



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES

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

***TRABAJO PRÁCTICO***

ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS DE DAÑOS  
ESTRUCTURALES ASOCIADOS AL AGRIETAMIENTO SUPERFICIAL EN EL  
“MUSEO DE LA INSURGENCIA”, PABELLÓN DE HIDALGO, RINCÓN DE ROMOS,  
AGUASCALIENTES

PRESENTA

Hugo David Montalvo Delgado

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL  
CON SALIDA EN ESTRUCTURAS

TUTOR

Dr. Martín Hernández Marín

COMITÉ TUTORAL

Dr. José Ángel Ortiz Lozano, M. Ing. Jorge Eudave Muñoz

Aguascalientes, Ags, Noviembre del 2013

**Autorizaciones**



**SOLICITUD DE REGISTRO DE PROYECTO RECEPCIONAL**

No. de expediente: \_\_\_\_\_

DATOS DEL ESTUDIANTE	
NOMBRE: Hugo David Montalvo Delgado	ID (No. de Registro): 34212
PROGRAMA: Posgrado de Maestría en Ingeniería Civil	ÁREA: Estructuras
LUGAR DE TRABAJO:	PUESTO/CARGO:
TELÉFONO:	
DATOS DEL PROYECTO RECEPCIONAL	
TÍTULO: Análisis mediante simulaciones numéricas de daños estructurales asociados al agrietamiento superficial en el "Museo de la Insurgencia" en Pabellón de Hidalgo, Rincón de Romos Aguascalientes.	
TESIS (        )	TRABAJO PRÁCTICO ( X )
OBJETIVO: a.- Las características de los esfuerzos derivados de la fallas geológicas que inciden en la construcción. b.- Los esfuerzos y deformaciones críticas y actuantes en la estructura. c.- Las condiciones estructurales a futuro bajo las condiciones actuantes de esfuerzo y deformación. d.- Al menos un propuesta de adecuación estructural de acuerdo a los esfuerzos estimados derivados de la falla geológica.	
CUERPO ACADÉMICO:	LÍNEA GENERAL DE APLICACIÓN DEL CONOCIMIENTO (LGAC):
COMITÉ TUTORAL	
<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
Tutor / Asesor Académico: Dr. Martín Hernández Marín. (en caso de tener dos Tutores, favor de abrir otro espacio)	
Integrante del Comité Tutorial: Dr. José Ángel Ortiz Lozano	
Integrante del Comité Tutorial: M. en Ing. Jorge Eudave Muñoz	
VISTO BUENO	
<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
Consejero Académico: Dr. José Ángel Ortiz Lozano	
Secretario Técnico del Programa: Dr. Jesús Pacheco Mtz.	
Secretario de Investigación y Posgrado: M. en Ing. José Luis López López	

Aguascalientes, Ags. a 18 de Enero de 2013

Código: FO-040200-25  
Revisión: 01  
Emisión: 11/01/12

**SOLICITUD DE INTEGRACIÓN DEL COMITÉ TUTORAL**

**Consejo Académico del : Maestría en Ingeniería Civil.**

Por medio de la presente propongo a Uds. **tema tentativo del Trabajo Recepcional, objetivo y nombre de posibles asesores** que considero podamos dirigir el trabajo del estudiante a mi cargo, con la finalidad de someterlo a su evaluación y se me designe el Comité Tutorial.

DATOS DEL ESTUDIANTE	
NOMBRE: Hugo David Montalvo Delgado	ID (No. de Registro): 34212
	ÁREA: Estructuras
DATOS DE PROYECTO RECEPCIONAL	
TÍTULO: Análisis numérico de daños estructurales en construcciones afectadas por fracturamiento superficial en la comunidad de Pabellón de Hidalgo, Rincón de Romos Aguascalientes.	
TESIS ( )	TRABAJO PRÁCTICO ( X )
OBJETIVO: Establecer: a.- Las características de los esfuerzos que inciden en la construcción. b.- Los esfuerzos y deformaciones críticas y actuantes en la estructura. c.- Las condiciones estructurales a futuro bajo las condiciones actuantes de esfuerzo. d.- Propuesta de restructuración.	
PALABRAS CLAVE: Los esfuerzos y deformaciones críticas.	
PROPUESTA (POR ORDEN DE PREFERENCIA) DEL TUTOR RELACIONADO CON EL TEMA DE INTERÉS	
1º COTUTOR (puede ser externo): Jorge Eudave Muñoz y José Ángel Ortíz Lozano	
2º INTEGRACIÓN DEL COMITÉ TUTORAL (interno de la uaa):	
3º INTEGRACIÓN DEL COMITÉ TUTORAL (si es externo. anexar CV):	

Aguascalientes, Ags. a 15 de Junio de 2012

  
Martín Hernández Marín

**NOMBRE DEL TUTOR / ASESOR ACADÉMICO**  
(del núcleo académico básico)

ING. CIVIL  
ESTRUCTURAS  
MARTÍN HERNÁNDEZ MARÍN

ÁREA EXCLUSIVA PARA SER LLENADA POR EL CONSEJO ACADÉMICO DEL POSGRADO EN:	
CUERPO ACADÉMICO:	LÍNEA DE GENERACIÓN Y APLICACIÓN DEL CONOCIMIENTO (LGAC):
OBSERVACIONES:	

Código: FO-040200-26  
Revisión: 02  
Emisión: 04/01/11



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES

Centro de Ciencias del Diseño  
y de la Construcción

No. Oficio: CCDC-D-224-12

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

**ING. HUGO DAVID MONTALVO DELGADO**  
P R E S E N T E

Con fundamento en el Artículo 105-G Sección 2 del Capítulo XI del Reglamento General de Docencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, me permito designar como tutor al Dr. MARTIN HERNÁNDEZ MARÍN y como asesores al M. en ING. JORGE EUDAVE MUÑOZ y al DR. JOSÉ ÁNGEL ORTIZ LOZANO del proyecto de trabajo práctico terminal titulado "ANÁLISIS NUMÉRICO DE DAÑOS ESTRUCTURALES EN CONSTRUCCIONES AFECTADAS POR FRACTURAMIENTO SUPERFICIAL EN LA COMUNIDAD DE PABELLÓN DE HIDALGO, RINCÓN DE ROMOS AGUASCALIENTES" en el marco del programa de posgrado de la Maestría en Ingeniería Civil con salida en estructuras, durante el periodo del 23 de Julio del 2012 al 30 de Junio del 2013.

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

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

Aguascalientes, Ags., 09 de noviembre de 2012.

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

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





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES

**DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN**  
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS  
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **HUGO DAVID MONTALVO DELGADO** con ID 34212 quien realizó la trabajo práctico titulado: ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS DE DAÑOS ESTRUCTURALES ASOCIADOS AL AGRIETAMIENTO SUPERFICIAL EN EL "MUSEO DE LA INSURGENCIA" EN PABELLÓN DE HIDALGO, RINCÓN DE ROMOS, AGUASCALIENTES, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que el trabajo práctico pueda proceder a imprimirse, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

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

ATE NTAMENTE  
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 29 de octubre de 2013.

*Dr. Martín Hernández Marín*  
Tutor de trabajo práctico

*Dr. José Ángel Ortiz Lozano*  
Asesor de trabajo práctico

*M.I. Jorge Eudeve Muñoz*  
Asesor de trabajo práctico

c.c.p.- Hugo David Montalvo Delgado.  
c.c.p.- Secretario de Investigación y Posgrado, M.I. José Luis López López.  
c.c.p.- Jefatura del Depto. de Construcción y Estructuras, M.I. Manuel Andre Nuriño.  
c.c.p.- Consejero Académico, Dr. José Ángel Ortiz Lozano.  
c.c.p.- Minuta Secretario Técnico, Dr. Jesús Pacheco Martínez.

V.B.

---

### **Agradecimientos:**

A Dios por la fortaleza en todo momento de incertidumbre, por las alegrías y por encima de todo por las pruebas que cada día me hacen ser mejor ser humano.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes por la educación recibida a lo largo de mi vida como estudiante.

A la Dirección de Posgrados por darme la oportunidad de crecer como profesionista y otorgarme nuevas herramientas de trabajo.

Al Dr. Martín Hernández Marín por la oportunidad, orientación y motivarme día con día para seguir adelante, en fin por todo el apoyo recibido, pero sobre todo por la paciencia que me tuvo para la realización de este trabajo práctico.

Al Dr. José Ángel Ortiz Lozano por sus aportaciones y comentarios para la elaboración del trabajo práctico. Principalmente por permitirnos usar su licencia del SAP 2000

Al M. Jorge Eudave Muñoz por la ayuda otorgada para hacer este trabajo práctico.

Al Arq. José Luis García Rubalcava por la información y consejos recibidos.

Al Museo de la Insurgencia por las facilidades otorgadas para el desempeño de este trabajo.

Al M. Yolanda Hernández Álvarez y a todos sus colaboradores del Museo de la Insurgencia por el apoyo recibido para la elaboración de este trabajo práctico.

A mis profesores de la maestría por los conocimientos otorgados.

A mis compañeros y sobre todo a mis amigos Mary Lariz, Marisol, Sabas, Roberto, Carlos, Tonatiuh, Job, Pepe Chuy, Corchado, Héctor, Enrique y Diego de la maestría por el apoyo y ayuda brindada durante estos últimos 2 años.

A mi hermano “El Clon” por sus buenos deseos y su apoyo incondicional en todo momento.

---

---

A mi pequeña Megan por el apoyo, las fuerzas brindadas y el aliento para realizar este trabajo práctico.

A todos mis sobrinos por su paciencia y el aguantarme día con día.

A mi tía Raquel por el ánimo a continuar y por encima de todo a finalizar este camino que emprendí.

A mis primos, Martín, Christian, Jacqueline por los ánimos siempre brindados.

A mis Papás por el apoyo, por sus consejos y motivaciones, pero sobre todo por los valores que me inculcaron a ser una persona dedicada en cada aspecto de mi vida.

A mis hermanos por brindarme su ayuda incansable en todas las etapas y caminos que he emprendido en todo este tiempo.

A Mayra por haberme brindado su apoyo en todo momento, por su paciencia en los peores momentos, pero principalmente por todo su amor incondicional que cada día me brinda.

---

## Dedicatoria

A mis padres, Francisca y Ángel.

A mis hermanos, Cristina, Claudia, Luis, Nancy, Emelin y Walid.

A mis familias, Montalvo y Delgado.


A mi abuelita Pachita.

A mi abuelita Lupe.

A Mayra.

A Megan.

A mis amigos.





---

## 1 ÍNDICE GENERAL

1	ÍNDICE GENERAL.....	1
2	ÍNDICE DE TABLAS.....	4
3	ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
4	RESUMEN.....	9
5	ABSTRACT .....	11
6	INTRODUCCIÓN.....	13
6.1	Aspectos Generales.....	13
6.2	ALCANCES Y OBJETIVOS .....	17
7	ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EN RELACIÓN A PROBLEMAS DEL SUELO Y DE LAS ESTRUCTURAS .....	19
7.1	Consolidación de suelos.....	19
	7.1.1 Características de consolidación de suelos relativamente gruesos .....	19
7.2	Funcionamiento estructural de arcos y bóvedas de mampostería y causas de falla. .	21
7.3	La estructura de fábrica: el material .....	22
7.4	El Arco de Fábrica .....	23
	7.4.1 Equilibrio: líneas de empujes .....	23
	7.4.2 Análisis de equilibrio .....	24
	7.4.3 El cálculo elástico .....	25
	7.4.4 El colapso de arcos.....	26
	7.4.5 Cúpulas.....	28
8	ANTECEDENTES DEL MUSEO DE LA INSURGENCIA, PABELLÓN DE HIDALGO .....	30
8.1	HISTORIA.....	30
8.2	Descripción del Museo de la Insurgencia. ....	32
8.3	Historia estructural.....	36

---

---

9	METODOLOGÍA.....	47
9.1	Análisis estructural preliminar y tipos de materiales constructivos .....	48
9.2	Estudio Topográfico .....	50
9.3	4.3 Evaluación de daños estructurales actuales .....	56
	9.3.1 Descripción de testigos para evaluar las deformaciones.....	56
	9.3.2 Monitorización de daños.....	59
	9.3.3 Tipificación de daños .....	63
9.4	Ensayos destructivos y no destructivos para la determinación de los parámetros mecánicos.....	64
	9.4.1 Ensayos no destructivos .....	64
9.5	Ensayos destructivos.....	66
10	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	73
	10.1.1 Estimación de cargas.....	73
	10.1.2 Rehabilitación estructural .....	73
	10.1.3 Resumen de rehabilitación estructural .....	80
11	ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR MEDIO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	82
11.1	Descripción del método de los elementos finitos .....	82
11.2	Aplicación del método MEF en el Museo de la Insurgencia.....	86
11.3	Características mecánicas de los materiales estructurales.....	86
11.4	Elementos estructurales y criterios de simulación de los mismos .....	87
11.5	Primer modelo: Arcos y columnas afectadas solo por el peso propio de los materiales constructivos.....	88
11.6	Segundo modelo: Arcos y columnas con deformaciones inducidas por la falla geológica.....	89

---

---

11.7	Combinaciones de las acciones consideradas .....	90
11.8	Modelación de los arcos y columnas afectado solo por el peso propio de los materiales constructivos.....	90
11.8.1	Cargas actuantes estáticas. ....	90
11.9	Análisis y comparación de las deformaciones entre los modelos considerando su respuesta estructural ante las solicitaciones actuantes .....	91
11.9.1	Estados límite de falla por tensión, cortante y compresión de los materiales estructurales y comparación con los resultantes en las simulaciones .....	94
11.10	Estimación a futuro de los desplazamientos inducidos por la falla geológica.....	97
11.11	Análisis y comparación de las deformaciones entre los modelos considerando su respuesta estructural ante las solicitaciones actuantes a futuro. ....	105
11.12	Propuesta de adecuación estructural. ....	110
12	LIMITANTES DEL TRABAJO PRÁCTICO.....	113
13	CONCLUSIONES .....	115
14	BIBLIOGRAFÍA .....	117

---

---

## 2 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de los daños observados en construcciones relacionadas con el hundimiento de diferenciales en la ciudad de Aguascalientes y cuyos resultados fueron retomados por Pacheco et al (2013). .....	15
Tabla 2. Propiedades de los materiales utilizados en los modelos numéricos de este trabajo (Meli y Sánchez, 1993). .....	50
Tabla 3. Lecturas de testigos. ....	59
Tabla 4. Propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción y rehabilitación del Museo de la Insurgencia. ....	87
Tabla 5. Estados de esfuerzos de falla en arcos y columnas norte. ....	96
Tabla 6. Estados de esfuerzos de falla en arcos y columnas sur. ....	96
Tabla 7 Comportamiento de desplazamiento a futuro del testigo 01. ....	98
Tabla 8 Comportamiento de desplazamiento a futuro del testigo 02. ....	100
Tabla 9 Comportamiento de desplazamiento a futuro del testigo 03. ....	101
Tabla 10. Comportamiento de desplazamiento a futuro del testigo 04. ....	103
Tabla 11. Comportamiento de desplazamiento a futuro del testigo 05. ....	104
Tabla 12 Estados de esfuerzos de falla en arcos y columnas norte. ....	108
Tabla 13 Estados de esfuerzos de falla en arcos y columnas sur. ....	108

### 3 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas de compresibilidad en especímenes de arena fina (Juárez Badillo 2005).	20
Figura 2. Sección constructiva de un edificio medieval. Detalles de la construcción de muros romanos y medievales (Viollet-le-Duc 1858).....	22
Figura 3. Arcos de mampostería que soportan empujes de tierra (Durm 1885).....	23
Figura 4. Estabilidad de arcos de fábrica. ....	24
Figura 5. Posible línea de empujes de un arco de medio punto (Heyman 1995).....	24
Figura 6. Desplazamiento de la línea de empujes debido a ciertos procedimientos de los apoyos. Sistemas para “fijar” la línea de empujes durante la construcción (Winkler 1880). ....	25
Figura 7. Colapso de un arco de medio punto bajo una carga puntual (Heyman 1995).....	27
Figura 8. Agrietamiento típico de una cúpula (Heyman, 1988). ....	28
Figura 9. Agrietamiento parcial de una cúpula (Heyman, 1988).....	29
Figura 10. Localización del Museo de la Insurgencia, Pabellón de Hidalgo, Rincón de Romos, Aguascalientes, México.....	32
Figura 11. Planta del Museo de la Insurgencia. ....	33
Figura 12. Planta a nivel bóveda.....	34
Figura 13. Geometría de las bóvedas de cañón. ....	34
Figura 14. Elevación de arcos norte.....	35
Figura 15. Elevación de arcos este.....	35
Figura 16. Elevación de arcos sur. ....	35
Figura 17. Arcos en lado norte.....	36
Figura 18. Junta fría en muro norte, desprendimiento del plafón.....	37
Figura 19. Junta fría en arco norte debido a la falla. ....	37
Figura 20. Vista inferior de bóveda de arcos norte. Junta fría.....	38
Figura 21. Tapajuntas en azotea, lado norte. ....	38
Figura 22. Bóveda, muro y arco sur.....	39
Figura 23. Junta fría en bóveda en pasillo sur. ....	39

Figura 24. Junta fría en muro de pasillo sur, desprendimiento de plafón.....	40
Figura 25. Junta fría en arco sur. ....	40
Figura 26. Tapajuntas en pasillo sur. ....	40
Figura 27. Junta fría en bóveda, sala de exhibición principal.....	41
Figura 28. Junta fría en bóveda, sala de exhibición principal.....	41
Figura 29. Tapajuntas en bóvedas, sala de exhibición principal. ....	42
Figura 30. Junta fría en muro norte de la sala de exhibición, desprendimiento de plafón. ..	42
Figura 31. Junta fría en muro sur de la sala de exhibición, desprendimiento de plafón.....	43
Figura 32. Junta fría en muro sur de la sala de exhibición, en exterior del Museo. ....	43
Figura 33. Simulación de escalón por cambio a desnivel provocado por la falla en arco norte .....	44
Figura 34. Simulación de escalón por cambio a desnivel provocado por la falla en arco sur. .....	44
Figura 35. Escalón en sala de exhibición.....	45
Figura 36. Junta fría (viendo hacia arco norte).....	46
Figura 37. Junta fría (viendo hacia arco sur). ....	46
Figura 38. Diagrama esfuerzo-deformación de una mampostería típica .....	49
Figura 39. Planta general. ....	51
Figura 40. Zona de topografía más detallada, observando curvas de nivel (azul = 1mm. y magenta =0.5mm.) y trayectoria de falla. ....	52
Figura 41. Topografía del primer levantamiento, el 24 de Noviembre de 2012. Los valores incluidos en las curvas son elevaciones con datos ficticios solo para indicar la magnitud de la deformación relativa en el patio.....	53
Figura 42. Topografía del segundo levantamiento, el 23 de Marzo de 2013. Los valores incluidos en las curvas son elevaciones con datos ficticios solo para indicar la magnitud de la deformación relativa en el patio.....	55
Figura 43. Ubicación de testigos.....	56
Figura 44. Testigos 01 con su lectura inicial. ....	57
Figura 45. Testigos 02 con su lectura inicial .....	57
Figura 46. Testigos 03 con su lectura inicial .....	57

---

Figura 47. Testigos 04 con su lectura inicial .....	58
Figura 48. Testigos 05 con su lectura inicial. ....	58
Figura 49. Medidor de testigos. ....	62
Figura 50. Lector de testigos.....	63
Figura 51. Esclerometría en arco norte. ....	65
Figura 52. Esclerometría en arco norte. ....	65
Figura 53. Esclerometría en arco sur. ....	66
Figura 54. Esclerometría en arco sur. ....	66
Figura 55. Muestra para obtención de corazones. ....	68
Figura 56 Muestra para obtención de corazones. ....	68
Figura 57. Muestra para obtención de corazones. ....	69
Figura 58. Obtención del primer corazón .....	69
Figura 59. Obtención del segundo corazón. ....	70
Figura 60. Obtención del tercer y último corazón. ....	70
Figura 61. Ensayo del primer espécimen.....	71
Figura 62. Ensayo del segundo espécimen .....	71
Figura 63. Ensayo del tercer espécimen. ....	72
Figura 64. Especímenes después del ensayo. ....	72
Figura 65. Vista frontal de los arcos sobre las columnas norte. ....	74
Figura 66. Vista frontal de la junta fría en el arco norte viendo por el pasillo. ....	75
Figura 67. Se muestra la junta fría en el arco norte. ....	75
Figura 68. En la junta fría en el arco norte. ....	76
Figura 69. Elevación longitudinal del arco norte.....	77
Figura 70. Elevación longitudinal del arco norte.....	77
Figura 71. Corte A sobre arcos norte. ....	78
Figura 72. Vista frontal de los arcos sobre columnas sur. ....	78
Figura 73. Junta fría en el arco sur.....	79
Figura 74. Elevación longitudinal del arco sur. ....	79
Figura 75. Elevación longitudinal del arco sur. ....	80
Figura 76. Corte A sobre arcos norte. ....	80

---

---

Figura 77. Elementos para geometría unidimensional.....	83
Figura 78. Elementos para geometría bidimensional.....	83
Figura 79. Elementos para geometría tridimensional. ....	83
Figura 80. Elemento asimétrico. ....	84
Figura 81. Elemento viga. ....	84
Figura 82. Elemento placa. ....	84
Figura 83. Elemento cascara. ....	85
Figura 84. Modelación de los arcos y columnas nortes con elementos finitos.....	88
Figura 85. Modelación de los arcos y columnas sur con elementos finitos.....	89
Figura 86. Arcos y columnas norte sin deformación. Los valores en kg/cm <sup>2</sup> . ....	92
Figura 87. Arco y columnas sur sin deformaciones. Los valores en la barra de leyenda son kg/cm <sup>2</sup> . ....	92
Figura 88. Arco y columnas norte con deformación. Los valores en kg/cm <sup>2</sup> . ....	93
Figura 89. Arco y columnas sur con deformación. Los valores en la barra de leyenda son kg/cm <sup>2</sup> . ....	94
Figura 90 Arco y columnas norte con deformación a futuro a 5 años. Los valores en la barra de leyenda son kg/cm <sup>2</sup> . ....	106
Figura 91 Arco y columnas sur con deformación a futuro a 5 años. Los valores en la barra de leyenda son kg/cm <sup>2</sup> . ....	107
Figura 92 Columna de arco norte con fisura. Foto tomada a finales de esta investigación (agosto 2013) .....	109
Figura 93 Elevación longitudinal del arco norte con propuesta de adecuación estructural. ....	111
Figura 94 Zoom de la propuesta de adecuación estructural sobre elevación del arco norte. ....	111
Figura 95 Elevación longitudinal del arco sur con propuesta de adecuación estructural. ...	112
Figura 96 Zoom de la propuesta de adecuación estructural sobre elevación del arco sur. ....	112

---



## 4 RESUMEN

Según estudios realizados a partir de los años ochenta, desde 1985 se reportó la aparición de grietas y fallas geológicas superficiales en el valle de Aguascalientes. Las hipótesis más aceptadas que existen en cuanto a las causas de este fenómeno son, entre otras, los movimientos tectónicos, la extracción de agua subterránea o el arrastre de materiales granulares por efectos gravitatorios. Mientras que algunas de las consecuencias que genera el fenómeno del agrietamiento son por mencionar los más importantes, la contaminación del acuífero por infiltración de aguas negras, daños en infraestructura urbana y daños en edificaciones. Siendo éste último, el problema que se aborda en el presente documento.

Los hundimientos y agrietamientos producen inestabilidad en la estructura de inmuebles. Algunos de ellos son considerados patrimonio y tienen un valor histórico, social y cultural por lo que es necesario promover su preservación. Tal es el caso del Museo de la Insurgencia localizado en la comunidad de Pabellón de Hidalgo, Rincón de Romos, Aguascalientes, que está siendo severamente afectado por una falla geológica. Por lo anterior, fue necesario realizar una evaluación de daños y una propuesta de solución para salvaguardar su estabilidad estructural.

La metodología de análisis consistió primero en revisar el estado actual estructural del Museo de la Insurgencia que resultó de la última adecuación estructural realizada al edificio para que éste conviviera con la falla que lo afecta. Con base en este análisis, se determinaron los daños estructurales que sufre el inmueble vía cuantificación de los desplazamientos inducidos por la falla, esto se logró mediante la colocación de varios testigos fijos colocados estratégicamente a lo largo de la falla en su traza dentro del museo, fue necesario realizar un monitoreo de los desplazamientos a lo largo del Museo por medio de testigos fijos.

Los resultados obtenidos indican que estructuralmente, el edificio presenta desplazamientos tanto verticales como horizontales del orden del 3 mm y 10 mm, respectivamente, durante el periodo de medición que comprendió los meses de Febrero a Agosto del presente año, y que están afectando la integridad de la estructura.

Se concluye que la falla sigue activa, que sus desplazamientos continuarán afectando paulatinamente y que los daños serán cada mas graves en la estructura. Con base al análisis presentado de desplazamientos y esfuerzos simulados en este trabajo se estima que bajo las condiciones actuales el edificio está en riesgo de colapso a partir de los siguientes 5 años, por tal motivo en este trabajo se propone como adecuación estructural el desligar totalmente los dos bloque en los arcos y columnas más afectados, y si es posible incluir nuevas columnas para impedir que los arcos queden en voladizo.

---

## 5 ABSTRACT

After 1985 the existence of cracks and surface faults in the valley of Aguascalientes was reported. The more accepted hypotheses regarding the occurrence of this phenomenon are, among others, the tectonic movements, extraction of groundwater or the drag of granular materials by gravitational effects. While some of the most important consequences of the phenomenon of cracking are, aquifer pollution by sewage infiltration, urban infrastructure damage and damage to buildings. The later is the problem addressed in this document.

The subsidence and cracking produce instability in the structure of buildings. Some of them are considered to have an important inheritance as well as historical, social, and cultural values, thus, it is necessary to promote their preservation. This is the case of Insurgency Museum, located in the community of “Pabellón de Hidalgo”, Rincón de Romos, Aguascalientes. This historical building is being strongly affected by a geological fault. Therefore, in order to contribute with the preservation of this building, this investigation includes a series of analysis methodologies in order to propose a potential solution for structural safety and stability.

The analysis methodology consisted first in reviewing the current structural state of the Insurgency Museum, which resulted from the last structural rearrangement for the building to coexist with the fault that affects it. Based on this revision, the structural damages suffered by the building were determined. This was accomplished through the quantification of the fault-induced displacements in fixed witnesses strategically placed throughout the trace of the fault into the building.

Structural results indicate that the building suffers both vertical and horizontal displacements of the order of 3 mm and 10 mm, respectively, resulted after the period of

monitoring (February to August of 2013), and which are affecting the integrity of the structure.

It is concluded that the fault is still active, that its movements will gradually continue affecting and that the damages will become more serious in the structure. Based on the analysis presented in this paper it is estimated that under the current conditions, the building is in risk of collapse after the following five years, for this reason, in this work is proposed an structural adequacy consisting in completely decouple the two block in the most affected arches and columns, and if possible, to include new columns to prevent cantilevered arches.

---

## 6 INTRODUCCIÓN

### 6.1 Aspectos Generales

En México, la mayor parte del suministro de agua que llega a la población del país proviene de los acuíferos, mismos que, en su mayoría, se consideran sobreexplotados, es decir, que el volumen de salida es mayor al de entrada. Se calcula que de la totalidad de agua que se obtiene de un sistema acuífero se destina del 60 al 65% para el consumo urbano, agrícola e industrial, del cual el 80% es para uso agrícola. Lo anterior según las investigaciones realizadas de Rodríguez-Castillo y Rodríguez-Velázquez (2006).

Los planes y sistemas de suministros de agua subterránea no prevén las recargas de los acuíferos, y se sabe que, cuando la extracción es mayor que la recarga de los mismos, se ocasiona abatimiento de los niveles piezométricos. Estos acontecimientos pueden provocar daños colaterales prácticamente irreversibles, el más trascendente es la subsidencia, la cual se suele manifestar como hundimientos diferenciales en la superficie. Hoy en día, la falta de agua subterránea está provocando la compactación de los suelos, y por consecuencia, en algunos casos, fracturamiento en la superficie.

R. Fuller en 1908 (en Poland, 1984) fue uno de los primeros en vincular los hundimientos del suelo con la extracción de aguas subterráneas. Siendo Terzaghi (1925) el primero en plantear científicamente el acontecimiento con una ecuación de consolidación unidimensional. Tales trabajos fueron retomados por Meinzer (1928) quien relacionó a la extracción de agua de un acuífero con la compresión del mismo, además de que demostró que la disminución del almacenamiento puede ser permanente (inelástica) o recuperable (elástica). Las primeras observaciones son realizadas por Rappley y Tibbets en 1933 (citados en Poland e Ireland, 1988) en el Valle de Santa Clara en California. Posteriormente, T. Althouse (en Evans, 1986) asoció la extracción de agua con hundimientos en el Valle de San Joaquín en California de 1935. En México, Nabor Carrillo desde la década de 1950 reconoció que la subsidencia está asociada a la extracción de agua

---

---

subterránea del gran paquete arcilloso de origen lacustre de la Cuenca de México (Marsal y Mazari, 1959).

En la mayoría de las ciudades afectadas por hundimientos diferenciales se tiene la teoría que la exhaustiva extracción de aguas subterráneas para abastecimiento de uso urbano, agrícola e industrial está correlacionada con subsidencia. Hay varias ciudades de la República Mexicana, que presentan problemas de hundimientos diferenciales relacionados con la subsidencia, como es el caso de la ciudad de Aguascalientes. Hasta el momento no se ha realizado un censo detallado de los daños ocasionados por este fenómeno geológico, sobre todo en cuanto a la cuantificación del costo que representa este problema a la ciudadanía. La mayoría de estos daños no son previstos si no hasta la aparición de grietas en los inmuebles, ya sea en pisos, muros, cadenas, columnas, trabes, losas etcétera (Pacheco et al, 2013).

En la ciudad de Aguascalientes una investigación realizada por Ortiz-Lozano et al. (2010), en estructuras de vivienda afectadas por fallas superficiales, se inspeccionaron y analizaron más de 80 casas habitación que presentaban principalmente hundimientos diferenciales. Uno de los principales planteamientos fue unificar los criterios de evaluación e inspección, y así establecer que los dictámenes sean más objetivos, cuantificables y precisos. Cabe señalar que los daños a estas casas habitación no solo fueron derivados de hundimientos diferenciales si no también a consecuencia de la mala calidad de los materiales de construcción, o procesos constructivos inadecuados. Un resumen de los resultados obtenidos se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1. Lista de los daños observados en construcciones relacionadas con el hundimiento de diferenciales en la ciudad de Aguascalientes y cuyos resultados fueron retomados por Pacheco et al (2013).**

No.	Problema	Frecuencia
1	Grietas diagonales en muros de carga debido a la tensión diagonal.	61
2	Desprendimiento de recubierta de los elementos de concreto.	47
3	Grietas en los pisos debido a asentamientos diferenciales.	43
4	Varias grietas en muros de carga, que principalmente presentan trayectorias diagonales debido a la tensión diagonal.	23
5	Grietas horizontales en los muros de carga.	20
6	Grietas verticales en las esquinas de las columnas debido a la excesiva carga de compresión.	19
7	Barras de refuerzo de acero expuestas en elementos de concreto.	17
8	Distorsiones en marcos de puertas y ventanas.	16
9	Grietas diagonales en vigas de concreto armado, debido a fuerzas cortes por asentamientos diferenciales.	16
10	Grietas verticales en los muros de carga debido a la compresión excesiva cargar.	12
11	Grietas horizontales en la conexión de la pared y la losa debido a asentamientos diferenciales.	12
12	Las grietas en las losas debido a la tensión en la parte inferior prosedentes de la flexión.	10
13	Separación entre la columna y la pared.	8
14	Las grietas en las esquinas de las ventanas.	6
15	Las grietas en las esquinas de las puertas.	5
16	Las grietas en las vigas debido a la tensión en la parte inferior prosedentes de la flexión.	5
17	Grietas horizontales en los muros de carga en toda la longitud.	5
18	Grietas horizontales en muro de carga en la parte inferior debido a asentamientos diferenciales.	5
19	Elementos verticales con inclinación (muros y columnas).	3

Actualmente de entre las varias construcciones afectadas por el fracturamiento superficial en el valle de Aguascalientes, se encuentra el Museo de la Insurgencia en la comunidad de Pabellón de Hidalgo, el cual tiene gran valor histórico para el país puesto que fue en este lugar en el que Miguel Hidalgo fue relegado de su mando por los altos mandos insurgentes durante la guerra de Independencia. Este edificio tiene la peculiaridad de que ha recibido recientes adecuaciones estructurales para que la estructura “conviva” con una fractura superficial que lo está afectando, esto con el fin de no perder un edificio de patrimonio histórico nacional, sin embargo, los efectos de la grieta que se traducen en deformación (separación) continua, siguen afectándolo severamente, causando la aparición

---

de nuevas grietas en columnas y muros y la separación continua de arcos de mampostería, hechos que auguran un potencial colapso del mismo.





## 6.2 ALCANCES Y OBJETIVOS

Utilizando análisis estructural y simulaciones numéricas, el objetivo principal de este trabajo es determinar el comportamiento estructural del Museo de la Insurgencia ante las acciones de la falla geológica que lo afecta, así como proponer una solución que permita alargar la vida útil del inmueble.

Del análisis estructural se establecerán:

- Las técnicas constructivas del inmueble tanto las originales como las post-adecuación.
- El detalle estructural de las adecuaciones realizadas para rescatar el edificio.
- Las condiciones de esfuerzos estáticos derivados de las cargas vivas y muertas que actúan sobre la estructura.
- Mediante la aplicación de simulaciones numéricas se pretende establecer:
  - Las características de los esfuerzos derivados de la falla geológica que inciden en la construcción.
  - Un análisis comparativo de los esfuerzos y deformaciones críticas y actuantes en la estructura.
  - Las condiciones estructurales a futuro bajo las condiciones actuales de esfuerzo y deformación.

- Al menos una propuesta de adecuación estructural de acuerdo a los esfuerzos estimados derivados de la falla geológica.



## **7 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EN RELACIÓN A PROBLEMAS DEL SUELO Y DE LAS ESTRUCTURAS**

En este capítulo se abordan a grandes rasgos y desde un punto de vista analítico algunas características de la deformación del suelo por consolidación, teniendo en cuenta que este proceso es relevante en la subsidencia del valle de Aguascalientes, del cual ya se mencionó que la extracción del agua subterránea es una causa probable. De igual manera se incluye una retrospectiva de algunos de los principales componentes estructurales de edificios antiguos mexicanos como el Museo de la Independencia.

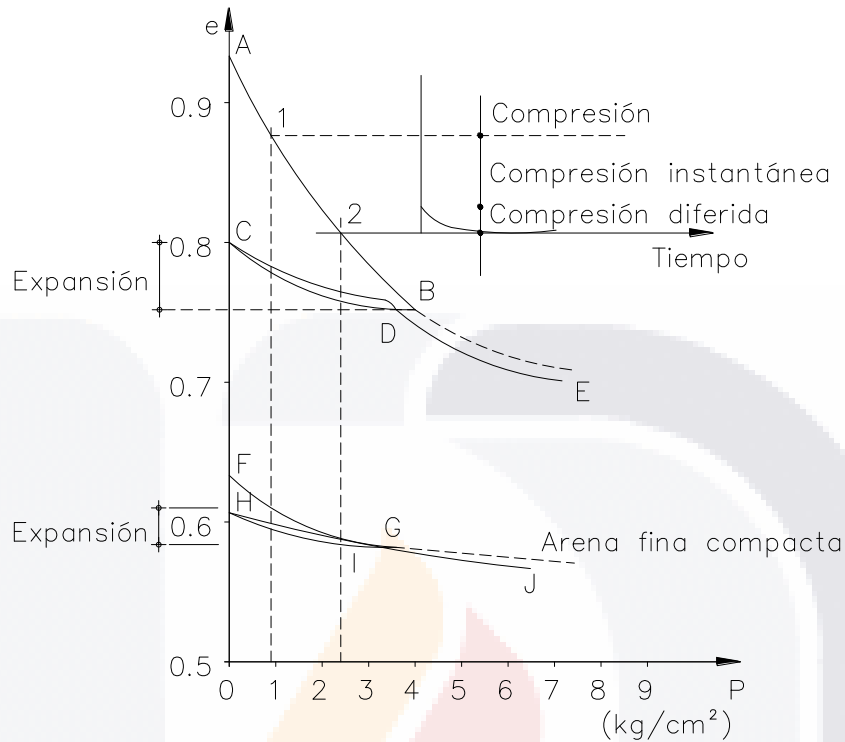
### **7.1 Consolidación de suelos**

Se puede definir a la consolidación de suelos como el proceso de disminución de volumen del mismo y aumento de cargas en un lapso de tiempo determinado causado por la imposición de esfuerzos compresivos o por la inducción de la reducción de la presión de fluido intersticial sobre el suelo. Durante el proceso de consolidación, las partículas sólidas se mantienen en un mismo plano horizontal y presentan desplazamientos únicamente en sentido vertical se dice que es una consolidación unidireccional o unidimensional (Juárez Badillo 2005).

#### **7.1.1 Características de consolidación de suelos relativamente gruesos**

A fin de comprender mejor algunos aspectos del fenómeno de la consolidación de los suelos finos, se considera, primeramente, a continuación el comportamiento de suelos relativamente gruesos cuando se someten a la prueba de consolidación unidimensional.

En la figura 1 se muestran los resultados de compresibilidad en escala natural derivados de pruebas de consolidación ejecutadas sobre muestras de arena fina seca, una en estado suelto y el otro en estado compacto.



**Figura 1. Curvas de compresibilidad en especímenes de arena fina (Juárez Badillo 2005).**

El eje de las ordenadas indica la relación de vacíos (equivalente a la deformación), mientras que el eje de las abscisas indica la magnitud de esfuerzos efectivos aplicados a la muestra. Como puede observarse la arena suelta muestra una deformación mucho mayor a la compacta debido al mayor volumen de vacío.

En una arena suelta (curva superior de la figura 1), por lo menos el 80% de la disminución de volumen ocurre en forma prácticamente instantánea. El resto del decremento volumétrico ocurre ya a lo largo del tiempo, a causa del retardamiento producido por la fricción entre las partículas; este decremento tiene lugar a una velocidad que decrece rápidamente. Si los vacíos de la arena están llenos de agua o si la masa compresible es grande, la deformación volumétrica instantánea puede ser lenta, debido a la dificultad que el agua encuentra para fluir. Cuanto menores sean los volúmenes de vacíos

del suelo y más largas sean las trayectorias de flujo del agua, es decir, cuanto mayor sea el espesor del estrato de suelo comprimido, se necesitará más tiempo para que el agua sea expulsada, retardando el proceso de consolidación. Siendo éste último el efecto primario o consolidación primaria, mientras que el efecto secundario o consolidación secundaria es debida al retardamiento del proceso por fricción entre las partículas.

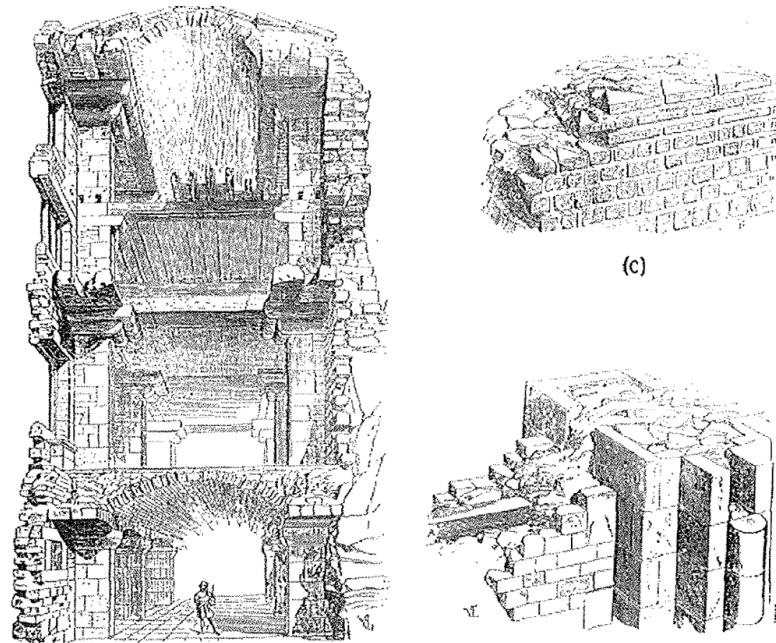
## **7.2 Funcionamiento estructural de arcos y bóvedas de mampostería y causas de falla.**

En el siguiente subcapítulo se basa principalmente en el trabajo realizado por Huerta (2001) sobre estructuras de arcos y bóvedas, mismas que se utilizaron en el diseño original del Museo de la Insurgencia.

Hasta el siglo XVIII no se desarrolló una teoría científica de las estructuras, basada en la Resistencia de Materiales y las leyes de la Mecánica. Al tema de bóvedas y arcos entonces, fue necesario darle un enfoque desde el punto de vista científico, dentro de los parámetros de las teorías de estructuras actuales, siendo el objetivo primordial la construcción de obras seguras y la revisión de las obras ya existente tomando en cuenta un análisis tradicional y moderno que sobre guarden la geometría tradicional de su tipo.

El profesor Heyman (1977) desarrolló la teoría moderna del análisis límite que nos permite comprender y analizar la construcción y fabricación de elementos de mampostería, siendo el “enfoque del equilibrio” su aportación principal a esta teoría, en el que se estudian posibles estados de equilibrio con la mampostería trabajada a compresión. La existencia de estos posibles estados de equilibrio depende de la geometría, por lo que la teoría moderna conduce a las mismas disposiciones geométricas que la tradicional.

### 7.3 La estructura de fábrica: el material



**Figura 2. Sección constructiva de un edificio medieval. Detalles de la construcción de muros romanos y medievales (Viollet-le-Duc 1858).**

Lo que tenemos en construcciones como el Museo de la Insurgencia es una superposición de piedras, ladrillos o cascote, recibido con mortero o a hueso y dispuestos (aparejados) de tal modo que se encuentran en equilibrio bajo la acción de la gravedad. El mortero, si existe, es muy débil y a tensión, por lo que la interacción entre los distintos elementos se tiene que producir por medio de esfuerzos de compresión. Además, es un hecho que el edificio mantiene su forma a través de los años, el rozamiento entre los distintos elementos es suficientemente alto para evitar el deslizamiento (el ángulo de rozamiento típico para la piedra es de  $30^{\circ}$ - $35^{\circ}$ ). Finalmente, la resistencia a las tensiones con relación a la de compresión es en general muy baja, con lo que el peligro de fallo por aplastamiento es despreciable.

Contamos entonces con un material compuesto y heterogéneo, resistente a compresión, muy débil a tensión y sin peligro de deslizamiento entre las piedras, todas

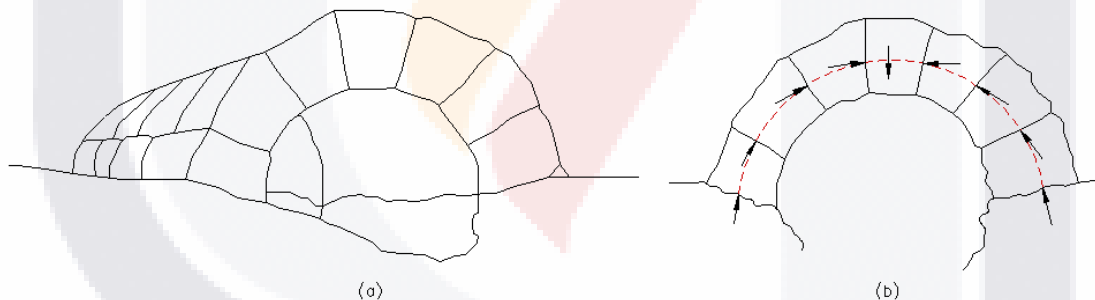
estas consideraciones fueron realizadas explícita o implícitamente en la teoría de bóvedas de los siglos XVIII y XIX.

## 7.4 El Arco de Fábrica

### 7.4.1 Equilibrio: líneas de empujes

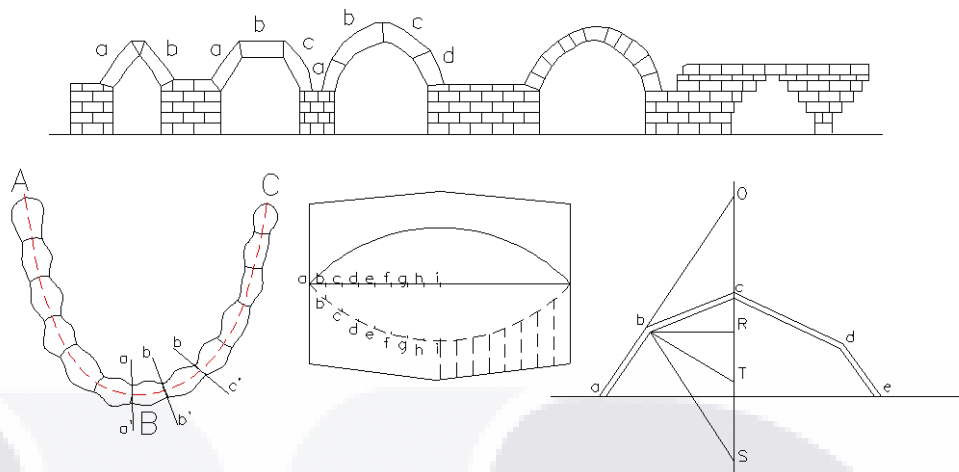
El elemento básico en la arquitectura de fábrica es el arco que da la forma "natural" de salvar una luz con un material que no resiste tensión. Los arcos no están presentes en la naturaleza: son una invención, que apareció en Babilonia hace unos 6,000 años.

El arco siempre está empujando, "el arco nunca duerme" dice un antiguo proverbio árabe; la arquitectura de fábrica tiene entonces, dos problemas principales: proyectar arcos que se mantengan en pie y estribos que resistan su empuje.

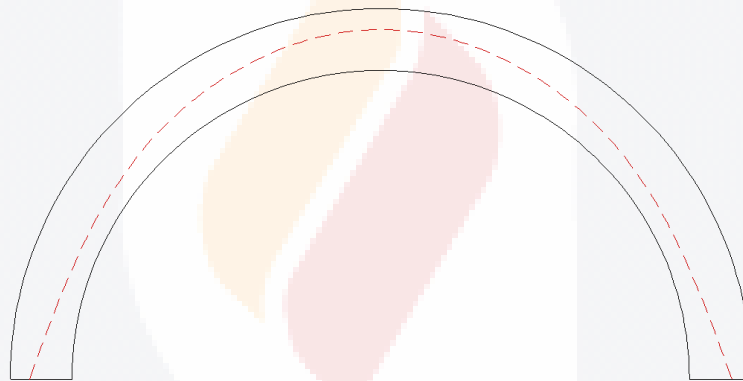


**Figura 3. Arcos de mampostería que soportan empujes de tierra (Durm 1885).**

El lugar geométrico de los centros de empuje forma una línea, conocida como "línea de empujes". La forma de esta línea depende de la geometría del arco, de sus cargas, así como de la familia de juntas planas consideradas.



**Figura 4. Estabilidad de arcos de fábrica.  
Arco “colgante” de fábrica (Robison 1822).**



**Figura 5. Posible línea de empujes de un arco de medio punto (Heyman 1995).**

#### 7.4.2 Análisis de equilibrio

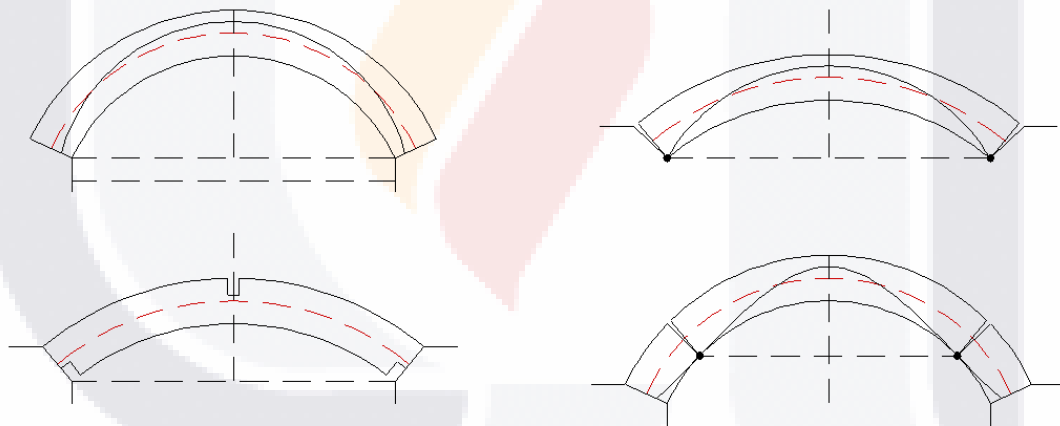
Cualquier línea de empujes dentro del arco representa una posible solución de equilibrio, pero esta solución no es única, es evidente que en un arco de suficiente espesor que son posibles e infinitas catenarias inventadas o líneas de empujes. El arco es una estructura estáticamente indeterminada o hiperestática.



### 7.4.3 El cálculo elástico

Hasta aproximadamente 1880, los ingenieros clasificaban los arcos en dos grupos: "elásticos", ejecutados en madera o hierro forjado, y "rígidos", los ejecutados en fábrica.

Winkler (1879) fue el primero en tratar de profundizar el enfoque elástico del cálculo de arcos de fábrica, añadiendo un extenso comentario sobre las perturbaciones que pueden afectar la posición de la línea de empujes, Winkler propuso, entonces, calcular el arco para lo que se denominó su estado "normal", sobre una cimbra rígida y estribos rígidos, con el mortero perfectamente fraguado, sin variaciones de temperatura. Considero, después, que la línea de empujes calculada para este estado "normal" era la "verdadera" o "real". No obstante, para paliar el efecto de las perturbaciones sobre este estado "real" sugirió algunos modos de controlar la posición de la línea de empujes, disponiendo en el arco articulaciones internas durante su construcción.



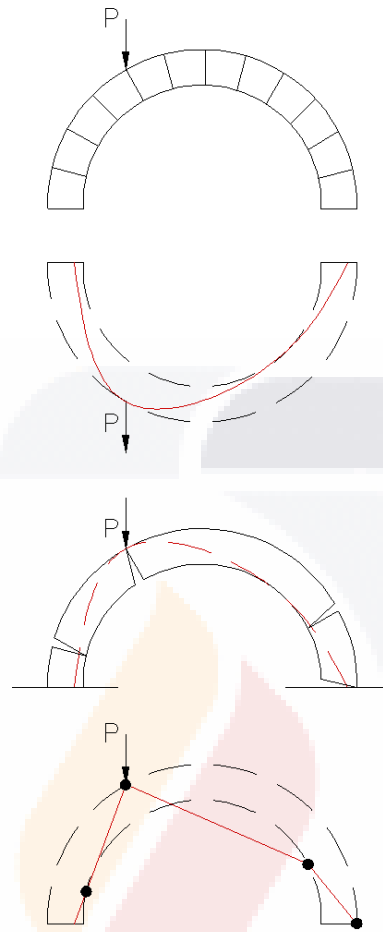
**Figura 6. Desplazamiento de la línea de empujes debido a ciertos procedimientos de los apoyos. Sistemas para “fijar” la línea de empujes durante la construcción (Winkler 1880).**

Sin embargo, todavía había dudas y para verificar la validez del cálculo elástico de arcos de fábrica el Osterreichisches Ingenieur- undarchitekten- Verein (Institución Austriaca de Ingenieros y Arquitectos) realizó una serie de ensayos sobre arcos de piedra, ladrillo, concreto en masa y concreto armado, algunos de ellos de hasta 23 m de luz, los

resultados se interpretaron como la confirmación experimental y definitiva de la "moderna" teoría elástica que se podían apreciar agrietamientos debido a movimientos y la aparición de mecanismos de colapso, por la formación de lo que se llamarían más tarde rotulas plásticas. Resulta interesante señalar que las deformaciones no son de ningún modo elásticas, sino el resultado de la división de la estructura en una serie de partes que, conectadas a través de las articulaciones, permiten ciertos movimientos.

#### **7.4.4 El colapso de arcos**

Cuando la línea de empujes toca el borde del arco se produce una articulación, que permite la rotación, tres articulaciones hacen al arco estáticamente determinado y un arco con tres articulaciones es una estructura estable. Una articulación más, no obstante, convertiría al arco en un mecanismo de cuatro bielas que colapsaría.



**Figura 7. Colapso de un arco de medio punto bajo una carga puntual (Heyman 1995).**

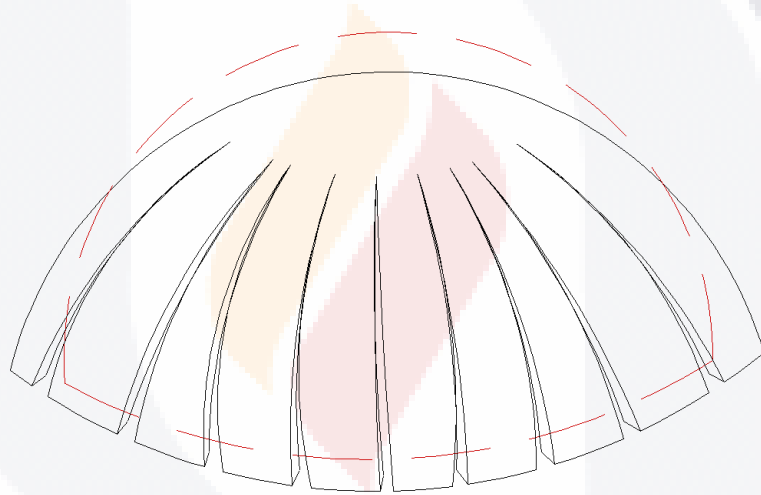
Por lo tanto un aumento de la carga que llevara a la formación de cuatro articulaciones provocaría el colapso sin que se produjera la ruptura del material.

El teorema de la seguridad del análisis limita solucionar el problema de encontrar la línea de empujes real. Es imposible conocer cuál es la línea de empujes real, pero esto no debe importarnos, ya que basta poder dibujar una línea de empujes dentro del arco para demostrar que es seguro. La potencia del teorema es que esta línea no tiene que ser la "real", es suficiente con que sea posible.

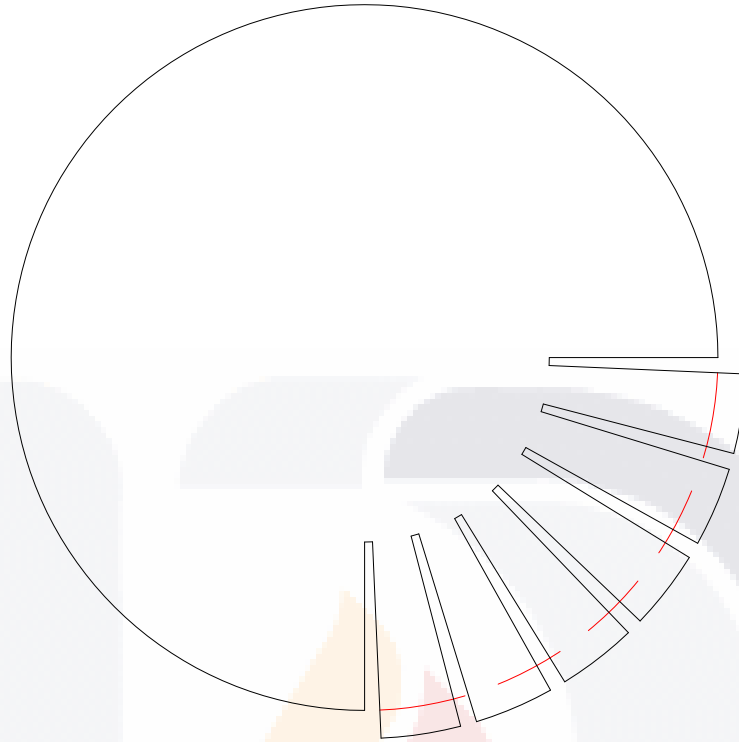
### 7.4.5 Cúpulas

Una cúpula se puede imaginar dividida en una serie de arcos, o "gajos", obtenidos al cortar la bóveda por planos meridianos. Cada dos gajos enfrentados forman un arco; si podemos dibujar una línea de empuje dentro de este arco, habremos encontrado un posible estado de equilibrio a compresión y la cúpula es segura, no colapsará.

Respecto a las grietas, el caso típico que encontramos en la mayoría de las ocasiones es el de las grietas meridianas, estas se deben a que el sistema de contrarresto cede en pequeña magnitud, en la mayoría de los casos es el tambor el que cede.



**Figura 8. Agrietamiento típico de una cúpula (Heyman, 1988).**



**Figura 9. Agrietamiento parcial de una cúpula (Heyman, 1988)**

## **8 ANTECEDENTES DEL MUSEO DE LA INSURGENCIA, PABELLÓN DE HIDALGO**

### **8.1 HISTORIA**

La Exhacienda de San Blas, localizada en Pabellón de Hidalgo, Rincón de Romos, en el estado de Aguascalientes, es el lugar en donde se llevó a cabo uno de los sucesos más importantes de la guerra de Independencia de México (24/25 de Enero de 1811), ya que fue un punto clave en la ruta del Padre Miguel Hidalgo y Costilla hacia el norte del país; la Hacienda contaba con toda clase de servicios acorde con su época y el fin con que fue construida, es decir, contaba con recamaras, salas, baños, panadería, caballerizas, así como áreas destinadas para molienda de granos y uva. Constructivamente lo más trascendente era los pasadizos subterráneos para llegar a la presa o a la iglesia, entre otros servicios básicos. Después de la derrota del ejército insurgente en la batalla de Puente de Calderón, es en esta Exhacienda, en la que los dirigentes del movimiento convocaron a una reunión con el fin de relevar del cargo de líder del ejército de los insurgentes a Miguel Hidalgo, siendo sustituido por Ignacio Allende.

Con el fin de conmemorar dicha gesta, en el lugar que antes ocupara la casa grande de la hacienda, se realizó el primer Museo con el que contó el estado de Aguascalientes el 17 de Octubre de 1964, llamado “Museo de la Insurgencia” (figura 10).

Actualmente el Museo cuenta con dos salas de exhibición; la principal alberga una exposición de herramientas usadas en su época para el cultivo, minería y textiles, la cual indica a sus visitantes las p

otenciales actividades que se desempeñaban en la antigua Hacienda de San Blas. En la segunda sala de exhibición se encuentran diferentes objetos típicos de aquellos años.

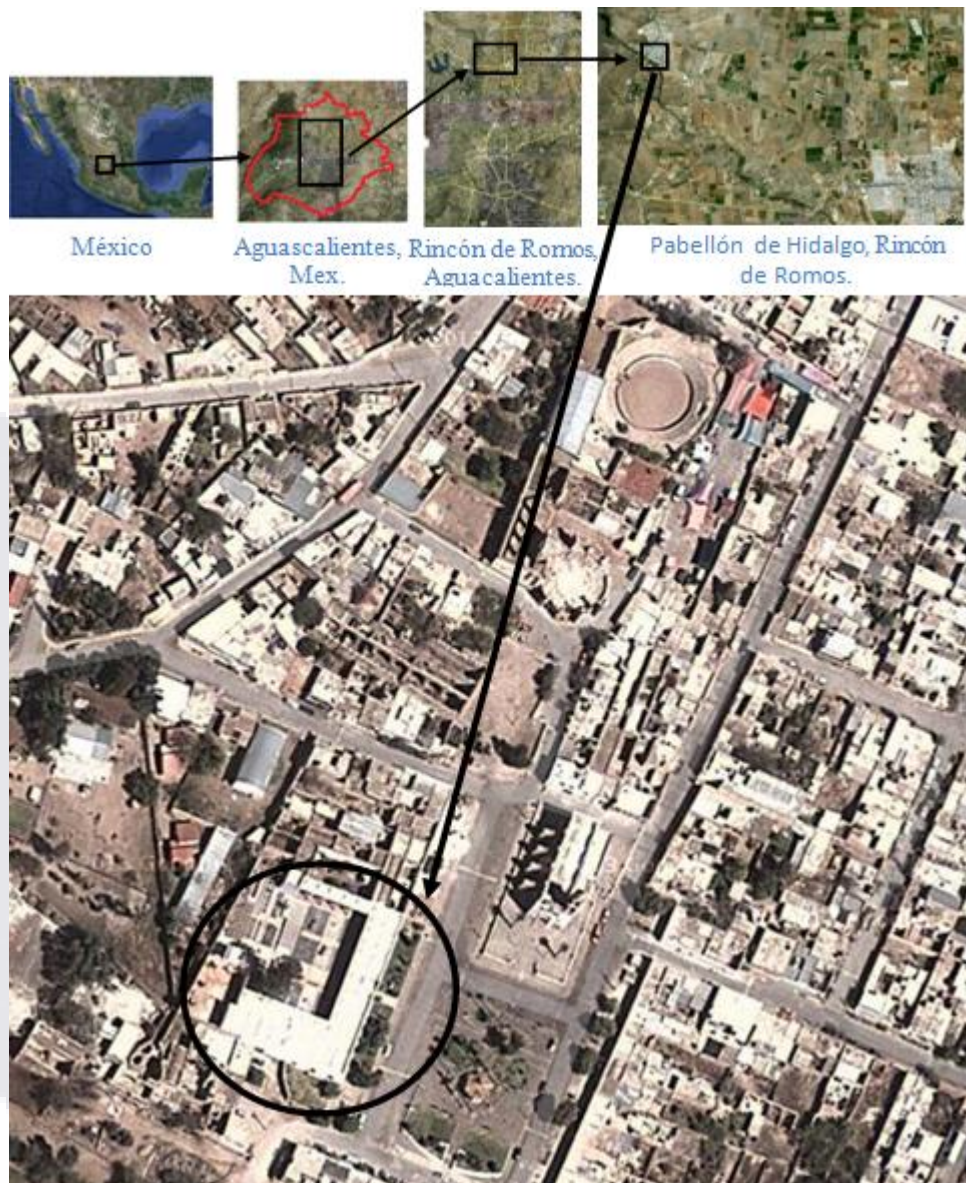
Actualmente, el edificio se encuentra afectado por una falla geológica, la cual corta al edificio de norte a sur, misma que se puede ser observada a lo largo del patio central. Por lo anterior, se han realizado dos intervenciones tanto en el ámbito arquitectónico como en el estructural.

En el ámbito estructural, la primer intervención consistió en colocar una junta fría para disminuir los esfuerzos del inmueble provocados por la falla geológica, la segunda fue la restauración del patio central, colocando una junta fría en la losa del piso y simular un escalón en los hundimientos diferenciales a todo lo largo del Museo provocados por la falla.

Hablando de las intervenciones arquitectónicas, se optó por retomar la arquitectura original de la hacienda, conservando los colores y elementos ornamentales originales, tanto en la fachada principal como en su interior. En el patio central, se integraron nuevos elementos como jardineras con flora de la región y una plataforma de usos múltiples.

Debido a su valor histórico y cultural la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) dio un reconocimiento, nombrándolo como “Patrimonio Cultural de la humanidad”, como parte del Camino Real de Tierra Adentro.

El Museo hoy en día resplandece su destacado semblante puesto que formó parte de un gesticular acto de lo que fue la conmemoración del Bicentenario de la Independencia de México y Centenario de la Revolución Mexicana.

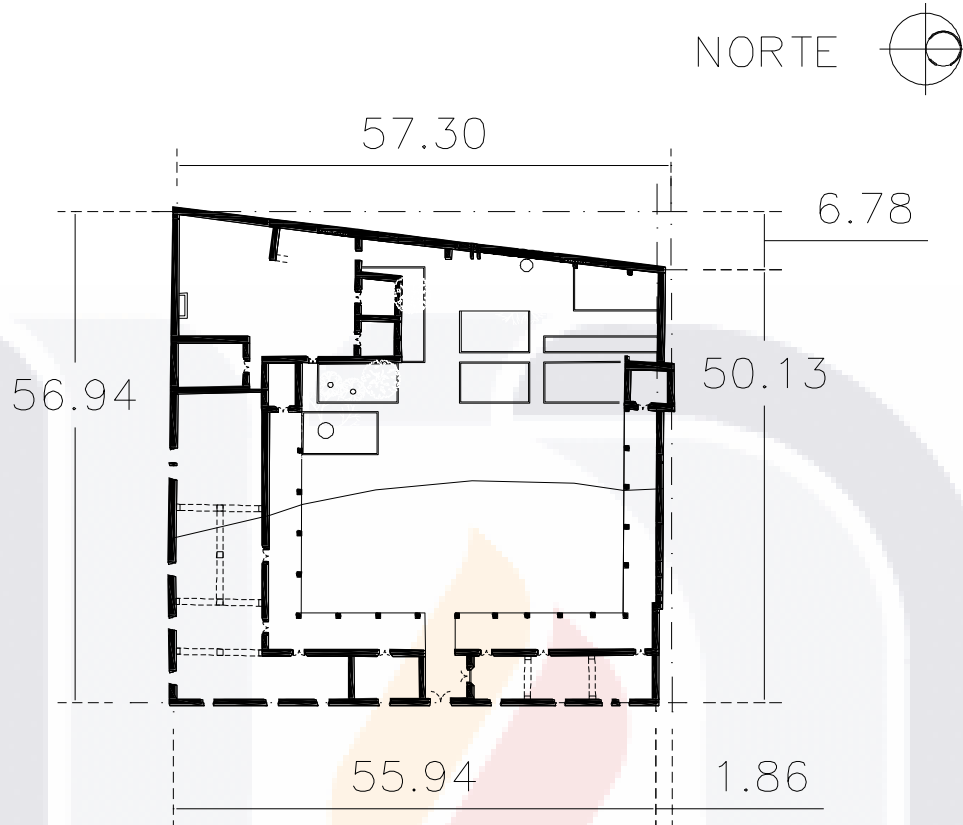


**Figura 10. Localización del Museo de la Insurgencia, Pabellón de Hidalgo, Rincón de Romos, Aguascalientes, México.**

## **8.2 Descripción del Museo de la Insurgencia.**

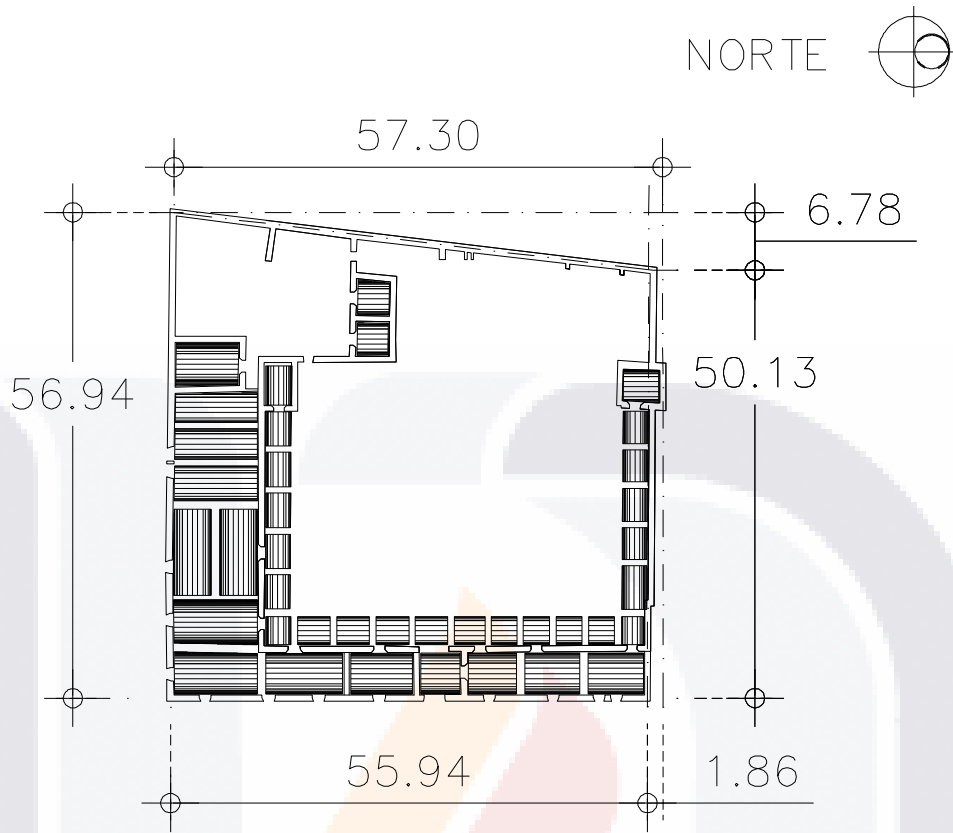
El Museo cuenta con un patio central y uno trasero, un jardín botánico, dos salas de exhibición, una sala de venta de recuerdos, un salón de usos múltiples, una rectoría, baños y pasillos que limitan el patio central.



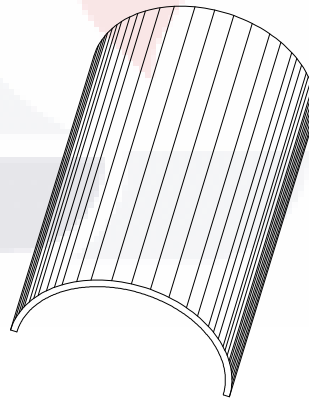


**Figura 11. Planta del Museo de la Insurgencia.**

Los techos son bóvedas de cañones, es decir, bóveda de superficie semicilíndrica (figura 12), las cuales son originadas geoméricamente por una generatriz semicircular y una directriz recta (figura 13).

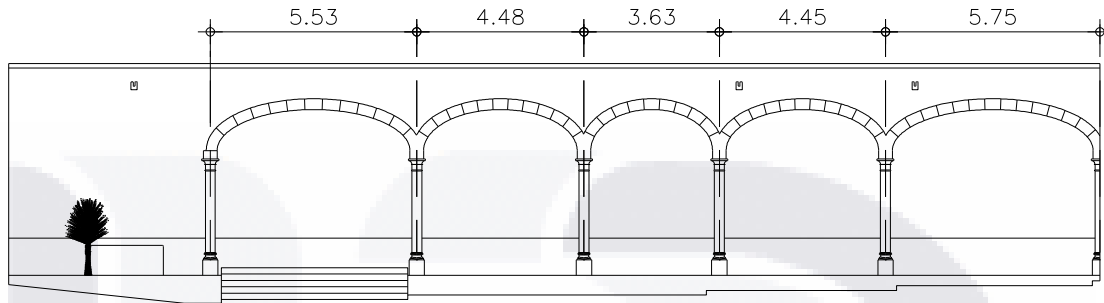


**Figura 12. Planta a nivel bóveda.**

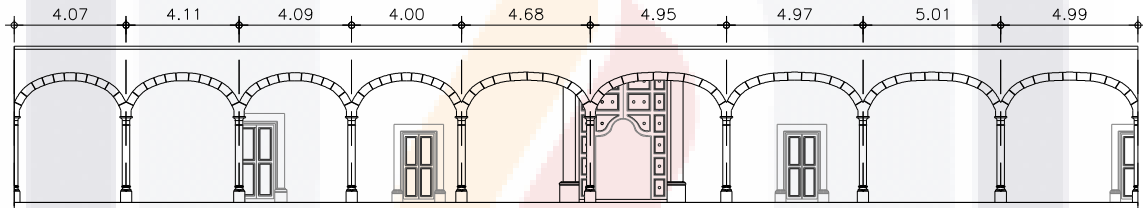


**Figura 13. Geometría de las bóvedas de cañón.**

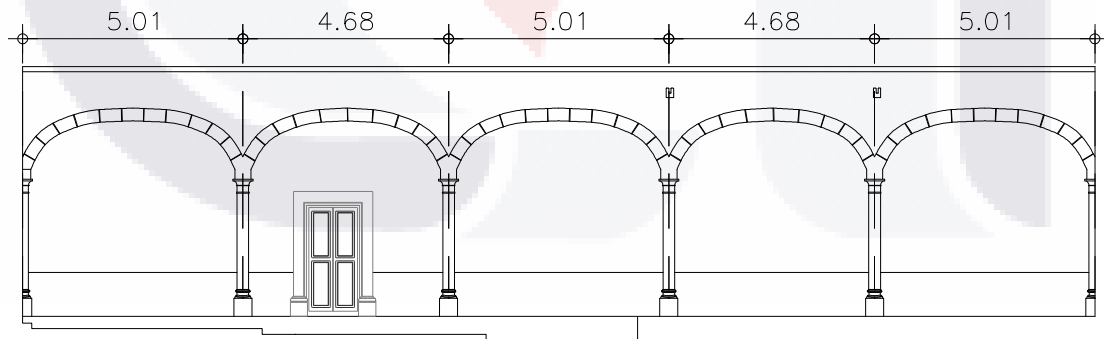
El patio central está delimitado por unos arcos (figuras 14 a 16), los cuales son el soporte de las bóvedas de cañón de los pasillos centrales que conducen a las salas de exhibición.



**Figura 14. Elevación de arcos norte.**



**Figura 15. Elevación de arcos este.**



**Figura 16. Elevación de arcos sur.**

### 8.3 Historia estructural.

Como ya se mencionó anteriormente, a lo largo de su historia, el Museo de la Insurgencia ha pasado por dos restauraciones significativas estructuralmente hablando, en la primera se colocó una junta fría a todo lo largo del Museo en la misma ubicación y sentido de la falla geológica con el fin de mitigar los esfuerzos inducidos de la falla a la estructura. Dicha junta fría se colocó en las bóvedas, muros y arcos del inmueble, y permitió separar todos estos elementos entre sí aproximadamente 10 centímetros. Para evitar filtraciones de agua en los momentos de precipitación se colocó un tapajuntas en las bóvedas. En la figura 17 se muestra la separación realizada en bóveda, muro y arco norte. Con referencia al muro no se aprecia con facilidad la separación realizada por que fue cubierta con falso plafón, el cual actualmente ya se está desprendiendo de los muros por la actividad de la falla como se muestra en la figura 18. En la figura 19 se muestra la junta fría realizada en los arcos norte, mientras que en la figura 20 se puede apreciar esta misma junta fría realizada a la bóveda de cañón en su sentido transversal (figura 21).



**Figura 17. Arcos en lado norte**



**Figura 18. Junta fría en muro norte, desprendimiento del plafón.**



**Figura 19. Junta fría en arco norte debido a la falla.**



**Figura 20. Vista inferior de bóveda de arcos norte. Junta fría.**



**Figura 21. Tapajuntas en azotea, lado norte.**

La figura 22 misma que muestra la junta fría en el muro y arco de parte sur, misma que de igual manera fue colocada casi al centro de la bóveda con una dirección de 45 grados al sur, del mismo modo, fue colocada casi al centro del arco sur. Las figuras 23, a 26 muestran la junta en los diferentes elementos del Museo en la parte sur. En esta parte del Museo es en donde se percibe con más facilidad la afectación de la falla particularmente en el muro, en el que se ve claramente como se está desprendiendo el falso plafón (figura 24), colocado para tapar la junta fría con el fin de tener una vista más estética en el área donde está afectando por la falla geológica.



**Figura 22. Bóveda, muro y arco sur.**



**Figura 23. Junta fría en bóveda en pasillo sur.**



**Figura 24. Junta fría en muro de pasillo sur, desprendimiento de plafón.**



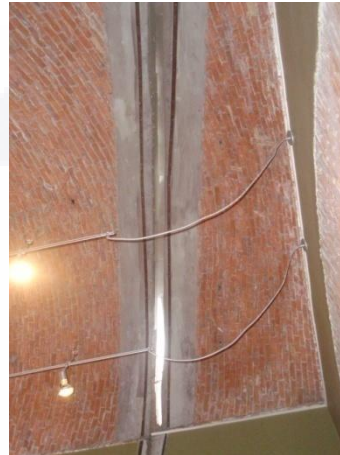
**Figura 25. Junta fría en arco sur.**



**Figura 26. Tapajuntas en pasillo sur.**



En la sala principal de exhibición también se colocó una junta fría en bóvedas y muros de aproximadamente 10 centímetros de separación, en cuya bóveda, sobre esta sala también se incluyeron tapajuntas para evitar la filtración de agua en ocasiones de lluvia (figura 29), quedando finalmente como se muestran en las siguientes figuras (figura 27 a 32).



**Figura 27. Junta fría en bóveda, sala de exhibición principal.**



**Figura 28. Junta fría en bóveda, sala de exhibición principal.**



**Figura 29. Tapajuntas en bóvedas, sala de exhibición principal.**



**Figura 30. Junta fría en muro norte de la sala de exhibición, desprendimiento de plafón.**



**Figura 31. Junta fría en muro sur de la sala de exhibición, desprendimiento de plafón.**



**Figura 32. Junta fría en muro sur de la sala de exhibición, en exterior del Museo.**

En una segunda etapa de restauración, se trabajó principalmente en el patio central, integrando un jardín botánico con flores de la región y dividiendo el patio central en plataformas. En el trayecto de la falla por el paso del Museo de la Insurgencia en los pasillos y sala de exhibición, se colocó un escalón para sobrellevar los diferentes desniveles producidos por la falla geológica. A continuación en las figuras 33 a 35 se muestran estos detalles.



**Figura 33. Simulación de escalón por cambio a desnivel provocado por la falla en arco norte**



**Figura 34. Simulación de escalón por cambio a desnivel provocado por la falla en arco sur.**



**Figura 35. Escalón en sala de exhibición.**

En la figura 35 se puede apreciar además el desnivel que existe entre los dos bloques separados por efecto de la falla y que es de unos 15 centímetros, como puede apreciarse con la pluma utilizada como escala.

El patio central esta seccionado en tres niveles siendo el nivel inferior, en donde se observan las afectaciones por la falla geológica, y en el cual en el 2009, se colocó una junta de polietileno de una pulgada con sellador acrílico por parte de la Secretaria de Infraestructura y Comunicación (SICOM, 2009), la cual se muestra en las figuras 36 y 37.



**Figura 36. Junta fría (viendo hacia arco norte).**



**Figura 37. Junta fría (viendo hacia arco sur).**

## 9 METODOLOGÍA

En la realización de este trabajo práctico se utilizó una metodología de investigación, la cual se describe en los siguientes puntos:

a) Se revisó arduamente la información del estado actual del conocimiento, en diversas tesis doctorales y de maestría, libros de textos, artículos especializados en el tema, memoria de seminarios y congresos, además en revistas y publicaciones periódicas. Tomado los fundamentos más trascendentes e importantes relacionados con el tema de estudio, así como también los alcances del mismo, destacando y haciendo hincapié a las investigaciones más recientes.

b) Se estableció a partir de la revisión del estado actual del conocimiento, el diseño y las bases de la campaña experimental y de simulación numérica para delimitar los alcances, así como los objetivos generales y particulares.

c) Se estableció la siguiente secuencia de actividades para determinar las condiciones estructurales actuales del Museo, la cual es punto de partida para el establecimiento de las condiciones iniciales del modelo numérico:

- a) Análisis estructural preliminar del Museo.
- b) Levantamiento fotográfico.
- c) Levantamiento topográfico.
- d) Levantamiento topográfico detallado sobre falla geológica.
- e) Monitorización de afectaciones en muros.
- f) Muestreo no destructivo y destructivo

d) Se analizó la información recabada y se establecieron las bases para la modelación numérica con ayuda de diferentes programas de cómputo. Principalmente para la elaboración de este trabajo práctico se empleó el programa de SAP 2000, en el cual una de sus funciones principales es al análisis

estructural lineal y no lineal, así como también el cálculo de estructuras mediante el método de elementos finitos (MEF).

- e) En la elaboración del modelo se determinó aplicar una serie de simulaciones lineales empleando el método de elementos finitos. En dichas simulaciones, los principales parámetros se obtuvieron de un estudio realizado por Meli y Sánchez (1993), así como determinaciones propias de esta investigación mediante pruebas destructivas y no destructivas en laboratorio e *in situ*. Los datos y figuras se analizaron y procesaron mediante programas comerciales de oficina. Así con la ayuda de estas herramientas computacionales se desarrolló el trabajo práctico.

### 9.1 Análisis estructural preliminar y tipos de materiales constructivos

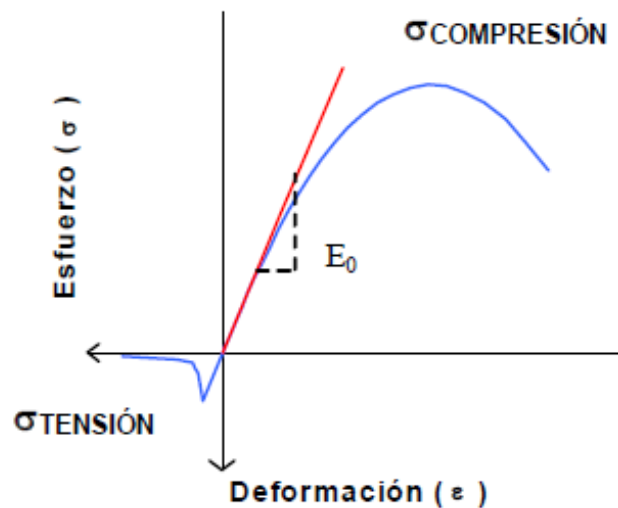
En las estructuras de mampostería, los materiales usados a lo largo de la historia han sido muy variados, y la mayoría de las veces su elección depende de las condiciones del lugar, de las técnicas empleadas en esa época, del deterioro ocasionado por el intemperismo, entre otras cosas. Por otro lado, generalmente las propiedades mecánicas determinadas de la mampostería utilizada en alguna construcción son inciertas ya que éstas dependen tanto de los materiales usados, como del arreglo de sus componentes (Meli, 1998). Por esta razón, la correcta determinación de las propiedades mecánicas de los materiales es fundamental para reproducir la respuesta del Museo de la Insurgencia de manera experimental, numérica o analítica. El proceso debe desarrollarse de manera cuidadosa y es recomendable realizar pruebas a los materiales usados.

Aunque un material constructivo de mampostería puede tener un comportamiento no-lineal como el mostrado en la figura 38, en algunos casos es aceptable modelarlo como elástico lineal, por ejemplo, para el caso de esfuerzos compresivos ya que generalmente en los elementos de estos materiales los esfuerzos máximos actuantes son del orden de un décimo de su resistencia a la compresión, por el hecho de que típicamente se utilizan secciones robustas (Castellanos, 2004). Sin embargo, se debe ser cuidadoso y tener en cuenta que la falla del material, como lo muestra la figura 38 es frágil y los elementos son



susceptibles a fallas súbitas, sobre todo en las mamposterías con resistencia alta a la compresión (Meli, 1998). La capacidad a tensión de la mampostería en cambio, es pequeña, del orden de un décimo al de la compresión y se reduce rápidamente al alcanzar su máximo.

**Curva Esfuerzo - Deformación**



**Figura 38. Diagrama esfuerzo-deformación de una mampostería típica (Castellanos, 2004).**

El material primario de la construcción utilizado en el Museo de la Insurgencia es una mampostería heterogénea constituida por cantera aglutinada por un mortero de cemento y arena. El conjunto crea una especie de concreto ciclópeo, es decir; un concreto simple sin armadura, en cuya masa se incorporan grandes piedras o bloques y cuya composición varía según el elemento estructural y en que originalmente la mampostería de cantera se empleó para los elementos que debían soportar esfuerzos de compresión elevados como columnas y arcos.

Para los alcances de este trabajo se consideró aceptable utilizar un material elástico-lineal dentro de las simulaciones, mientras que para definir el comportamiento de la

mampostería se consideraron además las propiedades determinadas con estudios realizados por Meli y Sánchez (1993), como se mencionó anteriormente y las cuales se resumen en la Tabla 2.

**Tabla 2. Propiedades de los materiales utilizados en los modelos numéricos de este trabajo (Meli y Sánchez, 1993).**

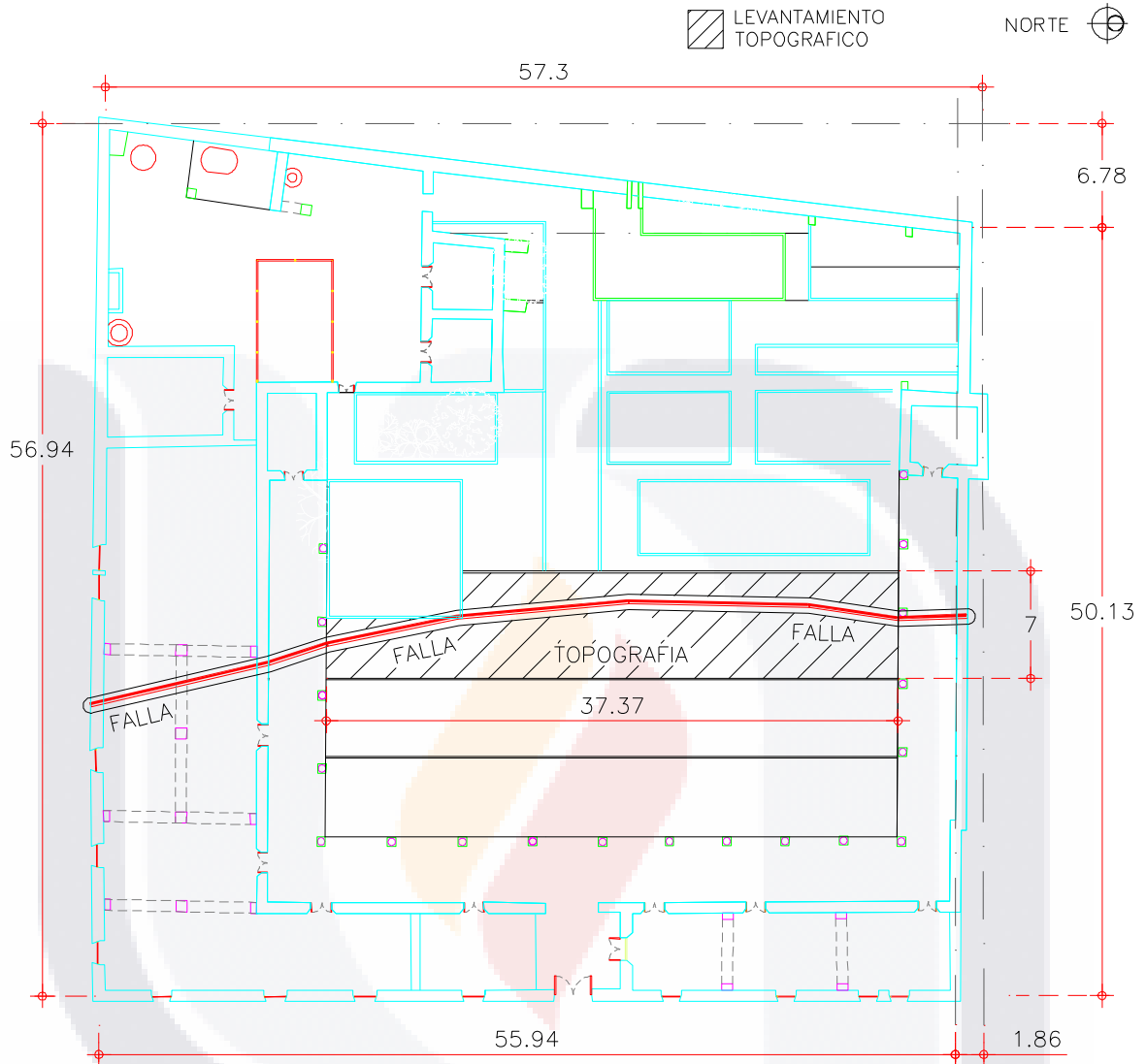
Material	Peso Volumétrico (t/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (t/m <sup>2</sup> )	Módulo de Poission	Módulo de Corte (t/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de fluencia (t/cm <sup>2</sup> )
Cantera Columnas y arcos	1.5	40000	0.25		
Viga (Acero)	7.785	2x10E <sup>6</sup>	0.3	784.193	2.53

## 9.2 Estudio Topográfico

La topografía del inmueble nos permitió establecer con mayor detalle la traza de la falla que está afectando todo el inmueble dividiéndolo de norte a sur, desde el muro norte y atravesando el pasillo norte, pasando por el patio central donde continua hasta que ésta atraviesa la sala principal ubicada en el lado sur del inmueble, es decir, cruzando de norte a sur todo el inmueble como se muestra en la figura 39.

Se realizaron dos levantamientos topográficos del Museo pero se hizo hincapié en la zona del patio central (figura 40), en donde se muestra con mayor claridad el trazado la falla geológica.

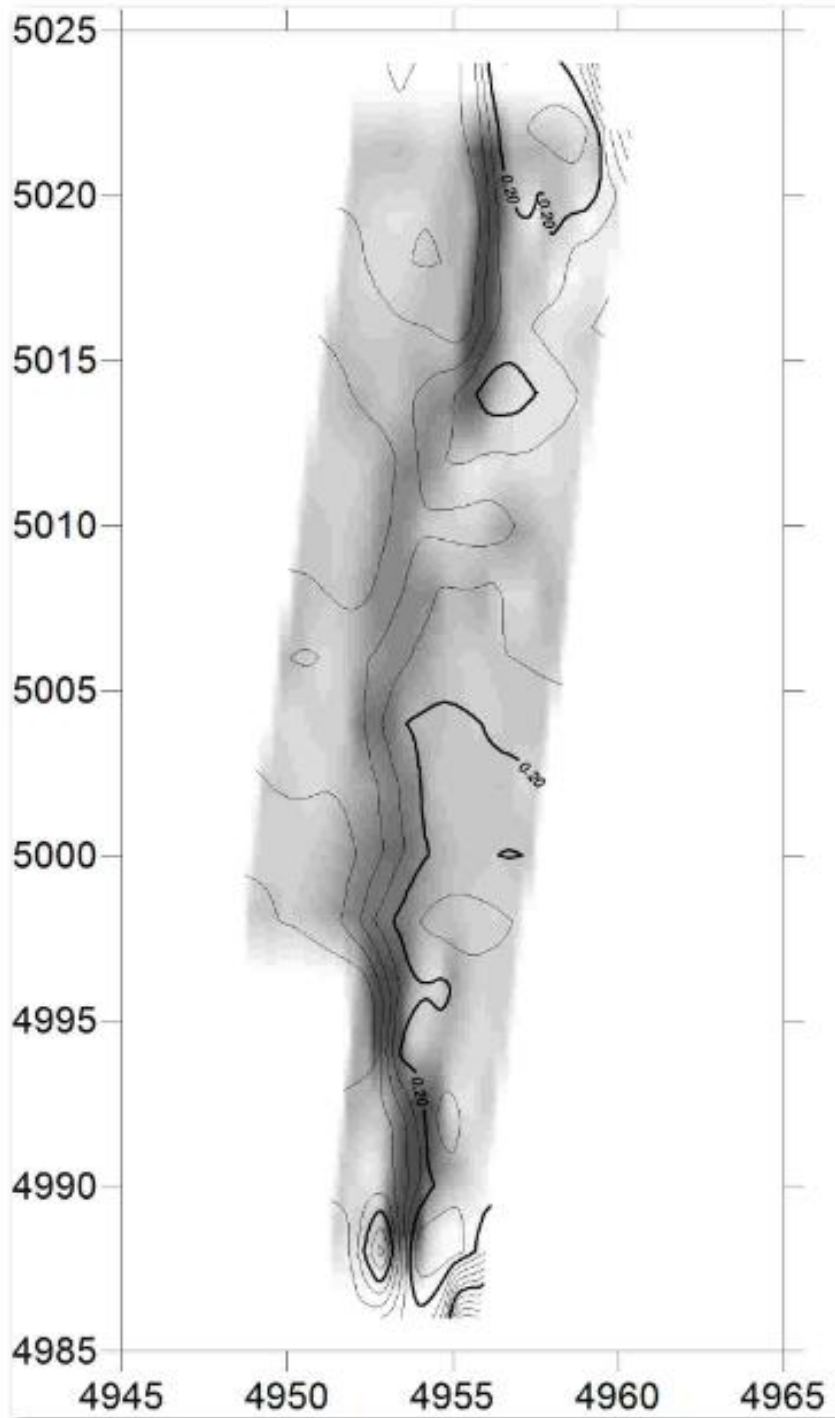
El primer levantamiento se realizó el día 24 de Noviembre de 2012, en el cual la falla se localiza en donde las curvas de nivel están más cercanas entre sí, es decir, donde se aprecia un sombreado más oscuro, en figura 41 se muestra la primer topografía realizada.



**Figura 39. Planta general.**



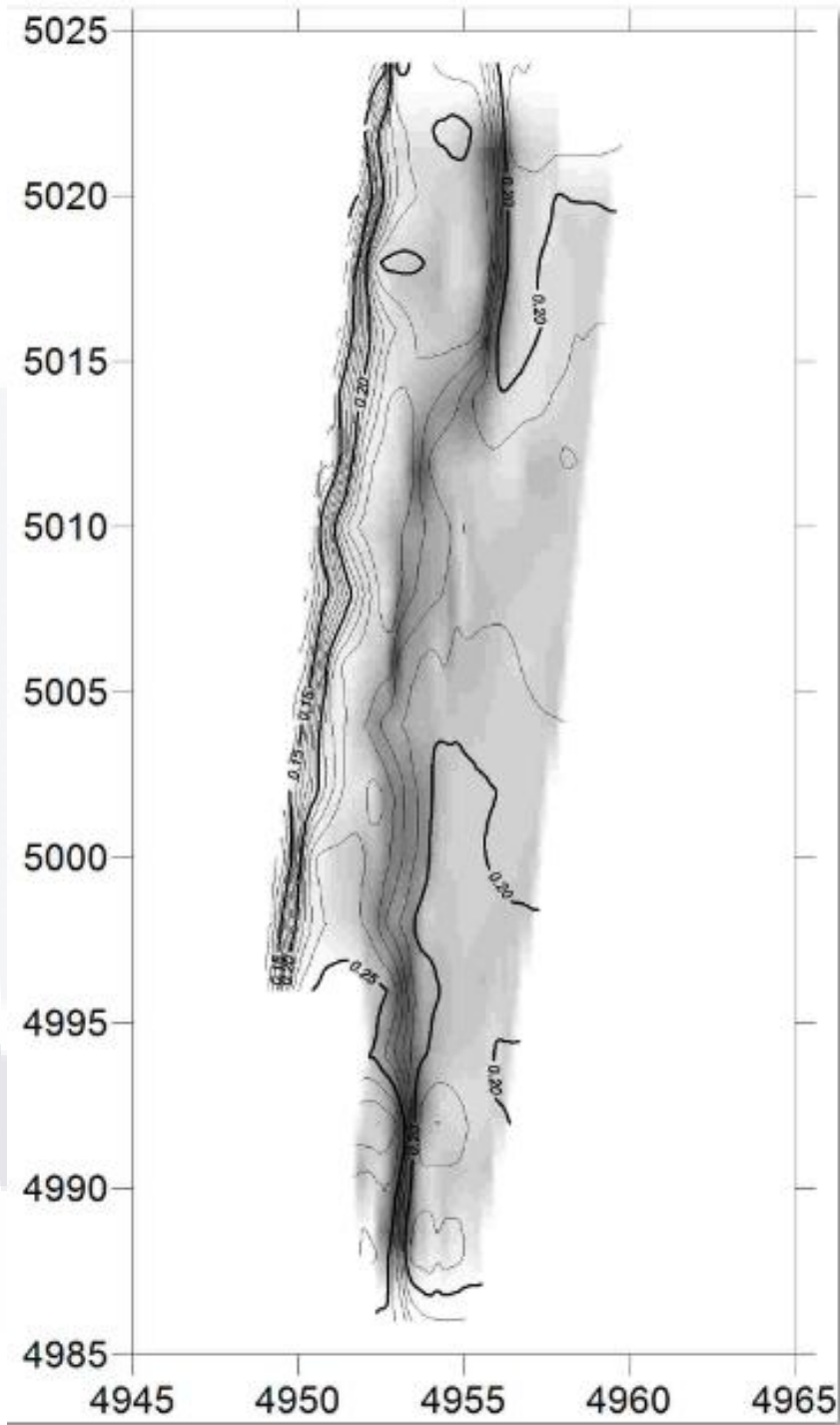
**Figura 40. Zona de topografía más detallada, observando curvas de nivel (azul = 1mm. y magenta =0.5mm.) y trayectoria de falla.**



**Figura 41. Topografía del primer levantamiento, el 24 de Noviembre de 2012. Los valores incluidos en las curvas son elevaciones con datos ficticios solo para indicar la magnitud de la deformación relativa en el patio.**

El segundo levantamiento topográfico realizado fue el día 23 de Marzo de 2013. En este levantamiento la falla es más visible por no tener una simulación de escalón para sobrellevar la falla geológica. En esta topografía se ve más clara la trayectoria de la falla geológica, sin cambiar mucho con relación a la primera topografía en el sentido de su trayectoria pero sí en la magnitud de la deformación (figura 42), lo que claramente indica que la falla sigue activa.



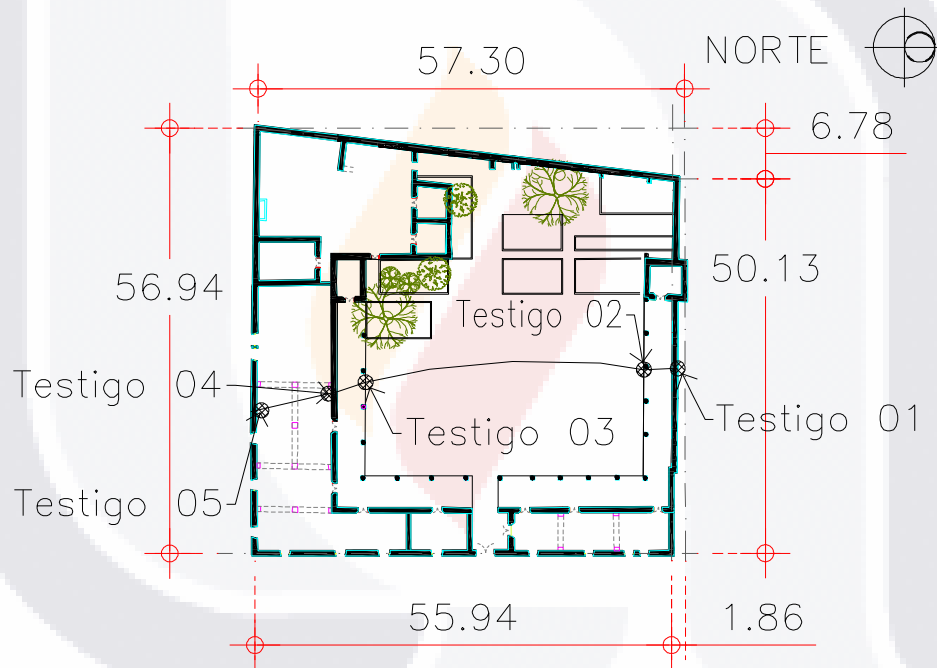


**Figura 42. Topografía del segundo levantamiento, el 23 de Marzo de 2013. Los valores incluidos en las curvas son elevaciones con datos ficticios solo para indicar la magnitud de la deformación relativa en el patio.**

### 9.3 4.3 Evaluación de daños estructurales actuales

#### 9.3.1 Descripción de testigos para evaluar las deformaciones.

Para la evaluación de daños se instalaron testigos fijos que permitieron monitorizar las deformaciones bidimensionales en el sentido vertical y horizontal (perpendicular a la traza de la falla). Se colocaron en puntos estratégicos a lo largo de las afectaciones provocadas por la falla, siguiendo un criterio de facilidad de instalación, acceso a la hora de toma de datos y de que su colocación provocara el mínimo daño al edificio. En la figura 43 se indican los puntos en los que colocaron los testigos.

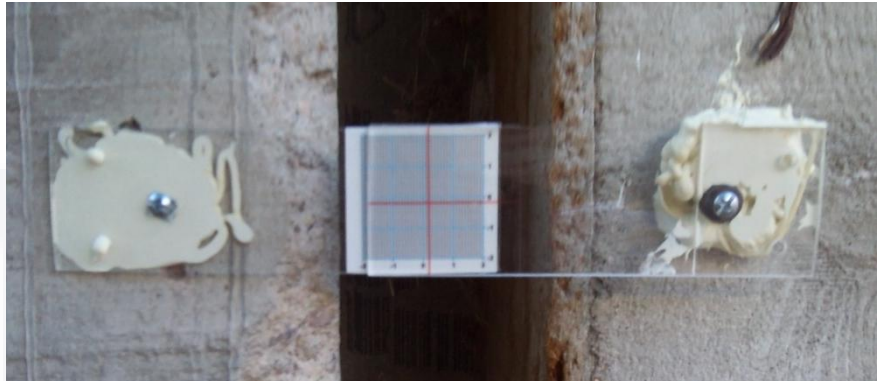


**Figura 43. Ubicación de testigos.**

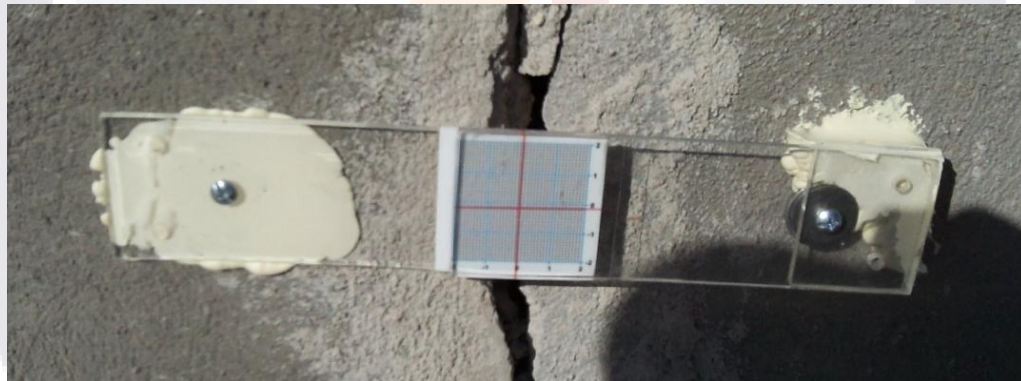
Los testigos consistieron en dos láminas de acrílico de unos 15 a 20 centímetros de largo por 5 de ancho, la lámina de fondo contenía un sistema cartesiano de coordenadas XY, mientras que la lámina del frente contenía un puntero mediante una cruz. Los desplazamientos medidos mediante esta técnica, permitieron determinar no solo la separación de los bloques de la falla sino que también de los hundimientos diferenciales.



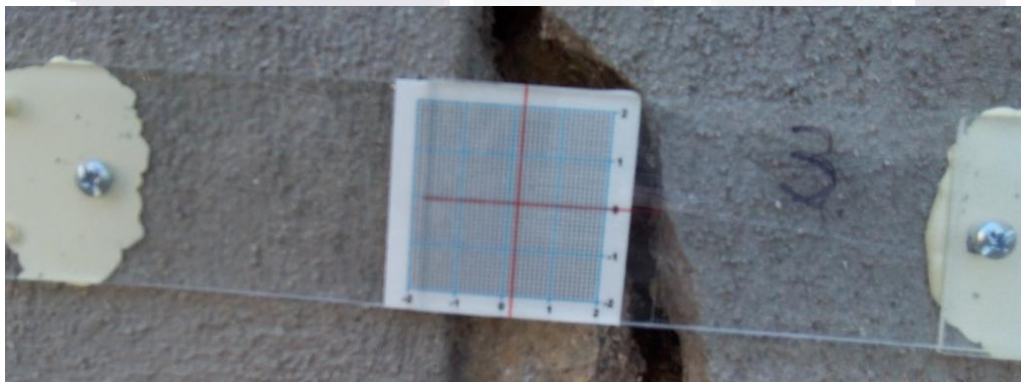
En las figuras 44 a 48 se muestran los testigos colocados en el Museo, teniendo cada uno de ellos diferentes lecturas iniciales, dependiendo de su posición relativa al concluir la instalación. En la tabla 3 se muestran estas lecturas iniciales (lectura 0) en cada testigo



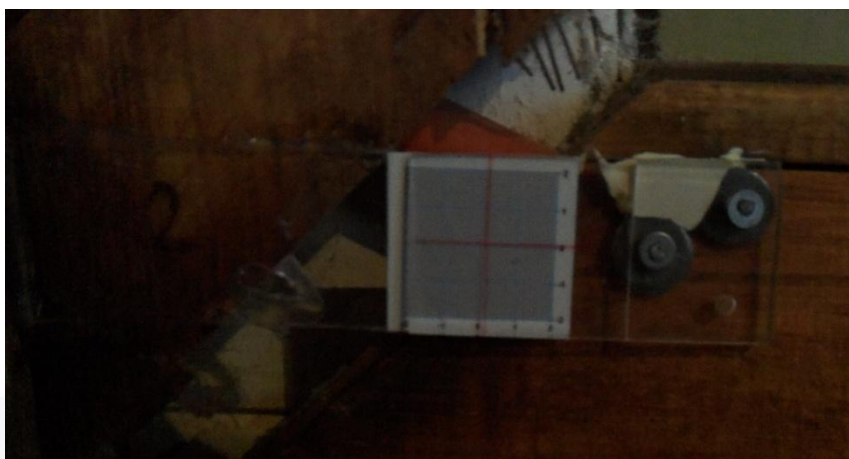
**Figura 44. Testigos 01 con su lectura inicial.**



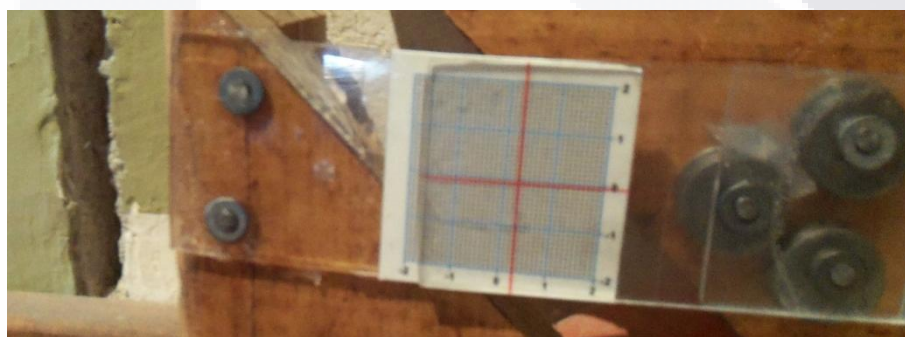
**Figura 45. Testigos 02 con su lectura inicial**



**Figura 46. Testigos 03 con su lectura inicial**



**Figura 47. Testigos 04 con su lectura inicial**



**Figura 48. Testigos 05 con su lectura inicial.**

### 9.3.2 Monitorización de daños.

Para la monitorización de daños se realizaron visitas frecuentes al Museo de la Insurgencia para toma de lecturas de los testigos estratégicamente colocados para medir las deformaciones ocasionadas por la falla.

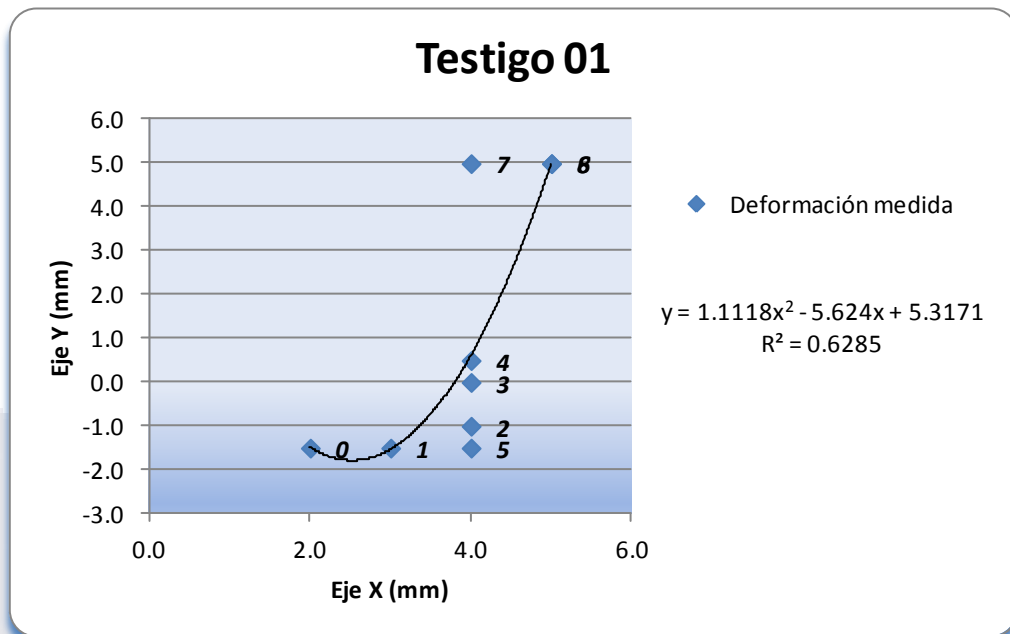
En la toma de las lecturas se planteó la estrategia de tomar las lecturas procurando la máxima precisión, para esto se tomaron las lecturas a la misma hora del día o con poca diferencia para descartar posibles alteraciones por el cambio de temperatura en el transcurso de un día y no tener la necesidad de un ajuste por este motivo.

En la tabla 3 se resumen las lecturas tomadas a lo largo del estudio, las cuales sirvieron como datos de deformación para la calibración y verificación del modelo numérico final.

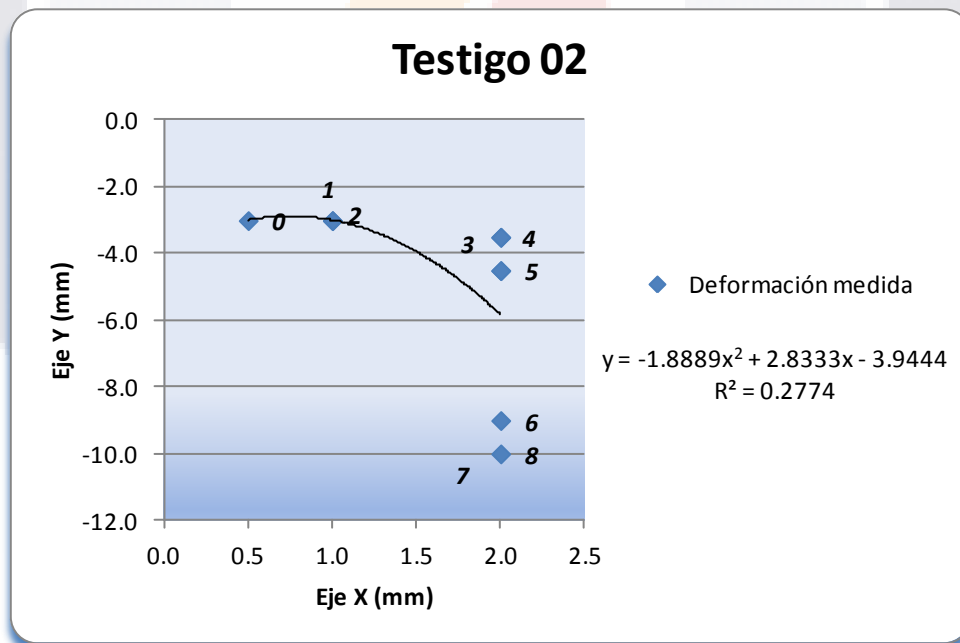
**Tabla 3. Lecturas de testigos**

Lectura	Días	Testigo 1		Testigo 2		Testigo 3		Testigo 4		Testigo 5	
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0	0	2.0	-1.5	0.5	-3.0	2.0	-1.0	2.0	0.0	0.5	-1.0
1	11	3.0	-1.5	1.0	-3.0	2.0	0.5	2.0	0.0	3.5	0.5
2	25	4.0	-1.0	1.0	-3.0	2.5	1.5	3.0	1.5	5.0	2.0
3	35	4.0	0.0	2.0	-3.5	2.5	1.5	3.0	1.5	5.0	2.0
4	63	3.5	-0.5	2.0	-3.5	2.5	2.0	3.0	-2.0	5.0	2.0
5	83	4.0	-1.5	2.0	-4.5	2.0	2.5	4.0	-2.0	6.0	3.5
6	139	4.0	5.0	2.0	-4.5	2.0	6.0	4.0	-5.0	3.0	6.0
7	165	5.0	4.0	2.0	-8.0	3.0	8.0	5.0	-9.0	3.0	6.0
8	202	5.0	5.0	2.0	-10.0	3.0	9.0	5.0	-9.0	3.0	7.0

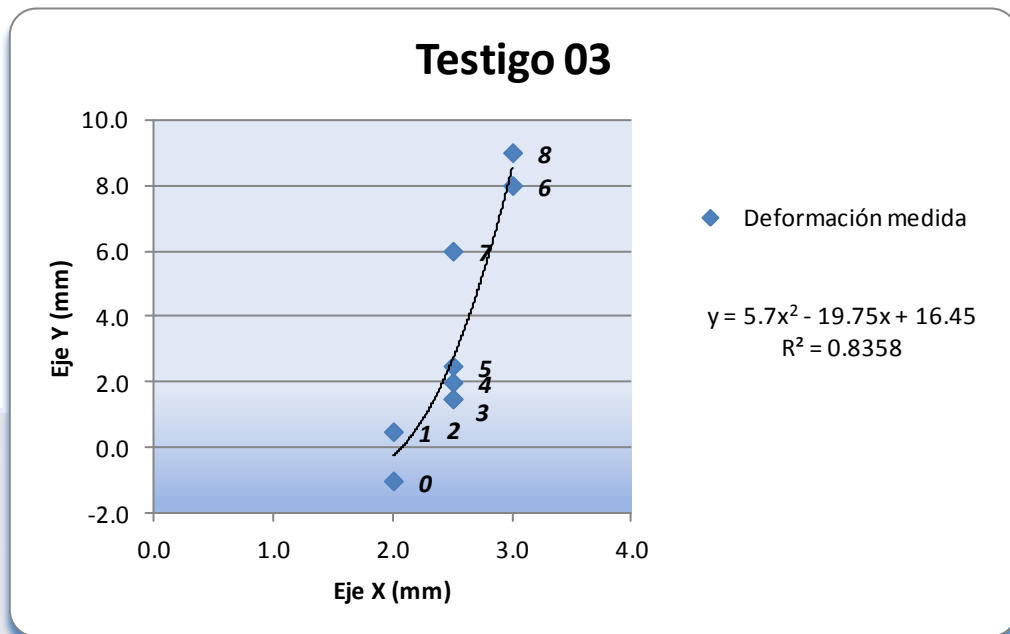
De la información de deformación obtenida mediante los testigos se construyeron gráficas de dispersión de datos de desplazamiento, en las cuales se obtuvieron las tendencias de los desplazamientos ejercidos por la falla. Esto se puede apreciar en las gráficas siguientes:



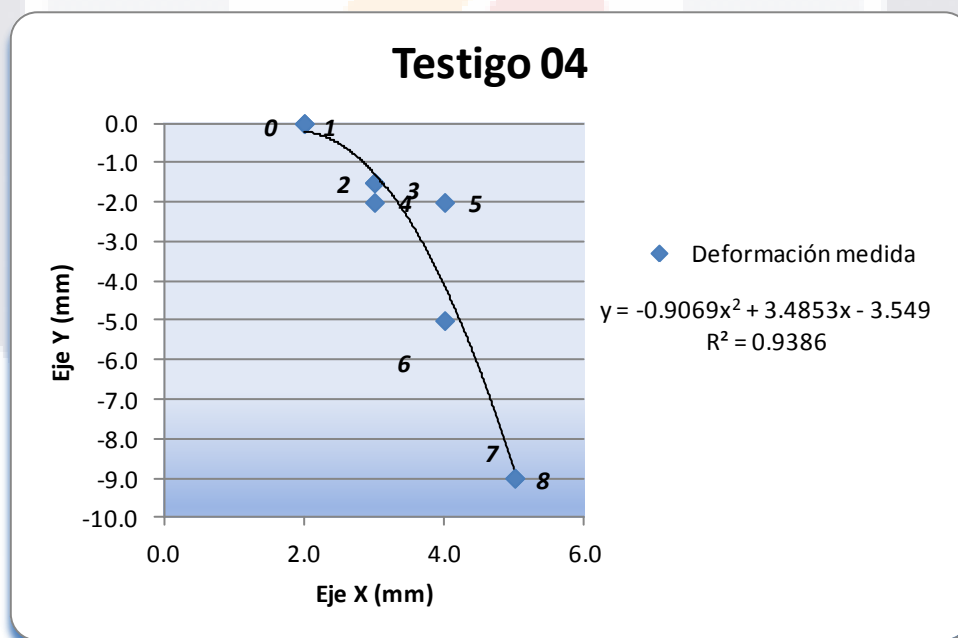
Gráfica 1 Lecturas horizontales y verticales de testigo 01.



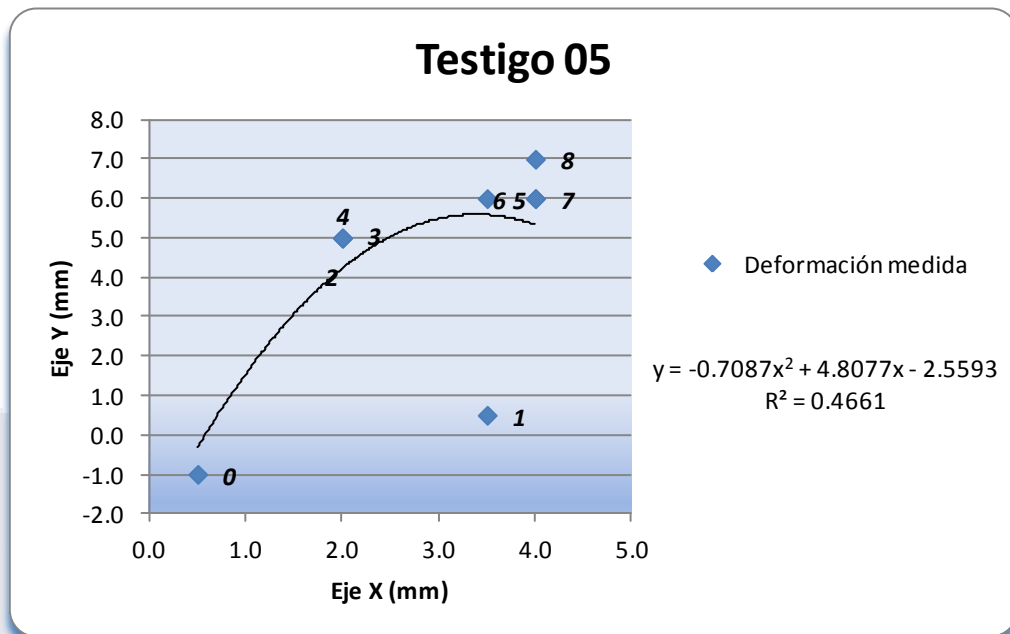
Gráfica 2 Lecturas horizontales y verticales de testigo 02.



Gráfica 3. Lecturas horizontales y verticales de testigo 03.

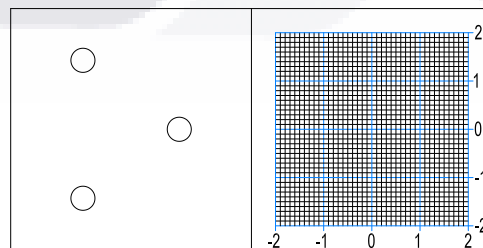


Gráfica 4. Lecturas horizontales y verticales de testigo 04.

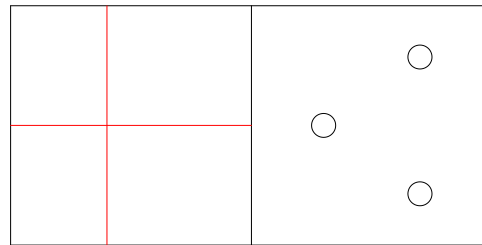


**Gráfica 5. Lecturas horizontales y verticales de testigo 05.**

Se puede observar que con respecto al eje Y, la línea de tendencia aumenta en algunas gráficas (gráficas 1 y 3) y en otras disminuye (gráficas 2, 4 y 5). Esto se debe a la posición de los testigos después de su colocación. Por ejemplo, en los casos en donde se observa una línea de tendencia ascendente, la lámina medidora (figura 49) se posicionaba en el bloque de falla que sufre asentamientos, mientras que en aquellas con línea descendente es, esto se debía a que el indicador de lecturas (figura 50) se posicionaba en el bloque fijo.



**Figura 49. Medidor de testigos.**



**Figura 50. Lector de testigos.**

### 9.3.3 Tipificación de daños

Con base a los datos obtenidos de las lecturas de los testigos se ve que la mayor deformación ocasionada por la falla geológica ocurre en el muro sur, el cual comprende la sala principal de exhibición. Esto se puede observar en la gráfica del testigo número 05.

El punto que presenta la segunda mayor deformación es el testigo número 04, colocado sobre el muro norte de la sala principal de exhibición.

El tercer lugar de deformación observada en el Museo de la Insurgencia es el arco norte, esto con base a la gráfica 2 el testigo número 02.

La cuarta posición de la deformación observada con base a las lecturas es el testigo número 03, el cual está ubicado en el arco sur a un costado de la sala principal de exhibición.

Por último la quinta zona con menos deformación que es observada en el Museo de la Insurgencia es el muro norte, esto lo podemos ver en la gráfica del testigo número 01.

#### **9.4 Ensayos destructivos y no destructivos para la determinación de los parámetros mecánicos.**

En esta sección se presentan los ensayos realizados en campo a los elementos estructurales de mampostería, que es con lo que están conformadas las columnas y arcos, siendo los elementos más importantes para el objetivo de esta investigación. En esta ocasión como no es pertinente y nada adecuado extraer muestras de los elementos estructurales, se determinó trabajar con pruebas no destructivas dentro de los elementos estructurales del Museo y pruebas destructivas utilizando elementos y bloques de mampostería de un edificio aledaño, el cual está prácticamente colapsado y en el que se utilizaron los mismos materiales que en el Museo de la Insurgencia. Los ensayos se complementaron con un análisis estadístico para correlacionar las propiedades físicas de los materiales ensayados, para así obtener la resistencia a compresión, pero sobre todo para correlacionar los resultados de los ensayos no destructivos con los obtenidos de los ensayos destructivos que fueron realizados casi paralelamente.

##### **9.4.1 Ensayos no destructivos**

Mediante este tipo de ensayos se determinó primeramente el índice de rebote utilizando el dispositivo conocido como esclerómetro y posteriormente determinar la resistencia al esfuerzo compresivo. En esta ocasión se emplearon los procedimientos básicos de la Norma NMX-C-192-1997-ONNCCE, la cual establece un procedimiento para determinar el índice de rebote en el concreto endurecido, mismo que generalmente sirve para: a) evaluar la uniformidad superficial del concreto en el sitio; b) delimitar zonas o áreas de diferentes resistencias; c) establecer zonas de concreto deteriorado en las estructuras; así como para d) indicar cambios en las características del concreto a través del tiempo, tal como aquellas, causadas por la hidratación del cemento. En este trabajo, como se mencionó al principio de este párrafo, este dispositivo se utilizó para determinar la resistencia al esfuerzo compresivo de los elementos constructivos, con base al índice de rebote.



La descripción general del equipo utilizado (esclerómetro), detalles de los procesos de prueba y de la preparación de muestras a ensayar, así como de los cálculos para la determinación de los índices se puede consultar en Norma NMX-C-192-1997-ONNCCE.

#### 9.4.1.1 Reporte fotográfico de las pruebas no destructivas

En las figuras 51 a 54 se muestra la realización de las pruebas de índice de rebote utilizando el esclerómetro para obtener el índice de rebote en las columnas de los arcos norte y sur.



**Figura 51. Esclerometría en arco norte.**



**Figura 52. Esclerometría en arco norte.**



**Figura 53. Esclerometría en arco sur.**



**Figura 54. Esclerometría en arco sur.**

### **9.5 Ensayos destructivos.**

Se realizaron pruebas destructivas para determinar la resistencia a la compresión de los materiales que conforman las columnas y arcos, siendo estos elementos el objetivo primordial para las simulaciones numéricas de esta investigación. Como se mencionó anteriormente, se determinó trabajar a la par con pruebas no destructivas, siendo los resultados de los ensayos destructivos la base para la calibración y validación de los resultados obtenidos con pruebas no destructivas, proceso en el cual se procedió al análisis

estadístico mediante las correlaciones de estos dos métodos y de esta forma se determinaron con mayor exactitud las resistencias a compresión de dichos elementos.

Se emplearon los procedimientos básicos de las normas NOM-008-SCFI-1993, NMX-Z-013-SCFI-1977, NMX-C-251-1997-0NNCCE, NMX-C-083-0NNCCE, NMX-C-109-0NNCCE y NMX-C-163-0NNCCE para las siguientes acciones: obtención y preparación de corazones extraídos de la mampostería; determinación de espesores de la muestra; manejo de los cálculos para determinar su resistencia a la compresión simple, y a la tensión por compresión diametral, y a la tensión por flexión. Para conocer el detalle del procedimiento de prueba como lo es la preparación del aparato de extracción de corazones, la preparación de las muestras como el cabeceo, entre otras cosas, se pueden consultar las normas antes mencionadas.

#### **9.5.1.1 Resultado de los ensayos del laboratorio.**

Como se mencionó anteriormente, los corazones de la mampostería no se obtuvieron directamente de las columnas y arcos, esto con el fin de no dañar el inmueble por su valor patrimonial, estos se extrajeron de los bloques colapsados de una construcción vecina, la cual era parte de la Ex Hacienda de San Blas. Del Museo de la Insurgencia solo se pudieron obtener tres muestras siendo los siguientes los resultados obtenidos:

El primer ensayo arrojó una resistencia a la compresión simple de 258.75 kg/cm<sup>2</sup>.

En el segundo ensayo dio una resistencia a la compresión simple de 256.01 kg/cm<sup>2</sup>.

Del tercero se obtuvo una resistencia a la compresión simple de 287.42 kg/cm<sup>2</sup>.

#### **9.5.1.2 Reporte fotográfico de las pruebas destructivas**

En este apartado se ve la extracción de los especímenes (figura 58 a la 60) obtenidos de una muestra representativa el material utilizado en los arcos y columnas norte y sur (figura 55 a la 57). De esta muestra solo se obtuvieron tres especímenes por no tener el riesgo de sacar un cuarto y fracturar la muestra. Cabe recordar que los especímenes fueron ensayados (figura 61 a la 64) para la obtención de su capacidad a la compresión.



**Figura 55. Muestra para obtención de corazones.**



**Figura 56 Muestra para obtención de corazones.**



**Figura 57. Muestra para obtención de corazones.**



**Figura 58. Obtención del primer corazón**



**Figura 59. Obtención del segundo corazón.**



**Figura 60. Obtención del tercer y último corazón.**



**Figura 61. Ensayo del primer espécimen**



**Figura 62. Ensayo del segundo espécimen**



**Figura 63. Ensayo del tercer espécimen.**



**Figura 64. Especímenes después del ensayo.**



## 10 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

### 10.1.1 Estimación de cargas

Para la estimación de cargas se utilizaron los pesos volumétricos de los materiales empleados para la edificación del inmueble, así como un valor de carga viva mínima (explicado más adelante)

#### 10.1.1.1 Carga muerta

Se consideró un peso volumétrico de  $1,500 \text{ kg/m}^3$  y un espesor promedio de 25 centímetros con un ancho tributario de 2 metros, resultando en una carga muerta de  $750 \text{ kg/ml}$ .

#### 10.1.1.2 Carga viva

Dado que el inmueble presenta una muy baja frecuencia de cargas vivas, se determinó utilizar un valor relativamente bajo del orden de  $30 \text{ kg/m}^2$ .

### 10.1.2 Rehabilitación estructural

De entre las remodelaciones estructurales realizadas anteriormente al Museo de la Insurgencia, la más importante y trascendente es la separación parcial del inmueble. Sin embargo, los arcos norte y sur no fueron separados totalmente ya que siguen ligados con una solera en su parte superior, por lo que esta solera no permite liberar en su totalidad las deformaciones inducidas por la falla geológica como se muestran en la figura 66.

En la figura 65, en la fotografías de la izquierda se pueden apreciar unas diminutas grietas en la parte superior en las cuales indican la colocación de una IR de  $10'' \times 44.8 \text{ kg/ml}$

(según información recabada), para lo cual, en la fotografía de la derecha se trazó la posible ubicación de este IR.



**Figura 65. Vista frontal de los arcos sobre las columnas norte.**

En la figura 66, se puede apreciar la dirección y ubicación del IR, el cual, fue ubicado bajo de la cúpula de caño a todo largo del pasillo norte, por encima de los arcos. En cada lado de la junta se tiene un IR, estos a su vez están unido con unas soleras de 3" x 3/8" en el alma, una solera de cada lado del alma del IR como se ven en la figura 67.



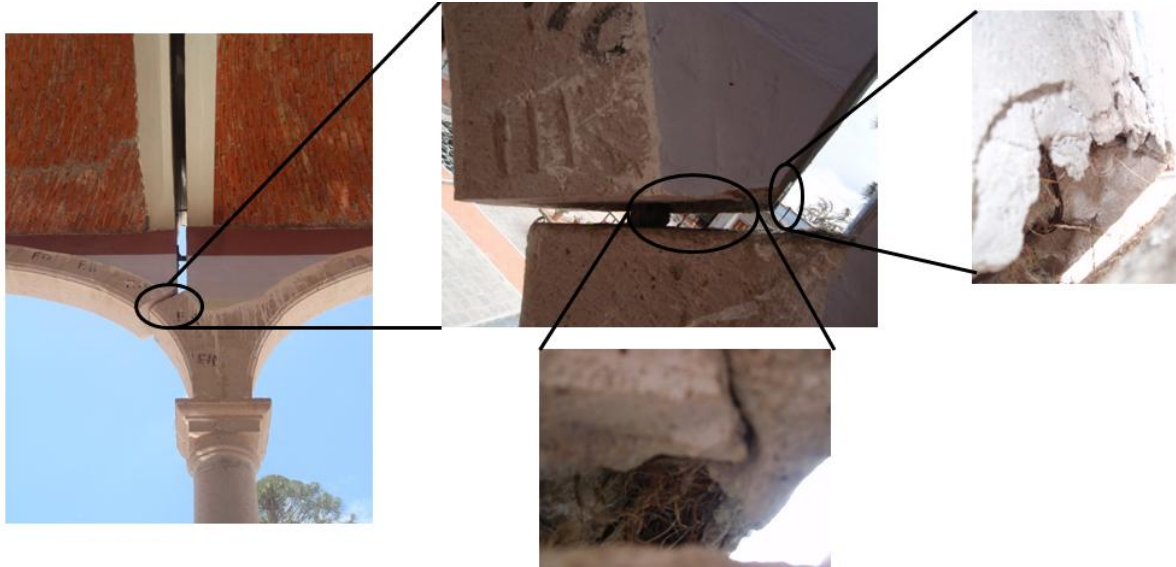
**Figura 66. Vista frontal de la junta fría en el arco norte viendo por el pasillo.**



**Figura 67. Se muestra la junta fría en el arco norte.**

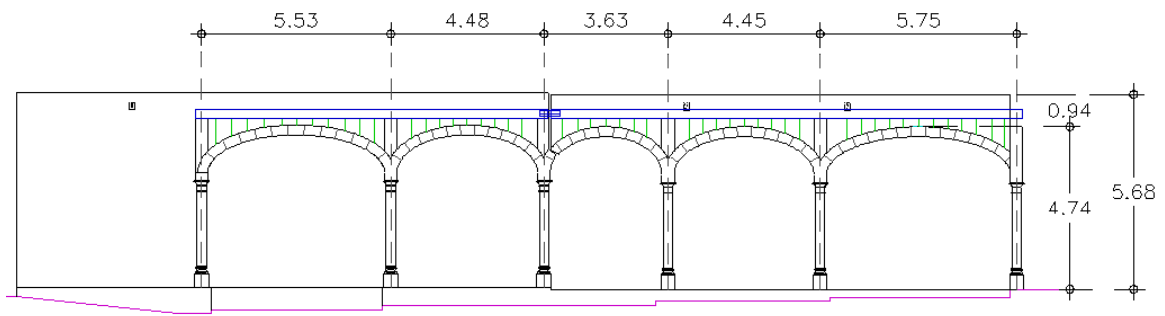
Se puede apreciar en la figura 68 con gran facilidad que los arcos de cantera fueron bajados para la colocación del IR. Como se muestra en esa misma figura 68, hay una marca con numeración en cada pieza que conforma el arco para su identificación, lo que indica que antes de bajarlos se marcaron para no perder su ubicación exacta y así poderlos colocar en su posición correcta y original. También se aprecia en esa figura que entre los arcos y el IR hay un hueco y solo hay un falso muro, esto se ve en la fotografía central superior de figura 68 en donde además se ve un fragmento de aplanado realizado para dar la apariencia de un muro. En la fotografía central inferior y en la de la derecha de esa misma figura 68 se

puede apreciar cómo se ha desconchado el aplanado y se ve un hueco que contiene hierba seca en su interior.

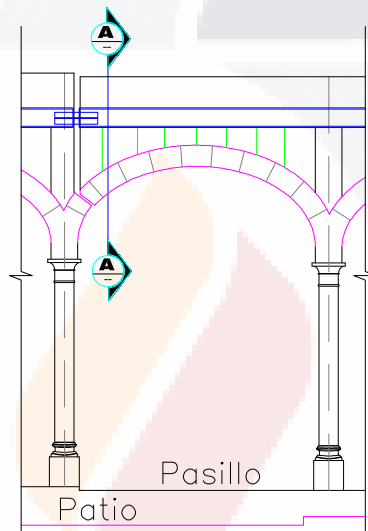


**Figura 68. En la junta fría en el arco norte.**

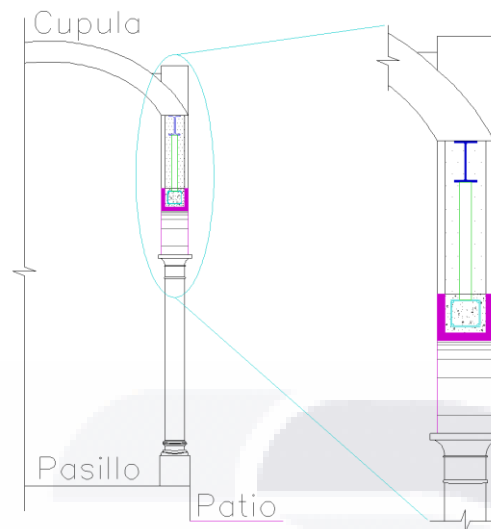
Como anteriormente se detalló en cuanto a cómo fue reestructurado el arco norte con la incorporación de los IR de 10" x 44.8kg, en cada lado de la junta fría se colocó un IR, los cuales fueron unidos por dos soleras de 3" x 3/8" en el alma de cada IR como se muestra en la figura 69. Observando la figura 70 se pueden ver las dos soleras anteriormente mencionadas. En la figura 71 se ve una elevación transversal detallando como fue colocando el IR de 10" x 44.8 kg en el sentido de los arcos y a su vez bajo las bóvedas de cañón. Por debajo de la IR se ve como fueron fijados los segmentos de los arcos, mientras que entre el IR y los arcos hay un hueco. También se ve como los arcos fueron usados de cimbra aparente después de colocados en su ubicación exacta.



**Figura 69. Elevación longitudinal del arco norte.**



**Figura 70. Elevación longitudinal del arco norte.**



**Figura 71. Corte A sobre arcos norte.**

En la foto de la izquierda de la figura 72 se pueden apreciar unas diminutas grietas en la parte superior, en las cuales se confirma también la colocación de un IR de 10”x44.8kg/ml con la traza de su potencial colocación en la foto de la derecha.



**Figura 72. Vista frontal de los arcos sobre columnas sur.**

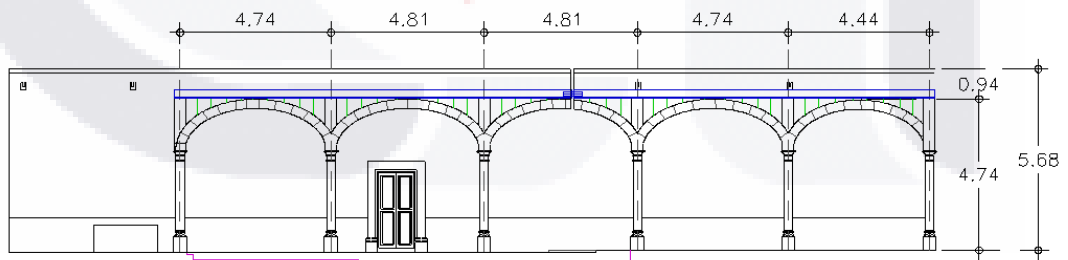
En la figura 73 pareciera que las piezas de los arcos fueron adecuados para usarlos de cascarones (cimbras aparentes) como se ve en la fotografía de la derecha de esa figura,

en donde se ve además el color rosado de la cantera y en medio un color gris cemento, es decir al volver a colocar todas las piezas de los arcos se modificaron para usarlos de cimbra.

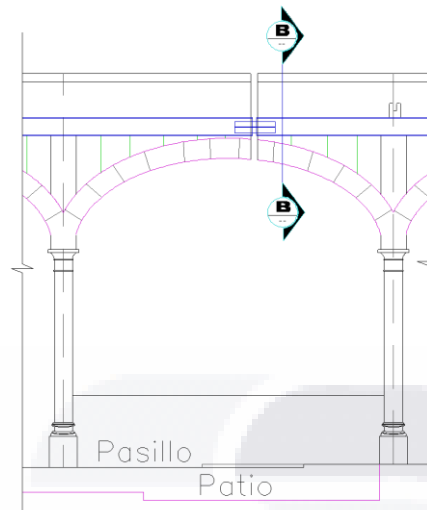


**Figura 73. Junta fría en el arco sur.**

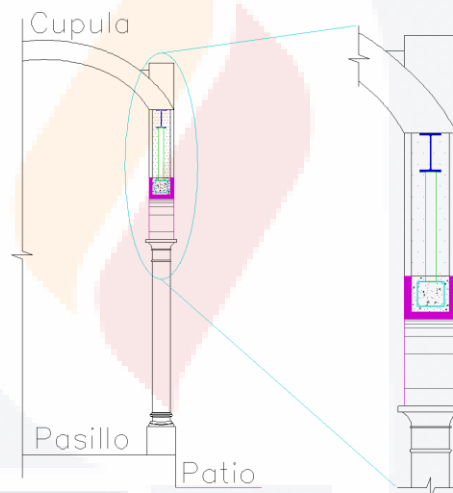
Muy parecido al proceso del arco norte, en el arco sur se incorporaron IR de 10" x 44.8 kg. Las figuras 74 a 76 muestran el proceso de adecuación del IR en ese arco norte. Las diferencias básicas entre las figuras 69 a 71 y 74 a 76 son las dimensiones en la posición de los arcos.



**Figura 74. Elevación longitudinal del arco sur.**



**Figura 75. Elevación longitudinal del arco sur.**



**Figura 76. Corte A sobre arcos norte.**

### 10.1.3 Resumen de rehabilitación estructural

En base a la información recabada y lo observado de la rehabilitación estructural realizada al Museo, se resume que los arcos norte y sur, debido a la colocación de una junta fría para mitigarles los esfuerzos y deformaciones inducidas por la falla geológica, hoy en día ya no están trabajando como es su función principal, la cual debería ser trabajo a



compresión formando una línea de empuje que se trasmite a las base de los mismos. Los IR que fueron colocados para trabajar con traveses en lugar de los arcos que están actualmente cargando las bóvedas de cañón, por lo que la función de los arcos ya es solo arquitectónico.



## **11 ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR MEDIO DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.**

### **11.1 Descripción del método de los elementos finitos**

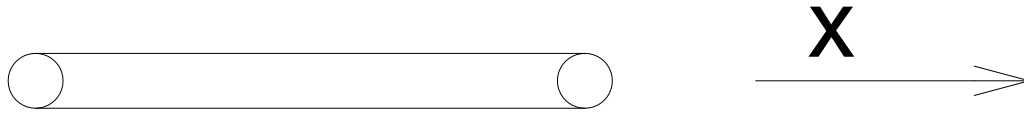
Generalmente los problemas a los que se enfrenta un ingeniero pueden ser de un alto nivel de complejidad, en los cuales es muy conveniente el uso de métodos complejos como es el método de elementos finitos, que es una herramienta muy útil para una gran variedad de soluciones que involucran geometrías complejas, cargas no distribuidas y propiedades no lineales en los materiales.

El fundamento de método de elemento finito (MEF) es la discretización de sus elementos y con esto se plantean ecuaciones algebraicas simultáneas, que en comparación a otros métodos es necesario la resolución de ecuaciones diferenciales. En el MEF se devuelven los valores aproximados de las incógnitas de los números finitos mediante la correlación entre los valores discretizados, entendiéndose por discretización al procedimiento de modelación de un elemento cuyo fundamento es dividir en porciones más pequeñas, o en los elementos finitos que conformen un cuerpo, los cuales están interconectados mediante nodos. Con estos se forman áreas que se comportan como volúmenes de controles independientes, mismos que a su vez son afectados por las condiciones frontera que son aplicadas a todo el cuerpo.

En la resolución del método de elementos finitos, el problema no se resuelve como si fuera un solo cuerpo sino como una suma de resultados de cada elemento finito, esto es, el resultado de un todo que se obtiene de la resolución simultanea de cada componente finita del elemento (Celigüeta 2008).

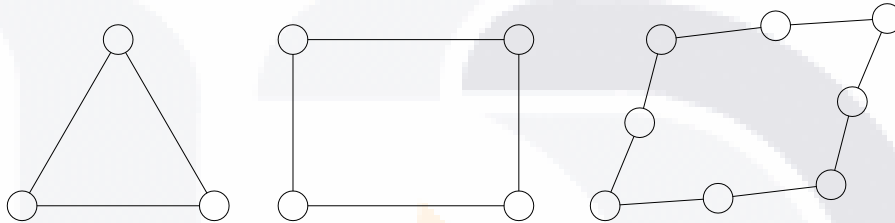
Se representan a continuación algunos de los elementos más comunes del método de elemento finito (MEF).

- Elementos unidimensionales.



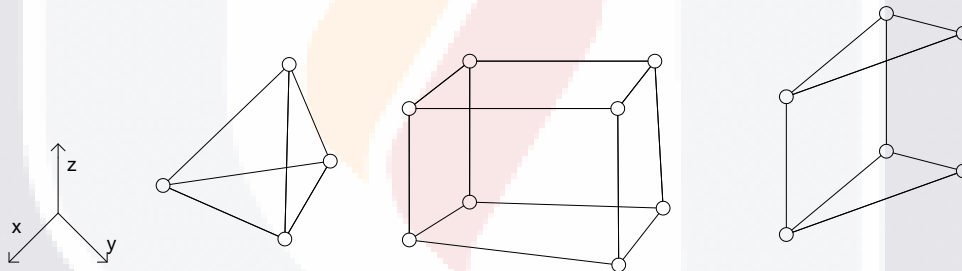
**Figura 77. Elementos para geometría unidimensional.**

- Elementos bidimensionales.



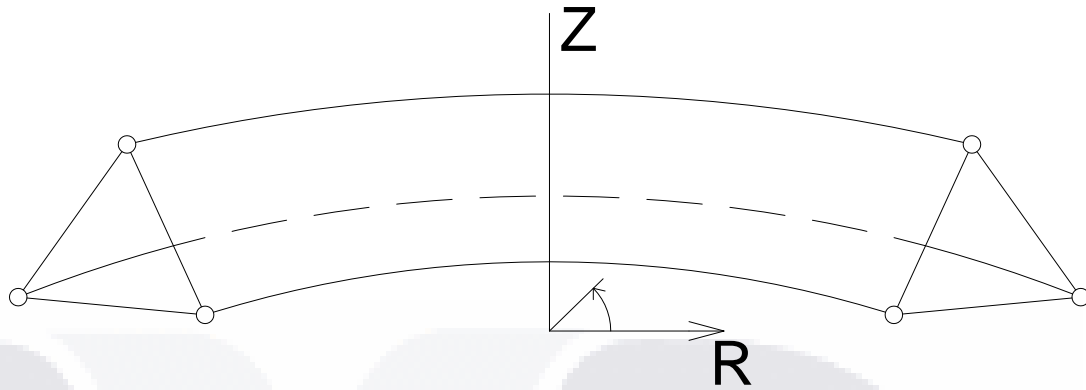
**Figura 78. Elementos para geometría bidimensional.**

- Elementos tridimensionales



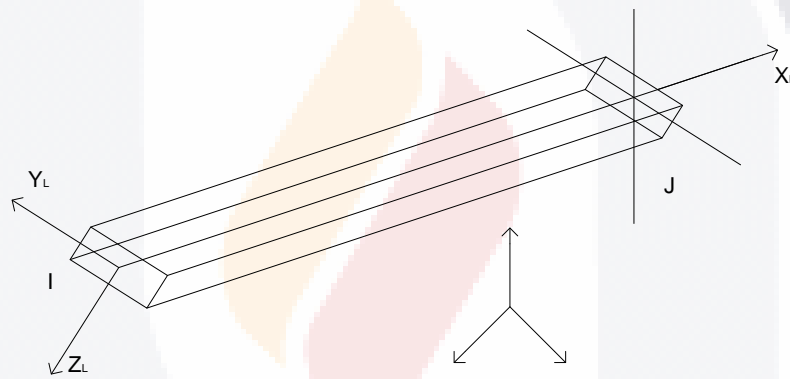
**Figura 79. Elementos para geometría tridimensional.**

- Problemas asimétricos.



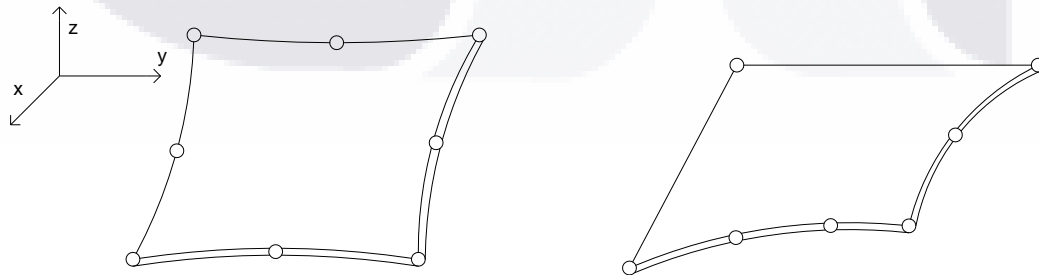
**Figura 80. Elemento asimétrico.**

- Vigas



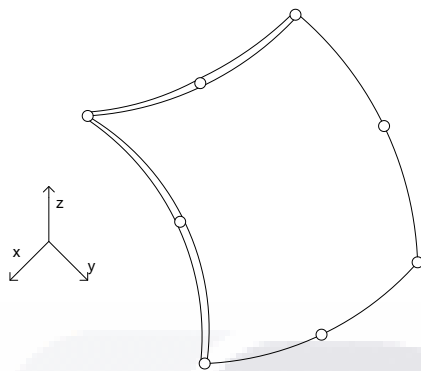
**Figura 81. Elemento viga.**

- Flexión de placas planas.



**Figura 82. Elemento placa.**

- Cascaras curvas.



**Figura 83. Elemento cascara.**

## 11.2 Aplicación del método MEF en el Museo de la Insurgencia

Para el análisis estructural del Museo de la Insurgencia y la determinación de esfuerzos y deformaciones en tres dimensiones (6 grados de libertad) se emplearon elementos tridimensionales tipo cuadriláteros con cuatro nodos.

Dentro del análisis, en la elaboración del modelo del arco norte se utilizaron aproximadamente 4,592 elementos tipo área y 18,368 nodos, mientras que para el arco sur se utilizaron aproximadamente 4,628 elementos tipo área y 18,512 nodos. Las condiciones de frontera entre elementos tipo tridimensional fueron de continuidad, es decir transmitiendo tanto fuerzas como momentos de un elemento a otro.

En los bordes de las columnas de los arcos sur y norte se consideraron apoyos empotrados, es decir, restringiendo en las tres dimensiones tanto los desplazamientos (X, Y y Z) como los giros ( $\theta_X$ ,  $\theta_Y$  y  $\theta_Z$ ). Pero esto solo se aplicó en la parte poniente de los arcos, lado en el que se presume que no hay afectaciones por los hundimientos diferenciales, en la otra parte de los arcos sur y norte se consideraron articulaciones para simular la consolidación del terreno, es decir, permitiendo la traslación en solo sus dos sentidos X y Y pero restringiendo el giro en sus tres sentidos, para poder permitir un desplazamiento en el sentido de Z y así representar el hundimiento diferencial en los arcos.

## 11.3 Características mecánicas de los materiales estructurales.

En la edificación de inmuebles se suelen utilizar diferentes materiales con diferentes propiedades mecánicas. En el caso particular del Museo de la Insurgencia, se utilizó mampostería y rehabilitación con acero estructural, los cuales tiene cada uno de ellos sus diferentes propiedades mecánicas, mismas que se describen en la tabla 4.

**Tabla 4. Propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción y rehabilitación del Museo de la Insurgencia.**

Elemento	Resistencia a Compresión Kg/cm <sup>2</sup>	Peso volumétrico Kg/cm <sup>3</sup>	Módulo de elasticidad Kg/cm <sup>2</sup>	Coefficiente de Poisson sin	Módulo de corte Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzos de fluencia Kg/cm <sup>2</sup>
Bóvedas (enladrillado)	20	1870	4000	0.25	1600	-
Arcos (mampostería piedra)	20	1500	4000	0.25	-	-
Columnas (mampostería piedra)	20	1500	4000	0.25	-	-
Vigas (acero)	-	7850	2x10 <sup>6</sup>	0.30	784193	2531

#### 11.4 Elementos estructurales y criterios de simulación de los muros

Para las simulaciones se consideraron solo los arcos norte y sur por ser los elementos estructurales dentro de toda la estructura del Museo que siguen interactuando con la actividad de la falla geológica, y por el hecho de estar unidos por unas soleras, las cuales, a su vez, no permiten su libre desplazamiento como lo hacen las bóvedas y los muros. Como ya se mencionó anteriormente, estructuralmente los arcos ya no están trabajando como en un principio fue su función principal, ahora la función de estos elementos solo es arquitectónica, ya que ahora están apoyados sobre la viga metálica que está colocada desde la restructuración realizada durante la colocación de las juntas frías en las bóvedas, muros y arcos.

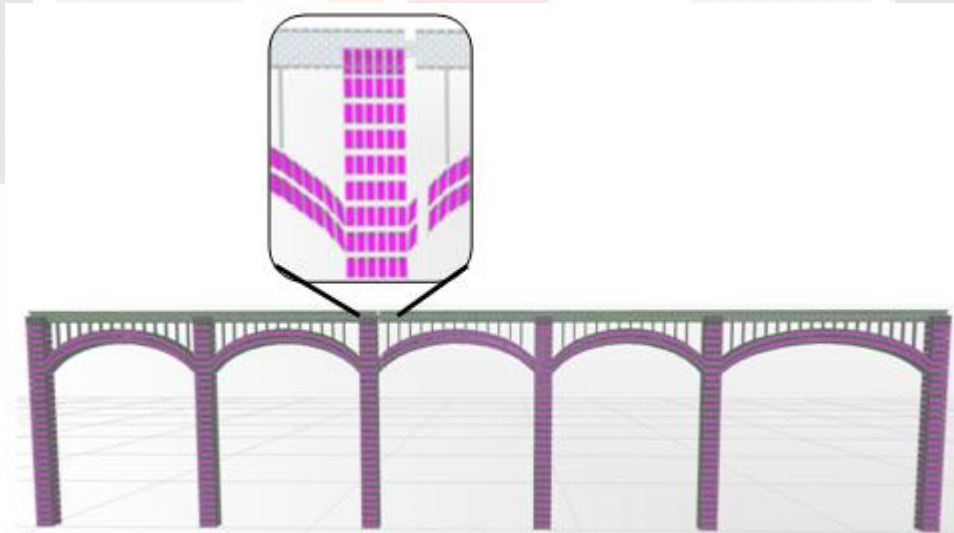
Para analizar la respuesta estructural de los modelos de los arcos y columnas se realizaron dos simulaciones principales: en la primera solo se consideraron las cargas actuantes y permanentes que inciden en los arcos y columnas por acciones gravitacionales estáticas. La segunda se realizó incluyendo las deformaciones inducidas por la falla que

están afectando a la estructura, más las actuantes permanentes, relacionadas al efecto de la acción gravitacional estática sobre sus elementos constructivos.

### 11.5 Primer modelo: Arcos y columnas afectadas solo por el peso propio de los materiales constructivos.

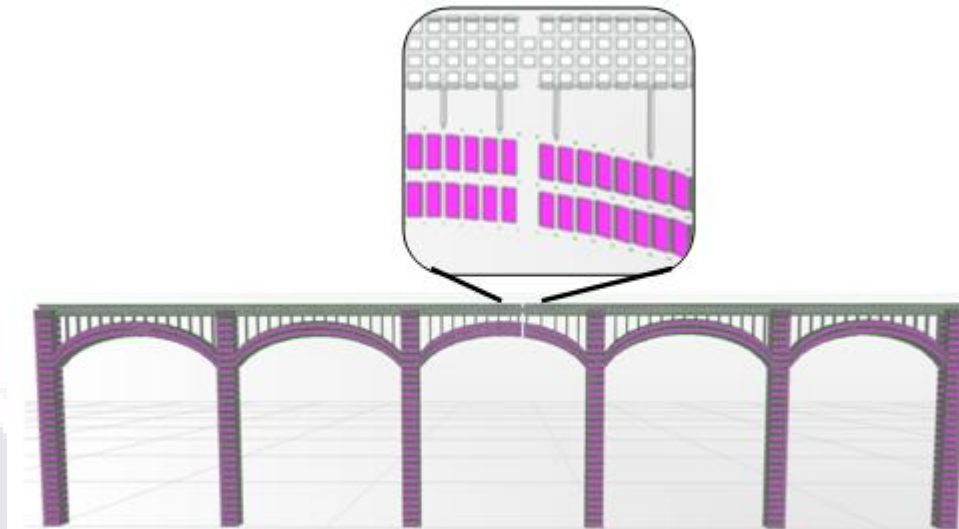
Como se especificó anteriormente, la estructuración del primer modelo corresponde a la simulación de los desplazamientos sobre una geometría que representa a los arcos y columnas actuales, pero sin la afectación de los desplazamientos inducidos por la falla geológica. El fin de este modelo fue determinar los esfuerzos en los arcos y columnas sin la acción de la falla geológica.

Como resultado de esta primer simulación, los esfuerzos inducidos por el peso de los mismos materiales empleados en la construcción no sobrepasaron los estados límites permitidos mostrados en la tabla 5. Las figuras 84 y 85 muestran la estructuración del modelo conceptual de los arcos y columnas empleado para validar los esfuerzos anteriormente mencionados.



**Figura 84. Modelación de los arcos y columnas nortes con elementos finitos.**





**Figura 85. Modelación de los arcos y columnas sur con elementos finitos.**

### **11.6 Segundo modelo: Arcos y columnas con deformaciones inducidas por la falla geológica.**

En esta segunda simulación se incluyeron los elementos y desplazamientos del primer modelo pero ahora con los desplazamientos inducidos por la falla geológica.

La finalidad de este segundo modelo fue verificar si la acción de la falla geológica, sus esfuerzos y deformaciones en conjunto con los de los materiales empleados en la construcción no sobrepasaban los estados de deformación y esfuerzo límites permitidos de los materiales empleados en la construcción.

### 11.7 Combinaciones de las acciones consideradas

La relación de esfuerzos en combinación utilizados en el análisis estructural de los cuatro modelos (dos modelos aplicados a arcos sur y norte) se muestran a continuación:

$$C1 = PP + CM + CV$$

$$C2 = PP + CM + CV + FG$$

En los que:

PP = Peso propio de la estructura

CM = Carga muerta

CV = Carga viva

FG = Deformaciones por Falla Geológica.

Cabe recalcar que las deformaciones inducidas por la falla geológica fueron tomadas de las lecturas en los testigos fijos a lo largo de 202 días, Por otro lado, no se consideraron factores de cargas indicados por los reglamentos NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS del D.F. (NTC DF 2004) debido a que se pretende realizar una evaluación estructural y no un diseño.

### 11.8 Modelación de los arcos y columnas afectado solo por el peso propio de los materiales constructivos

#### 11.8.1 Cargas actuantes estáticas.

Son varias las cargas que actúan sobre cualquier estructura, en el caso particular del Museo de la Insurgencia, estas corresponden a 4 principales: a) peso propio de la estructura, b) cargas muertas de la bóveda, c) cargas vivas y d) esfuerzos inducidos por la falla

geológica. A continuación se describen cada una de estas cargas actuantes y en base a qué se evaluaron:

El peso propio de los elementos estructurales fue calculado directamente por el programa de análisis estructural (SAP 2000) en base a la geometría de las secciones y el peso volumétrico de los materiales estructurales.

Las cargas muertas de la bóveda corresponden a las capas de los morteros de nivelación, enladrillado superior y a los rellenos de cascajo utilizado para llegar a una superficie horizontal de la bóveda. Lo anterior se calculó con valores promedio de peso volumétrico de  $1,500 \text{ kg/m}^3$  y un espesor de relleno de de 25 cm, con una ancho tributario de 2 m lo que da como resultado una carga muerta linealmente distribuida de  $750 \text{ kg/ml}$ , la cual es cargada por los arcos.

Las cargas vivas fueron consideradas de  $30 \text{ kg/m}^2$  (valor relativamente bajo), con base en la esporádica presencia de personas encima de la bóveda.

### **11.9 Análisis y comparación de las deformaciones entre los modelos considerando su respuesta estructural ante las solicitaciones actuantes**

Las figuras 86 y 87 muestran la distribución de isovalores de esfuerzo en los arcos y columnas norte y sur ante las solicitaciones correspondientes a la combinación de cargas C1 (solo peso propio de los materiales) en  $\text{kg/cm}^2$ , en una vista este-oeste.

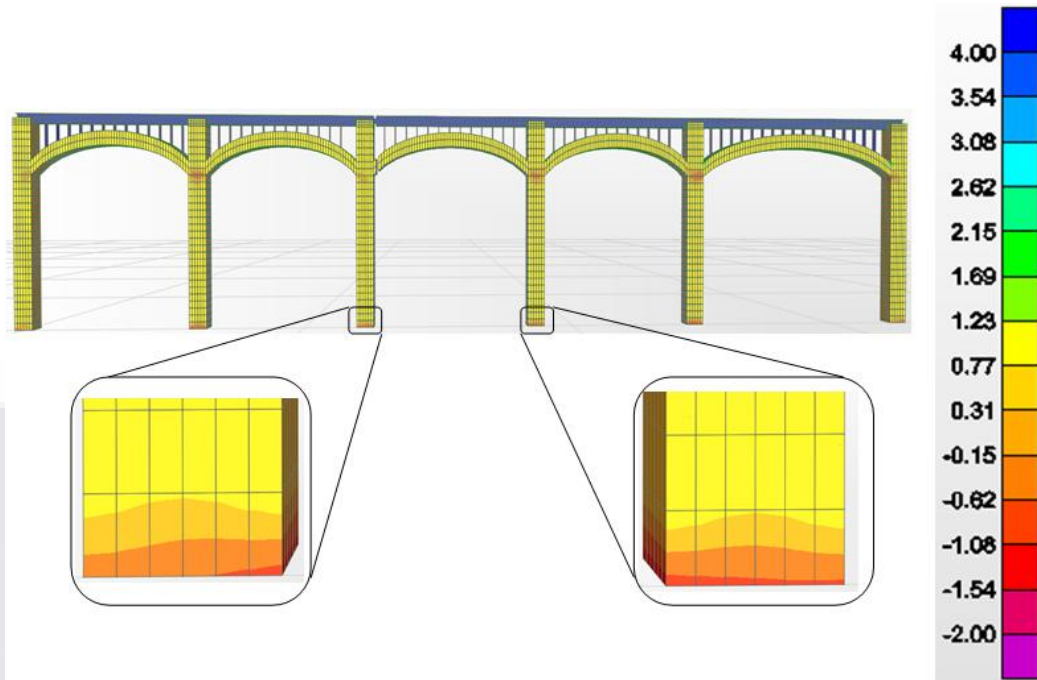


Figura 86. Arcos y columnas norte sin deformación. Los valores en  $\text{kg/cm}^2$ .

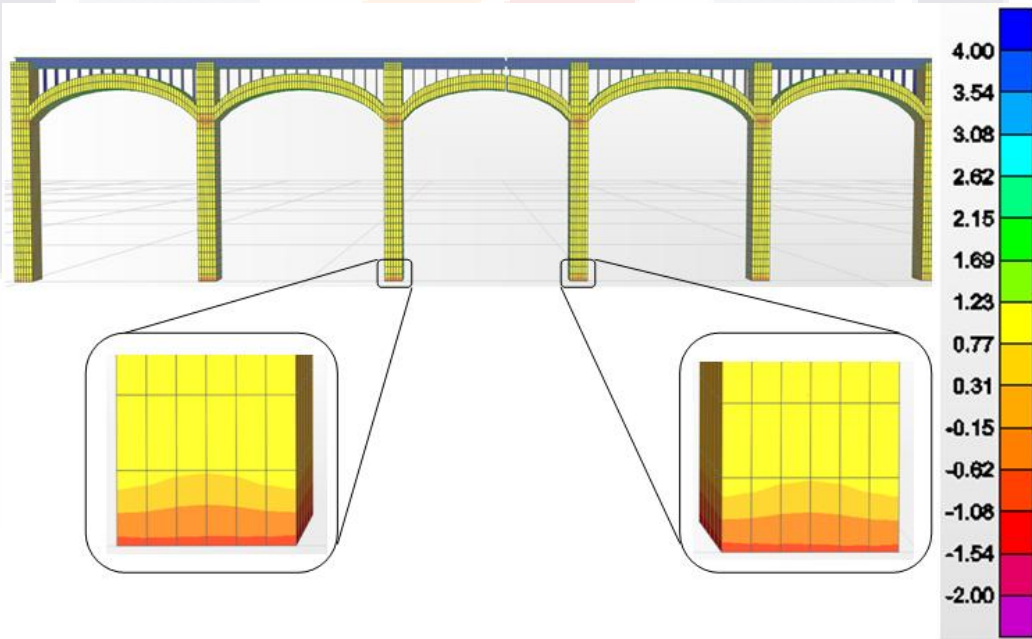


Figura 87. Arco y columnas sur sin deformaciones. Los valores en la barra de leyenda son  $\text{kg/cm}^2$ .

A su vez, las figuras 88 y 89 muestran un diagrama, la distribución de isovalores de esfuerzo ante las solicitaciones correspondientes a la combinación de cargas C2 (considerando el efecto de la falla geológica) en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , en una vista este-oeste haciendo énfasis en las zonas más críticas mediante recuadros de acercamiento.

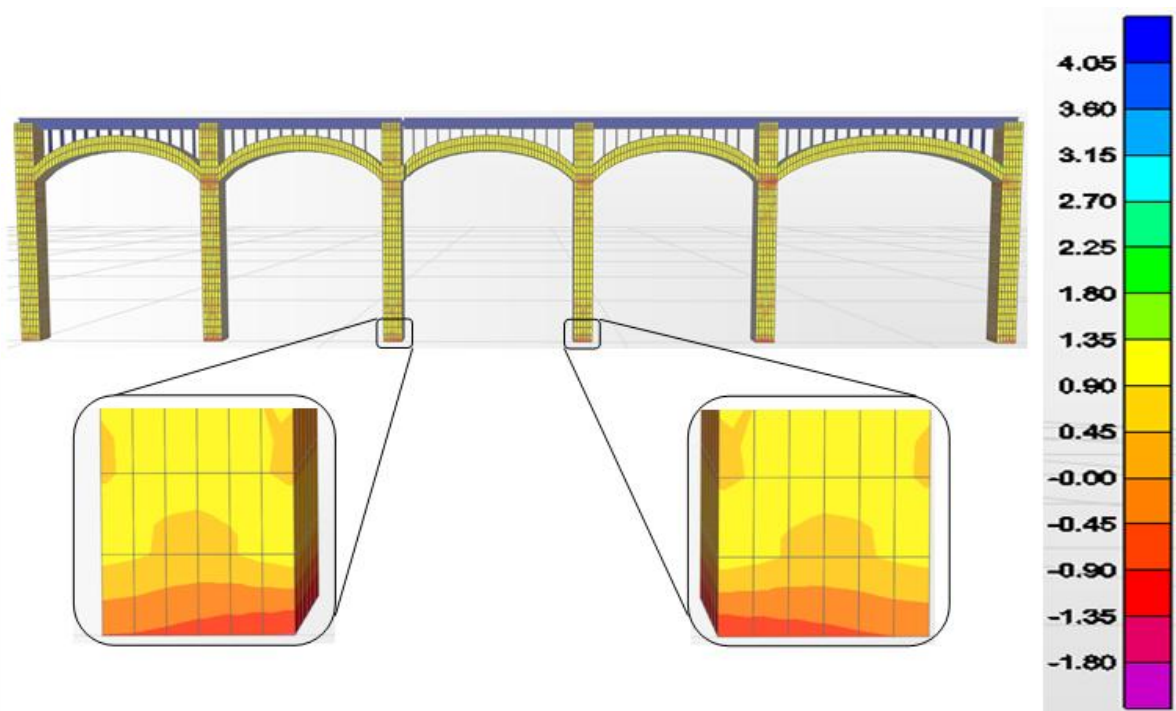
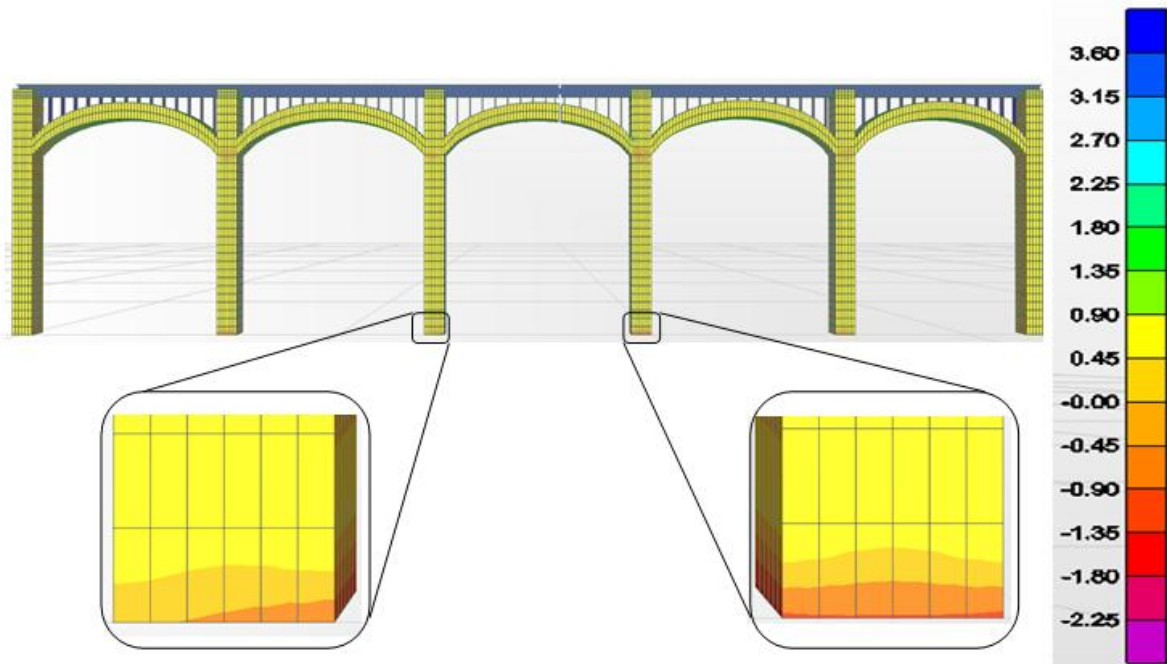


Figura 88. Arco y columnas norte con deformación. Los valores en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .



**Figura 89. Arco y columnas sur con deformación. Los valores en la barra de leyenda son  $\text{kg/cm}^2$ .**

### 11.9.1 Estados límite de falla por tensión, cortante y compresión de los materiales estructurales y comparación con los resultantes en las simulaciones

Los estados límite de falla de la mampostería, considerando una resistencia a la compresión de la misma de  $20 \text{ kg/cm}^2$ , son de  $2 \text{ kg/cm}^2$  a tensión y de  $3.50 \text{ kg/cm}^2$  a cortante, valores típicos que se manejan en los principales códigos y bibliografía más común sobre mampostería, por ejemplo las NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS del D.F. 2004, Meli, R. (1998) y Castellanos, H. (2004) entre otros.

Mediante el análisis estructural numérico realizado por elementos finitos, se evaluó el nivel de esfuerzos críticos actuantes en la arcos y columnas (esfuerzos principales máximos y mínimos) para los dos modelos de análisis; el correspondiente a arcos y columnas con el solo efecto del peso propio de los materiales constructivos (Combinación

de carga C1) y otro con la interacción de los arcos, columnas y las acciones de la falla geológica (Combinación de carga C2). Lo anterior tiene como finalidad, el comparar la magnitud de los esfuerzos falla (agrietamiento frágil). En la tabla 5 y 6 se presentan dichos valores de esfuerzos críticos y su correspondiente comparación con los valores de estado límite de falla por tensión, cortante y compresión de la mampostería.



**Tabla 5. Estados de esfuerzos de falla en arcos y columnas norte.**

Arcos y Columnas Norte				
Estado límite de Falla		Condición de Carga C1 (kg/cm <sup>2</sup> )	Condición de Carga C2 (kg/cm <sup>2</sup> )	Valor del Estado límite de Falla (kg/cm <sup>2</sup> )
Tensión	$\sigma_x$	1.01	1.17	2.00
	$\sigma_y$	0.37	0.56	
cortante	$T_{xy}$	0.56	0.92	3.50
Compresión	$\sigma_x$	1.89	2.57	20.00
	$\sigma_y$	1.66	1.98	
Esfuerzos principales	$\sigma_{min}$	0.92	1.01	2.00
	$\sigma_{max}$	6.69	6.91	20.00

**Tabla 6. Estados de esfuerzos de falla en arcos y columnas sur.**

Arcos y Columnas Sur				
Estado límite de Falla		Condición de Carga C1 (kg/cm <sup>2</sup> )	Condición de Carga C2 (kg/cm <sup>2</sup> )	Valor del Estado límite de Falla (kg/cm <sup>2</sup> )
Tensión	$\sigma_x$	1.06	1.12	2.00
	$\sigma_y$	0.39	0.58	
cortante	$T_{xy}$	0.84	1.28	3.50
Compresión	$\sigma_x$	2.07	3.05	20.00
	$\sigma_y$	2.02	2.91	
Esfuerzos principales	$\sigma_{min}$	1.02	1.16	2.00
	$\sigma_{max}$	7.15	10.36	20.00

Puede verse en las tablas 5 y 6 que bajo las condiciones actuales de esfuerzos simulados en ambos modelos (con deformaciones por peso propio y en interacción con la falla) ningún tipo de esfuerzo sobrepasa a los del estado límite de falla, por lo que se considera que la mampostería está trabajando actualmente de forma adecuada en ambos casos.

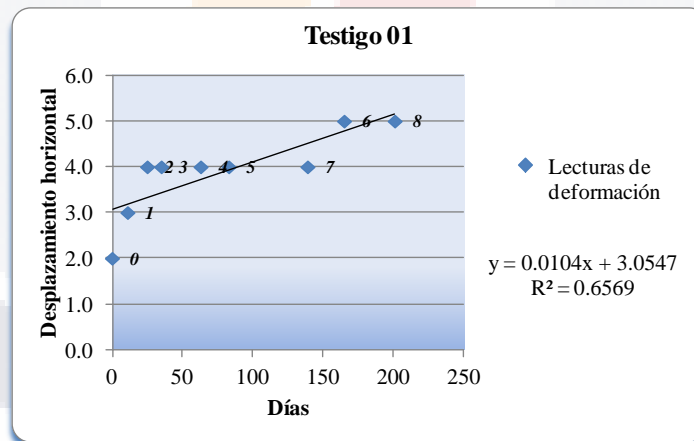


### 11.10 Estimación a futuro de los desplazamientos inducidos por la falla geológica.

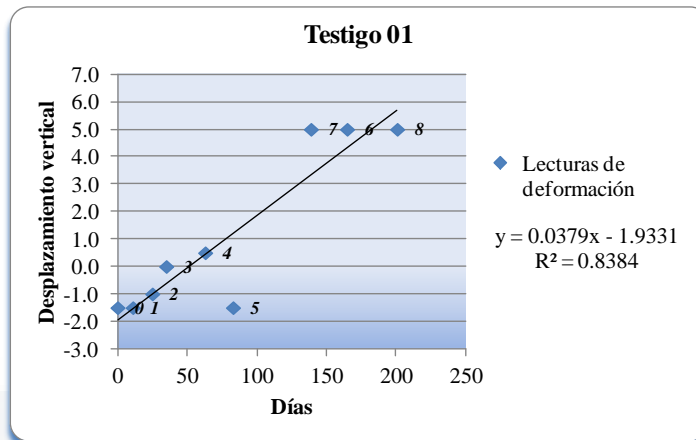
En este capítulo se analiza el comportamiento estructural del Museo de la Insurgencia a futuro, con base en las deformaciones a las que estaría sometida la estructura debido a la actividad de la falla geológica, siendo este uno de los temas principales de estudio de este trabajo practico.

De cada uno de los testigo fijos fueron utilizados para medir las afectaciones que está induciendo la falla geológica, así con las lecturas tomadas a lo largo de los 202 días de monitoreo se determino estadísticamente sus tendencias de desplazamiento a futuro.

A continuación se presentan los desplazamientos de cada uno de los testigos colocados en el Museo de las Insurgencia, en el que también se incluye una línea y ecuación de tendencia que permitirá conocer un comportamiento potencial en el futuro



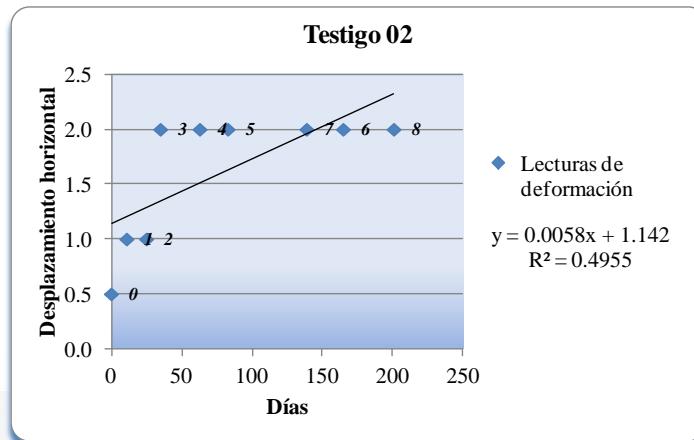
**Gráfica 6. Lecturas de desplazamiento horizontal (X) contra el tiempo y línea de tendencia del testigo 01. El valor en cada punto indica la secuencia de medición.**



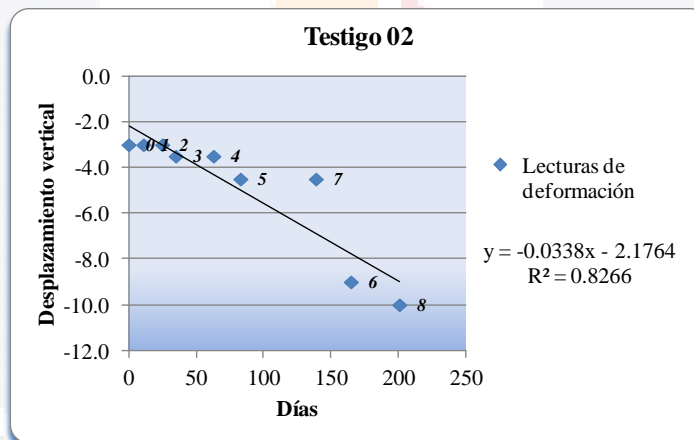
Gráfica 7. Lecturas de desplazamiento vertical (Y) contra el tiempo y línea de tendencia del testigo 01. El valor en cada punto indica la secuencia de medición.

Tabla 7 Comportamiento de desplazamiento a futuro del testigo 01.

Testigo 01			
Años	Días	Tendencia	
		X (mm)	Y (mm)
0	0	0.0	0.0
0.5	180	4.9	4.9
1	365	6.9	11.9
5	1825	22.0	67.2
10	3650	41.0	136.4
50	18250	192.9	689.7
100	36500	382.7	1381.4



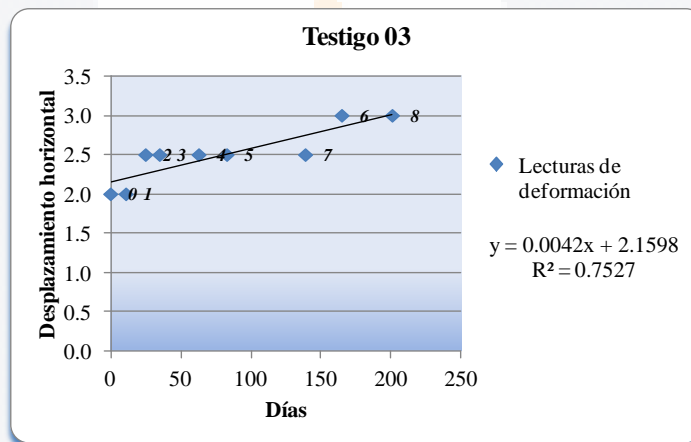
**Gráfica 8** Lecturas de desplazamiento horizontal (X) contra el tiempo y línea de tendencia del testigo 02. El valor en cada punto indica la secuencia de medición.



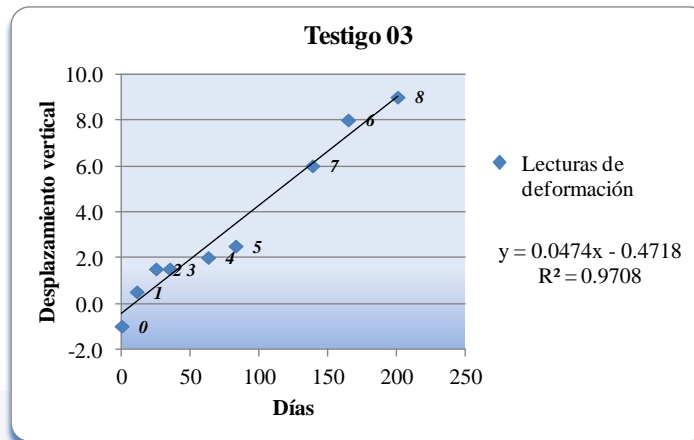
**Gráfica 9.** Lecturas de desplazamiento vertical (Y) contra el tiempo y línea de tendencia del testigo 02. El valor en cada punto indica la secuencia de medición.

**Tabla 8 Comportamiento de desplazamiento a futuro del testigo 02.**

Testigo 02			
Años	Días	Tendencia	
		X (mm)	Y (mm)
0	0	0.0	0.0
0.5	180	2.2	3.9
1	365	3.3	10.2
5	1825	11.7	59.5
10	3650	22.3	121.2
50	18250	107.0	614.7
100	36500	212.8	1231.5



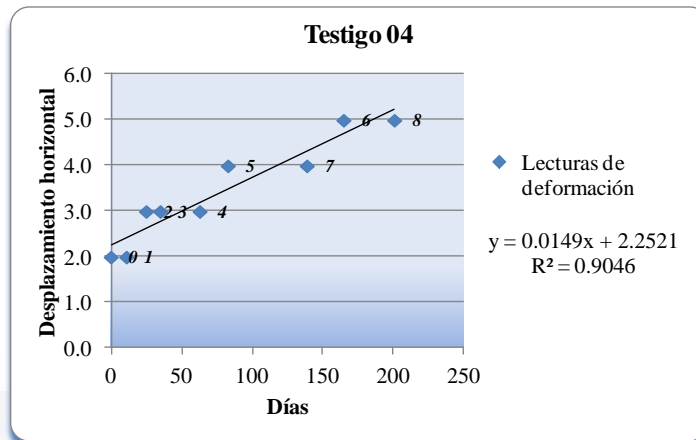
**Gráfica 10 Lecturas de desplazamiento horizontal (X) contra el tiempo y línea de tendencia del testigo 03. El valor en cada punto indica la secuencia de medición.**



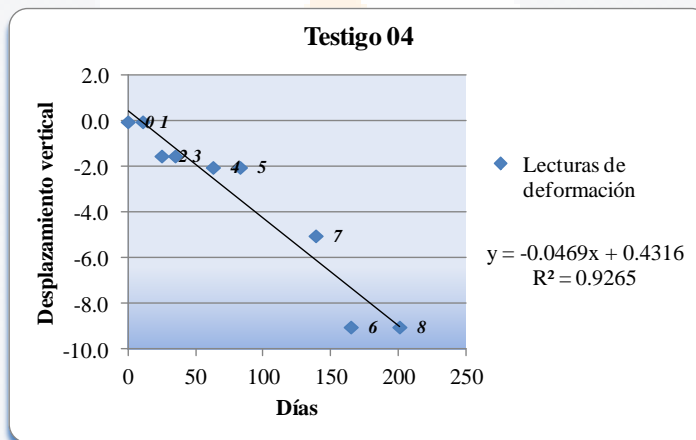
Gráfica 11. Lecturas de desplazamiento vertical (Y) contra el tiempo y línea de tendencia del testigo 03. El valor en cada punto indica la secuencia de medición.

Tabla 9 Comportamiento de desplazamiento a futuro del testigo 03.

Testigo 03			
Años	Días	Tendencia	
		X (mm)	Y (mm)
0	0	0.0	0.0
0.5	180	2.9	8.1
1	365	3.7	16.8
5	1825	9.8	86.0
10	5475	25.2	259.0
50	18250	78.8	864.6
100	36500	155.5	1729.6



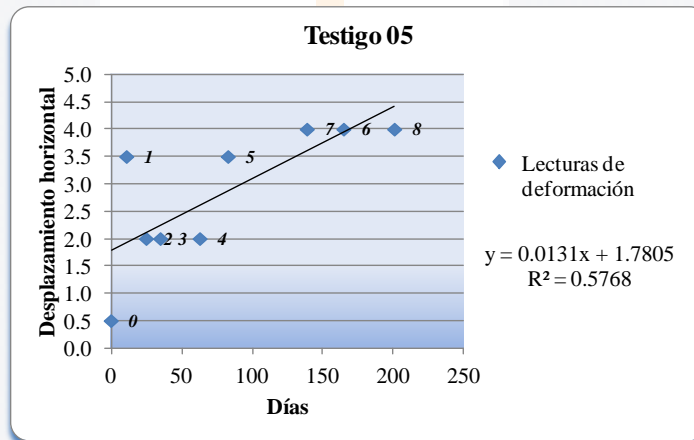
Gráfica 12. Lecturas de desplazamiento horizontales (X) contra el tiempo y línea de tendencia del testigo 04. El valor en cada punto indica la secuencia de medición.



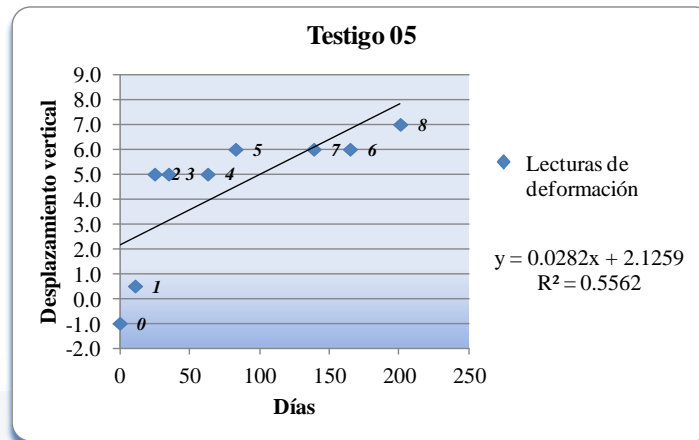
Gráfica 13. Lecturas de desplazamiento horizontales (X) contra el tiempo y línea de tendencia del testigo 04. El valor en cada punto indica la secuencia de medición.

**Tabla 10. Comportamiento de desplazamiento a futuro del testigo 04.**

Testigo 04			
Años	Días	Tendencia	
		X (mm)	Y (mm)
0	0	0.0	0.0
0.5	180	4.9	8.9
1	365	7.7	17.6
5	1825	29.4	86.0
10	3650	56.6	171.6
50	18250	274.2	856.4
100	36500	546.1	1712.3



**Gráfica 14. Lecturas de desplazamiento horizontales (X) contra el tiempo y línea de tendencia del testigo 05. El valor en cada punto indica la secuencia de medición.**



**Gráfica 15.** Lecturas de desplazamiento verticales (Y) contra el tiempo y línea de tendencia del testigo 05. El valor en cada punto indica la secuencia de medición.

**Tabla 11.** Comportamiento de desplazamiento a futuro del testigo 05.

Testigo 05			
Años	Días	Tendencia	
		X (mm)	Y (mm)
0	0	0.0	0.0
0.5	180	4.1	7.2
1	365	6.6	12.4
5	1825	25.7	53.6
10	3650	49.6	105.1
50	18250	240.9	516.8
100	36500	479.9	1031.4

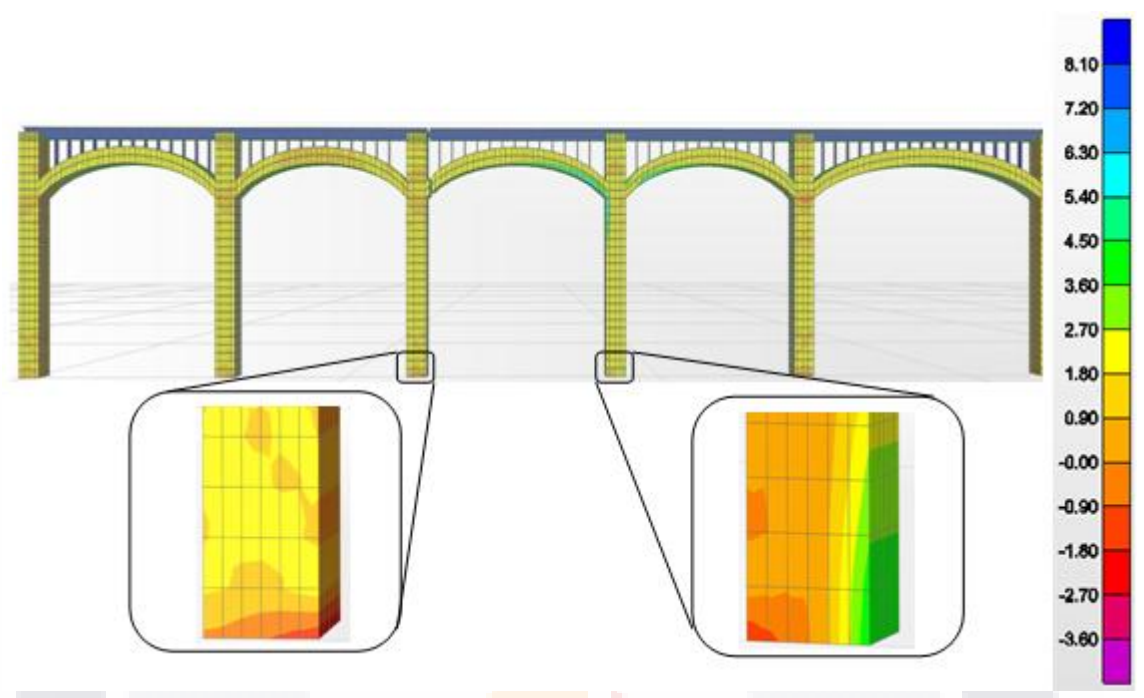
Como se puede observar, los desplazamientos en X son mucho menores a comparación de los hundimientos diferenciales (desplazamientos en Y). El promedio de desplazamiento vertical es de unos 5.64 milímetros por año, pero en cambio se tiene un hundimiento diferencial promedio de 13.78 milímetros por año. Siendo casi el doble de deformación vertical que la horizontal.



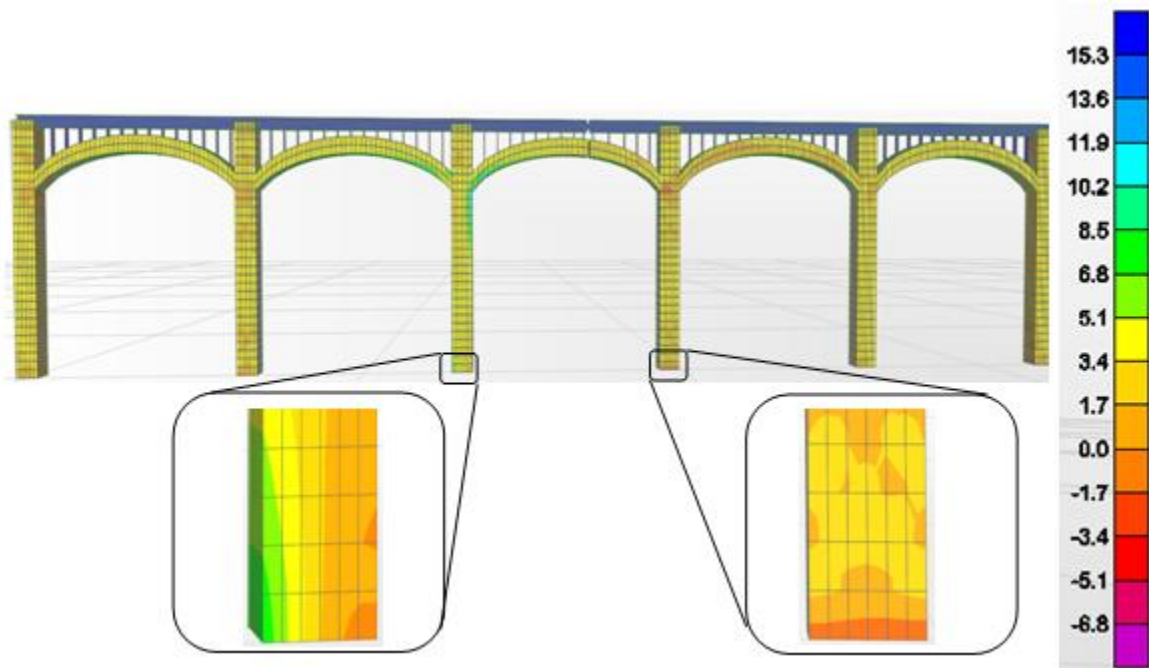
### **11.11 Análisis y comparación de las deformaciones entre los modelos considerando su respuesta estructural ante las solicitaciones actuantes a futuro.**

Utilizando los datos estadísticos de desplazamiento y tendencia del mismo desprendido de los datos de monitorización, en este capítulo se estima el posible tiempo de falla de las estructura considerando los estados límite de esfuerzo falla de los materiales empleados en la construcción del museo, los esfuerzos simulados críticos actuantes en la estructura, y teniendo en cuenta la deformación que está induciendo la falla geológica en el edificio, determinada mediante los desplazamientos en los testigos. Este análisis se realiza determinando el punto en el tiempo en el que los esfuerzos máximos últimos simulados sobrepasan los esfuerzos últimos de resistencia de los materiales, derivados de los desplazamientos inducidos por la falla (deformaciones y agrietamiento) y ante estados límite de falla (agrietamiento frágil).

En las figuras 90 y 91 muestran un diagrama simulado de la distribución de isovalores de esfuerzo a futuro ante las solicitaciones correspondientes a la combinación de cargas C2 (considerando el efecto de la falla geológica) en  $\text{kg/cm}^2$ , en una vista este-oeste para los arcos norte y sur. Se realizaron varias simulaciones, utilizando los tiempos de desplazamiento considerados en las tablas 7 a 11, resultando que en 5 años los esfuerzos sobrepasarían los estados límites de falla. Las figura 90 y 91 muestran los esfuerzos simulados para ese periodo de desplazamiento. Como se puede observar en las base de las columnas los esfuerzos sobrepasan los estados límite de falla, en el arco y columnas norte de obtuvieron valores de tensión de 3.8 y 2.34  $\text{kg/cm}^2$  que estos sobrepasan los estados límites de falla que son de 2.0  $\text{kg/cm}^2$ , en estos mismo se obtuvieron esfuerzos a cortante de 3.58 teniendo el estado límite de falla son 3.5  $\text{kg/cm}^2$ , en tanto en el arco y columnas sur se obtuvo resultados de tensión de 2.33 y 2.65  $\text{kg/cm}^2$  y de cortante de 3.62 $\text{kg/cm}^2$  los cuales también sobrepasan los valores máximo del estado limite falla de la mampostería.



**Figura 90 Arco y columnas norte con deformación a futuro a 5 años. Los valores en la barra de leyenda son kg/cm².**



**Figura 91 Arco y columnas sur con deformación a futuro a 5 años. Los valores en la barra de leyenda son  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .**

En la tabla 12 y 13 se presentan una comparación los valores de esfuerzos simulados críticos y los valores de esfuerzo de estado límite de falla por tensión, cortante y compresión de la mampostería. Los valores mostrados en estas tablas son valores de la parte inferior de las columnas que están siendo afectadas directamente por los desplazamientos verticales y horizontales provocados por la falla geológica.

**Tabla 12 Estados de esfuerzos de falla en arcos y columnas norte.**

<b>Arcos y Columnas Norte a 5 años</b>			
Estado límite de Falla		Condición de Carga C2 (kg/cm <sup>2</sup> )	Valor del Estado límite de Falla (kg/cm <sup>2</sup> )
Tensión	$\sigma_x$	<b>3.8</b>	2.00
	$\sigma_y$	<b>2.34</b>	
cortante	$T_{xy}$	<b>3.58</b>	3.50
Compresión	$\sigma_x$	10.04	20.00
	$\sigma_y$	4.62	
Esfuerzos principales	$\sigma_{min}$	1.47	2.00
	$\sigma_{max}$	7.93	20.00

**Tabla 13 Estados de esfuerzos de falla en arcos y columnas sur.**

<b>Arcos y Columnas Sur a 5 años</b>			
Estado límite de Falla		Condición de Carga C2 (kg/cm <sup>2</sup> )	Valor del Estado límite de Falla (kg/cm <sup>2</sup> )
Tensión	$\sigma_x$	<b>2.33</b>	2.00
	$\sigma_y$	<b>2.65</b>	
cortante	$T_{xy}$	<b>3.62</b>	3.50
Compresión	$\sigma_x$	1.32	20.00
	$\sigma_y$	1.36	
Esfuerzos principales	$\sigma_{min}$	<b>2.3</b>	2.00
	$\sigma_{max}$	8.29	20.00

Como se observa en las tablas 12 y 13, los valores en color rojo ya sobrepasaron los estados límite de falla, es decir, la estructura está en riesgo de sufrir un colapso por sobrepasar sus resistencias a la tensión.

Como se observa en las figuras 90 y 91 las zonas simuladas con mayor afectación estructural y con mayor posibilidad falla estructural en el futuro, de acuerdo al análisis presentado, son las zonas inferiores de la columna más cercanas a la falla. En la base de columna del arco norte, como se muestra en la figura 92 se puede observar fisuras incipientes. Esto corrobora (verifica), al menos de manera cualitativa, los resultados de la simulación presentada en este capítulo en cuanto a los potenciales daños a futuro de acuerdo a las tendencias de desplazamiento del edificio.

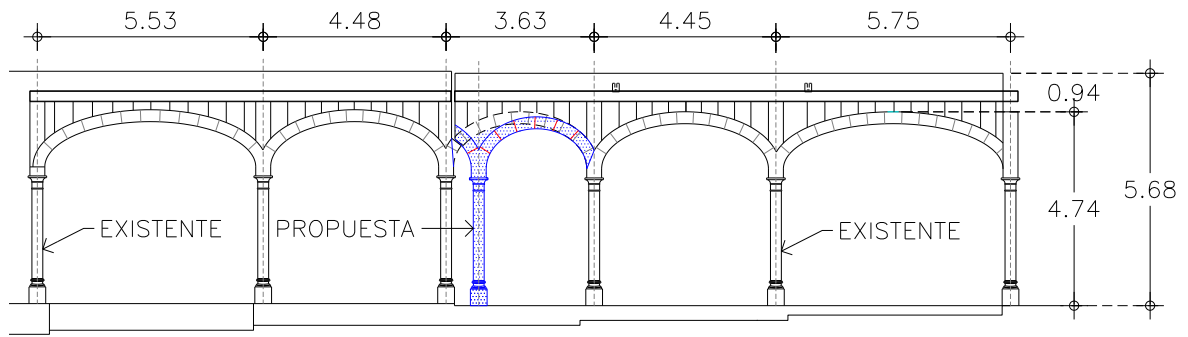


**Figura 92 Columna de arco norte con fisura. Foto tomada a finales de esta investigación (agosto 2013)**

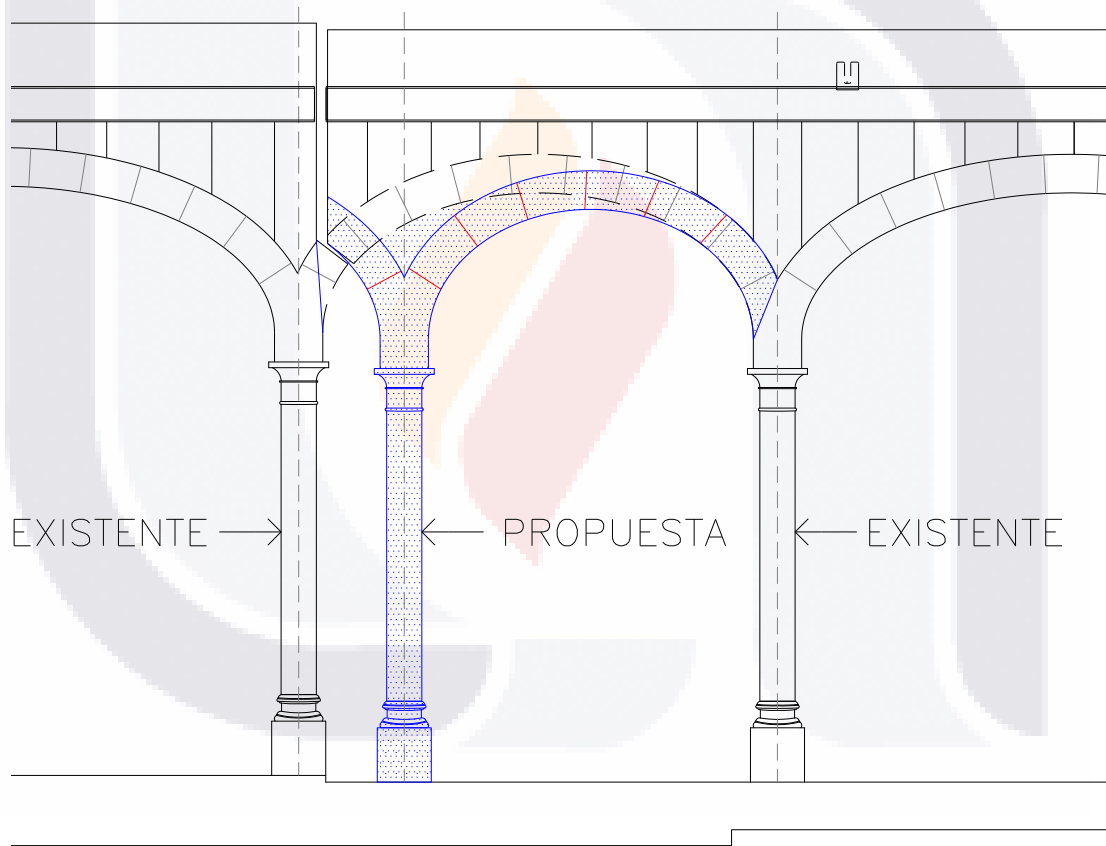
### **11.12 Propuesta de adecuación estructural.**

Considerando la importancia histórica y cultural de preservar el Museo de la Insurgencia, se recomienda que se desliguen totalmente los arcos para que las deformaciones inducidas a la estructura por la falla geológica no causen más afectaciones críticas, es decir, que la estructura trabaje en bloques independientes una de otra y así disminuir o casi eliminar los efectos inducidos por la falla geológica. Todo lo anterior se base al análisis estructural y a los modelos realizados, que incluye aquellos con solo las acciones gravitacionales (combinación de carga C1), en los cuales se muestra que las deformaciones son menores a las generadas por los desplazamientos inducidos por la falla geológica.

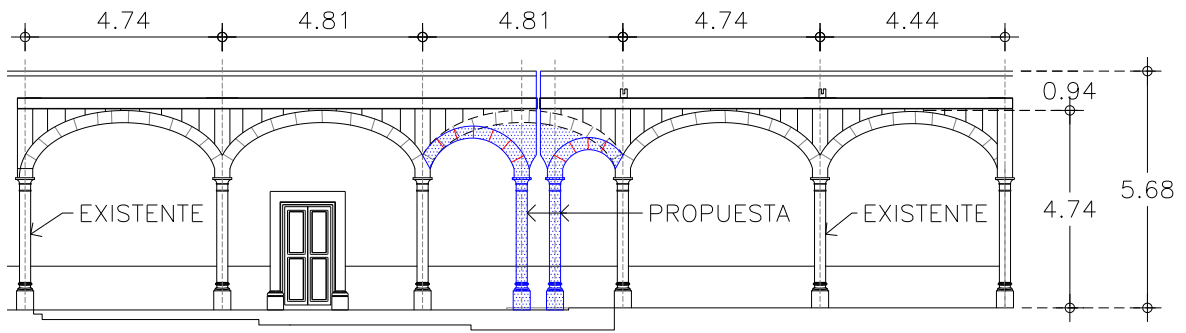
Además, una vez desligados los bloques afectados por la falla, una propuesta muy adecuada y sensata es colocar más columnas en los arcos, con el fin de hacer que éstos trabajen a compresión, como es su función principal. Esta solución está basada en los datos obtenidos de las tablas 7 a la 11, en donde se puede observar que las deformaciones tanto horizontal y sobre todo vertical (siendo el vertical el más desfavorable) seguirán aumentando paulatinamente. En el arco norte se debería poner una columna (como se muestra en la figura 93) y con esto se anularían casi por completo las deformaciones que afectan en la parte inferior de la columna debido a la falla geológica. Para el caso del arco sur se tendrían que colocar dos columnas una de cada lado de la junta fría, como se propone en la figura 95. Con la colocación de columnas se lograría hacer que todo el inmueble trabaje como dos bloques independientes uno de otro y eliminar casi por completo las deformaciones que está induciendo la falla geológica.



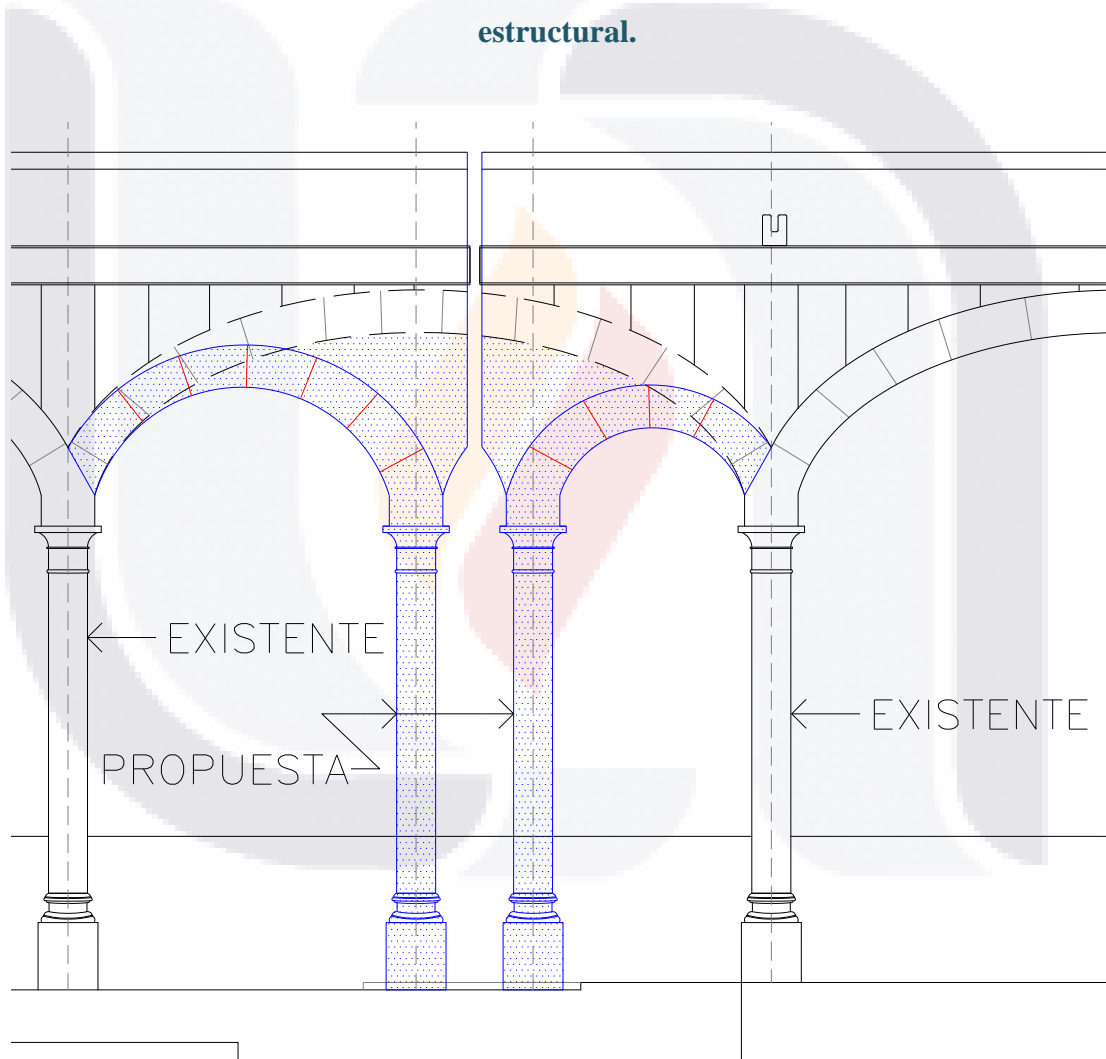
**Figura 93 Elevación longitudinal del arco norte con propuesta de adecuación estructural.**



**Figura 94 Zoom de la propuesta de adecuación estructural sobre elevación del arco norte.**



**Figura 95 Elevación longitudinal del arco sur con propuesta de adecuación estructural.**



**Figura 96 Zoom de la propuesta de adecuación estructural sobre elevación del arco sur.**



---

## 12 LIMITANTES DEL TRABAJO PRÁCTICO.

A continuación se enumeran y discuten algunas limitantes del trabajo de investigación:

a).- Las mediciones de desplazamiento en los testigos se realizaron periódicamente pero solo durante 202 días, (aproximadamente 7 meses). Sin embargo, hubiera sido más representativo realizar las mediciones en un año completo.

c).- Para las simulaciones numéricas se consideraron solo los arcos y columnas directamente afectados por la falla, por ser estos los únicos elementos estructurales que están interactuando con la actividad de la falla. Por consiguiente, el modelo se limitó en geometría y espacio a esos elementos estructurales.

d).- En las simulaciones numéricas se consideró aceptable simular a los materiales (mampostería) como elásticos lineales. En este punto la limitante resude en que no se permitió algún otro comportamiento no lineal de los materiales.

e).- Considerando las resistencias de los materiales empleados en la constitución del Museo y los esfuerzos que a que están siendo sometidos los elementos estructurales, se determinó solo enfocarse a los elementos de mampostería, por ser éstos lo que resisten menos los esfuerzos a tensión y cortante, y por esperarse que éstos son los que sufrirían una falla frágil súbita. Un modelo más extenso, podría incluir las resistencias compuestas del acero empleado en el Museo en conjunto con la mampostería.

f).- Los valores de los estados límites de falla para la mampostería se tomaron de las Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería (NTC D.F. 2004). En este punto se tienen dos limitantes con respecto a los

---

valores límite, una por el hecho de que esos valores podría no ser representativa para el estado de Aguascalientes, y que corresponden a una mampostería que solo se asemeja a la utilizada en el Museo de las Insurgencias.



---

### 13 CONCLUSIONES

Basándonos en los resultados obtenidos del trabajo práctico podemos concluir lo siguiente.

1. El análisis estructural preliminar mediante observaciones en el edificio, indica que tras una serie de restructuraciones para permitir que el edificio siga funcionando, en la zona más vulnerable a colapso por efecto de la falla geológica, esto es en los arcos y columnas norte y sur, se incrustó un IR de 10"x44.8 kg/ml, el cual en la actualidad está sosteniendo los arcos directamente afectados por la falla geológica.
2. De acuerdo con las monitorizaciones de deformación mediante testigos fijos, la falla esta activa y su afectación en los elementos estructurales se incrementa paulatinamente. Esta aseveración se basa en las lecturas, realizado a lo largo del estudio, utilizando los testigos ubicados estratégicamente para el monitoreo de la falla.
3. El análisis comparativo de esfuerzos indica que los esfuerzos de cortante y compresión simulados no sobrepasan a los esfuerzos del estado límite de falla. Dicho estado corresponde a la resistencia de los materiales empleados en la construcción y de los elementos estructurales y la cual, se tomaron de las Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería (NTC D.F. 2004).
4. Los valores máximos registrados de desplazamiento en los testigos están del orden de 10 mm correspondiendo al testigo número 3.
5. Los datos de desplazamiento obtenidos de los testigos fijos, indica que la parte sur del edificio presenta mayor deformación, sugiriendo entre otras cosas que la falla afecta al edificio de manera heterogénea, siendo la parte sur en la que se presenta más actividad.
6. Mediante una serie de simulaciones numéricas utilizando el programa de cómputo SAP 2000, se analizaron los esfuerzos actuales del edificio considerando en una serie las cargas

vivas y muertas y en otra el efecto de la falla geológica. De acuerdo a esos resultados y hasta el final de esta investigación en ningún caso, los esfuerzos simulados aun no sobrepasan los esfuerzos estimados del estado límites de falla.

7. El análisis numérico del comportamiento de los arcos y columnas modelado a futuro indica que en aproximadamente entre unos 5 y 10 años se tiene la posibilidad de falla estructural de las columnas en su parte inferior, todo esto depende de que las tendencias a futuro de los desplazamientos sigan comportándose similar a las determinadas durante este trabajo y no cambien las deformaciones o afectaciones que induce la falla geológica.

8. Se incluyó una propuesta de adecuación estructural tomando en cuenta los resultados de las simulaciones del comportamiento del edificio a futuro y los cálculos estructurales realizados. En esta propuesta se recomienda hacer que el inmueble trabaje como bloques independientes, es decir, que no estén unidos de ninguna forma, para ello se propone como mejor opción el colocar columnas para no tener los arcos en voladizo (cantiléver) y por lo tanto, no tener riesgos de colapso de los mismos por el efecto de los desplazamientos verticales en la parte superior.

---

## 14 BIBLIOGRAFÍA

Aranda Gómez, J. M., y Aranda Gómez, J. J. (1985). Análisis del agrietamiento en la ciudad de Aguascalientes. Aguascalientes.: Universidad Autónoma de Aguascalientes.

ASTM-C-805-79. "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete".

Castellanos, H. (2004). Efecto del agrietamiento en la respuesta sísmica de un templo colonial típico. UNAM México, DF: División de estudios de Posgrado Facultad de Ingeniería.

Celigüeta, L. J. (2008). Método de los Elementos Finitos. España: UNICOPIA C.B. M. Lardizábsl, 13 20018 San Sebastián-Gipuzkoa.

Durm, J. (1885). Die Baukunst der Etrusker und Römer. (Hand. der Arch. 2. Teil. 2. Band). Darmstadt: Diehl.

Evans, R. S. (1986). A Regional Groundwater model for Open Cut Coal Winning in the Latrobe Valley, Victoria. AWRC Conference, Groundwater Systems Under Stress, Brisbane.

Heyman, J. (1988.). Poleni's problem. . Proc. of the Institution of Civil Engineers, Part 1, Vol. 84, pp. 737-759.

Heyman, J. (1995). Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos, ed. by S. Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera/CEHOPU.

Huerta, S. (2001). Mecánica de las bóvedas de fábrica: el enfoque del equilibrio.

Juárez Badillo, E. (2005). Mecánica de suelos I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos. México: Limusa.

Marsal, R. J., y Mazari, M. (1959). El subsuelo de la Cd. de México. México D. F: UNAM, Fac. de Ingeniería, Vol I y II, 505 pp.

Meinzer, O. E. (1928). Compressibility and elasticity of artesian aquifers.: Econ. Geol. Vol. 23, Num 3. 263- 291 pp.

Meli, R. (1998). Ingeniería estructural de los edificios históricos. México, DF.: Fundación ICA.

Meli, R., y Sánchez, A. R. (1993). Rehabilitación de la Catedral de la Ciudad de México. México: Trabajo realizado por el Instituto de Ingeniería para la Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Nacional, SEDESOL.

NMX-C-083-0NNCCE. "Industria de la construcción-Concreto-Determinación de la resistencia a la compresión cilindros de concreto".

NMX-C-109-0NNCCE. Industria de la Construcción-Concreto-Cabeceo de especímenes cilíndricos.

NMX-C-163-0NNCCE. Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto.

NMX-C-251-1997-0NNCCE. "Industria de la construcción-Concreto-Terminología".

NMX-Z-013-SCFI-1977. "Guía para la redacción y presentación de las normas mexicanas".

NMX-Z-013-SCFI-1977. "Guía para la redacción y presentación de las normas mexicanas".

NOM-008-SCFI-1993. "Sistema General de Unidades de Medida".

NOM-008-SCFI-1993. "Sistema General de Unidades de Medida".

Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2004).:

- Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería.

Ortiz-Lozano, J.O., Alonso-Farrera, F.A, Pacheco-Martinez, J., Zermeño-De-León, M.E., Araiza-Garaygordobil, G., Mendoza-Otero, E. (2010). Assessment of the state of condition of damaged buildings and structures affected by land subsidence. In: Carreon-Freyre, D., Cerca, M., Galloway, D. (Eds.), IAHS Red Books. IAHS Press, U.K., pp. 449–451.

Pacheco-Martinez, J., Hernandez-Marín M., Burbey J., T., González-Cervantes N., Ortíz-Lozano, J.A., Zermeño-De-Leon. M.E., Solís-Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México.

Poland, J. F. (1984). Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal. UNESCO Studies and Reports in Hydrology no. 40. New York; Unipublications.

Poland, J. F., y R. L. Ireland. (1988). Land Subsidence in the Santa Clara valley. Mechanics of Aquifer Systems: U. S. Geol. Surv. Prof. Pap., 497-F, 61 pp.

Rodríguez-Castillo, R. y Rodríguez-Velázquez I. (2006). Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia, Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Robison, J. (1822). AOn the construction of arches. A System of Mechanical Philosophy, with notes of D. Brewster. : Edinburgh: John Murray, Vol. 1, pp. 616-60, lám. 10.

Terzaghi, K. (1925). Principals of Soil Mechanics IV: Settlement and consolidation of clay. Engineering News-Record v. 95 (Nov 26), p. 874-878.

Viollet-le-Duc, E. (1858). AConstruction@ Dictionnaireraisonnée de l'Arcbitectutre Francaise du XI au XVI siècle. Paris: A. Morel: Vol. 4, pp. 2-20H. (Spanish translation and edition by E. Rabasa y S. Huerta. La cotntrucción medieval. Madrid: Instituto Juan.

Winkler, E. (1879 y 1880.). Die Lage der Stützlinie im Gewolbe. Deutsche Bauzeitung, Vols. 13 y 14, pp. 117-119, 127-128, 130 (1879); 58-60 (1880).

Zienkiewics, O. C. (1981). El Método de los elementos finitos. Editorial Reverte, 1ª edición.