

UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
División de Estudios de Posgrado



**TESIS**

INFLUENCIA DE LAS REGLAS EMPÍRICAS DE  
DIMENSIONAMIENTO EN EL COMPORTAMIENTO  
SÍSMICO DE EDIFICIOS HISTÓRICOS DE CARÁCTER  
RELIGIOSO, EN LA CIUDAD DE MORELIA,  
MICHOACÁN.

PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS

PRESENTA:

LESLIE EDITH ALEJO GUERRA

ASESOR:

DOCTOR EN INGENIERÍA  
GUILLERMO MARTÍNEZ RUIZ

Morelia, Michoacán, Agosto de 2014





## **AGRADECIMIENTOS**

---

A mi asesor, el Dr. Guillermo Martínez Ruiz, , por la paciencia y apoyo incondicional, la amistad brindada y conocimiento compartido.

A mis padres, Leticia Guerra y Rafael Alejo, por su apoyo a lo largo de toda mi vida, por la vida y educación, sin ellos no estaría aquí.

A mis hermanos, David, Diana, Jonathan, Karina y Joseline, por las experiencias de vida compartidas, por ser soporte y paño de lágrimas en momentos difíciles, compañeros de alegrías y amigos eternos.

A mi novio, Diego Pantoja, por acompañarme durante este tiempo y darme su apoyo y cariño incondicional en cada instante de este trayecto.

A mis amigos, Laura, Pablo, Saraí, Marisela, sin ustedes no habría podido culminar este trabajo, por su amistad y compañía en desvelos durante estos años, su apoyo en momentos de flaqueza y sobre todo por su amistad.

A mis compañeros de la maestría, fue un placer convivir con cada uno de ustedes, conocerlos un poco y compartir una pequeña parte de nuestras vidas.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por albergarme como estudiante durante todos estos años, y darme la oportunidad de sobresalir en la vida.

Al programa de CONACYT, por el apoyo económico que ha significado mucho durante este tiempo.

# CONTENIDO

---

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XI</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>XV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XVI</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>ANÁLISIS FORMAL .....</b>	<b>1</b>
<b>REGLAS EMPÍRICAS DE DIMENSIONAMIENTO EN EDIFICIOS HISTÓRICOS.....</b>	<b>4</b>
<b>ANTECEDENTES: LA ANTIGÜEDAD Y BIZANCIO.....</b>	<b>4</b>
<b>LA GEOMETRÍA EN EL GÓTICO .....</b>	<b>5</b>
Villard de Honnecourt.....	5
Reglas geométricas góticas en fuentes renacentistas y barrocas.....	6
Reglas estructurales del Gótico tardío alemán.....	10
<b>SELECCIÓN DE REGLAS Y PROPORCIONES A ESTUDIAR .....</b>	<b>12</b>
<b>IDENTIFICACIÓN DE EDIFICIOS.....</b>	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MODELOS NUMÉRICOS .....</b>	<b>26</b>
<b>MÉTODO DE ELEMENTOS RÍGIDOS (MER) .....</b>	<b>27</b>

FILOSOFÍA .....	27
PROGRAMA DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL RIGID V0.4.1 .....	29
MODELO CONSTITUTIVO .....	30
DEFINICIÓN DE PARÁMETROS .....	32
CONSTRUCCIÓN DE MODELOS.....	33
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>DESEMPEÑO SÍSMICO.....</b>	<b>43</b>
CURVAS DE CAPACIDAD.....	44
ESPECTROS DE CAPACIDAD.....	47
MACROELEMENTOS TRANSVERSALES.....	49
MACROELEMENTOS LONGITUDINALES .....	53
DEMANDA SÍSMICA.....	54
DESEMPEÑO SÍSMICO .....	55
PUNTOS DE DESEMPEÑO PARA MACROELEMENTOS TRANSVERSALES.....	58
PUNTOS DE DESEMPEÑO PARA MACROELEMENTOS LONGITUDINALES .....	62
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>VULNERABILIDAD SÍSMICA .....</b>	<b>66</b>
CURVAS DE FRAGILIDAD Y MATRICES DE PROBABILIDAD PARA MACROELEMENTOS TRANSVERSALES.....	71
CURVAS DE FRAGILIDAD Y MATRICES DE PROBABILIDAD PARA MACROELEMENTOS LONGITUDINALES.....	93

**CAPÍTULO V**

**CONCLUSIONES..... 100**

**REFERENCIAS..... 103**

**ANEXO A**

**PLANIMETRÍA ..... 105**

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

## CAPITULO I. ANÁLISIS FORMAL

<b>Figura 1.</b> Primera regla geométrica del gótico.....	7
<b>Figura 2.</b> Regla gótica para el cálculo de estribos. ....	8
<b>Figura 3.</b> Primera regla del gótico, según los trazos indicados por Martínez de Aranda .....	9
<b>Figura 4.</b> Aplicación de la regla geométrica n°1 a la catedral de Gerona y la Sainte-Chapelle de París. ....	9
<b>Figura 5.</b> Segunda regla geométrica del gótico.....	10
<b>Figura 6.</b> Macro localización del centro histórico en la ciudad de Morelia Michoacán.....	14
<b>Figura 7.</b> Ubicación de los templos en estudio, en el Centro Histórico de la ciudad. ....	14
<b>Figura 8.</b> Macroelementos transversales reales estudiados. Templos de una sola nave.....	15
<b>Figura 9.</b> Macroelemento transversal real estudiado. Templo con tres naves. ....	16
<b>Figura 10.</b> Macroelementos longitudinales reales estudiados. Templos de una sola nave.....	16
<b>Figura 11.</b> Continuación macroelementos longitudinales reales estudiados. Templos de una sola nave. ....	17
<b>Figura 12.</b> Macroelemento longitudinal real estudiado. Templo con tres naves.....	17
<b>Figura 13.</b> Análisis formal para el templo de San Agustín .....	17
<b>Figura 14.</b> Análisis formal para el templo Franciscano de San Buenaventura.....	18
<b>Figura 15.</b> Análisis formal para el templo del Carmen.....	18
<b>Figura 16.</b> Análisis formal para el templo de San Francisco Javier.....	19
<b>Figura 17.</b> Análisis formal para el templo de la Cruz .....	19
<b>Figura 18.</b> Análisis formal para el templo de San Juan Bautista .....	20
<b>Figura 19.</b> Análisis formal para el templo de Guadalupe.....	20
<b>Figura 20.</b> Análisis formal para el templo de las Monjas.....	21

<b>Figura 21.</b> Análisis formal para el templo de Capuchinas.....	21
<b>Figura 22.</b> Análisis formal para el templo de la Merced.....	21
<b>Figura 23.</b> Análisis formal para el templo de Santa Rosa de Lima .....	22
<b>Figura 24.</b> Análisis formal para el templo de San José .....	22
<b>Figura 25.</b> Análisis formal para la iglesia Catedral de la Transfiguración.....	23
<b>Figura 26.</b> Análisis formal para la iglesia Catedral de la Transfiguración para la sección longitudinal .....	25
<b>Figura 27.</b> Fuerzas y Desplazamientos .....	28
<b>Figura 28.</b> Conexión de dos elementos rígidos continuos.....	28
<b>Figura 29.</b> Ley Mohr-Coulomb .....	29
<b>Figura 30.</b> Ley Trilineal.....	30
<b>Figura 31.</b> Ley Exponencial.....	31
<b>Figura 32.</b> Ley Parabólica.....	31
<b>Figura 33.</b> Mallado propuesto para el templo de San Agustín.....	33
<b>Figura 34.</b> Mallado propuesto para el templo franciscano de San Buenaventura.....	34
<b>Figura 35.</b> Mallado propuesto para el templo del Carmen .....	34
<b>Figura 36.</b> Mallado propuesto para el templo de San Francisco Javier .....	34
<b>Figura 37.</b> Mallado propuesto para el templo de la Cruz .....	35
<b>Figura 38.</b> Mallado propuesto para el templo de San Juan Bautista .....	35
<b>Figura 39.</b> Mallado propuesto para el templo de Guadalupe .....	35
<b>Figura 40.</b> Mallado propuesto para el templo de las Monjas .....	36
<b>Figura 41.</b> Mallado propuesto para el templo de Capuchinas.....	36
<b>Figura 42.</b> Mallado propuesto para el templo de la Merced .....	36
<b>Figura 43.</b> Mallado propuesto para el templo de Santa Rosa de Lima .....	37
<b>Figura 44.</b> Mallado propuesto para el templo de San José .....	37

<b>Figura 45.</b> Mallado propuesto para la Iglesia Catedral de la Transfiguración. Secciones transversales.....	38
<b>Figura 46.</b> Mallado propuesto para la Iglesia Catedral de la Transfiguración. Secciones longitudinales .....	39
<b>Figura 47.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo de San Agustín.....	40
<b>Figura 48.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo franciscano de San Buenaventura.....	40
<b>Figura 49.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo del Carmen.....	40
<b>Figura 50.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo de San Francisco Javier .....	40
<b>Figura 51.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo de la Cruz.....	41
<b>Figura 52.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo de San Juan Bautista.	41
<b>Figura 53.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo de Guadalupe.....	41
<b>Figura 54.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo de las Monjas.....	41
<b>Figura 55.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo de Capuchinas .....	42
<b>Figura 56.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo de la Merced .....	42
<b>Figura 57.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo de Santa Rosa de Lima .....	42
<b>Figura 58.</b> Mallado propuesto para la sección longitudinal del templo de San José .....	42
<b>Figura 59.</b> Puntos elegidos para conocer el desplazamiento máximo de la estructura.....	45
<b>Figura 60.</b> Curva de capacidad para el macroelemento transversal del templo de San Francisco Javier.....	45
<b>Figura 61.</b> Acelerograma aplicado a los macroelementos en estudio.....	46
<b>Figura 62.</b> Espectro de capacidad para el macroelemento transversal del templo de San Francisco Javier.....	48
<b>Figura 63.</b> Bilinealización del espectro de capacidad para el macroelemento transversal del templo de San Francisco Javier .....	49

<b>Figura 64.</b> Espectros de demanda considerados en formato $T(\text{seg}) - S_a(g)$ .....	54
<b>Figura 65.</b> Espectros de demanda considerados en formato $S_d(\text{cm}) - S_a(g)$ .....	55
<b>Figura 66.</b> Ejemplo de la obtención del punto de desempeño en el rango elástico del espectro de capacidad.....	56
<b>Figura 67.</b> Ejemplo de la obtención del punto de desempeño en el rango inelástico del espectro de capacidad. ....	57
<b>Figura 68.</b> Valores y descripción gráfica de los umbrales de daño (Lagomarsino, et al 2003) .....	68
<b>Figura 69.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San Agustín, proporciones reales.....	71
<b>Figura 70.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San Agustín, 1ª regla del gótico. ....	71
<b>Figura 71.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San Agustín, 2ª regla del gótico. ....	71
<b>Figura 72.</b> Curvas de fragilidad para el Templo franciscano de San Buenaventura, proporciones reales. ....	72
<b>Figura 73.</b> Curvas de fragilidad para el Templo franciscano de San Buenaventura, 1ª regla del gótico. ....	73
<b>Figura 74.</b> Curvas de fragilidad para el Templo franciscano de San Buenaventura, 2ª regla del gótico. ....	73
<b>Figura 75.</b> Curvas de fragilidad para el Templo del Carmen, proporciones reales.....	74
<b>Figura 76.</b> Curvas de fragilidad para el Templo del Carmen, 1ª regla del gótico.....	74
<b>Figura 77.</b> Curvas de fragilidad para el Templo del Carmen, 2ª regla del gótico.....	75
<b>Figura 78.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San Francisco Javier, proporciones reales. ....	76
<b>Figura 79.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San Francisco Javier, 1ª regla del gótico. ....	76
<b>Figura 80.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San Francisco Javier, 2ª regla del gótico. ....	76
<b>Figura 81.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de la Cruz, proporciones reales.....	77

<b>Figura 82.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de la Cruz, 1ª regla del gótico.....	78
<b>Figura 83.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de la Cruz, 2ª regla del gótico.....	78
<b>Figura 84.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San Juan Bautista, proporciones reales..	79
<b>Figura 85.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San Juan Bautista, 1ª y 2ª regla del gótico.....	79
<b>Figura 86.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Guadalupe, proporciones reales.....	80
<b>Figura 87.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Gudalupe, 1ª regla del gótico.....	80
<b>Figura 88.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Guadalupe, 2ª regla del gótico.....	81
<b>Figura 89.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de las Monjas, poporciones reales.....	82
<b>Figura 90.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de las Monjas, 1ª regla del gótico.....	82
<b>Figura 91.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de las Monjas, 2ª regla del gótico.....	82
<b>Figura 92.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Capuchinas, proporciones reales.....	83
<b>Figura 93.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Capuchinas, 1ª regla del gótico.....	84
<b>Figura 94.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Capuchinas, 2ª regla del gótico.....	84
<b>Figura 95.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de la Merced, proporciones reales.....	85
<b>Figura 96.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de la Merced, 1ª regla del gótico.....	85
<b>Figura 97.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de la Merced, 2ª regla del gótico.....	86
<b>Figura 98.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Santa Rosa de Lima, proporciones reales.....	87
<b>Figura 99.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Santa Rosa de Lima, 1ª regla del gótico.....	87
<b>Figura 100.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Santa Rosa de Lima, 2ª regla del gótico.....	87
<b>Figura 101.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San José, proporciones reales.....	88
<b>Figura 102.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San José, 1ª regla del gótico.....	89
<b>Figura 103.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San José, 2ª regla del gótico.....	89

<b>Figura 104.</b> Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, proporciones reales. ....	90
<b>Figura 105.</b> Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, 1ª regla del gótico. ....	91
<b>Figura 106.</b> Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, 2ª regla del gótico. ....	91
<b>Figura 107.</b> Curvas de fragilidad para el templo de San Agustín. ....	93
<b>Figura 108.</b> Curvas de fragilidad para el templo franciscano de San Buenaventura. ....	93
<b>Figura 109.</b> Curvas de fragilidad para el templo del Carmen. ....	93
<b>Figura 110.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San Francisco Javier. ....	94
<b>Figura 111.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de la Cruz. ....	94
<b>Figura 112.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San Juan Bautista. ....	94
<b>Figura 113.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Guadalupe. ....	95
<b>Figura 114.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de las Monjas. ....	95
<b>Figura 115.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Capuchinas. ....	95
<b>Figura 116.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de la Merced. ....	96
<b>Figura 117.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de Santa Rosa de Lima. ....	96
<b>Figura 118.</b> Curvas de fragilidad para el Templo de San José. ....	96
<b>Figura 119.</b> Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, proporciones reales. ....	97
<b>Figura 120.</b> Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, 1ª regla del gótico. ....	98
<b>Figura 121.</b> Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, 2ª regla del gótico. ....	98

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Reglas estructurales del Gótico tardío alemán.....	11
<b>Tabla 2.</b> Resistencias a tensión y compresión del material.....	32
<b>Tabla 3.</b> Propiedades mecánicas del material .....	32
<b>Tabla 4.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo de San Agustín.....	49
<b>Tabla 5.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo franciscano de San Buenaventura...	49
<b>Tabla 6.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo del Carmen.....	50
<b>Tabla 7.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo de San Francisco Javier .....	50
<b>Tabla 8.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo de la Cruz.....	50
<b>Tabla 9.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo de San Juan Bautista.....	50
<b>Tabla 10.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo de Guadalupe .....	51
<b>Tabla 11.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo de las Monjas .....	51
<b>Tabla 12.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo de Capuchinas.....	51
<b>Tabla 13.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo de la Merced.....	51
<b>Tabla 14.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo de Santa Rosa de Lima .....	51
<b>Tabla 15.</b> Espectros de capacidad bilineal para el templo de San José .....	52
<b>Tabla 16.</b> Espectros de capacidad bilineal para la Iglesia Catedral de la Transfiguración.....	52
<b>Tabla 17.</b> Espectros de capacidad bilineales para templos de una sola nave. Macroelementos longitudinales. ....	53
<b>Tabla 18.</b> Espectros de capacidad bilineal para la Iglesia Catedral de la Transfiguración.....	53
<b>Tabla 19.</b> Puntos de desempeño para el templo de San Agustín.....	58
<b>Tabla 20.</b> Puntos de desempeño para el templo franciscano de San Buenaventura.....	58
<b>Tabla 21.</b> Puntos de desempeño para el templo del Carmen.....	58
<b>Tabla 22.</b> Puntos de desempeño para el templo de San Francisco Javier .....	58

<b>Tabla 23.</b> Puntos de desempeño para el templo de la Cruz.....	58
<b>Tabla 24.</b> Puntos de desempeño para el templo de San Juan Bautista .....	59
<b>Tabla 25.</b> Puntos de desempeño para el templo de Guadalupe .....	59
<b>Tabla 26.</b> Puntos de desempeño para el templo de las Monjas.....	59
<b>Tabla 27.</b> Puntos de desempeño para el templo de Capuchinas .....	59
<b>Tabla 28.</b> Puntos de desempeño para el templo de la Merced .....	60
<b>Tabla 29.</b> Puntos de desempeño para el templo de Santa Rosa de Lima .....	60
<b>Tabla 30.</b> Puntos de desempeño para el templo de San José .....	60
<b>Tabla 31.</b> Puntos de desempeño para la Iglesia Catedral de la Transfiguración .....	60
<b>Tabla 32.</b> Puntos de desempeño para el templo de San Agustín.....	62
<b>Tabla 33.</b> Puntos de desempeño para el templo franciscano de San Buenaventura.....	62
<b>Tabla 34.</b> Puntos de desempeño para el templo del Carmen.....	62
<b>Tabla 35.</b> Puntos de desempeño para el templo de San Francisco Javier .....	63
<b>Tabla 36.</b> Puntos de desempeño para el templo de la Cruz.....	63
<b>Tabla 37.</b> Puntos de desempeño para el templo de San Juan Bautista .....	63
<b>Tabla 38.</b> Puntos de desempeño para el templo de Guadalupe .....	63
<b>Tabla 39.</b> Puntos de desempeño para el templo de las Monjas.....	63
<b>Tabla 40.</b> Puntos de desempeño para el templo de Capuchinas .....	63
<b>Tabla 41.</b> Puntos de desempeño para el templo de la Merced .....	63
<b>Tabla 42.</b> Puntos de desempeño para el templo de Santa Rosa de Lima .....	64
<b>Tabla 43.</b> Puntos de desempeño para el templo de San José .....	64
<b>Tabla 44.</b> Puntos de desempeño para la iglesia Catedral de la Transfiguración .....	64
<b>Tabla 45.</b> Valores y descripción para los umbrales de daño sugeridos (Lagomarsino, et al 2003).....	68

<b>Tabla 46.</b> Valores numéricos para los umbrales de daño de los macroelementos transversales. .....	69
<b>Tabla 47.</b> Valores numéricos para los umbrales de daño de los macroelementos longitudinales de templos de una sola nave.....	69
<b>Tabla 48.</b> Continuación, valores numéricos para los umbrales de daño de los macroelementos longitudinales de templos de una sola nave.....	70
<b>Tabla 49.</b> Valores numéricos para los umbrales de daño del macroelemento longitudinal del templo de tres naves.....	70
<b>Tabla 50.</b> Distribución de probabilidades de los estados de daño esperado.....	70
<b>Tabla 51.</b> Matrices de propabilidad de daño para el Templo de San Agustín en función de los puntos de desempeño obtenidos.....	71
<b>Tabla 52.</b> Matrices de propabilidad de daño para el Templo franciscano de San Buenaventura en función de los puntos de desempeño obtenidos.....	73
<b>Tabla 53.</b> Matrices de propabilidad de daño para el Templo del Carmen en función de los puntos de desempeño obtenidos.....	75
<b>Tabla 54.</b> Matrices de propabilidad de daño para el Templo de San Fracisco Javier en función de los puntos de desempeño obtenidos.....	76
<b>Tabla 55.</b> Matrices de propabilidad de daño para el Templo de la Cruz en función de los puntos de desempeño obtenidos.....	78
<b>Tabla 56.</b> Matrices de propabilidad de daño para el Templo de San Juan Bautista en función de los puntos de desempeño obtenidos.....	79
<b>Tabla 57.</b> Matrices de propabilidad de daño para el Templo de Guadalupe en función de los puntos de desempeño obtenidos.....	81
<b>Tabla 58.</b> Matrices de propabilidad de daño para el Templo de las Monjas en función de los puntos de desempeño obtenidos.....	82
<b>Tabla 59.</b> Matrices de propabilidad de daño para el Templo de Capuchinas en función de los puntos de desempeño obtenidos.....	84

**Tabla 60.** Matrices de propabilidad de daño para el Templo de la Merced en función de los puntos de desempeño obtenidos.....86

**Tabla 61.** Matrices de propabilidad de daño para el Templo de Santa Rosa de Lima en función de los puntos de desempeño obtenidos.....87

**Tabla 62.** Matrices de propabilidad de daño para el Templo de San José en función de los puntos de desempeño obtenidos.....89

**Tabla 63.** Matrices de propabilidad de daño para la Iglesia Catedral de la Transfiguración en función de los puntos de desempeño obtenidos..... 91

**Tabla 64.** Matrices de propabilidad de daño para la Iglesia Catedral de la Transfiguración en función de los puntos de desempeño obtenidos..... 98

## RESUMEN

---

En este trabajo se analizó el comportamiento sísmico de un grupo de estructuras del patrimonio histórico de la ciudad de Morelia, Michoacán. Se llevó a cabo un estudio formal para saber si estas estructuras fueron dimensionadas empleando alguna regla empírica y si estas reglas son relevantes de alguna forma en el comportamiento sísmico de cada estructura. Las reglas empíricas de dimensionamiento empleadas, fueron las propuestas por Derand (1648), Blondel (1683), Rodrigo Gil de Hontañón (16th century), Ginés Martínez de Aranda (16th century) y Hernán Ruiz (1560). Con la finalidad de conseguir el objetivo final, se establecieron trece estructuras emblemáticas del patrimonio histórico, construidas entre los siglos XVI y XVIII. Se generaron dos modelos bidimensionales de elementos rígidos (Casolo, 2007), para cada uno de los macroelementos (Doglioni, 1994) transversal y longitudinal que representan el edificio completo. Los modelos originales fueron modificados usando las reglas empíricas de dimensionamiento con el objetivo de comparar el comportamiento sísmico. La aceleración máxima del suelo y los espectros de peligro uniforme para periodos de retorno de 475 años y 975 años se obtuvieron calculando el peligro sísmico probabilista en el sitio. El comportamiento no lineal del material se tomó en cuenta en todos los casos. Se realizaron análisis pushover para obtener las curvas de capacidad y los respectivos espectros para cada estructura. Se construyeron espectros de capacidad bilineales para definir los umbrales de daño con la finalidad de establecer puntos de desempeño, superponiendo capacidad contra la demanda para las recurrencias sísmicas mencionadas anteriormente (Freeman, 1998). Los estados de daño para cada macroelemento se obtuvieron mediante la construcción de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño para cada uno de los periodos de retorno. Al hacer la comparación entre los modelos originales y los modificados, se observó que las reglas empíricas no proporcionan un efecto favorable al comportamiento sísmico, salvo aquellos casos donde gracias a la modificación se proponen apoyos de mayor espesor. En la mayoría de los casos se espera daño ligero, moderado y extensivo. Los resultados muestran la necesidad de estudiar macroelementos adicionales como fachadas, muros longitudinales y torres con el objetivo de completar información que pueda ayudarnos a tener un mejor entendimiento de este tipo de edificios en México y Latinoamérica.

**Palabras clave:** reglas empíricas, espectro de capacidad, curvas de fragilidad.

## ABSTRACT

---

We analyze the seismic behavior of the naves for a group of religious heritage structures located in the historic center of Morelia city, Mexico. A formal study has been performed in order to know if these structures were dimensioned using empirical rules and if these empirical rules are relevant in some way in the expected seismic performance of each structure. The empirical rules of dimensioning used were the proposed by Derand (1648), Blondel (1683), Rodrigo Gil de Hontañón (16th century), Ginés Martínez de Aranda (16th century) y Hernán Ruiz (1560). In order to achieve the main objective, we established thirteen emblematic religious heritage structures built between 16th and 18th centuries. A set of two-dimensional models of rigid elements (Casolo, 2007), was generated for each one of the longitudinal and transversal macroelements (Doglioni, 1994) that form the entire building. The real original models were modified using the empirical rules of dimensioning in order to compare the seismic behavior. The peak ground accelerations and the uniform seismic hazard spectrums for return periods of 475 y 975 years were obtained calculating the probabilistic seismic hazard in the site. The nonlinear behavior of the material was taken into account in all cases. Several pushover analyses were performed in order to obtain the capacity curves and capacity spectra for each structure. The bilinear capacity spectrums were built to define damage thresholds which finally allowed establishing performance points superposing the capacity spectrum and the demand spectrum for the above mentioned seismic recurrences (Freeman,1998). The damage states were obtained for each macroelement through the construction of fragility curves and damage probability matrices for each one of the return periods. By making the comparison between the models with the empirical rules of dimensioning vs the models with the original construction characteristics it was observed a non-favorable effect when the empirical rules are considered. In most of the buildings a moderate and extensive damage degree will be expected case which is more evident in the larger structures and with more number of longitudinal naves like Cathedral. The results show us the need to study additional macroelements like facades, longitudinal walls, transversal walls and bell towers in order to have complete information that will help us to have a better understanding about these types of buildings in Mexico and Latin America.

**Keywords:** empirical rules, capacity spectrum, fragility curves.

# OBJETIVOS

---

## GENERAL

Determinar la influencia, en el comportamiento sísmico, de las reglas empíricas de dimensionamiento empleadas en edificaciones históricas religiosas de mampostería.

## PARTICULARES

- Conocer las reglas empíricas de dimensionamiento empleadas en construcciones históricas.
- Identificar, dentro del patrimonio histórico religioso moreliano, las edificaciones que presenten las reglas empíricas de dimensionamiento.
- Conocer la capacidad de los edificios en estudio.
- Obtener puntos de desempeño sísmico para el conjunto de estructuras en estudio, para las demandas sísmicas asociadas a 475 años y 975 años.
- Identificar las reglas empíricas que exhiban el mejor comportamiento sísmico.

# INTRODUCCIÓN

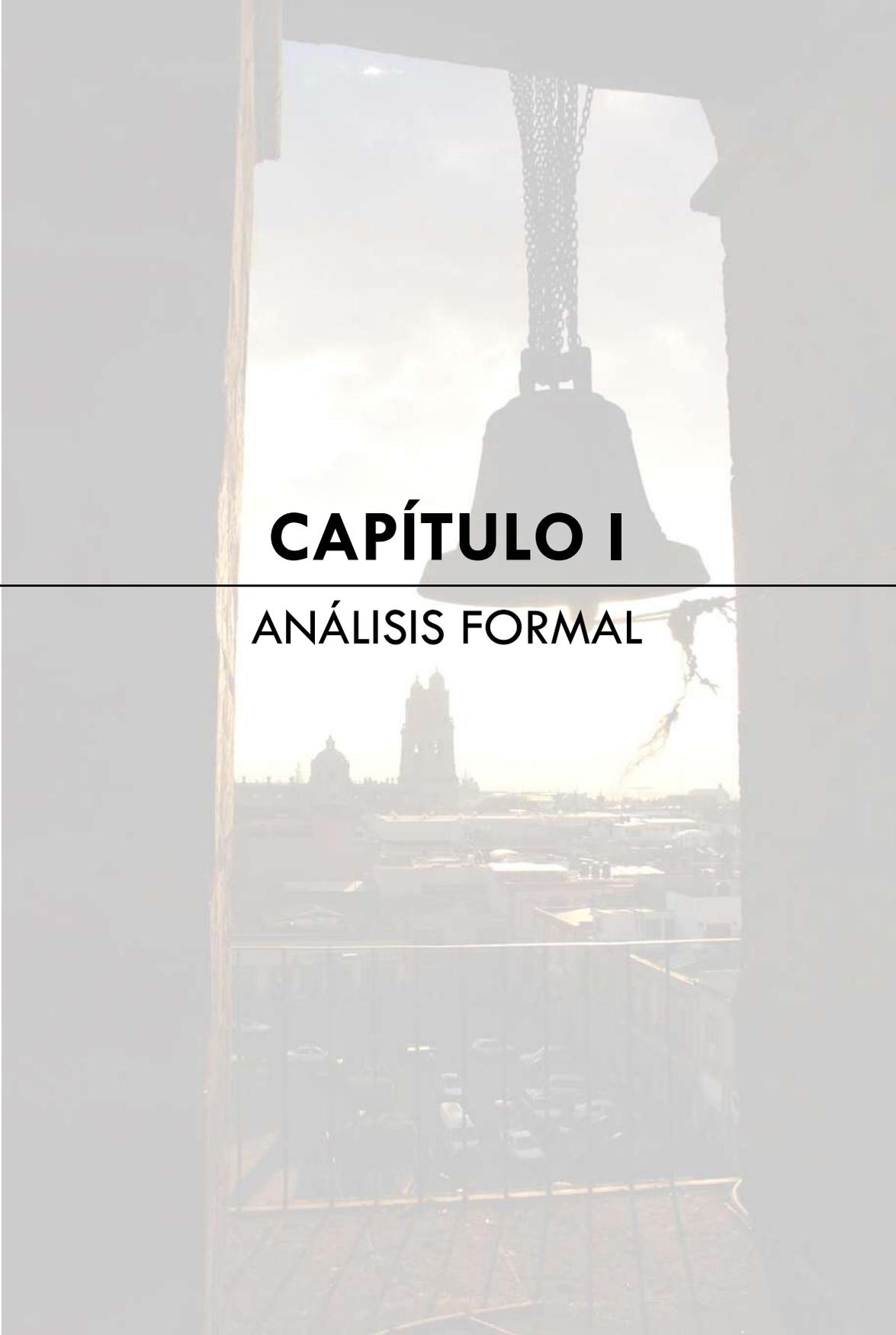
---

La arquitectura de los pueblos suele estudiarse en atención a su desarrollo posterior. Se dice que si una colonia llega a ser una gran nación, sus orígenes causan gran curiosidad, por lo que es centro de atención de los estudiosos. Sin embargo, en México, la arquitectura del s. XVI no requiere tal justificación ya que la maestría alcanzada por los constructores indígenas es suficiente y la originalidad de muchas formas estructurales y ornamentales mexicanas en ese primer periodo, son lo suficientemente poderosas para justificar su estudio sin necesidad de hacer referencia a hechos posteriores de la historia nacional (Kubler, 2012).

El patrimonio mexicano consta de cerca de 85000 edificios, de los cuales alrededor de 6000 se encuentran en el estado de Michoacán y poco más de 1100 tan solo en el centro histórico de la ciudad de Morelia; pese a lo anterior, dentro del contexto multidisciplinario que implica el correcto estudio y conservación de estos inmuebles, la parte correspondiente a la ingeniería sísmica y estructural de los mismos se encuentra en la actualidad abandonada, por lo que al momento de llevar a cabo la etapa de diagnóstico para establecer algún tipo de intervención, ésta resulta en la mayoría de los casos desafortunada, poco respetuosa y con prácticamente nulo carácter científico.

La ciudad de Morelia se encuentra ubicada aproximadamente a 340 kilómetros de la zona de subducción mexicana, además de que por su ubicación geográfica sufre sismos de tipo local y normal; particularmente éstos últimos, aunque suelen tener distancias hipocentrales intermedias históricamente han evidenciado un carácter altamente destructivo, prueba de ello es entre otros el terremoto del 19 de junio de 1858 que colapsó construcciones dentro del Estado y fuera del mismo, además de producir daños en estructuras de tipo religioso tales como la catedral de Morelia (García, 1996), condición que no se ha vuelto a presentar en sismos recientes.

Lo anterior y el gran número de estructuras existentes en esta ciudad distinguida por UNESCO desde 1991 como patrimonio de la humanidad motiva el presente estudio, el cual forma parte de una serie de trabajos encaminados a conocer de mejor forma el comportamiento esperado de estos edificios ante futuras acciones de tipo sísmico, con la finalidad de coadyuvar en un mejor conocimiento de nuestro patrimonio mexicano.



# **CAPÍTULO I**

---

## **ANÁLISIS FORMAL**

Hoy en día, mientras caminamos por el centro histórico de la ciudad de Morelia, podemos observar la magnificencia de las edificaciones antiguas, construcciones que datan de los siglos XVI al XIX y que, en la actualidad, se encuentran de pie sorprendiendo a aquellos que son capaces de contemplar la magnitud de su naturaleza.

No es de admirarse que despierten el interés de conocer la causa de su duración, y observarlos de una manera más detenida, escudriñarlos al punto de conocer cuál es su comportamiento ante las acciones de la naturaleza y también la influencia de las actividades humanas a su alrededor, sus partes frágiles así como sus fortalezas.

Aunque los usos originales de estos edificios han venido cambiando con el paso del tiempo, actualmente la mayoría han evolucionado de ser casonas coloniales a lugares de uso público, ya sea como escuelas, espacios de gobierno, bibliotecas, centros comerciales, espacios de recreación y culturales, museos, hoteles y algunos, conservando su uso original como son la mayoría de los templos, capillas y desde luego, la catedral de la ciudad.

El hecho de haberse convertido en espacios tan concurridos, es un factor más que adiciona interés al estudio de estos edificios, que además también son la razón principal de que la ciudad de Morelia, haya sido declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, en 1991<sup>1</sup>.

Según CONACULTA<sup>2</sup>, el centro Histórico de la ciudad, es, en el país, el lugar con más edificios catalogados como monumentos arquitectónicos (posee 1,113 y de ellos 260 fueron señalados como relevantes), los cuales se asientan sobre una suave loma de cantera que abarca 390 hectáreas distribuidas en 219 manzanas con 15 plazas.

Se dice que la arquitectura de los pueblos suele estudiarse en atención a su desarrollo posterior. Si una colonia llega a ser una gran nación, sus orígenes causan gran curiosidad, por lo que se convierte en centro de atención de los estudiosos. Sin embargo, en México,

---

<sup>1</sup> UNESCO. *Historic Centre of Morelia*, <http://whc.unesco.org/en/list/585>

<sup>2</sup> CONACULTA. *Morelia, Ciudad Mexicana Patrimonio de la Humanidad*, [http://www.conaculta.gob.mx/turismocultural/destino\\_mes/morelia/](http://www.conaculta.gob.mx/turismocultural/destino_mes/morelia/)

### **Posgrado de Ingeniería Civil**

incluyendo en la ciudad de Morelia, la arquitectura a partir del siglo XVI no requiere tal justificación ya que la maestría alcanzada por los constructores indígenas es suficiente, así como la originalidad de muchas formas estructurales y ornamentales mexicanas en ese primer periodo, son lo suficientemente poderosas para justificar su estudio sin necesidad de hacer referencia incluso a hechos posteriores de la historia nacional (Kluber,2012). De manera particular la ciudad se cataloga como un ejemplo excepcional de planeación urbana en la cual se combinó el conocimiento de los Españoles del Renacimiento con la experiencia de los indígenas mesoamericanos<sup>3</sup>.

Así pues, el hecho de que estas edificaciones sean catalogadas como Patrimonio Cultural, y que además muchas se encuentren actualmente clasificadas como estructuras tipo A, hace que se vuelvan un foco de interés para el estudio ingenieril, de manera que surgen preguntas asociadas al comportamiento estructural, su desempeño sísmico, las posibilidades de su duración futura, entre otras; y aunque todo esto se puede determinar de formas probabilistas, nos brinda un gran rango de posibles campos de estudio para la prevención, no sin antes darnos un amplio conocimiento acerca de un tema que pocas veces ha sido abordado en México.

Sin embargo, el simbolismo que albergan estos edificios es tan grande, que nos atrevemos a decir que nunca será completamente comprendido por la falta de información tanto de su diseño como de su proceso constructivo. Dentro de las preguntas que han surgido se encuentra la duda de si su diseño se llevó a cabo empleando alguna regla empírica de dimensionamiento y la relación que podría existir entre este dimensionamiento y el comportamiento estructural del edificio.

Por lo anterior se ha propuesto realizar un análisis formal de trece edificaciones de tipo religioso con el propósito de darnos cuenta si existe alguna característica que nos permita saber si el dimensionamiento de estos edificios corresponde a alguna regla empírica conocida de la época y poder hacer una comparación entre el comportamiento estructural de los edificios que presentan alguna de estas características contra los que no presentan dimensionamiento basado en estas reglas.

---

<sup>3</sup> UNESCO. *Historic Centre of Morelia*, <http://whc.unesco.org/en/list/585>

En el siguiente tema se darán a conocer una serie de reglas que permitieron en algún momento dimensionar edificios en la época de su propuesta.

## **REGLAS EMPÍRICAS DE DIMENSIONAMIENTO EN EDIFICIOS HISTÓRICOS**

Aunque no se tiene registro de los procesos de diseño y/o constructivos de la gran mayoría de edificaciones históricas, las grandes construcciones de la antigüedad no fueron obra de aficionados sino de profesionales expertos: de maestros constructores (Huerta, 2004).

### **ANTECEDENTES: LA ANTIGÜEDAD Y BIZANCIO**

De manera curiosa, aquellos que han estudiado sobre este tema, principalmente en Europa, señalan que la primera fuente existente sobre el proceso constructivo de un edificio de este tipo, se encuentra en la Biblia, concretamente en el libro de Ezequiel donde el profeta narra lo visto en un sueño en el que observa la modulación con un cordel de hilo y una pértiga de medir.

Con respecto a la modulación y desde el punto de vista del proyecto de estructuras, algunos autores (Huerta, 2004) abordan el concepto de *ley de semejanza geométrica*, donde, si un edificio con unas determinadas proporciones es seguro, otro edificio semejante aunque de distinto tamaño también lo será. Y algunas comparaciones de las medidas de determinadas construcciones de la época romana parecen confirmar esta hipótesis.

Vitruvio también hace mención al proceso constructivo, sin embargo no hace referencia a reglas estructurales.

En la época Helenística sí se escriben tratados sobre bóvedas. En particular Herón de Alejandría (ca. 60 d. C.), pero por desgracia, también se ha perdido.

En Bizancio, con el renacer de la construcción abovedada también aparecen algunos tratados técnicos. Sabemos que los arquitectos bizantinos para alcanzar el grado máximo de “mecánicos” debían dominar no sólo la práctica de la construcción sino también la ciencia de la mecánica y el equilibrio enunciada unos siglos antes por Arquímedes (Downey 1946; Warren 1976).

## **Posgrado de Ingeniería Civil**

También se piensa que los conocimientos de estática de los mecánicos bizantinos hubieran podido realizar cálculos semejantes a los actuales, sin embargo no hay registro alguno de ello, ya que se ha perdido evidencia de ello.

### **LA GEOMETRÍA EN EL GÓTICO**

Después de la caída del Imperio Romano se produjo un retroceso evidente de la construcción en Europa, lo cual llevó a una mayor imperfección geométrica, ya que las reglas de la geometría práctica aplicadas por romanos y bizantinos se desaparecieron.

Al aparecer en el gótico se retomó un poco el dominio de la geometría ya que los procesos geométricos se ven reflejados en muchos de los métodos de traza góticos, desde las trazas generales, pasando por la decoración y la escultura, hasta llegar al menor de los problemas técnicos, por ejemplo, el diseño de las plantillas para el corte de piedras (Huerta, 2004).

El único manuscrito que ha sobrevivido de la época del gótico clásico es el de Villard de Honnecourt, alrededor de 1235.

Existen cinco fuentes que Santiago Huerta aborda con un enfoque relacionado con la traza o proyecto de los elementos de la estructura:

- El álbum de Villard de Honnecourt
- Las reglas geométricas góticas incluidas en fuentes renacentistas y barrocas
- Los tratados de arquitectura del gótico tardío alemán
- Los informes parciales y reuniones de expertos: la catedral de Gerona
- La traza de puentes medievales: el manuscrito de Zaragoza

Sin embargo de las anteriores, solo abordaremos las primeras tres fuentes, ya que, aunque Huerta (2004) ha hecho un análisis profundo de las últimas dos, la información obtenida no es de gran importancia para el desarrollo de este trabajo.

#### ***Villard de Honnecourt***

El álbum de Villard de Honnecourt es la fuente más antigua que se conserva sobre la construcción gótica.

Además de tratar una enorme cantidad de temas tales como técnica constructiva, problemas de estereotomía, levantamiento, de replanteo, de proyecto y finalmente un poco de alarde constructivo medieval.

Sin embargo, con todo lo anterior este escrito, no nos proporciona reglas concretas acerca del dimensionamiento de las edificaciones. Algunos expertos piensan que cuando Villard hizo el álbum era un oficial inexperto o simplemente un estudioso aficionado a la arquitectura. Ya que al hacer comparaciones de sus dibujos con algunos edificios existentes se han encontrado inconsistencias que ningún maestro gótico hubiera cometido (Huerta, 2004).

### ***Reglas geométricas góticas en fuentes renacentistas y barrocas***

Desafortunadamente para estudios actuales, resulta un tanto decepcionante que no haya registros de indicaciones sobre como los maestros medievales proyectaron tan asombrosas estructuras. Existe la posibilidad que la causa de la ausencia de información se deba al secreto al que estaban obligados los canteros medievales, según las ordenanzas de las logias.

Es obvio pensar que las construcciones con cierto grado de complejidad tengan una base teórica, es decir que en algún momento debieron existir reglas o preceptos que recogieran la experiencia acumulada.

Dentro de las reglas que han llegado a manos de los estudiosos están aquellas que se refieren al problema central de toda construcción de mampostería: resistir el empuje de las bóvedas colocando apoyos adecuados.

Con la llegada de la imprenta se hizo casi imposible seguir guardando el secreto, fue así como algunas reglas salieron a la luz en épocas subsecuentes, de ahí se pudieron obtener dos reglas góticas para establecer los estribos de las bóvedas de crucería, llamadas regla no. 1 y regla no. 2 del gótico (Huerta, 2004).

#### ***Regla geométrica no. 1***

Apareció en distintos tratados y manuscritos de cantería de los siglos XVI y XVII, coincidiendo precisamente con el inicio de la difusión de los conocimientos de los gremios y logias medievales de canteros. Impresa en el tratado de Derand de 1643, en 1990 Müller descubrió que también se citaba en el perdido tratado de cantería de Bacciojani de 1546. Vuelve a

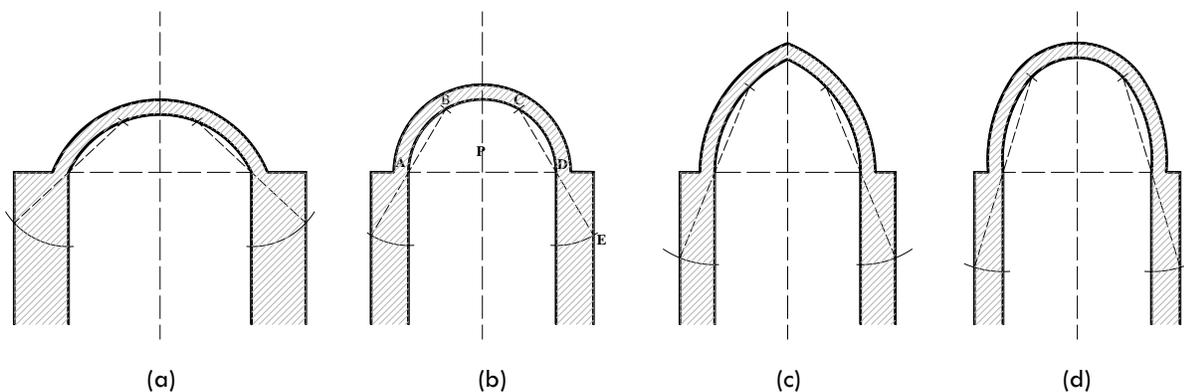
aparecer bajo una concepción geométrica distinta en el manuscrito de Martínez de Aranda hacia 1590. Blondel también la incluye en su *Traité d' architecture* de 1675, y de hecho en algunos libros de historia se le conoce como la “Regla de Blondel”

La regla según Derand, citada en un apartado de su tratado relacionado con la traza del empuje de las bóvedas, en el que se ve qué espesores deben tener los muros y arbotantes que las soportan.

A continuación se explica la construcción con referencia a un arco de medio punto (P):

«Sea la bóveda de medio punto ABCD... divídase en tres partes iguales por los puntos B y C, y por uno de los tercios, por ejemplo CD, trácese la línea recta CDF, y tomando el mismo punto D como centro, y abriendo el compás como la cuerda CD, trácese por debajo el Arco EF. Y por el punto F, donde el citado Arco corta a la línea CF, trácese el plomo FG por fuera del muro, que debe soportar la bóveda ACD; así el espesor del muro estará comprendido entre las líneas EH y FG, y aquél será suficiente para resistir el Empuje de la Bóveda como hacen ver la práctica y la experiencia».

Como se puede observar en la **Figura 1**, la forma del arco afecta el espesor de los apoyos, así pues, mientras más rebajado sea el arco mayor espesor de apoyos necesitará, un arco rebajado necesita apoyos más densos que un arco de medio punto, y este a su vez, necesitará espesor de apoyos de mayor longitud que un arco apuntado o un arco peraltado. Lo cual concuerda con la realidad, ya que mientras más rebajado el arco sea, mayor fuerza de coccio transmite a los apoyos y viceversa.

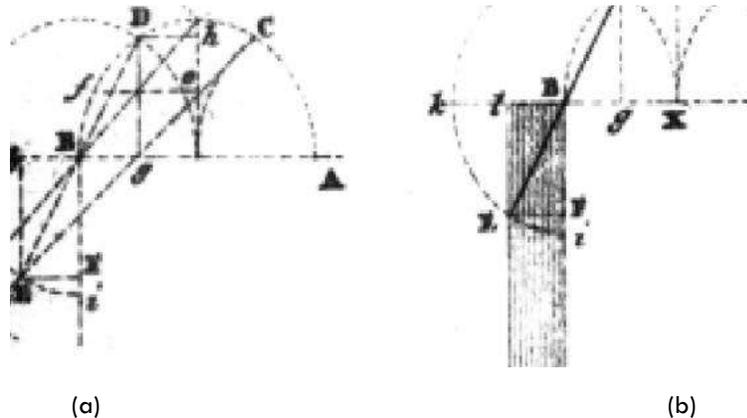


**Figura 1.** Primera regla geométrica del gótico.

(a) aplicación a un arco rebajado; (b) aplicación a un arco de medio punto; (c) aplicación a un arco apuntado; (d)

aplicación a un arco peraltado.

Se presume que Bacciojani publicó con anterioridad esta regla, sin embargo, y ya que se perdió dicho compendio, solo se tiene como referencia el tratado de carpintería de Schübler de 1731 (Ver [Figura 2](#)), el cual hace referencia a tratado de Bacciojani.



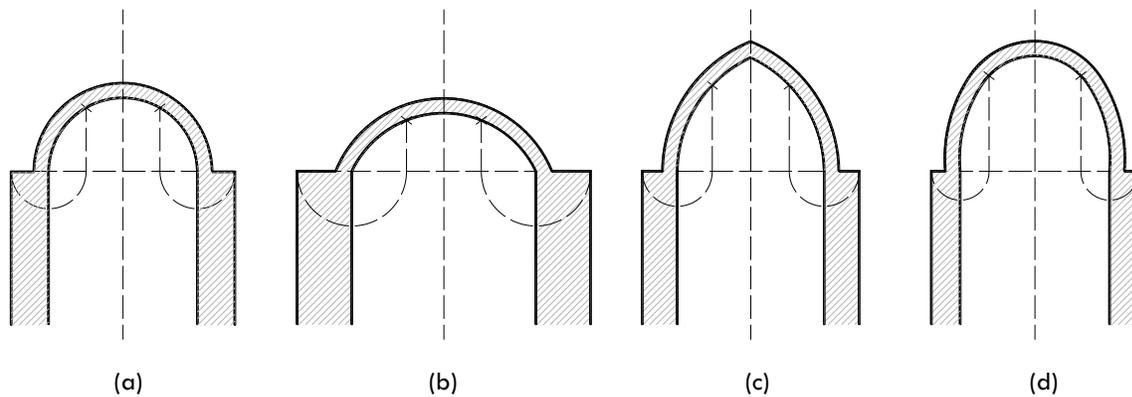
**Figura 2.** Regla gótica para el cálculo de estribos.

Proviene del tratado de Shübler de 1731: (a) traza geométrica copiada del desaparecido Bacciojani de 1546; (b) la misma regla tomada del tratado de Sturm (1710).

En la [Figura 2\(a\)](#) podemos observar que se encuentra una superposición de varios trazos, sin embargo es notable la presencia de la primera regla del gótico, que se plasma como única en la [Figura 2\(b\)](#).

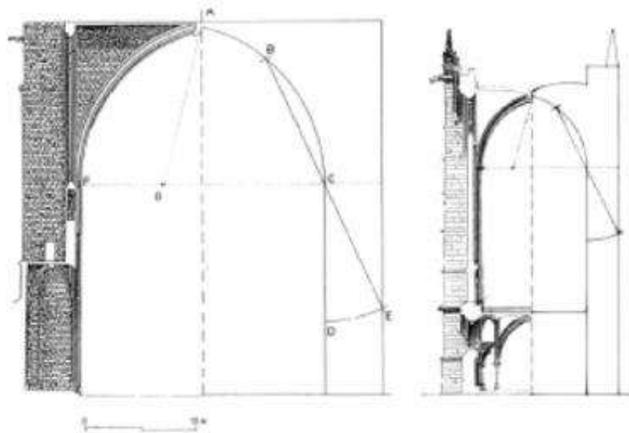
Ginés Martínez de Aranda dejó un escrito sobre el arte de la cantería, cuya primera parte habla de cómo ejecutar arcos peraltados o rebajados a partir de arcos de medio punto, cómo extender un arco sobre un cilindro, y entre este tipo de construcciones aparecen las reglas para dimensionar estribos y arcos.

Se describe la regla de la siguiente forma: se divide el arco en tres partes iguales por dos puntos y se proyecta uno de ellos sobre la línea de los arranques; la distancia entre el punto de proyección y el arranque más próximo nos da el espesor que debe tener el estribo.



**Figura 3.** Primera regla del gótico, según los trazos indicados por Martínez de Aranda  
 (a) aplicación a un arco rebajado; (b) aplicación a un arco de medio punto; (c) aplicación a un arco apuntado;  
 (d) aplicación a un arco peraltado

Podemos observar que la **Figura 3** presenta la aplicación de la primera regla del gótico, según la concepción de Martínez de Aranda, que con diferente configuración geométrica propone el mismo espesor de estribos.



**Figura 4.** Aplicación de la regla geométrica n°1 a la catedral de Gerona y la Sainte-Chapelle de París.

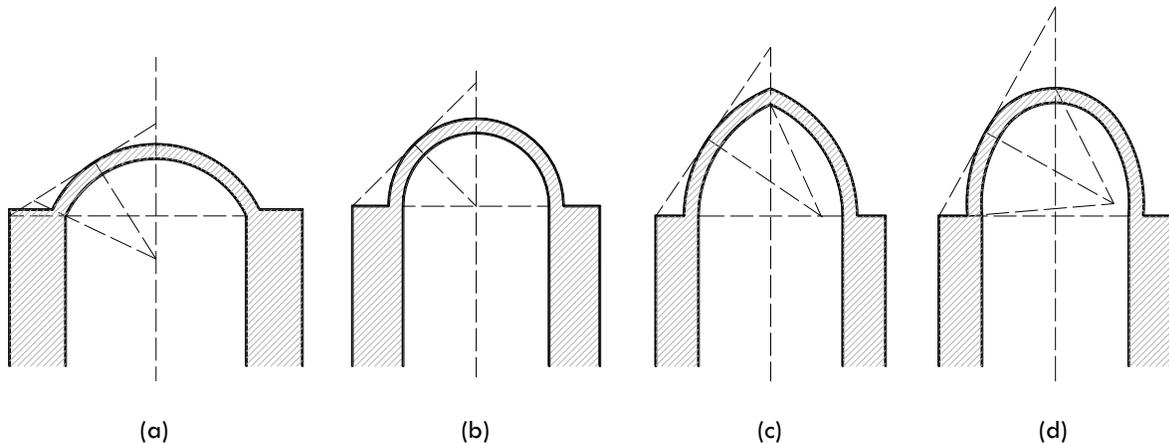
En la **Figura 4** se ha hecho un bosquejo en la concepción de los espesores de apoyos en edificios de la época, en la izquierda se observa un corte transversal de la Catedral de Gerona, en Italia; y en la derecha también un corte transversal pero de la Sainte-Chapelle de París. Ambas secciones tienen la presencia de la regla geométrica no. 1 del gótico.

### Regla geométrica no. 2

La segunda regla geométrica aparece citada en el manuscrito de Hernán Ruiz el Joven y fue publicada por Navascués en 1974. Entre los temas abordados en este manuscrito se encuentran: geometría, proporciones, órdenes clásicos, relojes solares, etc.

Considerando un semiarco cualquiera, Hernán Ruiz dice:

- Dividimos su línea de trasdós en dos partes iguales.
- Trazamos por dicho punto una tangente a la línea de trasdós.
- El punto de intersección de la tangente con la línea horizontal definida por los arranques del arco, nos da el espesor del estribo.



**Figura 5.** Segunda regla geométrica del gótico

(a) aplicación a un arco rebajado; (b) aplicación a un arco de medio punto; (c) aplicación a un arco apuntado; (d) aplicación a un arco peraltado

La **Figura 5** nos muestra la concepción geométrica del espesor de apoyo sugerido por la segunda regla del gótico, al igual que en las **figuras 1 y 3** que hacen referencia a la regla geométrica número uno, se puede observar que la forma del arco influye de manera directa en el espesor del estribo.

### **Reglas estructurales del Gótico tardío alemán**

Algunos autores hacen referencia a esta época mencionando algunos tratados que surgieron de manera dispersa, sin embargo se convirtieron en una recopilación que Coenen (1990) llama “Werkmeisterbücher”, libros de los maestros de obra (Huerta, 2004).

**Posgrado de Ingeniería Civil**

- Unterweisungen (Instrucciones) de Lorenz Lechler.
- Von des Chores Maß und Gerechtigkeit (La medida del coro).
- Wiener Werkmeisterbuch (Tratado de Viena).
- Das Buchlein von der Fialen Gerechtigkeit (Cuaderno sobre la traza correcta de los pináculos) de Matthäus Roriczer.
- Geometria Deutsch (Geometría alemana) de Matthäus Roriczer.
- Fialenbüchlein (Cuaderno de los pináculos) de Hans Schuttermayer.

De estos escritos se distinguen dos tipos: los que son verdaderos tratados de arquitectura, que se ocupan de todos los aspectos del proyecto de una iglesia gótica (desde la traza general, hasta el diseño de los elementos decorativos y estructurales); el resto son manuales sobre temas específicos dentro del proyecto de una iglesia.

En este apartado del gótico tardío alemán, todas las medidas del proyecto están en función del claro del coro, siendo múltiplos o fracciones simples de este módulo.

Así pues, hemos preparado la siguiente tabla para mostrar los resultados encontrados. En la primera columna se encuentra el elemento o parte del templo a la cual se hace referencia, en la segunda columna la fuente que proporciona la medida y en la tercera columna la propia medida del elemento.

Los tres tratados a los cuales se hará referencia como fuente, son los primeros tres enlistados anteriormente.

**Tabla 1.** Reglas estructurales del Gótico tardío alemán.

<b>PARTE DEL TEMPLO</b>	<b>FUENTE</b>	<b>MEDIDA</b>
Pared del coro	En los tres tratados	1/10 del claro del coro
Pared de la nave central	Tratado de Viena	1/10 del claro del coro
	Instrucciones	$\sqrt{2}$ veces el espesor de la pared del coro

	La medida del coro	1.25 veces la pared del coro
Pared de las naves laterales	Tratado de Viena	1/10 del claro del coro
	Instrucciones	1/10 del claro del coro
	La medida del coro	1/3 más gruesa que la pared del coro
Ancho de los estribos del coro	En los tres tratados	Mismo espesor de la pared del coro
Espesor de los estribos del coro	En los tres tratados	El doble del ancho del estribo
Maineles de las ventanas	Viejo mainel	1/3 de la pared del coro
	Nuevo mainel	5/7 de la proporción anterior
Nervios de las bóvedas	La medida del coro	Difícil interpretación
	Instrucciones	1/3 de la pared del coro
Espesor de las paredes de las torres	Instrucciones y la medida del coro	En función de su altura, tendrá de grueso 1/20 de su altura

En la tabla anterior podemos observar que se tratan las proporciones para diferentes partes del templo, tomando como medida principal el claro del coro y con éste, el espesor de la pared del mismo, con excepción del espesor de las paredes de las torres que están en función de su altura. Sin embargo podemos observar que, aunque no se trata el templo en su totalidad se tiene información de elementos estructurales importantes, como lo son los espesores de muros, estribos, maineles e incluso nervios de bóvedas de crucería.

### SELECCIÓN DE REGLAS Y PROPORCIONES A ESTUDIAR

Hemos decidido seleccionar dos proporciones de las tratadas en los apartados anteriores, por claridad en los trazos, información acompañada de imágenes y facilidad en la comparación con los modelos que aquí trataremos, las proporciones seleccionadas serán las que corresponden a la primera y segunda regla del gótico.

## IDENTIFICACIÓN DE EDIFICIOS

Un conjunto de trece estructuras patrimonio histórico de la ciudad de Morelia, se han elegido para formar parte de este conjunto de estudio. Construidas entre los siglos XVI y XVIII, son de vital importancia para la ciudad que, gracias a la abundancia de construcciones coloniales, entre otras razones, fue nombrada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1991.

A continuación se enlistan los trece edificios por orden cronológico:

### Templos de una nave

1. Templo de San Agustín (1550)
2. Templo franciscano de San Buenaventura (1585)
3. Templo del Carmen (1596)
4. Templo de San Francisco Javier (1660)
5. Templo de la Cruz (1680)
6. Templo de San Juan Bautista (1696)
7. Templo de Guadalupe (1708)
8. Templo de las Monjas (1732)
9. Templo de Capuchinas (1734)
10. Templo de la Merced (1736)
11. Templo de Santa Rosa de Lima (1757)
12. Templo de San José (1760)

Finalmente con tres naves:

13. Iglesia Catedral de la Transfiguración (1660)

En la **Figura 6** un mapa de ubicación del Centro Histórico de la ciudad de Morelia, nos muestra la localización del mismo con respecto a la ciudad, mientras que la **Figura 7** se indica donde se encuentra cada uno de los edificios estudiados con la misma numeración en que se encuentran enlistados anteriormente.



**Figura 6.** Macro localización del centro histórico en la ciudad de Morelia Michoacán



**Figura 7.** Ubicación de los templos en estudio, en el Centro Histórico de la ciudad.

Según Doglioni *et al.* (1994), las estructuras de este tipo se pueden subdividir en elementos que presentan una respuesta sísmica autónoma con respecto al resto del sistema, conformando así los llamados macroelementos. Para este trabajo, se han seleccionado, por cada uno de los templos enlistados, un macroelemento transversal y uno longitudinal, que serán los sometidos a

## Posgrado de Ingeniería Civil

los análisis y comparaciones (para mayores especificaciones de cuáles son esos macroelementos, revisar el Anexo A, sobre los planos de cada una de las edificaciones e identificación de los macroelementos en ambas direcciones).

A continuación se presenta en las Figuras 8 y 9 los macroelementos en alzado transversales.

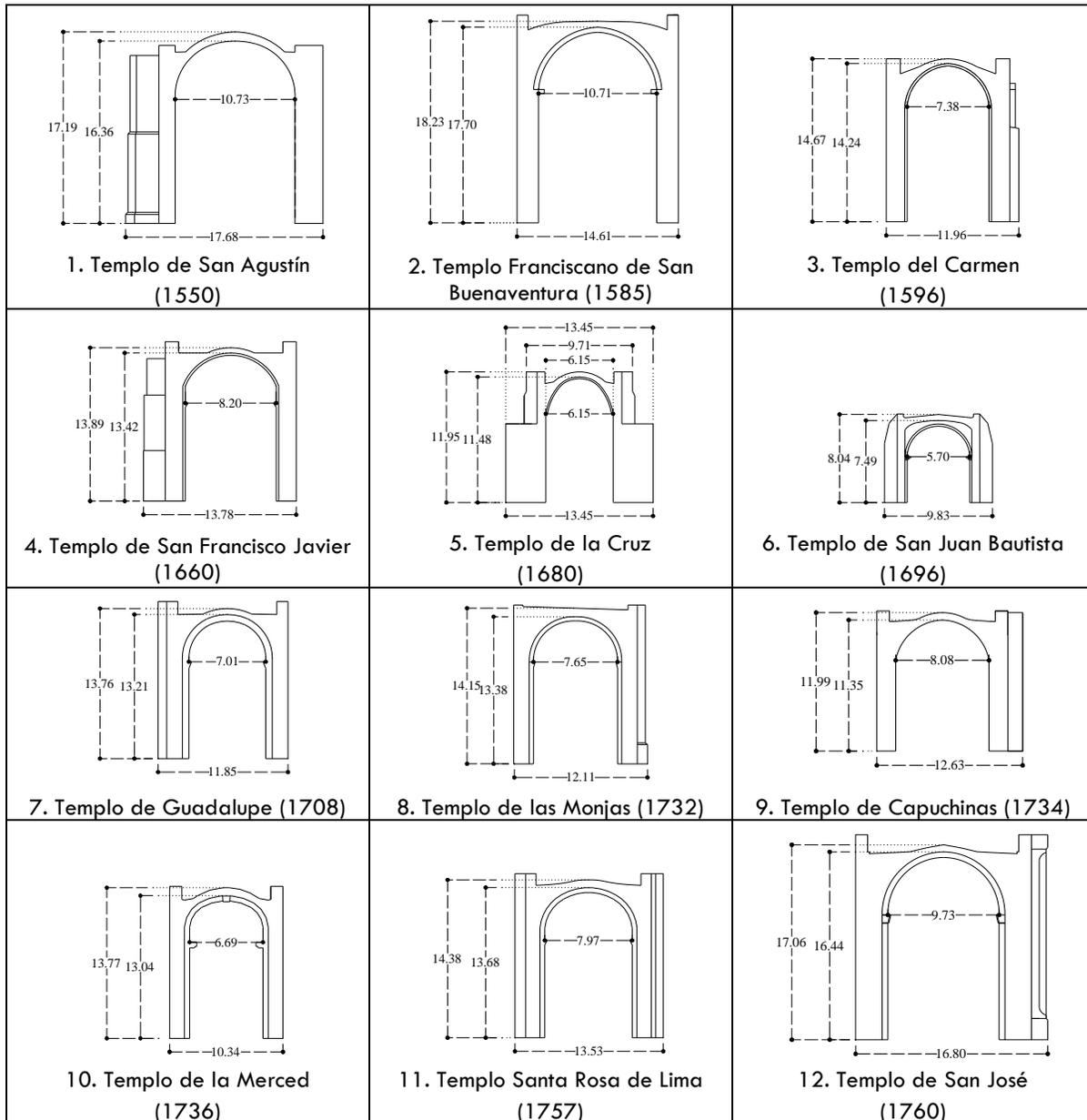
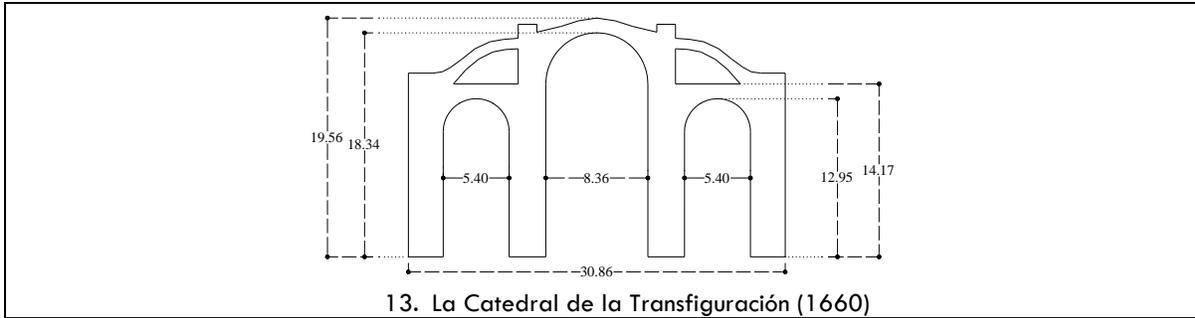
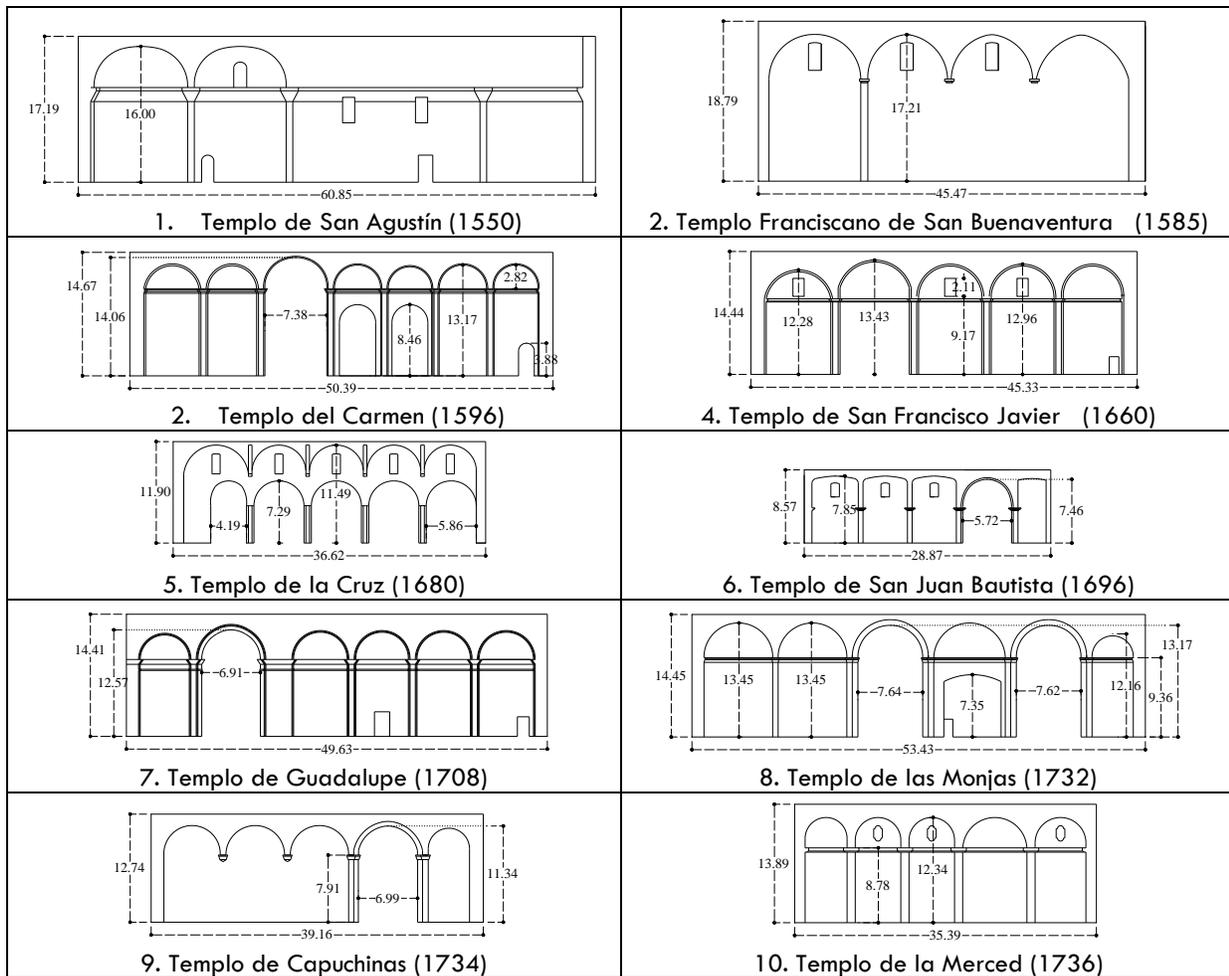


Figura 8. Macroelementos transversales reales estudiados. Templos de una sola nave.

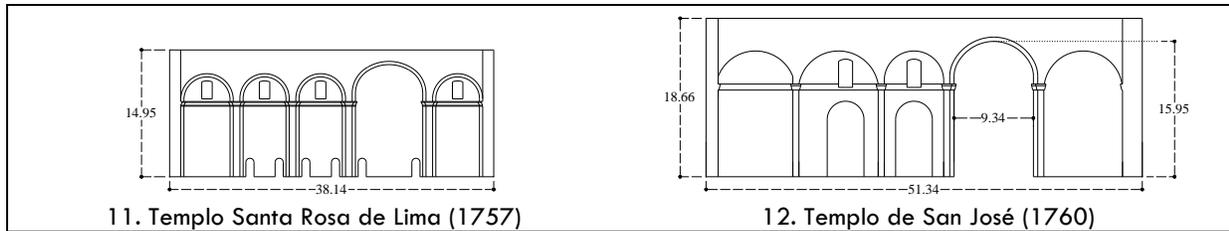


**Figura 9.** Macroelemento transversal real estudiado. Templo con tres naves.

En las siguientes figuras se observan los macroelementos longitudinales con proporciones reales a estudiar en este trabajo.

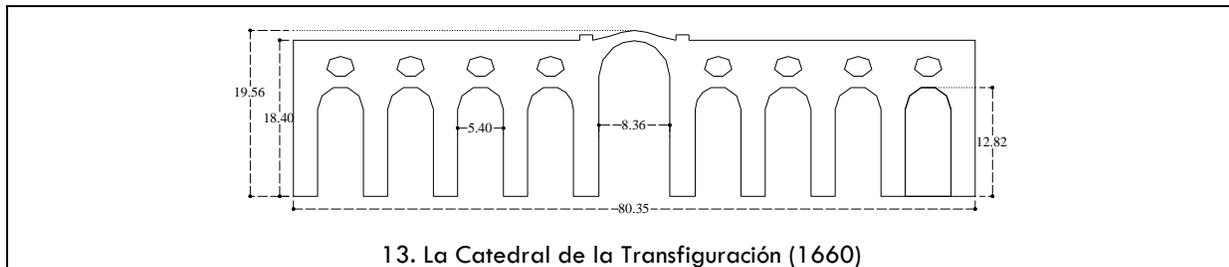


**Figura 10.** Macroelementos longitudinales reales estudiados. Templos de una sola nave.



11. Templo Santa Rosa de Lima (1757) 12. Templo de San José (1760)

**Figura 11.** Continúa macroelementos longitudinales reales estudiados. Templos de una sola nave.

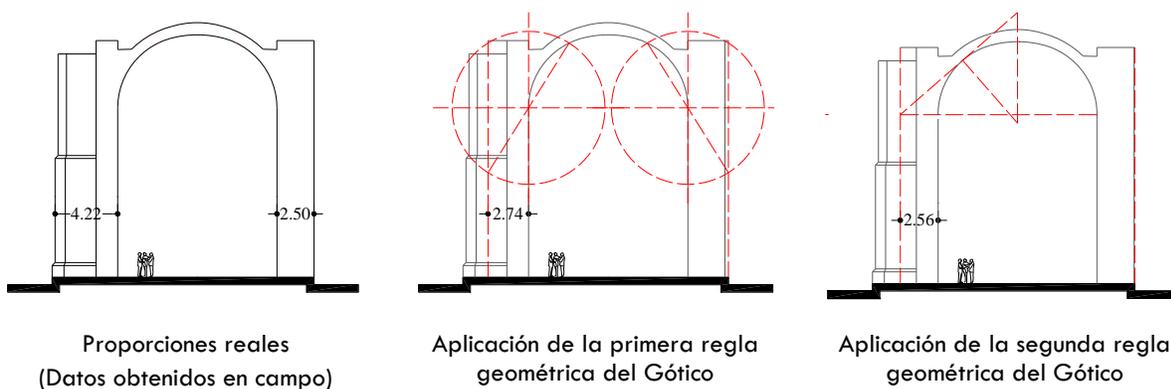


13. La Catedral de la Transfiguración (1660)

**Figura 12.** Macroelemento longitudinal real estudiado. Templo con tres naves.

Cada uno de los edificios seleccionados, se sometió a un análisis formal para verificar que tuviera en sus medidas las proporciones seleccionadas.

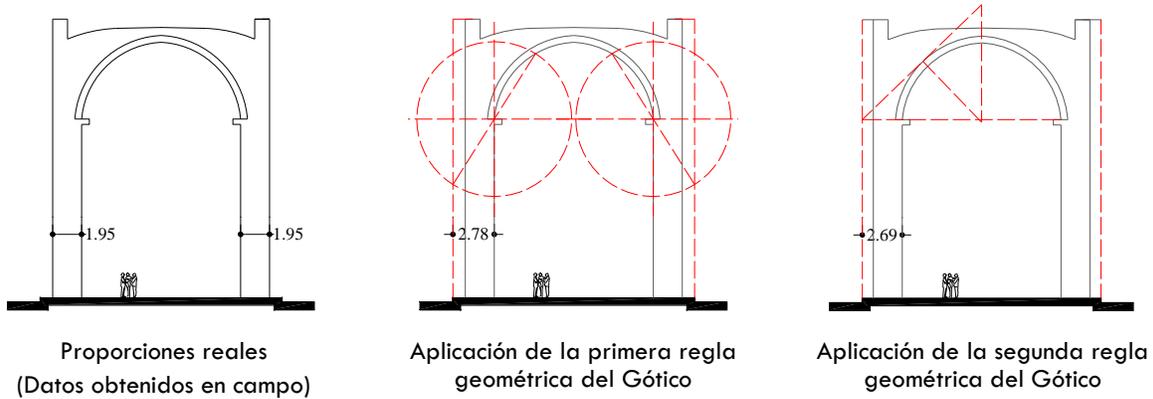
Para lo anterior, a cada una de las secciones se les superpuso, sobre sus medidas reales, los trazos indicados en el tema de selección de reglas y proporciones a estudiar: la primera y segunda regla del gótico; que se refieren solo al ancho de los apoyos, por lo que en la siguiente comparación contrastaremos los valores obtenidos para cada una de las proporciones y los datos reales obtenidos en campo.



**Figura 13.** Análisis formal para el templo de San Agustín

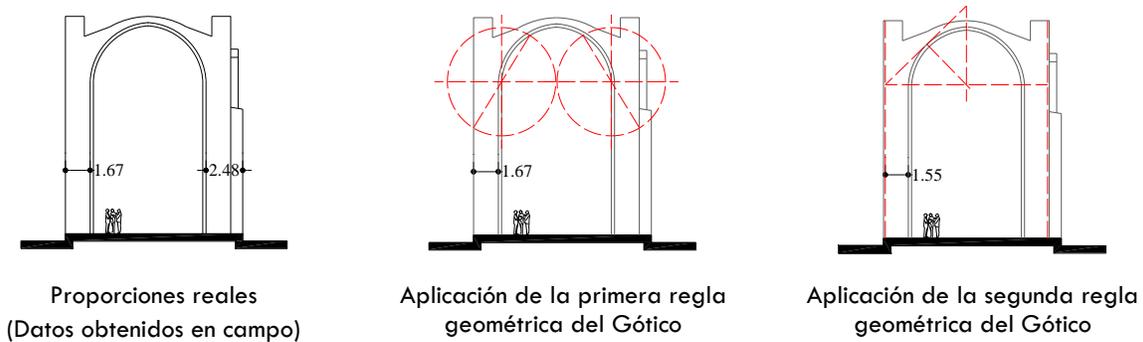
El templo de San Agustín posee espesores de muro de 2.50m y 4.22m donde está el contrafuerte, en la figura anterior vemos que al sobreponer los trazos geométricos de la

primera regla del gótico se obtiene un espesor de 2.74m, mientras que la segunda regla nos proporciona un espesor de 2.56m.



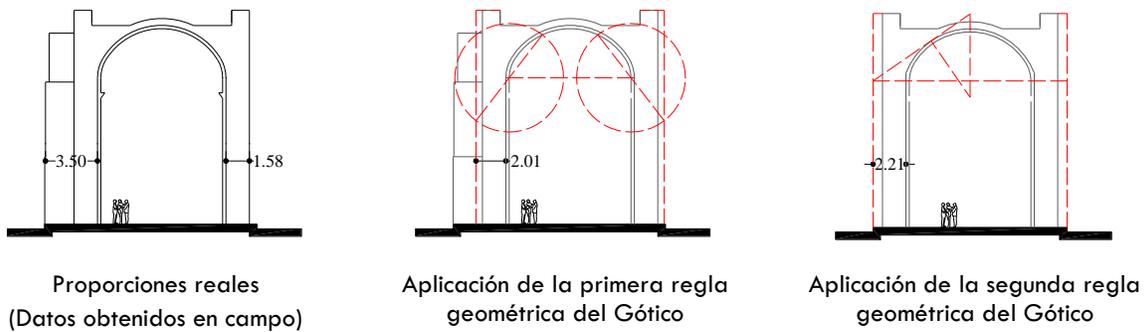
**Figura 14.** Análisis formal para el templo Franciscano de San Buenaventura

En el templo Franciscano de San Buenaventura, de gran importancia en la ciudad, encontramos un espesor de muros de 1.95m, mientras que las reglas proponen 2.78m y 2.69m respectivamente. En este caso se obtiene un espesor mayor que el real.



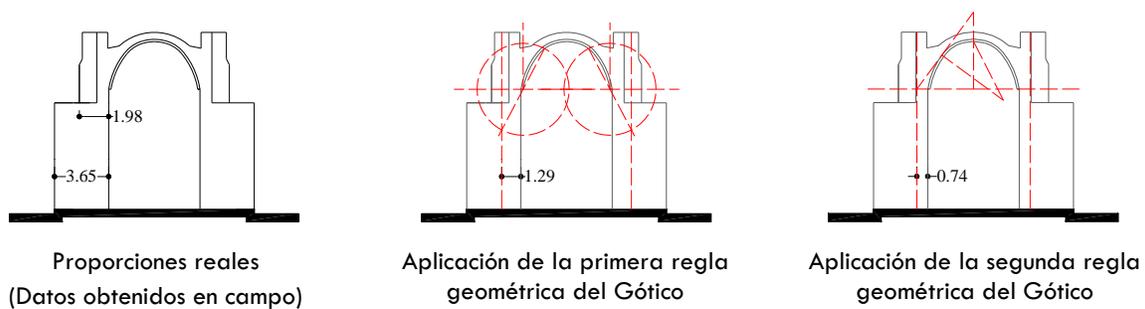
**Figura 15.** Análisis formal para el templo del Carmen

En el análisis formal para el templo del Carmen podemos observar que al aplicar la primera regla del gótico obtenemos el mismo espesor de muro que se obtuvo en campo, sin embargo, no contará con contrafuertes, por lo que se espera que el comportamiento sea diferente. Para la segunda regla del gótico se obtiene un espesor de apoyo de 1.55m



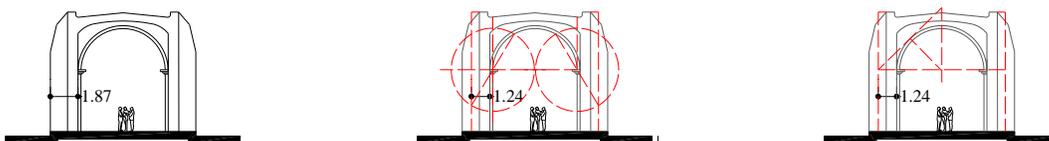
**Figura 16.** Análisis formal para el templo de San Francisco Javier

El templo de San Francisco Javier también presenta contrafuertes que, con el espesor del muro dan un espesor de 3.50m, mientras que el muro que no presenta refuerzos tiene un espesor de 1.58m. La aplicación de la primera regla del gótico arroja un espesor de 2.01m y la segunda un espesor de 2.21m, mayor que la anterior.



**Figura 17.** Análisis formal para el templo de la Cruz

En el templo de la Cruz, el caso es un poco particular, ya que tiene pequeñas capillas laterales entre los contrafuertes que, en este caso son interiores, por lo que tenemos un primer espesor de 3.65m y en la parte superior un segundo espesor de 1.98m. Para la primera regla del gótico el espesor se reduce notablemente, a 1.29m, pero el espesor se reduce aún más cuando se aplica la segunda regla, donde el espesor llega hasta los 74cm.



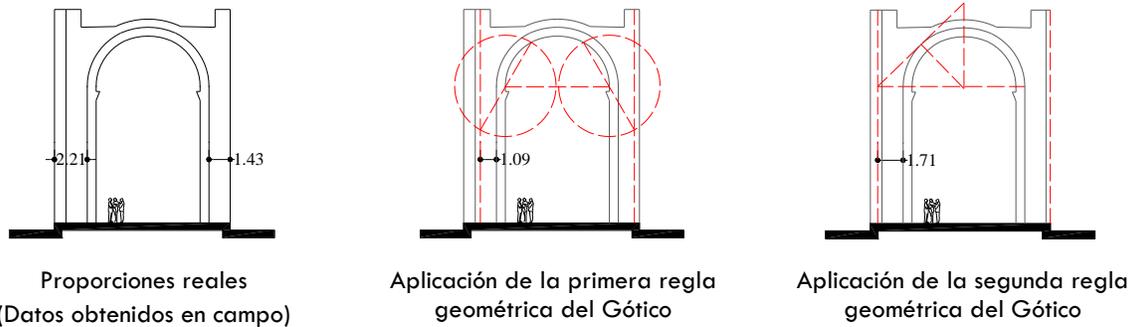
Proporciones reales  
 (Datos obtenidos en campo)

Aplicación de la primera regla  
 geométrica del Gótico

Aplicación de la segunda regla  
 geométrica del Gótico

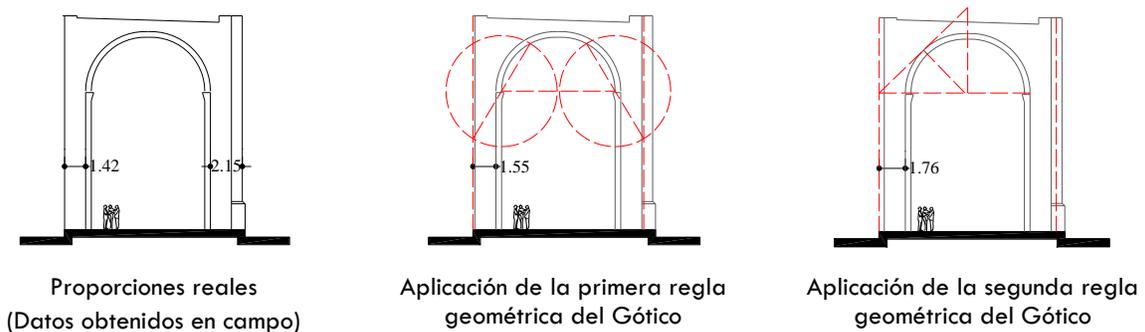
**Figura 18.** Análisis formal para el templo de San Juan Bautista

El templo de San Juan Bautista es el más pequeño en altura y en claro, sin embargo cuenta con un espesor de apoyos de 1.87m, tomando en cuenta muro y contrafuerte. Al aplicar ambas reglas del gótico, nos hemos dado cuenta que el espesor propuesto es el mismo, 1.24m. Esto se debe a que la forma que presenta el arco tiene una relación de radios de 2.85m en base contra 2.78m de altura, es decir que el radio en la base es aproximadamente un 2.5% mayor que el radio en altura.



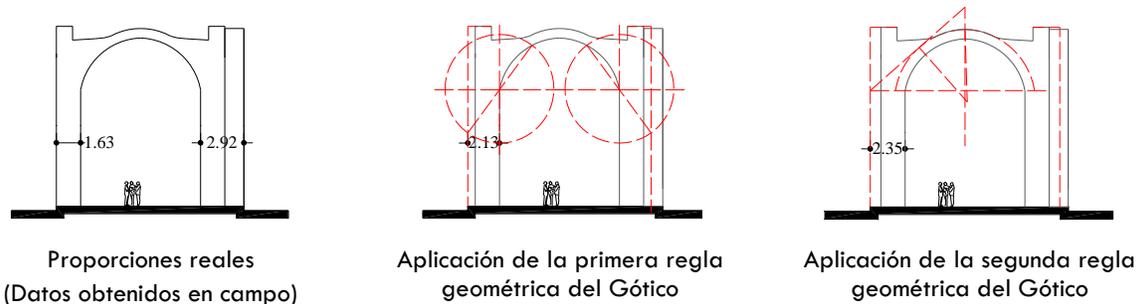
**Figura 19.** Análisis formal para el templo de Guadalupe

El templo de Guadalupe, o también conocido como el templo de San Diego, presenta características similares, por un lado contrafuertes y por otro lado el muro que coincide con el claustro. El espesor real es de 2.21m y 1.43m, mientras que al aplicar la primera regla obtenemos un espesor de 1.09m. La segunda regla da como resultado un espesor de 1.71m, espesor mucho mayor que el mencionado anteriormente.

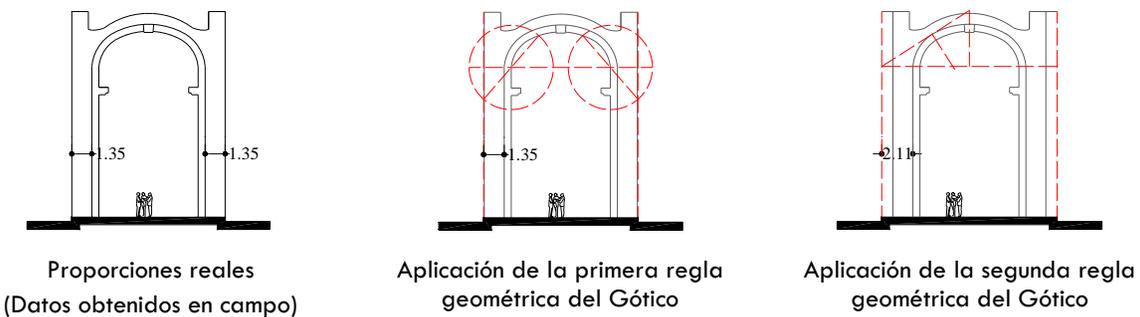


**Figura 20.** Análisis formal para el templo de las Monjas

Podemos observar que la figura anterior nos describe la sección transversal del templo de las Monjas, donde se presentan los espesores de 1.42m y 2.15m, muro y muro más contrafuerte respectivamente. La primera regla del gótico aumenta un poco el espesor del muro dejándolo en 1.55m y la segunda regla lo aumenta aún más proponiendo 1.76m.

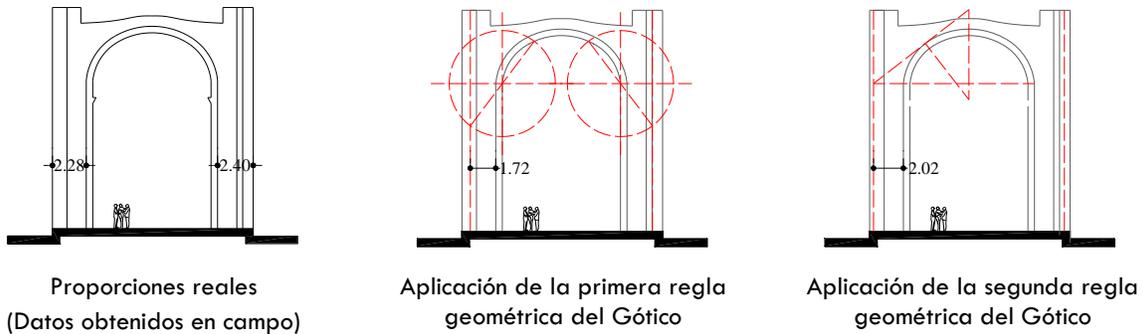
**Figura 21.** Análisis formal para el templo de Capuchinas

En el caso del templo de Capuchinas los espesores con 1.63m y 2.92m. Al hacer el análisis formal llegamos a la conclusión de que los espesores cambiarían a 2.13m para la primera regla del gótico y 2.35m para la segunda regla del gótico.

**Figura 22.** Análisis formal para el templo de la Merced

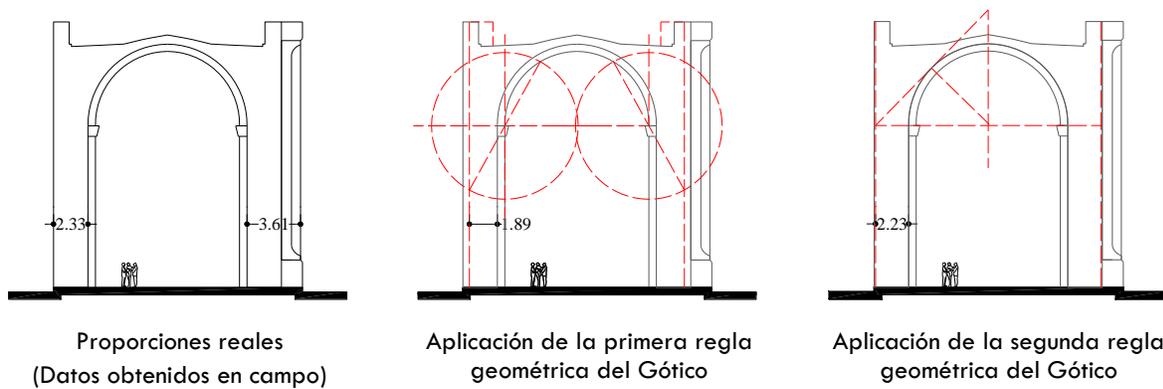
El templo de la merced es particular, ya que la forma de su arco permite que al aplicar la primera regla del gótico se presente una coincidencia en los espesores, es decir que las proporciones reales coinciden con un espesor de apoyos de 1.35m con el propuesto por la

primera regla del gótico, por el contrario, la segunda regla del gótico difiere, ya que aumenta a 2.11m



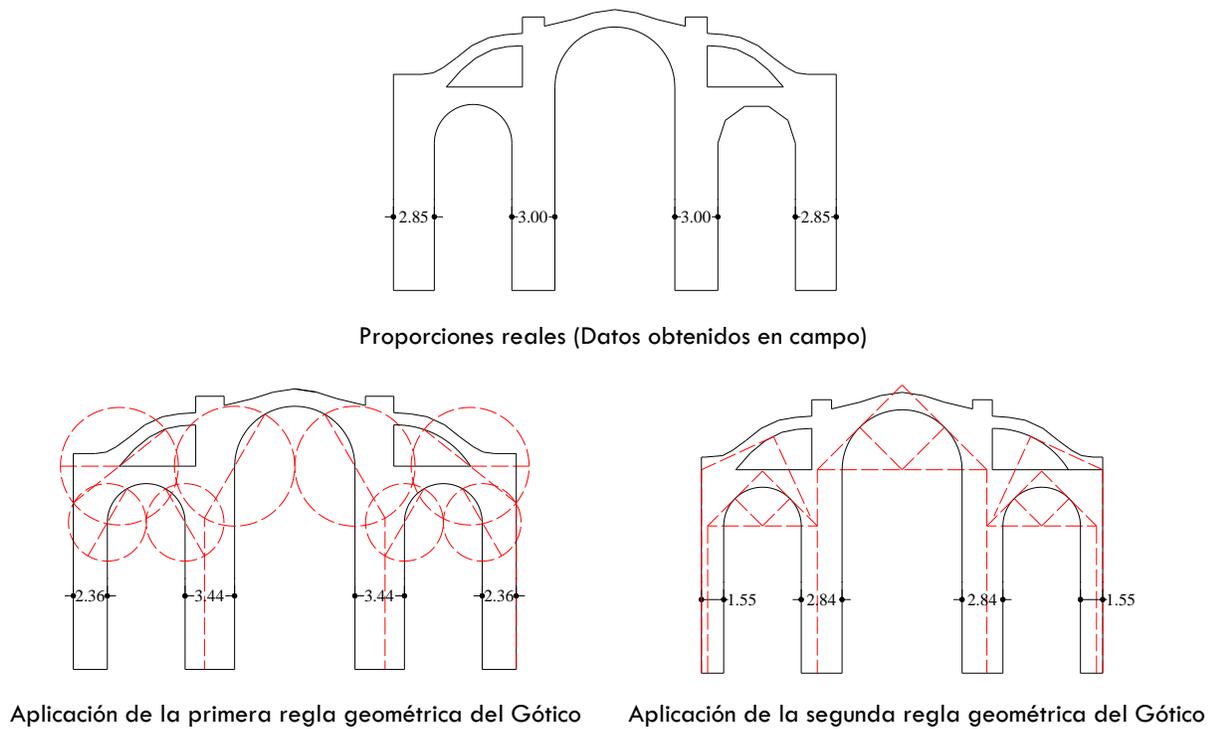
**Figura 23.** Análisis formal para el templo de Santa Rosa de Lima

El templo de santa rosa de lima presenta contrafuertes en ambos lados, mientras que uno mide 2.28m en el lado contrario tenemos 2.40m. Para el caso de la aplicación de la primera regla del gótico se obtuvo un espesor de 1.72m y para la aplicación de la primera regla del gótico un espesor de 2.02m. En ambas proporciones se disminuyó el espesor original.



**Figura 24.** Análisis formal para el templo de San José

En la **figura 24** podemos observar el análisis formal para el templo de San José, el cual presenta 2.33m y 3.61m en muros y muro más contrafuerte. Ambas proporciones hacen que el espesor del apoyo para la sección disminuya, ya que para la primera regla se obtiene un espesor de 1.89 y para la segunda regla del gótico un espesor de apoyos de 2.23m.



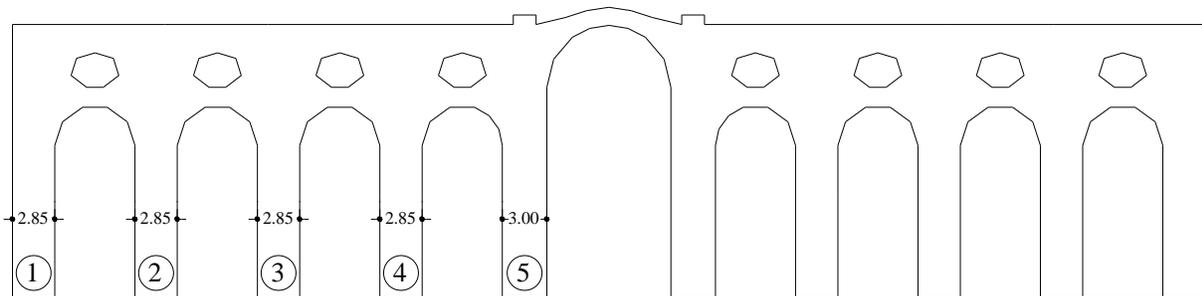
**Figura 25.** Análisis formal para la iglesia Catedral de la Transfiguración

Tomando como referencia un eje de simetría central imaginario, podemos observar que la Catedral de la Transfiguración tiene un apoyo lateral de 2.85m y un apoyo central de 3.00m de espesor. En la aplicación de las reglas geométricas del gótico, hemos propuesto que el espesor de cada apoyo sea la combinación de los espesores necesarios para cada uno de los arcos que intervienen, es decir que para cada apoyo se tomarán en cuenta dos arcos que transportan esfuerzos a estos apoyos. Como se muestra en la **figura 25**, en la aplicación de la primera regla del gótico, los espesores cambian, de manera que el apoyo lateral queda de 2.36m y el apoyo central de 3.44m; en la aplicación de la segunda regla del gótico, los espesores disminuyen a 1.55m en el apoyo lateral y 2.84 en el apoyo central.

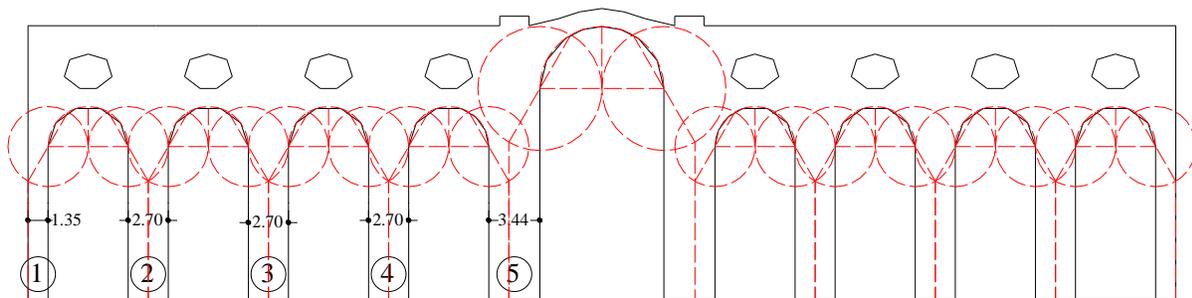
Ya que las reglas geométricas seleccionadas solo hacen referencia a los espesores de los apoyos, las secciones longitudinales no juegan un papel importante para ser modificadas, puesto que son en su mayoría muros tapiados, por lo que nos limitaremos a hacer las comparaciones en secciones transversales, sin embargo, también se realizarán todos los análisis numéricos para las secciones longitudinales con sus proporciones reales obtenidas en campo para así conocer su comportamiento real, en base a los análisis numéricos.

En el caso de la iglesia Catedral de la Transfiguración, por ser un templo de tres naves, podemos emplear una sección longitudinal que nos permite modificar de manera adecuada aplicando las reglas del gótico, la cual hemos seleccionado para este estudio. Por lo anterior presentamos a continuación la modificación de la sección longitudinal de la catedral.

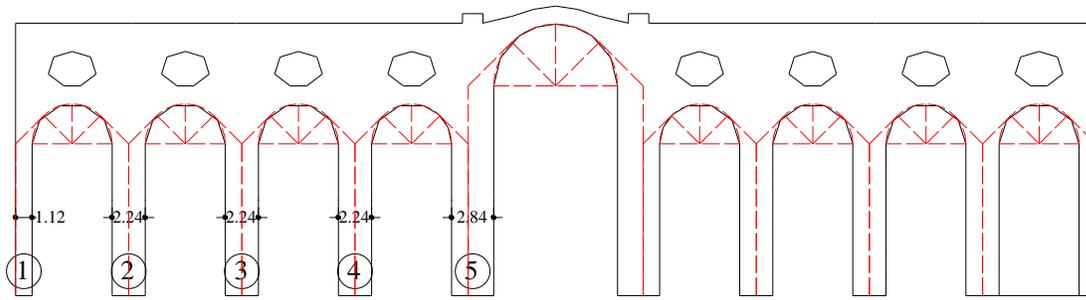
En la **figura 26** observamos que la sección longitudinal de la Catedral presenta un eje de simetría central imaginario, la numeración de los apoyos de izquierda a derecha, desde 1 hasta 5. En las proporciones reales, con los datos obtenidos en campo, tenemos que los apoyos de 1 a 4 tienen un espesor de 2.85m, mientras que el apoyo 5 tiene un espesor de 3.00m. Al aplicar la primera regla geométrica del gótico los espesores de los apoyos disminuye de la siguiente manera: apoyo 1 tiene un espesor de 1.35m; apoyo 2 al 4, presentan espesor de 2.70m; y el apoyo 5 cambia su espesor a 3.44m. En la aplicación de la segunda regla del gótico para el apoyo 1 el espesor del apoyo disminuye a 1.12m; los apoyos 2 al 4 presentan un espesor de 2.24, finalmente el apoyo 5 que presenta un espesor de 2.84m.



Proporciones reales (Datos obtenidos en campo)

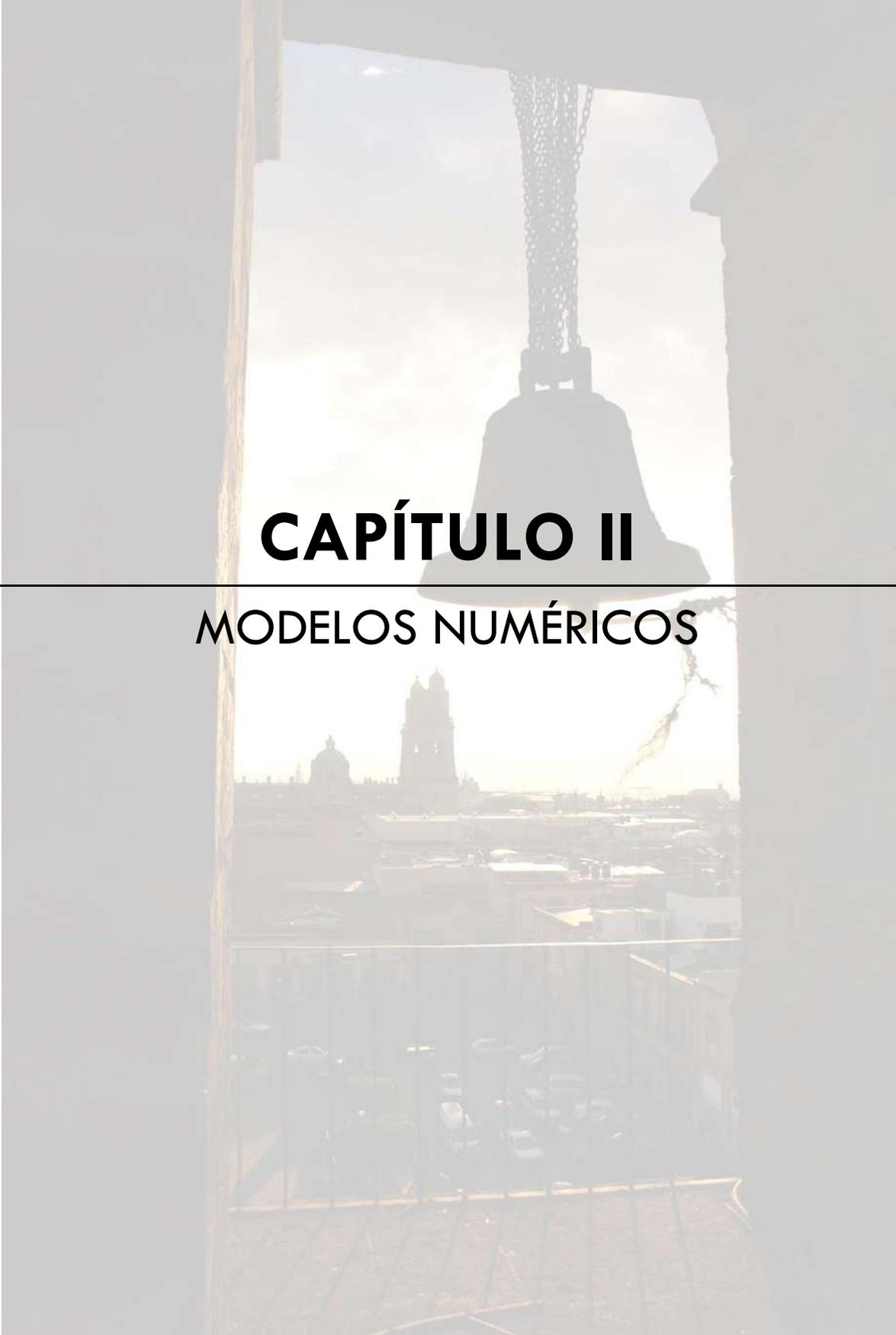


Aplicación de la primera regla geométrica del Gótico



Aplicación de la segunda regla geométrica del Gótico

**Figura 26.** Análisis formal para la iglesia Catedral de la Transfiguración para la sección longitudinal



# **CAPÍTULO II**

---

## **MODELOS NUMÉRICOS**

Se someterán los edificios a análisis pushover

## MÉTODO DE ELEMENTOS RÍGIDOS (MER)

Existen diferentes alternativas de análisis no lineal para estructuras históricas, una de las más utilizadas en la actualidad es el método de elementos finitos, el cual es muy efectivo. Sin embargo para el caso de edificios históricos es muy difícil encontrar un software adecuado para el análisis de mampostería antigua. Por otra parte también se cuenta con la alternativa de análisis límite de bloques rígidos, el cual tiene la ventaja de ser muy sencillo y proporciona únicamente la capacidad de carga y el mecanismo de colapso de la estructura.

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras de mampostería requiere de procedimientos específicos para este tipo de estructuras. En este campo, existe la necesidad de usar modelos lo suficientemente simples que permitan realizar análisis dinámicos paramétricos, pero al mismo tiempo deben tener en cuenta el comportamiento de la mampostería sujeta a cargas cíclicas. En particular, primero Casolo (2000, 2004) y después Casolo y Peña (2004, en prensa) han desarrollado un método de análisis que toma en cuenta estas características de las estructuras de mampostería, el Método de los Elementos Rígidos (MER). El estudio paramétrico presentado en este trabajo utiliza este método de análisis. A continuación se presenta una breve descripción del método.

Para el presente trabajo de investigación se decidió emplear el método de análisis estructural de Elementos Rígidos, puesto que es un método formulado con la finalidad de no necesitar tantos elementos para analizar los modelos de mampostería generados, así como también es una simplificación adecuada para el análisis lineal y no lineal de estructuras de mampostería sin reforzar, al considerar que los elementos tienen una dinámica de cuerpo rígido con dos desplazamientos traslacionales y uno rotacional, y las uniones entre los mismos son modelada por medio de resortes no lineales.

## FILOSOFÍA

El método de los elementos rígidos idealiza las estructuras de mampostería como una serie de elementos rígidos. Estos elementos son cuadriláteros y tienen una cinemática de cuerpos rígidos, con dos desplazamientos lineales y una rotación (Figura 27). Tres puntos de conexión (resortes) conectan dos elementos contiguos o los lados restringidos. Estas conexiones son dos puntos

axiales, separados una distancia  $2b$  para tomar en cuenta un momento flexionante, y un punto de conexión a cortante, colocado a la mitad del lado (Figura 28).

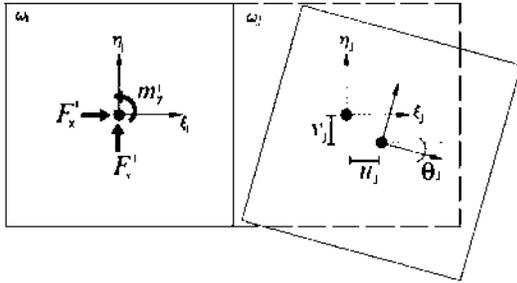


Figura 27. Fuerzas y Desplazamientos

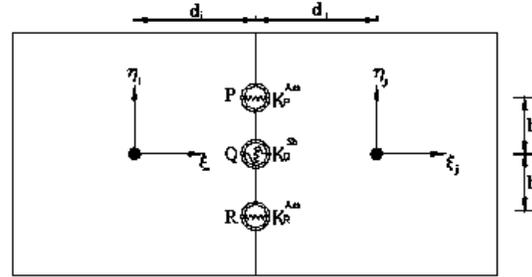


Figura 28. Conexión de dos elementos rígidos continuos.

La mampostería se considera como un material deformable, pero esta deformación se concentra en los puntos de conexión; mientras que, los elementos no son deformables. Cada uno de los puntos de conexión son cinemáticamente independientes entre ellos, pero se encuentran relacionados por la ley constitutiva del material. En otras palabras, los puntos de conexión representan las características mecánicas de la mampostería, pero al mismo tiempo, representan la capacidad del modelo de tomar en cuenta la separación y el deslizamiento entre elementos.

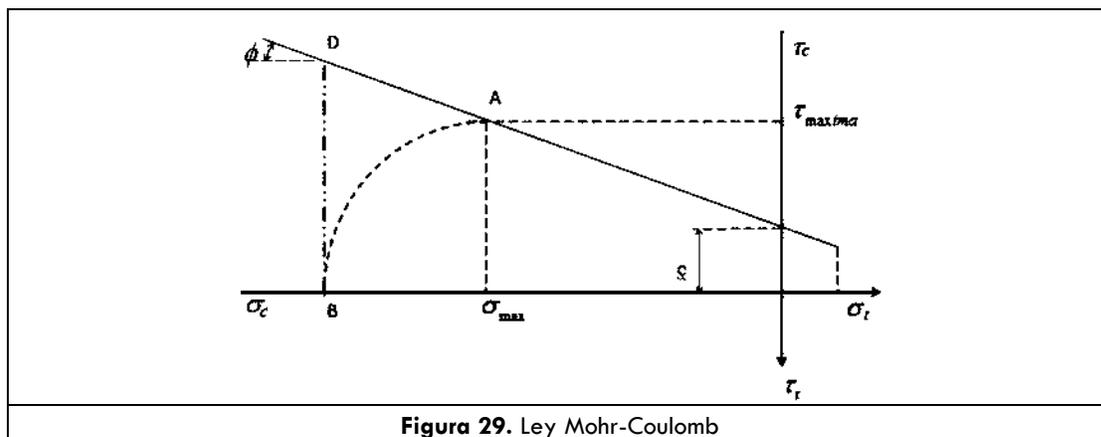
El método de los elementos rígidos es considerado como un modelo semicontinuo. En un modelo continuo, existe una compatibilidad de deformaciones entre los elementos que comparten nodos en común; mientras que, en un modelo discontinuo puede existir un movimiento relativo entre dos elementos contiguos. En el método de los elementos rígidos, puede haber un movimiento relativo entre elementos, pero las conectividades iniciales no cambian, existiendo una continuidad relativa ente elementos. De hecho, puede existir sobreposición, separación o deslizamiento entre elementos; lo cual puede significar esfuerzos de compresión, tensión o cortante. El movimiento de cada uno de los elementos es considerado independiente, ya que las estructuras de mampostería no pueden ser consideradas continuas, porque parte de su deformación se debe al movimiento relativo entre elementos. Sin embargo, las conexiones iniciales no cambian para disminuir el tiempo de cómputo.

## PROGRAMA DE ANÁLISIS ESTRUCTURAL RIGID V0.4.1

El programa RIGID V0.4.1 lleva a cabo análisis dinámicos no-lineales de estructuras de mampostería y se basa en el método de los elementos rígidos. Este programa ha sido desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Para la parte gráfica, es necesario utilizar el programa que lleva por nombre RIGIDPLOT, el cual permite crear archivos que puedan ser leídos por algún otro software de representación gráfica, con el fin de visualizar los estados de esfuerzos, deformaciones, modos de vibrar y daños dentro del modelo analizado.

Esta herramienta computacional presenta limitaciones, ya que es un programa de análisis bidimensional, lo que nos lleva a pensar que fue realizado para el análisis de macroelementos de monumentos históricos principalmente. Es por esto que la capacidad de análisis del programa está limitada a modelos que no sobrepasen las siguientes características: mil elementos, tres mil nodos, cincuenta lados restringidos, quince materiales y cien mil puntos del acelerograma. Aun con lo anterior, estas características son suficientes para analizar la mayoría de las estructuras de mampostería.

Otra de las limitaciones de este programa es que al crear el archivo de datos, se tienen que definir los nodos de cada elemento en sentido antihorario y se tiene que definir si se utiliza ley tipo Mohr-Coulomb para el cortante; en caso de utilizarla, se tendrá que definir si existe una degradación de la resistencia a cortante por esfuerzos de compresión cercanos a la falla, tal como se indica en la siguiente figura.

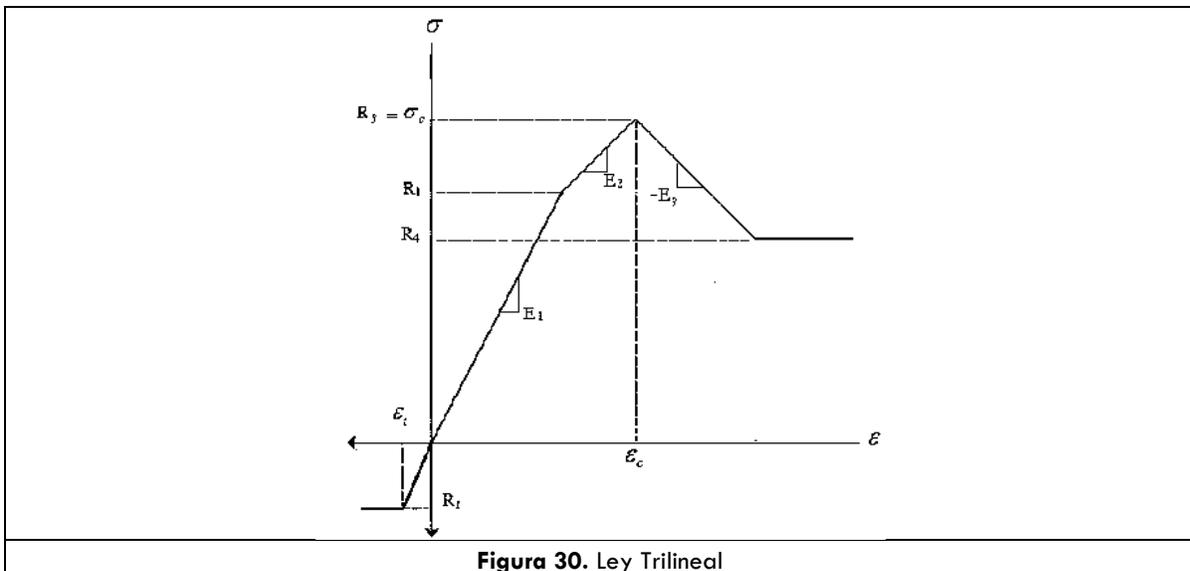


Este programa nos permite realizar análisis lineales, no lineales, estáticos o dinámicos; de los cuales se entregan resultados de cortante basal, desplazamientos y fuerzas en los resortes de interfaces, además de la energía disipada de cada elemento en cada incremento de tiempo.

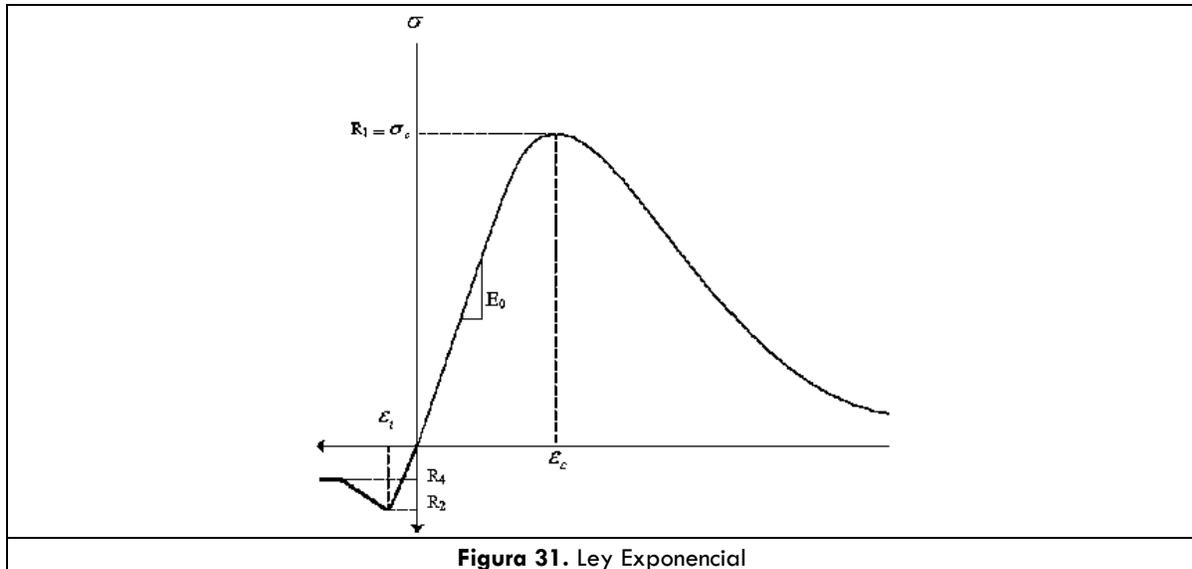
## MODELO CONSTITUTIVO

El RIGID V0.4.1 cuenta con tres leyes constitutivas, para definir el comportamiento axial de los materiales que son: trilineal, exponencial y parabólico.

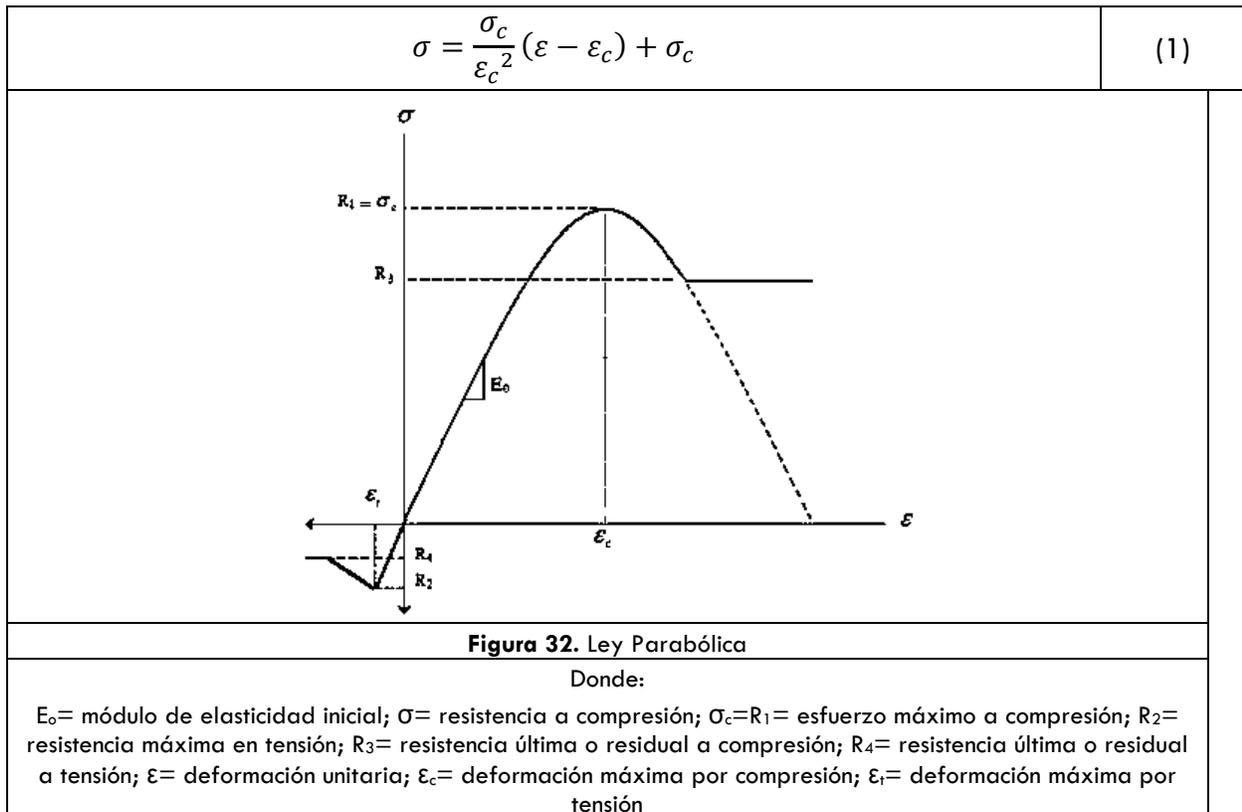
**Trilineal:** Ley definida por tres segmentos de rectas a compresión según la **Figura 30**. Para asignar esta ley, el comportamiento a compresión se debe definir para cada segmento de recta mediante sus pendientes, así como la resistencia de cada segmento. Mientras que para el comportamiento a tensión se considera sólo un segmento de recta y su respectiva deformación (Peña, F. 2010).



**Exponencial:** el comportamiento a compresión se define mediante una ley exponencial (**Figura 31**). Para definir este tipo de ley que representará la curva esfuerzo –deformación, únicamente se necesita la rigidez inicial del material y la resistencia a compresión máxima.



**Parabólico:** el comportamiento a compresión se define mediante la ley parabólica (Figura 32). En esta ley, es necesario definir una resistencia a compresión residual (ver ecuación 1), después de la cual, el comportamiento es plástico.



De las leyes constitutivas anteriores emplearemos la ley parabólica, puesto que se considera la más simple, ya que en las restantes tendríamos que suponer mayor cantidad de datos (con los que no se cuenta), lo cual nos hace tener mayor incertidumbre y por tanto menos certeza de que nuestros resultados puedan reflejar casos reales.

## DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

Para definir los parámetros que hemos empleado en los modelos estudiados en este trabajo, nos hemos basado en valores obtenidos en estudios europeos, ya que para el caso de México no se ha hecho investigación acerca de esto, sin embargo, cabe destacar que este trabajo puede ser punta de flecha para este tipo de investigaciones.

Ya que el método de elementos rígidos usa como base una ley constitutiva, y en este caso hemos elegido la ley parabólica, definiremos cada uno de los parámetros a emplear:

**Tabla 2.** Resistencias a tensión y compresión del material

<b>Material</b>	<b>R1 (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>R2 (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>R3 (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>R4 (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
Cantera de la zona	110	-11	71	-3.3
Relleno	50	-5	3.2	-1.5

Cabe destacar que contamos con dos tipos de materiales; cantera de la zona y material de relleno, el cual se emplea en las zonas de los riñones como agente moldeador para emparejar la superficie de las bóvedas y darle las pendientes necesarias para las caídas de agua.

**Tabla 3.** Propiedades mecánicas del material

<b>Material</b>	<b>Módulo de Elasticidad (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Módulo de Poisson</b>	<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>
Cantera de la zona	100 000	0.2	1800
Relleno	50 000	0.2	1600

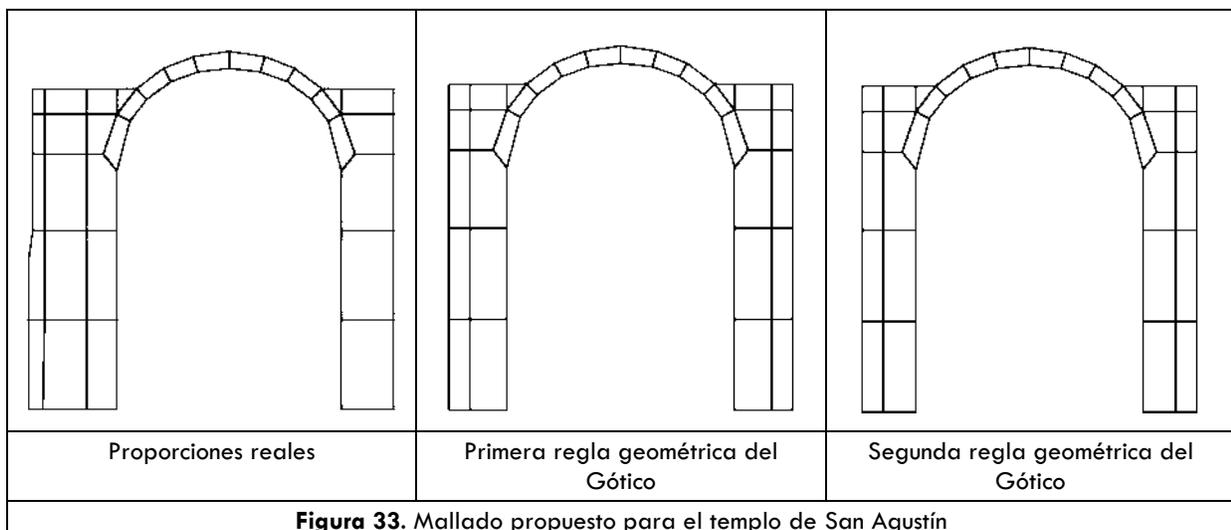
La cantera de la zona y el relleno poseen diferentes propiedades mecánicas que también les confieren diferentes comportamientos sísmicos y estructurales, sin embargo al trabajar juntos se obtiene el comportamiento estructural del modelo completo, ya sean macroelementos transversales o longitudinales.

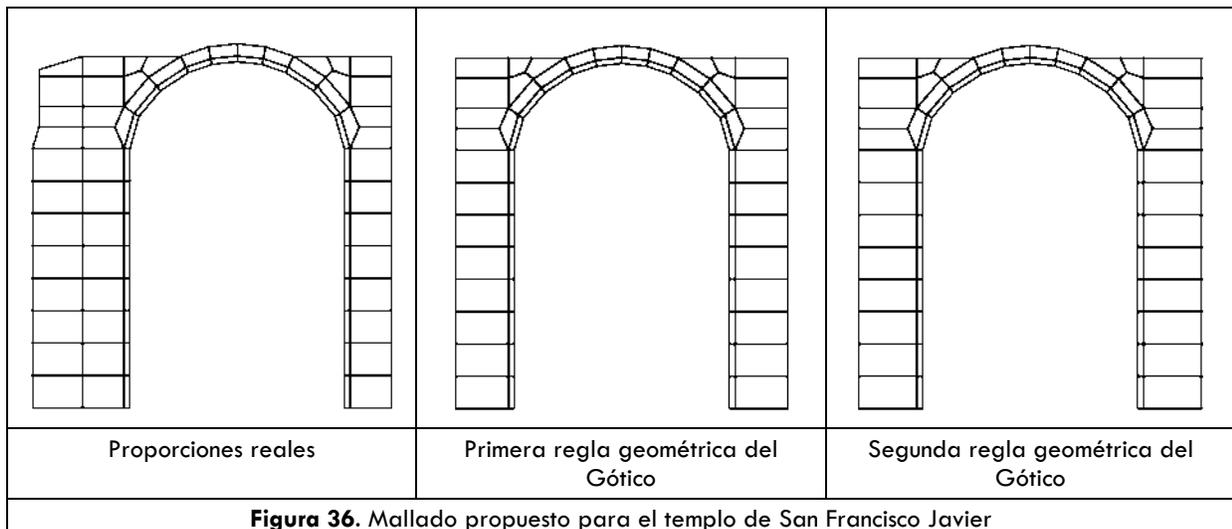
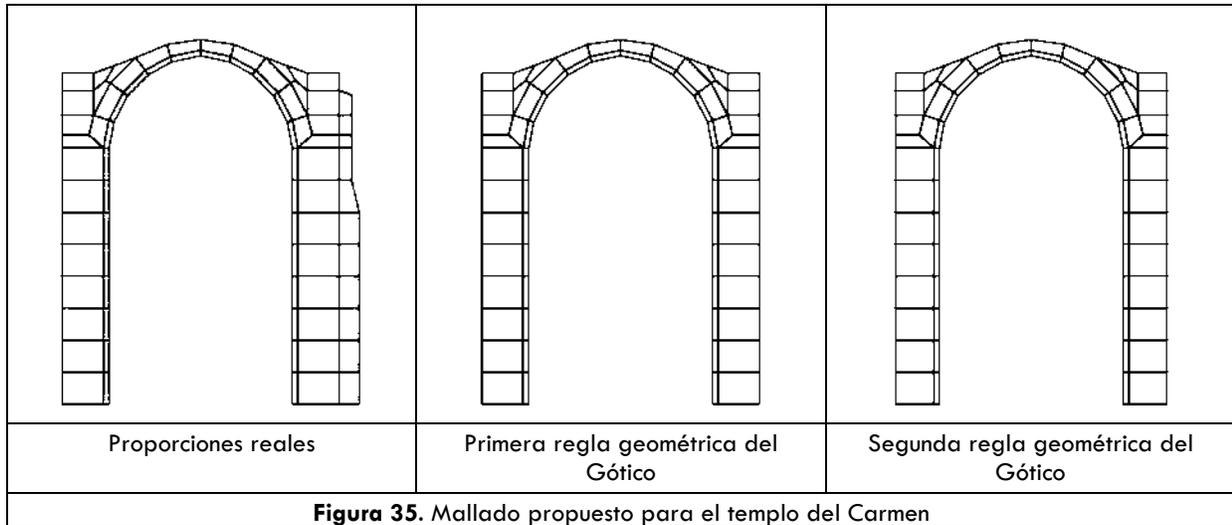
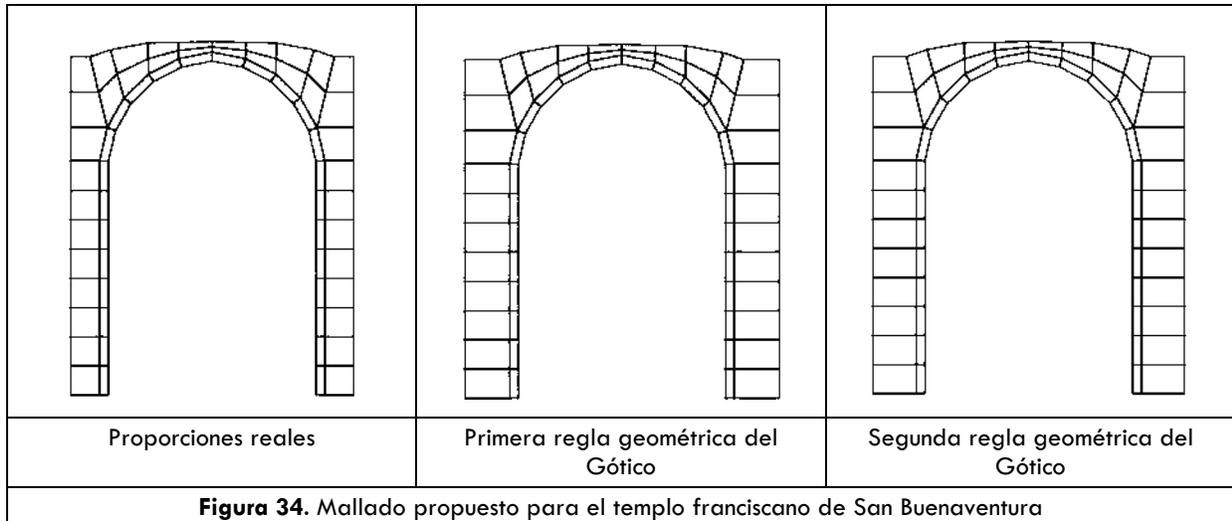
## CONSTRUCCIÓN DE MODELOS

Se ha empleado un modelado bidimensional para el análisis de los macroelementos elegidos, los cuales corresponden a una sección transversal y longitudinal de los trece edificios patrimoniales de carácter religioso identificados en el Capítulo I. Para la definición de estos macroelementos se consideraron las zonas más vulnerables de cada caso en estudio, empleando el criterio de que donde existe mayor rigidez se concentran los mayores estados de esfuerzos.

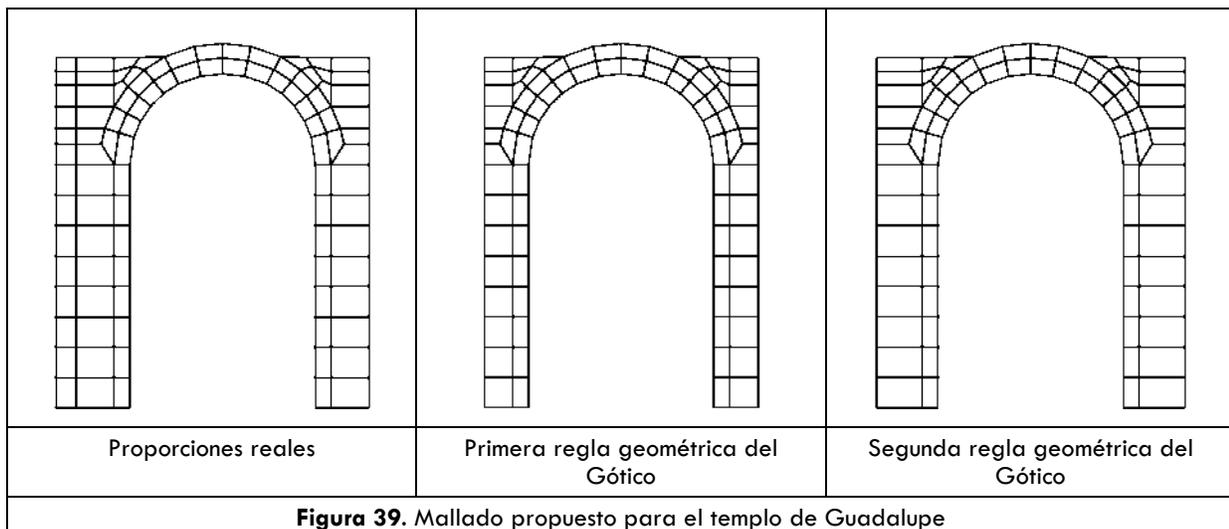
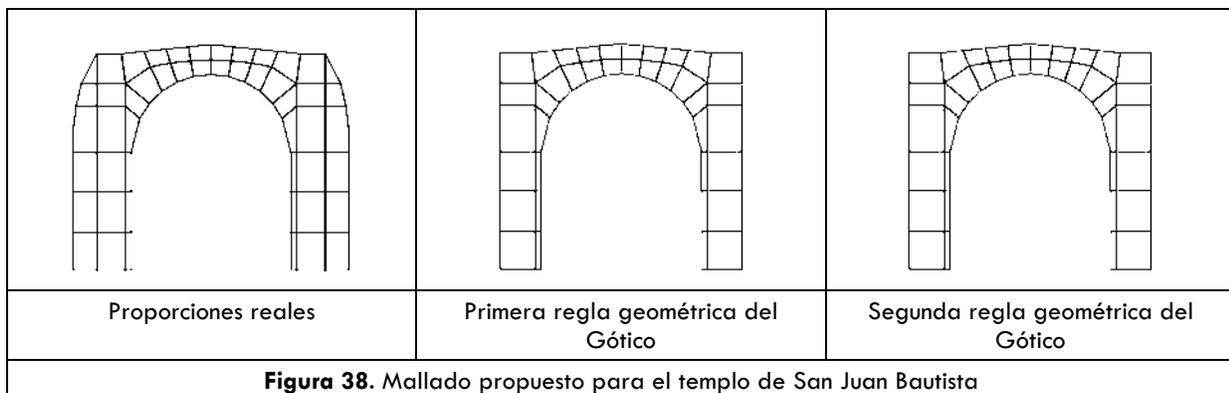
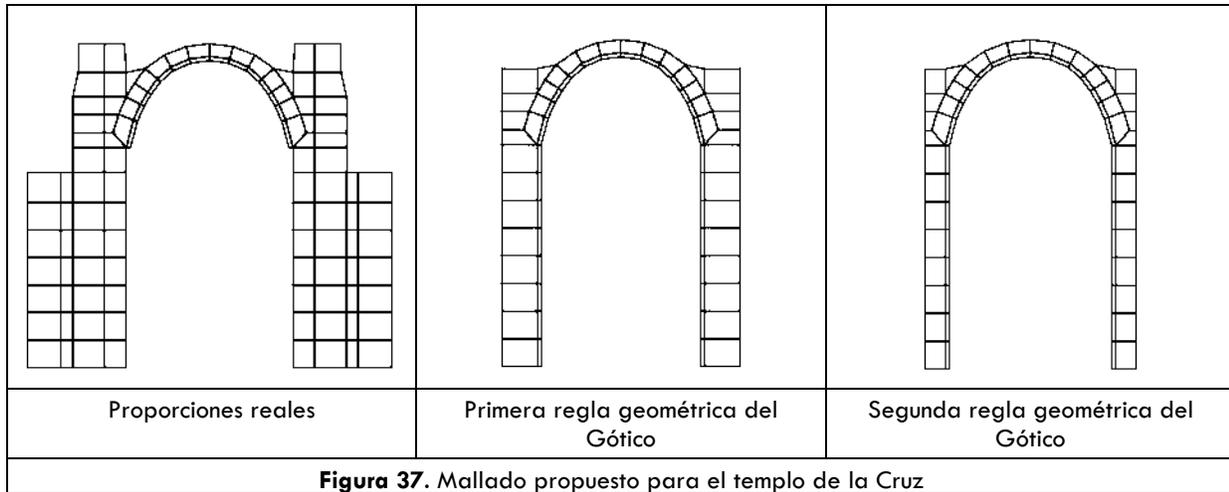
El mallado propuesto para cada uno de los macroelementos se basó en la geometría de cada sección estudiada, y a su vez los valores de espesores proporcionados fueron los obtenidos en campo (ver [Anexo A](#)). Se hace notar que en esta etapa preliminar del estudio no se incluyó el efecto de rigidización proporcionada por las bóvedas ni las zonas del coro.

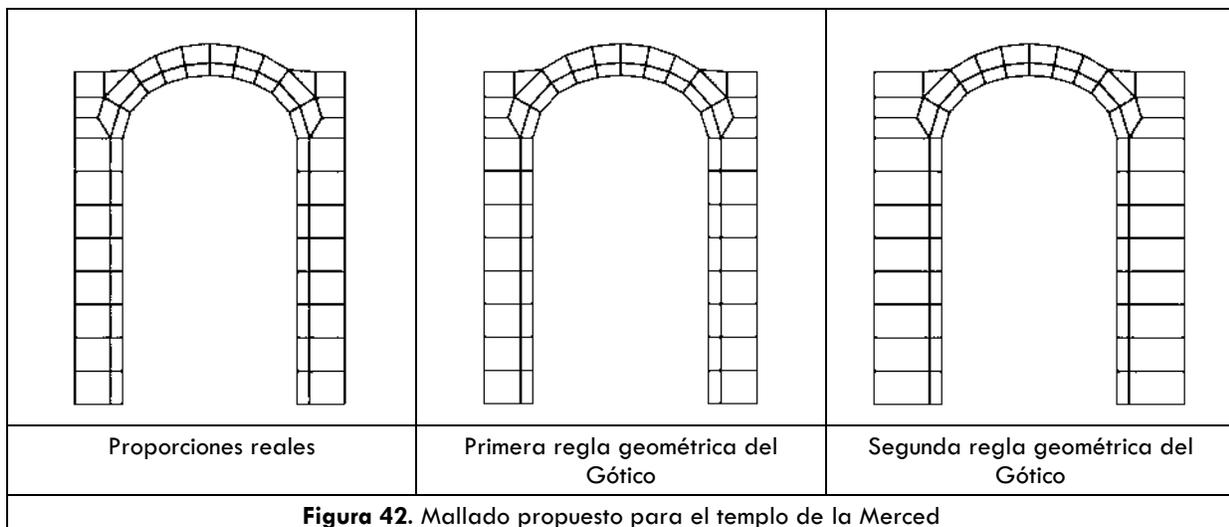
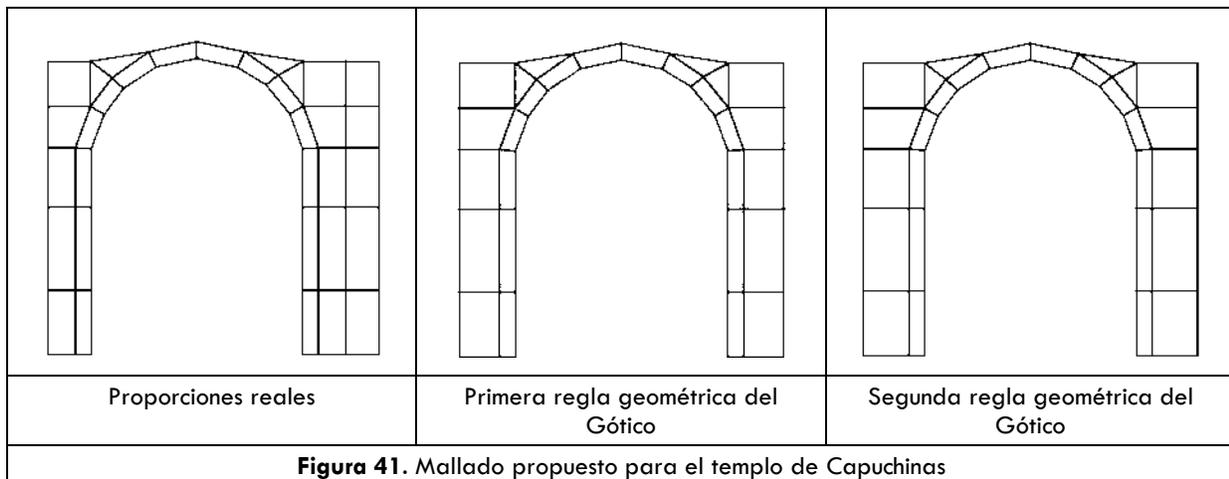
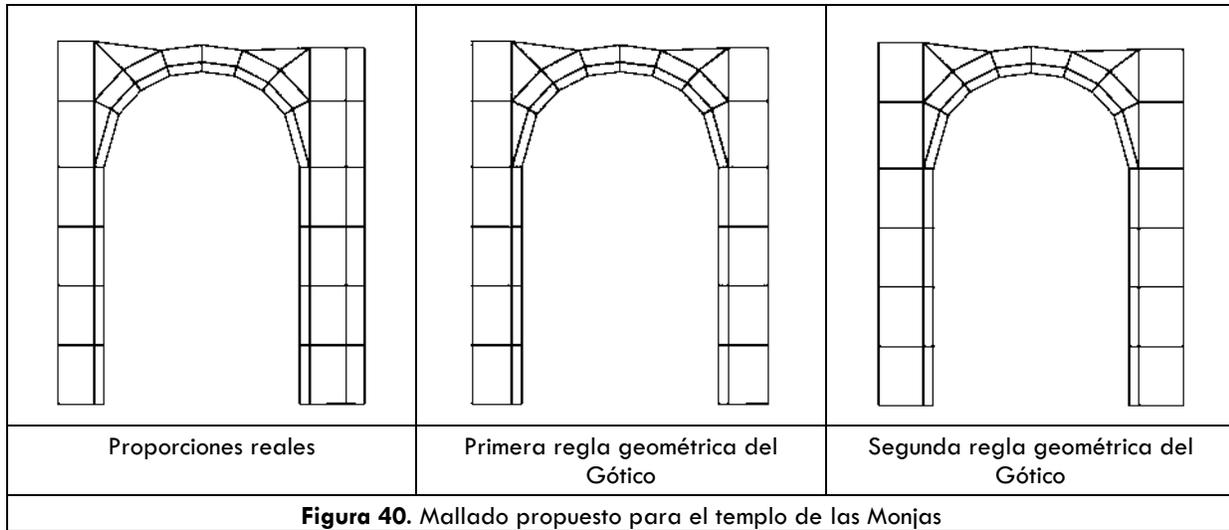
Se puede observar en las [Figuras 33 a la 46](#) que el mallado de las secciones guarda semejanza entre los modelos reales y los modificados, ya que con esto aseguramos que los resultados no varíen de alguna forma haciendo posible una comparación más objetiva, puesto que la malla interviene ligeramente con los resultados obtenidos.

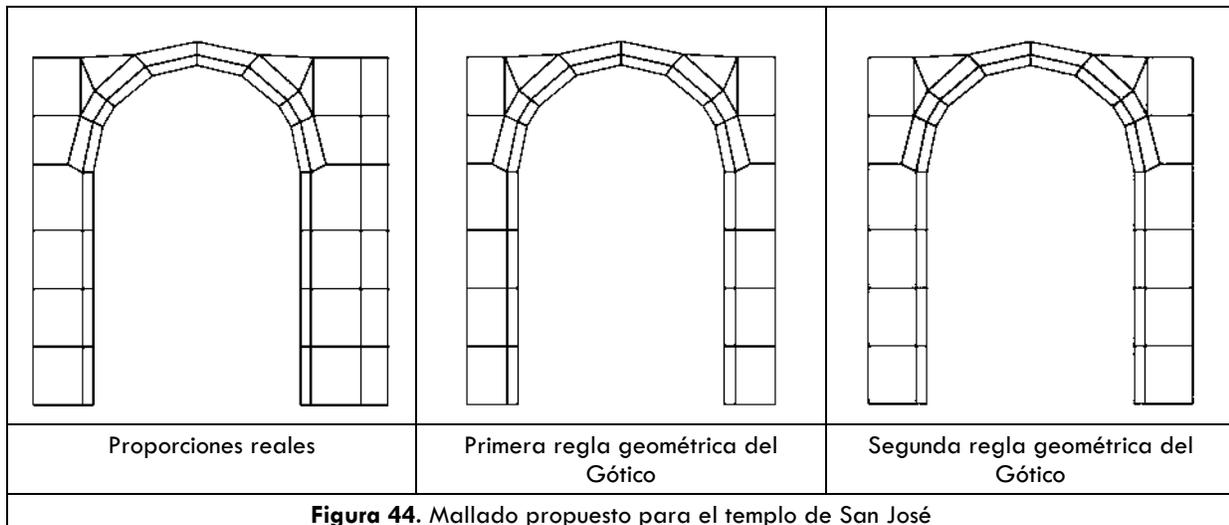
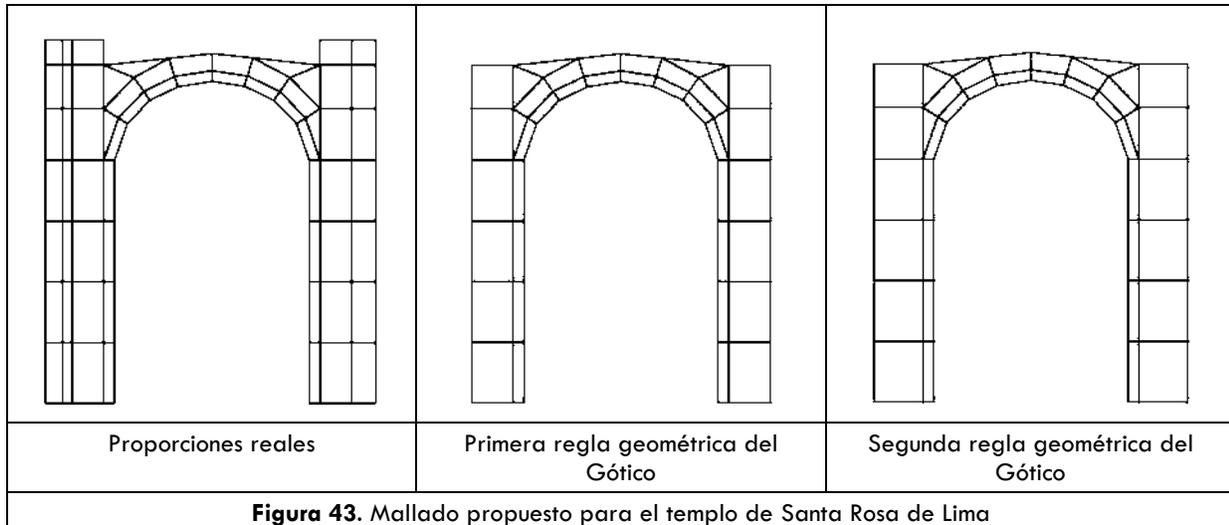




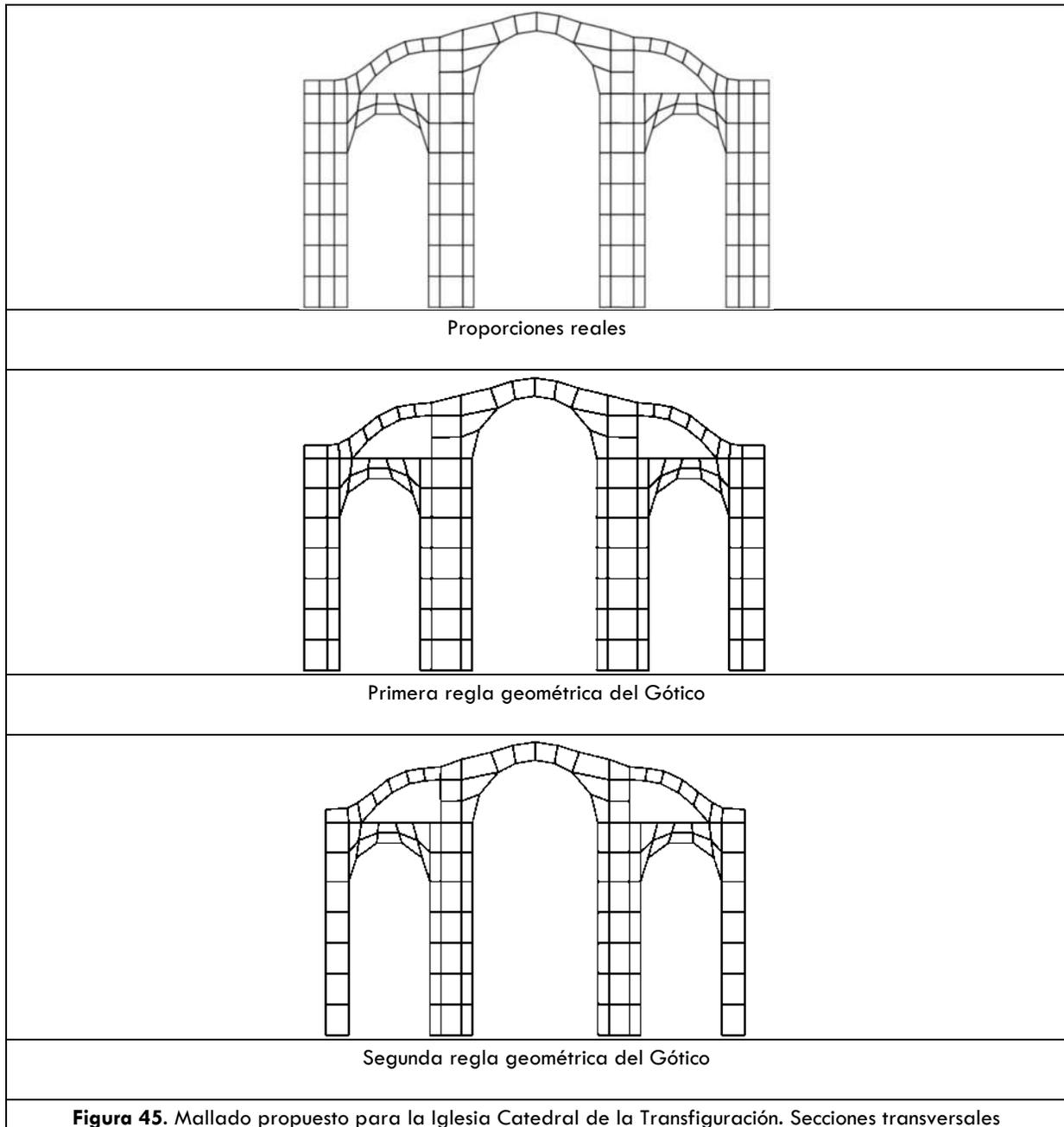
Posgrado de Ingeniería Civil

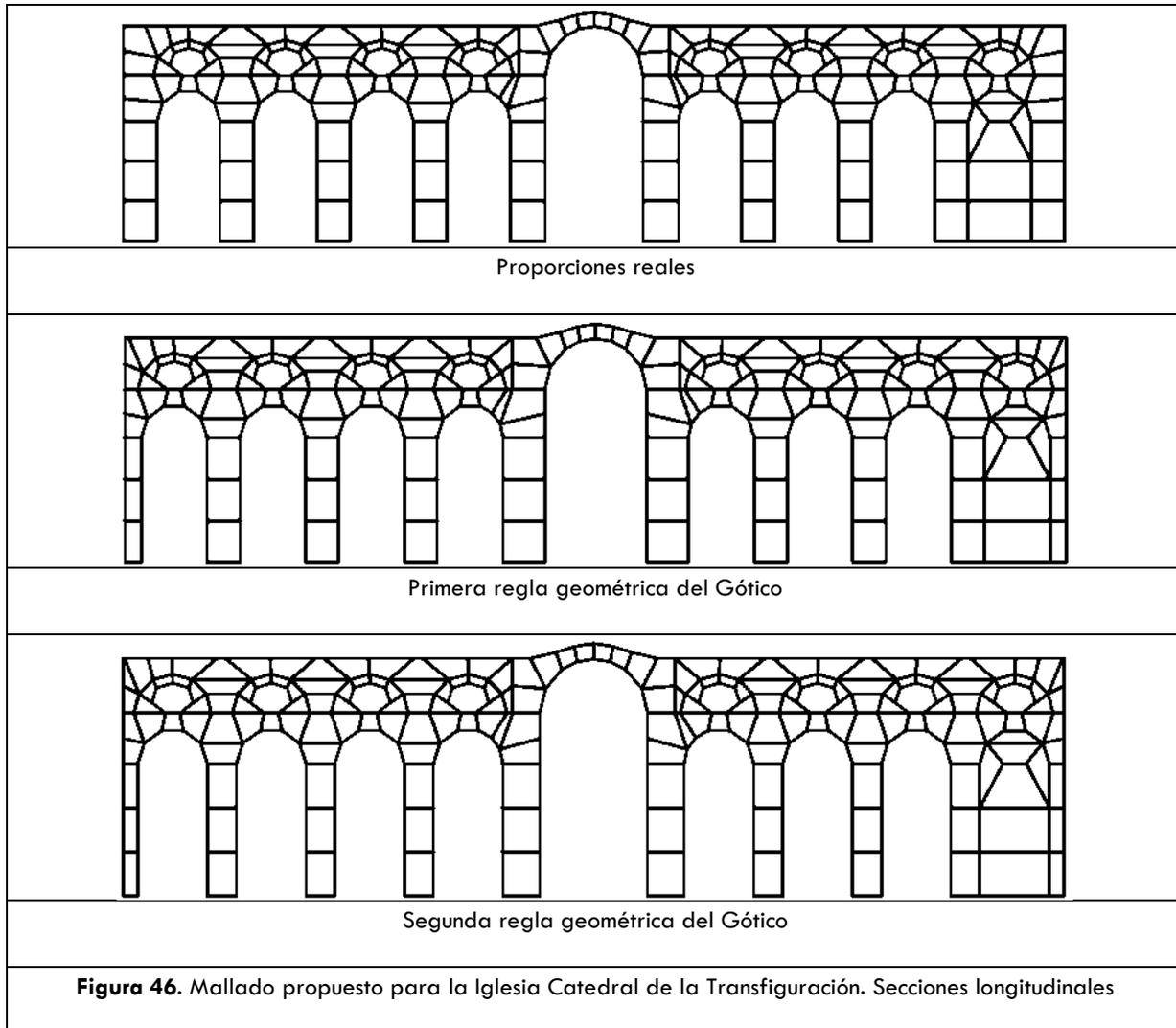






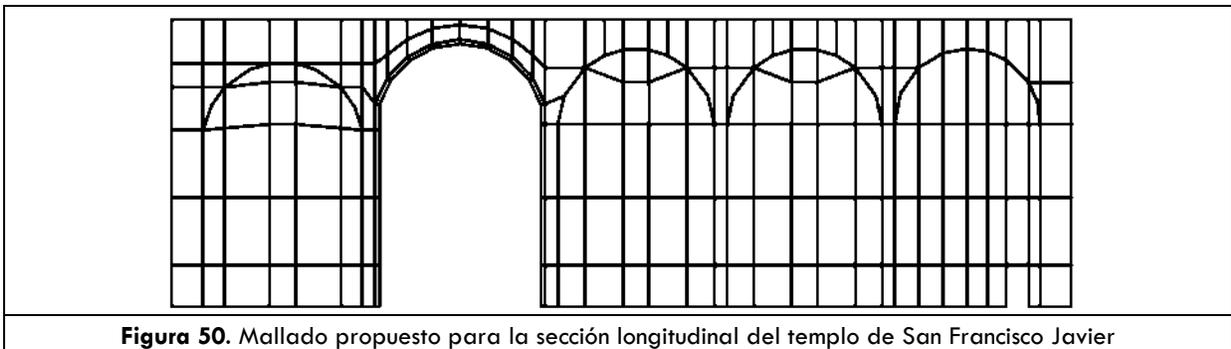
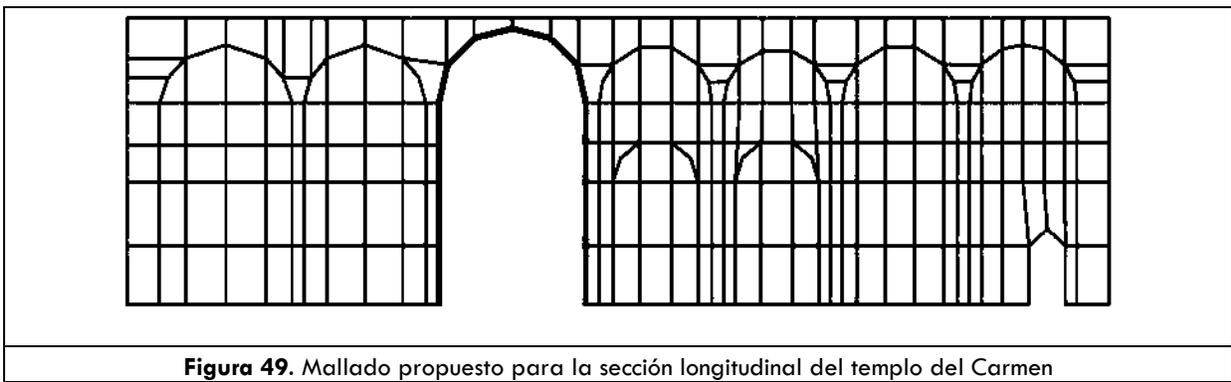
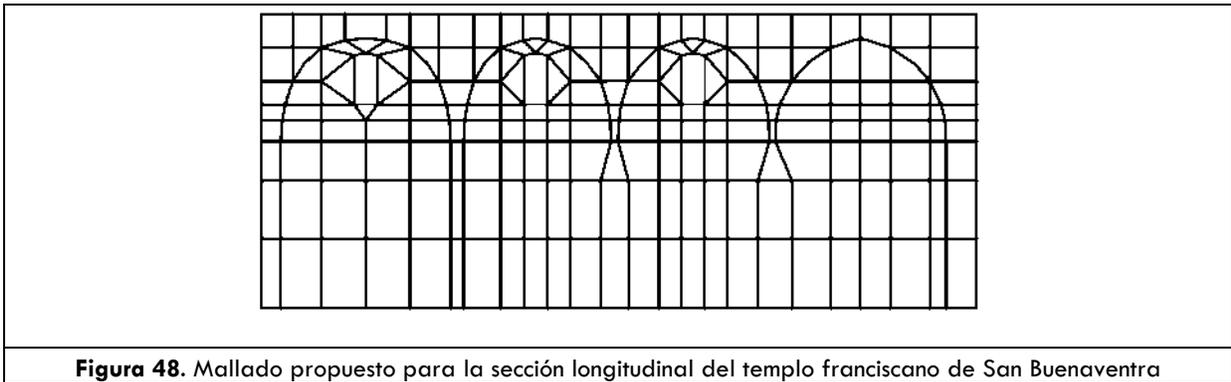
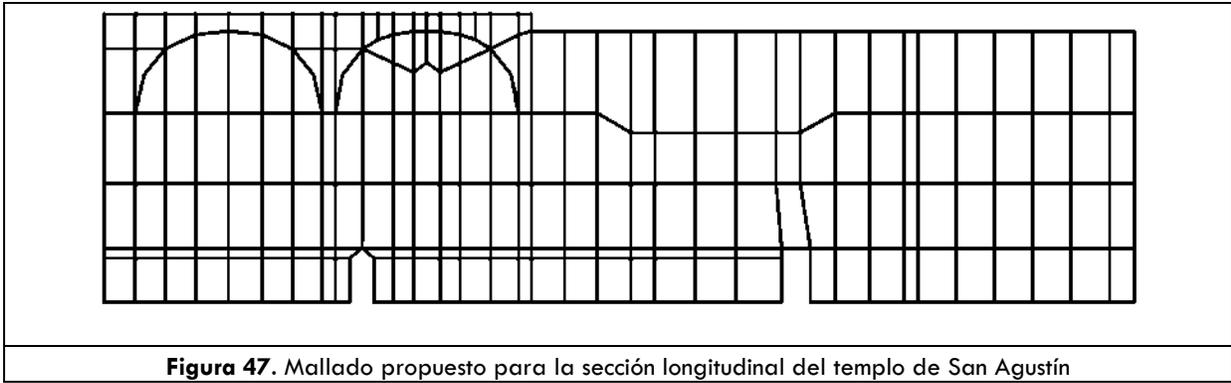
Las secciones anteriores corresponden a las secciones transversales de los doce templos de una nave, en las siguientes figuras encontraremos las secciones transversal y longitudinal de la Iglesia Catedral de la Transfiguración con sus respectivas modificaciones aplicando la primera y la segunda regla geométrica del gótico.

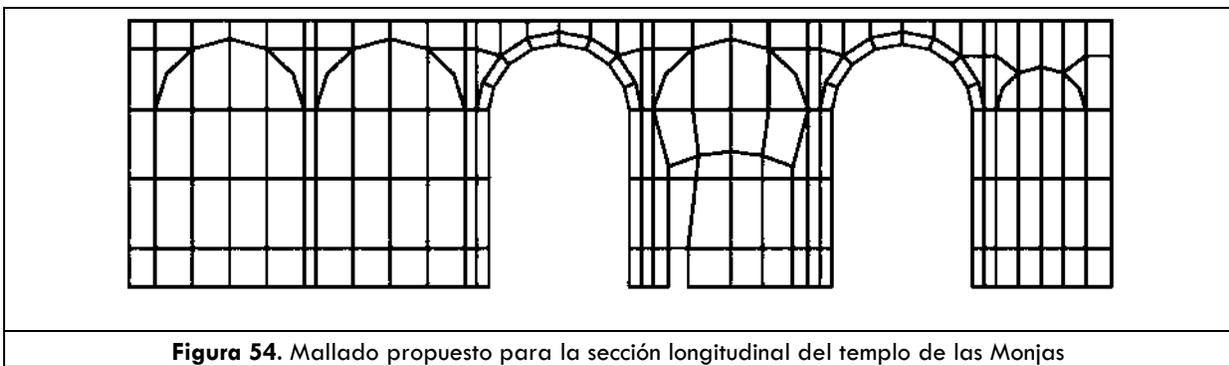
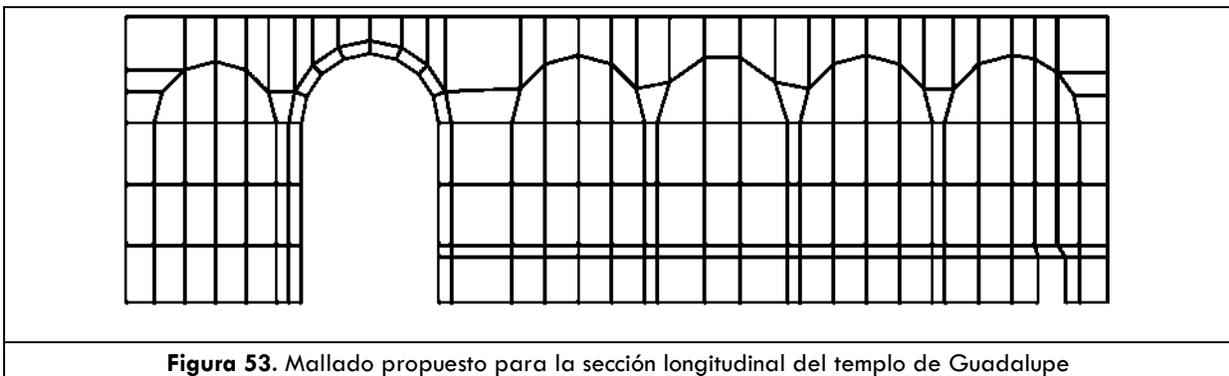
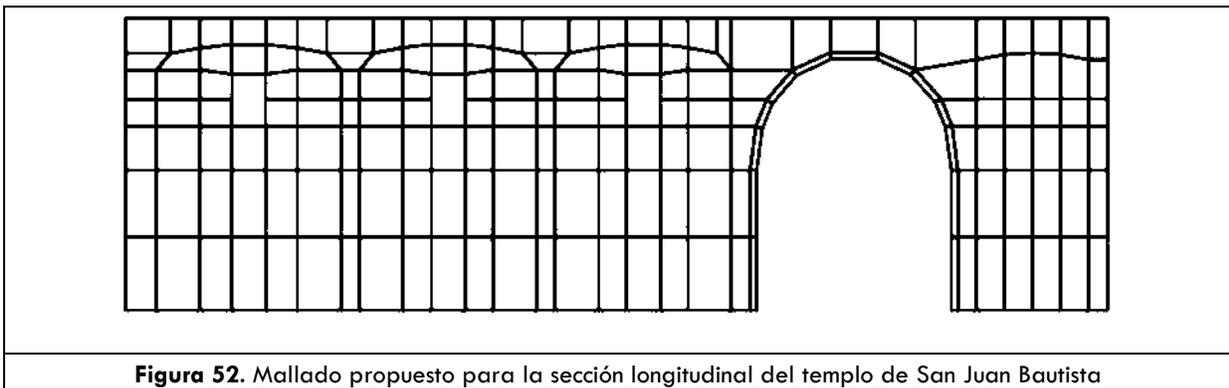
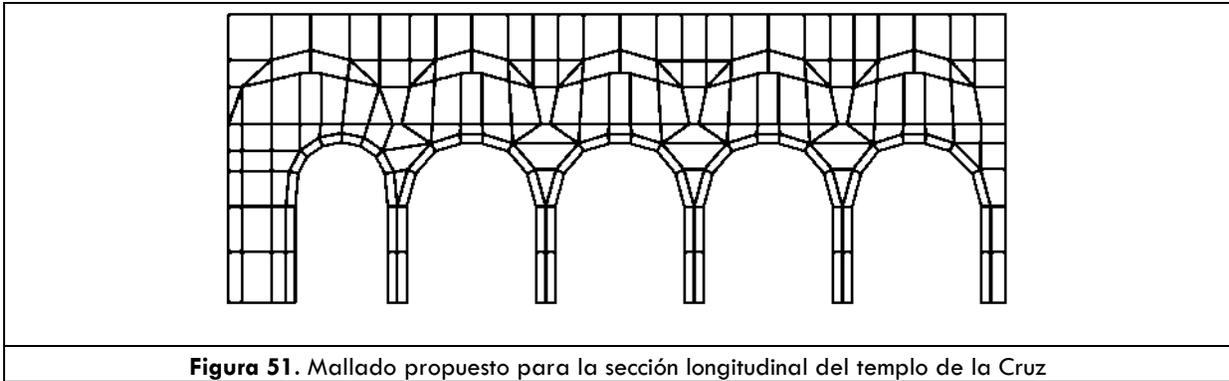


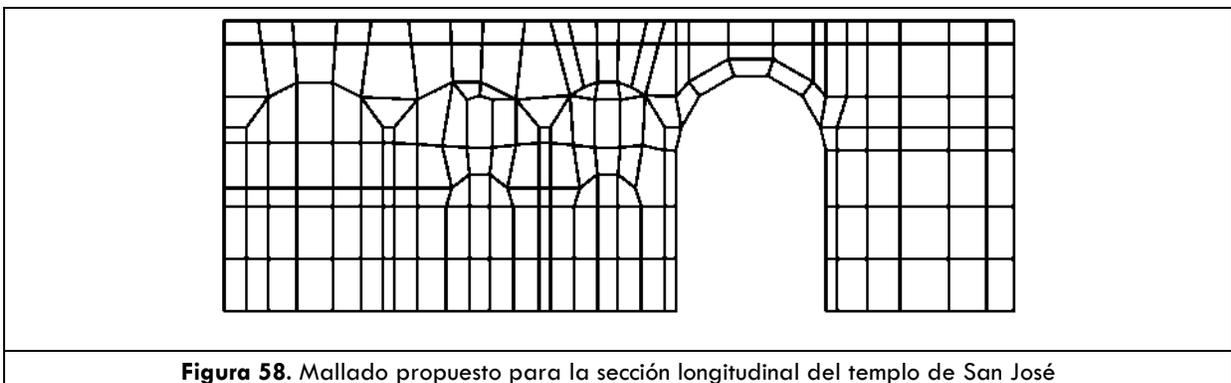
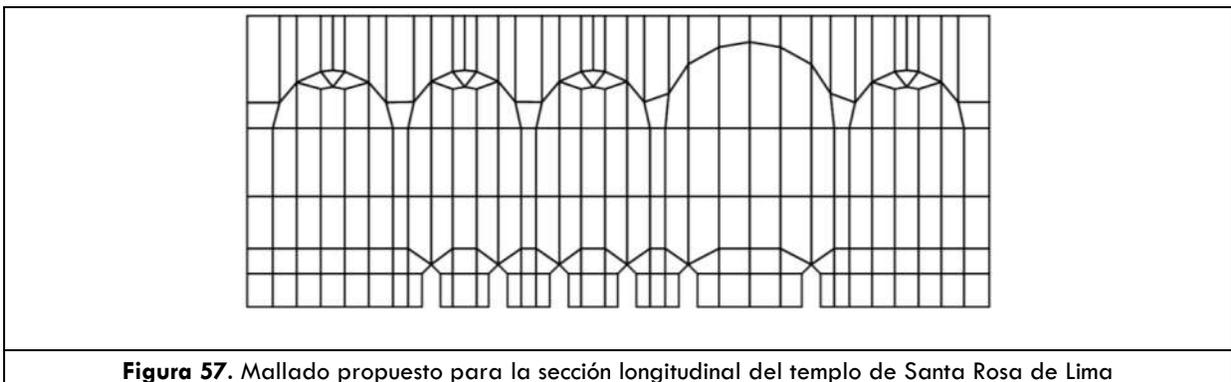
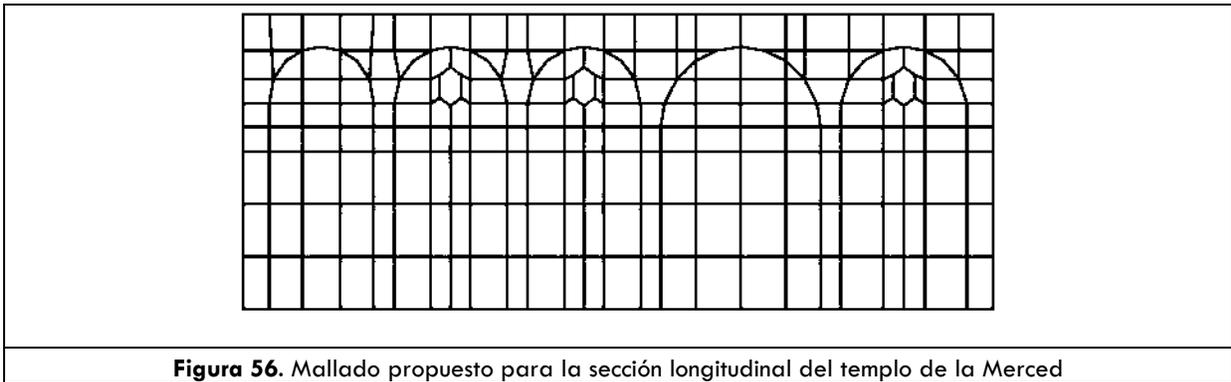
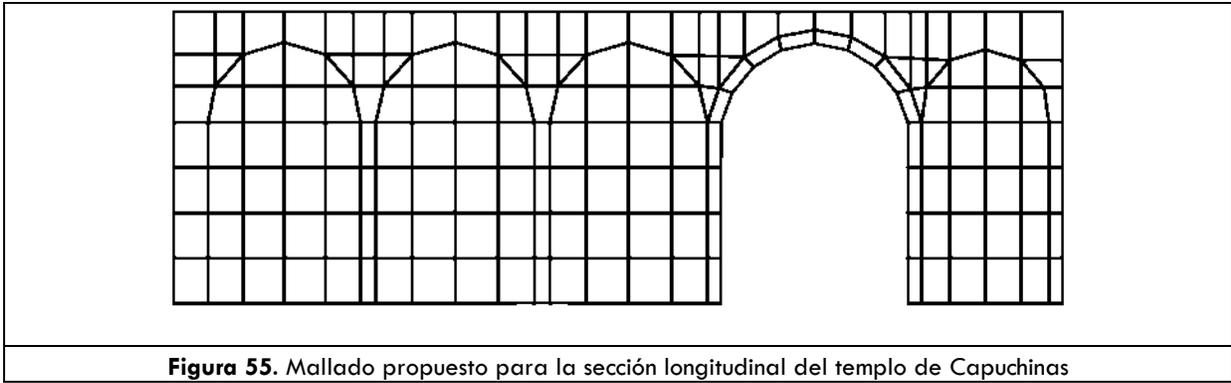


En las Figuras 36 a la 46 se muestran las tres secciones correspondientes a un mismo templo: mallado para proporciones reales; mallado para la sección con la aplicación de la primera regla geométrica del gótico; y finalmente, mallado para la sección con la aplicación de la segunda regla geométrica del gótico.

Como se había mencionado anteriormente, ya que las reglas del gótico solo hacen referencia a los espesores de los apoyos y en las secciones longitudinales las arcadas se encuentran tapiadas, por lo que estos macroelementos se comportan como muro, nos limitaremos a presentar el comportamiento de las secciones longitudinales con sus proporciones reales obtenidas en campo, para lo cual se muestra el mallado propuesto en las siguientes figuras.









# **CAPÍTULO III**

---

## **DESEMPEÑO SÍSMICO**

Cocco et. al (2010) menciona que el Método de Capacidad Espectral fue originalmente introducido en 1975 como un procedimiento para la evaluación rápida de la vulnerabilidad sísmica de edificios. Este método ha pasado por varios procesos de desarrollo y mejoras, desde 1978 hasta 2004, y varios autores, incluido el mismo Freeman.

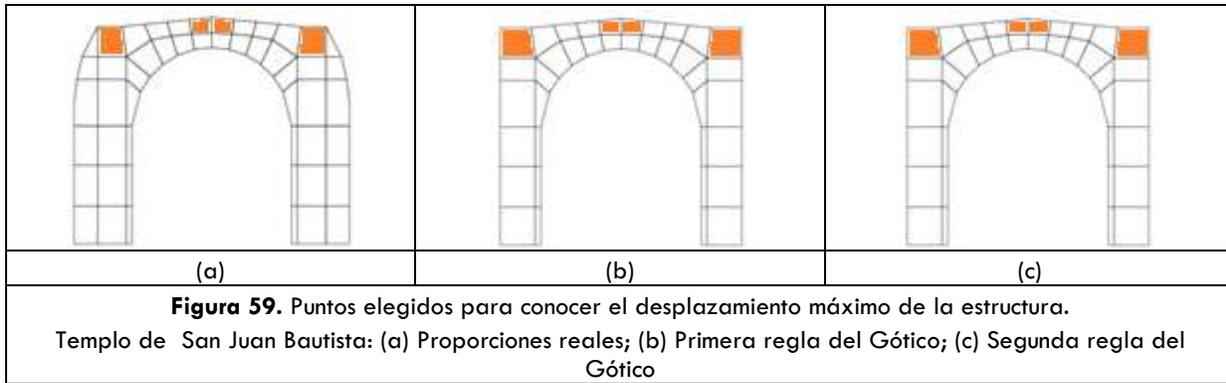
El procedimiento fundamental está basado en un concepto simple, la comparación de la capacidad de la estructura frente a la demanda sísmica.

En este trabajo, para evaluar el desempeño sísmico del conjunto, se optó por emplear este método, que consiste en la realización de análisis de empuje incremental (*pushover*) sobre los modelos de los macroelementos en estudio. Éste se basa en generar una serie de análisis iterativos en los cuales se acelera lateral e incrementalmente la masa del modelo con la finalidad de obtener los máximos desplazamientos antes que la estructura llegue a la falla. Se definen curvas y espectros de capacidad que posteriormente se bilinealizan, y que superpuestos con las demandas sísmicas obtenidas de los análisis determinista y probabilista de peligrosidad sísmica del sitio, conllevan a intersecciones entre los dos espectros conocidas como puntos de desempeño (Freeman, 1998; Fajfar, 1996), cuyos desplazamientos espectrales asociados son un indicador del estado de daño esperado.

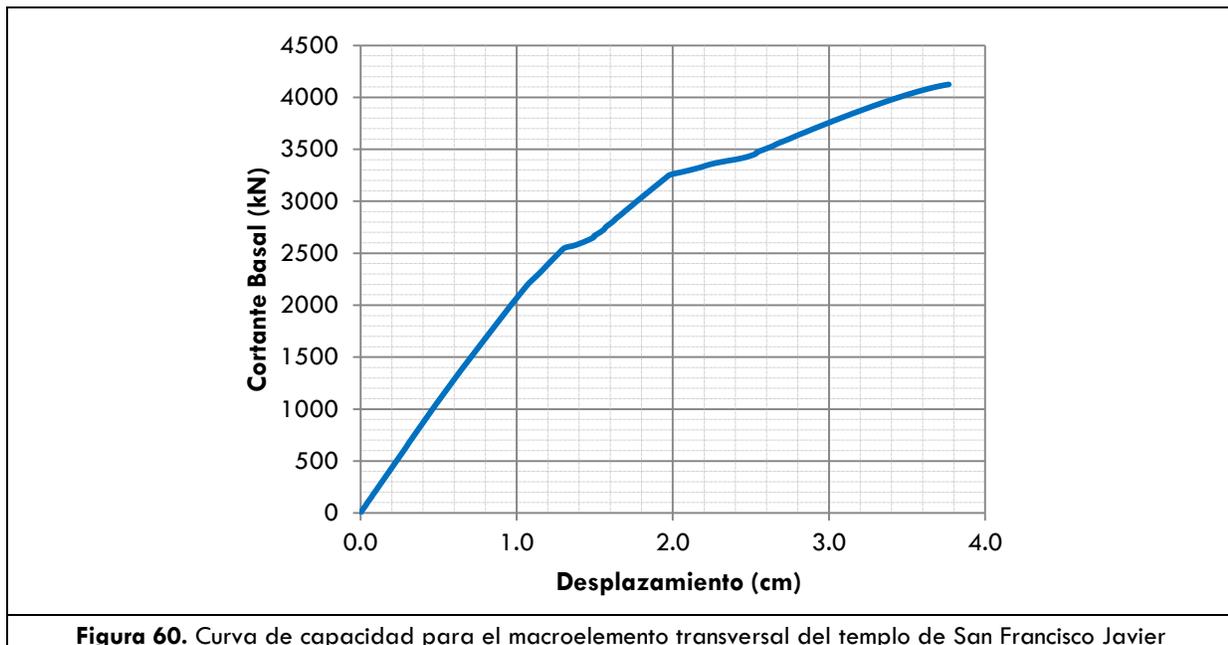
## CURVAS DE CAPACIDAD

El primer paso en la aplicación de este método es la estimación de la curva de capacidad de la estructura, es decir, la relación entre un parámetro representando el nivel de carga lateral aplicada a la estructura y un desplazamiento característico representando la configuración de la deformada de la estructura. Típicamente, el corte basal ( $V_b$ ) contra el desplazamiento de un punto seleccionado del macroelemento (Figura 60).

Ya que suponemos que el punto más alto de la estructura será el que presente mayor desplazamiento, hemos elegido cuatro puntos en la parte superior de cada macroelemento, de los cuales elegiremos el que presente la deformación máxima (ver Figura 59). Este parámetro será el apropiado para graficar contra el cortante basal y así obtener las respectivas curvas de capacidad (las cuatro curvas de cada macroelemento se pueden encontrar en el Anexo B).

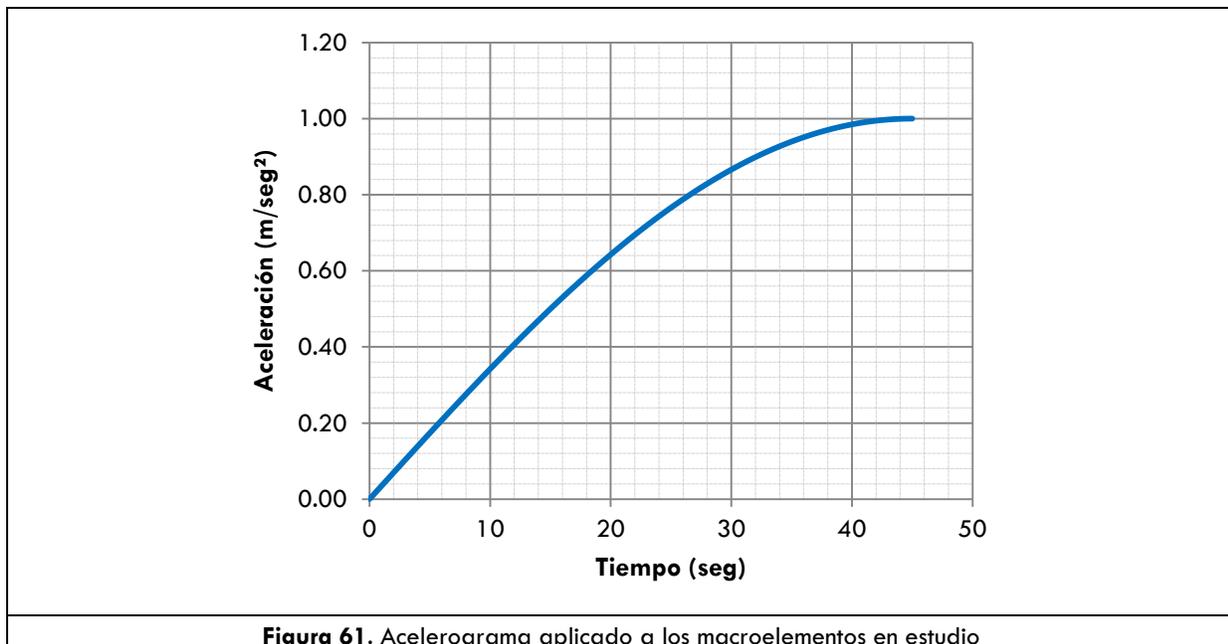


Según Cocco et. al (2010), hay dos formas para obtener la curva de capacidad: una es por medio de “empujar” la estructura hasta que un desplazamiento especificado es alcanzado en un punto característico. Este es realizado por la imposición incremental de desplazamientos, y con la obtención en cada paso el corte basal y el desplazamiento característico. Este método es conocido como procedimiento a desplazamiento controlado. El otro método para determinar la curva de capacidad, conocido como procedimiento a fuerza controlada, está basado en la aplicación de carga lateral, con un cierto patrón de distribución, que es gradualmente incrementada en magnitud mientras se mantiene la forma fija, hasta que un corte basal especificado es alcanzado. El corte basal y el desplazamiento característico son calculados y dibujados para cada paso del proceso de carga.



Un importante atributo del último método es el patrón de carga propuesto. Las cargas laterales aplicadas representan las fuerzas actuantes sobre la estructura cuando es excitada por un terremoto. Por lo tanto, el patrón de carga debe ser lo más similar posible a las fuerzas de inercia generadas por la imposición de movimientos sísmicos. Hay varias distribuciones espaciales propuestas para estas fuerzas laterales: uniformes en altura, proporcionales a la masa tributaria de cada nivel, con un patrón descrito por métodos estáticos de códigos sísmicos, o proporcionales al primer modo. Probablemente el patrón de carga lateral más popular es el que sigue la distribución del modo fundamental. En tal distribución, la magnitud de las fuerzas laterales es proporcional al primer modo elástico y a la matriz de masa de la estructura (Cocco et. al 2010).

Ya que en este trabajo se ha optado por el procedimiento a fuerza controlada, que, como ya hemos mencionado anteriormente, se realiza considerando las fuerzas proporcionales a la masa, aplicando una aceleración horizontal creciente hasta la falla, donde, para el incremento de la aceleración se recomienda utilizar una función sinusoidal (ver [Figura 61](#)), en vez de una lineal, debido a que de esta forma el programa se vuelve más estable numéricamente, en los últimos pasos de carga (Peña, 2010).



**Posgrado de Ingeniería Civil**

Al someter cada macroelemento ante este empuje incremental, conocemos su capacidad ante cargas laterales, así pues, podemos identificar ante los diferentes incrementos de carga el cortante basal producido contra el desplazamiento lateral máximo asociado.

**ESPECTROS DE CAPACIDAD**

Las curvas de capacidad obtenidas anteriormente se encuentran en unidades de cortante basal (kN) contra desplazamiento (cm), sin embargo las unidades de trabajo utilizadas para fines de fragilidad fueron pseudoaceleración (g) contra desplazamiento espectral (cm). Para poder efectuar con esta conversión, Freeman (1998) propone hacerlo utilizando las propiedades dinámicas de la estructura partiendo del factor de participación modal fundamental,  $\Gamma_1$ , el cual indica la participación del modo fundamental de vibración a la respuesta total de la estructura.

Así tenemos que

$\Delta = \Gamma_1 S_d$	(2)
-------------------------	-----

donde  $\Delta$  es el desplazamiento y  $S_d$  el desplazamiento espectral. Despejando el desplazamiento espectral:

$S_d = \frac{\Delta}{\Gamma_1}$	(3)
---------------------------------	-----

También sabemos que la fuerza cortante basal es la suma de las fuerzas sísmicas actuantes:

$V_b = \sum f$	(4)
----------------	-----

$V_b = m\Gamma_1 S_a$	(5)
-----------------------	-----

$V_b = M_1^* S_a$	(6)
-------------------	-----

Donde  $m$  corresponde a la masa del macroelemento y  $S_a$  a la pseudoaceleración. En la **ecuación (6)**  $M_1^*$  se conoce como la masa modal efectiva que se puede calcular como

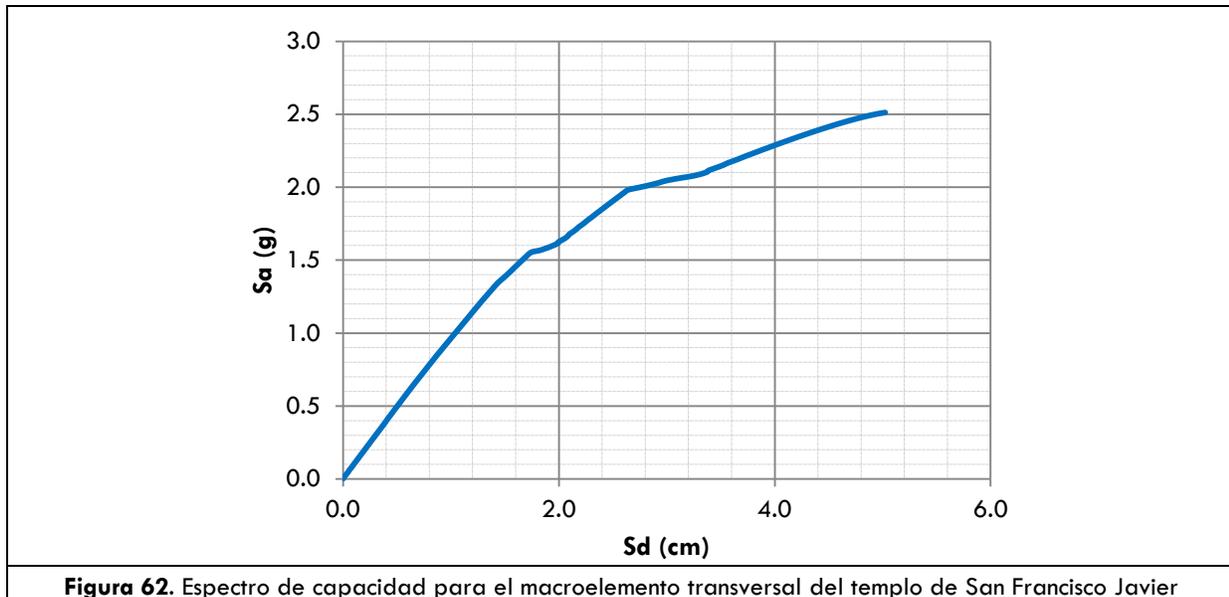
$M_1^* = m\Gamma_1$	(7)
---------------------	-----

Se recomienda que la masa total efectiva nunca sea menor de 0.75 veces la masa total de la estructura (Freeman, 1998).

Finalmente de la ecuación (6) se obtiene

$$S_a = \frac{V_b}{M_1^*} \quad (8)$$

Aplicando las ecuaciones (3) y (8) a las curvas de capacidad se obtiene para cada macroelemento su correspondiente espectro de capacidad.



Es recomendable simplificar los espectros de capacidad generando una bilinealización de los mismos. El punto donde se cruzan la rama elástica y la rama inelástica se conoce como punto de cedencia, y el criterio de bilinealización empleado se basa en la igualdad del área por arriba y por debajo del espectro de capacidad continuo.

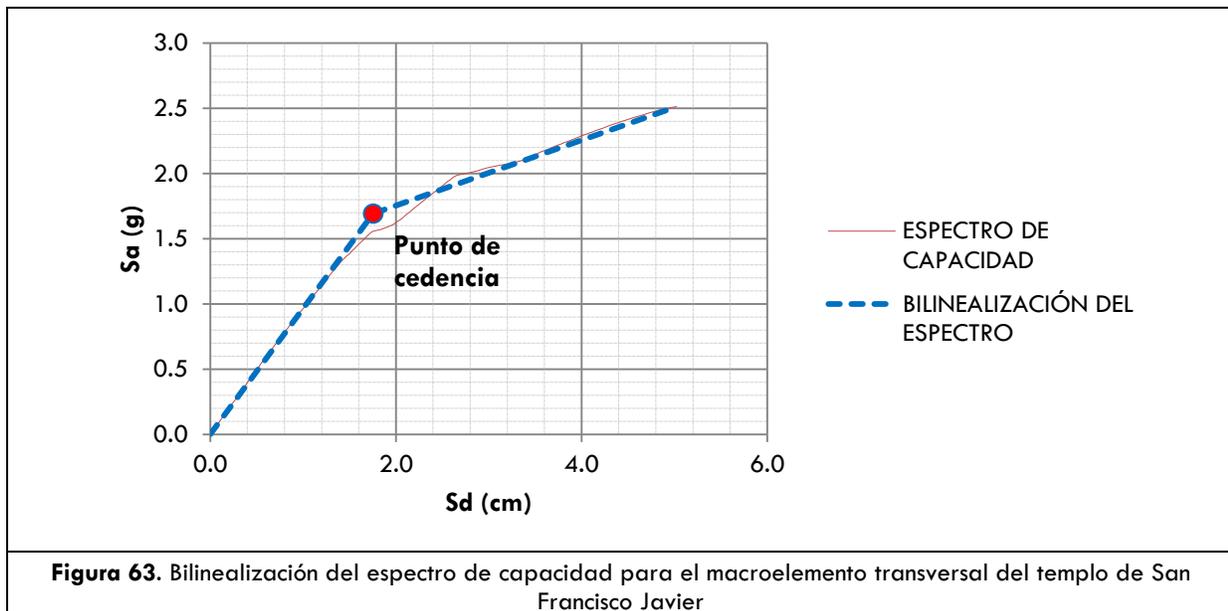
Este proceso se hace con la finalidad de facilitar la obtención de los puntos de desempeño para cada uno de los macroelementos estudiados, ya que dicha simplificación permite conocer con mayor facilidad el punto de cruce entre los espectros de capacidad y demanda.

Al conocer las coordenadas de cada uno de los puntos del espectro, es posible calcular de manera precisa el área bajo la curva.

Como siguiente paso se prosiguió a identificar el punto de cedencia para cada espectro en particular, con el cual se definió la pendiente de la rama ascendente. Para finalizar se prosiguió a trazar la segunda rama del espectro, la cual tiene origen en el punto de

**Posgrado de Ingeniería Civil**

capacidad última el cual se toma como eje rotacional y finaliza al cortar con la rama ascendente, su pendiente es definida al igualar el área del espectro bilineal con el área calculada para el espectro continuo y esto se logra con la variación de la pendiente de la segunda rama. De esta manera se generaron los espectros bilineales para cada uno de los puntos estudiados como se observa en la **Figura 63** (en el **Anexo B** se puede encontrar un apartado con los espectros de capacidad, contrapuestos con su bilinealización, de los puntos de mayor desplazamiento de cada macroelemento).



En las siguientes tablas, podemos observar los datos que corresponden a los espectros de capacidad bilinealizados para cada macroelemento (ver **anexo B**)

**MACROELEMENTOS TRANSVERSALES****Tabla 4.** Espectros de capacidad bilineal para el templo de San Agustín

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	1.0000	0.4131	0.8500	0.2762	0.3600	0.1005
<b>Capacidad última</b>	6.4649	2.0023	8.3239	0.6281	3.6604	0.4772

**Tabla 5.** Espectros de capacidad bilineal para el templo franciscano de San Buenaventura

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)

<b>Punto de cedencia</b>	1.5000	0.3476	1.0000	0.4898	1.1000	0.5740
<b>Capacidad última</b>	4.4291	0.5973	7.2494	1.2892	7.9502	1.2132

Tabla 6. Espectros de capacidad bilineal para el templo del Carmen

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	1.5000	0.9227	0.9500	0.3312	0.8500	0.2900
<b>Capacidad última</b>	4.6671	1.6001	4.5334	1.0134	4.8140	0.9201

Tabla 7. Espectros de capacidad bilineal para el templo de San Francisco Javier

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	1.6000	1.6489	1.0000	0.4382	1.0000	0.5101
<b>Capacidad última</b>	5.1491	2.5116	3.8706	1.2451	3.5761	1.3868

Tabla 8. Espectros de capacidad bilineal para el templo de la Cruz

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	0.9750	3.6240	0.9200	0.3994	1.2200	0.1873
<b>Capacidad última</b>	3.0122	4.7702	3.2425	0.9734	2.9487	0.3601

Tabla 9. Espectros de capacidad bilineal para el templo de San Juan Bautista

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	0.4000	2.8591	0.3500	1.4645	0.3500	1.4645
<b>Capacidad última</b>	1.9540	3.6348	0.7443	2.5243	0.7443	2.5243

Tabla 10. Espectros de capacidad bilineal para el templo de Guadalupe

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	1.0000	0.8072	1.1000	0.4866	1.0000	0.6260
<b>Capacidad última</b>	5.1265	1.5327	2.8589	0.7261	4.2362	1.2534

Tabla 11. Espectros de capacidad bilineal para el templo de las Monjas

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	0.9000	0.6501	0.9000	0.6045	0.9000	0.7107
<b>Capacidad última</b>	3.9885	1.3498	4.0511	1.1714	4.1366	1.3151

Tabla 12. Espectros de capacidad bilineal para el templo de Capuchinas

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	0.5000	0.7314	0.9000	0.9919	0.9000	1.7198
<b>Capacidad última</b>	4.7759	1.6584	3.1950	1.7955	2.7968	2.9947

Tabla 13. Espectros de capacidad bilineal para el templo de la Merced

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	0.8000	0.3503	0.8000	0.3503	0.6500	0.5221
<b>Capacidad última</b>	5.4975	1.0600	5.4975	1.0600	3.5813	1.6337

Tabla 14. Espectros de capacidad bilineal para el templo de Santa Rosa de Lima

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	1.4000	0.9406	1.2000	0.6068	1.5000	0.7131
<b>Capacidad última</b>	4.4562	1.4800	2.1794	0.9947	3.6130	1.3638

**Tabla 15.** Espectros de capacidad bilineal para el templo de San José

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	1.3000	0.5651	1.3000	0.2894	1.5000	0.4648
<b>Capacidad última</b>	4.8473	1.4438	6.2907	0.8547	5.4070	1.1516

**Tabla 16.** Espectros de capacidad bilineal para la Iglesia Catedral de la Transfiguración

	PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
<b>Punto de cedencia</b>	0.8000	0.8926	0.6500	0.7044	0.5000	0.2858
<b>Capacidad última</b>	7.3796	1.2785	6.0190	1.2533	1.5735	0.7867

**MACROELEMENTOS LONGITUDINALES****Tabla 17.** Espectros de capacidad bilineales para templos de una sola nave. Macroelementos longitudinales.

<b>TEMPLO</b>		<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
Templo de San Agustín	Punto de cedencia	0.6000	8.7565
	Capacidad última	0.8506	11.3330
Templo franciscano de San Buenaventura	Punto de cedencia	0.8000	8.0941
	Capacidad última	1.2837	11.3330
Templo del Carmen	Punto de cedencia	0.7000	8.1126
	Capacidad última	2.2139	11.7267
Templo de San Francisco Javier	Punto de cedencia	0.3500	3.0905
	Capacidad última	0.8394	5.5977
Templo de la Cruz	Punto de cedencia	0.8000	1.1277
	Capacidad última	1.5390	1.7514
Templo de San Juan Bautista	Punto de cedencia	0.7000	15.7954
	Capacidad última	2.1229	23.9990
Templo de Guadalupe	Punto de cedencia	0.4500	4.3349
	Capacidad última	1.8542	6.6664
Templo de las Monjas	Punto de cedencia	1.0000	6.7260
	Capacidad última	3.2518	10.0444
Templo de Capuchinas	Punto de cedencia	1.0000	15.8046
	Capacidad última	3.2295	24.7108
Templo de la Merced	Punto de cedencia	1.0000	19.4813
	Capacidad última	1.8650	22.6658
Templo de Santa Rosa de Lima	Punto de cedencia	0.4500	7.0384
	Capacidad última	0.5561	8.2851
Templo de San José	Punto de cedencia	1.5000	8.1603
	Capacidad última	3.0198	11.3330

**Tabla 18.** Espectros de capacidad bilineal para la Iglesia Catedral de la Transfiguración

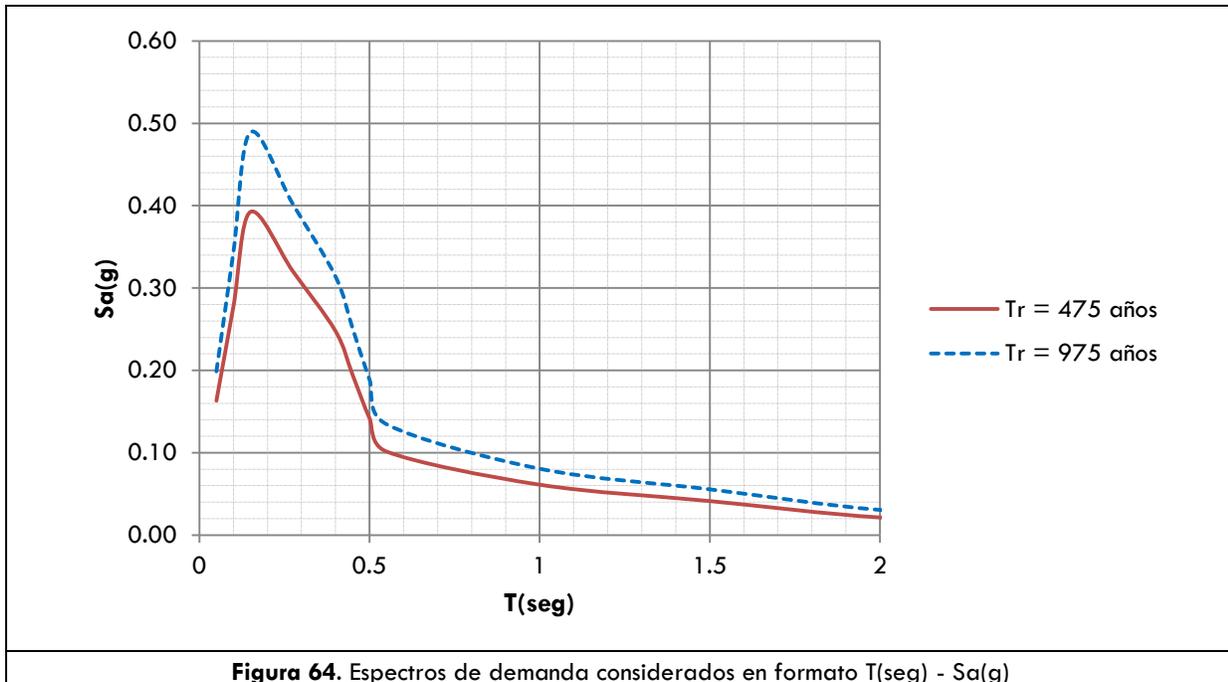
	<b>PROPORCIONES REALES</b>		<b>PRIMERA REGLA DEL GÓTICO</b>		<b>SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO</b>	
	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
<b>Punto de cedencia</b>	1.0000	0.9396	0.6000	0.4991	0.5000	0.3544
<b>Punto último</b>	3.2141	2.1048	2.4844	1.3920	3.7531	1.3333

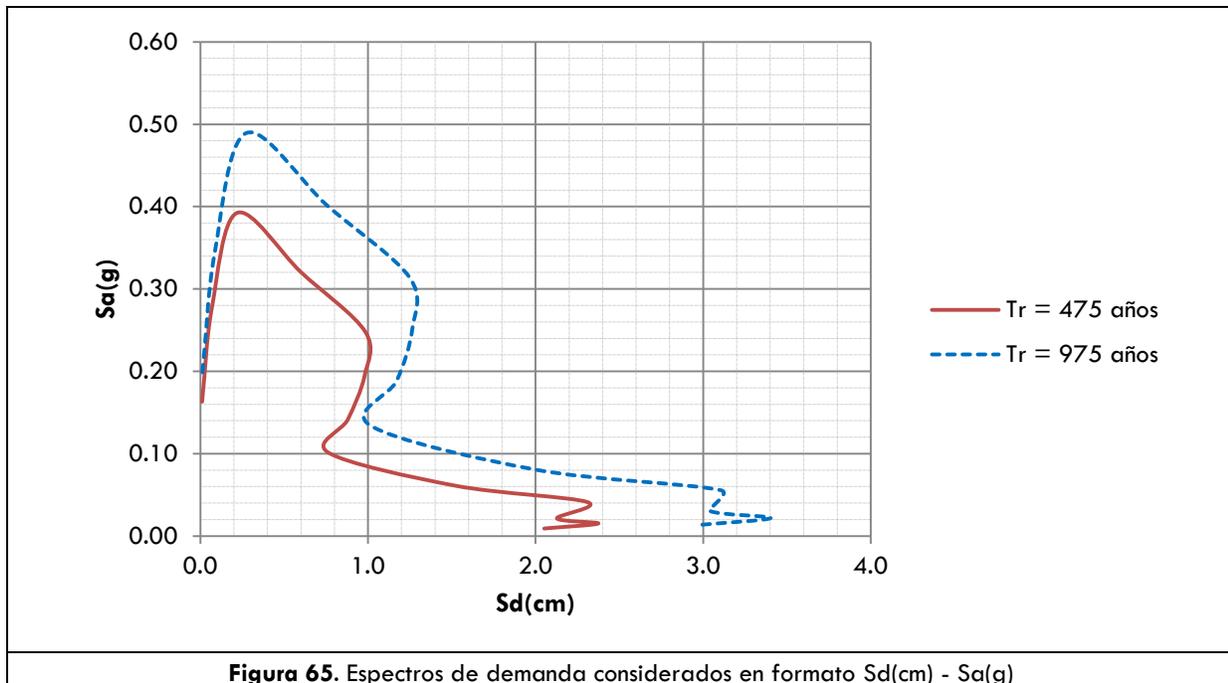
## DEMANDA SÍSMICA

Se utilizaron espectros de peligro uniforme desarrollados específicamente para la ciudad de Morelia, tomando en cuenta el terreno firme sobre el que se encuentra desplantado el Colegio de San Nicolás.

Dichos espectros probabilistas fueron desarrollados por el Dr. José Manuel Jara Guerrero (Gaytán, 2010), los cuales incluyen fuentes de subducción, sismicidad local y fallamiento normal considerando periodos de retorno de 475 y 975 años (ver [Figura 64](#)). En la [Figura 65](#) se muestran los espectros de demanda en formato desplazamiento espectral ( $S_d$ ) contra pseudoaceleración ( $S_a$ ), modificación realizada para la posterior interacción de los mismos con la capacidad de la estructura, empleando la [ecuación \(9\)](#). Cabe mencionar que en estructuras de tipo histórico se deberán de emplear recurrencias mayores a las consideradas en edificios contemporáneos, por lo que las utilizadas en el presente estudio pueden tomarse como las mínimas necesarias.

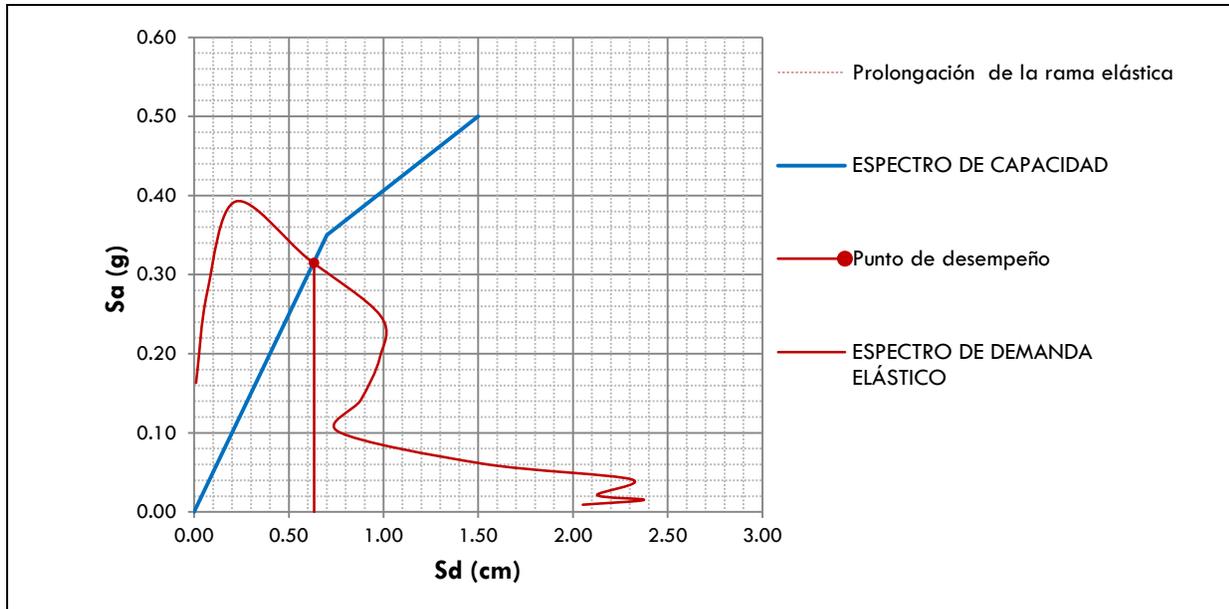
$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a$	(9)
--------------------------------	-----





## DESEMPEÑO SÍSMICO

Al superponer el espectro de demanda sísmica contra el espectro de capacidad de la estructura obtenemos el llamado punto de desempeño (Freeman, 1998; Fajfar, 1996). Como habíamos mencionado anteriormente, el desplazamiento espectral asociado a este punto es un indicador del estado de daño esperado, pero también representa el punto de máxima solicitud de la capacidad de la estructura por parte de la demanda a la que se está sometiendo. El espectro de capacidad bilineal está formado por dos ramas: una que representa el comportamiento lineal o elástico de la estructura; y la segunda rama que representa el comportamiento inelástico de la misma. Si la intersección entre capacidad y demanda se presenta en el rango elástico del espectro de capacidad, el punto obtenido es directamente el punto de desempeño, y no es necesaria reducción alguna por inelasticidad del espectro de demanda, como podemos observar en la [Figura 66](#).



**Figura 66.** Ejemplo de la obtención del punto de desempeño en el rango elástico del espectro de capacidad.

Mientras que en la **Figura 67** se muestra que el cruce de los espectros se da en el rango inelástico del espectro de capacidad, por lo que debemos considerar la disipación histerética de energía en el sistema mediante la reducción del espectro elástico de demanda, con lo que podremos obtener el punto de desempeño en dicho rango inelástico.

El procedimiento utilizado para generar esta reducción es el propuesto por el método N2, para lo cual no se requieren iteraciones gráficas obteniendo los resultados de manera directa.

Al extender la rama elástica del espectro de capacidad y emplear el criterio de iguales desplazamientos, el cual se basa en el supuesto de que el desplazamiento espectral inelástico es el mismo que el que se presentaría si la estructura se comportara de forma lineal, podemos encontrar que dicho desplazamiento indicará también el punto de intersección de ambos espectros, es decir el punto de desempeño en el rango inelástico.

Lo anterior se puede definir como:

$Sa_e = Sa_p$	(10)
---------------	------

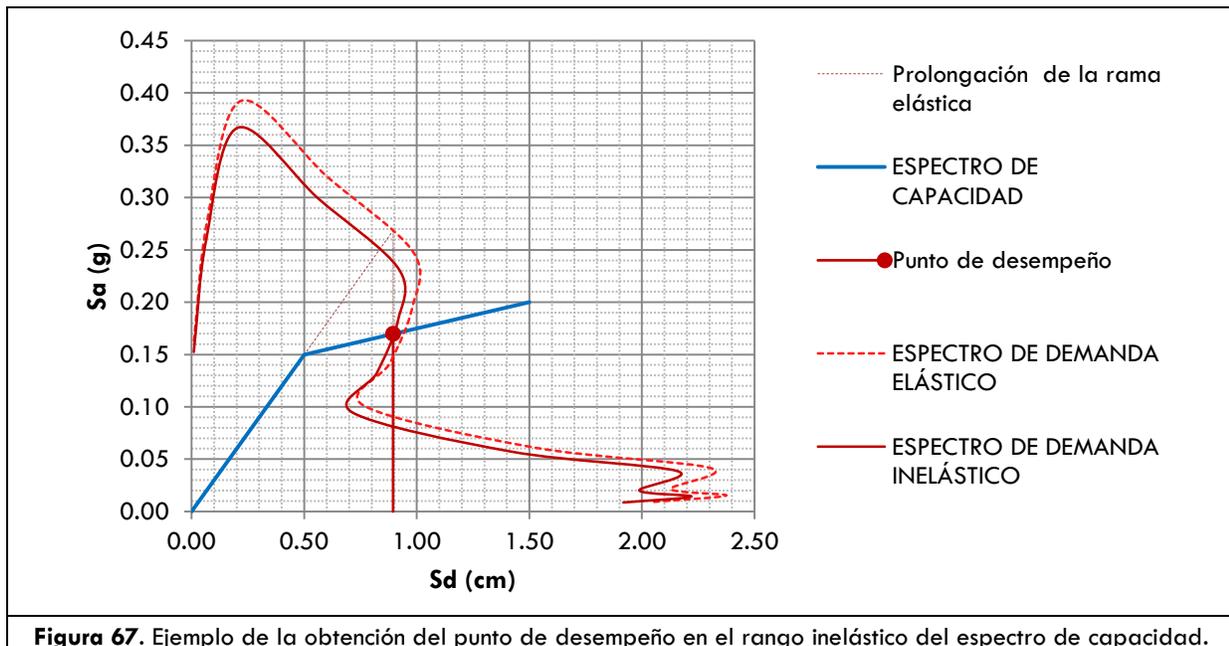
Donde  $Sa_e$  representa el desplazamiento espectral producto del cruce del espectro de capacidad en su rango elástico y  $Sa_p$  el desplazamiento espectral para el rango inelástico del mismo espectro de capacidad.

**Posgrado de Ingeniería Civil**

Por otro lado encontramos que la relación de pseudoaceleraciones correspondientes a los sistemas elástico e inelástico representa el factor de resistencia debida a ductilidad, lo cual se puede representar de la siguiente manera:

$R_{\mu} = S a_e / S a_p$	(11)
---------------------------	------

La **Figura 67** nos muestra de forma gráfica lo explicado anteriormente, ya que nos encontramos con una intersección capacidad-demanda en el rango inelástico del espectro de capacidad.



**Figura 67.** Ejemplo de la obtención del punto de desempeño en el rango inelástico del espectro de capacidad.

En las siguientes tablas encontraremos los valores de la pseudoaceleración ( $S_a$ ) y desplazamiento espectral ( $S_d$ ) correspondientes al punto de desempeño para cada uno de los macroelementos estudiados, pueden observarse las gráficas en el **Anexo B**, para cualquier duda acerca de los valores.

## PUNTOS DE DESEMPEÑO PARA MACROELEMENTOS TRANSVERSALES

**Tabla 19.** Puntos de desempeño para el templo de San Agustín

PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.7300	0.3018	0.8500	0.2760	0.9360	0.1663
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.9100	0.3760	1.0710	0.2866	1.1808	0.1942

**Tabla 20.** Puntos de desempeño para el templo franciscano de San Buenaventura

PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
1.0050	0.2329	0.6400	0.3136	0.6105	0.3187
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
1.2750	0.2954	0.8100	0.3968	0.7700	0.4019

**Tabla 21.** Puntos de desempeño para el templo del Carmen

PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.5400	0.3325	0.8075	0.2815	0.8245	0.2830
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.6750	0.4155	1.0260	0.3456	1.0370	0.3198

**Tabla 22.** Puntos de desempeño para el templo de San Francisco Javier

PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.3648	0.3768	0.6930	0.3038	0.6200	0.3165
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.4560	0.4707	0.8700	0.3813	0.7800	0.3980

**Tabla 23.** Puntos de desempeño para el templo de la Cruz

## Posgrado de Ingeniería Civil

PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.0751	0.2814	0.6946	0.3016	0.7320	0.1124
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.0946	0.3538	0.8786	0.3815	1.0370	0.1593

Tabla 24. Puntos de desempeño para el templo de San Juan Bautista

PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.0292	0.2103	0.0648	0.2720	0.0648	0.2720
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.0348	0.2503	0.0805	0.3379	0.0805	0.3379

Tabla 25. Puntos de desempeño para el templo de Guadalupe

PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.4450	0.3595	0.6875	0.3042	0.5300	0.3320
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.5600	0.4523	0.8580	0.3796	0.6700	0.4196

Tabla 26. Puntos de desempeño para el templo de las Monjas

PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.4860	0.3510	0.4860	0.3459	0.4293	0.3584
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.6030	0.4356	0.6210	0.4302	0.5490	0.4480

Tabla 27. Puntos de desempeño para el templo de Capuchinas

PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
---------------------	--	--------------------------	--	--------------------------	--

<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.2700	0.3955	0.3420	0.3775	0.2043	0.3915
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.3350	0.4904	0.4293	0.4736	0.2547	0.4878

**Tabla 28.** Puntos de desempeño para el templo de la Merced

<b>PROPORCIONES REALES</b>		<b>PRIMERA REGLA DEL GÓTICO</b>		<b>SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO</b>	
<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.6960	0.3048	0.6720	0.3051	0.3835	0.3084
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.8720	0.3612	0.8496	0.3710	0.4810	0.3866

**Tabla 29.** Puntos de desempeño para el templo de Santa Rosa de Lima

<b>PROPORCIONES REALES</b>		<b>PRIMERA REGLA DEL GÓTICO</b>		<b>SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO</b>	
<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.5082	0.3418	0.6240	0.3157	0.6525	0.3105
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.6342	0.4264	0.7800	0.3946	0.8205	0.3903

**Tabla 30.** Puntos de desempeño para el templo de San José

<b>PROPORCIONES REALES</b>		<b>PRIMERA REGLA DEL GÓTICO</b>		<b>SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO</b>	
<b>TR = 475 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.7020	0.3054	1.0140	0.2258	0.8775	0.2720
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.8840	0.3844	1.3000	0.2894	1.1100	0.3440

**Tabla 31.** Puntos de desempeño para la Iglesia Catedral de la Transfiguración

<b>PROPORCIONES REALES</b>		<b>PRIMERA REGLA DEL GÓTICO</b>		<b>SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO</b>	
<b>TR = 475 años</b>					

**Posgrado de Ingeniería Civil**

<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.3400	0.3802	0.3484	0.3778	0.5700	0.3185
<b>TR = 975 años</b>					
<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>	<b>Sd (cm)</b>	<b>Sa (g)</b>
0.4240	0.4738	0.4355	0.4721	0.7150	0.3862

Al comparar las tablas anteriores, podemos darnos una idea del comportamiento sísmico de los edificios, que si bien ya se ha observado en capítulos anteriores su geometría, estos valores vienen a corroborar algunas suposiciones a las que se llegaron con el solo hecho de observar los gráficos que representan los modelos de cada uno de los macroelementos. Algunas de estas suposiciones se refieren a que la mayoría de las secciones de los templos estudiados presentan un mejor comportamiento ante la demanda sísmica, si se analizan con sus proporciones reales, ya que al modificar su geometría para integrar las reglas del gótico sugeridas para este estudio, los espesores de los apoyos cambiaron a uno menor. Sin embargo existen casos para los cuales el resultado fue el contrario, el espesor de los apoyos aumentó, ayudando así a mejorar su comportamiento.

Al comparar las tablas anteriores, podemos darnos una idea del comportamiento sísmico de los edificios, que si bien ya se ha observado en capítulos anteriores las diferencias en su geometría, estos valores vienen a corroborar algunas suposiciones a las que se llegaron con el solo hecho de observar los gráficos que representan los modelos de cada uno de los macroelementos. Algunas de estas suposiciones se refieren a que la mayoría de las secciones de los templos estudiados presentan un mejor comportamiento ante la demanda sísmica, si se analizan con sus proporciones reales, ya que al modificar su geometría para integrar las reglas del gótico sugeridas para este estudio, los espesores de los apoyos cambiaron a uno menor. Sin embargo existen casos para los cuales el resultado fue el contrario, el espesor de los apoyos aumentó, ayudando así a mejorar su comportamiento.

En la mayoría de los casos se puede observar que ante las proporciones reales, el macroelemento presenta una mayor capacidad de carga, lo cual lo hace más resistente, sin embargo menos dúctil, es decir que para una mayor aplicación de carga, en comparación con los macroelementos que presentan las modificaciones en sus proporciones, se presenta un menor desplazamiento. Por el contrario, en los casos donde los apoyos fueron de menor espesor al ser modificados, se llegó a un mayor desplazamiento con una menor aplicación de

carga, en comparación con la capacidad de su respectivo macroelemento con las proporciones reales.

Un caso particular fue el presentado por el templo de San Juan Bautista, el cual presenta los mismos valores para el punto de desempeño, tanto ante la primera como ante la segunda regla del gótico, ya que, como se había mencionado en el apartado de la modificación de las secciones, debido a la modulación de este arco, ambas modificaciones resultan ser iguales.

Existe otro caso, el de la sección de la Merced, que presenta prácticamente el mismo espesor de apoyos en la modificación de la primera regla del gótico con sus proporciones reales, lo que, en consecuencia, hace que los resultados para los respectivos puntos de desempeño sean muy parecidos.

Cabe mencionar que los periodos de retorno influyen en la demanda esperada, como es lógico, por lo que al comparar el comportamiento esperado con TR=475 años contra el comportamiento esperado con TR=975 años, podemos observar que el segundo es más demandante tanto en pseudoaceleración como en desplazamiento espectral.

### PUNTOS DE DESEMPEÑO PARA MACROELEMENTOS LONGITUDINALES

Tabla 32. Puntos de desempeño para el templo de San Agustín

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.0108	0.1628	0.0132	0.1978

Tabla 33. Puntos de desempeño para el templo franciscano de San Buenaventura

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.0168	0.1752	0.0208	0.2157

Tabla 34. Puntos de desempeño para el templo del Carmen

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.0140	0.1677	0.0175	0.2082

**Tabla 35.** Puntos de desempeño para el templo de San Francisco Javier

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.0210	0.1879	0.0256	0.2280

**Tabla 36.** Puntos de desempeño para el templo de la Cruz

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.2760	0.3910	0.3440	0.4866

**Tabla 37.** Puntos de desempeño para el templo de San Juan Bautista

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.0068	0.1650	0.0081	0.1934

**Tabla 38.** Puntos de desempeño para el templo de Guadalupe

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.0180	0.1764	0.0225	0.2197

**Tabla 39.** Puntos de desempeño para el templo de las Monjas

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.0310	0.2132	0.0380	0.2603

**Tabla 40.** Puntos de desempeño para el templo de Capuchinas

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.0095	0.1617	0.0120	0.2011

**Tabla 41.** Puntos de desempeño para el templo de la Merced

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.0080	0.1668	0.0095	0.1960

**Tabla 42.** Puntos de desempeño para el templo de Santa Rosa de Lima

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.0104	0.1656	0.0126	0.2008

**Tabla 43.** Puntos de desempeño para el templo de San José

TR = 475 años		TR = 975 años	
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.0420	0.2340	0.0540	0.2992

**Tabla 44.** Puntos de desempeño para la iglesia Catedral de la Transfiguración

PROPORCIONES REALES		PRIMERA REGLA DEL GÓTICO		SEGUNDA REGLA DEL GÓTICO	
<b>TR = 475 años</b>					
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.3900	0.3671	0.4320	0.3595	0.4875	0.3456
<b>TR = 975 años</b>					
Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)	Sd (cm)	Sa (g)
0.4900	0.4610	0.5400	0.4493	0.6100	0.3875

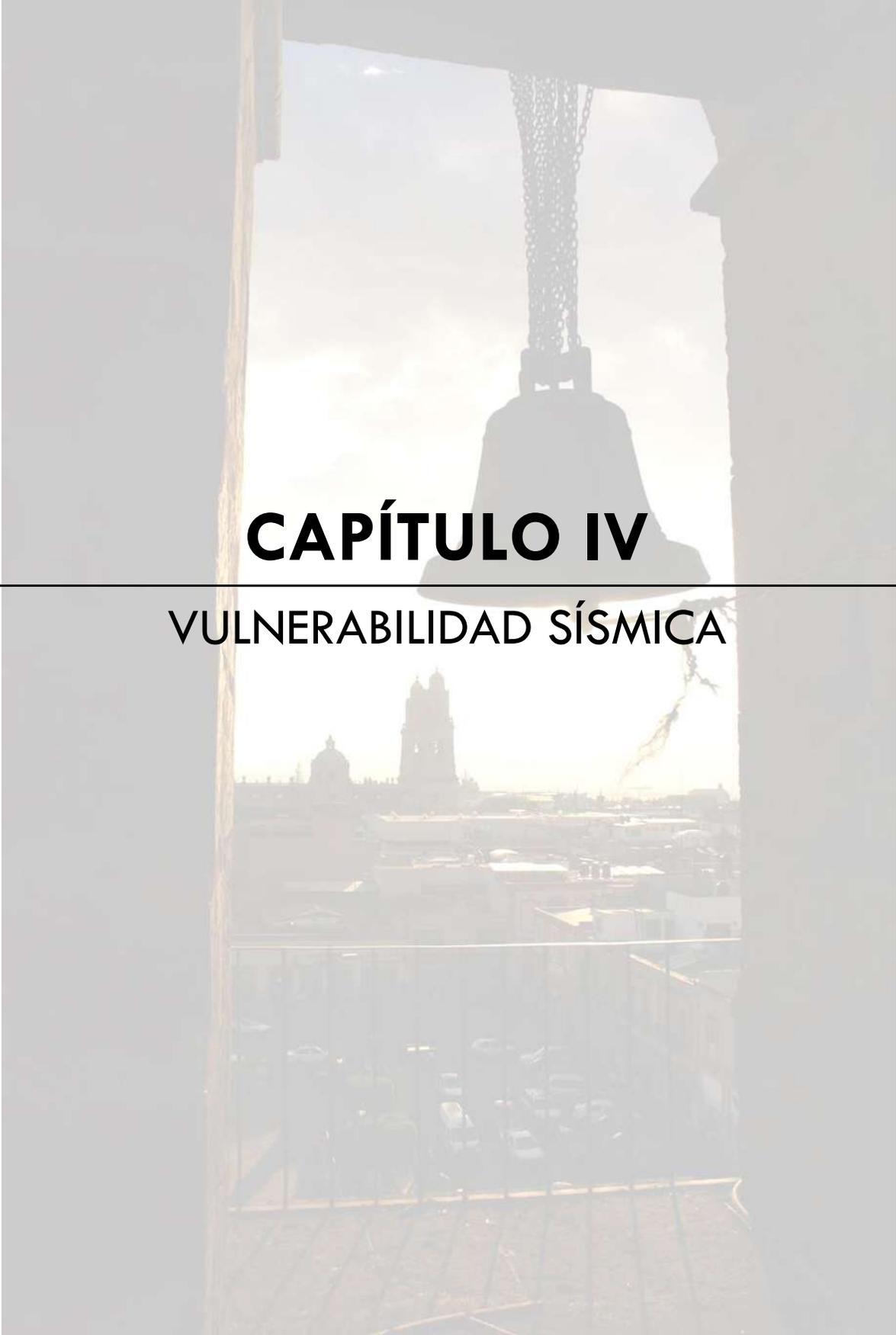
En el caso de los macroelementos longitudinales de los templos de una nave, es decir, de la [tabla 17 a la 28](#), nos encontramos con que la comparación que podemos realizar se refiere solamente al periodo de retorno, así pues se observa que la demanda para un periodo de retorno de 475 años es inferior que para el periodo de retorno de 975 años. Sin embargo podemos hacer la comparación entre los macroelementos transversales y longitudinales, observando que los comportamientos difieren bastante en valores. Tomamos como ejemplo el templo de San Agustín, que para una sección transversal de proporciones reales presenta un desplazamiento espectral de 0.486 cm y una pseudoaceleración de 0.347 g para un periodo de retorno de 475 años, mientras que para el mismo periodo de retorno en su sección longitudinal el desplazamiento espectral es de 0.0102 cm y la pseudoaceleración de 0.16 g, con lo que nos podemos dar cuenta al comparar las deformaciones que, lógicamente, la sección longitudinal es más rígida, puesto que su deformación representa solo un 2.1% de la deformación de la sección transversal.

En el caso particular de la catedral de la Transfiguración, ya que su planta arquitectónica se caracteriza por tener tres naves longitudinales, y como se mencionó en el capítulo I, se pudo

**Posgrado de Ingeniería Civil**

modificar la sección longitudinal con las proporciones sugeridas, podemos notar lo siguiente con los valores obtenidos del punto de desempeño: el macroelemento con las proporciones reales es el que exhibe mayor rigidez, ya que, para ambos periodos de retorno, en las dos secciones modificadas se obtuvieron mayores desplazamientos con casi la misma aplicación de carga. Si comparamos los resultados obtenidos entre los periodos de retorno, nuevamente vemos que la demanda es mayor para un mayor periodo de retorno (ver [tabla 29](#)).

De manera general, los puntos de desempeño obtenidos, tanto de secciones transversales como de secciones longitudinales, serán empleados en el siguiente capítulo para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras estudiadas.



# **CAPÍTULO IV**

---

## **VULNERABILIDAD SÍSMICA**

**Posgrado de Ingeniería Civil**

En México y el mundo entero, las estructuras importantes siempre son fuente de gran interés para su respectiva comunidad, tal es el caso particular de las estructuras históricas.

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica, aplicada a estructuras antiguas de tipo religioso construidas a base de mampostería no confinada, es un procedimiento poco estudiado, pero sus resultados se pueden aceptar como un pronóstico aceptable del comportamiento estructural ante un estado de cargas sísmicas esperadas, pues de manera probabilista se establece un estado de daño esperado ante las mismas.

Este tipo de análisis es generado particularmente a estructuras importantes, ya que debido a la complejidad de su comportamiento, otras metodologías resultarían muy elaboradas y con requerimientos de mucho tiempo de inversión en el modelado y cálculos matemáticos y computacionales.

Así que se usan curvas de fragilidad como una alternativa para definir el daño en las estructuras. Estas curvas definen la probabilidad de igualar o exceder un estado de daño considerado para una acción sísmica dada. La curva de fragilidad para un estado de daño nulo es igual a 1 (uno). Se asume que las curvas de fragilidad para los estados de daño siguen una distribución de probabilidad lognormal:

$P[ds Sd] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left( \frac{Sd}{\overline{S_{d,ds}}} \right) \right]$	(12)
---	------

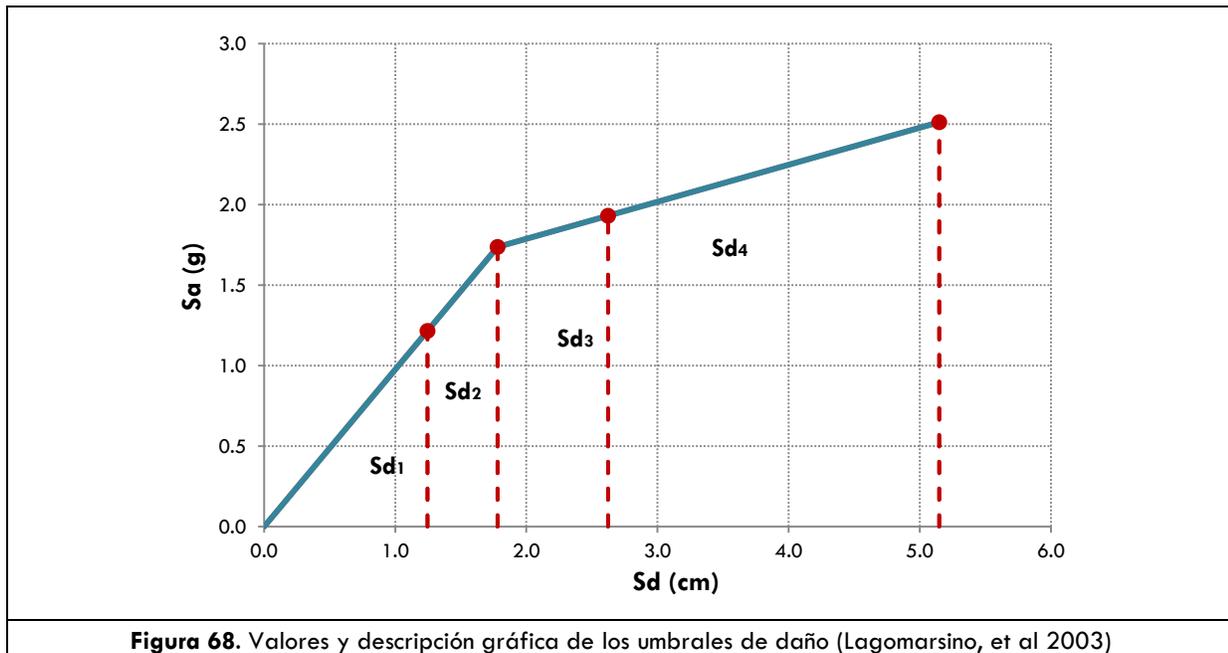
En esta ecuación  $Sd$  es el desplazamiento espectral inelástico,  $\overline{S_{d,ds}}$  es el valor promedio del desplazamiento en el que el edificio alcanza el límite de daño  $ds$ ,  $\beta_{ds}$  refleja la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para un estado de daño  $ds$  y  $\Phi$  es una función de distribución acumulativa normal estándar. Así estas curvas se definen solo por dos parámetros, el valor promedio  $\overline{S_{d,ds}}$  que es el punto en el cual la probabilidad de igualar o exceder el estado de daño es del 50%, y la desviación estándar  $\beta_{ds}$  que proporciona una idea de la dispersión de la variable aleatoria  $Sd$ .

Lagomarsino *et al.* (2003) explica que para aplicar el método se consideran cinco estados de daño: ligero, moderado, severo, completo y se incluye un estado de no daño. Los anteriores

pueden ser calculados a partir del espectro de capacidad bilineal para cada macroelemento, tal y como lo sugiere numéricamente la **tabla 45** y gráficamente la **Figura 68**.

**Tabla 45.** Valores y descripción para los umbrales de daño sugeridos (Lagomarsino, et al 2003)

UMBRALES DE DAÑO	DESPLAZAMIENTO ESPECTRAL	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO
$Sd_1$	$0.7 S_{dy}$	Ligero
$Sd_2$	$S_{dy}$	Moderado
$Sd_3$	$S_{dy} + 0.25 (S_{du}-S_{dy})$	Extensivo
$Sd_4$	$S_{du}$	Colapso



En las siguientes tablas encontraremos los valores de los umbrales de daño para cada uno de los macroelementos, los cuales serán necesarios para el posterior cálculo de las curvas de fragilidad, ya que como se mencionó anteriormente, corresponden a los valores que definen los límites de los cuatro estados de daño.

**Tabla 46.** Valores numéricos para los umbrales de daño de los macroelementos transversales.

TEMPLO	PROPORCIONES REALES				1ª REGLA DEL GÓTICO				2ª REGLA DEL GÓTICO			
	ds1	ds2	ds3	ds4	ds1	ds2	ds3	ds4	ds1	ds2	ds3	ds4
T. de San Agustín	0.70	1.00	2.37	6.46	0.59	0.85	2.72	8.32	0.25	0.36	1.19	3.66
T. franciscano de San Buenaventura	1.05	1.50	2.23	4.43	0.70	1.00	2.56	7.25	0.77	1.10	2.81	7.95
T. del Carmen	1.05	1.50	2.29	4.67	0.67	0.95	1.85	4.53	0.60	0.85	1.84	4.81
T. de San Francisco Javier	1.12	1.60	2.49	5.15	0.70	1.00	1.72	3.87	0.70	1.00	1.64	3.58
T. de la Cruz	0.68	0.98	1.48	3.01	0.64	0.92	1.50	3.24	0.85	1.22	1.65	2.95
T. de San Juan Bautista	0.28	0.40	0.79	1.95	0.25	0.35	0.45	0.74	0.25	0.35	0.45	0.74
T. de Guadalupe	0.70	1.00	2.03	5.13	0.77	1.10	1.54	2.86	0.70	1.00	1.81	4.24
T. de las Monjas	0.63	0.90	1.67	3.99	0.63	0.90	1.69	4.05	0.63	0.90	1.71	4.14
T. de Capuchinas	0.35	0.50	1.57	4.78	0.63	0.90	1.47	3.19	0.63	0.90	1.37	2.80
T. de la Merced	0.56	0.80	1.97	5.50	0.56	0.80	1.95	5.39	0.46	0.65	1.38	3.58
T. de Santa Rosa de Lima	0.98	1.40	2.16	4.46	0.84	1.20	1.44	2.18	1.05	1.50	2.03	3.61
T. de San José	0.91	1.30	2.19	4.85	0.91	1.30	2.55	6.29	1.05	1.50	2.48	5.41
Iglesia Catedral de la Transfiguración	0.56	0.80	2.44	7.38	0.46	0.65	1.99	6.02	0.35	0.50	0.77	1.57

**Tabla 47.** Valores numéricos para los umbrales de daño de los macroelementos longitudinales de templos de una sola nave.

TEMPLO	PROP. REALES			
	ds1	ds2	ds3	ds4
T. de San Agustín	0.42	0.60	0.66	0.85
T. franciscano de San Buenaventura	0.56	0.80	0.92	1.28
T. del Carmen	0.49	0.70	1.08	2.21
T. de San Francisco Javier	0.25	0.35	0.47	0.84
T. de la Cruz	0.56	0.80	0.98	1.54
T. de San Juan Bautista	0.49	0.70	1.06	2.12
T. de Guadalupe	0.32	0.45	0.80	1.85
T. de las Monjas	0.70	1.00	1.56	3.25

**Tabla 48.** Continuación, valores numéricos para los umbrales de daño de los macroelementos longitudinales de templos de una sola nave.

TEMPLO	PROP. REALES			
	ds1	ds2	ds3	ds4
T. de Capuchinas	0.70	1.00	1.56	3.23
T. de la Merced	0.70	1.00	1.22	1.86
T. de Santa Rosa de Lima	0.32	0.45	0.48	0.56
T. de San José	1.05	1.50	1.88	3.02

**Tabla 49.** Valores numéricos para los umbrales de daño del macroelemento longitudinal del templo de tres naves

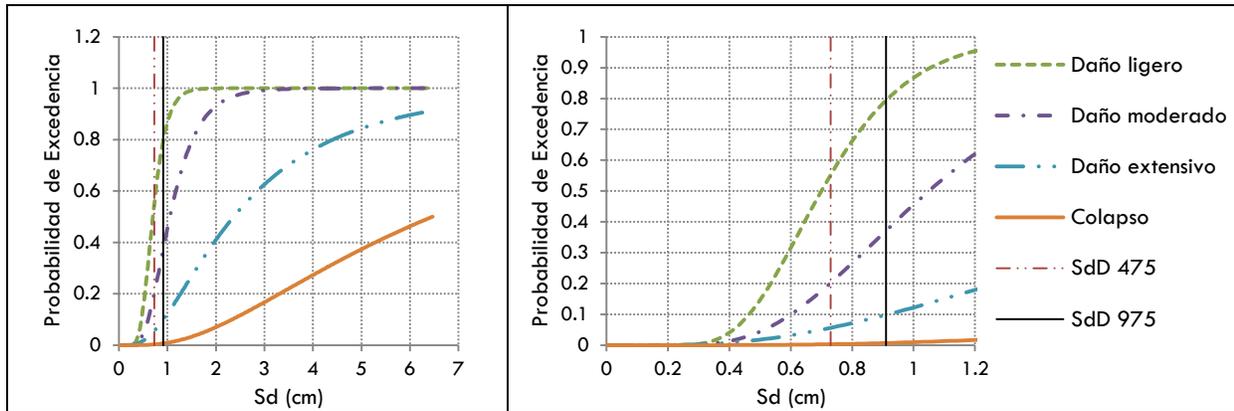
TEMPLO	PROPORCIONES REALES				1ª REGLA DEL GÓTICO				2ª REGLA DEL GÓTICO			
	ds1	ds2	ds3	ds4	ds1	ds2	ds3	ds4	ds1	ds2	ds3	ds4
Iglesia Catedral de la Transfiguración	0.70	1.00	1.55	3.21	0.42	0.60	1.07	2.48	0.35	0.50	1.31	3.75

Habiendo dado valores a uno de los dos parámetros que definen las curvas de fragilidad, procederemos a darle identidad a la distribución de probabilidades de los estados de daño esperados, la cual proporciona una idea de la dispersión de la variable aleatoria  $S_d$ . En la **tabla 50**, encontraremos dichos valores.

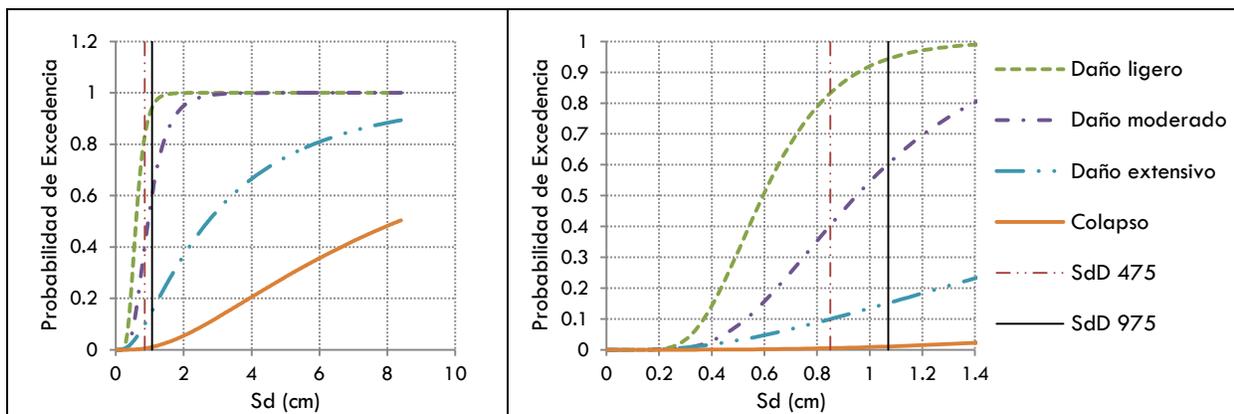
**Tabla 50.** Distribución de probabilidades de los estados de daño esperado.

$\beta_{ds1}$	$\beta_{ds2}$	$\beta_{ds3}$	$\beta_{ds4}$
0.5000	0.8960	0.9920	1.0000
0.1190	0.5000	0.8660	0.9880
0.0120	0.1350	0.5000	0.8810
0.0000	0.0080	0.8810	0.5000

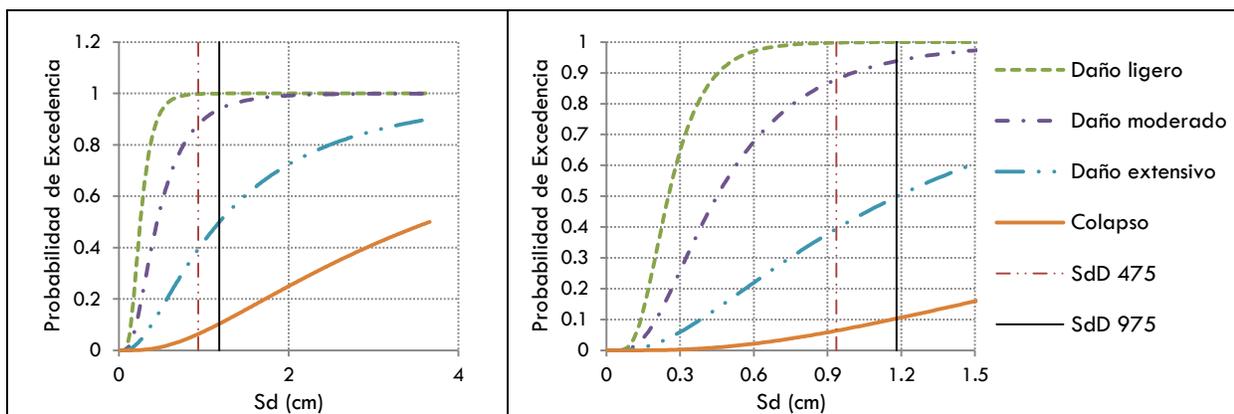
## CURVAS DE FRAGILIDAD Y MATRICES DE PROBABILIDAD PARA MACROELEMENTOS TRANSVERSALES



**Figura 69.** Curvas de fragilidad para el Templo de San Agustín, proporciones reales.  
 $S_{dD} 475 = 0.73\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.91\text{cm}$



**Figura 70.** Curvas de fragilidad para el Templo de San Agustín, 1ª regla del gótico.  
 $S_{dD} 475 = 0.850\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 1.071\text{cm}$



**Figura 71.** Curvas de fragilidad para el Templo de San Agustín, 2ª regla del gótico.  
 $S_{dD} 475 = 0.936\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 1.1808\text{cm}$

**Tabla 51.** Matrices de propabilidad de daño para el Templo de San Agustín en función de los puntos de

desempeño obtenidos.

GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
LIGERO	0.56	0.80	0.84	0.95	1.00	1.00
MODERADO	0.21	0.38	0.41	0.61	0.88	0.94
EXTENSIVO	0.06	0.10	0.11	0.15	0.40	0.50
COLAPSO	0.00	0.01	0.00	0.01	0.06	0.10

Podemos observar que para el caso del Templo de San Agustín, las curvas de fragilidad (Figuras 69-71) muestran que el modelo con las proporciones reales presenta un mejor comportamiento, ya que para ambas demandas las probabilidades de daño esperado son mucho menores que para los modelos modificados con las reglas del gótico, lo que quiere decir que para este caso la aplicación de las reglas resultaron contraproducentes. Mientras que para el modelo con las proporciones reales el daño extensivo llega al 6% y 10%, para los periodos de retorno de 475 y 974 años respectivamente, para la primera regla del gótico asciende a 11% y 15% y para la segunda regla del gótico los valores resultantes son del 40% y el 50%. No existen probabilidades de que exista un colapso con las proporciones reales para un periodo de retorno de 475 años, sin embargo existe el 1% de probabilidades de que éste se presente en un periodo de retorno asociado a 975 años, si hacemos la comparación con los modelos modificados, nos daremos cuenta que las mismas probabilidades se dan para la primera modificación, mientras que para la segunda modificación las probabilidades de colapso aumentan a 6% y 10% para las respectivas demandas.

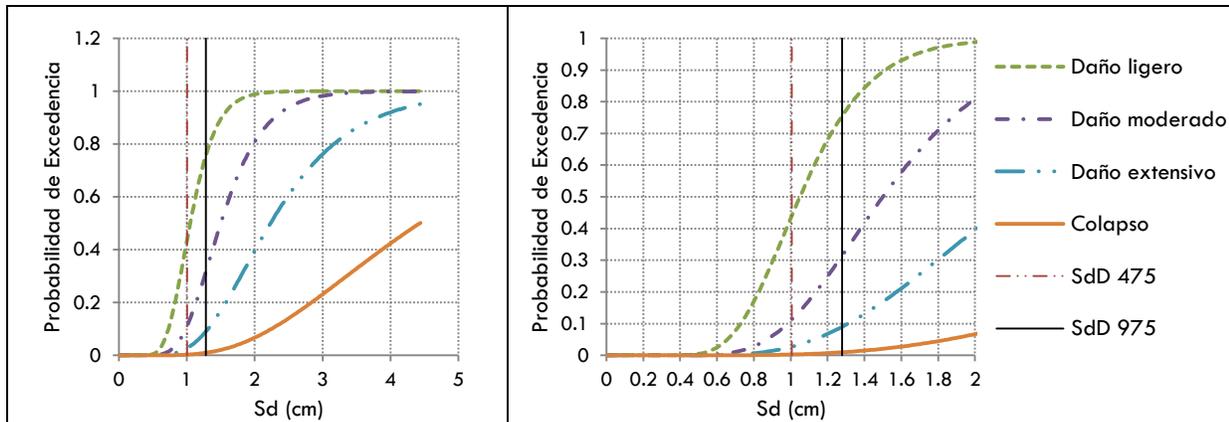


Figura 72. Curvas de fragilidad para el Templo franciscano de San Buenaventura, proporciones reales.

$S_{db} 475 = 1.005\text{cm}$ ;  $S_{db} 975 = 1.278\text{cm}$

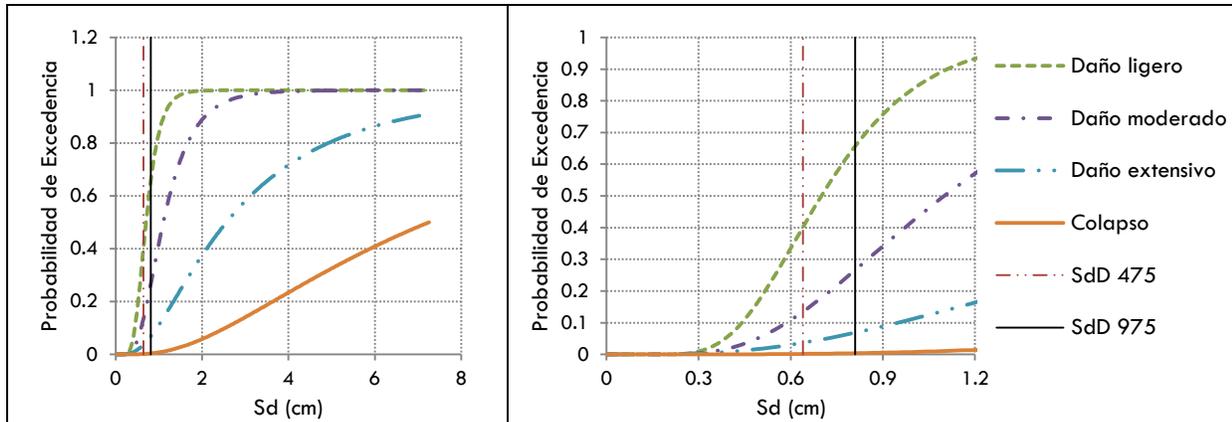


Figura 73. Curvas de fragilidad para el Templo franciscano de San Buenaventura, 1ª regla del gótico.

$$S_{db} 475 = 0.64\text{cm}; S_{db} 975 = 0.81\text{cm}$$

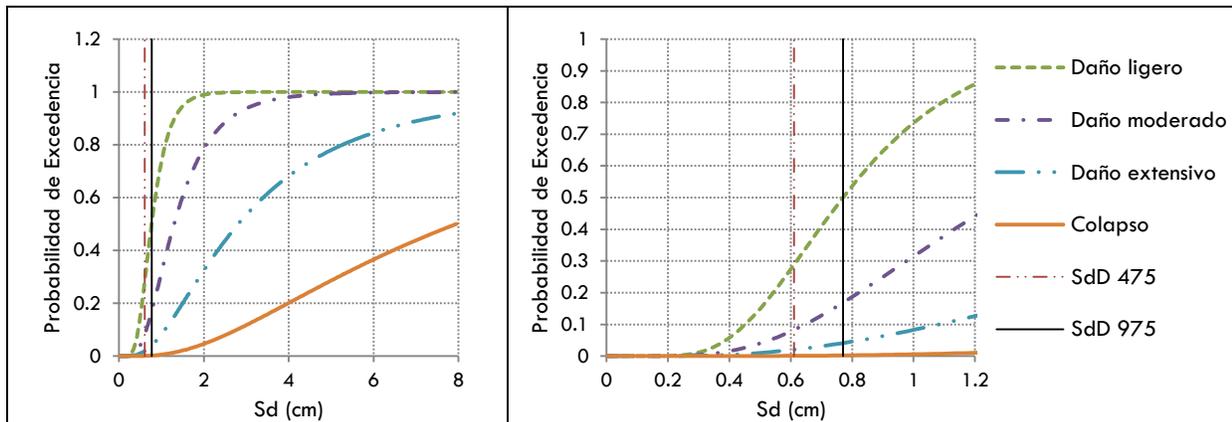


Figura 74. Curvas de fragilidad para el Templo franciscano de San Buenaventura, 2ª regla del gótico.

$$S_{db} 475 = 0.61\text{cm}; S_{db} 975 = 0.77\text{cm}$$

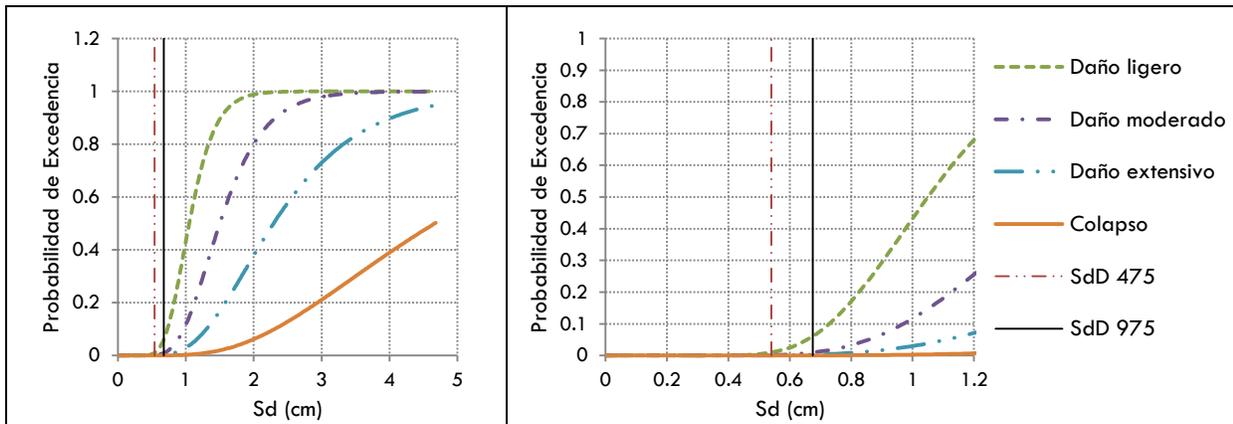
Tabla 52. Matrices de probabilidad de daño para el Templo franciscano de San Buenaventura en función de los puntos de desempeño obtenidos.

GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
LIGERO	0.45	0.75	0.40	0.65	0.28	0.51
MODERADO	0.11	0.34	0.14	0.28	0.08	0.18
EXTENSIVO	0.03	0.10	0.03	0.08	0.02	0.04
COLAPSO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

El Templo franciscano de San Buenaventura, contrariamente al Templo de San Agustín, presenta un mejor comportamiento en el modelo modificado con la segunda regla geométrica del gótico, ya que mientras el modelo con las proporciones reales llega a un 45% de probabilidades de tener daño ligero y un 75% para las demandas asociadas a los periodos

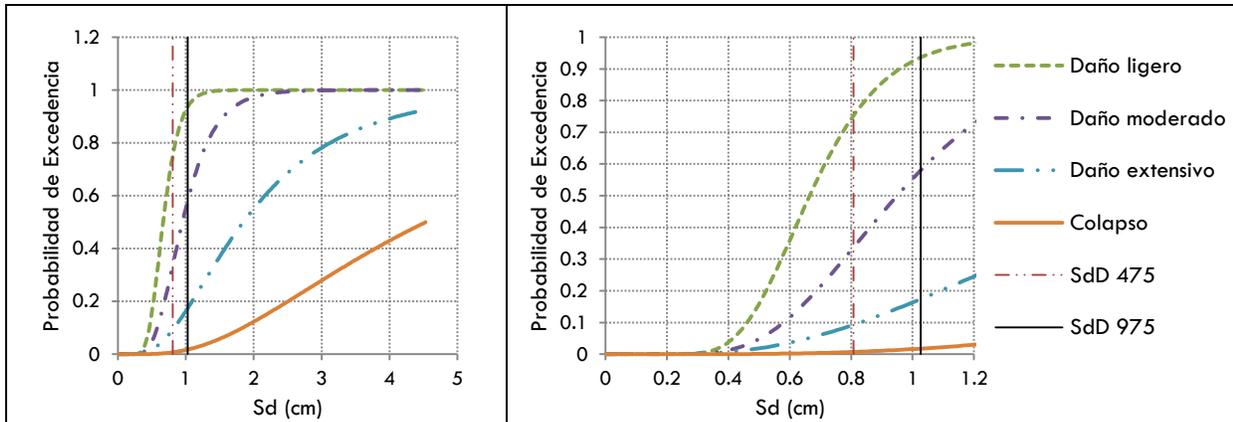
de retorno de 475 y 975 años respectivamente, para el modelo con mejor comportamiento desciende a 28% y 51% para las respectivas demandas. Cabe mencionar que las probabilidades para el mismo grado de daño en el modelo modificado con la primera regla del gótico llegan al 40% y 65%, probabilidades menores que con las proporciones reales pero mayores que la modificación con la segunda regla del gótico (ver Figuras 72-74).

En lo que respecta al colapso, podemos observar en la Tabla 52 que el único que presenta posibilidades que ascienden al 1% es el modelo de proporciones reales para una demanda asociada a un periodo de retorno de 975 años.



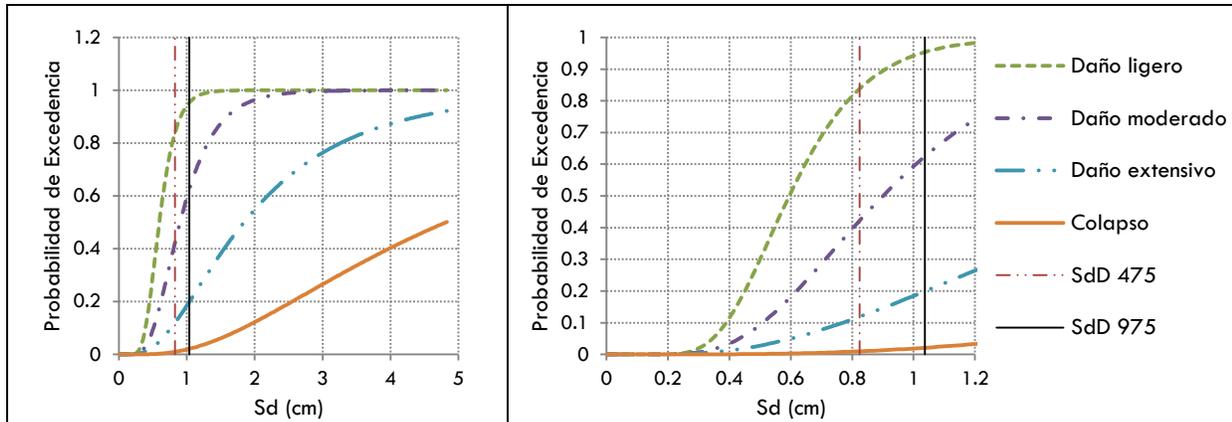
**Figura 75.** Curvas de fragilidad para el Templo del Carmen, proporciones reales.

$S_{dB} 475 = 0.540\text{cm}$ ;  $S_{dB} 975 = 0.675\text{cm}$



**Figura 76.** Curvas de fragilidad para el Templo del Carmen, 1ª regla del gótico.

$S_{dB} 475 = 0.8075\text{cm}$ ;  $S_{dB} 975 = 1.0260\text{cm}$



**Figura 77.** Curvas de fragilidad para el Templo del Carmen, 2ª regla del gótico.

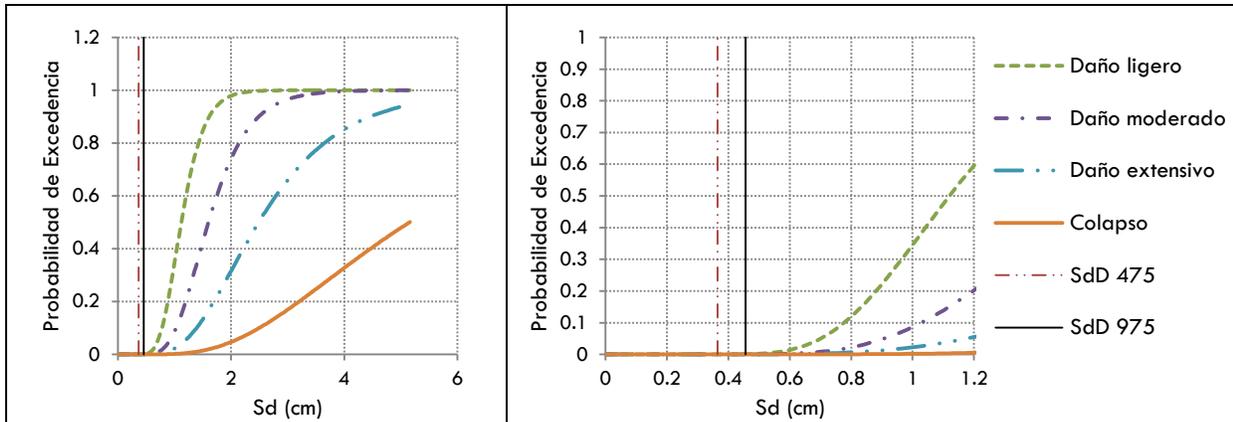
$S_{dD} 475 = 0.8245\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 1.0370\text{cm}$

**Tabla 53.** Matrices de probabilidad de daño para el Templo del Carmen en función de los puntos de desempeño obtenidos.

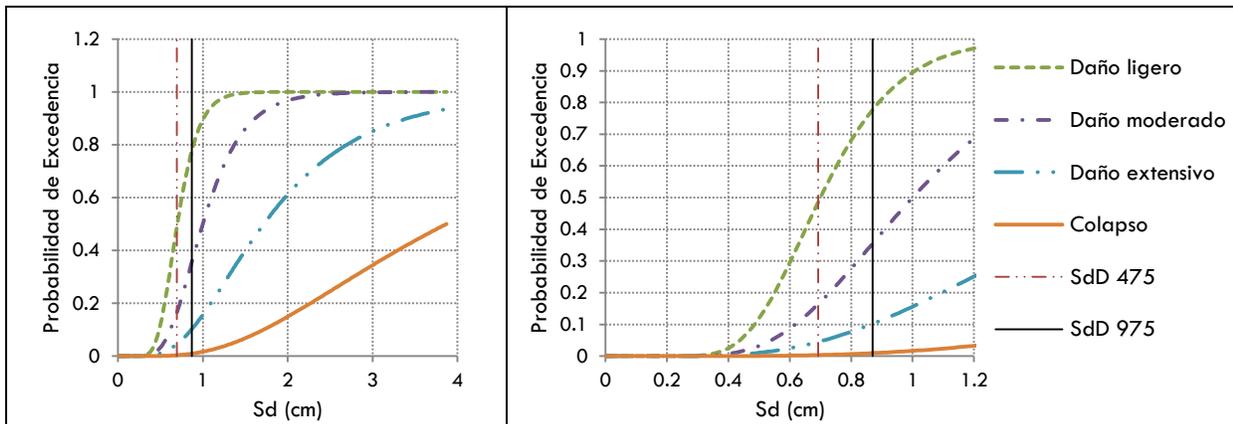
GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
LIGERO	0.02	0.08	0.75	0.93	0.84	0.95
MODERADO	0.00	0.01	0.34	0.59	0.42	0.62
EXTENSIVO	0.00	0.00	0.10	0.18	0.12	0.20
COLAPSO	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.03

Las Figuras 75-77 explican de manera gráfica el comportamiento del conjunto que corresponde al macroelemento transversal del Templo del Carmen. En este caso nos podemos dar cuenta que las probabilidades de daño son casi nulas para el modelo con las proporciones reales, mientras que se expone de manera clara que los modelos modificados presentan mayores probabilidades de daño en todos los grados, siendo la segunda regla del gótico la modificación que tiene mayores probabilidades de daño desde ligero hasta el colapso, desde luego presentando mayores probabilidades para una demanda asociada a un periodo de retorno de 975 años (ver Tabla 53).

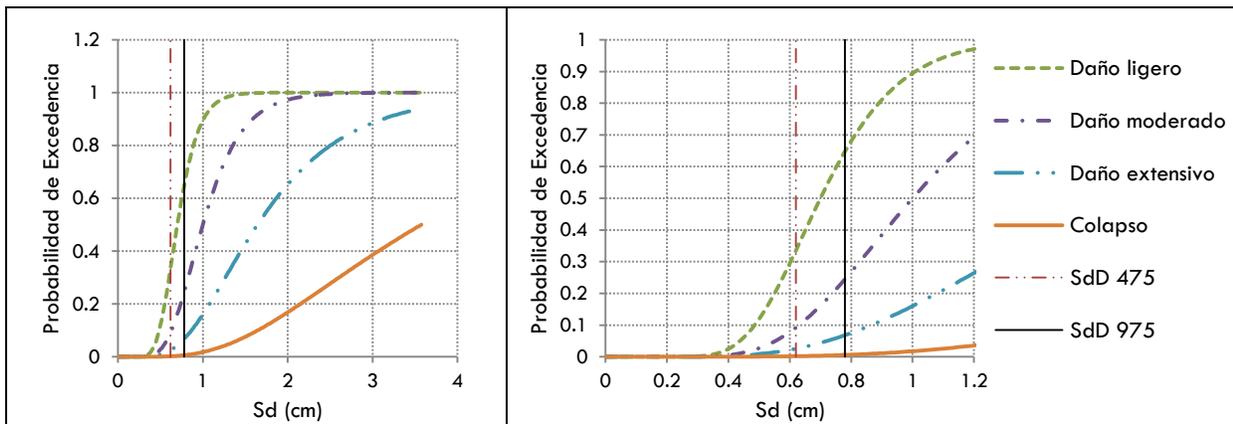
La diferencia es muy poca si comparamos los valores entre los modelos modificados, ya que para la primera regla del gótico las probabilidades de daño ligero ascienden a 93% y 84% para las respectivas demandas, mientras que para el modelo modificado con la segunda regla del gótico los valores son del orden de 84% y 95% y así sucesivamente con cada uno de los grados de daño, hasta llegar a las posibilidades de colapso que se pueden presentar en porcentajes por debajo del 3%.



**Figura 78.** Curvas de fragilidad para el Templo de San Francisco Javier, proporciones reales.  
 $S_{dD} 475 = 0.3648\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.4560\text{cm}$



**Figura 79.** Curvas de fragilidad para el Templo de San Francisco Javier, 1ª regla del gótico.  
 $S_{dD} 475 = 0.693\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.870\text{cm}$



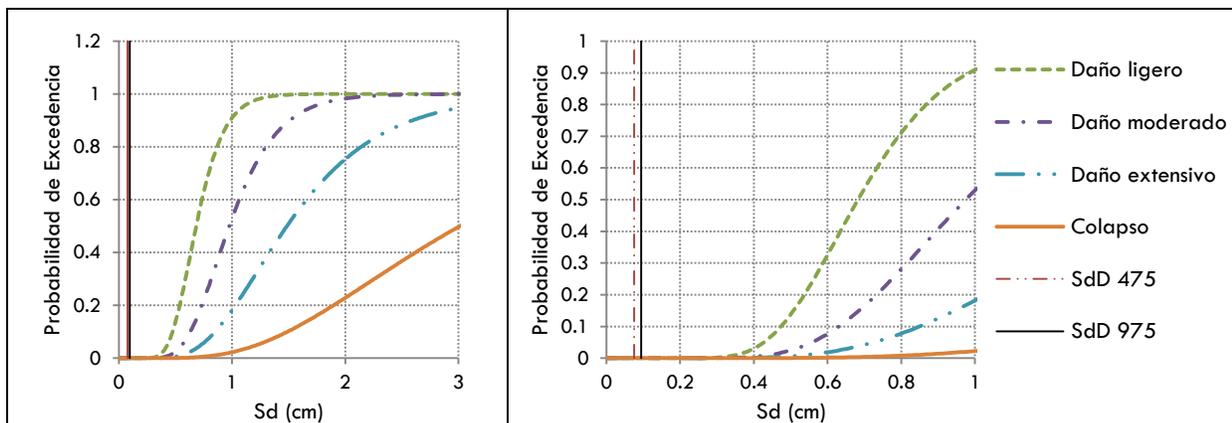
**Figura 80.** Curvas de fragilidad para el Templo de San Francisco Javier, 2ª regla del gótico.  
 $S_{dD} 475 = 0.62\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.78\text{cm}$

**Tabla 54.** Matrices de propabilidad de daño para el Templo de San Francisco Javier en función de los puntos de

desempeño obtenidos.

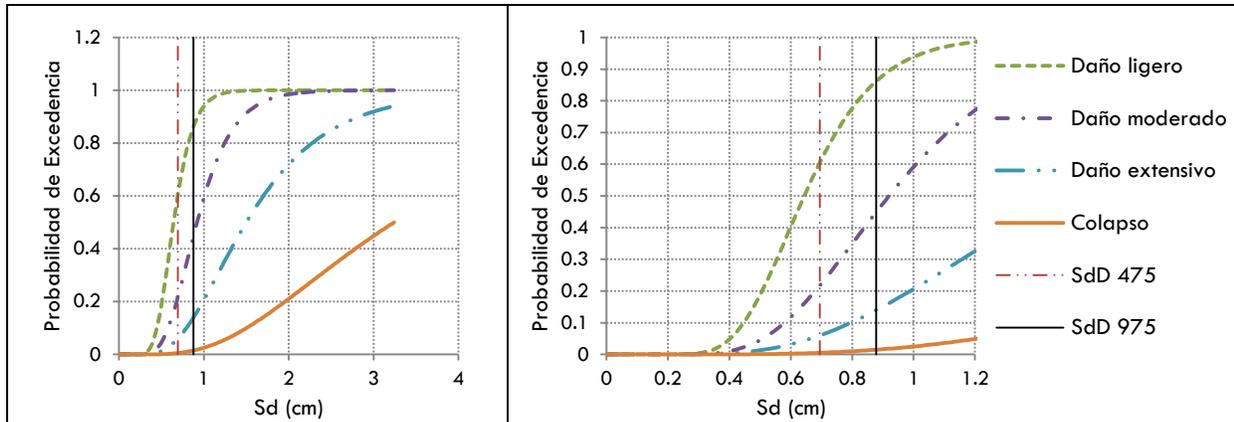
GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
LIGERO	0.00	0.00	0.48	0.78	0.35	0.65
MODERADO	0.00	0.00	0.15	0.35	0.09	0.25
EXTENSIVO	0.00	0.00	0.04	0.10	0.02	0.06
COLAPSO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01

La capacidad del modelo del Templo de San Francisco Javier con sus proporciones reales es tal que la demanda asociada a los dos periodos de retorno de este estudio, no permite que haya probabilidad de daño en ningún grado, lo cual, comparado con los modelos modificados con las reglas del gótico, contrasta de manera notoria, ya que para la primera regla del gótico existe un 48% y un 78% de posibilidades de haber daño ligero para la demanda asociada a los periodos de retorno de 475 y 975 años respectivamente y para la modificación con la segunda regla del gótico 35% y 65% en el mismo orden. De igual manera podemos observar que las probabilidades de daño moderado y extensivo, aunque descienden, siguen manteniendo una relación de mayor para el modelo modificado con la primera regla del gótico y por tanto menor para el modelo modificado con la segunda regla del gótico. Es importante mencionar que para los modelos modificados, con un periodo de retorno de 975 años existe el 1% de posibilidades de colapso, mientras que para el modelo con las proporciones reales no se alcanza ni este 1% (ver Figuras 78-80 y Tabla 54).

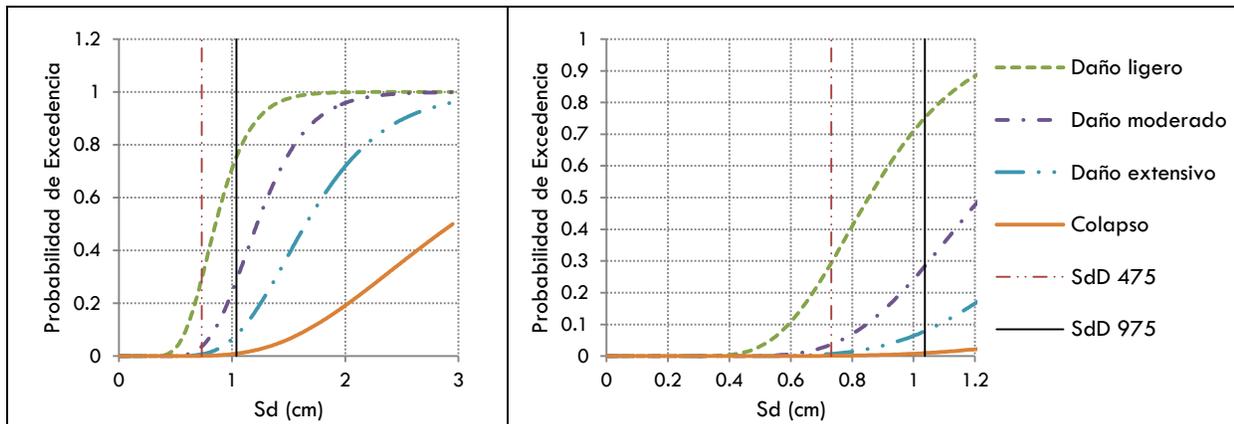


**Figura 81.** Curvas de fragilidad para el Templo de la Cruz, proporciones reales.

$S_{db} 475 = 0.0751 \text{ cm}$ ;  $S_{db} 975 = 0.0946 \text{ cm}$



**Figura 82.** Curvas de fragilidad para el Templo de la Cruz, 1ª regla del gótico.  
 $S_{dB} 475 = 0.6946\text{cm}$ ;  $S_{dB} 975 = 0.8786\text{cm}$



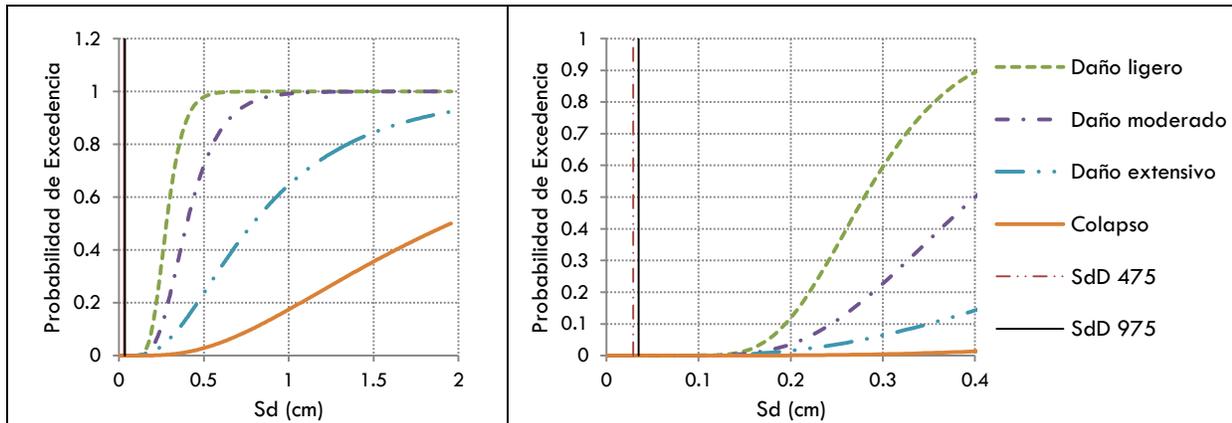
**Figura 83.** Curvas de fragilidad para el Templo de la Cruz, 2ª regla del gótico  
 $S_{dB} 475 = 0.732\text{cm}$ ;  $S_{dB} 975 = 1.037\text{cm}$

**Tabla 55.** Matrices de propabilidad de daño para el Templo de la Cruz en función de los puntos de desempeño obtenidos.

GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
<b>LIGERO</b>	0.00	0.00	0.62	0.88	0.29	0.75
<b>MODERADO</b>	0.00	0.00	0.22	0.46	0.04	0.28
<b>EXTENSIVO</b>	0.00	0.00	0.05	0.15	0.00	0.17
<b>COLAPSO</b>	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01

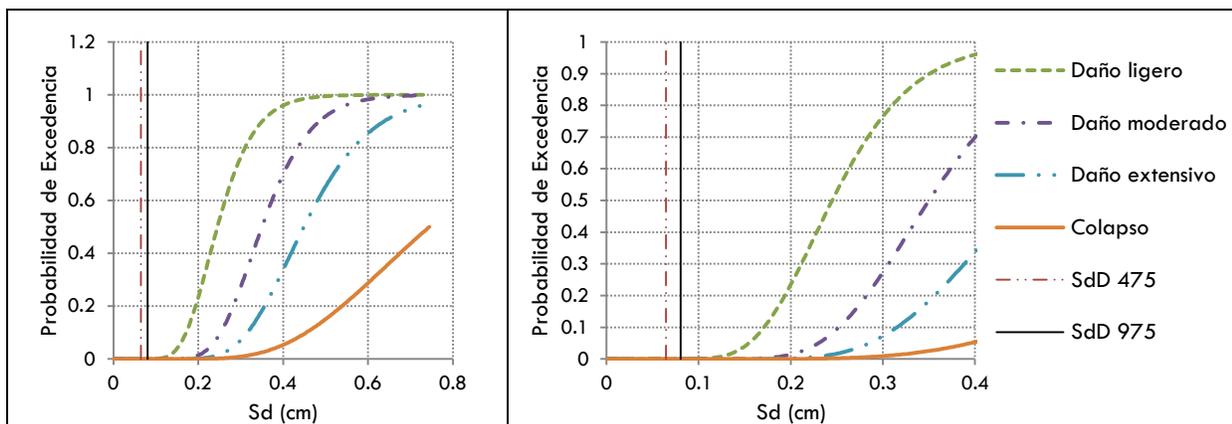
Si observamos la **Figura 17** que muestra el análisis formal para el macroelemento que corresponde a la sección transversal del Templo de la Cruz, nos daremos cuenta que la rigidez presentada en el modelo que conserva las proporciones reales es mucho mayor que la que pueden alcanzar los modelos modificados, esto debido al espesor de los apoyos, lo que puede

explicar el comportamiento de estos tres modelos observado en las Figuras 81-83 y resumido en la Tabla 55, ya que el primer modelo referente a las proporciones reales no presenta posibilidades de daño en ningún grado, mientras que para las modificaciones incluso se presentan bajas posibilidades de colapso.



**Figura 84.** Curvas de fragilidad para el Templo de San Juan Bautista, proporciones reales.

$$S_{dD} 475 = 0.0292\text{cm}; S_{dD} 975 = 0.0348\text{cm}$$



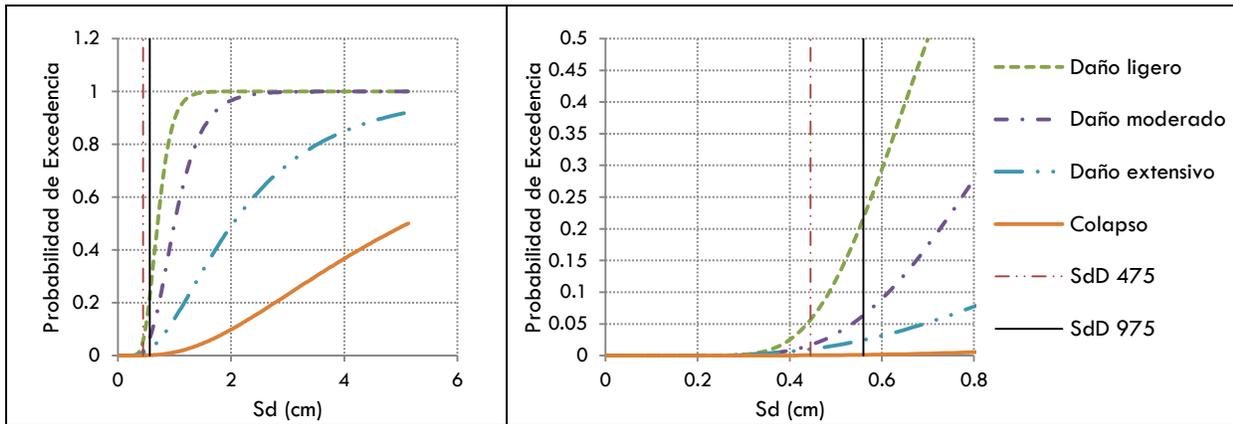
**Figura 85.** Curvas de fragilidad para el Templo de San Juan Bautista, 1ª y 2ª regla del gótico.

$$S_{dD} 475 = 0.0648\text{cm}; S_{dD} 975 = 0.0805\text{cm}$$

**Tabla 56.** Matrices de probabilidad de daño para el Templo de San Juan Bautista en función de los puntos de desempeño obtenidos.

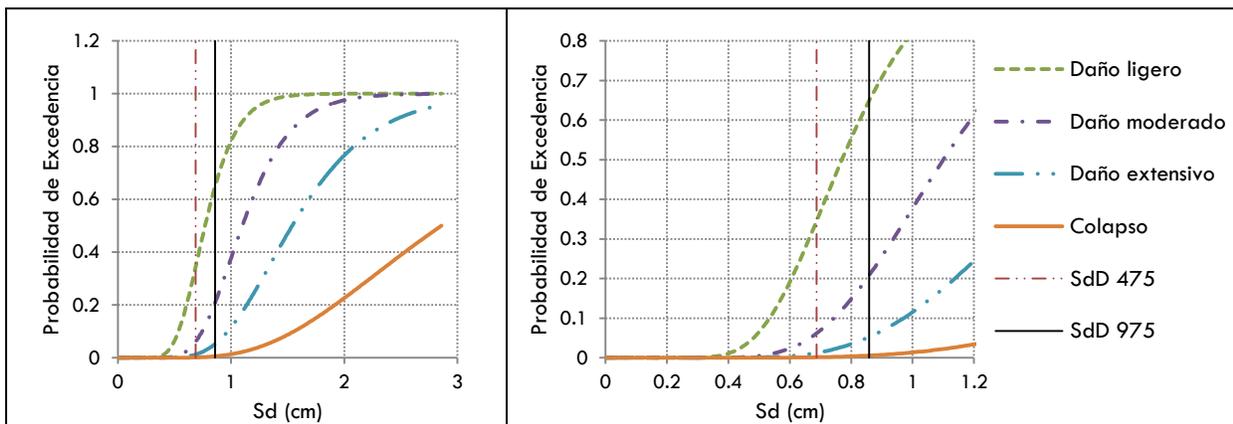
GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
LIGERO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MODERADO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EXTENSIVO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
COLAPSO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

El templo de San Juan Bautista es el que presenta dimensiones más pequeñas, tanto en altura (7.49m desde el piso terminado hasta el lecho bajo de la bóveda) como en longitud de claro (5.70m entre pilastras del arco fajón), además que, como se había mencionado con anterioridad, las proporciones del arco, en el cual se basan las modificaciones empleando las reglas del gótico, son de tal manera que el espesor de apoyos resultante para cada modificación es igual el uno al otro, obteniendo por esto solo dos grupos de curvas de fragilidad (Figuras 84 y 85). La capacidad de estos modelos es tal que no presentan posibilidades de daño para ninguna de las demandas asociadas a los periodos de retorno. Lo anterior nos hace pensar que las dimensiones de la estructura influyen de manera directa en su fragilidad, pues dimensiones más pequeñas que se vean reflejadas en una mayor rigidez aumentarán la capacidad de la estructura y por tanto disminuirá su fragilidad.



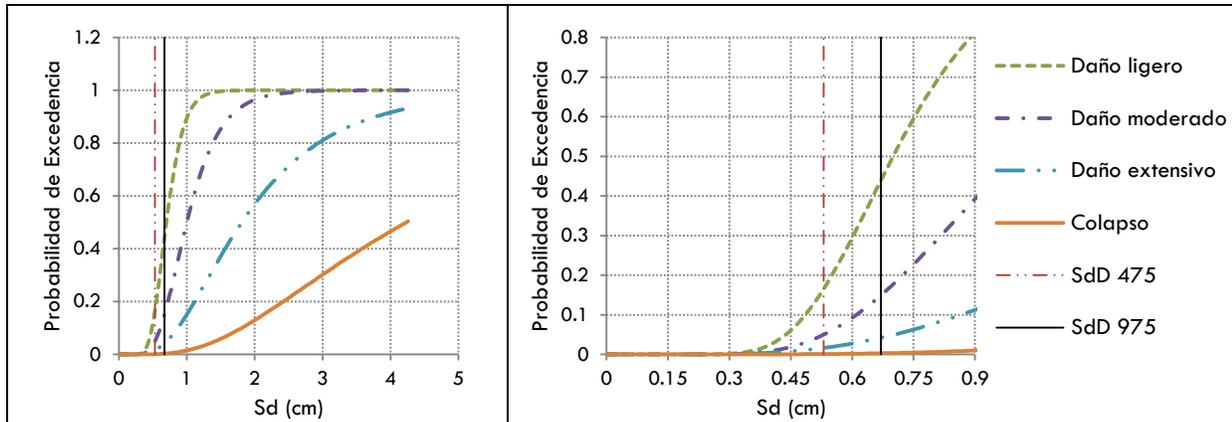
**Figura 86.** Curvas de fragilidad para el Templo de Guadalupe, proporciones reales.

**S<sub>db</sub> 475 = 0.445cm; S<sub>db</sub> 975 = 0.560cm**



**Figura 87.** Curvas de fragilidad para el Templo de Guadalupe, 1ª regla del gótico.

**S<sub>db</sub> 475 = 0.6875cm; S<sub>db</sub> 975 = 0.8580cm**



**Figura 88.** Curvas de fragilidad para el Templo de Guadalupe, 2ª regla del gótico.

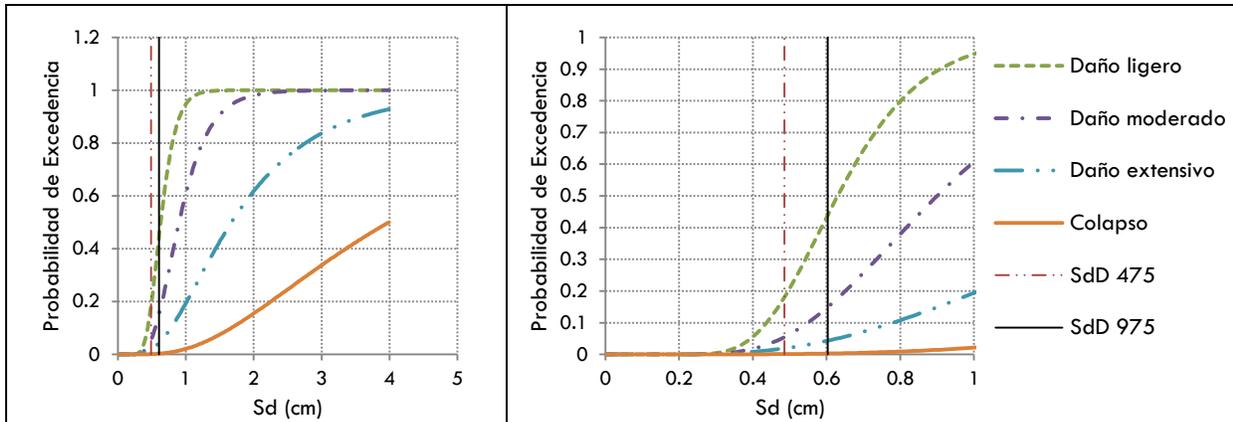
$S_{dB}$  475 = 0.53cm;  $S_{dB}$  975 = 0.67cm

**Tabla 57.** Matrices de probabilidad de daño para el Templo de Guadalupe en función de los puntos de desempeño obtenidos.

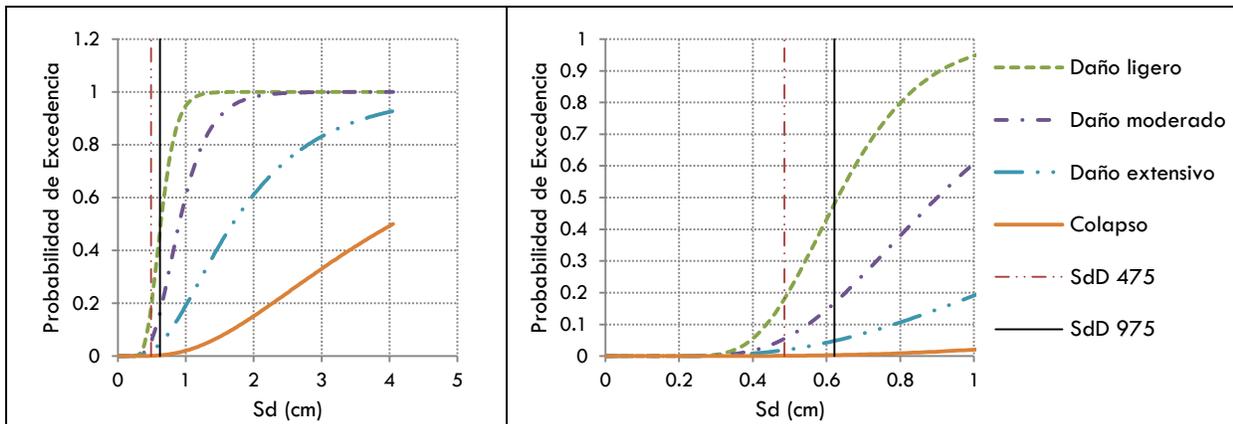
GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
LIGERO	0.06	0.21	0.35	0.64	0.16	0.45
MODERADO	0.02	0.07	0.05	0.22	0.05	0.15
EXTENSIVO	0.015	0.02	0.01	0.05	0.02	0.05
COLAPSO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00

Hasta este punto, la mayoría de los macroelementos con proporciones reales han mostrados un mejor comportamiento al exponer menor posibilidad de daño estructural. El templo de Guadalupe se suma a esta cuenta ya que si observamos la [Tabla 57](#) donde se resumen los resultados de las curvas de fragilidad ([Figuras 86-88](#)) correspondientes a los modelos del macroelemento transversal de este templo, podemos darnos cuenta que para ambos periodos de retorno, existen menores posibilidades de daño para el modelo que conserva las proporciones reales, mientras que al ser modificadas estas proporciones decrece el espesor de los apoyos lo que repercute directamente en la capacidad de los modelos por lo que da como resultado mayores posibilidades de daño, habiendo, para el modelo modificado con la primera regla geométrica del gótico y el periodo de retorno de 975 años, posibilidad del 1% de colapso.

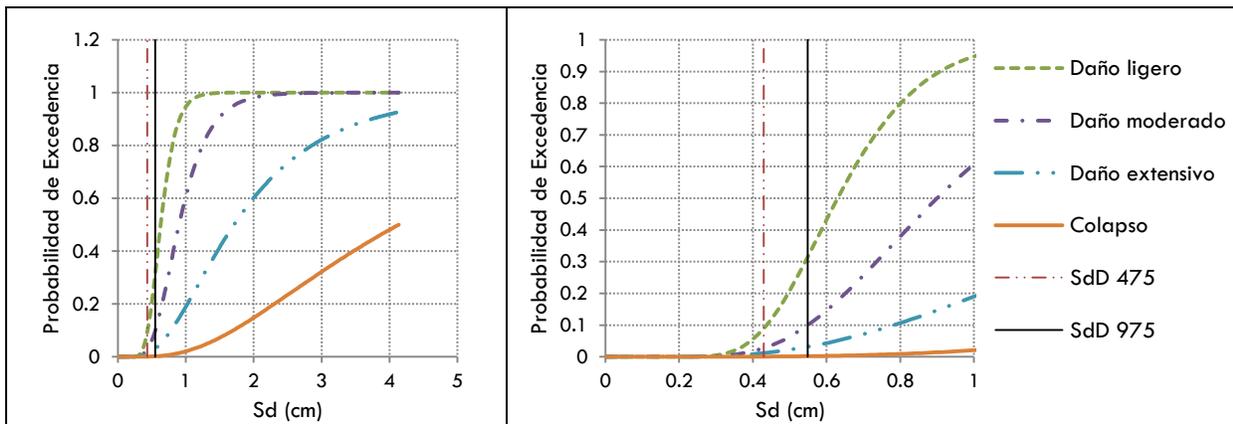
El modelo modificado con la primera regla del gótico es la que presenta una mayor fragilidad ya que para daño ligero, podemos observar en la tabla anterior, existe un 35% y un 64% de posibilidades de daño para las respectivas demandas.



**Figura 89.** Curvas de fragilidad para el Templo de las Monjas, proporciones reales.  
 $S_{dD} 475 = 0.486\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.603\text{cm}$



**Figura 90.** Curvas de fragilidad para el Templo de las Monjas, 1ª regla del gótico.  
 $S_{dD} 475 = 0.486\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.621\text{cm}$



**Figura 91.** Curvas de fragilidad para el Templo de las Monjas, 2ª regla del gótico.  
 $S_{dD} 475 = 0.4293\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.5490\text{cm}$

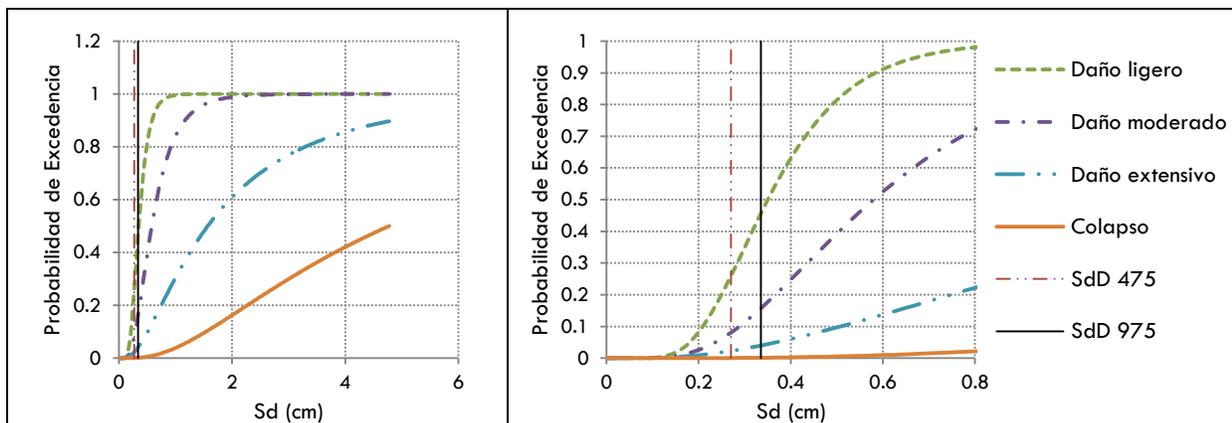
**Tabla 58.** Matrices de propabilidad de daño para el Templo de las Monjas en función de los puntos de

desempeño obtenidos.

GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
LIGERO	0.20	0.43	0.18	0.38	0.09	0.31
MODERADO	0.05	0.15	0.05	0.18	0.03	0.11
EXTENSIVO	0.02	0.05	0.02	0.05	0.00	0.03
COLAPSO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

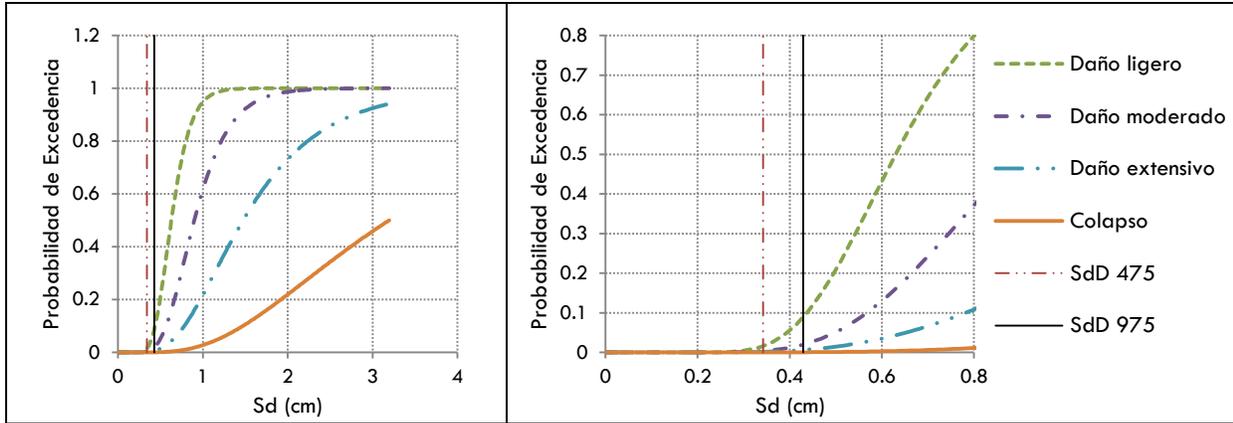
En el caso del Templo de las Monjas, al igual que el templo franciscano de San Buenaventura, se puede observar que el modelo con las proporciones reales presenta mayores posibilidades de daño, ya que para que se presente daño ligero existe el 20% y 43% de probabilidades para las demandas sísmicas, mientras que para el modelo modificado con la primera regla del gótico se presentan posibilidades del 18% y 38% y para el modelo modificado con la segunda regla del gótico las posibilidades descienden al 9% y la 31% para las respectivas demandas asociadas a los dos periodos de retorno (ver [Tabla 58](#)).

En este caso, si regresamos a la [Figura 20](#) podemos encontrar una explicación a lo ocurrido con el comportamiento de estos modelo, ya que el espesor de los apoyos del modelo que conserva las proporciones reales es menor que el espesor de los modelos modificados, siendo la modificación donde interviene la segunda regla geométrica del gótico, la que da como resultado un mayor espesor de apoyos. Por lo tanto este modelo presenta una mayor rigidez y una mayor capacidad, que se ve reflejado en las posibilidades de daño ([Figura 91](#)). Para este templo los modelos no presentan posibilidad de colapso ante las demandas propuestas.

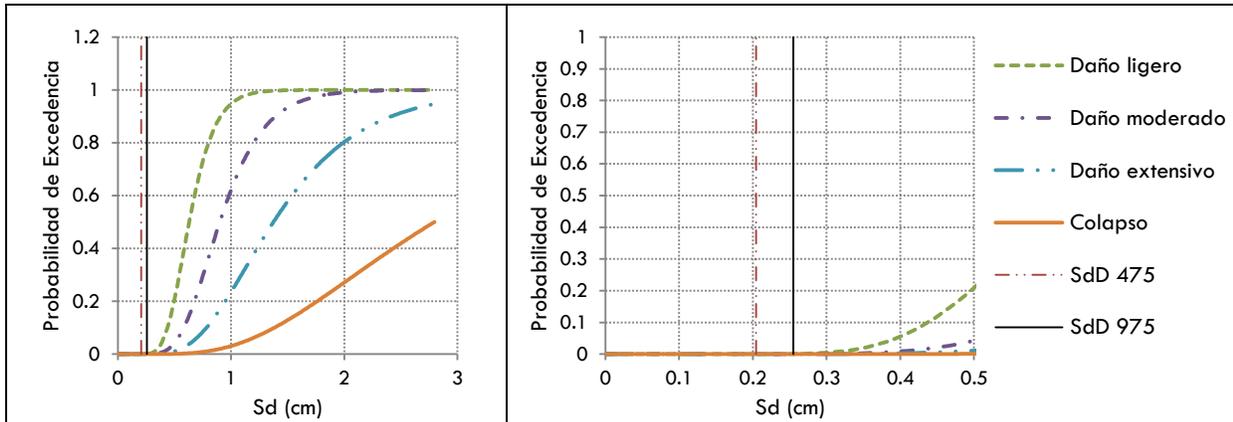


**Figura 92.** Curvas de fragilidad para el Templo de Capuchinas, proporciones reales.

**S<sub>db</sub> 475 = 0.270cm; S<sub>db</sub> 975 = 0.335cm**



**Figura 93.** Curvas de fragilidad para el Templo de Capuchinas, 1ª regla del gótico.  
 $S_{dD} 475 = 0.342\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.4293\text{cm}$



**Figura 94.** Curvas de fragilidad para el Templo de Capuchinas, 2ª regla del gótico.  
 $S_{dD} 475 = 0.2043\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.2547\text{cm}$

**Tabla 59.** Matrices de propabilidad de daño para el Templo de Capuchinas en función de los puntos de desempeño obtenidos.

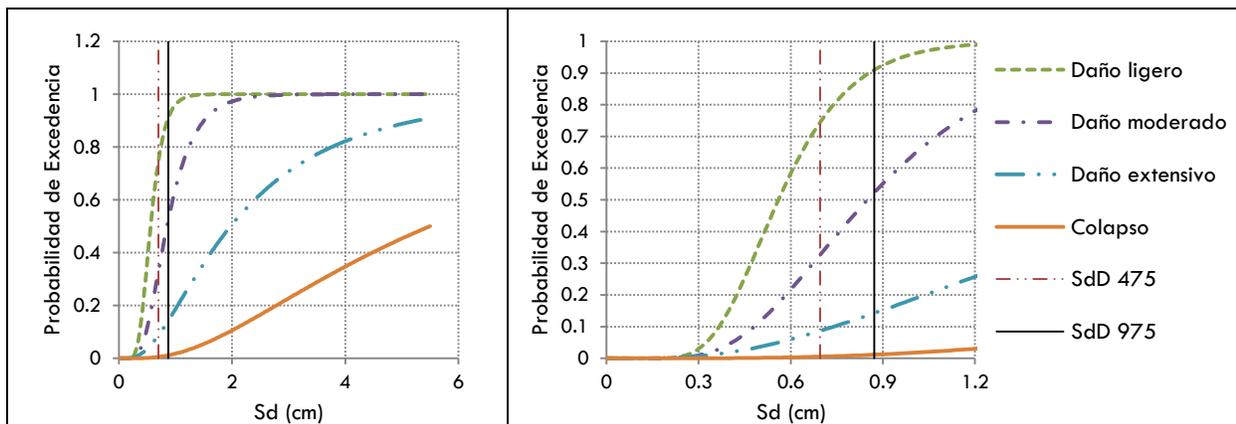
GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
<b>LIGERO</b>	0.25	0.45	0.02	0.08	0.00	0.00
<b>MODERADO</b>	0.08	0.16	0.00	0.02	0.00	0.00
<b>EXTENSIVO</b>	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>COLAPSO</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Nuevamente la **Tabla 59** nos muestra que el modelo que conserva las proporciones reales presenta mayores posibilidades de daño, y si observamos la **Figura 21** corroboramos lo que se dijo anteriormente, pues para este templo las modificaciones aplicando las reglas del gótico proponen espesores de apoyos mayores al original.

**Posgrado de Ingeniería Civil**

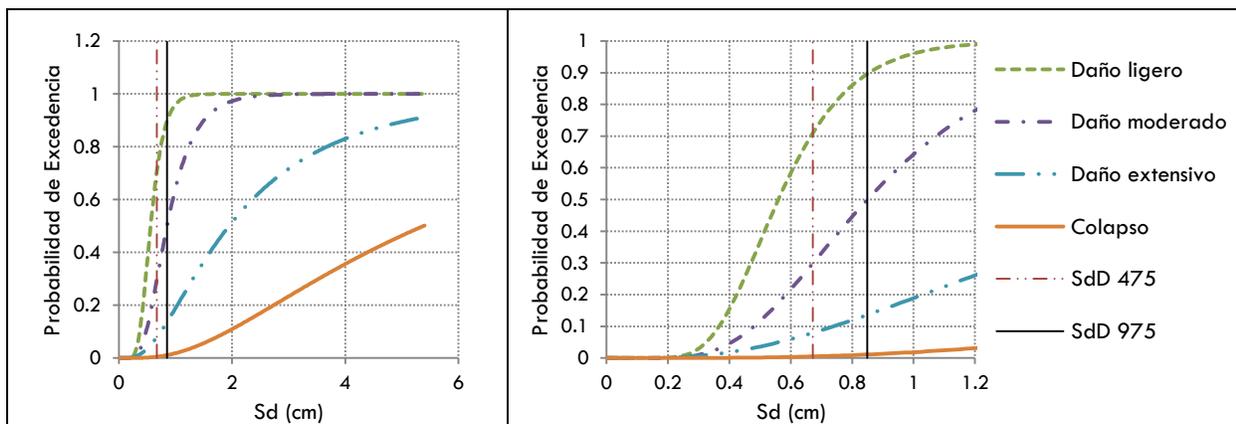
Mientras que para el modelo con las proporciones reales existen posibilidades de daño desde ligero hasta extensivo, para la modificación del modelo con la primera regla del gótico solo se presentan bajas posibilidades de daño moderado y ligero, y para la modificación del modelo con la segunda regla del gótico, debido a su rigidez y capacidad por tener los apoyos con mayor espesor, observamos que no se presenta posibilidad de daño.

Para ninguno de los modelos, para ninguna demanda asociada a los periodos de retorno de 475 años y 975 años, se observa que el colapso de la estructura sea una posibilidad.



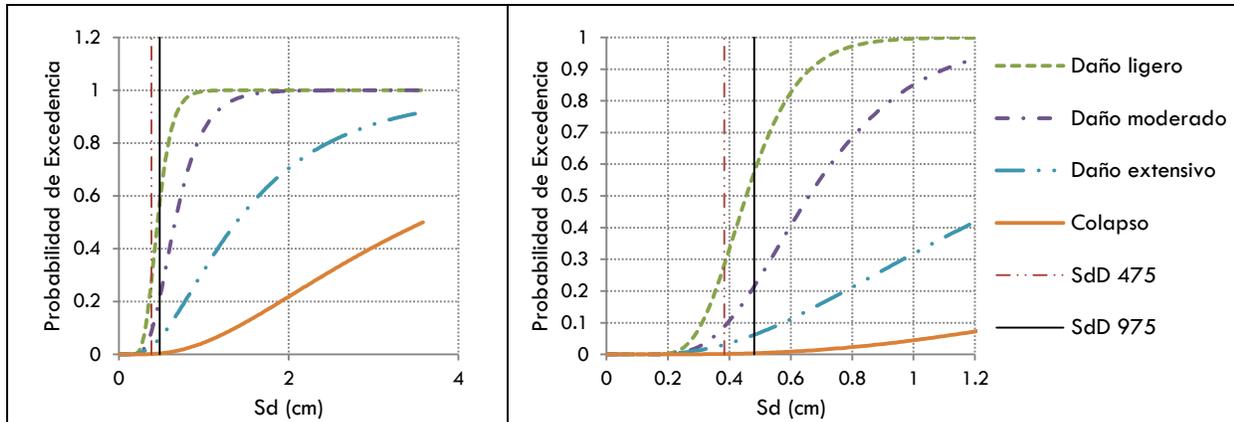
**Figura 95.** Curvas de fragilidad para el Templo de la Merced, proporciones reales.

$$S_{dD} 475 = 0.696\text{cm}; S_{dD} 975 = 0.872\text{cm}$$



**Figura 96.** Curvas de fragilidad para el Templo de la Merced, 1ª regla del gótico.

$$S_{dD} 475 = 0.6720\text{cm}; S_{dD} 975 = 0.8496\text{cm}$$



**Figura 97.** Curvas de fragilidad para el Templo de la Merced, 2ª regla del gótico.  
 $S_{dB} 475 = 0.3835\text{cm}$ ;  $S_{dB} 975 = 0.4810\text{cm}$

**Tabla 60.** Matrices de probabilidad de daño para el Templo de la Merced en función de los puntos de desempeño obtenidos.

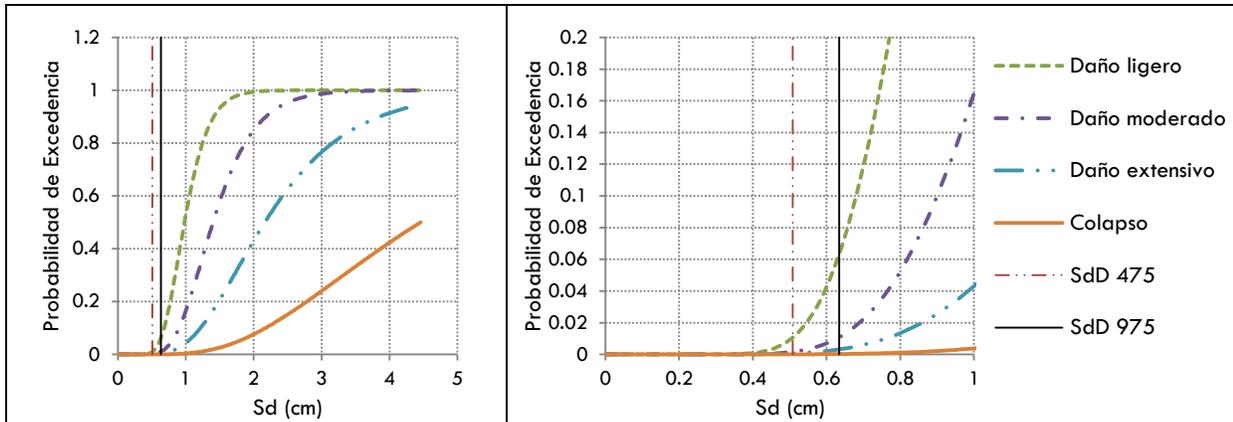
GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
<b>LIGERO</b>	0.73	0.91	0.73	0.91	0.28	0.56
<b>MODERADO</b>	0.34	0.52	0.34	0.52	0.08	0.22
<b>EXTENSIVO</b>	0.09	0.15	0.09	0.15	0.03	0.06
<b>COLAPSO</b>	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.005

Ya se había mencionado en el capítulo I que para el Templo de la Merced el espesor de los apoyos tanto en el modelo que conserva las proporciones reales como en el modelo modificado con la primera regla del gótico, es el mismo, por lo que podemos observar que las Figuras 95 y 96 exhiben el mismo comportamiento, lo que indica que el diseño de este templo presenta en sus medidas reales la primera regla geométrica del gótico.

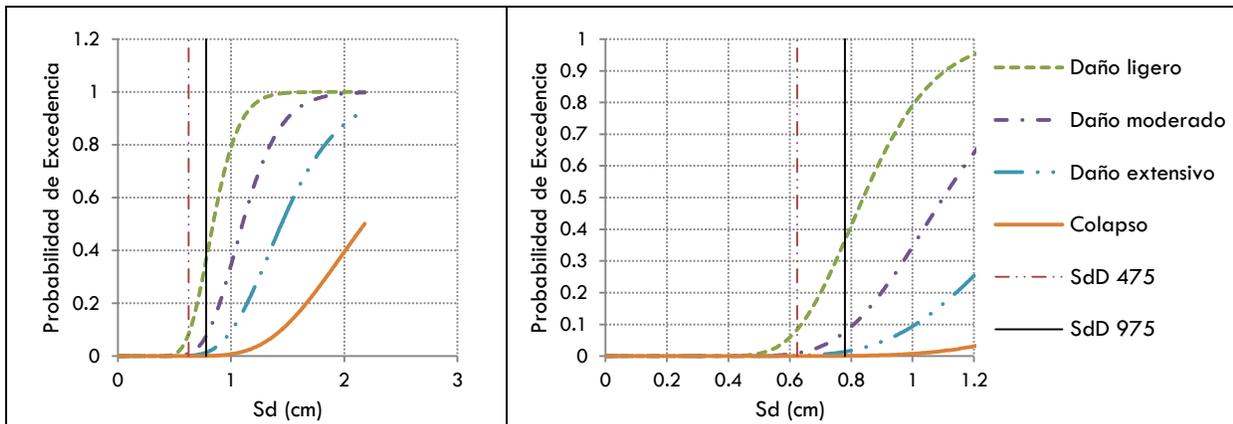
Podemos observar en la Tabla 60 que las matrices de probabilidad de daño tanto para el modelo de proporciones reales como para el modelo que se obtuvo a partir de la primera regla del gótico son iguales: para daño ligero las posibilidades ascienden a 73% y 91% para las respectivas demandas; para el daño moderado 34% y 52%; para daño extensivo 9% y 15%; mientras que para el colapso solo se presenta un 1% de posibilidades para la demanda mayor.

La Figura 97 muestra que las probabilidades de daño son menores que en los modelos anteriores, ya que la modificación con la segunda regla exhibe un mejor comportamiento.

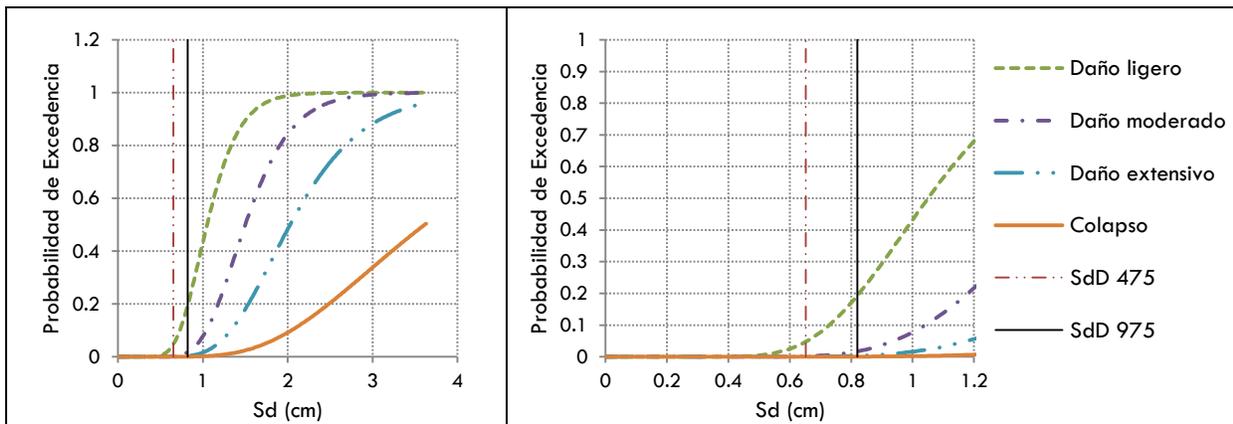
Posgrado de Ingeniería Civil



**Figura 98.** Curvas de fragilidad para el Templo de Santa Rosa de Lima, proporciones reales.  
 $S_{dD} 475 = 0.5082\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.6342\text{cm}$



**Figura 99.** Curvas de fragilidad para el Templo de Santa Rosa de Lima, 1ª regla del gótico.  
 $S_{dD} 475 = 0.624\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.780\text{cm}$



**Figura 100.** Curvas de fragilidad para el Templo de Santa Rosa de Lima, 2ª regla del gótico.  
 $S_{dD} 475 = 0.6525\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.8205\text{cm}$

**Tabla 61.** Matrices de propabilidad de daño para el Templo de Santa Rosa de Lima en función de los puntos de

desempeño obtenidos.

GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
LIGERO	0.010	0.063	0.08	0.36	0.05	0.19
MODERADO	0.003	0.015	0.01	0.08	0.00	0.02
EXTENSIVO	0.000	0.002	0.00	0.02	0.00	0.00
COLAPSO	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00

En el Templo de Santa Rosa de Lima volvemos a encontrar que la modificaciones a la sección original no mejoraron el comportamiento de la estructura, ya que la Tabla 61, en las matrices de probabilidad de daño, podemos comparar los valores numéricos. Se puede ver que los porcentajes de daño son mínimos para el modelo con proporciones reales, mientras que la mayor posibilidad de daño se presenta en el modelo modificado con la primera regla del gótico.

Si comparamos valores tenemos que existe el 1% y 6.3% de probabilidades de daño ligero para el modelo original, para las respectivas demandas asociadas a los periodos de retorno de 475 años y 975 años, mientras que para el modelo modificado con la primera regla se presenta el 8% y el 36% para las mismas demandas. Para el tercer modelo, modificado con la segunda regla del gótico tenemos un 5% y un 19% en el mismo orden.

Ningún modelo llega a tener posibilidades de colapso, pero se puede presentar daño extensivo en un 2% para demandas asociadas al periodo de retorno de 975 años en los dos primeros modelos.

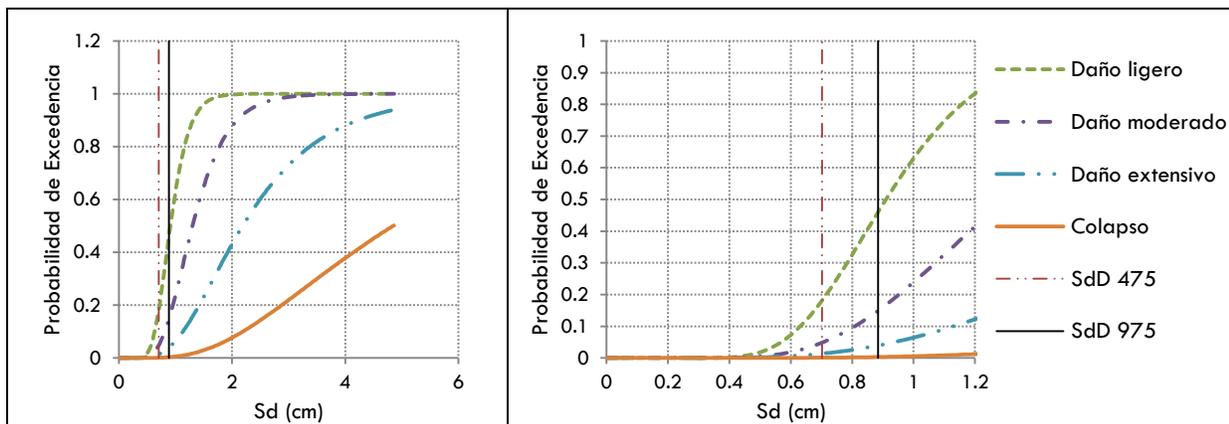
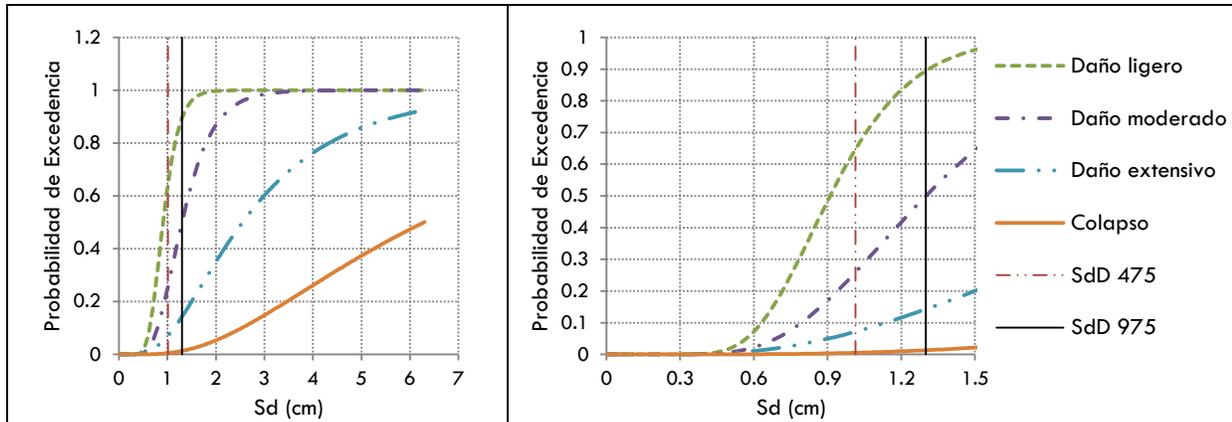


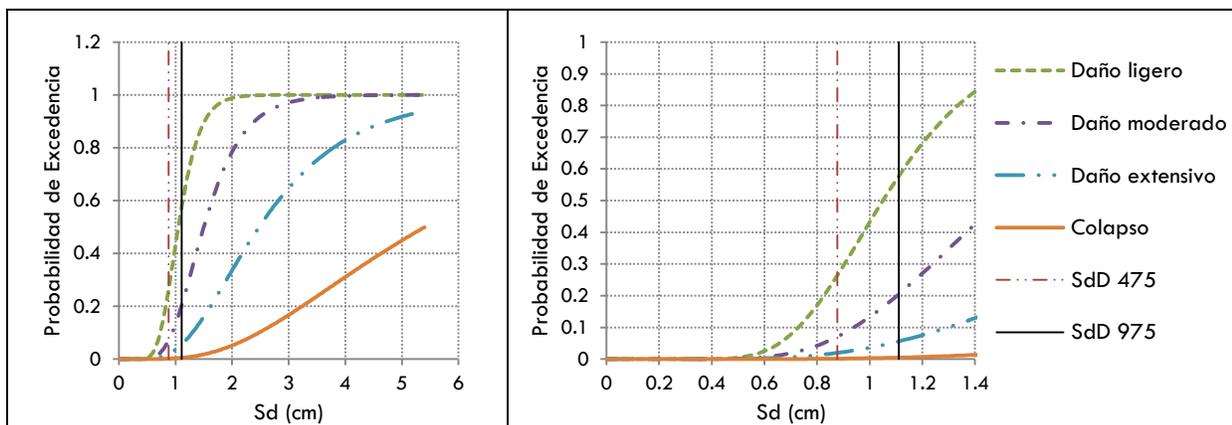
Figura 101. Curvas de fragilidad para el Templo de San José, proporciones reales.

$S_{db} 475 = 0.702\text{cm}$ ;  $S_{db} 975 = 0.884\text{cm}$



**Figura 102.** Curvas de fragilidad para el Templo de San José, 1ª regla del gótico.

$S_{dD} 475 = 1.014\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 1.300\text{cm}$



**Figura 103.** Curvas de fragilidad para el Templo de San José, 2ª regla del gótico.

$S_{dD} 475 = 0.8775\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 1.1100\text{cm}$

**Tabla 62.** Matrices de probabilidad de daño para el Templo de San José en función de los puntos de desempeño obtenidos.

GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
LIGERO	0.18	0.46	0.65	0.90	0.26	0.56
MODERADO	0.05	0.15	0.26	0.50	0.08	0.20
EXTENSIVO	0.02	0.04	0.08	0.14	0.02	0.05
COLAPSO	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01

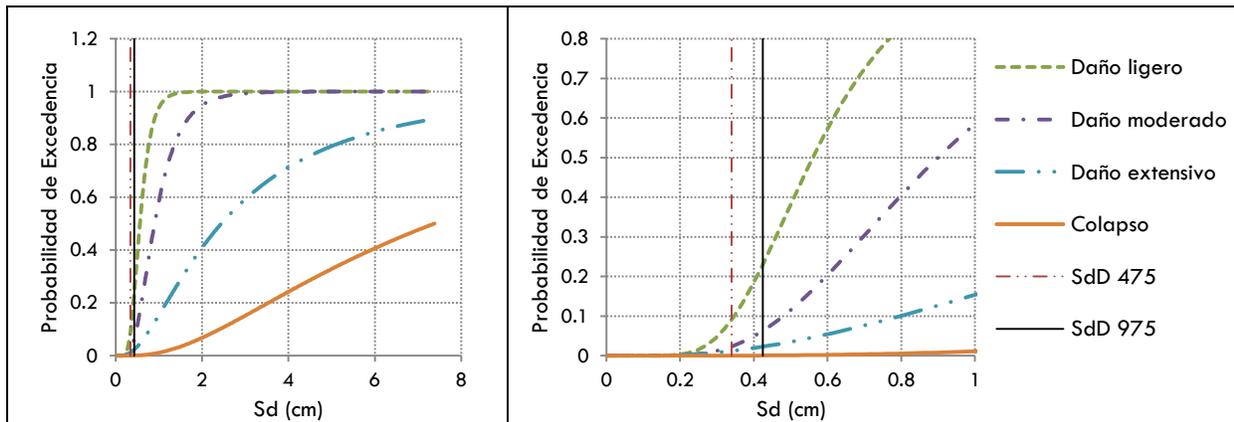
El Templo de San José, uno de los templos de mayor tamaño en este estudio, presenta mejor comportamiento en su modelo original que en los modelos modificados. En la [Figura 24](#), que muestra los espesores de los apoyos tanto de la sección con proporciones reales como de las secciones resultado de la aplicación de las reglas del gótico, podemos observar que el mayor

espesor lo posee el modelo original, lo que también se ve reflejado en esta sección del trabajo, ya que la vulnerabilidad de los modelos es mayor al modificar el macroelemento original.

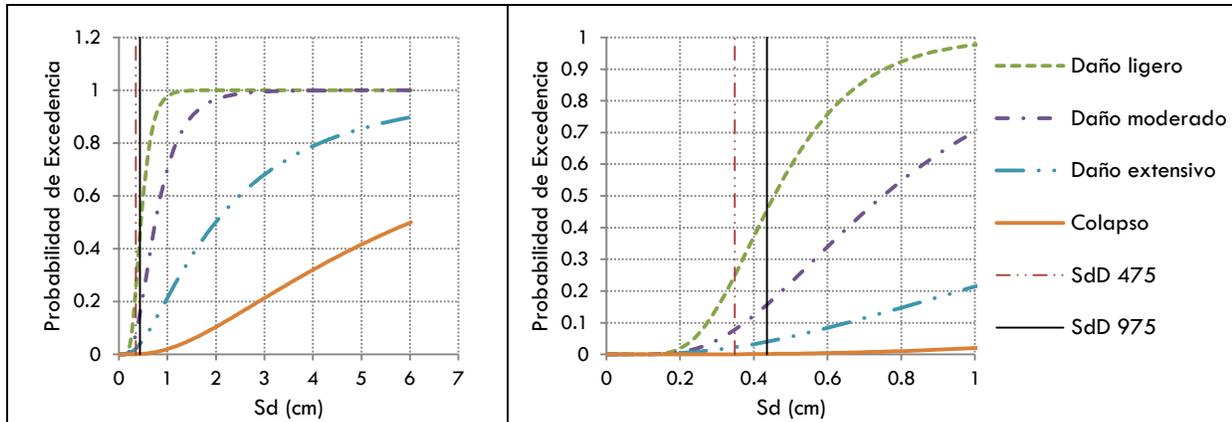
Mientras que para el modelo con proporciones reales solo se presenta el 18% y el 46% de probabilidades de daño ligero para las respectivas demandas sísmicas, para el modelo modificado con la primera regla del gótico estas posibilidades ascienden al 65% y 90% respectivamente y, aunque las probabilidades disminuyen un poco para el modelo modificado con la segunda regla del gótico, con 26% y 56% para daño ligero, aún siguen siendo mayores que para el modelo original (ver [Tabla 62](#))

En lo que respecta al daño moderado y extensivo, vemos la misma tendencia, menores posibilidades de daño para el modelo original, le sigue el modelo con características de la segunda regla del gótico aumentando las probabilidades y finalmente el modelo con características de la primera regla del gótico, con el orden de mayor probabilidad de daño.

Existen posibilidades de hasta el 1% de colapso para ambos modelos, lo cual indica que, en este caso, la aplicación de las reglas del gótico no representa mejoría alguna en el comportamiento sísmico de esta estructura en particular.

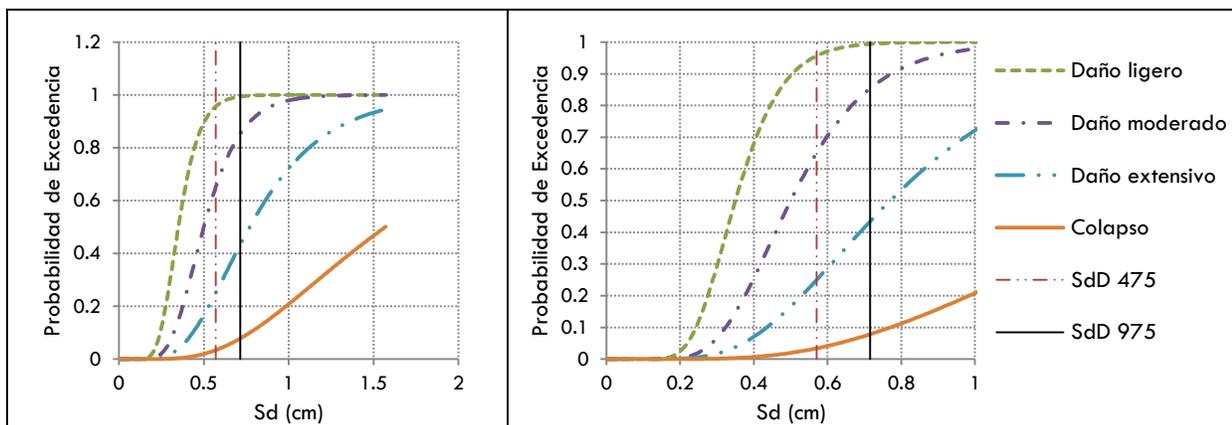


**Figura 104.** Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, proporciones reales.  
 $S_{dD} 475 = 0.340\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.424\text{cm}$



**Figura 105.** Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, 1ª regla del gótico.

$S_{dD} 475 = 0.3484\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.4355\text{cm}$



**Figura 106.** Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, 2ª regla del gótico.

$S_{dD} 475 = 0.570\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.715\text{cm}$

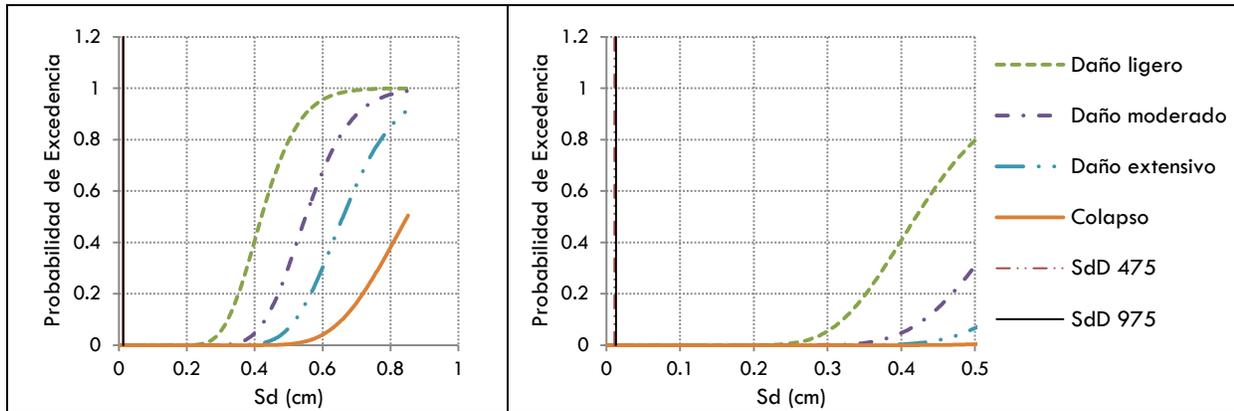
**Tabla 63.** Matrices de probabilidad de daño para la Iglesia Catedral de la Transfiguración en función de los puntos de desempeño obtenidos.

GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
<b>LIGERO</b>	0.08	0.23	0.26	0.45	0.95	0.99
<b>MODERADO</b>	0.03	0.07	0.08	0.16	0.65	0.85
<b>EXTENSIVO</b>	0.02	0.02	0.03	0.04	0.25	0.43
<b>COLAPSO</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.08

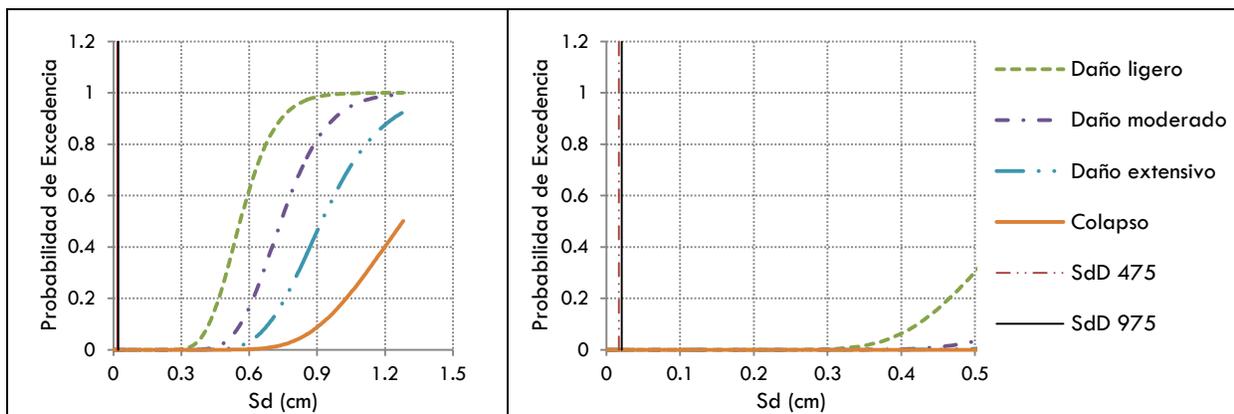
En los modelos transversales de la Iglesia Catedral de la Transfiguración se presenta el caso general de las estructuras en este estudio, el modelo original exhibe mejor comportamiento que los modificados con las reglas del gótico.

Los resultados de las curvas de capacidad para esta estructura y sus modificaciones (**Figuras 104-106**) se muestran en la **Tabla 63**, donde podemos observar numéricamente lo mencionado en el párrafo anterior. Para el modelo original, para el desplazamiento asociado a la demanda sísmica con periodo de retorno de 475 años y 975 años, las probabilidades de daño son para grado ligero 8% y 23%, moderado 3% y 7%, extensivo 2% en ambos casos, y sin posibilidad de colapso. Mientras que para el modelo modificado con la primera regla del gótico las probabilidades aumentan para daño ligero a 26% y 45%, daño moderado 8% y 16%, daño extensivo 3% y 4%, respectivamente. Ya que al modificar la sección con la segunda regla del gótico el modelo resultó ser más esbelto, esto se ve reflejado en los resultados pues aumenta notablemente su vulnerabilidad, las probabilidades aumentan para el daño ligero a 95% y 99%, para daño moderado a 65% y 85%, para daño extensivo a 25% y 43%, y en este caso se presenta el 3% y 8% de colapso.

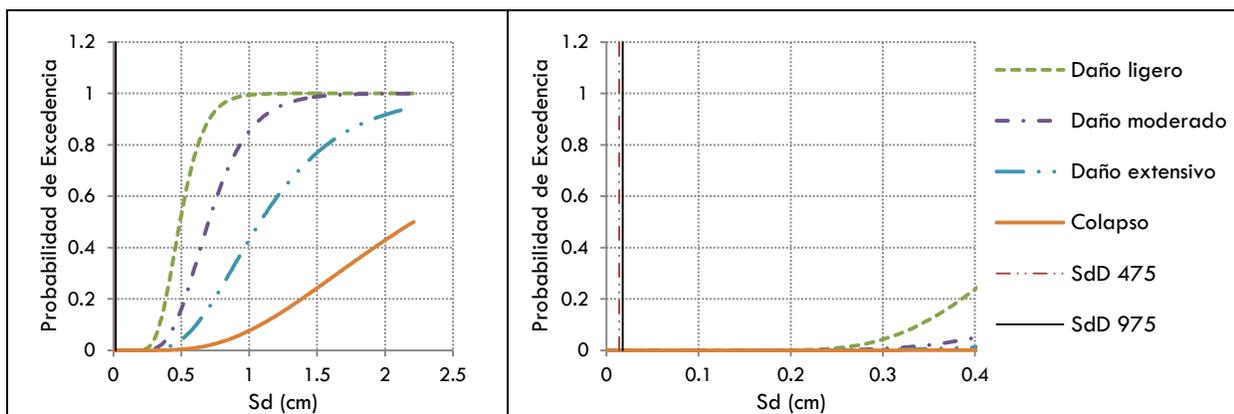
## CURVAS DE FRAGILIDAD Y MATRICES DE PROBABILIDAD PARA MACROELEMENTOS LONGITUDINALES



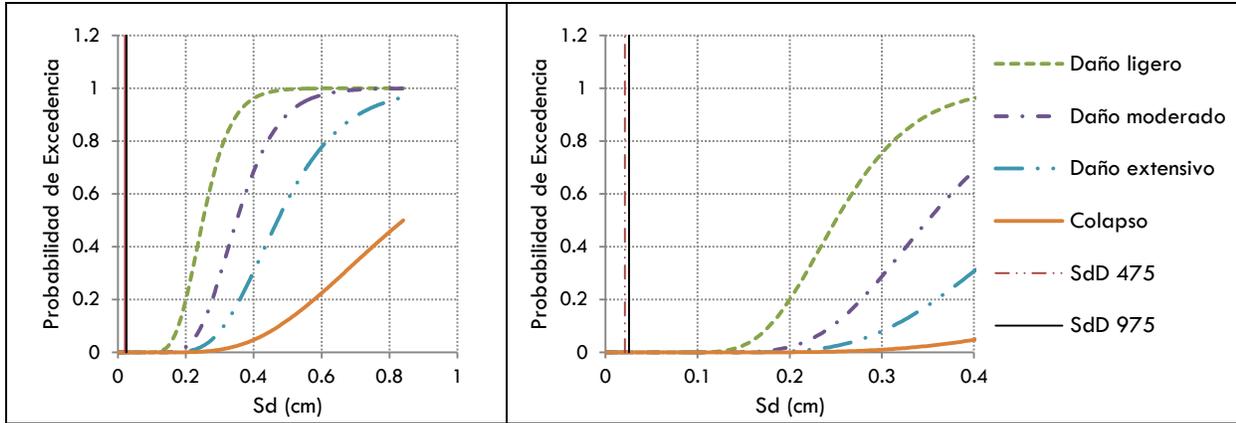
**Figura 107.** Curvas de fragilidad para el templo de San Agustín.  
 $S_{dD} 475 = 0.0108\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.0132\text{cm}$



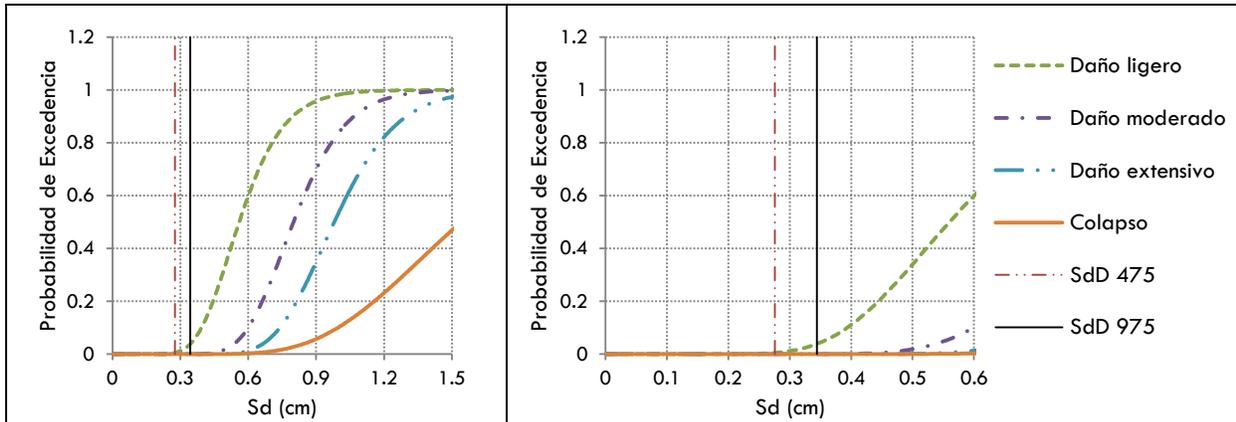
**Figura 108.** Curvas de fragilidad para el templo franciscano de San Buenaventura.  
 $S_{dD} 475 = 0.0168\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.0208\text{cm}$



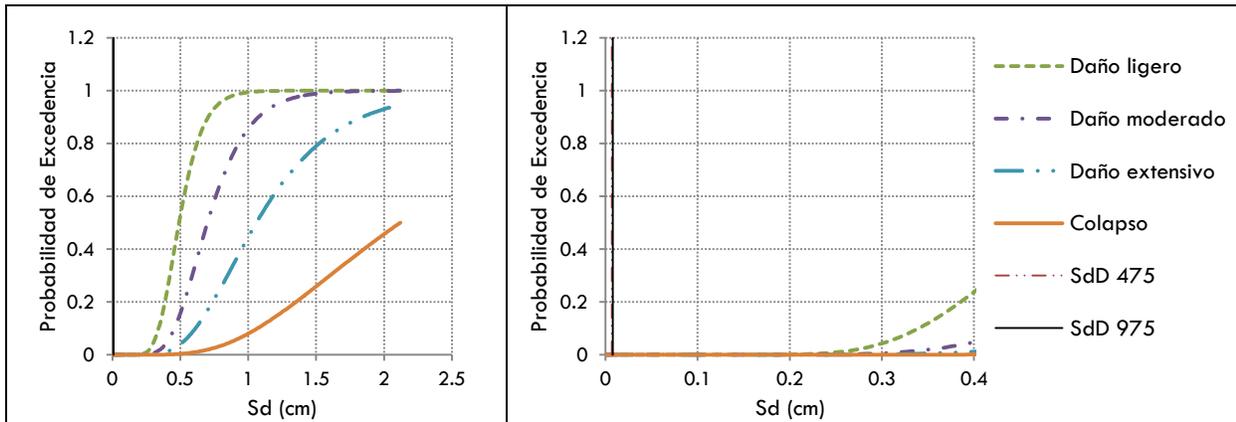
**Figura 109.** Curvas de fragilidad para el templo del Carmen.  
 $S_{dD} 475 = 0.0140\text{cm}$ ;  $S_{dD} 975 = 0.0175\text{cm}$



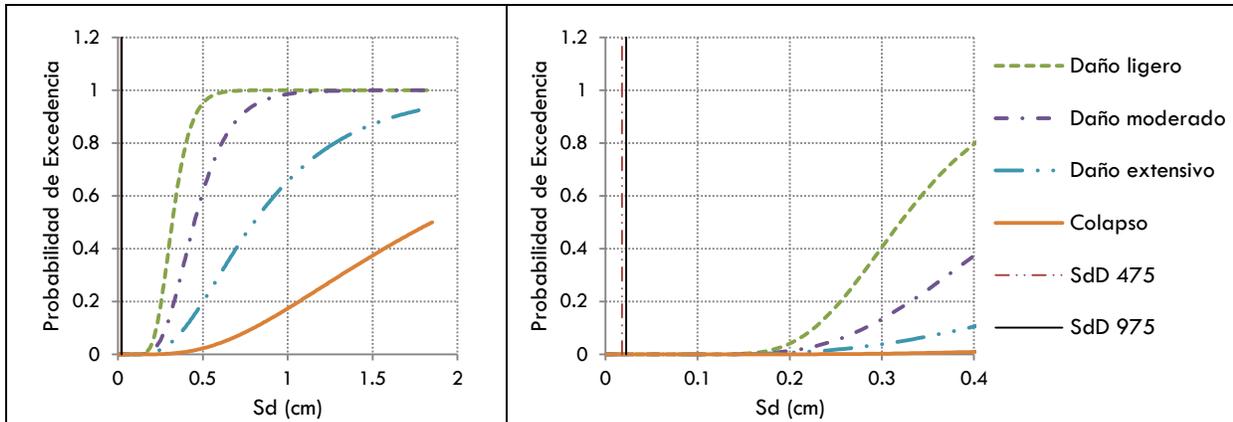
**Figura 110.** Curvas de fragilidad para el Templo de San Francisco Javier.  
**SdP 475 = 0.0210cm; SdP 975 = 0.0256cm**



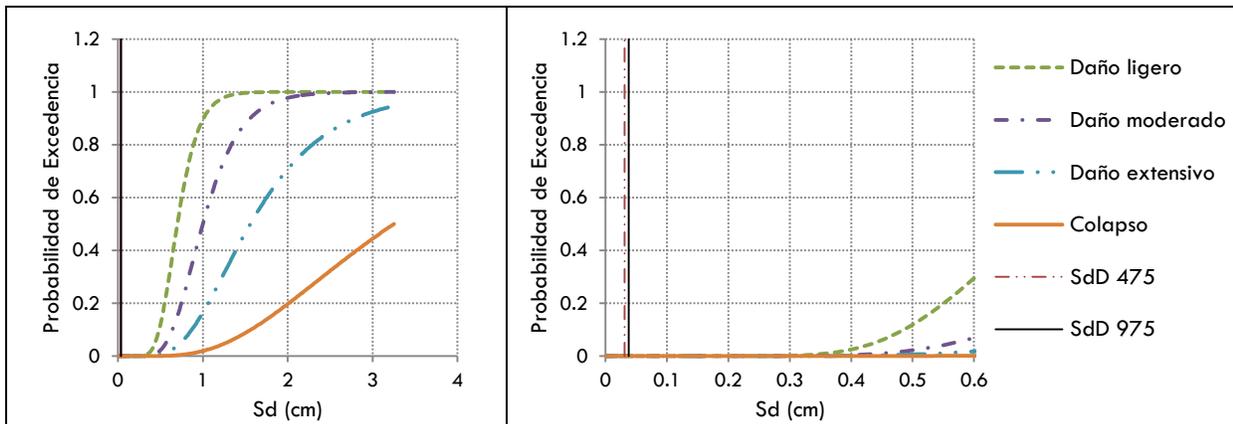
**Figura 111.** Curvas de fragilidad para el Templo de la Cruz.  
**SdP 475 = 0.276cm; SdP 975 = 0.344cm**



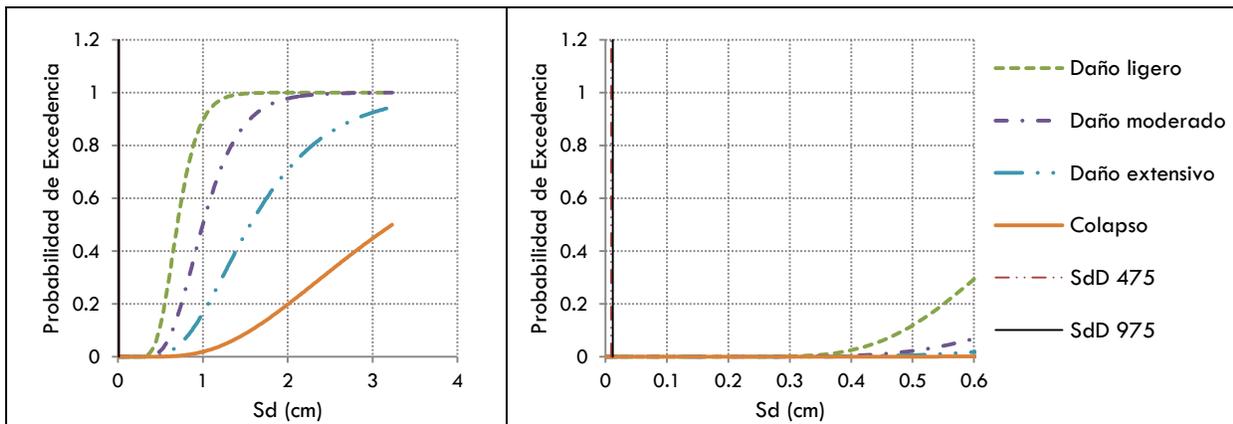
**Figura 112.** Curvas de fragilidad para el Templo de San Juan Bautista.  
**SdP 475 = 0.0068cm; SdP 975 = 0.0081cm**



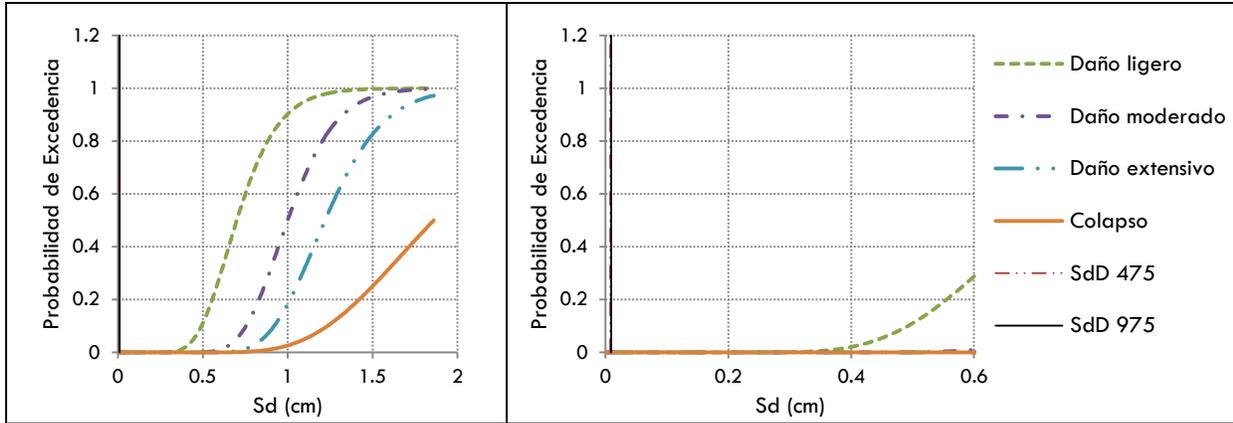
**Figura 113.** Curvas de fragilidad para el Templo de Guadalupe.  
**SdP 475 = 0.0180cm; SdP 975 = 0.0225cm**



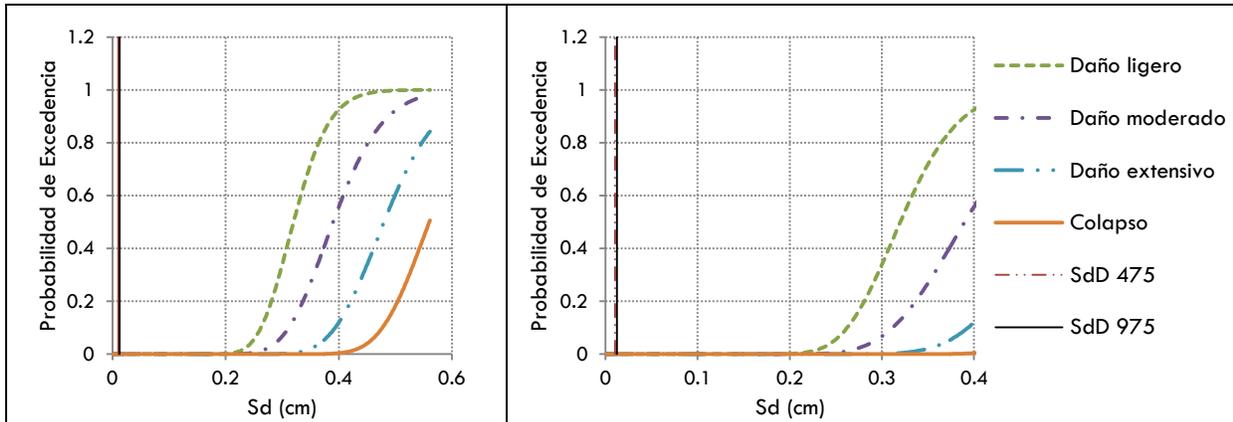
**Figura 114.** Curvas de fragilidad para el Templo de las Monjas.  
**SdP 475 = 0.031cm; SdP 975 = 0.038cm**



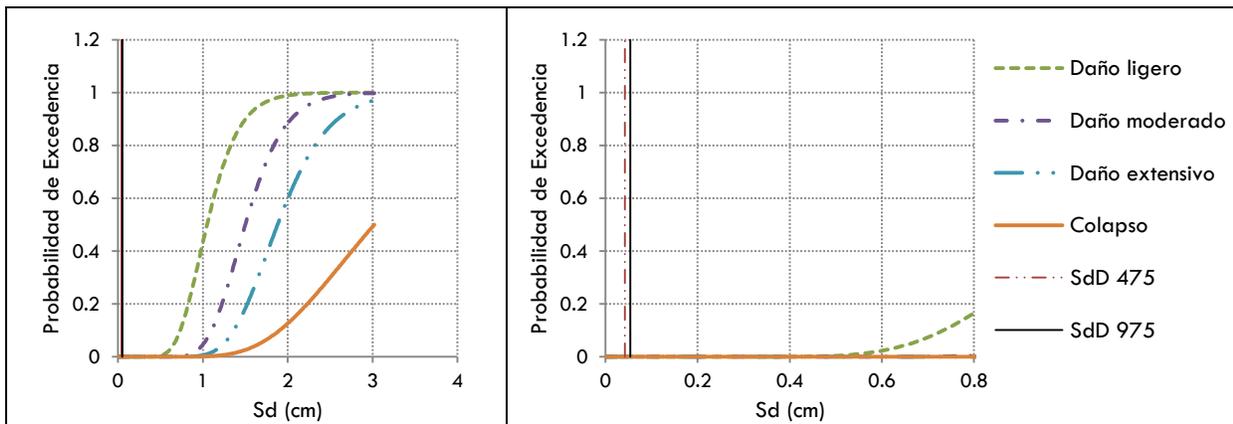
**Figura 115.** Curvas de fragilidad para el Templo de Capuchinas.  
**SdP 475 = 0.0095cm; SdP 975 = 0.0120cm**



**Figura 116.** Curvas de fragilidad para el Templo de la Merced.  
**SdP 475 = 0.0080cm; SdP 975 = 0.0095cm**



**Figura 117.** Curvas de fragilidad para el Templo de Santa Rosa de Lima.  
**SdP 475 = 0.0104cm; SdP 975 = 0.0126cm**



**Figura 118.** Curvas de fragilidad para el Templo de San José.  
**SdP 475 = 0.042cm; SdP 975 = 0.054cm**

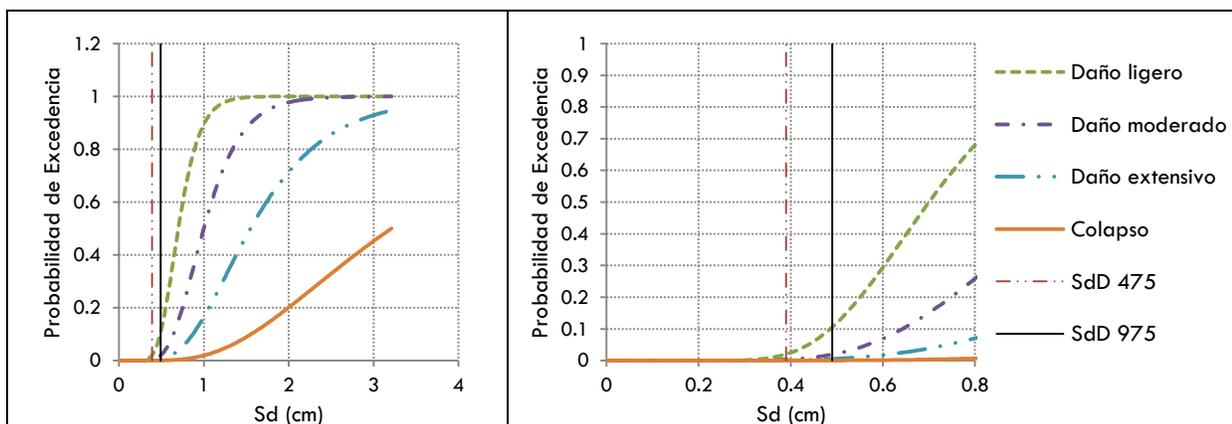
**Posgrado de Ingeniería Civil**

Los macroelementos longitudinales de los templos con una sola nave cuentan con gran rigidez, lo que se puede observar tanto en la obtención de los puntos de desempeño ([Anexo B](#)) como en las curvas de fragilidad ([Figuras 107-118](#)), ya que mientras se obtienen deformaciones pequeñas la capacidad de la estructura para resistir la aplicación de la fuerza incremental no se compara con la capacidad de los macroelementos transversales.

Optamos por no resumir los resultados en matrices de probabilidad de daño, ya que, como podemos observar claramente en las curvas de fragilidad, los desplazamientos asociados a las demandas sugeridas en este estudio, que corresponden a los periodos de retorno de 475 años y 975 años, son tan pequeños que en ningún caso existe la posibilidad de algún grado de daño, con la excepción del modelo para el templo de la Cruz, el cual para una demanda asociada a un periodo de retorno de 975 años presenta posibilidades del 0.2% de aparición de daño ligero.

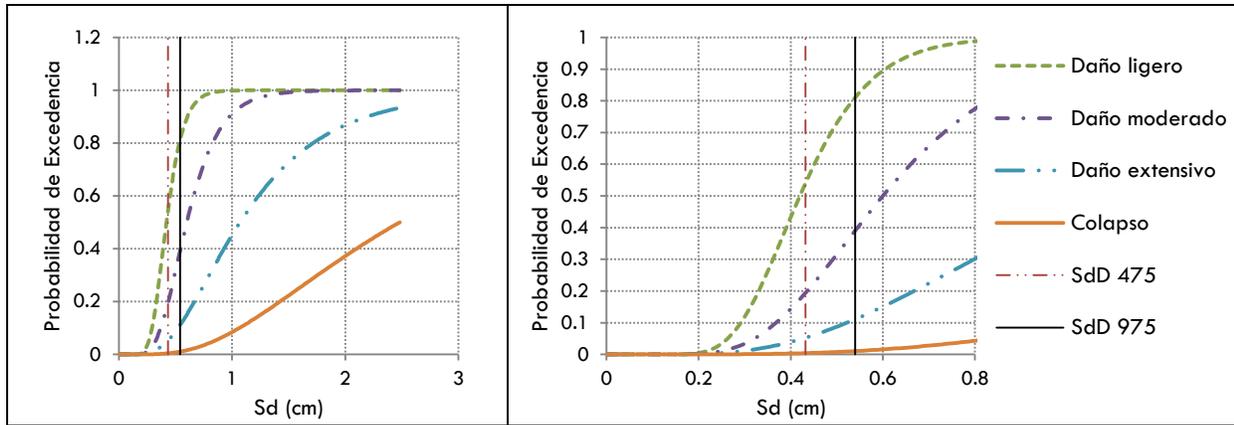
En general las secciones transversales, ya que trabajan como muro, son bastante rígidas, ya que la aplicación de la fuerza se encuentra en dirección longitudinal también, y aunque poseen huecos que representan tanto puertas como ventanas, ninguno representa disminución notoria en la capacidad de la estructura.

Debido a que, solo se analizó el modelo original para los macroelementos longitudinales de templos de una nave, no podemos comparar el comportamiento con alguna modificación basada en las reglas del gótico.

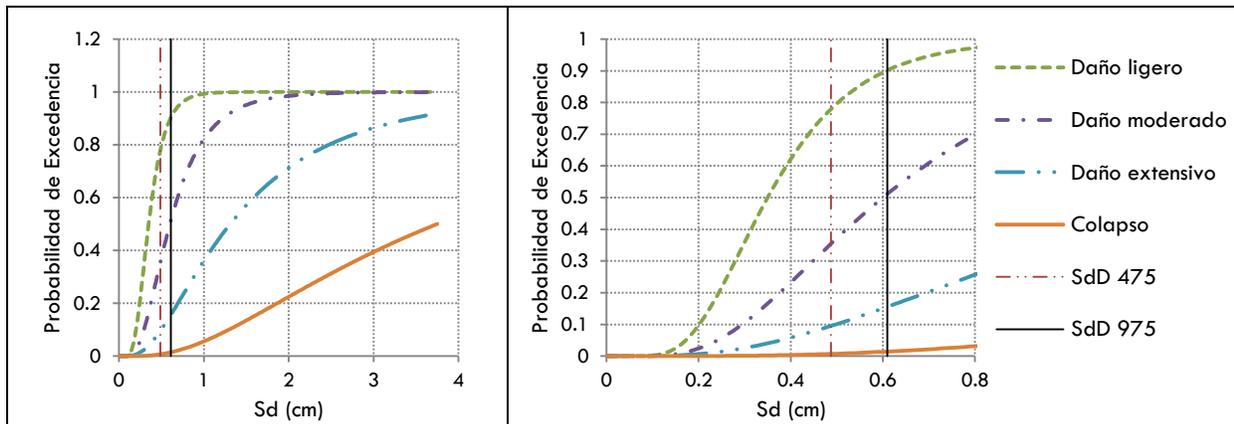


**Figura 119.** Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, proporciones reales.

**SdP 475 = 0.39cm; SdP 975 = 0.49cm**



**Figura 120.** Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, 1ª regla del gótico.  
**SdP 475 = 0.432cm; SdP 975 = 0.540cm**



**Figura 121.** Curvas de fragilidad para la Iglesia Catedral de la Transfiguración, 2ª regla del gótico.  
**SdP 475 = 0.4875cm; SdP 975 = 0.6100cm**

**Tabla 64.** Matrices de propabilidad de daño para la Iglesia Catedral de la Transfiguración en función de los puntos de desempeño obtenidos.

GRADO DE DAÑO	PROPORCIONES REALES		1ª REGLA DEL GÓTICO		2ª REGLA DEL GÓTICO	
	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años	TR=475 años	TR=975 años
<b>LIGERO</b>	0.02	0.11	0.54	0.82	0.78	0.90
<b>MODERADO</b>	0.00	0.02	0.18	0.40	0.36	0.51
<b>EXTENSIVO</b>	0.00	0.00	0.04	0.12	0.10	0.16
<b>COLAPSO</b>	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02

Ya que la Catedral de la ciudad cuenta con tres naves longitudinales en su planta arquitectónica a diferencia de los doce templos anteriores, nos fue posible modificar el macroelemento de manera que podemos hacer nuevamente una comparación entre un modelo original y los modificados con base en las reglas geométricas del gótico.

**Posgrado de Ingeniería Civil**

Al igual que la sección transversal, el modelo original exhibe un mejor comportamiento, ya que para las demandas sísmicas asociadas a los periodos de retorno estudiados, solo existen posibilidades de que haya un 2% y un 11% de daño ligero, y alcanza un 2% de probabilidades de daño moderado para una demanda de 975 años. En cambio para los modelos modificados las probabilidades ascienden de manera alarmante, ya que para el modelo que lleva las características de la primera regla del gótico alcanza probabilidades de 54% y 82% de presentar daño ligero, probabilidades de 18% y 40% de presentar daño moderado, probabilidades de 4% y 12% de presentar daño extensivo y alcanza el 1% de probabilidades de colapso para una demanda asociada a un periodo de retorno de 975 años. La modificación basada en la segunda regla del gótico, al igual que en la sección transversal, es la más vulnerable, ya que presenta probabilidades aún mayores que las mostradas en la primera modificación, incluso llega al 1% de probabilidades de colapso para una demanda de 475 años y del 2% para una demanda de 975 años.



# **CAPÍTULO V**

---

## **CONCLUSIONES**

## Posgrado de Ingeniería Civil

Se llegó a la conclusión de que la mayoría de las secciones estudiadas no presentan características geométricas correspondientes a alguna regla del gótico, con excepción del macroelemento transversal que representa el Templo de La Merced (1736), el cual presenta la primera regla del gótico.

En los macroelementos transversales, las diferencias que surgen entre los comportamientos resultado de las modificaciones geométricas del gótico, se deben principalmente a que un mismo arco genera diferentes espesores de apoyos para cada una de las proporciones, sin embargo, se presentó un caso (ver la [Figura 18](#)) donde ambas modificaciones coinciden en el ancho del apoyo, esto se debe a que la forma de arco que presenta el templo de San Juan Bautista, permite que ambas proporciones converjan en un mismo espesor. Este arco tiene una relación de radios de 2.85m en base contra 2.78m de altura, es decir que el radio en la base es aproximadamente un 2.5% mayor que el radio en altura.

Ambas proporciones del gótico exhibieron diferencias en el comportamiento sísmico basadas en la forma del arco de cada macroelemento transversal, así pues para la primera regla del gótico mientras más apuntado sea el arco el espesor de los apoyos será mayor en relación a la segunda regla del gótico y viceversa. En el [Anexo B](#) se puede apreciar de manera gráfica lo anterior, ya que dependiendo de este factor será la posición en que se encuentran los espectros de capacidad para ambos casos.

lo que explica la posición en que se encuentran los espectros de capacidad para ambos casos en las Figuras 5 a 17.

Las reglas empíricas de dimensionamiento no mejoran el comportamiento sísmico de las estructuras, salvo aquellos casos donde estas reglas proponen un ancho de apoyos de mayor espesor, tal es el caso del templo franciscano de San Buenaventura (1585) y el Templo de la Merced (1736).

Corroborando lo anterior, se puede observar en el apartado de desempeño sísmico que la mayoría de los espectros de capacidad bilinealizados que corresponden a los macroelementos originales, poseen una mayor rigidez (ver en gráficas de los espectros de capacidad en el Anexo B), con las excepciones de los modelos antes mencionados, el templo franciscano de San Buenaventura, cuya rigidez es claramente mayor para los modelos modificados que para el

modelo original; el otro caso es el templo de la Merced, que, aunque como se mencionó el modelo original posee características de la primera regla del gótico, el modelo modificado con la segunda regla del gótico presenta una mayor rigidez que la obtenida en su modelo original.

Al analizar las curvas de fragilidad, podemos observar que la mayoría de los casos tanto la primera como la segunda regla del gótico, presentan una mayor vulnerabilidad, excepto los casos donde ambas reglas mejoraron el comportamiento estructural, es decir que en la mayoría de los macroelementos estudiados el uso de las reglas empíricas de dimensionamiento no aportaron mejoría al comportamiento estructural de los edificios que se presentan en este artículo.

Para hacer una comparación entre la vulnerabilidad de cada edificio con sus proporciones reales, propusimos un desplazamiento de 1cm, con lo cual podemos observar que los macroelemento más vulnerables son el templo franciscano de San Buenaventura (Figura 20), el templo del Carmen (Figura 21), el templo del Carmen (Figura 21), por su rigidez el templo de la Cruz (Figura 23) y el templo de San Juan Bautista (Figura 24), el templo de la Merced (Figura 28) y finalmente la catedral de la Transfiguración (Figura 31)

## REFERENCIAS

---

George **Kubler**, *Arquitectura mexicana del siglo XVI*. Mexico: Fondo de Cultura Económica, **2012**.

V. **García** Acosta y G. Suárez Reynoso, *Los sismos en la historia de México*, FCE-CIESAS-UNAM, vol. 1, **1996**.

Santiago **Huerta**, *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España ca.1600 - ca.1800*, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid , Madrid , Tesis **1990**.

Ricardo León **Bonett** Díaz, *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Tesis doctoral, **2003**.

Santiago **Huerta**, *Arcos, bóvedas y cúpulas Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid, España, **2004**.

Siro **Casolo** y Fernando Peña, *Rigid element model for in-plane dynamics of masonry walls considering hysteretic behaviour and damage*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 36, 1029-1048, **2007**.

Fernando **Peña**, Programa RIGID v.4.0.1, *Manual del usuario*, Instituto de Ingeniería, UNAM, **2010**.

**Freeman**, S.A., *Development and use of capacity spectrum method*, in Proceedn Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering. Earthquake Engineering Reserch Inst., Oakland California, **1998**.

Giovinazzi S., Podestà S., Resemini S. **Lagomarsino** S., *Wp5 –Vulnerability of historical and monumental buildings Handbook. Risk- UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns*, Contract No. EVK4-CT-2000-00014, **2003**.

A.H. **Barbat**, L. Pujades, y N. Lantada, *Performance of buildings under earthquakes in Barcelona, Spain*, in Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, **2006**, 573–593.

Siro **Casolo** y Fernando **Peña**, *Modelo de elementos rígidos para el análisis de estructuras de mampostería*, Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería, vol. 21, no. 2, 193-211, **2005**.

**EMS-98**. European Macroseismic Scale. G. Grünthal, Chairman of the ESC Working Group Macroseismic Scales, GeoForschungsZentrum Potsdam, Germany. <http://www.gfz-potsdam.de/pb5/pb53/projekt/ems/>

**Dogliani F.**, Moretti A. y Petrini V., *Churches and earthquakes*, LINT. Trieste (en italiano), **1994**.

**Fajfar P.**, Gaspersic P., *The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25, **1996**, pp. 23-67.

**Cocco** Leonardo J., Suárez Luis E., Ruiz Miguel E., *Desarrollo de un método no-lineal de capacidad espectral para torres de toma de agua de presas*, Mecánica Computacional Vol XXIX, **2010**, pp. 353-378, Buenos Aires, Argentina

**Gaytán R.**, Martínez G., Rojas R., Roca P., Viviescas A. (2010), "Vulnerabilidad sísmica para el conjunto torres-fachada de la catedral de Morelia", XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León Guanajuato, **2010**.

**Martínez G.**, Rojas R., Gaytan R., *Caracterización Dinámica de las Torres de la Catedral de Morelia*, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, Puebla, **2009**.

**Martínez G.**, Rojas R., Gaytan R., Infante H., *Fragilidad sísmica para las naves de la Catedral de Morelia*, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Aguascalientes, **2011**.

**Martínez G.**, Rojas R., Infante H., *Comportamiento sísmico del histórico Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás en Morelia, Michoacán*, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, Puebla, **2009**.

**Lantada N.**, Pujades L. G., Barbat A. H., *Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison*, Springer Science+Business Media B. V., **2008**.



# ANEXO A

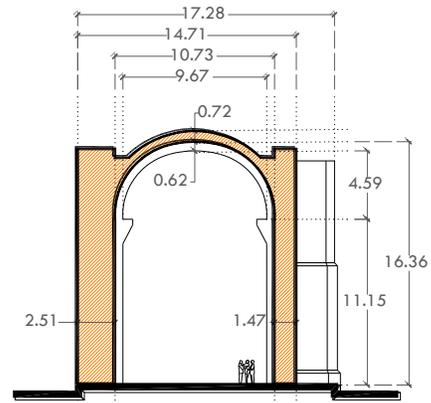
---

## PLANIMETRÍA

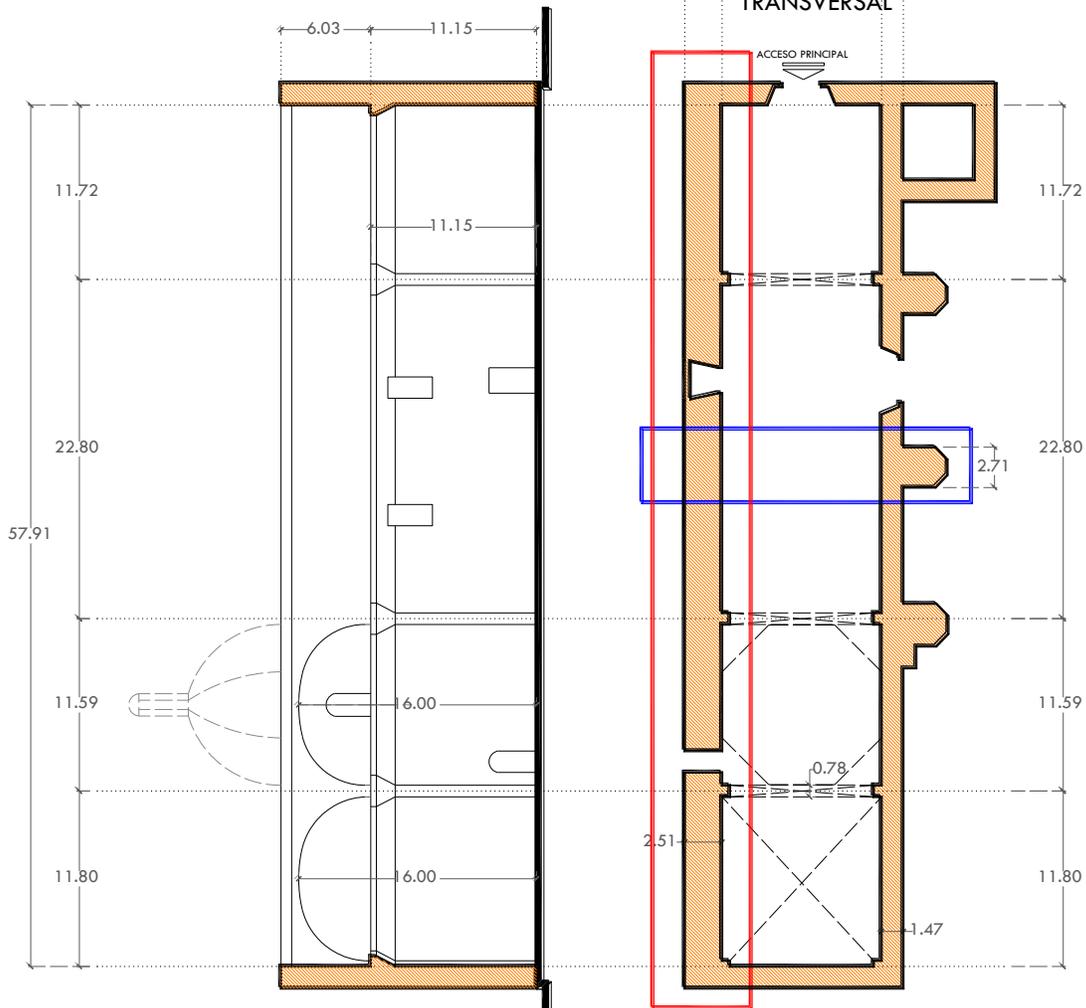
# 1. TEMPLO DE SAN AGUSTÍN (1550)



- Macroelemento transversal
- Macroelemento longitudinal

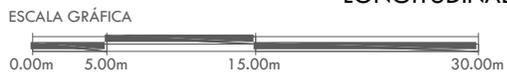


MACROELEMENTO  
TRANSVERSAL

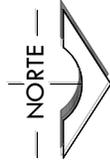


MACROELEMENTO  
LONGITUDINAL

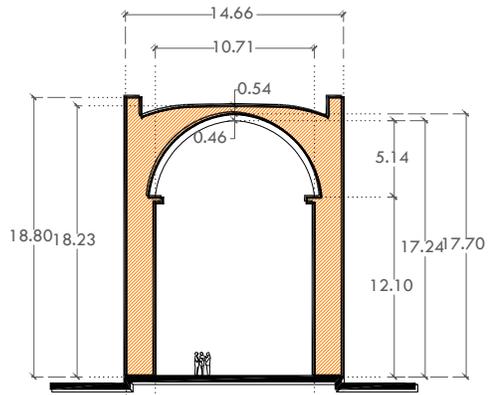
PLANTA  
ARQUITECTÓNICA



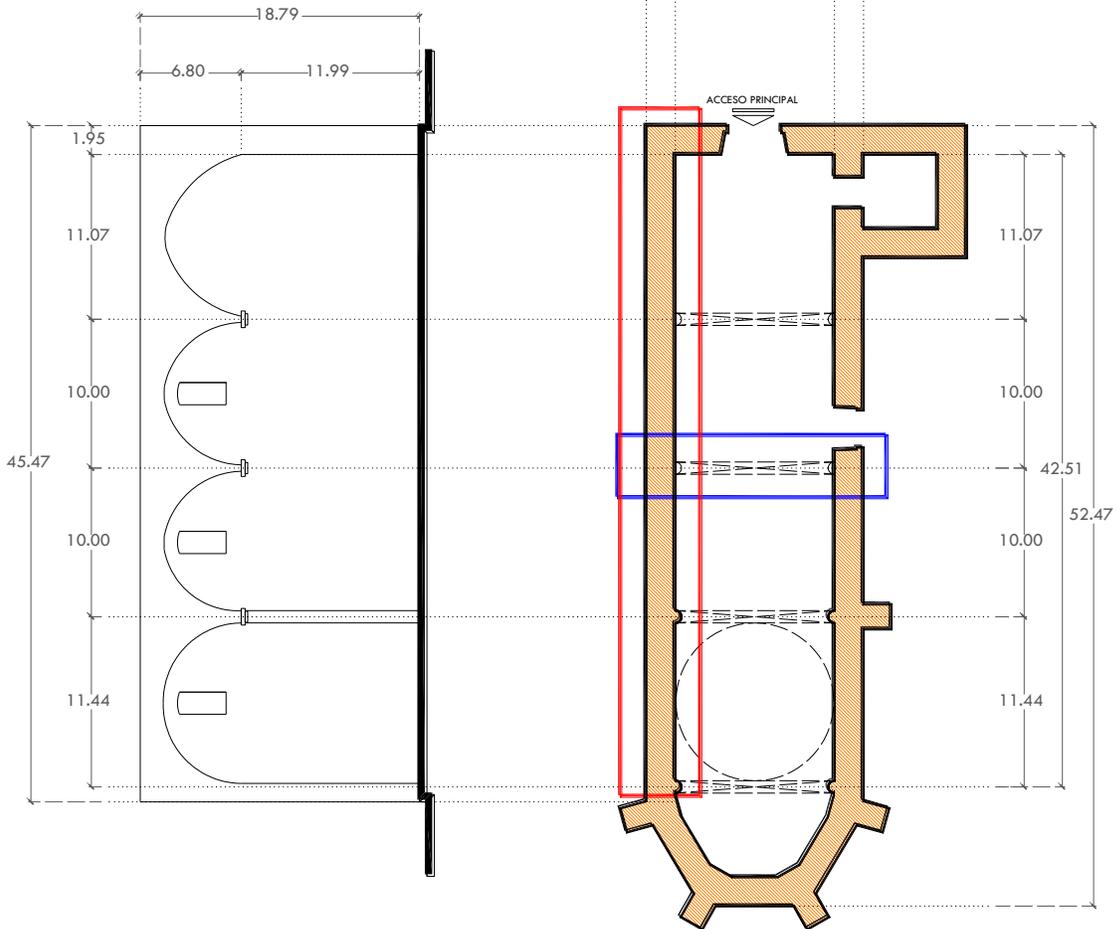
## 2. TEMPLO FRANCISCANO DE SAN BUENAVENTURA (1585)



- ▭ Macroelemento transversal
- ▭ Macroelemento longitudinal

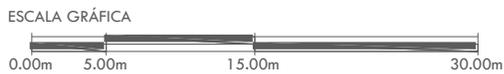


MACROELEMENTO TRANSVERSAL

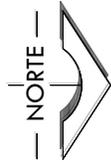


MACROELEMENTO LONGITUDINAL

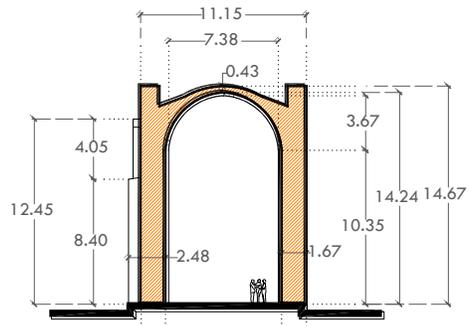
PLANTA ARQUITECTÓNICA



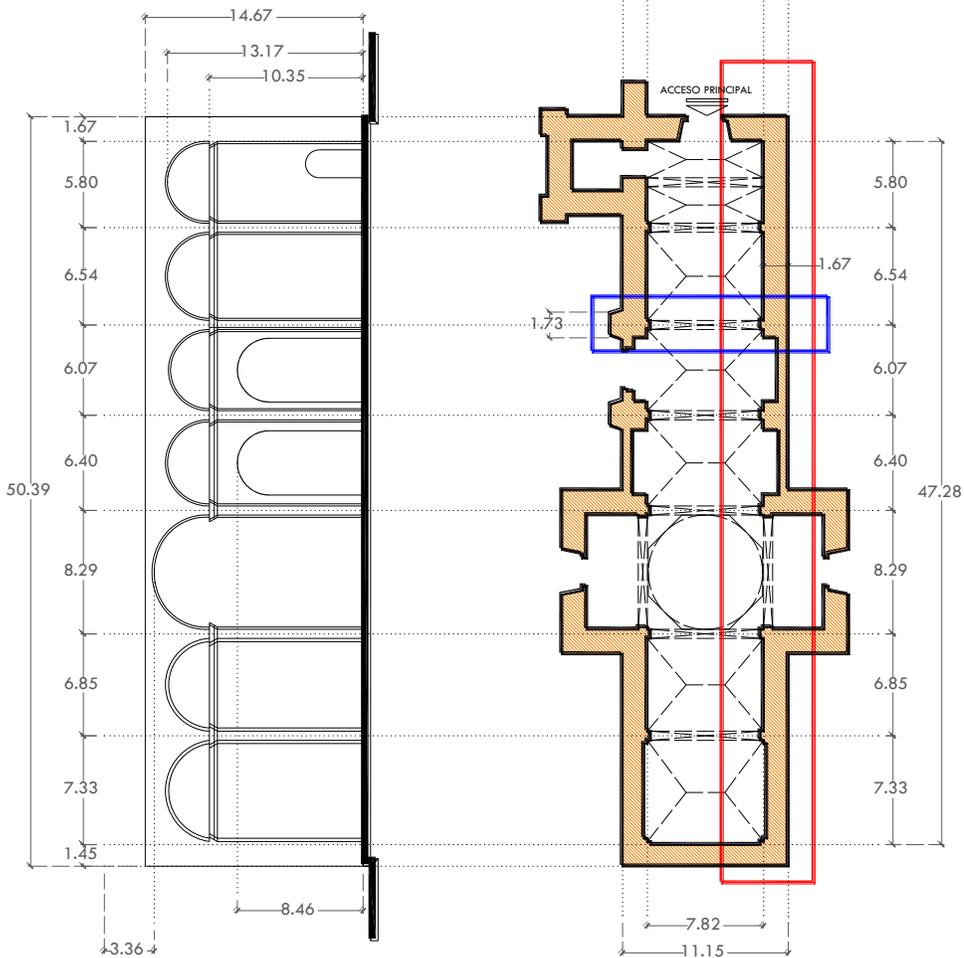
### 3. TEMPLO DEL CARMEN (1596)



- Macroelemento transversal
- Macroelemento longitudinal

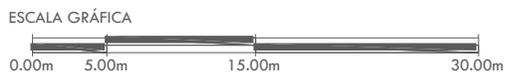


MACROELEMENTO  
 TRANSVERSAL



MACROELEMENTO  
 LONGITUDINAL

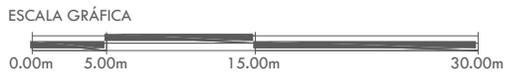
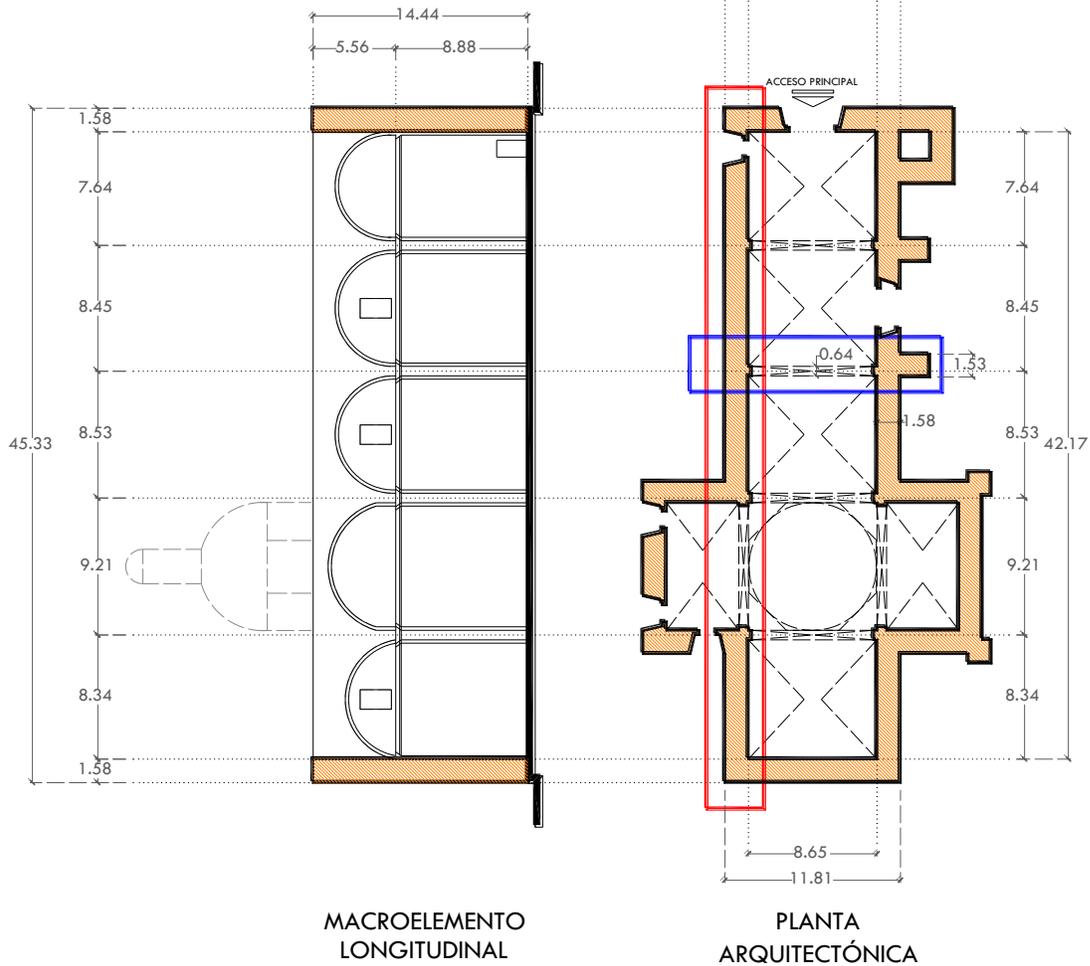
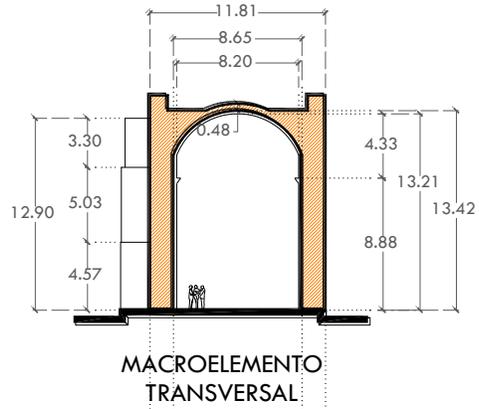
PLANTA  
 ARQUITECTÓNICA



#### 4. TEMPLO DE SAN FRANCISCO JAVIER (1660)



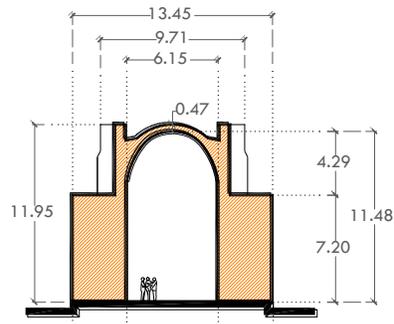
- Macroelemento transversal
- Macroelemento longitudinal



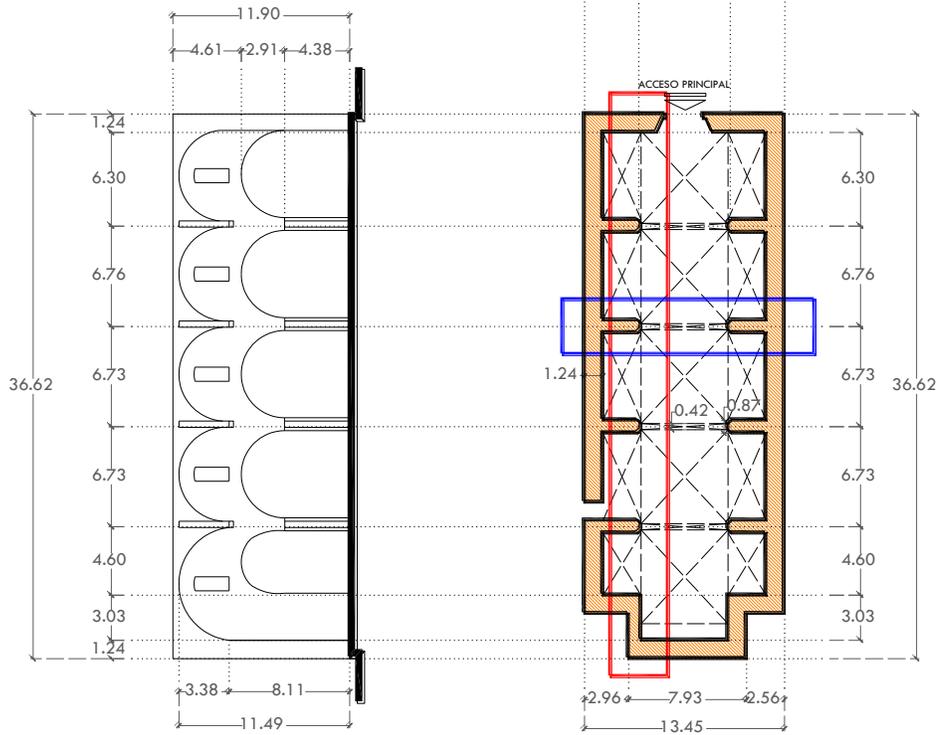
### 5. TEMPLO DE LA CRUZ (1680)



- Macroelemento transversal
- Macroelemento longitudinal

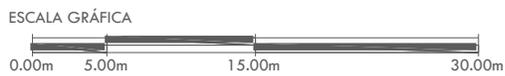


MACROELEMENTO  
 TRANSVERSAL

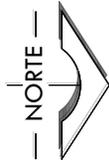


MACROELEMENTO  
 LONGITUDINAL

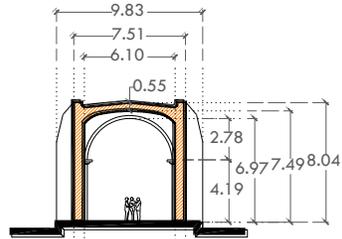
PLANTA  
 ARQUITECTÓNICA



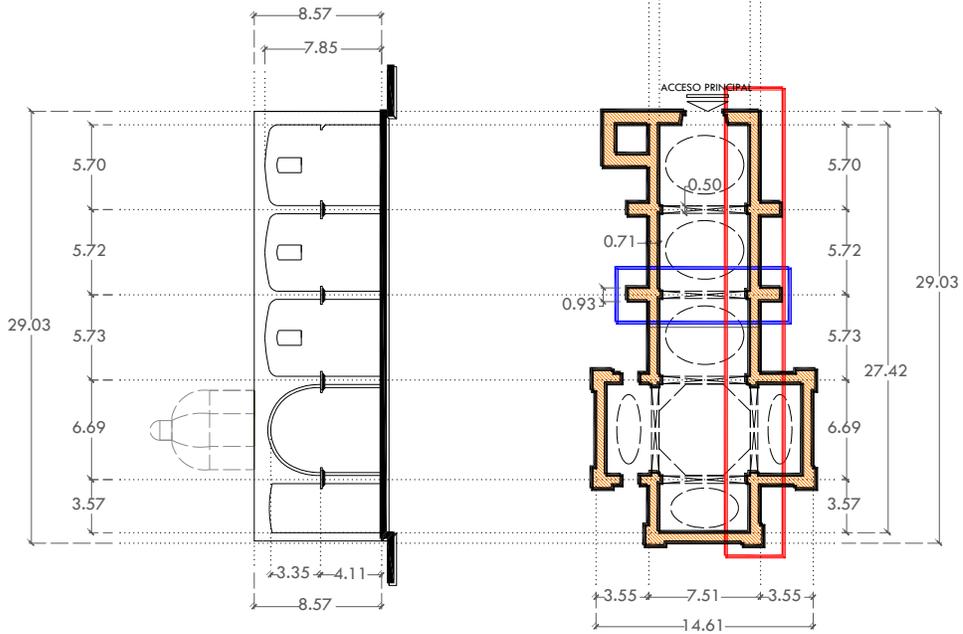
### 6. TEMPLO DE SAN JUAN BAUTISTA (1696)



- Macroelemento transversal
- Macroelemento longitudinal



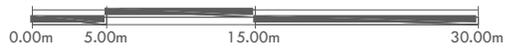
MACROELEMENTO  
TRANSVERSAL



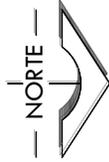
MACROELEMENTO  
LONGITUDINAL

PLANTA  
ARQUITECTÓNICA

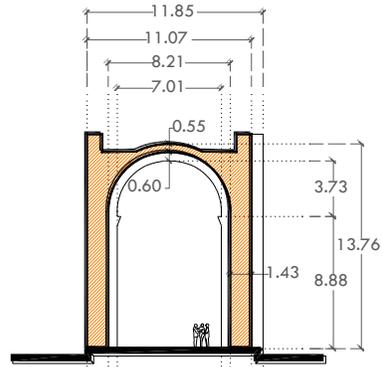
ESCALA GRÁFICA



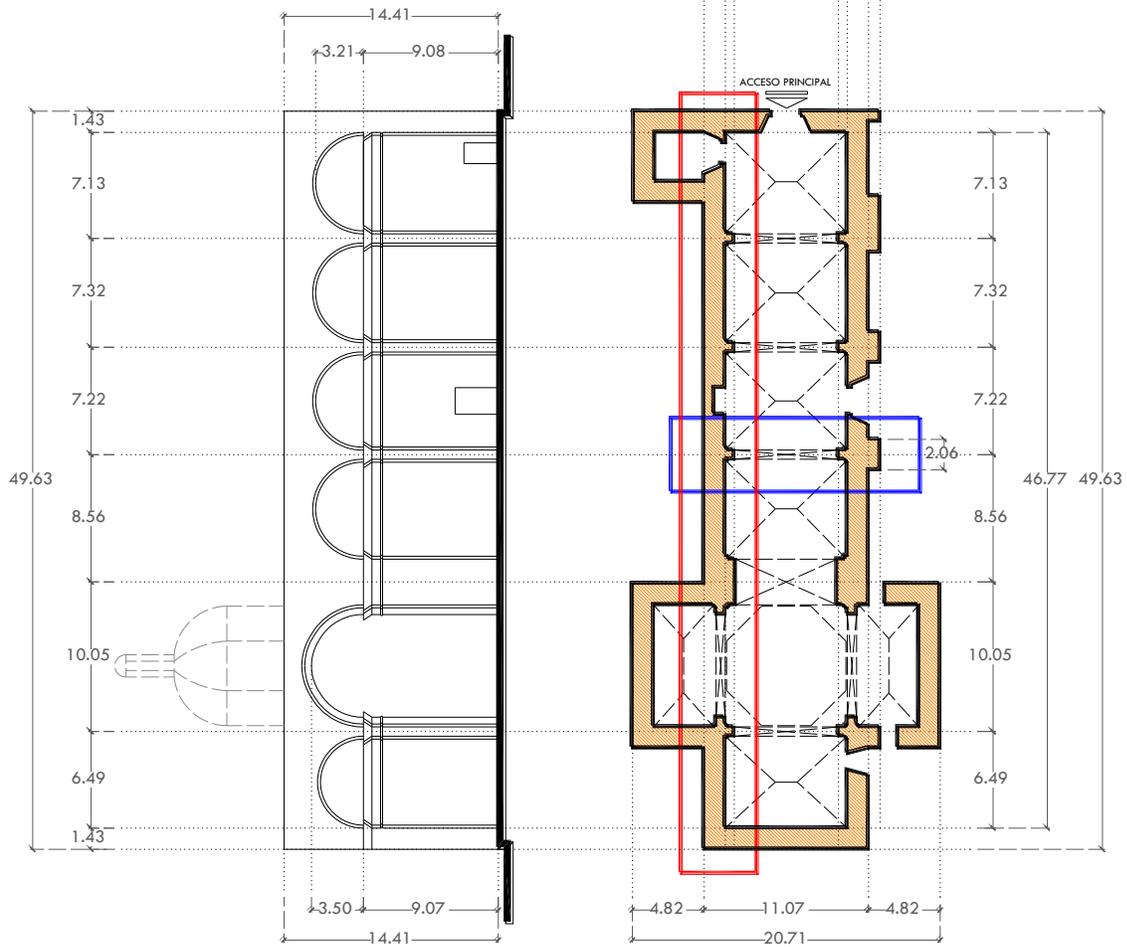
### 7. TEMPLO DE GUADALUPE (1708)



- Macroelemento transversal
- Macroelemento longitudinal

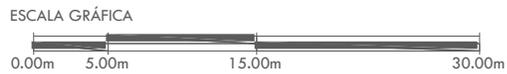


MACROELEMENTO  
 TRANSVERSAL



MACROELEMENTO  
 LONGITUDINAL

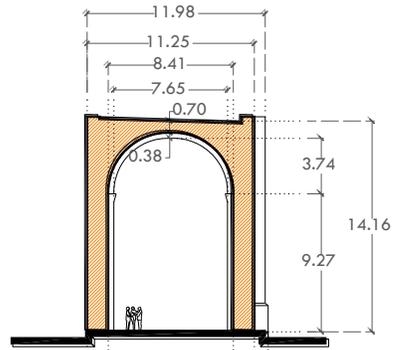
PLANTA  
 ARQUITECTÓNICA



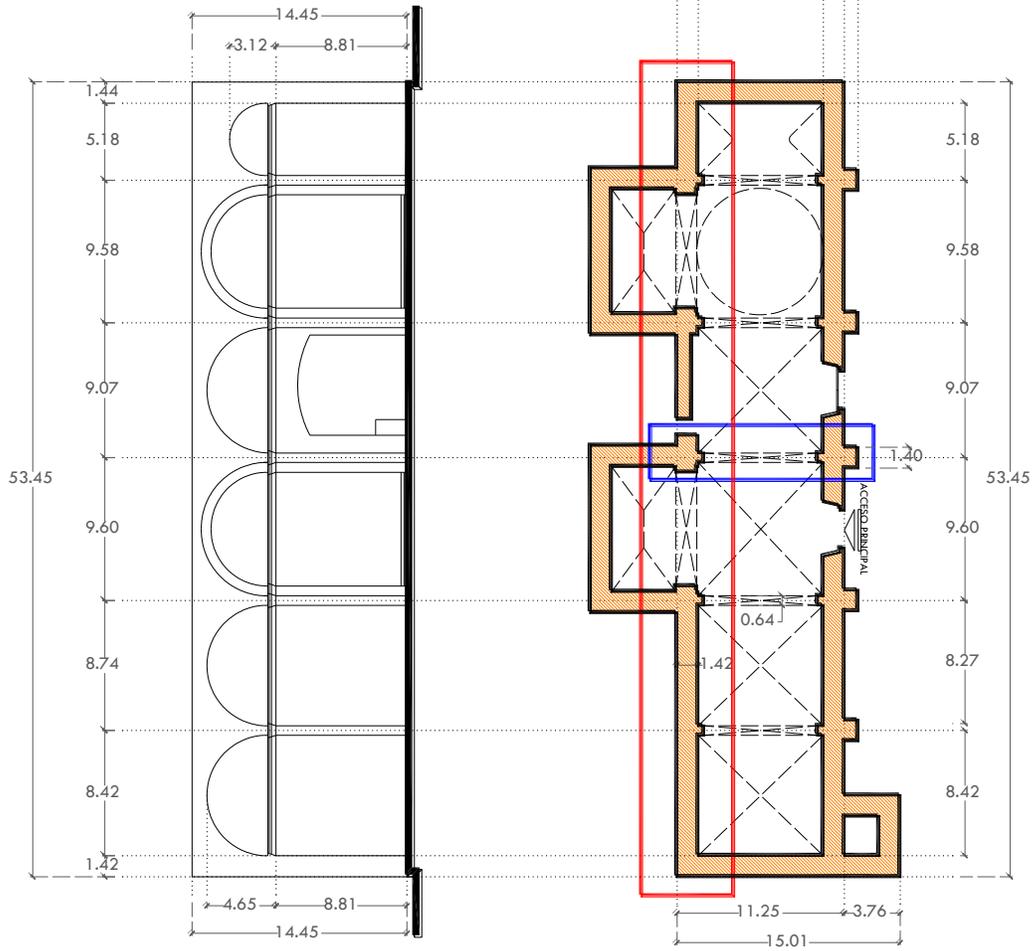
### 8. TEMPLO DE LAS MONJAS (1732)



- Macroelemento transversal
- Macroelemento longitudinal

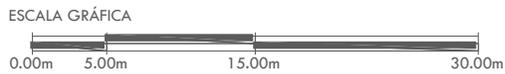


MACROELEMENTO  
TRANSVERSAL

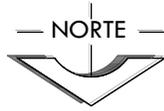


MACROELEMENTO  
LONGITUDINAL

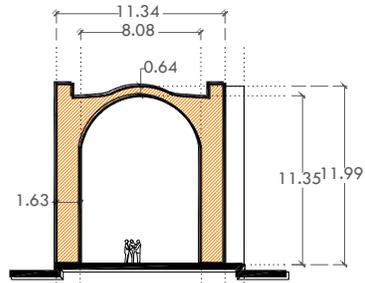
PLANTA  
ARQUITECTÓNICA



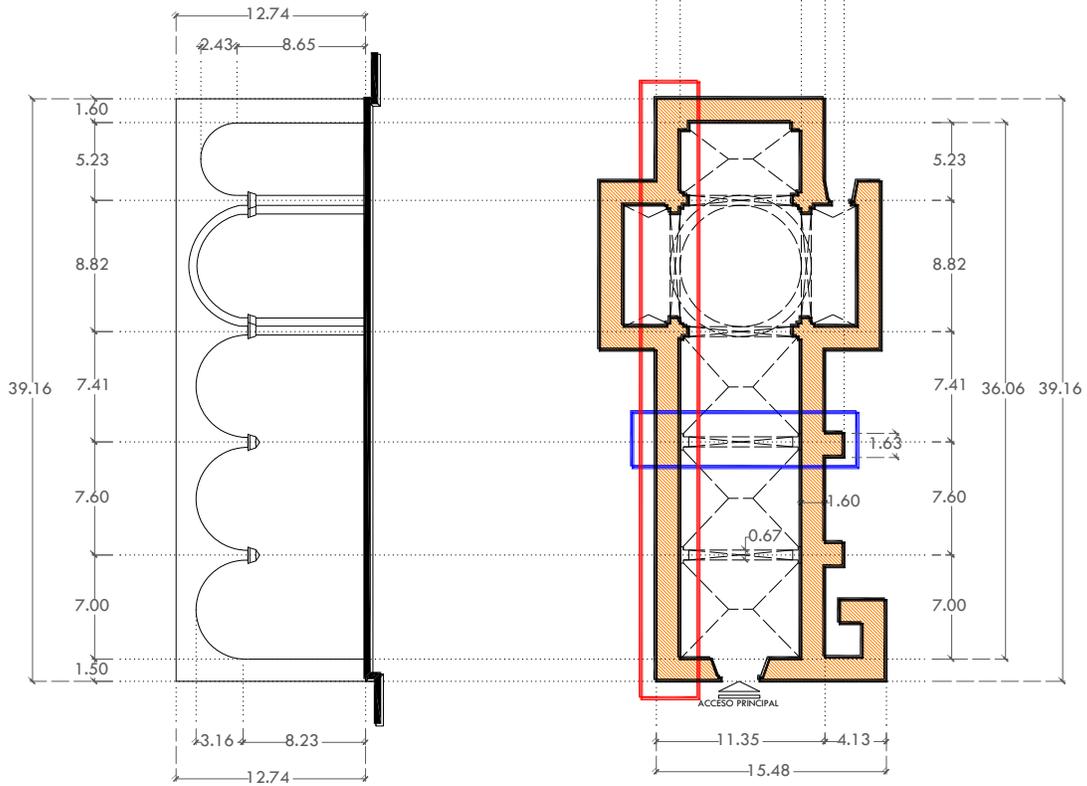
### 9. TEMPLO DE CAPUCHINAS (1734)



- Macroelemento transversal
- Macroelemento longitudinal

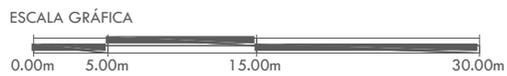


MACROELEMENTO  
 TRANSVERSAL



MACROELEMENTO  
 LONGITUDINAL

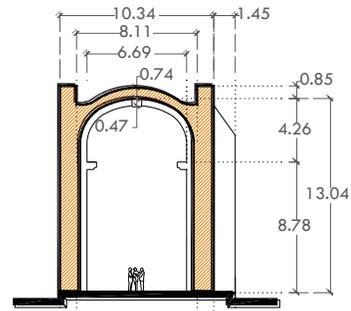
PLANTA  
 ARQUITECTÓNICA



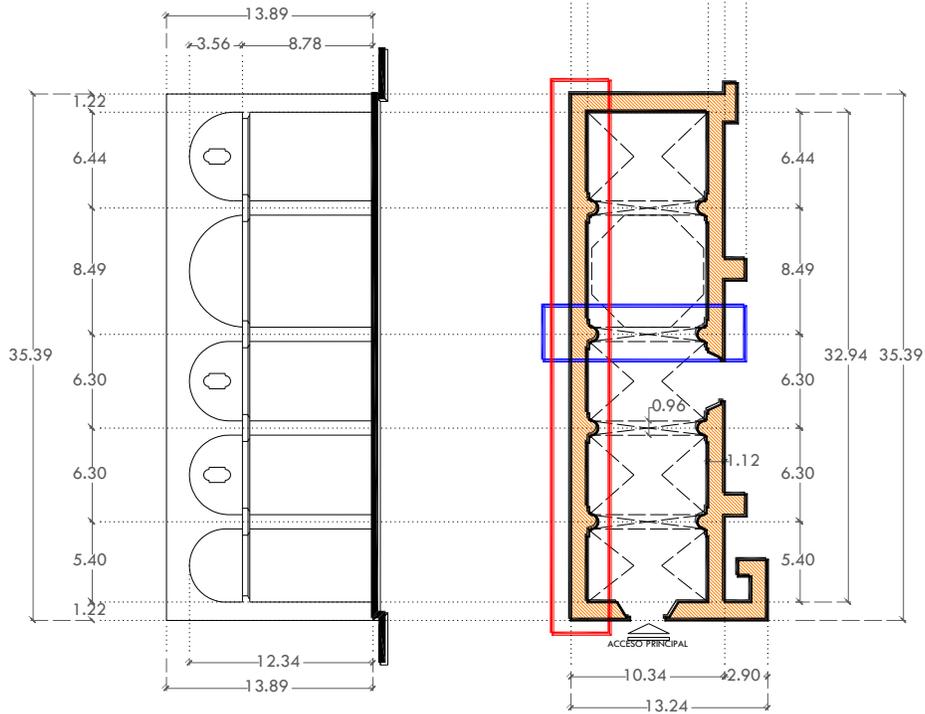
### 10. TEMPLO DE LA MERCED (1736)



- Macroelemento transversal
- Macroelemento longitudinal



MACROELEMENTO  
TRANSVERSAL



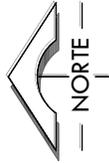
MACROELEMENTO  
LONGITUDINAL

PLANTA  
ARQUITECTÓNICA

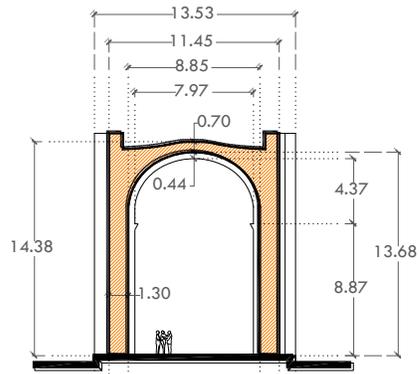
ESCALA GRÁFICA



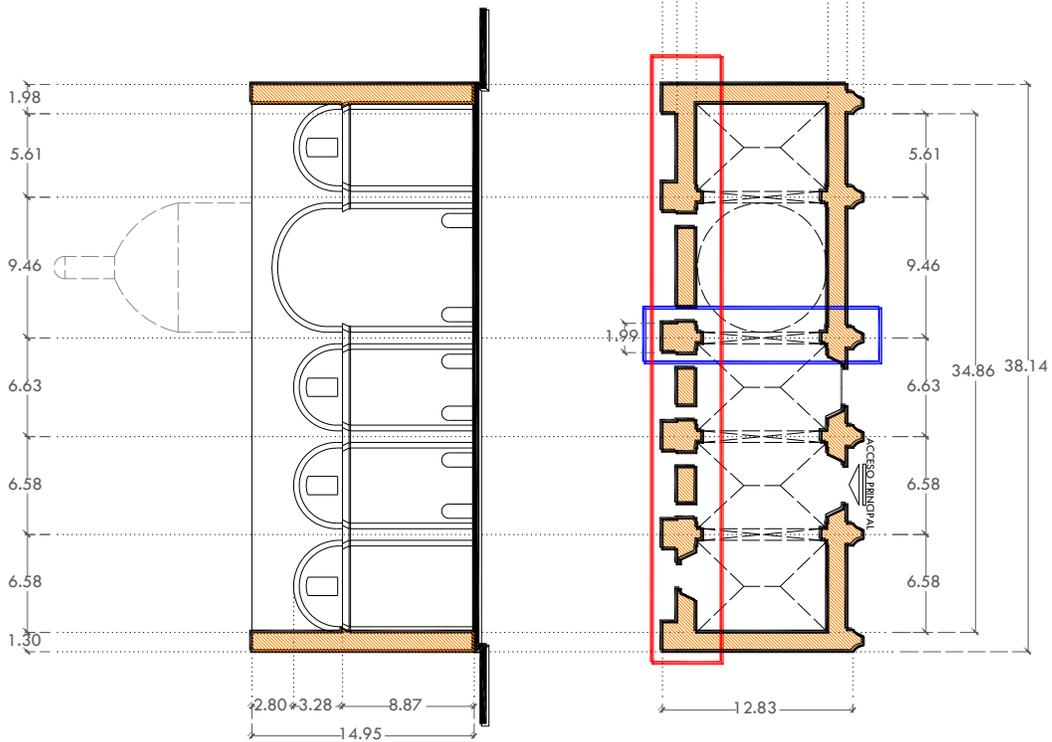
**11. TEMPLO DE SANTA ROSA DE LIMA (1757)**



- Macroelemento transversal
- Macroelemento longitudinal

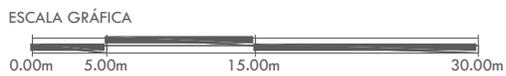


MACROELEMENTO TRANSVERSAL

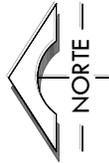


MACROELEMENTO LONGITUDINAL

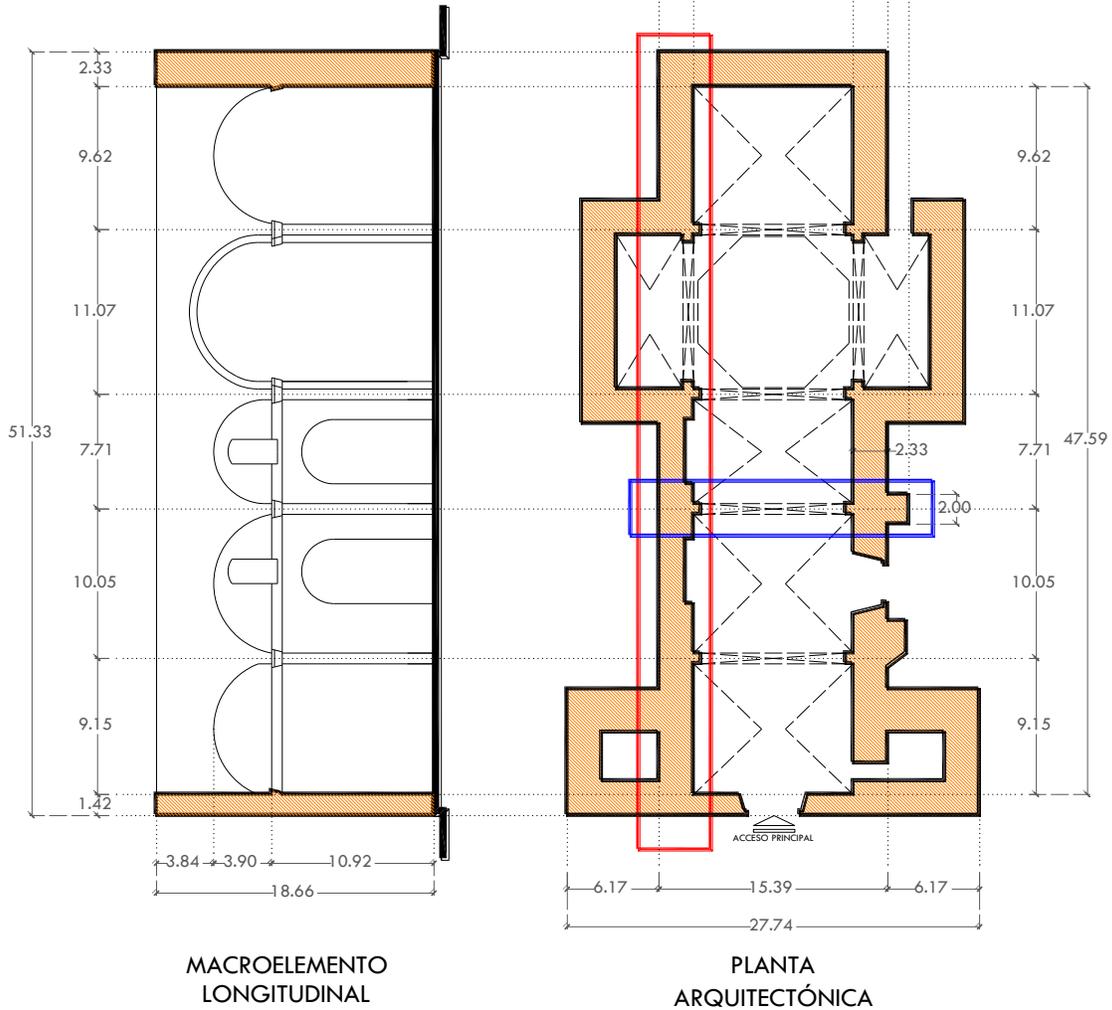
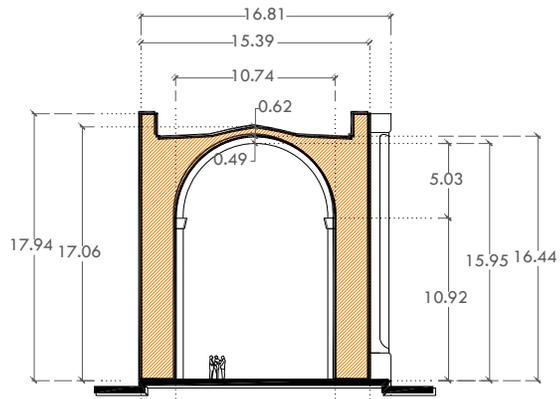
PLANTA ARQUITECTÓNICA



**12. TEMPLO DE SAN JOSÉ  
(1760)**

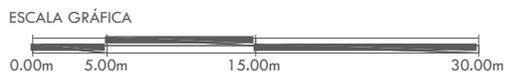


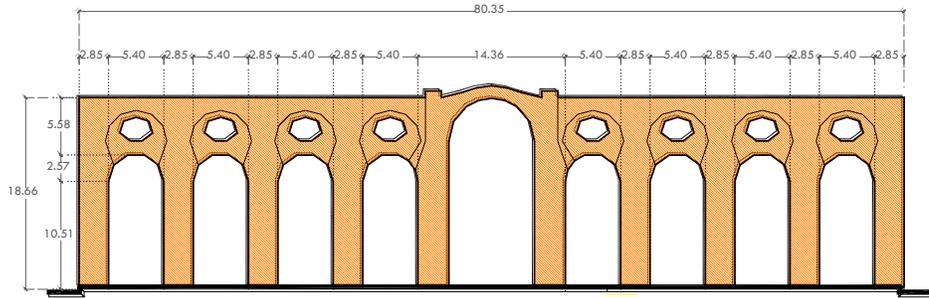
- ▭ Macroelemento transversal
- ▭ Macroelemento longitudinal



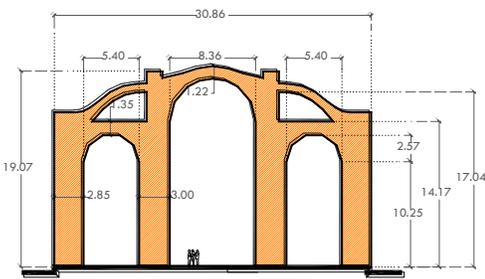
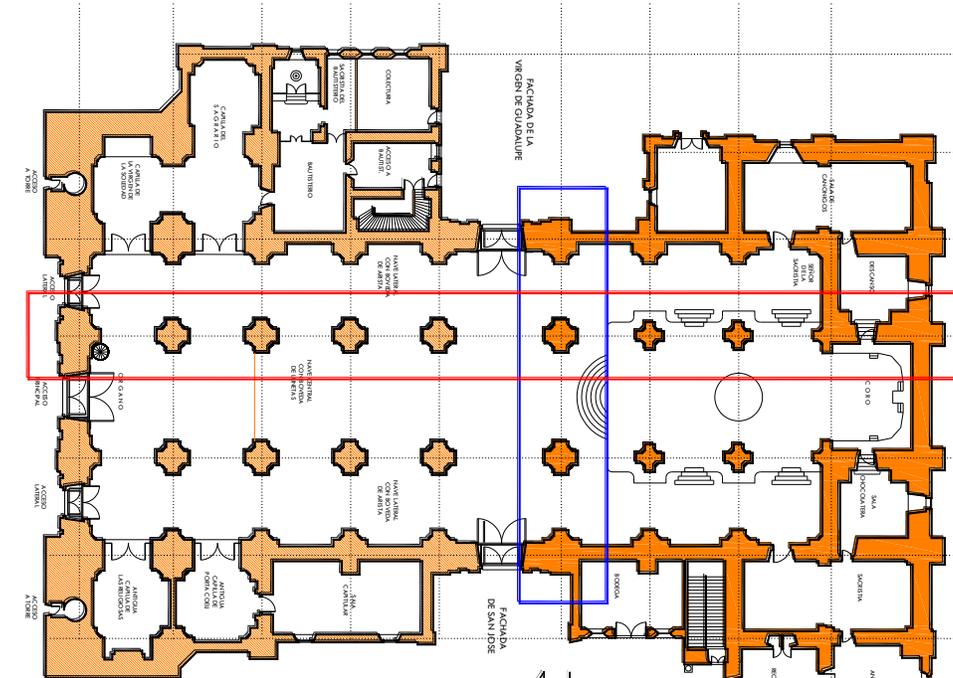
MACROELEMENTO  
LONGITUDINAL

PLANTA  
ARQUITECTÓNICA





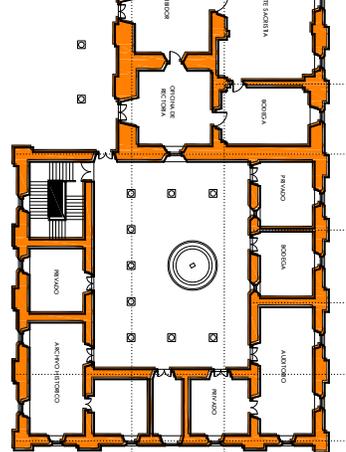
MACROELEMENTO LONGITUDINAL



MACROELEMENTO TRANSVERSAL

**13. IGLESIA CATEDRAL DE LA TRANSFIGURACIÓN (1660)**

- ▭ Macroelemento transversal
- ▭ Macroelemento longitudinal



PLANTA  
 ARQUITECTÓNICA

