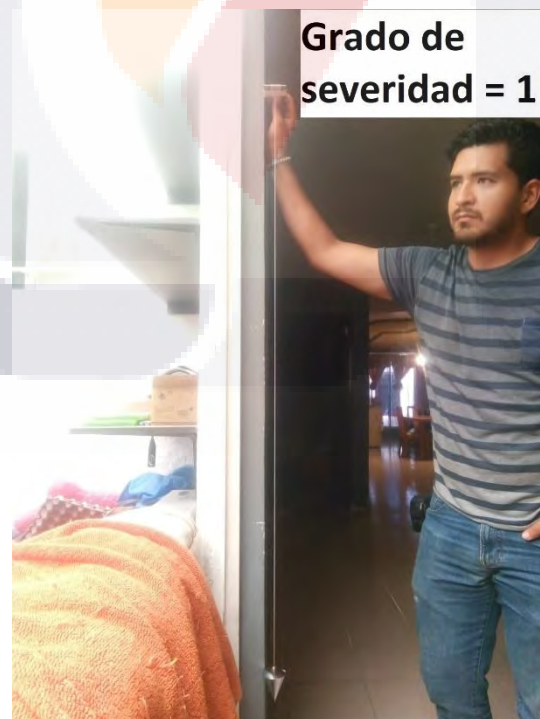
Algunas fotografías en donde se muestran algunos de estos descuadres máximos registrados se observan de la Figura 32 a Figura 34.



Figura 32. Descuadre de puerta ubicada entre el dormitorio 1 y baño 1.



*Figura 33. Descuadre de ventana ubicado entre el dormitorio 2 y el patio.*



*Figura 34. Descuadre de abertura ubicado entre el pasillo y la sala de estar 2.*

5.1.2.2.5. Desprendimientos

En la Tabla 13 y Tabla 14 se resume el análisis estadístico de las dimensiones (longitud y anchura, respectivamente) de los desprendimientos, agrupados por subcategoría. Adicionalmente, de la Figura 35 a Figura 37 se muestran ejemplos destacados de estos daños, clasificados según su tipo, hallados en la vivienda.

Longitud de separaciones			
	Desprendimientos de herrería en marcos de ventanas	Desprendimientos de herrería en marcos de aberturas	Desprendimientos de zoclos
Valor mínimo	1.50 m	2.10 m	3.06 m
Valor máximo	1.86 m	2.50 m	5.59 m
Rango	0.36 m	0.40 m	2.53 m
Media	1.68 m	2.30 m	4.27 m

Tabla 13. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos de la longitud de las separaciones de los desprendimientos por subcategoría de desprendimiento.

Anchura de separaciones			
	Desprendimientos de herrería en marcos de ventanas	Desprendimientos de herrería en marcos de aberturas	Desprendimientos de zoclos
Valor mínimo	6.00 mm	2.00 mm	1.00 mm
Valor máximo	10.00 mm	4.00 mm	3.00 mm
Rango	4.00 mm	2.00 mm	2.00 mm
Media	8.00 mm	3.00 mm	1.67 mm

Tabla 14. Medidas de tendencia central, variabilidad y posición de los datos del ancho de las separaciones de los desprendimientos por subcategoría de desprendimiento.

En cuanto a la longitud de las separaciones de los desprendimientos, se observan comportamientos diferenciados entre las categorías analizadas. Las longitudes de separación de la herrería de marcos de ventanas presentan una media de aproximadamente 1.68 metros. La variabilidad es reducida, con un rango total de apenas



0.36 metros. Esto indica que las longitudes de las separaciones en esta categoría son bastante homogéneas, con pocas diferencias entre los valores registrados.

En el caso de las longitudes de separación de la herrería en marcos de aberturas, la situación es similar. La longitud media es de 2.30 metros, mientras que el rango, de 0.40 metros. Este comportamiento confirma que las longitudes de separaciones en aberturas tienen dimensiones muy consistentes, con una dispersión mínima entre los distintos casos observados.

Por otro lado, las longitudes de separación en zoclos presentan características distintas. La longitud media es considerablemente mayor, alcanzando los 4.27 metros. El rango de 2.53 metros muestra una variabilidad más amplia en comparación con las otras categorías.

Respecto la anchura de las separaciones, también se observan patrones diferenciados. En las anchuras de separación de herrería en marcos de ventanas, el ancho medio es de 8 milímetros. La variabilidad es moderada, con un rango de 4 milímetros. Esto sugiere que, aunque hay cierta dispersión, los anchos se mantienen relativamente consistentes en torno a la media.

En cuanto a las anchuras de separación de herrería en los marcos de aberturas, los anchos tienen un espesor medio de 3 milímetros, con un rango pequeño de solo 2 milímetros (indicando poca variabilidad en los registros).

Finalmente, en los zoclos, los anchos de separación muestran un espesor medio de 1.67 milímetros y un rango pequeño de 2 milímetros (al igual que el caso anterior, esto indica poca variabilidad en los registros).



*Figura 35. Desprendimiento de herrería de marco ventana ubicado entre el dormitorio 3 y la sala de estar 2. Este desprendimiento destaca por ser el uno de los registros con mayor espesor registrados de esta subcategoría.*





*Figura 36. Desprendimiento de herrería de marco de abertura ubicado entre el pasillo y la sala de estar 2. Este desprendimiento destaca por ser el uno de los registros con mayor espesor registrados de esta subcategoría.*



*Figura 37. Desprendimiento de zoclo sobre el eje longitudinal I, ubicado en el dormitorio 1. Este desprendimiento destaca por ser el uno de los registros con mayor espesor registrados de esta subcategoría.*

## 5.2. Determinación de la confiabilidad por el procedimiento de primer orden, segundo momento centrado en valores medios a partir de las distorsiones angulares de muros

### 5.2.1. Estado límite último

#### 5.2.1.1. Confiabilidad de muros y de la vivienda

Con base al análisis efectuado para la vivienda, la confiabilidad de cada muro de mampostería obtenido es la que se detalla en la Tabla 15, registrando un rango amplio de 14.78 en el índice de confiabilidad ( $\beta$ ), con valores extremos entre -13.56 y 1.22, lo que evidencia una alta variabilidad en los resultados. En cuanto a la probabilidad de falla ( $p_f$ ), los valores oscilan entre 0.11 y 1.00 (rango: 0.89).

Muro	$\beta$	$p_f$
ML-01	-0.14	0.60
ML-02	-3.07	1.00
ML-03	-5.34	1.00
ML-04	-1.71	0.96
ML-05	-2.47	0.99
ML-06	0.89	0.19
ML-07	-3.40	1.00
ML-08	-0.74	0.90
ML-09	-5.34	1.00
ML-10	-0.78	0.78
ML-11	-3.40	1.00
ML-12	-2.43	0.99
ML-13	-4.15	1.00
ML-14	1.22	0.11
ML-15	-0.47	0.68
ML-16	-1.02	0.85
ML-17	0.33	0.74
ML-18	-8.02	1.00
ML-19	0.46	0.33
ML-20	0.33	0.74
ML-21	-13.56	1.00
ML-22	-7.29	1.00

ML-23	0.46	0.33
ML-24	-3.81	1.00
ML-25	0.33	0.74
ML-26	-0.97	0.83
MT-01	-2.94	1.00
MT-02	-9.17	1.00
MT-03	-8.25	1.00
MT-04	-7.59	1.00
MT-05	0.20	0.44
MT-06	-3.22	1.00
MT-07	-2.09	0.98
MT-08	0.64	0.52
MT-09	0.20	0.44
MT-10	-3.02	1.00
MT-11	-1.22	0.89
MT-12	-6.99	1.00
MT-13	-1.19	0.89
MT-14	-2.57	1.00
MT-15	-2.29	0.99
MT-16	-1.36	0.92
MT-17	-1.16	0.88
MT-18	-0.29	0.67
MT-19	-6.06	1.00
MT-20	-0.29	0.67
MT-21	-0.94	0.83
MT-22	-0.94	0.83

Tabla 15. Valor del índice de confiabilidad  $\beta$  y de la probabilidad de falla asociada  $p_f$  para cada uno de los muros identificados del inmueble estudiado, bajo la consideración de variables independientes en la ecuación de desempeño.

La probabilidad de que sistema alcance el estado límite último, bajo las consideraciones establecidas de análisis, se encuentra aproximadamente entre 0.000366% y 11.26%, bajo los escenarios optimista y pesimista respectivamente.

### 5.2.1.2. Análisis de sensibilidad

#### 5.2.1.2.1. Escenario optimista: completa independencia entre muros

En cuanto a la evolución de la probabilidad de falla de la vivienda resultante conforme al aumento de las variables de la ecuación de estado límite, que se puede detallar en la Figura 38, se puede observar que existe un comportamiento que asemeja a una curva exponencial de aumento y decaimiento conforme aumenta la variable del hundimiento diferencial en el muro ( $\Delta S$ ) y la longitud del muro ( $L_m$ ), respectivamente; mientras que las variable de la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ) parece tener un decaimiento lineal conforme aumenta dicha variable.

Aumentar la longitud del muro ( $L_m$ ) un 30% hace que la probabilidad de falla de la vivienda pase de  $3.66 \times 10^{-6}$  a  $5.43 \times 10^{-9}$  (una disminución relativa de aproximadamente 99.85% respecto al estado original); hacerlo para la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ) hace que pase de  $3.66 \times 10^{-6}$  a  $2.48 \times 10^{-6}$  (una disminución relativa de aproximadamente 32.18% respecto al estado original); y aplicarlo al hundimiento diferencial en el muro ( $\Delta S$ ) hace que pase de  $3.66 \times 10^{-6}$  a  $1.19 \times 10^{-4}$  (un aumento relativo de aproximadamente 3145.82% respecto al estado original).

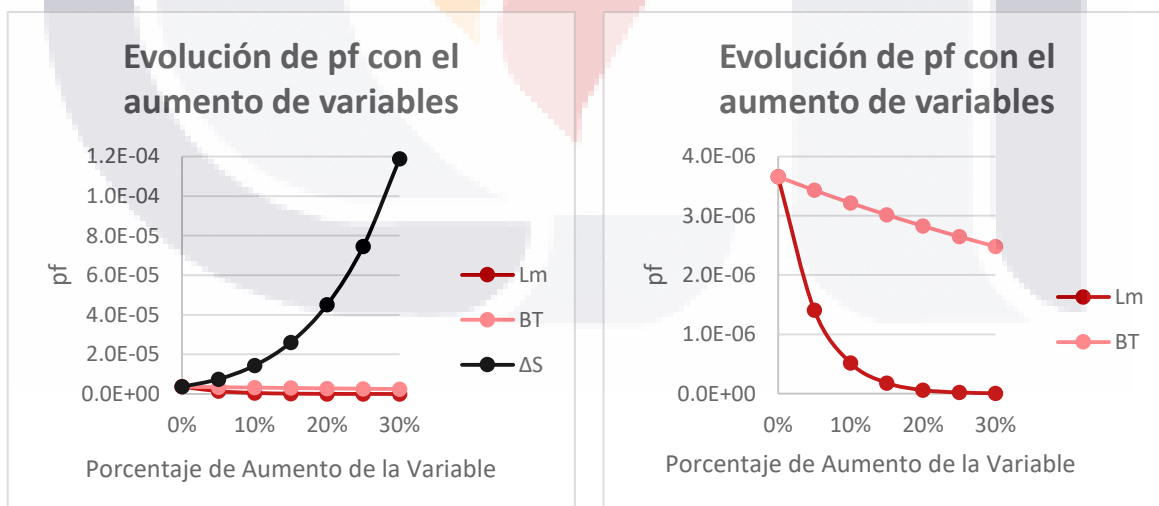


Figura 38. Gráfico de evolución de la probabilidad de falla de la vivienda conforme el aumento porcentual de las variables presentes en la ecuación de desempeño bajo el escenario optimista de análisis, considerando el estado límite último ( $L_m$  = longitud del muro,  $B_T$  = dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería,  $\Delta S$  = hundimiento diferencial en el muro). La gráfica de la izquierda muestra el comportamiento de todas las variables, mientras que la derecha es una ampliación de gráfico anterior, para las variables  $L_m$  y  $B_T$  exclusivamente.

Por tanto, las variables más críticas en el análisis del caso de estudio, ordenadas por la mayor variación de la probabilidad de falla en la vivienda, son la subsidencia diferencial en el muro ( $\Delta S$ ), seguida de la longitud de la mampostería ( $L_m$ ) y, por último, de la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ).

#### **5.2.1.2.2. Escenario pesimista: completa dependencia entre muros**

En cuanto a la evolución de la probabilidad de falla de la vivienda resultante conforme al aumento de las variables de la ecuación de estado límite, que se puede detallar en la Figura 39, se puede observar que existe un comportamiento que asemeja a una curva lineal de aumento conforme aumenta la variable del hundimiento diferencial en el muro ( $\Delta S$ ), y a una curva lineal de decaimiento conforme aumentan las variables de la longitud del muro ( $L_m$ ) y la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ).

Aumentar la longitud del muro ( $L_m$ ) un 30% hace que la probabilidad de falla de la vivienda pase de 0.1126 a 0.0329 (una disminución relativa de aproximadamente 70.78% respecto al estado original); hacerlo para la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ) hace que pase de 0.1126 a 0.1086 (una disminución relativa de aproximadamente 3.55% respecto al estado original); y aplicarlo al hundimiento diferencial en el muro ( $\Delta S$ ) hace que pase de 0.1126 a 0.1742 (un aumento relativo de aproximadamente 54.69% respecto al estado original).

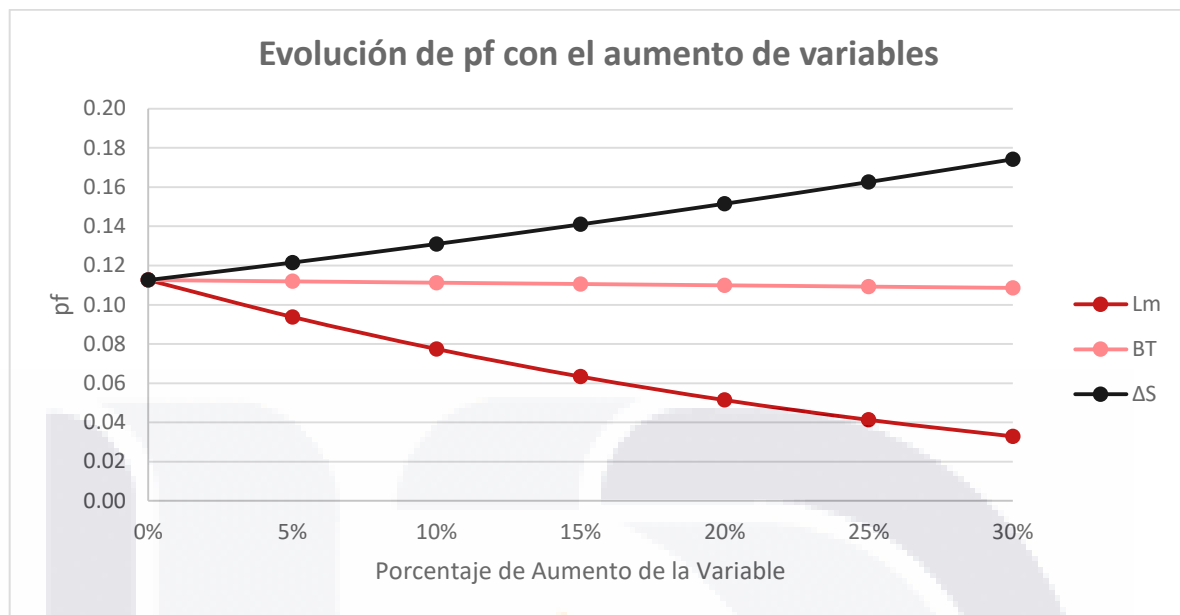


Figura 39. Gráfico de evolución de la probabilidad de falla de la vivienda conforme el aumento porcentual de las variables presentes en la ecuación de desempeño bajo el escenario pesimista de análisis, considerando el estado límite último ( $L_m$  = longitud del muro,  $B_T$  = dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería,  $\Delta S$  = hundimiento diferencial en el muro).

Por tanto, las variables más críticas en el análisis del caso de estudio, ordenadas por la mayor variación de la probabilidad de falla en la vivienda, son la longitud de la mampostería ( $L_m$ ), seguida de la subsidencia diferencial en el muro ( $\Delta S$ ) y, por último, de la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ).

## 5.2.2. Estado límite de servicio

### 5.2.2.1. Confiabilidad de muros y de la vivienda

Con base al análisis efectuado para la vivienda, la confiabilidad de cada muro de mampostería obtenido es la que se detalla en la Tabla 16. En relación con el índice  $\beta$ , se observa un amplio rango de variación (16.23), con valores extremos que oscilan entre -16.14 (mínimo) y 0.09 (máximo), lo que evidencia una dispersión significativa en los niveles de confiabilidad. Por otro lado, la probabilidad de falla ( $p_f$ ) en los muros oscila entre 0.79 y 1.00 (rango: 0.21).



Muro	$\beta$	$p_f$
ML-01	-0.78	0.92
ML-02	-5.86	1.00
ML-03	-7.04	1.00
ML-04	-3.34	1.00
ML-05	-2.73	1.00
ML-06	-0.58	0.82
ML-07	-3.66	1.00
ML-08	-0.89	0.98
ML-09	-7.04	1.00
ML-10	-2.41	0.99
ML-11	-3.66	1.00
ML-12	-4.28	1.00
ML-13	-6.06	1.00
ML-14	-0.52	0.79
ML-15	-1.63	0.97
ML-16	-2.55	1.00
ML-17	0.06	0.95
ML-18	-8.31	1.00
ML-19	-0.67	0.86
ML-20	0.06	0.95
ML-21	-16.14	1.00
ML-22	-8.92	1.00
ML-23	-0.67	0.86
ML-24	-5.25	1.00
ML-25	0.06	0.95
ML-26	-2.44	0.99
MT-01	-3.57	1.00
MT-02	-10.12	1.00
MT-03	-9.10	1.00
MT-04	-8.29	1.00
MT-05	-0.80	0.93

MT-06	-3.67	1.00
MT-07	-2.66	1.00
MT-08	0.09	0.93
MT-09	-0.79	0.93
MT-10	-3.61	1.00
MT-11	-1.76	0.99
MT-12	-7.39	1.00
MT-13	-1.73	0.98
MT-14	-2.75	1.00
MT-15	-2.74	1.00
MT-16	-1.81	0.99
MT-17	-1.73	0.98
MT-18	-0.86	0.96
MT-19	-6.46	1.00
MT-20	-0.86	0.96
MT-21	-2.44	0.99
MT-22	-2.44	0.99

Tabla 16. Valor del índice de confiabilidad  $\beta$  y de la probabilidad de falla asociada  $p_f$  para cada uno de los muros identificados del inmueble estudiado, bajo las consideraciones de variables independientes en la ecuación de desempeño.

La probabilidad de que sistema alcance el estado límite de servicio, bajo las consideraciones establecidas de análisis, se encuentra aproximadamente entre 24.62% y 78.90%, bajo los escenarios optimista y pesimista respectivamente.

#### 5.2.2.2. Análisis de sensibilidad

##### 5.2.2.2.1. Escenario optimista: completa independencia entre muros

En cuanto a la evolución de la probabilidad de falla de la vivienda resultante conforme al aumento de las variables de la ecuación de estado límite, que se puede detallar en la Figura 40, se puede observar que existe una curva lineal de aumento conforme aumentan las variables del hundimiento diferencial en el muro ( $\Delta S$ ) y de la longitud total de las aberturas presentes en el muro ( $L_{AT}$ ), mientras que las variables de la dimensión total de sección de

los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ) y de la longitud del muro ( $L_m$ ) parecieran tener un comportamiento lineal de decaimiento conforme se da dicho aumento.

Aumentar la longitud del muro ( $L_m$ ) un 30% hace que la probabilidad de falla de la vivienda pase de 0.246 a 0.153 (una disminución relativa de aproximadamente 37.87% respecto al estado original); hacerlo para la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ) hace que pase de 0.246 a 0.236 (una disminución relativa de aproximadamente 4.05% respecto al estado original); imponerlo a la longitud total de las aberturas presentes en el muro ( $L_{AT}$ ) hace que pase de 0.246 a 0.261 (un aumento relativo de aproximadamente 5.88% respecto al estado original); y aplicarlo al hundimiento diferencial en el muro ( $\Delta S$ ) hace que pase de 0.246 a 0.359 (un aumento relativo de aproximadamente 45.89% respecto al estado original).

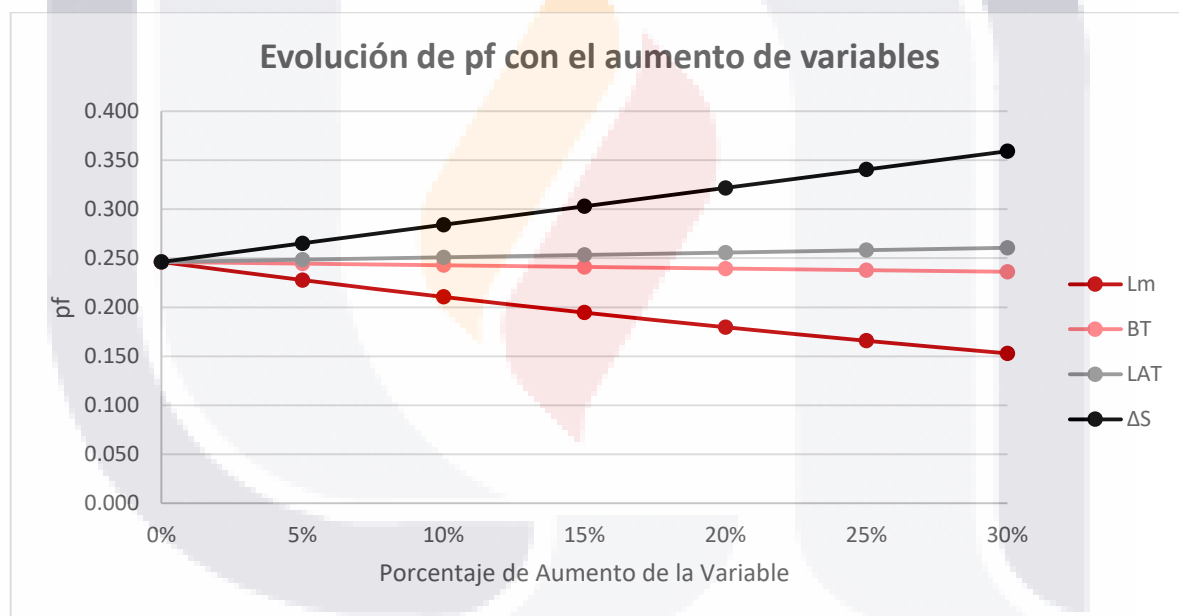


Figura 40. Gráfico de evolución de la probabilidad de falla de la vivienda conforme el aumento porcentual de las variables presentes en la ecuación de desempeño bajo el escenario optimista de análisis, considerando el estado límite de servicio ( $L_m$  = longitud del muro,  $B_T$  = dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería,  $\Delta S$  = hundimiento diferencial en el muro,  $L_{AT}$  = longitud total de las aberturas presentes en el muro).

Por tanto, las variables más críticas en el análisis del caso de estudio, ordenadas por la mayor variación de la probabilidad de falla en la vivienda, son la subsidencia diferencial en el muro ( $\Delta S$ ), seguida de la longitud de la mampostería ( $L_m$ ), la longitud total de las aberturas

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

presentes en el muro ( $L_{AT}$ ) y, por último, de la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ).

#### **5.2.2.2.2. Escenario pesimista: completa dependencia entre muros**

En cuanto a la evolución de la probabilidad de falla de la vivienda resultante conforme al aumento de las variables de la ecuación de estado límite, que se puede detallar en la Figura 41, se puede observar que existe una curva lineal de aumento conforme aumentan las variables del hundimiento diferencial en el muro ( $\Delta S$ ) y de la longitud total de las aberturas presentes en el muro ( $L_{AT}$ ), mientras que las variables de la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ) y de la longitud del muro ( $L_m$ ) parecieran tener un comportamiento lineal de decaimiento conforme se da dicho aumento.

Aumentar la longitud del muro ( $L_m$ ) un 30% hace que la probabilidad de falla de la vivienda pase de 0.7890 a 0.7286 (una disminución relativa de aproximadamente 7.66% respecto al estado original); hacerlo para la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ) hace que pase de 0.7890 a 0.7869 (una disminución relativa de aproximadamente 0.26% respecto al estado original); imponerlo a la longitud total de las aberturas presentes en el muro ( $L_{AT}$ ) hace que pase de 0.7890 a 0.7890 (sin cambios relativos respecto al estado original); y aplicarlo al hundimiento diferencial en el muro ( $\Delta S$ ) hace que pase de 0.7890 a 0.8409 (un aumento relativo de aproximadamente 6.58% respecto al estado original).

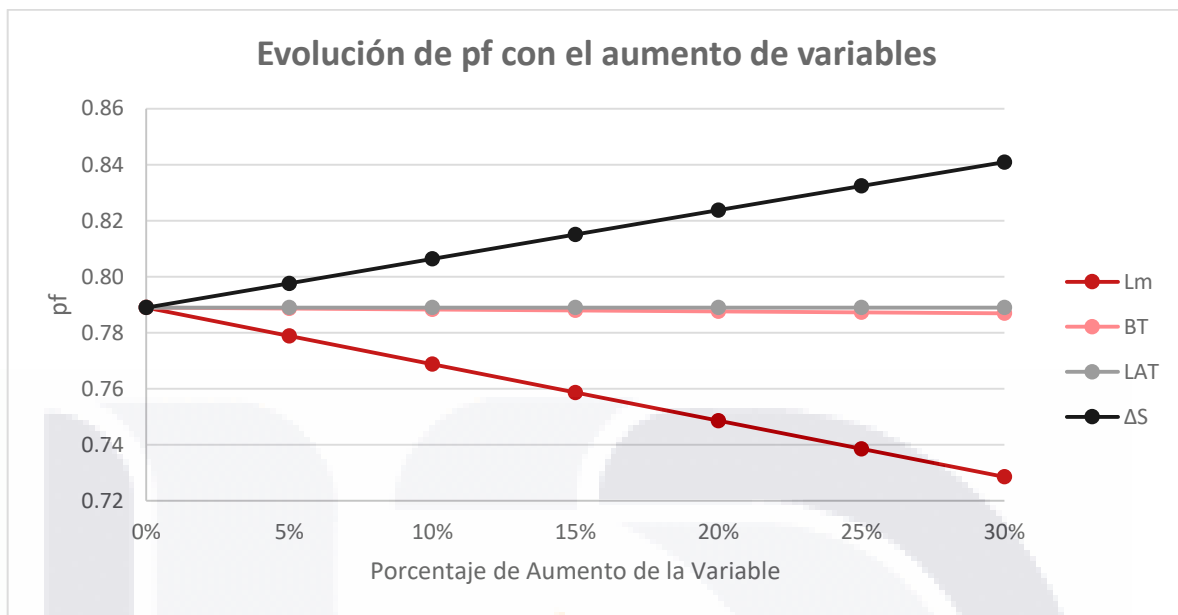


Figura 41. Gráfico de evolución de la probabilidad de falla de la vivienda conforme el aumento porcentual de las variables presentes en la ecuación de desempeño bajo el escenario pesimista de análisis, considerando el estado límite de servicio ( $L_m$  = longitud del muro,  $BT$  = dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería,  $\Delta S$  = hundimiento diferencial en el muro,  $LAT$  = longitud total de las aberturas presentes en el muro).

Por tanto, las variables más críticas en el análisis del caso de estudio, ordenadas por la mayor variación de la probabilidad de falla en la vivienda, son la longitud de la mampostería ( $L_m$ ), seguida de la subsidencia diferencial en el muro ( $\Delta S$ ), la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería ( $B_T$ ) y, por último, de la longitud total de las aberturas presentes en el muro ( $L_{AT}$ ).

## CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La evaluación estructural de la vivienda mostró que el 79% de los muros analizados presentan una distorsión angular igual o superior a 0.005 radianes debido a la subsidencia diferencial del terreno. Este nivel de deformación, según la literatura especializada, sería suficiente para inducir falla por cortante en muros de mampostería confinada (Flores, 1995). Sin embargo, la inspección visual reveló que, aunque los muros presentan agrietamientos severos y deformaciones significativas, no existe evidencia de un colapso inminente. Este comportamiento puede explicarse por la ductilidad que proporciona el confinamiento de los castillos y dalas, que incrementan la rigidez del sistema estructural y actúan como refuerzo adicional, tal y como se menciona en S. Alcocer (1997). En este sentido, aunque la mampostería pueda haber alcanzado su capacidad de resistencia al cortante, el sistema global permanece estable debido al desempeño de los elementos de confinamiento. Además, el hecho de que la vivienda sea de un solo nivel reduce las demandas por carga vertical en los muros, limitando las posibilidades de inestabilidad global o colapso progresivo.

En cuanto a los agrietamientos observados en muros, las causas principales parecen ser la acción combinada de cortante derivada de la subsidencia diferencial y de la compresión producto del peso propio de los elementos constructivos. Los agrietamientos inclinados corresponden principalmente a esfuerzos cortantes, mientras que las fisuras verticales en las esquinas y centros de los muros sugieren compresión (INIFED, 2021; Soto, 2008). Sin embargo, se identificaron patrones de agrietamiento que no se ajustan completamente a estos mecanismos. Algunos de ellos parecen estar relacionados con la ubicación de ductos eléctricos, hidráulicos o pluviales, indicando que las instalaciones introdujeron debilidades en los muros. Por otro lado, los agrietamientos en muros paralelos a los castillos también sugieren posibles errores constructivos, como la falta de dentado en las uniones entre mampostería y castillos. Esto debilita la interacción entre los elementos estructurales y reduce la capacidad del sistema para resistir esfuerzos inducidos por subsidencia.

Estos resultados destacan la importancia de considerar tanto las características geométricas y materiales de la vivienda como los procesos constructivos en el análisis estructural. Aunque el confinamiento de los muros ha evitado un colapso estructural, la severidad de los agrietamientos sugiere que las medidas de mitigación de daños, como el reforzamiento de los muros y la corrección de deficiencias constructivas, son esenciales



para garantizar la seguridad a largo plazo de la vivienda frente a los efectos de la subsidencia diferencial.

Respecto al análisis de confiabilidad estructural en los muros de la vivienda, si bien existe una alta variabilidad de resultados en cuanto al índice beta y la probabilidad de falla tanto en el estado límite último como en el estado límite de servicio, individualmente los muros presentan una tendencia a alcanzar ambos estados límite (con medianas del índice de confiabilidad de -1.54 y -2.60 y probabilidad de falla cercanos al 94 y 100%, para los estados límites de falla y de servicio, respectivamente). No obstante, al considerar la confiabilidad de la vivienda en su conjunto, se incrementa el índice de confiabilidad y se reduce la probabilidad de falla para ambos estados límite (con probabilidades de falla dentro del intervalo aproximado entre 0.000366% y 11.26% para el estado límite último, y del intervalo aproximado entre 24.62% y 78.90% para el estado límite de servicio). En este sentido, estos resultados de la confiabilidad global coinciden con el comportamiento esperado de sistemas en paralelo con varios elementos trabajando a la vez (Birolini, 2007); donde la probabilidad de falla del sistema siempre es menor o igual a la de alguno de sus elementos.

Por otra parte, el análisis de sensibilidad considerando el caso optimista muestra que, tanto en el estado límite último como de servicio, el hundimiento diferencial presente en los muros de mampostería es la variable más importante en el estudio de la confiabilidad estructural de la vivienda, ya que mostró el mayor incremento de la probabilidad de falla conforme se dio el aumento máximo del 30% de esta variable (con un aumento relativo de la probabilidad de falla de aproximadamente un 3145.82% y 45.89% respecto al estado original, para los estados límites último y de servicio, correspondientemente). La siguiente variable más importante con el aumento del 30% es la longitud de mampostería (mostrando una disminución relativa aproximada del 99.85% y 37.87% respecto al estado original, para los estados límites último y de servicio, correspondientemente), seguida de la longitud total de las aberturas presentes en el muro (con un aumento relativo de aproximadamente 5.88% respecto al estado original, sólo en el estado límite de servicio) y finalmente la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería (con una disminución relativa de aproximadamente 32.18% y 4.05% respecto al estado original, para los estados límites último y de servicio, correspondientemente).

La razón de importancia de estas variables anteriormente comentadas parece residir en la formulación de las ecuaciones de desempeño de los estados límite último y de servicio, ya que se puede observar que las variables más críticas son las que están multiplicadas por el mayor coeficiente numérico, haciendo que sean más proclives a aumentar o disminuir la confiabilidad global de la vivienda ante la presencia de pequeños cambios en los registros de las mediciones efectuadas en campo.

Es importante notar que, en el estado límite de servicio, la variable de la longitud total de las aberturas presentes en el muro sea más crítica que la variable de la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería para el caso de estudio. Esto, aunque no se ajusta a la explicación proporcionada en el anterior párrafo, podría deberse a que si bien no todos los muros en la vivienda estudiada tienen aberturas, lo cierto es que las dimensiones de las aberturas paralelas a la longitud del muro son mayores que las de los castillos en la misma dirección, haciendo que su importancia se compense y sea más sustancial en general para el caso de estudio.

En cuanto al análisis de sensibilidad considerando el caso pesimista, tanto en el estado límite último como de servicio, la longitud de la mampostería es la variable más importante en el estudio de la confiabilidad estructural de la vivienda, ya que mostró la mayor disminución de la probabilidad de falla el sistema conforme se dio el aumento máximo del 30% de esta variable (mostrando una disminución relativa de la probabilidad de falla aproximadamente del 70.78% y 7.66% respecto al estado original, para los estados límites último y de servicio, correspondientemente). La siguiente variable con mayor importancia al aumentar el mismo porcentaje, es el hundimiento diferencial presente en los muros de mampostería (aumentando relativamente en un 54.69% y 6.58% aproximadamente, respecto al estado original, para los estados límites último y de servicio, correspondientemente), seguida de la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería (con una disminución relativa de aproximadamente 3.55% y 0.26% respecto al estado original, para los estados límites último y de servicio, correspondientemente) y finalmente la longitud total de las aberturas presentes en el muro (sin cambios relativos respecto al estado original, sólo en el estado límite de servicio).

La razón de importancia de estas variables anteriormente comentadas parece residir en las características específicas del muro más seguro de la vivienda en combinación con la formulación de las ecuaciones de desempeño de los estados límite último y de servicio. Aunada a la explicación ofrecida para el caso optimista de análisis de sensibilidad comentada en párrafos anteriores respecto a la relación entre los coeficientes numéricos de las variables aleatorias y la importancia de dichas variables, es importante resaltar que la probabilidad de falla del muro más seguro corresponde a la probabilidad de falla de la vivienda como sistema (dadas las fórmulas para la estimación de esa probabilidad considerando que todos los muros están perfectamente correlacionados entre sí). En este caso, las características del muro con la menor probabilidad de falla (siendo en esta vivienda el muro ML-14) son que presenta una longitud de mampostería relativamente elevada respecto a otros muros, es uno de los pocos muros que no presenta un registro en campo de hundimiento diferencial, la longitud total de sus castillos es relativamente más pequeña que la longitud de la mampostería y no posee aberturas. Eso explica que, en el análisis de sensibilidad, la longitud de la mampostería fuera más crítica que la subsidencia diferencial (ya que la longitud en ese muro compensa la presencia de hundimiento diferencial existente) y que la longitud total de aberturas no tuviera ningún efecto en la estimación de la probabilidad de falla (ya que este elemento, por no tener aberturas, no considera el efecto de aumentar la longitud de las aberturas en otros muros). Por su parte, es importante mencionar que, aunque en campo no se registró hundimiento diferencial en el muro, aún persiste la incertidumbre sobre su determinación, dada el error de los instrumentos de medición, lo que explica el por qué el análisis de sensibilidad aun muestra a la variable de hundimiento diferencial como crítica.

Cabe resaltar que aunque una de las variable menos críticas en ambos estados límites y ambos escenarios de análisis sea la dimensión total de sección de los castillos del extremo izquierdo y derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería, eso no implica que en la práctica se pueda reducir la dimensión de los elementos de confinamiento o prescindir del uso de ellos, ya que los castillos deben de cumplir con las especificaciones mencionadas en las normatividades correspondientes y requisitos constructivos fijados en proyecto, y que emplearlos es precisamente un requisito esencial para que se pueda considerar en el análisis de confiabilidad que el comportamiento global de la vivienda se pueda modelar como un sistema dúctil en paralelo, y por ende, que la confiabilidad del sistema ante el modo de fallo por tensión diagonal sea alta.

Si bien el análisis de sensibilidad muestra que aumentar la longitud de la mampostería de los muros aumenta la confiabilidad de la vivienda para ambos estados límite, aplicarlo en la práctica debería considerar las limitaciones de longitud especificadas en las normativas correspondientes y los requerimientos para prevenir la aparición de otros modos de fallo además de la tensión diagonal, ya que los muros largos tienden a presentar flexión fuera del plano (INIFED, 2021).

La limitación principal de este trabajo de investigación radica en que no se pudo llevar a cabo una caracterización completa del inmueble que incluyera la determinación de los valores numéricos reales del módulo de cortante  $G_m$ , de la resistencia a la compresión diagonal  $v'_m$  y de la distorsión angular última por cortante  $DI_{ult}$  para cada uno de los muros que componen a la vivienda estudiada, con su respectiva incertidumbre asociada. En su lugar, esos valores se supusieron como constantes, provenientes de los indicados en las fuentes bibliográficas correspondientes, y adquiriendo los mismos valores en todos los muros del caso de estudio. Si bien el análisis de confiabilidad es metodológicamente correcto, realmente este trabajo no toma en cuenta las posibles variabilidades asociadas a esas variables (tanto de los errores de medición como de las diferencias de estas propiedades entre muros), por lo que los resultados son limitados y aproximados.

Continuando con lo comentado acerca de las limitaciones en la caracterización del inmueble, el análisis de confiabilidad de la vivienda analizada se llevó a cabo suponiendo que todos los muros que la componen tienen confinamiento (dadas y castillos), que los castillos solamente estaban presentes en la intersección entre muros, y que todos los muros no contaban con refuerzo horizontal. Estos supuestos no pudieron corroborarse físicamente durante las visitas físicas la vivienda, por lo que es posible que los resultados obtenidos de confiabilidad puedan desviarse de los estimados en esta tesis; por una parte porque puede que haya algunos muros sin confinar que, por sus características, deban considerar su propia metodología para estimar su probabilidad de falla; por otra parte, porque puede existir una mayor cantidad de castillos en la vivienda, lo que hace que haya más muros confinados que deban considerarse en el proceso de cálculo; y por otra parte, el hecho de contar con muros con refuerzo horizontal hace que el parámetro de  $DI_{ult}$  empleado en el cálculo de la confiabilidad de muros bajo el análisis del estado límite último sea distinto, que según el modelo de la curva trilineal de Flores (1995), deba tomarse de 0.01 radianes y no de 0.005 radianes como se consideró en esta investigación.

Además de lo anterior, otras fuentes de error en el análisis de confiabilidad en este trabajo radican el modelo de curva trilineal de Flores (1995) empleado para la deducción de las ecuaciones de estado límite, ya que únicamente considera la presencia de desplazamientos en el centro de los dos castillos en los extremos producto de los hundimientos, siendo que puede darse el caso de presentarse hundimientos en el centro de los muros, por lo que el análisis de confiabilidad para este tipo de condiciones en muros fue despreciado durante la realización de esta investigación.

Otra limitación importante a comentar radica en que el análisis de confiabilidad sólo se centra en el modo de falla por tensión diagonal puro, dado a que es el modo de falla principal ocasionado por la subsidencia diferencial en muros de mampostería confinada. Además, el análisis descrito sólo permite estimar la confiabilidad ante periodos de tiempo cortos y no permite predecir el valor de la probabilidad de falla en viviendas a largo plazo, ya que los hundimientos diferenciales aumentan gradualmente con el paso del tiempo.

Por otra parte, es posible que los resultados obtenidos respecto al análisis de sensibilidad no puedan ser generalizados a otras viviendas de mampostería confinada, puesto que sólo se efectuó el análisis para la muestra de una única vivienda, haciendo que los resultados puedan ser extremos y lejanos a la norma. Si pudieran contrastarse los resultados de confiabilidad con los obtenidos con otras viviendas en condiciones similares, se podría aplicar una estadística y un análisis más enriquecido y más completo respecto al impacto de la subsidencia diferencial en la seguridad estructural de los inmuebles.

La limitación de la generalización de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación también puede darse en el plano internacional, ya que tanto el modelo de curva trilineal de Flores (1995) del que se dedujeron las ecuaciones de desempeño, como de los parámetros del módulo de cortante  $G_m$ , de la resistencia a la compresión diagonal  $v'_m$  y de la distorsión angular última por cortante  $DI_{ult}$  se obtuvieron con base a las normativas y estudios científicos ensayados bajo las condiciones de construcción de obras mexicanas.

## CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

La presente investigación se centró en explorar y desarrollar una metodología para evaluar la confiabilidad estructural de viviendas de mampostería confinada sometidas a subsidencia bajo el análisis de los estados límites último (ELU) y de servicio (ELS), ejemplificando su aplicación a un caso de estudio real. A partir del método anteriormente propuesto, la investigación efectuada llevó a cabo el análisis de sensibilidad en el que se identificaron las variables más importantes en la vivienda estudiada.

Dicho trabajo cumplió satisfactoriamente el primer objetivo establecido y validó la hipótesis planteada, ya que sí fue posible construir una metodología para la estimación de la confiabilidad estructural propuesta, basada en el uso del modelo de curva trilineal de Flores (1995). El método desarrollado consiste en llevar a cabo la siguiente secuencia de acciones:

1. Recolectar datos in situ respecto a cada uno de los muros confinados presentes en los mismos. Se deben recolectar mediciones respecto a las dimensiones de la longitud de mampostería, de los castillos, de las aberturas existentes y de las dimensiones existentes en cada uno de los castillos de cada muro, así como de llevar un registro de la cota de elevación existente en el centro de cada uno de los castillos de la vivienda. Como evaluación inicial de estructuras, se propone que los parámetros del módulo de cortante  $G_m$ , de la resistencia a la compresión diagonal  $v'_m$  y de la distorsión angular última por cortante  $DI_{ult}$  sean constantes, cuyo valor proceda ya sea de la bibliografía correspondiente, de pruebas de laboratorio o de análisis mediante simulación numérica. En el caso de basar la estimación de estos parámetros a partir de la bibliografía,  $G_m$  y  $v'_m$  se pueden tomar de la NTC-Rehabilitación 2023, y  $DI_{ult}$ , del modelo de Flores (1995), este último adquiriendo un valor de 0.01 o 0.005 radianes, en caso de tratarse de un muro con o sin refuerzo horizontal, respectivamente.
2. Determinar la distribución de cada una de las mediciones anteriores recabadas con los instrumentos empleados. Como evaluación inicial, se deben asumir estas como distribuciones normales, procediendo a llevar a cabo el tratamiento de errores para determinar los parámetros de la media y desviación estándar de cada una de las mediciones recabadas.
3. Estimar el índice de confiabilidad y la probabilidad de falla de cada uno de los muros confinados de forma individual, considerando el análisis para el estado límite último y/o de servicio, con base a las expresiones (41) y (30), y (68) y (55), respectivamente.



4. Estimar el rango en el que se debe encontrar la probabilidad de falla global de la vivienda con base a la ecuación (21), considerando el valor mínimo como el caso más optimista de análisis (donde se considera una total independencia estadística entre muros), y el máximo como el más pesimista (donde hay una total dependencia estadística entre muros).

A partir de la metodología propuesta, se estimó que los muros analizados tienen un índice de confiabilidad entre -13.56 y 1.22, y entre -16.14 y 0.09 para los estados límite último y de servicio, respectivamente; y probabilidades de falla entre 11% y 100%, y entre 79% y 100% para los anteriormente descritos.

Adicionalmente, se estimó la probabilidad de falla de la vivienda entre 0.000366% y 11.26% para el estado límite último; y entre 24.62% y 78.90% para el estado límite de servicio.

A partir del análisis de sensibilidad a partir de la metodología propuesta, se cumplió satisfactoriamente el segundo objetivo de la presente investigación; revelando que en la vivienda estudiada, las variables más importantes en la estimación de la probabilidad de falla global son el hundimiento diferencial presente en los muros considerando los escenarios optimistas de análisis para el estado límite último y de servicio, y la longitud de la mampostería en los escenarios pesimistas en los dos estados límite considerados.

Algunas recomendaciones generales que se proponen para aumentar la resiliencia estructural de las construcciones de mampostería confinada ante hundimientos diferenciales, con base a los resultados obtenidos, son las siguientes:

- Verificar que todos los muros de mampostería tengan elementos de confinamiento, y que este cumpla con las especificaciones y requisitos mencionados en la normatividad aplicable. Al confinar y ligar los muros mediante dalas y castillos, el sistema edificado se vuelve dúctil y en paralelo, y por ende, aumenta la confiabilidad global del mismo.
- Edificar construcciones nuevas en las zonas marcadas con el menor riesgo posible por asentamientos diferenciales por parte de las autoridades. Esto permite disminuir la posibilidad de que los muros confinados estén afectados por subsidencia diferencial. Al respecto, el Código Municipal de Aguascalientes (2024), por ejemplo, establece tres zonas de riesgo telúrico en el Municipio de Aguascalientes: alto riesgo, para construcciones ubicadas en una franja de hasta 5 m (o según señale el Ayuntamiento) a ambos lados de las discontinuidades en el subsuelo; mediano riesgo, en una franja

de 5 a 200 m (o según señale el Ayuntamiento) a ambos lados de las discontinuidades en el subsuelo; y de bajo riesgo, en el resto del territorio municipal. En cualquier caso, se deben respetar las disposiciones señaladas por la autoridad, dependiendo de las zonas en la que se edifique.

- Aumentar la longitud de los muros de mampostería confinada a la mayor distancia posible permitida por proyecto constructivo. Los muros más largos, como se ha visto, tienen mayor confiabilidad estructural ante los hundimientos diferenciales.
- Aumentar la dimensión de los castillos paralela a la longitud de los muros de mampostería al máximo permitido por proyecto constructivo. Aumentar su dimensión aumenta la confiabilidad estructural de los muros.
- Aumentar la redundancia estructural del sistema, lo cual se logra incrementando la cantidad de muros confinados en la vivienda. Esto se puede implementar colocando más castillos intermedios y confinando los bordes de puertas y ventanas, según las normativas vigentes (NTC-Mampostería 2023).

La redundancia permite que un sistema estructural redistribuya las cargas de componentes dañados a los que aún funcionan, evitando así el colapso total del sistema. La efectividad de esta estrategia depende directamente del grado de correlación estadística entre los muros. Se pueden identificar tres escenarios principales:

- *Escenario optimista (muros estadísticamente independientes)*. En este escenario, la redundancia es altamente efectiva, ya que la probabilidad de falla de la vivienda disminuye significativamente al añadir más muros. La razón es que es estadísticamente improbable que todos los muros sean débiles al mismo tiempo. Si uno falla, los demás tienen una alta probabilidad de poseer la resistencia necesaria para soportar las cargas redistribuidas. El sistema es mucho más confiable que sus componentes individuales.
- *Escenario pesimista (muros estadísticamente dependientes)*. En este escenario, la redundancia es ineficaz, ya que añadir más muros no reduce la probabilidad de falla del sistema. La razón es que la correlación perfecta implica que todos los muros tienen una resistencia proporcionalmente similar. Si la carga es suficiente para hacer fallar a un muro, también lo será para los demás, provocando una falla simultánea sin una redistribución de carga efectiva. El sistema se comporta como un único elemento monolítico.

- *Escenario realista (muros con correlación parcial)*. En este escenario intermedio entre los dos anteriores, existe un beneficio real por la redundancia, pero es menor que en el caso optimista. Esto se debe a que en las construcciones reales, los materiales y la mano de obra introducen cierto grado de correlación entre los elementos. Por lo tanto, aunque aumentar el número de muros siempre mejora la seguridad, la ganancia en confiabilidad no es tan pronunciada como si los elementos fueran completamente independientes.

Para efectos de evaluación de las viviendas ya existentes, se recomienda suponer, como análisis inicial, que la vivienda posee muros estadísticamente dependientes entre sí (es decir, que se considere el escenario pesimista de análisis), ya que de este modo se podrían obtener estimaciones de la probabilidad de falla que resulten más conservadoras en ausencia de datos de correlación estadística entre muros, especialmente útil en la evaluación de la confiabilidad en viviendas ubicadas en zonas con riesgo geotécnico.

Por otra parte, se aconseja tener instrumentos de medición lo más precisos posibles para llevar a cabo el registro de datos en los muros. Esto se comenta dado que el cálculo de la confiabilidad en los muros es sensible al error las lecturas de los instrumentos de medición para las variables involucradas en las ecuaciones de estado límite; por lo que al tener instrumentos más precisos, el error de las mediciones disminuye, y los resultados del índice de confiabilidad de muros tenderán a 0, y los de la probabilidad de falla, al 0 o 100%, teniendo una certidumbre más alta respecto a si los muros alcanzan un determinado estado límite.

Es indispensable considerar que, al evaluar la confiabilidad de las viviendas, se complemente el análisis bajo otros modos de fallo que pudieran presentarse en los muros, además de la tensión diagonal producto de la subsidencia diferencial (por ejemplo, considerando también la presencia de cargas sísmicas); requiriendo determinar las ecuaciones de estado límite correspondientes con sus respectivas variables. Además, en el diseño de los elementos de mampostería confinada, se deben atender las especificaciones proporcionadas por la normatividad correspondiente y las fijadas por proyecto constructivo.

Como futuros trabajos relacionados, se podría llevar a cabo la determinación del valor real de los términos del módulo de cortante  $G_m$ , de la resistencia a la compresión diagonal  $v'_m$  y

de la distorsión angular última por cortante  $DI_{ult}$  para cada uno de los muros de la vivienda estudiada. Esto implicaría llevar a cabo la determinación de las distribuciones de dichas variables y del tratamiento de errores de los instrumentos de medición empleados para su registro. También implicaría determinar el índice de confiabilidad y probabilidad de falla considerando estos tres términos como variables aleatorias; requiriendo para esto técnicas de análisis de confiabilidad más avanzadas, por ejemplo, el índice de confiabilidad se puede estimar mediante el método iterativo de Rackwitz-Fiessler, y la probabilidad de falla, mediante el método de Monte Carlo.

Sería adecuado también llevar a cabo el análisis de confiabilidad de viviendas considerando la evolución de los registros de las cotas de hundimiento de la vivienda respecto al tiempo como apoyo en la toma de decisiones a largo plazo. Para esto, se requiere tener una monitorización constante del hundimiento presente en el centro de los castillos del inmueble y llevar a cabo la deducción de las ecuaciones de estado límite considerando estas variaciones de las demandas dependientes del tiempo.

También se podría considerar la deducción de las ecuaciones de estado límite y la determinación de la confiabilidad estructural de los muros de mampostería confinada y del sistema en conjunto considerando otros modos de falla además de la tensión diagonal (por ejemplo, compresión, tensión, entre otros). Asimismo, se podría llevar a cabo en análisis por confiabilidad en otros elementos estructurales de las viviendas de mampostería confinada (por ejemplo, la cimentación y las losas de entrepiso y azotea).

Otra futura ruta de investigación sería mejorar el proceso de cálculo del índice de confiabilidad de muros y de la probabilidad de falla considerando la presencia de hundimientos diferenciales intermedios en los muros de mampostería confinada.

Por último, sería conveniente contrastar los resultados obtenidos aplicando la metodología descrita en esta tesis a una muestra mayor de viviendas con diferentes condiciones de afectación por subsidencia, así como de diferentes tipos de cimentación y de cubierta, de tal manera que se puedan obtener conclusiones con un mayor grado de generalización.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Alcocer, S. (1997). *Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: Una revisión. Volumen I*, 164–191.
- Arroyo-Domínguez, N., Gárfias-Soliz, J. M., Salas-García, J., & Martel, R. (2016). *Evaluación de la subsidencia e identificación de riesgo por fracturamiento asociado a la explotación del agua subterránea*. 10, 8.
- Asad, M., Zahra, T., Thamboo, J., & Song, M. (2022). Finite element modelling of reinforced masonry walls under axial compression. *Engineering Structures*, 252, 113594. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113594>
- Astroza, M., & Schmidt, A. (2004). *Capacidad de deformación de muros de albañilería confinada para distintos niveles de desempeño*. 70, 59–75.
- Ávila, F., Puertas, E., & Gallego, R. (2020). Probabilistic reliability assessment of existing masonry buildings: The church of San Justo y Pastor. *Engineering Structures*, 223, 111160. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111160>
- Bazán, T. (1980). *Muros de mampostería ante cargas laterales: Estudios analíticos* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000053989>
- Birolini, A. (2007). *Reliability engineering: Theory and practice* (5° Edición). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-49390-7>
- Bjerrum, L. (1963). *Discussion*. Vol. 3, 135.
- Bokhari, R., Shu, H., Tariq, A., Al-Ansari, N., Guluzade, R., Chen, T., Jamil, A., & Aslam, M. (2023). Land subsidence analysis using synthetic aperture radar data. *Heliyon*, 9(3), e14690. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14690>

- Borah, B., Kaushik, H. B., & Singhal, V. (2023). Analysis and design of confined masonry structures: Review and future research directions. *Buildings*, 13(5), 1282. <https://doi.org/10.3390/buildings13051282>
- Brehm, E. (2011). *Reliability of unreinforced masonry bracing walls—Probabilistic approach and optimized target values* [Tesis de doctorado, Institut für Massivbau]. <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3142>
- Broto, C. (2005). *Enciclopedia broto de patologías de la construcción*. Links International.
- Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero (CONACERO). (2013). *Normativa NMX-B-253-CANACERO-2013: Industria siderúrgica—Alambre de acero liso o corrugado para refuerzo de concreto—Especificaciones y métodos de Prueba*.
- Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero (CONACERO). (2017). *Normativa NMX-B-072-CANACERO-2017: Industria siderúrgica—Varilla corrugada de acero, grado 60, laminada en frío para refuerzo de concreto—Especificaciones y métodos de prueba*.
- Carrió, J. M., & Ramos, L. M. (2001). *Patología y técnicas de intervención en estructuras arquitectónicas*. Munilla-Leria.
- CIB. (2014). *Defects in masonry walls guidance on cracking: Identification, prevention and repair*. International Council for Research and Innovation in Building and Construction.
- Cigna, F., & Tapete, D. (2021). Satellite InSAR survey of structurally-controlled land subsidence due to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 254, 112254. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112254>



- Corapcioglu, M. Y. (1984). Land subsidence—A state of the art review. En J. Bear & M. Y. Corapcioglu (Eds.), *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media* (pp. 369–444). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-6175-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-94-009-6175-3_8)
- De Lira, P. (2016). *Estudio de la vulnerabilidad estructural de las construcciones ante fracturamientos por subsidencia* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Aguascalientes]. <http://hdl.handle.net/11317/611>
- Dubourg, V., Sudret, B., & Deheeger, F. (2013). Metamodel-based importance sampling for structural reliability analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 33, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2013.02.002>
- Dueñas, V. E. (2021). *Análisis por desempeño de estructuras afectadas por subsidencia desde un enfoque probabilístico* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Aguascalientes]. <http://hdl.handle.net/11317/2159>
- Echard, B., Gayton, N., & Lemaire, M. (2011). AK-MCS: An active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo simulation. *Structural Safety*, 33(2), 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.01.002>
- Escobedo, A. (2016). *Predicción de subsidencia empleando métodos probabilísticos para la ciudad de Aguascalientes* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Aguascalientes]. <http://hdl.handle.net/11317/2349>
- Fernández-Torres, E., Cabral-Cano, E., Solano-Rojas, D., Havazli, E., & Salazar-Tlaczani, L. (2020). Land subsidence risk maps and InSAR based angular distortion structural vulnerability assessment: An example in Mexico City. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 583–587. <https://doi.org/10.5194/piahs-382-583-2020>
- fib. (2016, diciembre). *fib Bulletin 80: Partial factor methods for existing concrete structures*.

- Figuerola-Miranda, S., Tuxpan-Vargas, J., Ramos-Leal, J. A., Hernández-Madrigal, V. M., & Villaseñor-Reyes, C. I. (2018). Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: A review. *Engineering Geology*, 246, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.023>
- Florentín, Ma. M., & Granada, R. (2009). *Patologías constructivas en los edificios: Prevenciones y soluciones* (Primera edición). Facultad de Arquitectura, Diseño y Arte.
- Flores, L. E. (1995). *Estudio analítico de estructuras de mampostería confinada* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000227643>
- García, J. G. G. (2011). *Simulación numérica del comportamiento de muros de mampostería confinada con refuerzo horizontal* [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/4035](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/4035)
- García Manjarrez, J. L., & De León Escobedo, D. (2021). Reparación óptima de escuelas con muros de mampostería y marcos de concreto con daños sísmicos basada en confiabilidad. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 106, 45–75. <https://doi.org/10.18867/ris.106.590>
- Gaxiola, D. (2018). *Modelación del comportamiento estructural del templo de San Antonio para diferentes estados de degradación del material* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Aguascalientes]. <http://hdl.handle.net/11317/1582>
- Gennadyevich, Y., Pakhomova, E., & Olegovna, D. (2019). Reliability of RC frame-braced systems in dangerous geological conditions. *Journal of Applied Engineering Science*, 17(2), 245–250. <https://doi.org/10.5937/jaes17-21685>

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Gobierno de la Ciudad de México. (2023a). *Norma Técnica Complementaria para diseño y construcción de estructuras de concreto.*

Gobierno de la Ciudad de México. (2023b). *Norma Técnica Complementaria para diseño y construcción de estructuras de mampostería.*

Gobierno de la Ciudad de México. (2023c). *Norma Técnica Complementaria para evaluación y rehabilitación estructural de edificios existentes.*

Gobierno del Estado de Aguascalientes. (2024, marzo 18). *Código Municipal de Aguascalientes.*

Gómez Soberón, M. D. L. C. (2017). *Notas de apoyo. Curso de confiabilidad estructural.* Universidad Autónoma Metropolitana. <https://doi.org/10.24275/uama.353.9477>

Horn, B. K. P. (1981). Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, 69(1), 14–47. <https://doi.org/10.1109/proc.1981.11918>

INEGI. (2002). *Tratamiento de errores en levantamientos topográficos* (Primera Edición). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

INIFED. (2021). *Evaluación postsísmica de la infraestructura física educativa de México* (Primera edición, Vol. 2). Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, en Liquidación.

ISO. (1998). *ISO 2394: General principles on reliability for structures.* ISO.

Julio-Miranda, P., Ortiz-Rodríguez, A. J., Palacio-Aponte, A. G., López-Doncel, R., & Barboza-Gudiño, R. (2012). Damage assessment associated with land subsidence in the San Luis Potosi-Soledad de Graciano Sanchez metropolitan area, Mexico, elements for risk management. *Natural Hazards*, 64(1), 751–765. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0269-3>

Kala, Z. (2007). Influence of partial safety factors on design reliability of steel structures—Probability and fuzzy probability assessments. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING*

AND MANAGEMENT, 13(4), 291–296.

<https://doi.org/10.3846/13923730.2007.9636449>

Kireeva, V. I., Volokhov, E. M., & Lebedev, M. O. (2021). Assessment of differential subsidence harmful effects on large bridge structures during the underground space development. *E3S Web of Conferences*, 266, 03003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126603003>

Lourenço, P. J. B. B. (1996). *Computational strategies for masonry structures*. Delft Univ. Press.

Medina, S. (2017). *Breve introducción a la teoría de errores y la graficación* (Primera Edición). Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Melchers, R. E., & Beck, A. T. (2018). *Structural reliability analysis and prediction* (Tercera edición). Wiley.

Meli, R., & Salgado, G. (1969). *Comportamiento de muros de mampostería sujetos a carga lateral* (No. Segundo informe; p. 107). Universidad Nacional Autónoma de México.

Momeni, M., Bedon, C., Hadianfard, M. A., & Baghlani, A. (2021). An efficient reliability-based approach for evaluating safe scaled distance of steel columns under dynamic blast loads. *Buildings*, 11(12), 606. <https://doi.org/10.3390/buildings11120606>

Montazerolghaem, M., & Jäger, W. (2015). Characterization of uncertainty (probabilistic models) in verification of unreinforced masonry shear wall / Charakterisierung der Unschärfe (probabilistische Modelle) beim Nachweis von Wandscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk. *Mauerwerk*, 19(4), 287–297. <https://doi.org/10.1002/dama.201500665>

Montes, M. (1989). *Topografía* (4° Edición). Alfaomega.

Nichols, J. M., Tomor, A. K., & Benedetti, A. (2019). *Structural reliability analysis for masonry buildings*. 10.

- Nowak, A. S., & Carr, R. I. (1985). Sensitivity analysis for structural errors. *Journal of Structural Engineering*, 111(8), 1734–1746. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:8\(1734\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:8(1734))
- Nowak, A. S., & Collins, K. R. (2000). *Reliability of structures*. McGraw-Hill.
- Pacheco-Martínez, J., Hernandez-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortiz-Lozano, J. Á., Zermeño-De-Leon, M. E., & Solís-Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172–186. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>
- Papadrakakis, M., & Lagaros, N. D. (2002). Reliability-based structural optimization using neural networks and Monte Carlo simulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191(32), 3491–3507. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(02\)00287-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00287-6)
- Pereira Junior, W. M., Moraes, M. H. M. D., Beck, A. T., Araújo, D. L. D., Sarmiento, A. P., & Sousa, M. A. P. D. (2023). Reliability analysis of reinforced concrete frames subjected to post-construction settlements. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 16(5), e16503. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952023000500003>
- Ramírez, D. C. (2022). *Técnicas de rehabilitación de muros de mampostería* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/RepoFi/18003>
- Romero, K. (2021). *Diseño por desempeño de estructuras, con análisis determinístico por afectaciones por subsidencia* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Aguascalientes]. <http://hdl.handle.net/11317/2191>
- Ruiz, J., Sánchez, T., & Alcocer, S. M. (1998). *Rehabilitación de muros de mampostería confinada mediante malla de alambre y recubrimiento de mortero*. 880–889.

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: The primer* (Primera Edición). John Wiley.

Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., & Ratto, M. (2004). *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models* (Primera Edición). Wiley.

SIFAGG. (s/f). Google My Maps. Recuperado el 5 de junio de 2024, de <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1XSh-qhhWHKsMsdJUhAa9My8xDwA&hl=es>

Skempton, A. W., & Macdonald, D. H. (1956). The allowable settlements of buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 5(6), 727–768. <https://doi.org/10.1680/ipeds.1956.12202>

Skrzypczak, I., Kujda, J., & Buda-Ożóg, L. (2017). The use of probabilistic methods in assessing the reliability of masonry structures. *Procedia Engineering*, 193, 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.199>

SMIE. (2008). *Guía para el análisis de estructuras de mampostería*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.

SMIE. (2019). *Edificaciones de mampostería* (Primera edición). LIMUSA.

Song, C., & Kawai, R. (2023). Monte Carlo and variance reduction methods for structural reliability analysis: A comprehensive review. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 73, 103479. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2023.103479>

Soto, G. (2008). *Estudio del tipo de grietas en muros de mampostería: Posibles causas y efectos* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Querétaro]. <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/5518>

Stewart, M. G., & Lawrence, S. (2002). *Structural reliability of masonry walls in flexure*. 15(2), 48–52.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Tolentino López, D., Ruiz Gómez, S. E., Torres Pérez-Negrón, M. A., & Montiel Ortega, M.

A. (2011). Confiabilidad de estructuras considerando el daño acumulado en el tiempo. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 84, 25–46. <https://doi.org/10.18867/ris.84.21>

Vargas, Y. F., Pujades, L. G., Barbat, & Hurtado, J. E. (2013). Probabilistic assessment of the capacity, fragility and seismic damage of reinforced concrete buildings. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2013.04.003>

Wolf, P., & Ghilani, C. (2016). *Topografía* (14° Edición). Alfaomega.

Zhang, L., & Ng, A. M. Y. (2007). *Limiting tolerable settlement and angular distortion for building foundations*. 1–11. [https://doi.org/10.1061/40914\(233\)18](https://doi.org/10.1061/40914(233)18)



**APÉNDICE A. Deducción analítica de las ecuaciones generales de estado límite y confiabilidad por distorsiones angulares en muros**

Considerando un muro de mampostería confinada como el mostrado en la Figura 42:

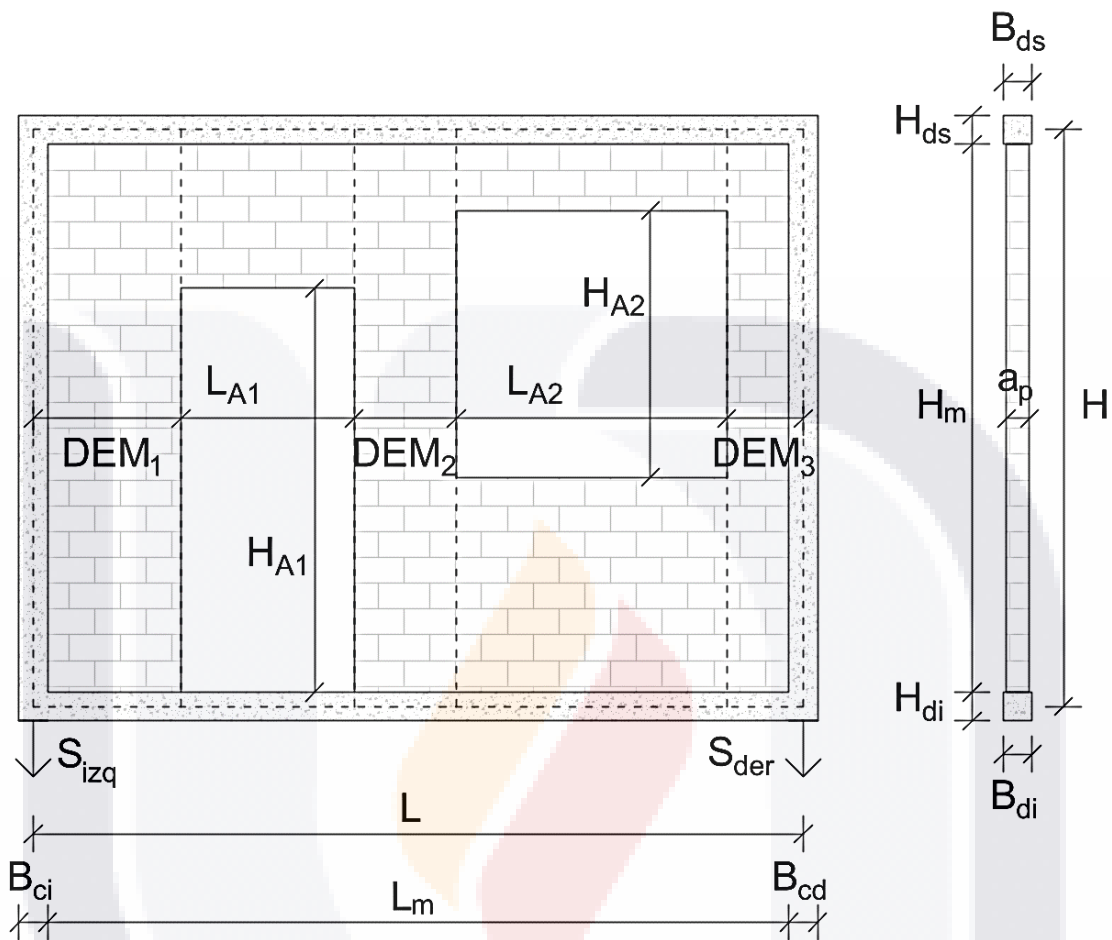


Figura 42. Representación frontal (izquierda) y de perfil (derecha) de muros de mampostería confinada con sus respectivas variables.

Donde se pueden considerar los términos:

$\Delta S$  = Hundimiento diferencial relativo en el muro (variable)

$a_p$  = Dimensión de tizón del tabique, sin considerar aplanados o recubrimientos (corresponde al ancho de la mampostería) (variable)

$A_T$  = Área de sección transversal de la mampostería, incluyendo el área de las dalas (variable)

$B_{cd}$  = Dimensión de sección del castillo del extremo derecho del muro paralelo a la longitud de la mampostería (variable)

$B_{ci}$  = Dimensión de sección del castillo del extremo izquierdo del muro paralelo a la longitud de la mampostería (variable)

$B_{di}$  = Dimensión de la sección de dala en el extremo inferior del muro paralelo al espesor de la mampostería (dimensión de tizón del tabique) (variable)

$B_{ds}$  = Dimensión de la sección de dala en el extremo superior del muro paralelo al espesor de la mampostería (dimensión de tizón del tabique) (variable)

$DEM_i$  = Distancia del segmento de muro sin abertura i-ésimo paralela a la longitud de la mampostería (variable)

$DI_{act}$  = Distorsión angular actuante en el muro analizado (variable)

$DI_{agr}$  = Distorsión angular de la mampostería en la que se produce el agrietamiento diagonal de la mampostería (variable)

$DI_{ult}$  = Distorsión angular de la mampostería en la que se alcanza el cortante último (constante)

$g()$  = Ecuación de estado límite R – D

$G_m$  = Módulo de cortante de la mampostería (constante)

$H$  = Altura de muro, de centro a centro de dala (variable)

$H_{Ai}$  = Distancia de la abertura i-ésima del muro paralela a la altura de la mampostería (variable)

$H_{di}$  = Dimensión de la sección de dala en el extremo inferior del muro paralelo a la altura de la mampostería (variable)

$H_{ds}$  = Dimensión de la sección de dala en el extremo superior del muro paralelo a la altura de la mampostería (variable)

$H_m$  = Altura de la mampostería, sin considerar las dalas de confinamiento (variable)

$K_i$  = Rigidez elástica inicial del segmento de muro  $i$ -ésimo (variable)

$K_o$  = Rigidez elástica inicial de la mampostería (variable)

$L$  = Longitud de muro, de centro a centro de castillo (variable)

$L_{Ai}$  = Distancia de la abertura  $i$ -ésima del muro paralela a la longitud de la mampostería (variable)

$l_i$  = Longitud del segmento horizontal de muro " $i$ " (variable)

$L_m$  = Longitud de la mampostería, sin considerar los castillos de confinamiento (variable)

$n_A$  = Número de aberturas en el muro analizado (constante)

$n_{DEM}$  = Número de segmentos sin aberturas en el muro analizado (constante)

$n_i$  = Número de muros en el segmento horizontal de muro " $i$ " (constante)

$n_s$  = Número de segmentos horizontales de muro (constante)

$S_{der}$  = Hundimiento registrado en el centro del castillo del extremo derecho del muro confinado (variable)

$S_{izq}$  = Hundimiento registrado en el centro del castillo del extremo izquierdo del muro confinado (variable)

$v'_m$  = Resistencia a la compresión diagonal de la mampostería (constante)

Entonces se puede determinar las ecuaciones de estado límite último y de servicio para dicho muro.

#### **A.1. Estado límite último (ELU)**

##### **A.1.1. Ecuación de desempeño**

La ecuación general de estado límite está definida por la función  $g$ , en función de las variables de resistencia y demanda,  $R$  y  $Q$ . Basado en la ecuación (8):

$$g(R, Q) = R - D$$

En el caso del estado límite último, la variable de resistencia, acorde al modelo de curva trilíneal de Flores (1995), está definida como se muestra en la ecuación (23).

$$R = DI_{ult} \quad (23)$$

En cuanto a la variable de demanda, debido a la presencia de subsidencia diferencial, se puede aproximar como el gradiente de subsidencia presente en el muro analizado, tal y como se muestra en la ecuación (24).

$$D = DI_{act} \cong \frac{\Delta S}{L} = \frac{|S_{izq} - S_{der}|}{L} \quad (24)$$

Donde la longitud de la mampostería  $L$  se considera de centro del confinamiento vertical, como se expresa en la ecuación (25).

$$L = L_m + 0.5(B_{ci} + B_{cd}) \quad (25)$$

Sustituyendo las ecuaciones (23), (24) y (25) en (8):

$$g = DI_{ult} - \frac{|S_{izq} - S_{der}|}{L} \quad (26)$$

Dado que para el cálculo de la confiabilidad requiere considerar que la ecuación de estado límite se encuentre en la frontera entre la seguridad estructural y la falla, entonces se debe cumplir que la ecuación de desempeño  $g$  sea igual a cero. Por tanto, retomando la ecuación (26):

$$g = DI_{ult} - \frac{|S_{izq} - S_{der}|}{L} = 0 \quad (27)$$

Sustituyendo la ecuación (25) en (27) y simplificando, se determina la ecuación (28):

$$g = L \left( DI_{ult} - \frac{|S_{izq} - S_{der}|}{L} \right) = 0(L)$$



$$g = DI_{ult}[L_m + 0.5(B_{ci} + B_{cd})] - |S_{izq} - S_{der}| = 0$$

$$\boxed{g = 2L_m - \frac{2}{DI_{ult}}|S_{izq} - S_{der}| + B_{ci} + B_{cd} = 0} \quad (28)$$

**A.1.2. Índice de confiabilidad y probabilidad de falla de muros individuales mediante el procedimiento de primer orden, segundo momento centrado en valores medios**

Para determinar la probabilidad de falla  $p_f$ , es necesario retomar la ecuación (7):

$$p_f = P(g(R, Q) \leq 0)$$

Sustituyendo la ecuación (28) en (7):

$$p_f = P\left(2L_m - \frac{2}{DI_{ult}}|S_{izq} - S_{der}| + B_{ci} + B_{cd} \leq 0\right)$$

$$p_f = P\left(2L_m + B_{ci} + B_{cd} - \left|\frac{2}{DI_{ult}}(S_{izq} - S_{der})\right| \leq 0\right) \quad (29)$$

Sustituyendo  $X = 2L_m + B_{ci} + B_{cd}$  y  $Y = \frac{2}{DI_{ult}}(S_{izq} - S_{der})$  en la ecuación (29) y resolviendo:

$$p_f = P(X - |Y| \leq 0)$$

$$p_f = P(X - Y \leq 0) + P(X + Y \leq 0)$$

$$p_f = P\left(\frac{(X - Y) - (\mu_X - \mu_Y)}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}} \leq \frac{0 - (\mu_X - \mu_Y)}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}}\right) + P\left(\frac{(X + Y) - (\mu_X + \mu_Y)}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}} \leq \frac{0 - (\mu_X + \mu_Y)}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}}\right)$$

$$\boxed{p_f = \Phi\left(-\frac{\mu_X - \mu_Y}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}}\right) + \Phi\left(-\frac{\mu_X + \mu_Y}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}}\right)} \quad (30)$$

Puesto que

$$X - Y \sim N(\mu_X - \mu_Y, \sigma_X^2 + \sigma_Y^2)$$

y

$$X + Y \sim N(\mu_X + \mu_Y, \sigma_X^2 + \sigma_Y^2)$$

Dada la suposición de independencia entre las variables X y Y.

Los parámetros  $\mu_X$ ,  $\mu_Y$ ,  $\sigma_X$  y  $\sigma_Y$  son los siguientes, dada la independencia entre las variables de la ecuación de estado límite:

$$\mu_X = E[X] = E[2L_m + B_{ci} + B_{cd}]$$

$$\mu_X = 2\mu_{L_m} + \mu_{B_{ci}} + \mu_{B_{cd}} \quad (31)$$

$$\sigma_X = \sqrt{V[X]} = \sqrt{V[2L_m + B_{ci} + B_{cd}]}$$

$$\sigma_X = \sqrt{4\sigma_{L_m}^2 + \sigma_{B_{ci}}^2 + \sigma_{B_{cd}}^2} \quad (32)$$

$$\mu_Y = E[Y] = E\left[\frac{2}{DI_{ult}}(S_{izq} - S_{der})\right]$$

$$\mu_Y = \frac{2}{DI_{ult}}(\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}) \quad (33)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{V[Y]} = \sqrt{V\left[\frac{2}{DI_{ult}}(S_{izq} - S_{der})\right]}$$

$$\sigma_Y = \left|\frac{2}{DI_{ult}}\right| \sqrt{\sigma_{S_{izq}}^2 + \sigma_{S_{der}}^2} \quad (34)$$

Para estimar el índice de confiabilidad  $\beta$ , se debe retomar la ecuación (19):

$$\beta \approx \frac{g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_i^2}} \quad \text{donde } a_i = \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\text{Evaluado en valores medios}}$$

Con base a la ecuación (28), las constantes  $a_1$  a  $a_n$  son las correspondientes a las ecuaciones (35) a (39).

$$a_1 = \left. \frac{\partial g}{\partial L_m} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = 2 \quad (35)$$

$$a_2 = \left. \frac{\partial g}{\partial S_{izq}} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = - \frac{2 |\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}|}{DI_{ult} (\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}})} \quad (36)$$

$$a_3 = \left. \frac{\partial g}{\partial S_{der}} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = \frac{2 |\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}|}{DI_{ult} (\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}})} \quad (37)$$

$$a_4 = \left. \frac{\partial g}{\partial B_{ci}} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = 1 \quad (38)$$

$$a_5 = \left. \frac{\partial g}{\partial B_{cd}} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = 1 \quad (39)$$

Con base a la ecuación (28), reemplazando las ecuaciones (35) a (39) en (19) y simplificando, se determina la ecuación (40).

$$\beta \approx \frac{2\mu_{L_m} - \frac{2}{DI_{ult}} |\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}| + \mu_{B_{ci}} + \mu_{B_{cd}}}{\sqrt{(2\sigma_{L_m})^2 + \left( -\frac{2 |\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}|}{DI_{ult} (\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}})} \sigma_{S_{izq}} \right)^2 + \left( \frac{2 |\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}|}{DI_{ult} (\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}})} \sigma_{S_{der}} \right)^2 + (1\sigma_{B_{ci}})^2 + (1\sigma_{B_{cd}})^2}}$$

$$\beta \approx \frac{2\mu_{L_m} - \frac{2}{DI_{ult}} |\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}| + \mu_{B_{ci}} + \mu_{B_{cd}}}{\sqrt{4\sigma_{L_m}^2 + \frac{4}{DI_{ult}^2} (\sigma_{S_{izq}}^2 + \sigma_{S_{der}}^2) + \sigma_{B_{ci}}^2 + \sigma_{B_{cd}}^2}} \quad (40)$$

Y simplificando la ecuación (40) en términos de las ecuaciones (31) a (34):

$$\beta \approx \frac{\mu_X - |\mu_Y|}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}} \quad (41)$$

Dado que la ecuación (28) se puede aproximar mediante una función lineal de variables aleatorias mediante los polinomios de la serie de Taylor de primer orden, y dado que todas las variables de la ecuación de desempeño tienen distribución normal y son independientes entre sí, entonces la ecuación (41) no posee el problema de no invarianza y el cálculo de  $\beta$  es aproximado.

## A.2. Estado límite de servicio (ELS)

### A.2.1. Ecuación de desempeño

La ecuación general de estado límite está definida por la función  $g$ , en función de las variables de resistencia y demanda,  $R$  y  $Q$ . Retomando la ecuación (8):

$$g(R, Q) = R - D$$

En el caso del estado límite de servicio, la variable de resistencia, acorde al modelo de curva trilineal de Flores (1995), está definida como se muestra en la ecuación (42).

$$R = DI_{agr} = \frac{V_{agr}}{K_o L} \quad (42)$$

Donde el cortante para el cual se produce el agrietamiento  $V_{agr}$  se define con base a la Tabla 1 y la ecuación (1), sin considerar la presencia de cargas axiales aplicadas sobre el muro, representada simplificada en la ecuación (43).

$$V_{agr} = 0.5v'_m A_T \quad (43)$$

Por otra parte, la rigidez elástica inicial de la mampostería  $K_o$  se puede aproximar subdividiendo el muro de mampostería en  $n_s$  paneles acoplados, dependiendo de la presencia de aperturas intermedias. En cada panel se tiene una rigidez elástica  $K_i$ , por lo que la rigidez  $K_o$  se obtiene aproximadamente con la ecuación (44).

$$K_o \approx \left( \sum_{i=1}^{n_s} \frac{1}{K_i} \right)^{-1} \quad (44)$$

El valor de la rigidez  $K_i$  se determina con base a la cantidad de muros  $n_i$  presentes en cada panel, con base a la siguiente expresión, que toma en consideración la suma de las rigideces a flexión y cortante de cada muro, correspondiendo al primer y segundo término de la expresión contenida en la sumatoria de la ecuación (45), respectivamente.

$$K_i \approx \sum_{i=1}^{n_i} \left( \frac{l_i^3}{\beta_i E_m I_m} + \frac{l_i}{G_m A_T} \right)^{-1} \quad (45)$$

Dado que la acción de la subsidencia diferencial en muros de mampostería induce desplazamientos predominantemente por corte (con poca generación de momentos flectores), la rigidez lateral debida a flexión resulta ser despreciable en comparación con la rigidez por cortante. Por ello, en el análisis se puede optar por considerar únicamente esta última, simplificando el problema sin perder la fidelidad respecto al comportamiento real del muro. Por lo tanto, la ecuación (45) se puede simplificar a (46).

$$K_i \approx \sum_{i=1}^{n_i} \left( \frac{l_i}{G_m A_T} \right)^{-1} \quad (46)$$

Como la longitud horizontal del panel  $l_i$ , el módulo de cortante de la mampostería  $G_m$  y el área de sección transversal de la mampostería (incluyendo el área de las dalas)  $A_T$  son constantes para cada uno de los muros  $n_i$ , entonces la ecuación (46) se puede simplificar a (47).

$$K_i \approx n_i \left( \frac{l_i}{G_m A_T} \right)^{-1} = n_i \frac{G_m A_T}{l_i} \quad (47)$$

En cuanto a la longitud  $L$ , esta se considera de centro a centro del confinamiento vertical del muro, por tanto se puede emplear la misma ecuación (25) que se empleó para determinar la ecuación de estado límite último en el apéndice A.1.1., es decir:

$$L = L_m + 0.5(B_{ci} + B_{cd})$$

En cuanto a la variable de demanda, debido a la presencia de subsidencia diferencial, se puede aproximar como el gradiente de subsidencia presente en el muro analizado. Retomando la ecuación (24) del apéndice A.1.1.:

$$D = DI_{act} = \frac{\Delta S}{L} = \frac{|S_{izq} - S_{der}|}{L}$$

Sustituyendo las ecuaciones (42) y (24) en (8):



$$g = \frac{V_{agr}}{K_o L} - \frac{|S_{izq} - S_{der}|}{L} \quad (48)$$

Dado que para el cálculo de la confiabilidad requiere considerar que la ecuación de estado límite se encuentre en la frontera entre la seguridad estructural y la falla, entonces se debe cumplir que la ecuación de desempeño  $g$  sea igual a cero. Por tanto, considerando la ecuación (48) previamente deducida:

$$g = \frac{V_{agr}}{K_o L} - \frac{|S_{izq} - S_{der}|}{L} = 0 \quad (49)$$

Sustituyendo las ecuaciones (44) y (47) en (49) y simplificando:

$$\begin{aligned} g &= L \left( \frac{V_{agr}}{K_o L} - \frac{|S_{izq} - S_{der}|}{L} \right) = 0(L) \\ g &= \frac{V_{agr}}{\left( \sum_{i=1}^{n_s} \frac{1}{K_i} \right)^{-1}} - |S_{izq} - S_{der}| = 0 \\ g &= \frac{v'_m}{2G_m} \left( \sum_{i=1}^{n_s} \frac{l_i}{n_i} \right) - |S_{izq} - S_{der}| = 0 \end{aligned} \quad (50)$$

Para simplificar la sumatoria  $\sum_{i=1}^{n_s} \frac{l_i}{n_i}$ , se puede considerar que hay dos clases de paneles: los que no tienen aberturas (considerando un único murete de análisis, es decir,  $n_i = 1$ ), y los que tienen abertura (en donde existe murete por debajo y encima de la misma, donde  $n_i = 2$ ). Por tanto, se puede representar la ecuación (50) como se muestra en (51).

$$g = \frac{v'_m}{2G_m} \left( \sum_{i=1}^{n_{DEM}} \frac{DEM_i}{1} + \sum_{i=1}^{n_A} \frac{L_{Ai}}{2} \right) - |S_{izq} - S_{der}| = 0 \quad (51)$$

Dado que, por compatibilidad, se debe cumplir la ecuación (52).

$$L = \sum_{i=1}^{n_{DEM}} DEM_i + \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai} \quad \rightarrow \quad \sum_{i=1}^{n_{DEM}} DEM_i = L - \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai} \quad (52)$$

Sustituyendo las ecuaciones (25) y (52) en (51) y simplificando, se determina la ecuación (53):

$$\begin{aligned} g &= \frac{v'_m}{2G_m} \left( \sum_{i=1}^{n_{DEM}} DEM_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai} \right) - |S_{izq} - S_{der}| = 0 \\ g &= \frac{v'_m}{2G_m} \left( L - \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai} \right) - |S_{izq} - S_{der}| = 0 \\ g &= 2[L_m + 0.5(B_{ci} + B_{cd})] - \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai} - \frac{4G_m}{v'_m} |S_{izq} - S_{der}| = 0 \\ \boxed{g = 2L_m - \frac{4G_m}{v'_m} |S_{izq} - S_{der}| + B_{ci} + B_{cd} - \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai} = 0} \end{aligned} \quad (53)$$

#### A.2.2. Índice de confiabilidad y probabilidad de falla de muros individuales mediante el procedimiento de primer orden, segundo momento centrado en valores medios

Para determinar la probabilidad de falla  $p_f$ , es necesario retomar la ecuación (7):

$$p_f = P(g(R, Q) \leq 0)$$

Sustituyendo la ecuación (53) en (7):

$$\begin{aligned} p_f &= P \left( 2L_m - \frac{4G_m}{v'_m} |S_{izq} - S_{der}| + B_{ci} + B_{cd} - \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai} \leq 0 \right) \\ p_f &= P \left( 2L_m + B_{ci} + B_{cd} - \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai} - \left| \frac{4G_m}{v'_m} (S_{izq} - S_{der}) \right| \leq 0 \right) \end{aligned} \quad (54)$$

Sustituyendo  $X = 2L_m + B_{ci} + B_{cd} - \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai}$  y  $Y = \frac{4G_m}{v'_m}(S_{izq} - S_{der})$  en la ecuación (54) y resolviendo:

$$p_f = P(X - |Y| \leq 0)$$

$$p_f = P(X - Y \leq 0) + P(X + Y \leq 0)$$

$$p_f = P\left(\frac{(X - Y) - (\mu_X - \mu_Y)}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}} \leq \frac{0 - (\mu_X - \mu_Y)}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}}\right) + P\left(\frac{(X + Y) - (\mu_X + \mu_Y)}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}} \leq \frac{0 - (\mu_X + \mu_Y)}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}}\right)$$

$$p_f = \Phi\left(-\frac{\mu_X - \mu_Y}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}}\right) + \Phi\left(-\frac{\mu_X + \mu_Y}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}}\right) \quad (55)$$

Puesto que

$$X - Y \sim N(\mu_X - \mu_Y, \sigma_X^2 + \sigma_Y^2)$$

y

$$X + Y \sim N(\mu_X + \mu_Y, \sigma_X^2 + \sigma_Y^2)$$

Dada la suposición de independencia entre las variables X y Y.

Los parámetros  $\mu_X$ ,  $\mu_Y$ ,  $\sigma_X$  y  $\sigma_Y$  son los siguientes, dada la independencia entre las variables de la ecuación de estado límite:

$$\mu_X = E[X] = E\left[2L_m + B_{ci} + B_{cd} - \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai}\right]$$

$$\mu_X = 2\mu_{L_m} + \mu_{B_{ci}} + \mu_{B_{cd}} - \sum_{i=1}^{n_A} \mu_{L_{Ai}} \quad (56)$$

$$\sigma_X = \sqrt{V[X]} = \sqrt{V \left[ 2L_m + B_{ci} + B_{cd} - \sum_{i=1}^{n_A} L_{Ai} \right]}$$

$$\sigma_X = \sqrt{4\sigma_{L_m}^2 + \sigma_{B_{ci}}^2 + \sigma_{B_{cd}}^2 + \sum_{i=1}^{n_A} \sigma_{L_{Ai}}^2} \quad (57)$$

$$\mu_Y = E[Y] = E \left[ \frac{4G_m}{v'_m} (S_{izq} - S_{der}) \right]$$

$$\mu_Y = \frac{4G_m}{v'_m} (\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}) \quad (58)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{V[Y]} = \sqrt{V \left[ \frac{4G_m}{v'_m} (S_{izq} - S_{der}) \right]}$$

$$\sigma_Y = \left| \frac{4G_m}{v'_m} \right| \sqrt{\sigma_{S_{izq}}^2 + \sigma_{S_{der}}^2} \quad (59)$$

Para estimar el índice de confiabilidad  $\beta$ , se debe retomar la ecuación (19):

$$\beta \approx \frac{g(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_i^2}} \quad \text{donde } a_i = \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{\text{Evaluado en valores medios}}$$

Con base a la ecuación (53), las constantes  $a_1$  a  $a_n$  son las correspondientes a las ecuaciones (60) a (66).

$$a_1 = \left. \frac{\partial g}{\partial L_m} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = 2 \quad (60)$$

$$a_2 = \left. \frac{\partial g}{\partial S_{izq}} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = - \frac{4G_m |\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}|}{v'_m (\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}})} \quad (61)$$

$$a_3 = \left. \frac{\partial g}{\partial S_{der}} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = \frac{4G_m |\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}|}{v'_m (\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}})} \quad (62)$$

$$a_4 = \left. \frac{\partial g}{\partial B_{ci}} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = 1 \quad (63)$$

$$a_5 = \left. \frac{\partial g}{\partial B_{cd}} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = 1 \quad (64)$$

$$a_6 = \left. \frac{\partial g}{\partial L_{A1}} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = -1 \quad (65)$$

$$\vdots$$

$$a_n = \left. \frac{\partial g}{\partial L_{An}} \right|_{\text{Evaluado en los valores medios}} = -1 \quad (66)$$

Con base a la ecuación (53), reemplazando las ecuaciones (60) a (66) en (19) y simplificando, se determina la ecuación (67).

$$\beta \approx \frac{2\mu_{L_m} - \frac{4G_m}{v'_m} |\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}| + \mu_{B_{ci}} + \mu_{B_{cd}} - \sum_{i=1}^{n_A} \mu_{L_{Ai}}}{\sqrt{(2\sigma_{L_m})^2 + \left( -\frac{4G_m}{v'_m} \frac{|\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}|}{(\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}})} \sigma_{S_{izq}} \right)^2 + \left( \frac{4G_m}{v'_m} \frac{|\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}|}{(\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}})} \sigma_{S_{der}} \right)^2 + (1\sigma_{B_{ci}})^2 + (1\sigma_{B_{cd}})^2 + (-1\sigma_{L_{A1}})^2 + \dots + (-1\sigma_{L_{An}})^2}}$$

$$\beta \approx \frac{2\mu_{L_m} - \frac{4G_m}{v'_m} |\mu_{S_{izq}} - \mu_{S_{der}}| + \mu_{B_{ci}} + \mu_{B_{cd}} - \sum_{i=1}^{n_A} \mu_{L_{Ai}}}{\sqrt{4\sigma_{L_m}^2 + \frac{16G_m^2}{v'^2_m} (\sigma_{S_{izq}}^2 + \sigma_{S_{der}}^2) + \sigma_{B_{ci}}^2 + \sigma_{B_{cd}}^2 + \sum_{i=1}^{n_A} \sigma_{L_{Ai}}^2}} \quad (67)$$

Y simplificando la ecuación (67) en términos de las ecuaciones (56) a (59):

$$\beta \approx \frac{\mu_X - |\mu_Y|}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}} \quad (68)$$

Dado que la ecuación (53) se puede aproximar mediante una función lineal de variables aleatorias mediante los polinomios de la serie de Taylor de primer orden, y dado que todas las variables de la ecuación de desempeño tienen distribución normal y son independientes entre sí, entonces la ecuación (68) no posee el problema de no invarianza y el cálculo de  $\beta$  es aproximado.





**APÉNDICE B. Determinación de las distribuciones de probabilidad para cada una de las variables presentes en las ecuaciones de estado límite**

### B.1. Distancias horizontales con cinta métrica

La medición de una distancia horizontal con cinta métrica puede aproximarse como una función lineal, tal y como se expresa en la ecuación (69).

$$L_H \approx L \pm L_1 \pm L_2 \pm L_3 \quad (69)$$

Donde se involucran las siguientes variables:

$L_H$  = Longitud horizontal con cinta métrica

$L$  = Lectura de la longitud de la cinta para la distancia horizontal medida. Este término se asumirá como una constante.

$L_1$  = Lectura incorrecta de la longitud de la cinta dada por fabricante. Para esta variable, se asumirá una distribución normal, con media equivalente a 0 metros y desviación estándar equivalente a 0.0001 veces la longitud medida " $L$ " (tomado de Wolf & Ghilani (2016)), tal y como se detallan en las ecuaciones (70) y (71), respectivamente.

$$\mu_{L_1} = 0 \text{ m} \quad (70)$$

$$\sigma_{L_1} = 0.0001L \quad (71)$$

$L_2$  = Lectura incorrecta de la longitud de la cinta dada por la desalineación en el plano horizontal durante la medición. Para esta variable, se asumirá una distribución normal, con media equivalente a 0 metros y desviación estándar equivalente a 0.014 veces la longitud medida " $L$ " (tomado de Wolf & Ghilani (2016)), mostradas en las ecuaciones (72) y (73), respectivamente.

$$\mu_{L_2} = 0 \text{ m} \quad (72)$$

$$\sigma_{L_2} = 0.014L \quad (73)$$

$L_3$  = Lectura incorrecta por interpolación, redondeo o precisión del instrumento empleado. Para esta variable, se asumirá una distribución normal, con media equivalente a 0 metros

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

y precisión de aparato de 5 cm, tal como se representa en las ecuaciones (74) y (75), respectivamente.

$$\mu_{L_3} = 0 \text{ m} \quad (74)$$

$$P_{L_3} = 5 \text{ cm} \quad (75)$$

El error asociado por precisión de aparato está dado por la ecuación (76) (Medina, 2017).

$$E = \frac{1}{2} P \quad (76)$$

Sustituyendo la ecuación (75) en (76):

$$E_{L_3} = \frac{1}{2} P_{L_3} = \frac{1}{2} (5 \text{ cm}) = 2.5 \text{ cm} = 0.025 \text{ m} \quad (77)$$

Ahora, cuando se conoce el valor de la desviación estándar de la distribución normal del error aleatorio para una determinada medición, entonces puede determinarse la probabilidad de un error de cualquier porcentaje de probabilidad mediante la ecuación (78).

$$E_P = C_P \sigma \quad (78)$$

Donde  $E_P$  es el porcentaje de error y  $C_P$  es el factor numérico correspondiente.

Con base a la ecuación (78), tomando un error del 95% ( $C_P = 1.96$ ):

$$E = 1.96 \sigma \rightarrow \sigma = \frac{E}{1.96} \quad (79)$$

Sustituyendo la ecuación (77) en (79):

$$\sigma_{L_3} = \frac{E_{L_3}}{1.96} = \frac{0.025 \text{ m}}{1.96} = 0.0128 \text{ m} \quad (80)$$

Sea  $Z$  una cantidad obtenida mediante un cálculo usando cantidades observadas  $a, b, c, \dots, n$  mediante una función  $f$ , tal que  $Z = f(a, b, c, \dots, n)$ , se puede deducir que la desviación estándar de la cantidad  $Z$  se puede expresar en función de las desviaciones de cada una de las variables, tal y como se expresa en la ecuación (81).

$$\sigma_Z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \sigma_a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \sigma_b\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \sigma_c\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial n} \sigma_n\right)^2} \quad (81)$$

Un caso especial a analizar sería cuando  $Z$  está definida por una función lineal de sus mediciones, tal que se cumpla la ecuación (82).

$$Z = c_0 + c_1 a + c_2 b + c_3 c + \dots + c_n n \quad (82)$$

Donde  $c_0, c_1, c_2, \dots, c_n$  son constantes.

Sin importar el tipo de distribución de probabilidad del error de cada una de las variables, y asumiendo que las mediciones son estadísticamente independientes entre sí, se puede determinar que la distribución de la cantidad  $Z$  tiene una media y desviación estándar expresadas con las fórmulas de las ecuaciones (83) y (84), respectivamente.

$$\mu_Z = c_0 + c_1 \mu_a + c_2 \mu_b + c_3 \mu_c + \dots + c_n \mu_n \quad (83)$$

$$\begin{aligned} \sigma_Z &= \sqrt{(c_1 \sigma_a)^2 + (c_2 \sigma_b)^2 + (c_3 \sigma_c)^2 + \dots + (c_n \sigma_n)^2} \\ &= \sqrt{\left(c_1 \frac{E_a}{C_a}\right)^2 + \left(c_2 \frac{E_b}{C_b}\right)^2 + \left(c_3 \frac{E_c}{C_c}\right)^2 + \dots + \left(c_n \frac{E_n}{C_n}\right)^2} \end{aligned} \quad (84)$$

Donde  $\mu_a, \mu_b, \mu_c, \dots, \mu_n$  son los valores más probables de cada una de las mediciones;  $\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c, \dots, \sigma_n$  son las desviaciones estándar de cada una de las mediciones;  $E_a, E_b, E_c, \dots, E_n$  son los errores de cada una de las mediciones bajo cierta probabilidad; y  $C_a, C_b, C_c, \dots, C_n$  son los factores numéricos correspondientes para obtener la probabilidad del error en cada una de las mediciones.

Ahora, dado que para el cálculo de  $L_H$  con la ecuación (69) se aborda una función lineal, y asumiendo que todas las variables involucradas son estadísticamente independientes entre sí, entonces empleando las ecuaciones (83) y (84), se pueden deducir las ecuaciones (85) y (86), representando la media y desviación estándar de las mediciones de distancias horizontales

$$\mu_{L_H} \approx L \pm \mu_{L_1} \pm \mu_{L_2} \pm \mu_{L_3} \quad (85)$$

$$\sigma_{L_H} \approx \sqrt{(\pm\sigma_{L_1})^2 + (\pm\sigma_{L_2})^2 + (\pm\sigma_{L_3})^2} \quad (86)$$

Sustituyendo las ecuaciones (70), (72) y (74) en (85), entonces:

$$\mu_{L_H} \approx L \pm 0 \text{ m} \pm 0 \text{ m} \pm 0 \text{ m}$$

$$\mu_{L_H} \approx L \quad (87)$$

Por otra parte, sustituyendo las ecuaciones (71), (73) y (80) en (86), entonces:

$$\sigma_{L_H} \approx \sqrt{(\pm 0.0001L)^2 + (\pm 0.014L)^2 + (\pm 0.0128 \text{ m})^2}$$

$$\sigma_{L_H} \approx \sqrt{0.00019601L^2 + 0.00016384 \text{ m}^2} \quad (88)$$

Como todas las variables involucradas en el cálculo tienen distribución normal, entonces las mediciones horizontales con cinta métrica  $L_H$  también tendrán distribución normal, con parámetros de las ecuaciones (87) y (88).

$$\mu_{L_H} \approx L$$

$$\sigma_{L_H} \approx \sqrt{0.00019601L^2 + 0.00016384 \text{ m}^2}$$

## B.2. Cotas de elevaciones de puntos visados con estación total

Acorde a INEGI (2002), las estaciones totales llevan a cabo el proceso de nivelación trigonométrica para determinar la cota de elevación de puntos visados. La expresión general para determinar la diferencia de elevación entre dos puntos es la que se muestra en la ecuación (89).

$$\Delta H = t + AB \cos z - C_{cr} - T \quad (89)$$

Adicionalmente a la fórmula anterior, se puede considerar el error asociado a la lectura incorrecta por interpolación, redondeo o precisión del instrumento empleado "L", por tanto:

$$\Delta H = t + AB \cos z - C_{cr} - T \pm L \quad (90)$$

Dado que la diferencia de elevación entre dos puntos  $\Delta H$  se puede calcular con la ecuación (91).

$$\Delta H = H_v - H_o \quad (91)$$

Y el efecto combinado de la curvatura terrestre y refracción atmosférica  $C_{cr}$  se puede estimar con la ecuación (92).

$$C_{cr} = 0.0067 \left( \frac{AB \cos z}{1000} \right)^2 \quad (92)$$

Sustituyendo las ecuaciones (91) y (92) en (90) y simplificando:

$$H_v - H_o = t + AB \cos z - 0.0067 \left( \frac{AB \cos z}{1000} \right)^2 - T \pm L$$
$$H_v = H_o + t + AB \cos z - 0.0067 \left( \frac{AB \cos z}{1000} \right)^2 - T \pm L \quad (93)$$

Donde:

$H_v$  = Cota determinada por la estación total

$H_o$  = Datum de la cota base. Este término se asumirá como una constante para todos los puntos. En la investigación realizada se consideró la ecuación (94).

$$H_o = 100 \text{ m} \quad (94)$$

$T$  = Altura de la señal en el punto observado. Para esta variable, se asumirá una distribución normal, con media equivalente a 1.52 m (promedio asumido para todas las alturas de estación total consideradas en el registro de datos en la vivienda analizada) y desviación estándar equivalente a 0.005 m (promedio tomado de INEGI (2002)), correspondientes a las ecuaciones (95) y (96), respectivamente.

$$\mu_T = 1.52 \text{ m} \quad (95)$$

$$\sigma_T = 0.005 \text{ m} \quad (96)$$

$t$  = Altura del instrumento en el punto de observación. Para esta variable, se asumirá una distribución normal, con media equivalente a 1.60 m (promedio para todas las alturas del prisma considerados en el registro de datos en la vivienda analizada) y desviación estándar equivalente a 0.005 m (promedio tomado de INEGI (2002)), correspondientes a las ecuaciones (97) y (98), respectivamente.

$$\mu_t = 1.60 \text{ m} \quad (97)$$

$$\sigma_t = 0.005 \text{ m} \quad (98)$$

$AB$  = Distancia inclinada entre el punto de observación y el punto observado. Para esta variable, se asumirá una distribución normal, con media equivalente a la distancia  $AB$  del registro, y desviación estándar de 0.000005 de la distancia  $AB$  (promedio tomado de INEGI (2002)), correspondientes a las ecuaciones (99) y (100), respectivamente.

$$\mu_{AB} = AB \quad (99)$$

$$\sigma_{AB} = 0.000005AB \quad (100)$$



Para efectos de la investigación efectuada, se asumirá para todos los puntos una distancia AB de 5 m. Por tanto, sustituyendo en las ecuaciones (99) y (100):

$$\mu_{AB} = 5 \text{ m} \quad (101)$$

$$\sigma_{AB} = 0.000025 \text{ m} \quad (102)$$

$z$  = Ángulo cenital del punto de observación. Para esta variable, se asumirá una distribución normal, con media equivalente al ángulo  $z$  del registro, y desviación estándar de 2 segundos de arco (promedio tomado de INEGI (2002)), correspondientes a las ecuaciones (103) y (104).

$$\mu_z = z \quad (103)$$

$$\sigma_{AB} = 2'' = 0.0000096963 \text{ rad} \quad (104)$$

Para efectos de la investigación efectuada, se asumirá para todos los puntos un ángulo  $z$  de  $85^\circ$ . Por tanto, sustituyendo en la ecuación (103).

$$\mu_z = 85^\circ = 1.4835298645 \text{ rad} \quad (105)$$

$L$  = Lectura incorrecta por interpolación, redondeo o precisión del instrumento empleado. Para esta variable, se asumirá una distribución normal, con media equivalente a 0 metros y precisión de aparato de 1 cm, tal y como se muestra a las ecuaciones (106) y (107), respectivamente.

$$\mu_L = 0 \text{ m} \quad (106)$$

$$P_L = 1 \text{ cm} \quad (107)$$

Considerando la ecuación (76) previamente comentada, en la que se muestra el error asociado por precisión de aparato (Medina, 2017):

$$E = \frac{1}{2}P$$

Sustituyendo la ecuación (107) en (76), se obtiene la ecuación (108).

$$E_L = \frac{1}{2}P_L = \frac{1}{2}(1 \text{ cm}) = 0.5 \text{ cm} = 0.005 \text{ m} \quad (108)$$

Con base a la ecuación (78), tomando un error del 95% ( $C_P = 1.96$ ), se debe emplear nuevamente la ecuación (79):

$$E = 1.96\sigma \rightarrow \sigma = \frac{E}{1.96}$$

Sustituyendo la ecuación (108) en (79), se obtiene la ecuación (109).

$$\sigma_L = \frac{E_L}{1.96} = \frac{0.005 \text{ m}}{1.96} = 0.0026 \text{ m} \quad (109)$$

Asumiendo una distribución normal respecto a la variable  $H_v$ , entonces la media se puede aproximar como el valor más probable de  $n$  repeticiones de una misma medición, tal y como se expresa en la ecuación (110).

$$\hat{\mu} = \bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} \quad (110)$$

Dado que para cada registro de medición es única, entonces  $n = 1$ , sustituyendo en la ecuación (110), en cada uno de las cotas de elevación registradas se cumple la ecuación (111).

$$\mu_{H_v} = M = H_v \quad (111)$$

Para la desviación estándar de la variable  $H_v$ , esta se puede aproximar mediante las fórmulas de propagación de errores. Para ello, se deben obtener las derivadas parciales de cada una de las variables de  $H_v$ , expresadas en la ecuación (93). Estas derivadas parciales son las correspondientes a las ecuaciones (112) a (117).

$$\frac{\partial H_v}{\partial H_o} = 0 \quad (112)$$

$$\frac{\partial H_v}{\partial t} = 1 \quad (113)$$

$$\frac{\partial H_v}{\partial AB} = \cos z \left( 1 - \frac{67AB \cos z}{5000000000} \right) \quad (114)$$

$$\frac{\partial H_v}{\partial z} = AB \sin z \left( \frac{67 \cos z}{5000000000} - 1 \right) \quad (115)$$

$$\frac{\partial H_v}{\partial T} = -1 \quad (116)$$

$$\frac{\partial H_v}{\partial L} = \pm 1 \quad (117)$$

Sustituyendo las ecuaciones (112) a (117) en la ecuación (81) y simplificando, se obtiene la ecuación (118).

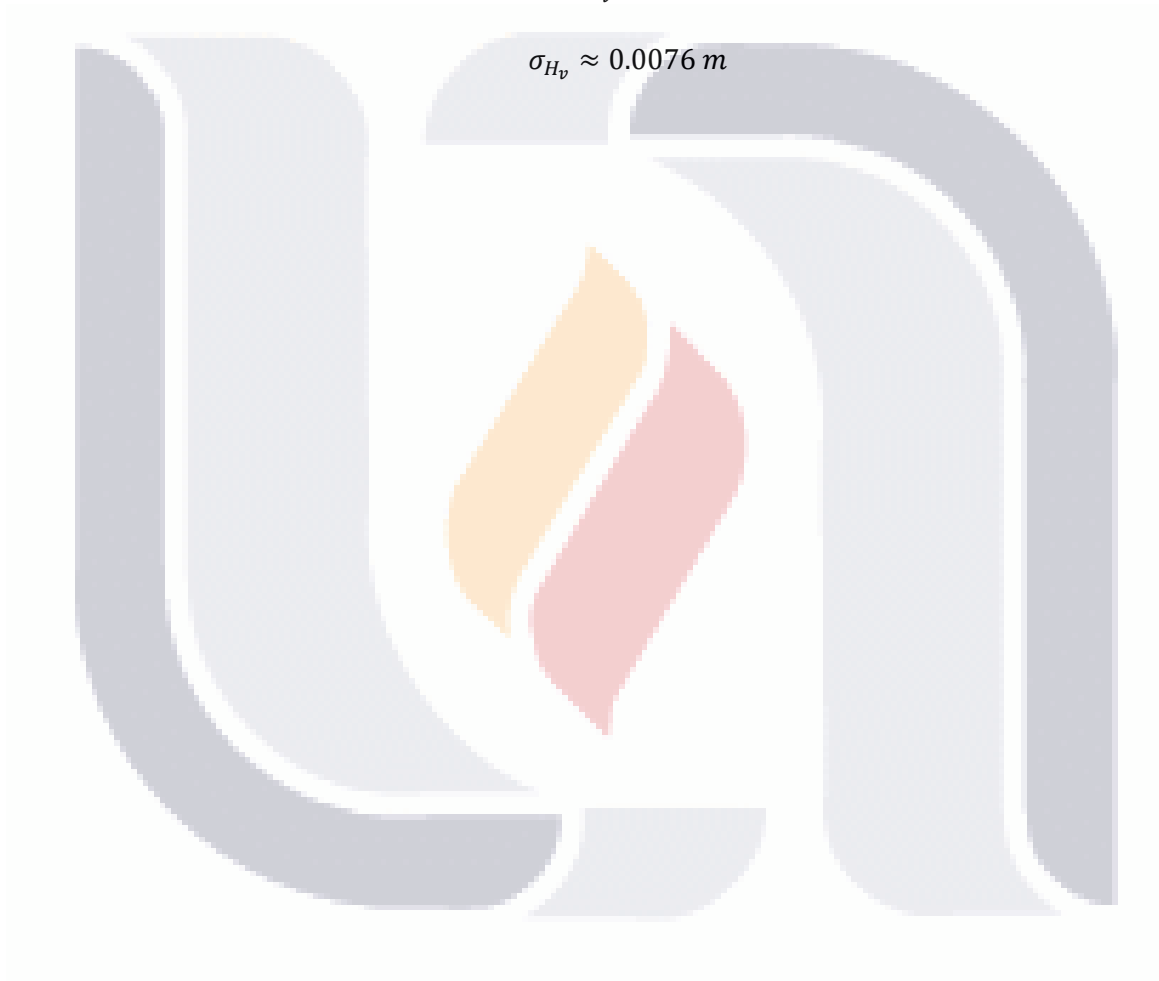
$$\begin{aligned} \sigma_{H_v} &= \sqrt{\left(\frac{\partial H_v}{\partial H_o} \sigma_{H_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial H_v}{\partial t} \sigma_t\right)^2 + \left(\frac{\partial H_v}{\partial AB} \sigma_{AB}\right)^2 + \left(\frac{\partial H_v}{\partial z} \sigma_z\right)^2 + \left(\frac{\partial H_v}{\partial T} \sigma_T\right)^2 + \left(\frac{\partial H_v}{\partial L} \sigma_L\right)^2} \\ \sigma_{H_v} &= \sqrt{\left[0\sigma_{H_o}\right]^2 + [1(0.005 \text{ m})]^2 + \left[\cos z \left(1 - \frac{67AB \cos z}{5000000000}\right) (0.000005AB)\right]^2 +} \\ &\quad \left[AB \sin z \left(\frac{67 \cos z}{5000000000} - 1\right) (0.0000096963 \text{ rad})\right]^2 + [-1(0.005 \text{ m})]^2} \\ &\quad + [\pm 1(0.0026 \text{ m})]^2} \\ \sigma_{H_v} &= \sqrt{\left[0\sigma_{H_o}\right]^2 + [1(0.005 \text{ m})]^2 +} \\ &\quad \left[\cos(1.4835298645 \text{ rad}) \left(1 - \frac{67(5 \text{ m}) \cos(1.4835298645 \text{ rad})}{5000000000}\right) (0.000005(5 \text{ m}))\right]^2 +} \\ &\quad \left[(5 \text{ m}) \sin(1.4835298645 \text{ rad}) \left(\frac{67 \cos(1.4835298645 \text{ rad})}{5000000000} - 1\right) (0.0000096963 \text{ rad})\right]^2 +} \\ &\quad [-1(0.005 \text{ m})]^2 + [\pm 1(0.0026 \text{ m})]^2} \end{aligned}$$

$$\sigma_{H_v} \approx 0.0076 \text{ m} \quad (118)$$

Por tanto, la media y la varianza para la cota de elevación de un punto visado por la estación total es aproximadamente el estimado con las ecuaciones (111) y (118).

$$\mu_{H_v} = H_v$$

$$\sigma_{H_v} \approx 0.0076 \text{ m}$$





APÉNDICE C. Simulación numérica de muros de mampostería

## C.1. Simulación numérica por el método de la diagonal equivalente

### C.1.1. Proceso de modelado

El modelado de los muros de mampostería se llevó a cabo de forma individual, con base al uso del software SAP2000 V22.2.0.

#### C.1.1.1. Geometría y restricciones de apoyo

PASO 1. Se creó un nuevo modelo, empleando las unidades de Kgf, cm, °C.

PASO 2. Como se llevará a cabo el análisis en 2D de muros individuales, se debe elegir la opción “2D Frames”. Se debe especificar sólo un piso y una bahía, con las distancias medidas de centro a centro del confinamiento vertical y horizontal, respectivamente.

PASO 3. Una vez creado el modelo base, se debe modificar considerando la configuración adecuada para el análisis de la diagonal equivalente. Para ello, se empotraron los 4 nodos del marco con la opción de “Assign Joint Restraints”.

PASO 4. Una vez empotrados estos nodos, se debe crear la dala inferior (creando un elemento horizontal que conecte los nodos N1 a N3) (Figura 43).

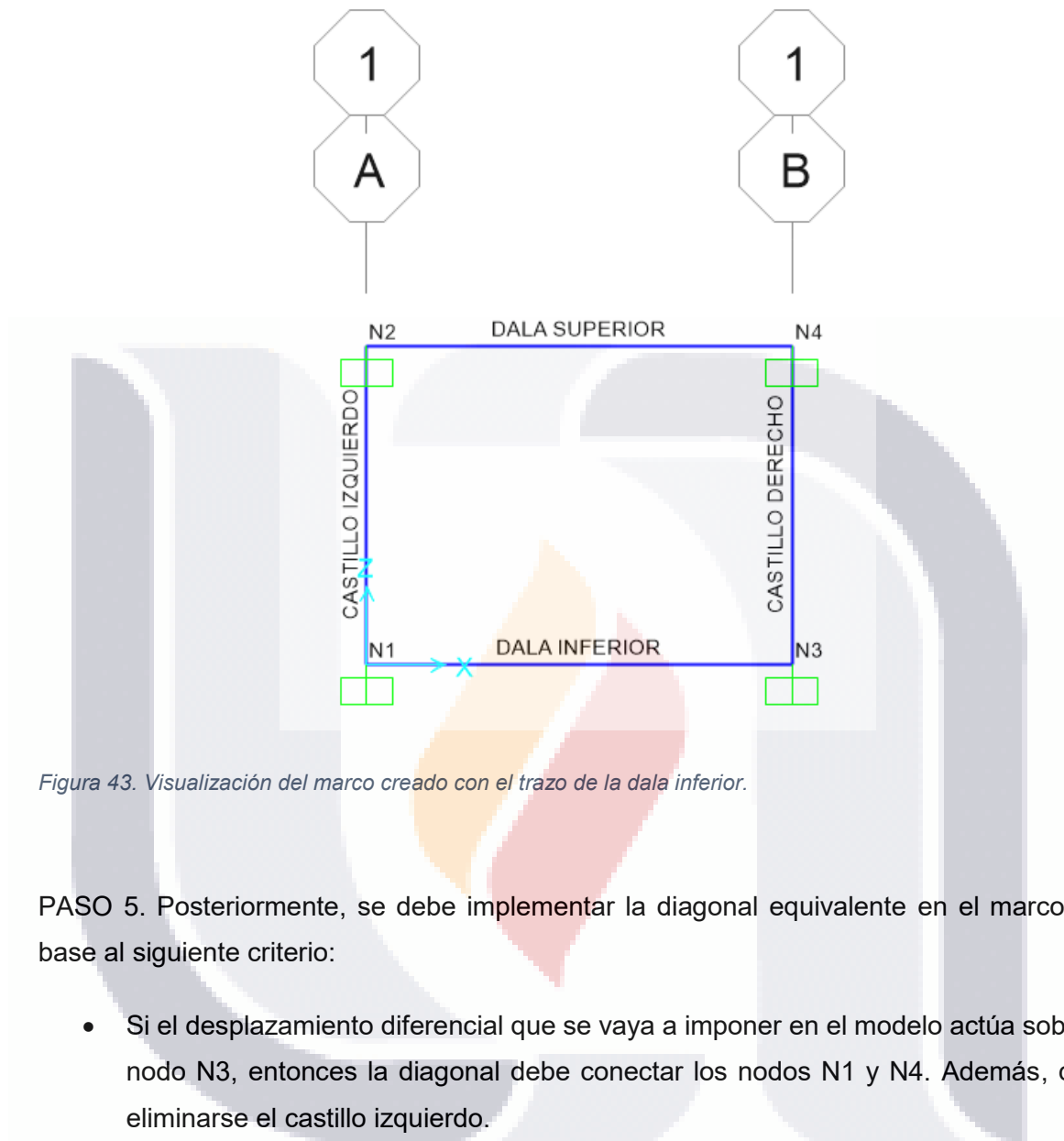


Figura 43. Visualización del marco creado con el trazo de la dala inferior.

PASO 5. Posteriormente, se debe implementar la diagonal equivalente en el marco con base al siguiente criterio:

- Si el desplazamiento diferencial que se vaya a imponer en el modelo actúa sobre el nodo N3, entonces la diagonal debe conectar los nodos N1 y N4. Además, debe eliminarse el castillo izquierdo.
- Si por el contrario, el desplazamiento diferencial actúa sobre el nodo N1, entonces la diagonal debe conectar los nodos N2 y N3, y se debe eliminar el castillo derecho.



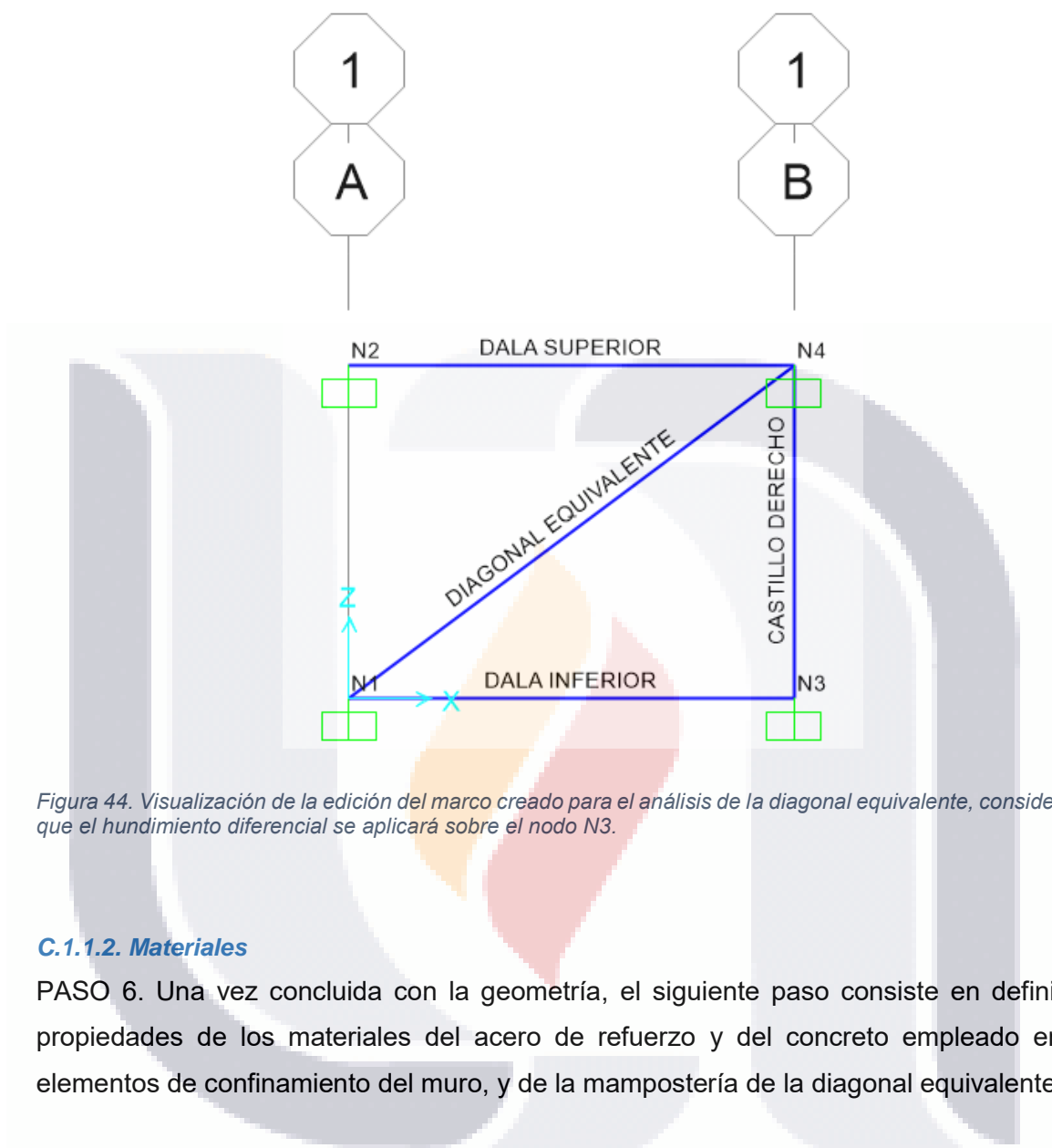


Figura 44. Visualización de la edición del marco creado para el análisis de la diagonal equivalente, considerando que el hundimiento diferencial se aplicará sobre el nodo N3.

#### C.1.1.2. Materiales

PASO 6. Una vez concluida con la geometría, el siguiente paso consiste en definir las propiedades de los materiales del acero de refuerzo y del concreto empleado en los elementos de confinamiento del muro, y de la mampostería de la diagonal equivalente.

#### C.1.1.3. Secciones

PASO 7. Una vez definidos los materiales a emplear, el siguiente paso consiste en definir y asignar las secciones en los elementos de confinamiento y la diagonal equivalente del muro simulado con base a la información recabada en la base de datos, según corresponda. Para la diagonal equivalente, el ancho de la sección corresponde a la dimensión de tizón del tabique, mientras que la altura se determina mediante las expresiones de Bazán (1980).

PASO 8. Además de definir las secciones de los elementos de confinamiento y de la diagonal equivalente, se deben especificar las propiedades no lineales de la articulación plástica y asignarlas en los extremos de la diagonal equivalente del modelo numérico.

#### ***C.1.1.4. Imposición de desplazamientos diferenciales***

PASO 9. Una vez definida y asignada la articulación plástica a la diagonal equivalente, se procede a definir el patrón de carga de hundimiento.

PASO 10. Con base a la información de la base de datos, se asigna el desplazamiento diferencial relativo en el nodo N1 o N3 del muro simulado numéricamente (según corresponda) y también, por encontrarse en el mismo eje vertical, deben asignarse los mismos valores de desplazamiento diferencial a los nodos N2 o N4, respectivamente. El desplazamiento asignado a dichos nodos debe especificarse bajo el patrón de carga “Hundimiento” previamente definido.

#### ***C.1.1.5. Configuraciones adicionales para análisis***

PASO 11. Dado que el análisis numérico de los muros de mampostería se llevará a cabo de forma bidimensional, entonces se debe seleccionar en las opciones de análisis el tipo de análisis plano.

PASO 12. Por otra parte, dado que se llevará a cabo un análisis no lineal de los elementos de confinamiento y de la diagonal equivalente, entonces se deberá especificar en los casos de carga muerta “*DEAD*” y de carga por hundimiento.

PASO 13. Ya definido el análisis no lineal en estos casos de carga, se define una combinación de cargas para la suma de la carga muerta y la carga por hundimiento.

#### ***C.1.2. Determinación del cortante actuante en muros***

Una vez completado el modelado numérico del muro de mampostería a analizar, se procede a ejecutar la simulación de dicho modelo (Figura 45). Ya terminado el análisis, para determinar el cortante actuante máximo absoluto ( $V_{\text{máx}}$ ) se debe emplear el valor máximo

absoluto de carga axial presente en la diagonal equivalente ( $N_{\max}$ ), y emplear la ecuación (119).

$$V_{\max} = N_{\max} \sin \theta \quad (119)$$

Donde  $\theta$  se determina con la ecuación (120).

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{H}{L} \right) \quad (120)$$

$\theta$  es el ángulo que forma la diagonal con la horizontal, H es la altura del muro medida de centro a centro de dala, y L es la longitud de muro medido de centro a centro de castillo.

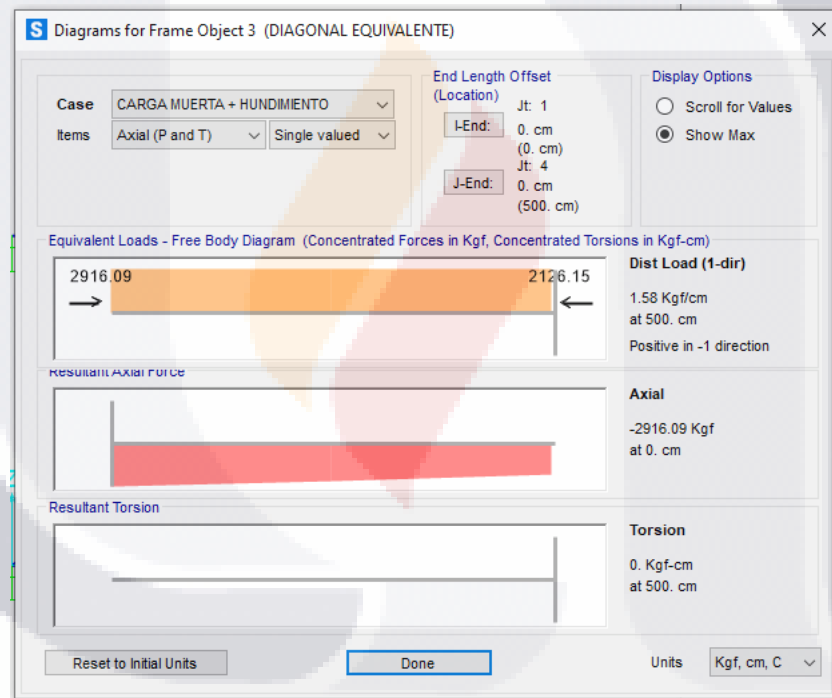


Figura 45. Visualización de ejemplo de carga axial máxima (2° diagrama en la figura) en el elemento de la diagonal equivalente, una vez analizado el modelo numérico en SAP2000.

### C.1.3. Resultados obtenidos

Una vez calibrado el modelo, se simuló el comportamiento de un muro de mampostería de 4 m de longitud (de centro a centro de castillo), 3 m de altura (de centro a centro de dala) y 0.14 m de espesor, cuyas dos primeras dimensiones corresponden a las máximas

permitidas por la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2023), considerando la presencia de castillos y dalas de 15x15 cm de sección.

Para el muro simulado se generó la gráfica de esfuerzos cortantes respecto a distintos valores de distorsión angular presente en el muro, considerando la suma de las cargas muertas y las cargas debidas a los desplazamientos por hundimiento diferencial. Dicha gráfica corresponde a la mostrada en la Figura 46.

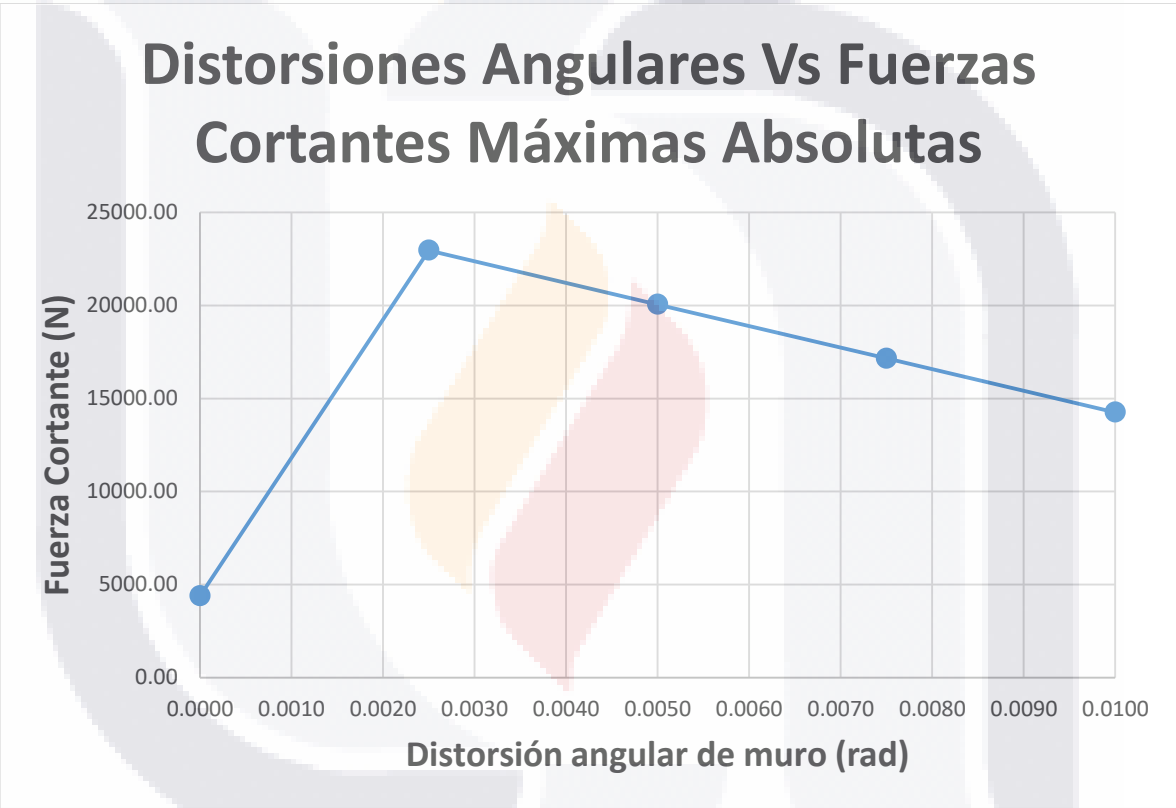


Figura 46. Gráfica de distorsiones angulares contra fuerzas cortantes máximas absolutas mediante la simulación por diagonal equivalente en el software SAP2000.

Los resultados muestran un rango de distorsiones angulares desde 0.0000 hasta 0.0100 radianes, con incrementos de 0.0010 radianes. Estos valores están asociados a diferentes niveles de distorsión angular y a un cortante máximo de 22,963.03 N. La gráfica indica que, en una primera etapa, la relación entre la fuerza cortante y la distorsión angular del muro es lineal y positiva. Sin embargo, a partir de 0.0025 radianes, punto en el que se alcanza el cortante máximo, esta relación se invierte y se vuelve lineal y negativa, lo cual concuerda

con el comportamiento frágil esperado en muros de mampostería sometidos a cargas laterales.

## **C.2. Simulación numérica por elementos finitos no lineales**

### **C.2.1 Creación del modelo numérico**

La siguiente fase del programa experimental consistió en llevar a cabo la simulación numérica de muros de mampostería confinada. Para ello, se empleó el software Cast3M para tomar en cuenta el comportamiento no lineal de estos elementos estructurales mediante el modelado por elementos finitos, llevando a cabo el macromodelado de la mampostería confinada siguiendo modelo elastoplástico isótropo perfecto.

La metodología general para crear un modelo numérico en CAST3M se puede resumir en las siguientes subfases:

- *Definición del modelo.* Se determina si la solución será en 2D o 3D y se eligen los tipos de elementos finitos que se usarán en el análisis.
- *Creación de la geometría y mallado.* Se genera la geometría del modelo y se elabora la malla de elementos finitos. Esto puede realizarse mediante la inserción manual de coordenadas, a partir de las cuales se construyen las líneas, superficies y volúmenes necesarios.
- *Aplicación de condiciones de contorno.* Se establecen las restricciones y condiciones límite del modelo. Durante este paso, también se crea la matriz de rigidez correspondiente.
- *Definición de las cargas y desplazamientos.* Se especifica la historia de carga y/o desplazamientos, incluyendo su magnitud, dirección y cualquier variación en el tiempo o en el espacio.
- *Ejecución del análisis.* Se ejecuta el programa siguiendo un proceso paso a paso, verificando que el modelo proporciona una solución al problema planteado.

Se tomarán en cuenta únicamente la presencia de cargas muertas verticales actuando en los muros, estimadas a partir de los valores establecidos de pesos muertos según el Código Municipal de Aguascalientes (2024). No se considerarán en el modelado la introducción de

cargas muertas afectadas por factores de carga ni de resistencia, ya que se tomarán en cuentas las cargas reales que existen en la estructura.

El modelo generado también considerará la presencia de hundimientos en los muros, y por ende, los posibles esfuerzos generados por dichos desplazamientos. Estos hundimientos, para fines prácticos, se tomarán como cargas permanentes.

El modelo de simulación numérica para muros creado en el software CAST3M es un modelo con las siguientes características:

#### C.2.1.1 Dimensionalidad

Para recrear lo más fielmente posible los muros de mampostería, el modelo trabaja considerando la presencia de elementos en tres dimensiones espaciales. La longitud, altura y espesor de dichos muros puede ajustarse para representar las diversas formas de los diversos muros considerados en el proyecto (Figura 47).

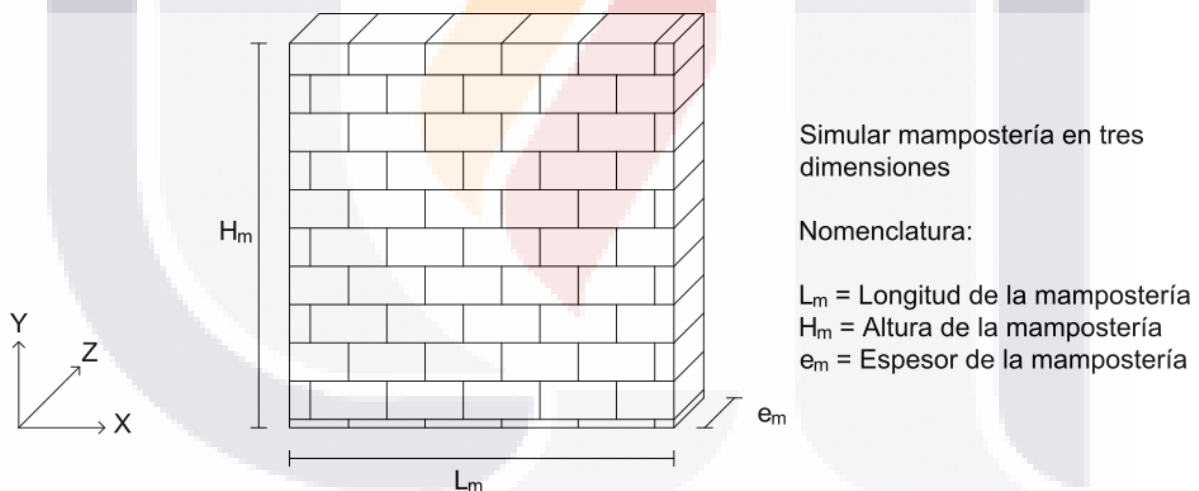


Figura 47. Dimensionalidad de los muros de mampostería analizados para simulación numérica.

#### C.2.1.2 Características del enmallado

El enmallado se hizo de forma cuadriculada rectangular de forma reglada para las 6 caras que integran el elemento estructural analizado. Para optimizar el tiempo de ejecución de la simulación numérica de los muros de mampostería, se eligió una resolución de enmallado paralelo a la longitud equivalente al entero superior de la longitud de muro multiplicada por

diez, de enmallado paralelo a la altura equivalente al entero superior de la longitud de muro multiplicada por diez, y de enmallado paralelo al espesor equivalente a 1 (Figura 48).

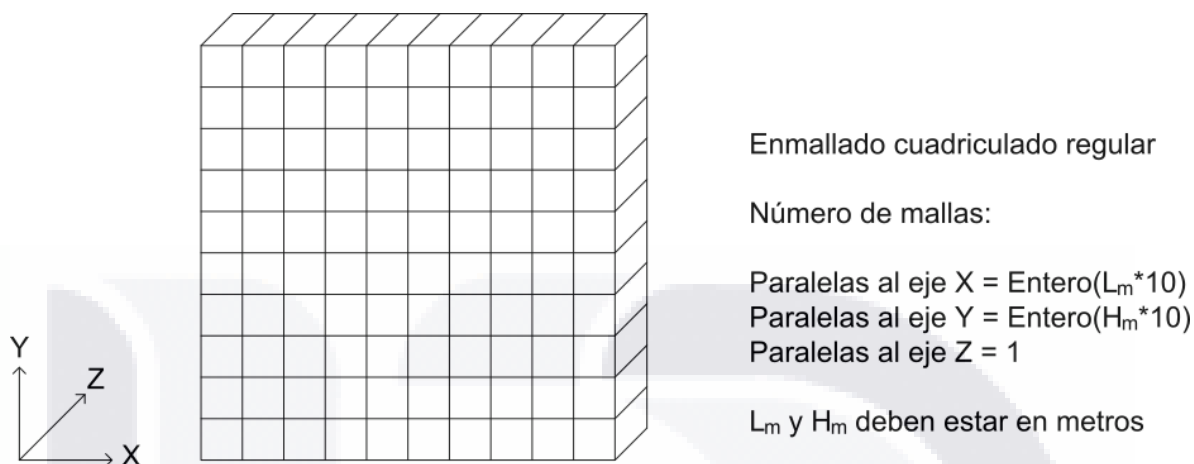


Figura 48. Enmallado considerado para la simulación numérica de los muros de mampostería.

### C.2.1.3 Restricciones en los apoyos

El modelo consideró una restricción de los desplazamientos en los 3 ejes espaciales para todos los nodos que se encontraran en las caras inferior y superior del muro de mampostería. En cuando a los nodos de las demás caras, estos no se restringieron de ninguna manera (Figura 49).

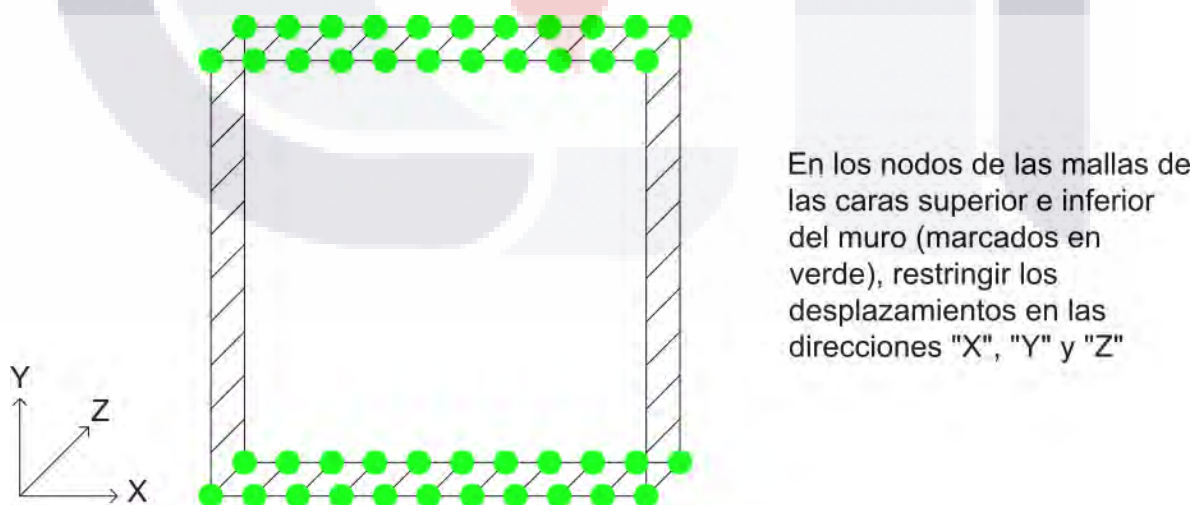


Figura 49. Restricciones de los apoyos considerados en la simulación numérica de la mampostería.



#### C.2.1.4. Cargas impuestas

La única carga que se considera en el modelo es la producida por el peso propio del muro, relacionada intrínsecamente con la densidad del material de mampostería  $\rho_m$  (determinada con la ecuación (22)). Todos los nodos del enmallado estarán sujetos a una carga vertical gravitatoria tal cual se muestra en la Figura 50.

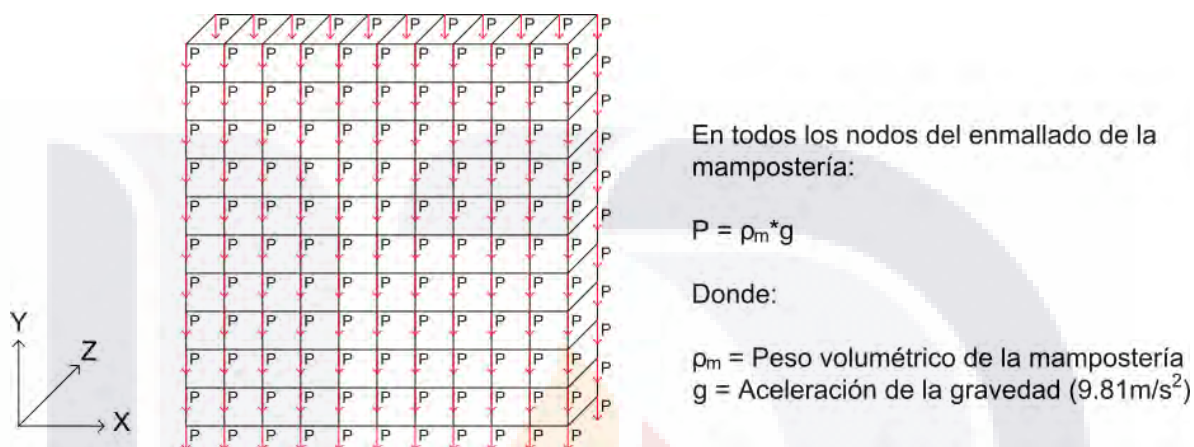


Figura 50. Cargas verticales impuestas en los todos los nodos del enmallado del muro de mampostería simulado numéricamente.

#### C.2.1.5. Desplazamientos impuestos

Con el objetivo de replicar el comportamiento del hundimiento diferencial en los muros, se implementó la posibilidad de imponer desplazamientos específicos en los nodos ubicados en los extremos izquierdo y derecho de las caras inferior y superior del muro. Esta estrategia permite simular condiciones reales de deformación. Para lograr una distribución coherente de los desplazamientos a lo largo de los nodos intermedios, se emplearon comandos que asignan valores interpolados linealmente entre los desplazamientos especificados en los extremos (Figura 51). Este enfoque asegura una transición gradual y realista del movimiento en el modelo, evitando discontinuidades o concentraciones no deseadas de deformaciones.

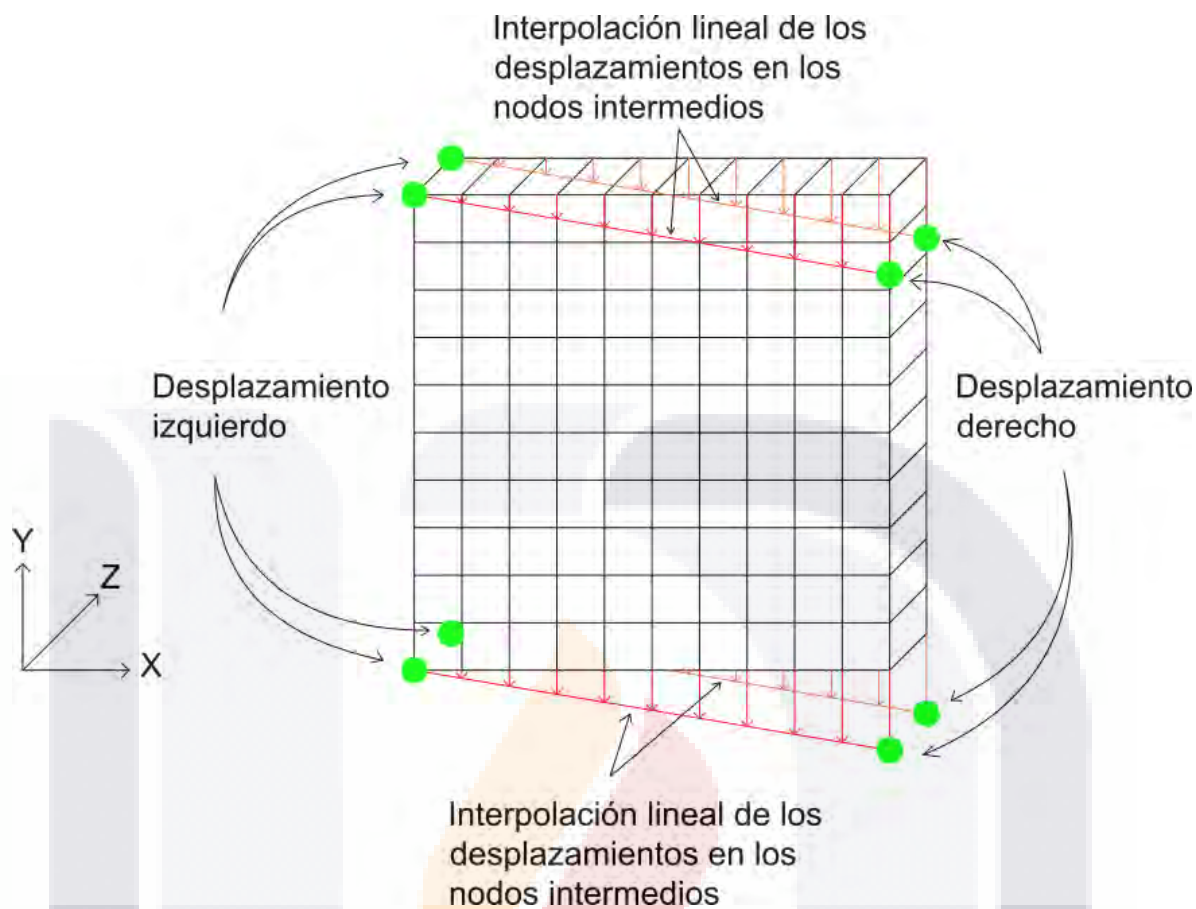


Figura 51. Desplazamientos considerados en los nodos del enmallado de los muros de mampostería simulados numéricamente.

#### C.2.1.6. Definición del modelo mecánico

El modelo elastoplástico empleado para la simulación no lineal es el modelo elástico isótropo plástico perfecto, cuyos parámetros son el módulo de elasticidad (YOUN), módulo de Poisson (NU) y el límite elástico del material (SIGY). Las unidades que se manejan tanto para el módulo de elasticidad como para el límite elástico son Pa y, para el módulo de Poisson, son adimensionales. Empleando los datos previamente especificados del material de mampostería, los parámetros empleados se pueden resumir en la Tabla 17.

YOUN	NU	SIGY
5250E5	0.25	2E5

Tabla 17. Resumen de los parámetros de los materiales empleados para la creación del modelo elastoplástico.

### C.2.2. Resultados obtenidos

Como prueba inicial, se simuló el comportamiento de un muro de mampostería de 3.85 m de longitud, 2.85 m de altura y 0.14 m de espesor, cuyas dos primeras dimensiones corresponden a las máximas permitidas por la Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2023), considerando la presencia de castillos de 15x15 cm de sección. Se consideró un peso volumétrico del muro simulado de 1770 kg/m<sup>3</sup> (considerando las propiedades más comunes de la mampostería, según la base de datos), con un hundimiento diferencial de 10 cm hacia la derecha (imponiendo una distorsión angular de aproximadamente 0.0260 radianes).

Los esfuerzos normales pueden visualizarse en la Figura 52, Figura 53 y Figura 54. Los esfuerzos normales mínimos y máximos paralelos a la dirección X son de -0.0089 Pa y +0.0089 Pa, respectivamente; en la dirección Y, de -0.0272 Pa y +0.0272 Pa respectivamente; y en la dirección Z, de -0.0198 Pa y +0.0198 Pa, respectivamente.

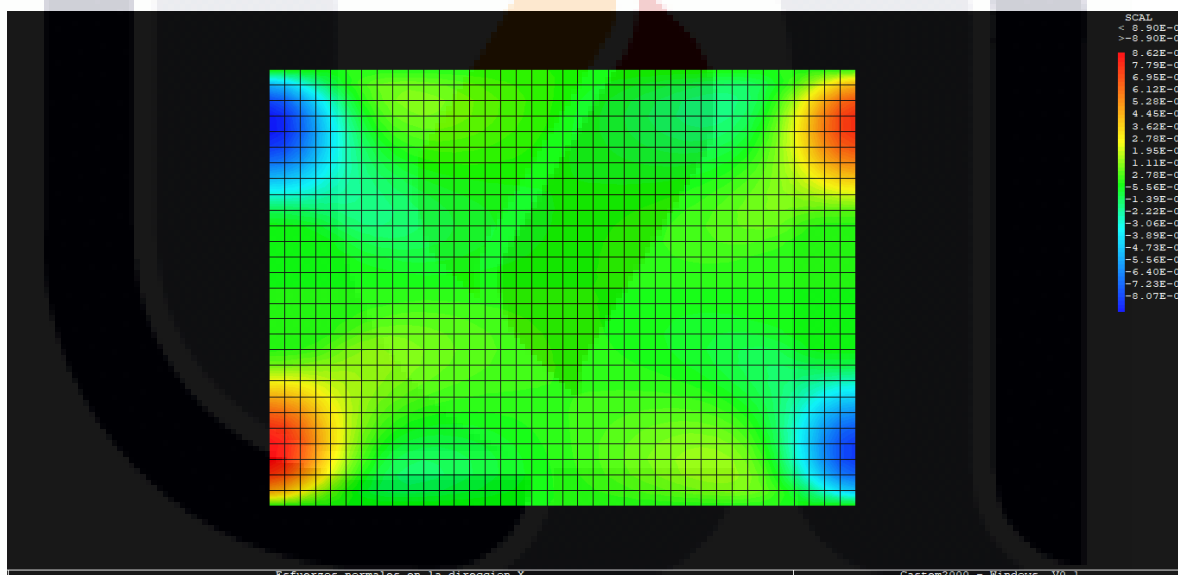


Figura 52. Esfuerzos normales en la dirección X para un hundimiento diferencial de 10 cm.

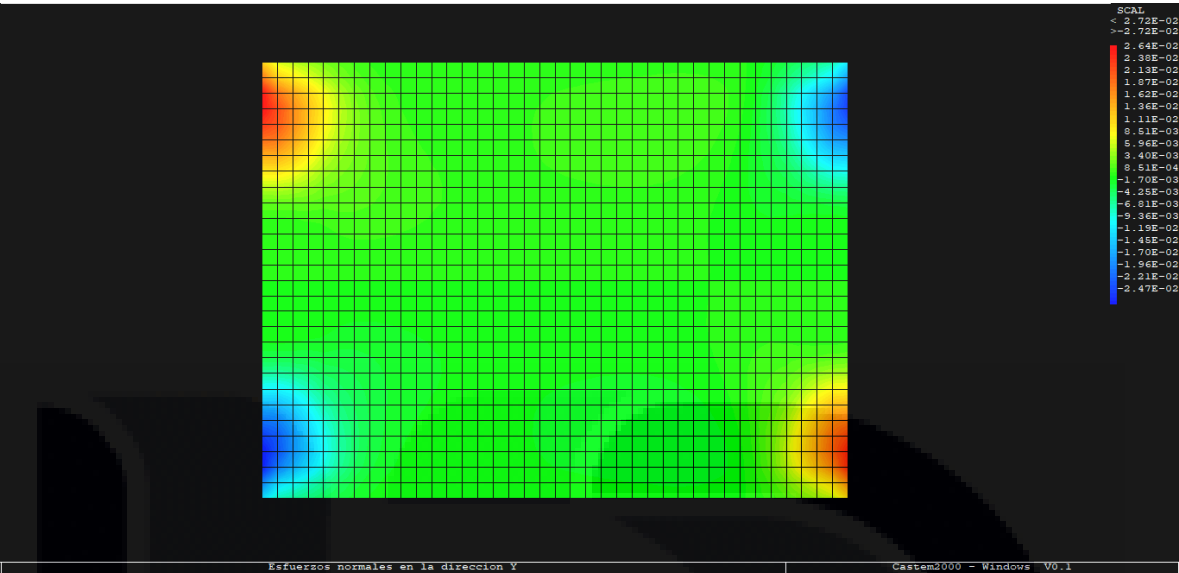


Figura 53. Esfuerzos normales en la dirección Y para un hundimiento diferencial de 10 cm.

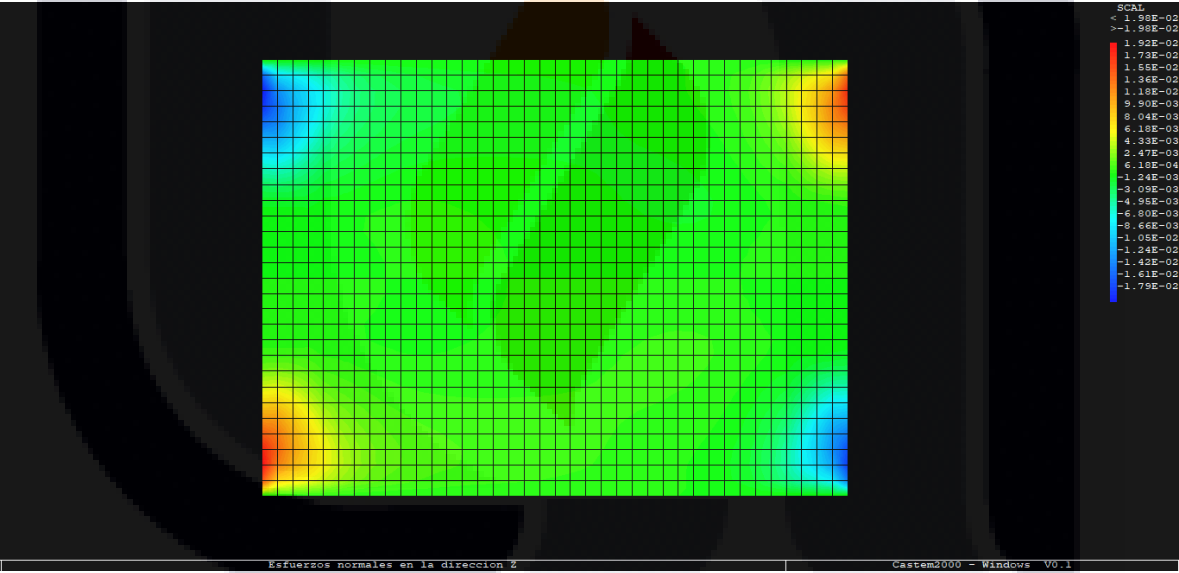


Figura 54. Esfuerzos normales en la dirección Z para un hundimiento diferencial de 10 cm.

El esfuerzo cortante en la dirección XY pueden visualizarse en la Figura 58. El esfuerzo cortante mínimo y máximo en dicha dirección son de -0.0291 Pa y +0.000235 Pa, respectivamente.

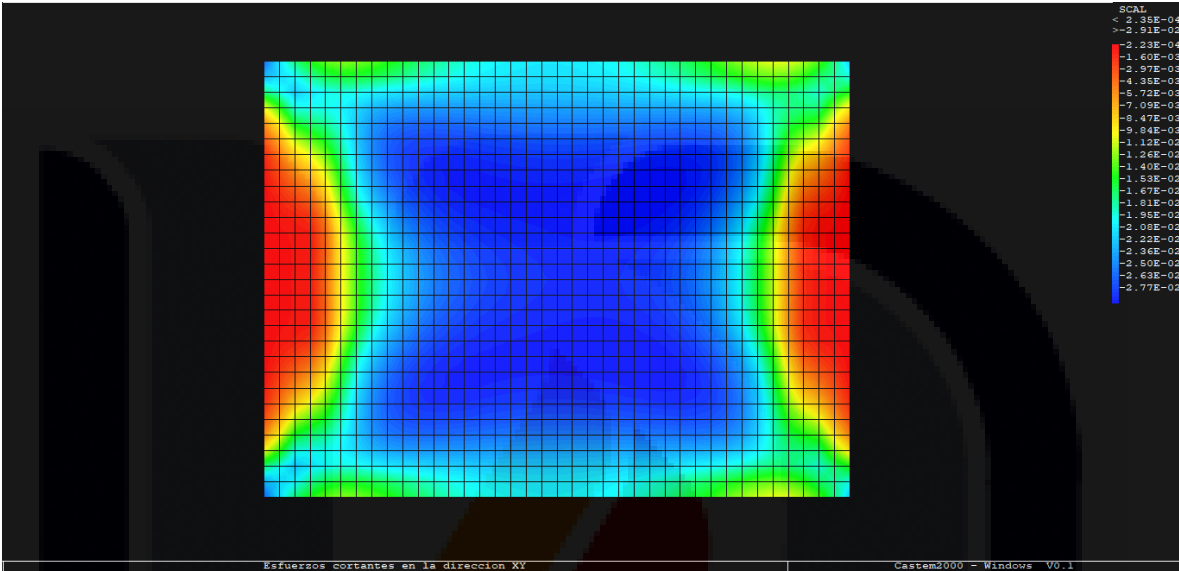


Figura 55. Esfuerzos cortantes en la dirección XY para un hundimiento diferencial de 10 cm.

Por otra parte, también se generó la gráfica de esfuerzos cortantes en la dirección XY respecto a distintos valores de hundimientos diferenciales. Dicha gráfica corresponde a la mostrada en la Figura 56, en la que se muestra que el esfuerzo cortante es directamente proporcional al hundimiento diferencial presente en la mampostería.

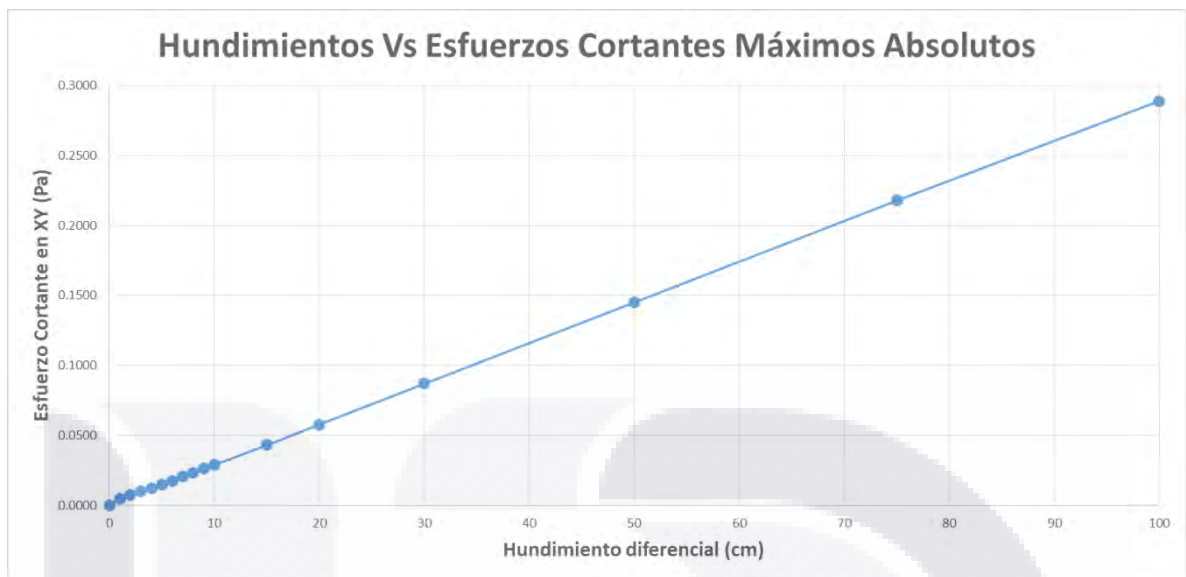


Figura 56. Gráfica de hundimientos diferenciales contra esfuerzos cortantes máximos absolutos en la dirección XY mediante la simulación por elementos finitos en el software CAST3M.

En virtud del modelo del material usado en la simulación, una relación lineal de esfuerzos y deformaciones indica que el material está en régimen elástico. Esto llama la atención, ya que son los esfuerzos cortantes insignificantes para enormes hundimientos diferenciales, lo que no concuerda con el comportamiento esperado de la mampostería confinada.