



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Escuela Civil

**“DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LAS PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES
EXISTENTES EN LA CATEDRAL NUEVA INMACULADA CONCEPCIÓN DE
CUENCA”**

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

AUTORES:

David Humberto Bravo Caguana

Verónica Alexandra Molina Villavicencio

DIRECTOR:

Ing. Fernando Zalamea León. PhD.

Cuenca – Ecuador

2013



RESUMEN

La determinación de las patologías existentes en la Catedral Nueva de Cuenca se basa en cinco etapas claramente definidas; como primera parte se tiene una investigación histórica constructiva en la cual se busca conocer los distintos materiales utilizados, su lugar de procedencia y las técnicas aplicadas en la construcción de los elementos estructurales más importantes como son: la cimentación, columnas, muros, paredes, cúpulas, contrafuertes, etc.

Dentro de la segunda etapa se encuentra un estudio y caracterización de los materiales que constituyen la estructura de la Catedral, entre ellos tenemos: el mortero de cal, mampostería, hormigón ciclópeo. De dicho estudio se puede aproximar las constantes elásticas, que son: el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson correspondientes a dichos materiales; valores necesarios en la etapa de la modelización estructural.

En la tercera etapa se tiene un levantamiento de patologías en campo. Todos los daños identificados en la estructura son analizados con el objeto de conocer la causa o motivo que los produjo, por esta razón en esta fase del proyecto es preciso ubicar las patologías más relevantes de la estructura en planos. Además, se ha realizado un registro de las patologías detectadas.

Para el desarrollo de la cuarta y quinta etapa se tiene un modelo tridimensional generado en SAP 2000, el mismo que toma en cuenta el comportamiento elástico de los materiales y sus propiedades características, esto con la finalidad de realizar una comparación entre los elementos estructurales que presentan altos esfuerzos de tracción y las zonas de mayor daño o deterioro registradas en la estructura. Finalmente después de este análisis se puede determinar cuáles son los lugares o zonas más vulnerables de la estructura.

Palabras Claves: Investigación histórica; estudio de materiales; patologías; modelo 3D en SAP 2000; análisis comparativo; resultados.

ABSTRACT

The determination of the existing pathologies in the Catedral Nueva de Cuenca is based on five clearly defined stages; Firstly, an historical constructive investigation is used looking to find the different materials used, their place of origin and the techniques applied in the construction of the most important structural elements like: the foundation pile, columns, walls, cupolas, buttresses, etc.

In the second stage there is a study and characterization of the materials that make up the structure of the Cathedral, among them: lime mortar, masonry and cyclopean concrete.

Of this study it can be approximated that the elastic constants are: modulus of elasticity and Poisson's ratio restating to such materials, values required in structural modeling stage.

In the third stage there is a study of the pathologies on site. All the damages identified in the structure are be analyzed with the objective of knowing the cause that produced them, for this reason in this stage of the project it is necessary to find the more relevant pathologies of the structure. Furthermore it has a record of the detected pathologies.

Development of the four and fifth stage has a three dimensional model generated in SAP 2000, which takes in to account the elastic behavior of the materials and their characteristics, this in order to make a comparison between the structural elements which have traction and high stress areas of greater damage or deterioration recorded in the structure. Finally after this analysis can determine which are the most vulnerable places or areas of the structure.

Keywords: Historical research, study materials, pathologies; 3D model SAP 2000 comparative analysis, results.



Contenido

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
AGRADECIMIENTOS:.....	16
DEDICATORIAS:.....	16
PRESENTACIÓN	17
CAPÍTULO 1	19
1.1 INTRODUCCIÓN.....	19
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	20
1.3 HIPÓTESIS DE LA TESIS.....	20
1.4 OBJETIVOS.....	20
1.4.1 Objetivo General.....	20
1.4.2 Objetivos Específicos.....	20
1.5 ALCANCE	21
CAPÍTULO 2	22
2.1 INVESTIGACIÓN HISTÓRICA CONSTRUCTIVA	22
2.1.1 PRIMERA ETAPA: Diseño y dirección del Hermano Juan Stiehle.....	23
2.1.2 SEGUNDA ETAPA: Bajo la dirección del Dr. Issac de María Peña hasta su muerte	25
2.1.3 TERCERA ETAPA: Bajo la dirección de Palacios Bravo y la Junta de Urbanización, Ornato y Embellecimiento de Cuenca	35
2.1.4 CUARTA ETAPA: Intervenciones del Arq. Gastón Ramírez	44
CAPÍTULO 3	47
3.1 ESTUDIO DE MATERIALES	47
3.1.1 Cimentación:	47
3.1.2 Paredes:.....	48
3.1.3 Muros:.....	51
3.1.4 Cúpulas:.....	52
3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES DE LA FÁBRICA.	53
3.2.1 Propiedades mecánicas	53
3.2.1.1 Peso específico γ_b	54
3.2.1.2 Resistencia a compresión f_b	54
3.2.1.3 Resistencia a tracción f_{tb}	56



3.2.1.4 Módulo de deformación longitudinal E_b	57
3.2.1.5 Coeficiente de Poisson ν_b	58
3.2.1.6 Energía de fractura G_f	58
3.2.1.7 Módulo de cortante G	58
3.3 MECANISMO RESISTENTE Y CRITERIOS DE ROTURA.....	58
3.3.1 Comportamiento tenso- deformacional $\sigma - \epsilon$	59
3.4 ENSAYO DE ABSORCIÓN Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN LADRILLO.....	60
3.4.1 Ensayo de Absorción:.....	60
3.4.1.1 Objetivo:.....	60
3.4.1.2 Resultados del Ensayo:.....	62
3.4.2 Ensayo de Compresión Simple:.....	63
3.4.2.1 Objetivo.....	63
3.4.2.2 Resultados del Ensayo.....	64
3.5 ENSAYOS CON MORTEROS DE CAL.....	65
3.5.1 Ensayo de Compresión Simple f_m :.....	66
3.5.1.1 Objetivo:.....	67
3.5.1.2 Resultados del Ensayo:.....	67
3.6 ENSAYOS EN MAMPOSTERÍA DE LADRILLO.....	69
3.6.1 Ensayo de compresión simple:.....	69
3.6.1.1 Objetivo del Ensayo:.....	70
3.6.1.2 Resultados del Ensayo:.....	70
3.7 ENSAYOS DE CILINDROS DE HORMIGÓN CICLÓPEO.....	71
3.7.1 Ensayos de Resistencia a Compresión:.....	72
3.7.1.1 Objetivo del ensayo:.....	72
3.7.1.2 Resultados de los ensayos:.....	72
3.7.2 Ensayo del módulo de Poisson:.....	74
3.7.2.1 Objetivo del Ensayo:.....	75
3.7.2.2 Resultados de los Ensayos:.....	75
4.1 RECOPIACIÓN DE DAÑOS Y PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES.....	78
4.1.1 Definición de Patología Estructural.....	78
4.1.1.1 Fisura:.....	81
4.1.1.2 Deterioros:.....	81
4.1.1.3 Desintegración:.....	81



4.1.1.4 Distorsión:.....	81
4.1.1.5 Eflorescencia:	81
4.1.1.6 Humedad:.....	81
4.2 LA CRIPTA	84
4.2.1 Capilla.....	85
4.2.2 Segundo Tramo del Pasillo.....	86
4.2.3 Tercer Tramo del Pasillo	87
4.2.4 Cuarto Tramo del Pasillo	88
4.2.5 Quinto Tramo del Pasillo	89
4.3 SÍNTESIS DE LAS PATOLOGÍAS ANALIZADAS:.....	90
CAPÍTULO 5	92
5.1 MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL	92
5.1.1 Detalles del Modelo:.....	93
5.1.2 Presentación de Modelo Estructural en 3D SAP 2000.....	96
5.1.2.1 Planta	96
5.1.2.2 Secciones Transversales.....	97
5.1.2.3 Secciones Longitudinales	100
5.1.2.4 Características de materiales y secciones empleados en el modelo	102
5.1.2.5 Descripción de las condiciones de apoyo suelo-cimentación.....	103
5.1.2.6 Revisión y Modificación del modelo en SAP 2000.	103
CAPÍTULO 6	106
6.1 COMPARACIÓN DE LOS DAÑOS DETECTADOS CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO.....	106
6.1.1 Resultados obtenidos del modelo:.....	106
6.1.2 Esfuerzos producidos en los elementos estructurales bajo la acción de Carga Muerta (CM)	108
6.1.2.1 Base o Nivel de Piso:.....	108
6.1.2.2 Pórticos Longitudinales	108
6.1.2.3 Pórticos Transversales.....	110
6.1.2.4 Sección Posterior	113
6.1.2.5 Cúpulas.....	114
6.1.2.6 Cúpula Posterior.....	116
6.1.2.7 Torres.....	117
6.1.3 Relación comparativa de las patologías existentes en la estructura de la Catedral Nueva de Cuenca con los esfuerzos obtenidos en el modelo bajo la acción de CM ..	120



6.1.3.1 Zona 1 - Fachada Calle Sucre	121
6.1.3.1.1 Vista Exterior:	121
6.1.3.1.2 Vista Interior:.....	121
6.1.3.2 Zona 2 – Fachada Calle Santa Ana	122
6.1.3.2.1 Vista Exterior:	122
6.1.3.2.2 Vista Interior:.....	123
6.1.3.3 Zona 3 – Fachada frontal calle Benigno Malo	124
6.1.3.3.1 Vista Exterior:	124
6.1.3.3.2 Vista Interior:.....	125
6.1.3.4 Zona 4 – Fachada posterior calle Padre Aguirre	126
6.1.3.4.1 Vista Externa:	126
6.1.3.5 Zona 5 – Cúpulas Altas y Bajas.....	127
6.1.3.5.1 Vista Externa:	127
6.1.3.5.2 Vista Interior:.....	128
6.1.3.6 Zona 6 – Pórticos transversales vista interna.....	129
CAPÍTULO 7	130
7.1 CONCLUSIONES	130
ANEXO 1	135
DATOS DEL SUELO DE CIMENTACIÓN.....	135
ESTUDIO REALIZADO POR “SUELOS Y CIMENTACIONES” ING. FLORENCIO CALLE – ING. EDMUNDO CUEVA.....	137
ANEXO 2	138
COMPORTAMIENTO DE LA FÁBRICA	138
ANEXO 3	144
FOTOS DEL MANUAL DE OBRAS DEL HERMANO STIEHLE.....	144
ANEXO 4	159
FOTOGRAFÍAS DE LOS PLANOS ORIGINALES DE LA CATEDRAL.....	159
NUEVA DE CUENCA DISEÑADOS POR EL HNO. STHIELE	159
ANEXO 5	162
OBRAS REALIZADAS POR EL HNO. JUAN STHIELE	162
Bibliografía	166



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Espesor de mortero medido en sentido vertical.....	50
Tabla 2: Espesor de mortero en sentido horizontal	50
Tabla 3: Valores de peso específico aparente de la piedra según diversos autores [kN/m ³].....	54
Tabla 4: Valores del peso específico aparente del ladrillo según distintas fuentes [kN/m ³].....	54
Tabla 5: de resistencia a compresión de la piedra fb [N/mm ²].....	55
Tabla 6: Valores de resistencia a compresión de ladrillos fb [N/mm ²]	55
Tabla 7: Resistencia a tracción como fracción en % de la resistencia a compresión ...	57
Tabla 8: Valores orientativos del módulo de elasticidad de piedras Eb [N/mm ²].....	57
Tabla 9: Valores orientativos del módulo de elasticidad del ladrillo, Eb [N/mm ²].....	57
Tabla 10: Dimensiones de los dos tipos de ladrillos tomados de la Catedral.....	61
Tabla 11: Pesos de las muestras secas y saturadas	62
Tabla 12: Porcentaje de absorción obtenido.....	62
Tabla 13: Requisitos de resistencia mecánica y absorción de la humedad que debe cumplir los ladrillos cerámicos.....	63
Tabla 14: Peso y Carga de las muestras de ladrillos	64
Tabla 15: Resultado de resistencia a la compresión	64
Tabla 16: Dosificación y resistencias especificados por ACI 530.1-99 ANS C270 [27.29]para morteros.....	66
Tabla 17: Dosificación y Resistencia.....	68
Tabla 18: Factores que afectan la resistencia a compresión de la mampostería	70
Tabla 19: Ensayo de compresión de muretes de mampostería	70
Tabla 20: Escala real y reducida de la piedra de agua empleada.....	72
Tabla 21: Escala real y reducida del árido fino.....	72
Tabla 22: Dosificación de H° Ciclópeo 1:3 (60% Cal-40% Cem)	73
Tabla 23: Dosificación de H° Ciclópeo 1:2 (60% Cal-40% Cem)	73
Tabla 24: Dosificación de H° Ciclópeo 1:3 (50% Cal-50% Cem)	73
Tabla 25: Dosificación de H° Ciclópeo 1:2 (50% Cal-50% Cem)	73
Tabla 26: Dosificación de H° Ciclópeo 1:3 (40% Cal-60% Cem)	73
Tabla 27: Dosificación de H° Ciclópeo 1:2 (40% Cal-60% Cem)	74
Tabla 28: Módulo Elástico del H. Ciclópeo.....	77
Tabla 29: Valores del módulo de elasticidad de la mampostería de ladrillo	94
Tabla 30: Propiedades de los materiales utilizados en el software SAP 2000	102
Tabla 31: Espesores de las secciones utilizadas en el software SAP 2000.....	102
Tabla 32: Resumen de máximos esfuerzos de compresión y tracción.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: La Catedral en construcción". Fotografía publicada en Guía Comercial, Agrícola e Industrial, 1909.	26
Ilustración 2: "Desfile Cívico 1917". Fotografía publicada en Cuenca Tradicional, p. 118	27
Ilustración 3: "La Catedral de Cuenca en construcción", Archivo fotográfico Dr. Miguel Díaz Cueva.....	29
Ilustración 4: José Salvador Sánchez, 1934, "Calle Solano hoy Padre Aguirre y Benigno Malo". Detalle de fotografía publicada en Viaje a la memoria, p. 284 (En tesis de arquitectura fechada 1918).....	31
Ilustración 5: Diseños de modelos de ladrillos decorativos realizados por el Hermano Juan.	32
Ilustración 6: José Salvador Sánchez, "La Catedral Nueva en Construcción". Fotografía publicada en Cuenca Tradicional, p. 65 En el libro Viaje a la memoria esta foto está fechada 1938.	34
Ilustración 7: José Salvador Sánchez, 1940, "Catedral Nueva primera cúpula terminada". Archivo fotográfico Dr. Miguel Díaz Cueva.	36
Ilustración 8: Catedral en construcción 1941. Fotografía publicada en Tesis de arquitectura.....	37
Ilustración 9: Catedral en construcción 1945. Fotografía publicada en Tesis de arquitectura.....	38
Ilustración 10: Catedral en construcción. Archivo Fotográfico Dr. Miguel Díaz Cueva. (Una foto parecida fechada en Tesis como 1947)	39
Ilustración 11: "Estado en el que se halla la edificación de la Nueva Catedral". Fotografía publicada en Guía abreviada de Cuenca, 1948, s/p	40
Ilustración 12: Catedral en construcción. 1950. Fotografía publicada en Tesis de arquitectura.....	41
Ilustración 13: Alejandro Ortiz Cobos, 1953, "Catedral de la Inmaculada Concepción en construcción	42
Ilustración 14: Catedral de la Inmaculada, Cuenca 1955. Archivo Fotográfico Dr. Miguel Díaz Cueva.	43
Ilustración 15: Ortiz, "La Nueva Catedral". Archivo fotográfico Dr. Miguel Díaz Cueva	45
Ilustración 16: Plano de partes constitutivas de la Catedral.....	46
Ilustración 17: Posición de colocación de ladrillos	50
Ilustración 18: Espesor del mortero de cal	50
Ilustración 19: Muros de carga (piedra confinada con paredes de ladrillo).....	51
Ilustración 20: Modelo en 3D - Identificación de Cúpulas (Fuente Universidad de Cuenca).....	52
Ilustración 21: Nomenclatura para las dimensiones y caras de las piezas de fábrica ..	53
Ilustración 22: 6: Relación esfuerzo-deformación para mortero, ladrillo y los paneles de mampostería (Paulay y Priestley, 1992)	56
Ilustración 23: Estado tensional en la pieza y en el mortero en la fábrica sometida a esfuerzos de compresión	58
Ilustración 24: Curva $\sigma - \epsilon$ teórica y experimental (Priestley y Elder).....	60
Ilustración 25: Muestras de ladrillos sobrantes de la fábrica de la Catedral.....	61



Ilustración 26: Representación de la forma de los ladrillos tomados de la Catedral	61
Ilustración 27: Ensayo de Compresión Simple sobre muestras de ladrillos	64
Ilustración 28: Ensayo de compresión simple en morteros de cal	67
Ilustración 29: Curva esfuerzo - deformación (mortero cal - cemento).....	68
Ilustración 30: Representación de la relación altura/espesor del murete.....	69
Ilustración 31: Curva esfuerzo-deformación para mortero, ladrillo y los paneles de mampostería.	71
Ilustración 32: Gradas de acceso a la torre sur (hormigón ciclópeo).....	71
Ilustración 33: Curva esfuerzo-deformación.....	74
Ilustración 34: Muestra para el ensayo del módulo de Poisson	75
Ilustración 35: Ensayo módulo de Poisson.....	75
Ilustración 36: Curva esfuerzo-deformación Poisson	77
Ilustración 37: Planta de la Catedral Nueva.....	79
Ilustración 38: Capilla.....	85
Ilustración 39: Segundo pasillo	86
Ilustración 40: Tercer Pasillo	87
Ilustración 41: Cuarto Pasillo.....	88
Ilustración 42: Quinto Pasillo	89
Ilustración 43: Modelo de la Catedral discretizado en SAP 2000.....	92
Ilustración 44: Secciones de arcos añadidos.....	104
Ilustración 45: Losas añadidas en la zona posterior.....	104
Ilustración 46: Zonas de pared completada	105
Ilustración 47: Plano General en planta de la Catedral de Cuenca	107
Ilustración 48: Esfuerzos de compresión y tracción en el nivel de piso.....	108
Ilustración 49: Esfuerzos en el eje longitudinal F	109
Ilustración 50: Esfuerzos en el eje longitudinal D.....	109
Ilustración 51: Esfuerzos en el eje longitudinal C.....	110
Ilustración 52: Esfuerzos en el eje longitudinal A.....	110
Ilustración 53: Esfuerzos en el eje transversal 2	111
Ilustración 54: Esfuerzos en el eje 3.....	111
Ilustración 55: Esfuerzos en el eje 4.....	112
Ilustración 56: Esfuerzos en el eje 5.....	112
Ilustración 57: Esfuerzos en el eje 6.....	113
Ilustración 58: Esfuerzos en el eje 7.....	113
Ilustración 59: Esfuerzos parte posterior	114
Ilustración 60: Esfuerzos de compresión cúpulas altas vista exterior.....	115
Ilustración 61: Esfuerzos de tracción cúpulas altas vista interior	115
Ilustración 62: Esfuerzos de compresión cúpulas bajas vista exterior.....	116
Ilustración 63: Esfuerzos de tracción cúpulas bajas vista exterior	116
Ilustración 64: Esfuerzos de compresión en la cúpula posterior.....	117
Ilustración 65: Esfuerzos de tracción en la cúpula posterior, zona del presbiterio	117
Ilustración 66: Esfuerzos de compresión en la terraza ejes C y D	118
Ilustración 67: Esfuerzos de tracción	119
Ilustración 68: Esfuerzos fachada calle Sucre vista externa	121
Ilustración 69: Esfuerzos fachada calle Sucre, vista interna	121



Ilustración 70: Esfuerzos fachada calle Santa Ana, vista externa	122
Ilustración 71: Esfuerzos en la fachada calle Santa Ana, vista interna	123
Ilustración 72: Esfuerzos en la fachada frontal, calle Benigno Malo	124
Ilustración 73: Esfuerzos fachada frontal calle Benigno Malo vista posterior	125
Ilustración 74: Esfuerzos en la fachada posterior calle Padre Aguirre	126
Ilustración 75: Esfuerzos en las cúpulas altas y bajas vista exterior.....	127
Ilustración 76: Esfuerzos en las cúpulas altas y bajas vista interior.....	128
Ilustración 77: Mecanismos de rotura obtenidos por Page al ensayar a rotura los paneles bajo diferentes estados biaxiales de tensiones.	140
Ilustración 78: Envoltente de rotura en ejes τ - σ . Mann y Müller.	141
Ilustración 79: "Manual de Obras y Diseños" Hermano Juan Stiehle. p. 211	144
Ilustración 80: "Manual de Obras y Diseños" Hermano Juan Stiehle. p. s/n	145
Ilustración 81: "Manual de Obras y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n	146
Ilustración 82: "Manual de Obras y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n.....	147
Ilustración 83: "Manual de Obras y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n.....	148
Ilustración 84: "Manual de Obras y Diseños" del Hermano Juan Stiehle.- p. s/p	149
Ilustración 85: "Manual de Obras y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/p.....	150
Ilustración 86: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/p.....	151
Ilustración 87: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/p.....	152
Ilustración 88: "Manual de Obra Y diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/p.....	153
Ilustración 89: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n.....	154
Ilustración 90: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n.....	155
Ilustración 91: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n.....	156
Ilustración 92: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. 271	157
Ilustración 93: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p.337.....	158
Ilustración 94: Fachada Lateral Sur.....	159
Ilustración 95: Fachada Principal Este.....	160
Ilustración 96: Fachada Posterior, Cubierta del Presbiterio	161
Ilustración 97: Iglesia de San Alfonso	162
Ilustración 98: Puente sobre el río Sayausí - Azuay	163
Ilustración 99: Puente sobre el río Burgay - Cañar.....	164
Ilustración 100: Templo del Santo Cenáculo	165



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, BRAVO CAGUANA DAVID HUMBERTO, autor de la Tesis ORIGEN DE LAS PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES EXISTENTES EN LA CATEDRAL NUEVA INMACULADA CONCEPCIÓN DE CUENCA, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 18 de Octubre de 2013

Bravo Caguana David Humberto
0104307616



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, MOLINA VILLAVICENCIO VERÓNICA ALEXANDRA, autora de la Tesis ORIGEN DE LAS PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES EXISTENTES EN LA CATEDRAL NUEVA INMACULADA CONCEPCIÓN DE CUENCA, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 18 de Octubre de 2013

Molina Villavicencio Verónica Alexandra
0105624837



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA
desde 1867

UNIVERSIDAD DE CUENCA
Fundada en 1867

Yo, BRAVO CAGUANA DAVID HUMBERTO, autor de la Tesis ORIGEN DE LAS PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES EXISTENTES EN LA CATEDRAL NUEVA INMACULADA CONCEPCIÓN DE CUENCA, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser éste requisito para la obtención de mi título de INGENIERO CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor

Cuenca, 18 de Octubre de 2013

Bravo Caguana David Humberto
0104307616



UNIVERSIDAD DE CUENCA

desde 1867

UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

desde 1867

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, MOLINA VILLAVICENCIO VERÓNICA ALEXANDRA, autora de la Tesis ORIGEN DE LAS PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES EXISTENTES EN LA CATEDRAL NUEVA INMACULADA CONCEPCIÓN DE CUENCA, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser éste requisito para la obtención de mi título de INGENIERO CIVIL. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor

Cuenca, 18 de Octubre de 2013

VERÓNICA MOLINA

Molina Villavicencio Verónica Alexandra

0105624837

AGRADECIMIENTOS:

Nuestro agradecimiento sincero a los Ingenieros Fernando Zalamea y Adrián Tola, quienes con su conocimiento y experiencia guiaron cada una de las etapas para lograr culminar de manera satisfactoria este trabajo de tesis.

DEDICATORIAS:

Viviré toda mi vida agradecido con mis padres Paula y Humberto, y les dedico este esfuerzo ya que gracias a su amor y apoyo hoy puedo cumplir una etapa más en mi vida, ellos han sido mi fuerza y mi perseverancia a lo largo de todos estos años en los que he podido aprender y valorar los detalles que me ha brindado la vida.

En estos años de vida universitaria conocí a una compañera, amiga y mi enamorada con quien con dedicación y esfuerzo hemos podido librar los obstáculos que se nos han presentado, una mujer con virtudes y valores a quien amo y respeto mucho le dedico este esfuerzo, gracias por ser parte de mi vida MP.

David Bravo C.

Este trabajo se lo dedico a mis padres Martha y Daniel por su apoyo brindado en los buenos y malos momentos, por vivir día a día este largo camino de mi carrera universitaria y por ser el pilar que me sostiene; a mis queridos hermanos Damián y Adrián por contagiarme de sus alegrías y travesuras; a mi amigo, compañero, enamorado, apoyo y parte fundamental de mi vida David BrC. por haber compartido junto a mi largas noches de estudio, por su paciencia, dedicación y ayuda en momentos difíciles, por enseñarme que los retos se los logra con esfuerzo y que las caídas son una oportunidad más para demostrar hasta donde podemos llegar, para esa persona especial que tuve la dicha de conocer, de tener a mi lado y con quien comparto este logro.

Verónica Molina V.

PRESENTACIÓN

El trabajo de investigación que se presenta a continuación busca determinar el origen de las patologías estructurales existentes en la Nueva Catedral Inmaculada Concepción de Cuenca, una de las obras más reconocidas de la ciudad.

Este estudio se apoya en una detallada investigación histórica-constructiva, acerca de los materiales, herramientas, técnicas y conocimientos empleados por los constructores de ésta edificación, de esta manera se puede comprender más a fondo el comportamiento estructural que presenta la construcción a medida del paso del tiempo.

Esta tesis se fundamenta en la recopilación de información disponible en el Archivo de la Curia Arquidiocesana de Cuenca, Archivo de la Casa de la Cultura y otras fuentes como: libros, tesis, artículos de revistas y demás documentos que contienen datos históricos de interés.

Como una segunda etapa de este proyecto se plantea una caracterización de materiales para establecer el comportamiento de los elementos estructurales con datos obtenidos mediante: curva esfuerzo-deformación, módulo de Poisson, porcentaje de absorción, adherencia mortero-ladrillo, resistencia máxima a compresión simple (ladrillos, morteros), ensayos de compresión de cilindros de hormigón ciclópeo (utilizando mezcla de cal y cemento).

Dentro del comportamiento de la estructura es importante conocer las características del suelo donde está asentada la cimentación; para ello se cuentan con datos proporcionados de estudios de suelos realizados por la Universidad de Cuenca e informes de análisis realizados anteriormente como sustento de algunas intervenciones llevadas a cabo por el Arq. Gastón Ramírez.

El levantamiento de patologías existentes en la Catedral es la parte quizá más importante de este proyecto, puesto que, se pone en manifiesto las anomalías de la estructura en una forma detallada. Esta sección se basa en una inspección visual realizada con un especialista, para detectar las zonas y elementos de la estructura que han sufrido algún tipo de daño, deterioro o que

se han visto afectados por fenómenos internos generados por el comportamiento de los materiales con el paso del tiempo. Como una de las herramientas utilizadas para describir y evidenciar los daños encontrados se utilizó la fotografía, ya que, mediante la misma es posible registrar y fijar de una manera clara y descriptiva los sitios donde la estructura presenta anomalías.

Debido a que no es posible saber a detalle todas las zonas vulnerables de la edificación y teniendo en cuenta que en la actualidad existen programas que facilitan el modelado de estructuras con miras a una restauración, en este proyecto se utilizó un modelo tridimensional en un programa de cálculo estructural (SAP 2000) modelo realizado por el Ing. Fernando Zalamea, docente de la Universidad de Cuenca y Director de este trabajo.

Los resultados obtenidos del modelo fueron comparados con las patologías detectadas en las inspecciones visuales, a fin de entablar similitudes que faciliten la interpretación de los fenómenos que se han producido y se encuentran en desarrollo dentro de la estructura.

Dentro de la etapa final del proyecto y alcanzado sus objetivos se plantean conclusiones referentes a los materiales empleados, procesos constructivos y origen de los daños encontrados actualmente en la Catedral de Cuenca; con lo cual se tendrá un sustento para futuros estudios e intervenciones para mantenimiento y preservación de este monumento.

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

La construcción de la Catedral de la Inmaculada Concepción o también llamada Catedral Nueva se construyó gracias al Obispo Remigio Estévez de Toral, quien a su vez encarga la elaboración de los planos al Hermano Redentorista Juan Stielhe, de origen alemán. Esta obra dio inicio en el año de 1885 y fue establecida frente a la Plaza de Armas, actualmente “Parque Calderón” entre las calles: Benigno Malo, Santa Ana, Mariscal Sucre y Padre Aguirre.

Su ejecución fue prolongada hasta el año de 1975. Debido a ello su proceso constructivo se lo puede dividir en cuatro etapas, en las cuales se dan a conocer los diferentes materiales empleados, las técnicas y conocimientos empíricos aplicados, además de los principales precursores de esta magna obra.

La fábrica de la Catedral se vio afectada por ciertos daños estructurales, el más trascendental y significativo de todos ellos fue la fisura que se originó en la zona central del rosetón en la entrada principal del templo, esto generó inseguridad entre sus constructores por lo que no fueron terminadas las torres que contemplaba el proyecto de acuerdo a los planos entregados por el Hno. Stielhe.

Pese a la magnificencia y solidez de la obra, en el transcurso del tiempo se han producido patologías en la estructura que han causado preocupación en las autoridades eclesiásticas, siendo éste un motivo para iniciar una investigación referente a las mismas. Se ha visto pertinente iniciar identificando y caracterizando los materiales desde el inicio de la construcción hasta los daños y patologías existentes en la actualidad, todo esto con el fin de obtener un diagnóstico adecuado.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En los últimos años se han realizado estudios puntuales, con la finalidad de dar soluciones a daños que se han observado en ciertas zonas de la estructura de la Catedral, dichas investigaciones han sido relevantes, pero en muchos de los casos no se ha dispuesto de información suficiente, debiéndose asumir parámetros importantes para poder realizar dichos estudios, como características de materiales, aproximación de dimensiones, etc.

En el presente trabajo se determina dichos parámetros con mayor exactitud para obtener conclusiones justificadas.

1.3 HIPÓTESIS DE LA TESIS: Establecer si las patologías encontradas se originan por efectos gravitacionales y retracción. Efectos que son inherentes a la mampostería.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General.

- Determinación del origen de los daños y patologías existentes en la Catedral Nueva

1.4.2 Objetivos Específicos.

1. Realizar una investigación histórica referente al proceso constructivo
2. Caracterizar los materiales que conforman la estructura mediante ensayos de laboratorio, dentro de los cuales se encuentran: ladrillos, morteros, mampostería de ladrillo y hormigón ciclópeo.
3. Elaborar una recopilación de daños y patologías mediante una inspección visual y visitas técnicas dirigidas por especialistas de la Universidad de Cuenca.
4. Utilizar un modelo estructural a partir de un dibujo a escala tridimensional entregado por la Universidad de Cuenca. En el cual se alimentará con los parámetros determinados
5. Establecer el origen de las patologías detectadas mediante la comparación de los daños observados visualmente con los resultados obtenidos del modelo bajo cargas gravitacionales. Patologías de carácter sísmico caen fuera del alcance del presente estudio.

1.5 ALCANCE

En este trabajo se va realizar una compilación de información relevante de la estructura, como: recopilación histórica de la construcción, caracterización de los materiales y sobre todo un levantamiento de patologías existentes en la edificación.

Con éste propósito se utilizará un modelo en ordenador con el fin de comparar la ubicación de estos daños con la presencia de esfuerzos excesivos en el material, bajo cargas gravitacionales. Con dicha comparación se pretende sacar resultados concluyentes sobre el origen que generó las patologías.

CAPÍTULO 2

2.1 INVESTIGACIÓN HISTÓRICA CONSTRUCTIVA

La historia de la construcción de la Catedral Nueva de Cuenca recae desde sus inicios en un personaje que marcó el rumbo de tan memorable obra el obispo Estévez de Toral, brota desde su fe la idea magna de construir una gran catedral de acuerdo a la fe del pueblo. Es en el año de 1874, cuando el Obispo Toral alcanza un rescripto del Papa Pío IX, con la asignación de 500 pesos anuales para la fábrica de la Catedral. Dos años atrás, 1872 se había dispuesto del terreno donde se encontraba la Iglesia de la Compañía, que fue demolida debido a que toda su estructura se encontraba cuarteada por los numerosos sismos que azotaron a varios lugares del país. Se miden entonces cuarenta varas entre las calles Sucre y Bolívar, frente a la Plaza de Armas para levantar la catedral de Cuenca. Pero en el año de 1883 sin haber tenido la dicha de ver colocada la primera piedra de la construcción, muere el Obispo Toral; la dignidad episcopal recae en la figura de Miguel León, quien colaboró y conocía de los anhelos del Obispo.

Es entonces que la congregación de los Padres Redentoristas, quienes tenían deudas de gratitud con el Obispo Toral, ofrece la colaboración del Hermano Juan Bautista Stiehle, para proyectar tan formidable obra. El Hermano Juan, descendiente alemán de familia de campesinos quien con su humildad trabajando intensamente, debió de concebir el milagro; presenta entonces tres planos al Monseñor León quien debería de escoger uno de ellos.

El año de 1885 se inicia entonces la construcción de la Catedral, al mando de sobresalientes habitantes de la ciudad hasta 1970, época en la cual se realizan unos nuevos estudios para terminar con el levantamiento de las torres, las cuales se haya inconclusas hasta el día de hoy.

La construcción de la catedral mostró varias dificultades en el transcurso de su ejecución, entre los inconvenientes presentados cabe citar: la dificultad en la conformación de los cimientos (filtraciones de agua), falta de mano de obra, carencia de las herramientas propicias, pero lo más importante fue la imposibilidad de conseguir el presupuesto necesario que permitiera seguir con la construcción; estos son unos de los aspectos a los que se vio expuesta la obra.

La Historiadora María Tómmerbakk en su “Investigación Histórica de la Catedral Nueva de Cuenca” divide en cuatro etapas el proceso constructivo de esta obra, tomando en cuenta que esta construcción tuvo períodos de paralización, diferentes ejecutores y el levantamiento de la estructura se la realizó paulatinamente se analizan las siguientes etapas:

- La primera desde 1882 con la adquisición de los primeros materiales y las primeras excavaciones, hasta la muerte del hermano Juan Stiehle en 1899.
- La segunda etapa inicia alrededor de 1909 bajo la dirección del Dr. Isaac María Peña quien está al frente de los trabajos hasta su muerte en 1937.
- La tercera etapa estuvo a cargo del canónigo y poeta Palacios quien tuvo el apoyo de la Junta de Urbanización, Ornato y Embellecimiento de Cuenca desde la fundación de esta entidad en 1940 hasta la celebración del 4to centenario de la fundación de la ciudad en 1957.
- Se puede considerar como una cuarta etapa, las intervenciones del Arq. Gastón Ramírez que culminaron en la década de los 70 (Tómmerbakk, 2013)

2.1.1 PRIMERA ETAPA: Diseño y dirección del Hermano Juan Stiehle

Los primeros planos de diseño presentados por el Hno. Stiehle en primera instancia no fueron aprobados por el Obispo León, sin embargo ya empezó a verse movimientos en cuanto a adquisición de materiales para el inicio de la construcción de la fábrica de la Nueva Catedral. Es así que se hacen grandes pedidos de ladrillos a diferentes personalidades de distintos sectores de la ciudad; muchos de los ladrillos presentaban diferentes calidades, y en cuanto a ello los mejores eran los llamados “ladrillos de obra” elaborados en los tejares de Sinincay, (Tómmerbakk, 2013) los “ladrillos de presión” fabricados en el tejear de la parroquia de San Sebastián a pesar de ser más económicos (cinco “ladrillos de presión” equivalían a cuatro “ladrillos de obra”) eran de una calidad menor ya que eran elaborados con barro batido, de este modo se puede destacar el conocimiento y variedad de técnicas que se conocía en ese entonces. En el año de 1882 se comenzaron a fabricar ladrillos en el sector de Ucubamba, una propiedad arrendada al convento de Santo Domingo cuyos “ladrillos de obra” producidos allí tenían dimensiones especificadas para elaborarlos, 30 x 15 x 6 cm. (Tómmerbakk, 2013)

Antes de haber sido colocada la primera piedra de la Catedral, ya se tenía una gran cantidad de materiales almacenados para su construcción, además de haberse realizado algunos trabajos para mejorar el acceso a la fábrica, los mismos que comprendían: la nivelación, empedramiento de la vía, abertura de canales, ente otros trabajos. En el mes de octubre de 1884 se registran datos referentes a gastos por excavación y desalojo de tierra del solar de la Compañía para hacer adobes, lo cual indica que el material que se iba excavando del terreno donde se ubicaría la cripta de la Nueva Catedral, se destinaba para la producción de adobes. En estas mismas fechas también se realizaba limpieza de las acequias que rodeaban al terreno de la Compañía, posiblemente estos canales servían para desfogar el agua. (Tómmerbakk, 2013)

Los primeros trabajos significativos que marcan el inicio de la construcción de la Catedral, se dan en los años de 1885 a 1886, en los cuales se realizan avances importantes en las excavaciones que corresponderían a las cimentaciones y para lo que sería la cripta. En los primeros meses a petición del Obispo León, se llevaron a cabo mingas en las que participaba la gente que vivían en las distintas parroquias de Cuenca, para llevar piedras del río Tomebamba a la construcción, apilaban ladrillos, se realizaba limpieza de acequias de la calle de la Compañía, además de contratar peones para la composición y construcción de rieles.

En el año 1886 los egresos para cubrir gastos aumentaron, todas las semanas se hacía un registro de pagos a peones, dichos registros son detallados, indicaban cuantos días trabajaban, de donde provenían, cuál era su función (sobrestante, albañil, artesano, peón o cantero), y el pago que percibían. Los gastos de materiales y herramientas se van repitiendo continuamente, se alquilan yuntas para batir el barro, se compra manteca para los vagones, moldes de madera para los ladrillos, carretillas, paja, sogas, costales para cargar piedra, cueros para betas, puntales, etc.

Es en el mes de abril cuando se mandó elaborar la piedra angular de lo que sería la nueva Catedral de Cuenca, pero no fue hasta el mes de diciembre que se celebró la colocación de la piedra dando así inicio formal a la construcción.

En el período comprendido entre los años de 1887-1889 la construcción presentaba un ritmo más acelerado en cuanto al avance de la construcción; se contaba con tres cuadrillas de 15 personas aproximadamente, además de personas especializadas como: artesanos, carpinteros, herreros y un fundidor. En el inicio de este período se ocupaba una importante cantidad de piedra, las cuales como ya se indicó eran acarreadas en mingas desde el río hacia la construcción, sin embargo en el año de 1887 se empezó a hacer gastos para pólvora y tiros para reventar piedras grandes de canteras.

Existen documentos en los cuales se demuestra que en esa época ya se contaba con un medio mecánico para transportar las piedras de las tres canteras que se adquirió en 1990 en el sector de El Tejar, además hay registro de pagos a canteros de Sayausí; también se tallaba piedra en una cantera de Balsay, y se realizaron dos mingas para traer piedras de una cantera en San Roque. Es evidente que en esta época se tenía grandes avances de la obra por lo cual se requería gran cantidad de piedra; además de la adquisición cal, de este último material se desconoce la procedencia aunque en algunos escritos se menciona que parte de este material fue explotado en el sector de baños.

En el año de 1891 se hicieron algunas adquisiciones de moldes para ladrillos de labor de los Padres Redentoristas, en esta etapa la compra de ladrillos

incrementó, ya que se hallan registros de obtención de miles de ellos destinados para la construcción.

La compra de sogas para levantar andamios y así poder trabajar en las partes superiores de las bóvedas subterráneas es un indicador del progreso de la obra. Es así que en el año 1893 es notorio el avance en la culminación de la cripta, ya que se elaboran varios contratos con distinguidos artistas de la ciudad para que construyan capiteles, indicando que serían usados en algunas paredes que ya habían llegado a su altura requerida de los accesos en la zona del presbiterio.

Desde este último año hasta 1899 tanto los obreros como los trabajos en la Catedral habían disminuido notoriamente, los gastos para este fin son bajos ayudándose con migas de gente proveniente de las parroquias. En 1898 se culmina la cripta, el Hermano Juan realiza una visita con la ayuda de espermas que le ayuden en su visibilidad debido a la escases de luz en ese lugar. En este último año debido a su edad y al deterioro de la salud del Hermano Stiehle, el Cabildo acuerda mandar elaborar un Faccimili de la Nueva Catedral, con las especificaciones de Juan a fin de prever dificultades en la ejecución de la obra en el futuro.

Después de la muerte del Hno. Juan, la construcción de la Catedral es realizada por varias generaciones cuencanas sujetándose a los planos originales. Los protagonistas de la construcción fueron los obispos: Miguel León, Manuel María Pólit, Daniel Hermida, Issac de María Peña y el canónigo Manuel María Palacios Bravo. (Tómmerbakk, 2013).

Como un dato importante, cabe mencionar que el Hno. Stihle realizó varios diseños para iglesias y puentes dentro de la ciudad y el país. Ver Anexo 5.

2.1.2 SEGUNDA ETAPA: Bajo la dirección del Dr. Issac de María Peña hasta su muerte

En el año de 1907 nuevamente se retoma la construcción de la fábrica de la Catedral con un número de trabajadores constantes. Para el año de 1909 la dirección de la fábrica estaría a cargo del Dr. Isaac María Peña elegido por el Obispo Polit.

En un informe realizado por el Dr. Peña en la revista católica con el título “Exposición de los trabajos ejecutados en la Catedral Nueva de Cuenca desde el 8 de febrero de 1909 hasta el 6 de agosto de 1918”, existen datos detallados sobre el avance de la obra. A continuación se muestran algunas imágenes del progreso de la construcción en esta época.



Ilustración 1: La Catedral en construcción”. Fotografía publicada en Guía Comercial, Agrícola e Industrial, 1909.



Ilustración 2: "Desfile Cívico 1917". Fotografía publicada en Cuenca Tradicional, p. 118

En esta última fotografía se muestra la pared lateral que da hacia la calle Mariscal Sucre, por lo que se puede asegurar que el avance de la construcción se dio desde la parte posterior o presbiterio hacia el tramo del este donde se ubicarían las torres frente al Parque Central.

En un informe de gastos presentado por el Dr. Peña se indica el desglose de las compras más importantes realizadas para la construcción, entre ellas están: compra de 345.500 ladrillos llamados ladrillos de adorno, 2.570 fanegas de cal de piedra y miles de costales de arena; además se registran datos de arrendamientos de canteras, traslado de grandes bloques de piedra y mármol. Los gastos más significativos están representados en la mano de obra, ya que se contrataron carpinteros, herreros y picapedreros.

En la parte final del informe menciona que “con todos los materiales enumerados, y tomando en consideración las dimensiones de los muros y bóvedas construidos, puedo asegurar que se han trabajado cosa de tres mil metros cúbicos de paredes entre piedra labrada y cal y ladrillo”.

En el período del Dr. Peña se llegó a dar inicio a las medias naranjas (cúpulas), sin ver concluida la primera cúpula grande del ábside, además de dar inicio a la cúpula frontal.

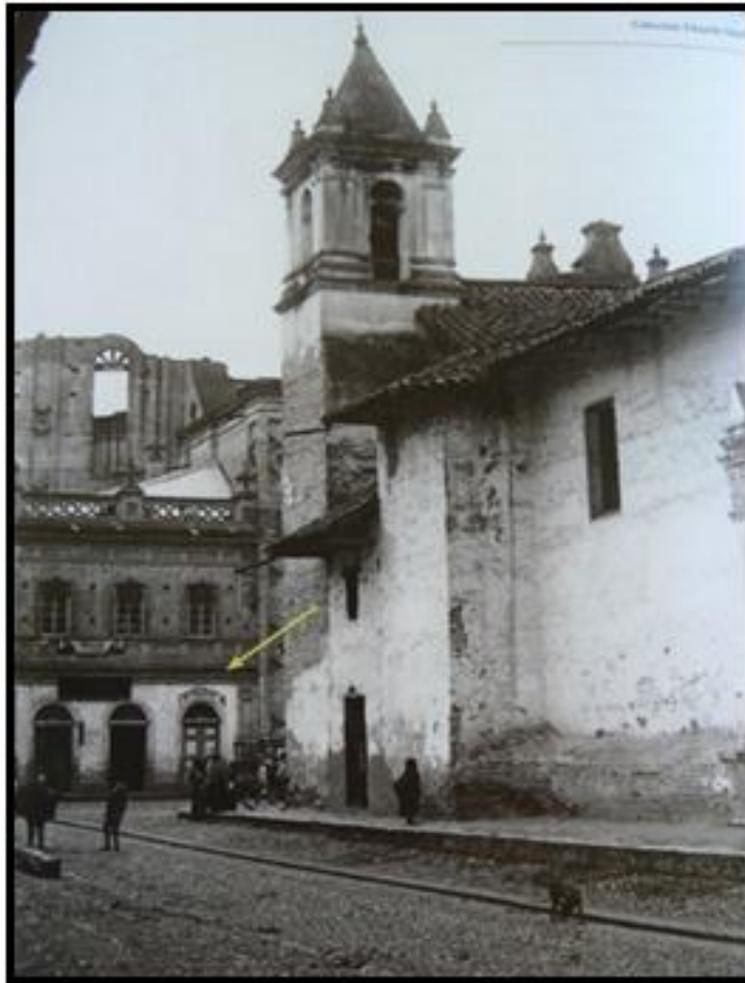


Ilustración 3: "La Catedral de Cuenca en construcción", Archivo fotográfico Dr. Miguel Díaz Cueva

En el año de 1919 Daniel Hermida asume el Obispado de la ciudad, la fábrica de la Catedral continua bajo la dirección del Dr. Peña, pocos son los avances prescritos que se realizaron, treinta metros de zócalo, levantamiento de filas de ladrillos en la pared paralela al seminario, acarreo de piedras de agua hasta el sitio de trabajo, fanegas de cal, producción propia de ladrillos, a más de la ejecución de una pequeña parte del frontis.

En el año de 1934 el 9 de diciembre, se puede confirmar, por los egresos registrados, la instalación de un ladrillal, anhelo que vio cumplido el Obispo Polit que la fábrica de la Catedral contara con su propia producción de ladrillos y cal.

La paralización en los adelantos de la Catedral fue causada porque no existía fuente alguna de recursos que ayuden a continuar con los trabajos, por ello el Obispo ordena recoger limosnas que serían destinadas exclusivamente para la fábrica de la Catedral, ya que los efectos del tiempo y la naturaleza estaban deteriorando lo que se había edificado hasta aquel momento. Por estas mismas fechas el país se convulsiona y adviene el liberalismo, varios sacerdotes son desterrados y con ello sus obras, la Catedral especialmente se detiene debida a la inestabilidad política y a las rentas que se le priva a la iglesia.



**Ilustración 4: José Salvador Sánchez, 1934, “Calle Solano hoy Padre Aguirre y Benigno Malo”.
Detalle de fotografía publicada en Viaje a la memoria, p. 284 (En tesis de arquitectura fechada 1918)**

A pesar de que la construcción se encontró paralizada algunos años, y el dinero obtenido de limosnas era escaso se seguían adquiriendo materiales como ladrillos y piedras de agua que iban a ser utilizadas en la conformación de muros y torres. En este mismo año la producción propia de materiales de construcción fue limitante; sin embargo el interés de continuar levantando la edificación hace que se adquieran más y más ladrillos con diversas formas decorativas; los de “punta de diamante” (que al parecer estaban destinados para la fachada), los de “media luna”, unos llamados “chucurillos”, “pupas”, “hojas” y “datias”. (Tómmerbakk, 2013)

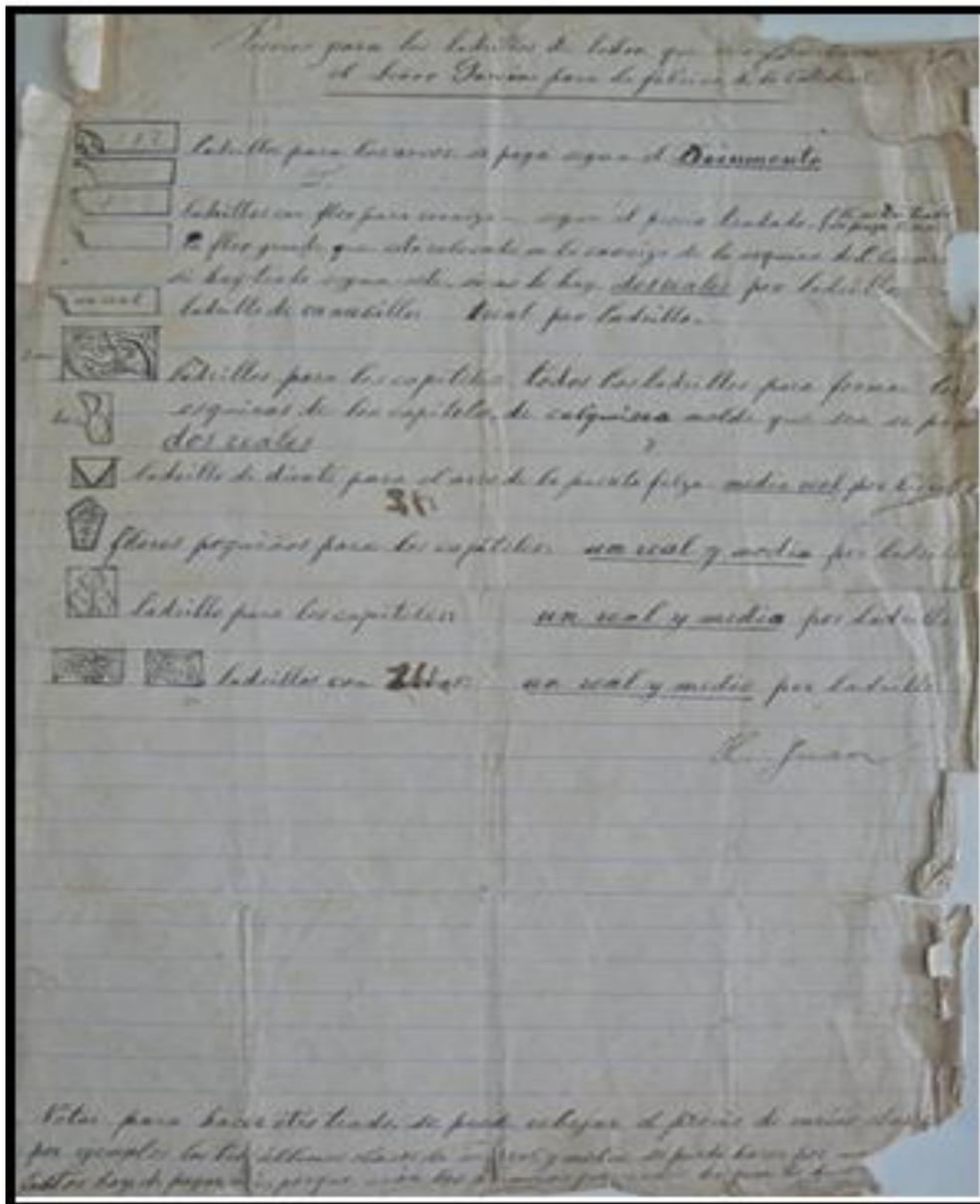


Ilustración 5: Diseños de modelos de ladrillos decorativos realizados por el Hermano Juan.

El estado en el que se halla la construcción para este entonces es revelado por los registros económicos existentes en estos años, en 1935 se adquieren ladrillos “media luna”, “chucurillos” y otros llamados “gavilanes” específicamente para la construcción del arco toral. Se compran varios materiales para el capitel, además de tubos para los desagües de las cúpulas y la adquisición de cemento para ser utilizado en remiendos de fisuras o grietas en muros o paredes.

Los trabajadores a los que se les mantenía en obra eran alrededor de seis peones y dos albañiles, siendo uno de ellos y el más reconocido Luis Antonio Chicaiza quien llegaría a trabajar en la Catedral casi toda su vida, y junto a él dos de sus hijos quienes murieron cuando se levantaron las cúpulas.

En el año de 1936, los registros económicos revelan que se seguía trabajando en las grandes cúpulas de la Catedral; se compraron tubos para los desagües de la “media cúpula”, ladrillos canecillos para la “bomba de la catedral” y tubos para los desagües de la “Media Naranja”. Para 1937 se estaba trabajando en lo que se indica como “la balaustrada”, siendo esto la parte superior de la fachada donde actualmente está situada la escultura de Santa Ana. (Tómmerbakk, 2013)



Ilustración 6: José Salvador Sánchez, “La Catedral Nueva en Construcción”. Fotografía publicada en Cuenca Tradicional, p. 65 En el libro Viaje a la memoria esta foto está fechada 1938.

2.1.3 TERCERA ETAPA: Bajo la dirección de Palacios Bravo y la Junta de Urbanización, Ornato y Embellecimiento de Cuenca

Isaac de María Peña muere en el año de 1937, luego de casi dos décadas a cargo de la dirección de la fábrica de la Catedral, en reemplazo queda el Canónigo Manuel María Palacios Bravo, quien se había dedicado a la poesía y no tenía mayores conocimientos sobre construcción. Al inicio pocos ciudadanos daban fe de que este hombre sería el adecuado para continuar los trabajos en la fábrica, empezó por promover un ambiente de simpatía para pedir contribuciones a las personas acaudaladas, pero las contribuciones que obtuvo Palacios no eran suficientes para cubrir los gastos de la obra por lo que se gestionó un impuesto al quintal de sal.

El presidente en esa época Arrollo del Río en una visita realizada a la ciudad resolvió apoyar el proyecto, para esto se creó una junta de Urbanización Ornato y Embellecimiento de la ciudad de Cuenca, cuyo objetivo fue preparar la ciudad para el IV Centenario de su fundación. Esta junta estaba conformada por El Rector de la Universidad de Cuenca, el Alcalde, un representante del Ejecutivo, un representante de las Sociedades Obreras de “La Salle” y la “Alianza Obrera”, un representante de centro de Estudios Históricos y Geográficos de Cuenca, un Tesorero y un Secretario, todos ellos a cargo de la administración de los recursos de esta obra.

Una decisión unánime de la ciudadanía de las provincias del Azuay y Cañar y a su vez tomada por esta junta y aceptada por el Ministro de Gobierno, fue que todos los fondos estarían destinados a la culminación de la Basílica de la Catedral de Cuenca.

Manuel María Palacios nombrado como inspector de construcciones, cargo que lo representaría hasta la disolución de la Junta en la década del 60, tenía en su responsabilidad de nombrar y remover arquitectos, ingenieros sobrestantes u otros operarios de la construcción. (Tómmerbakk, 2013)

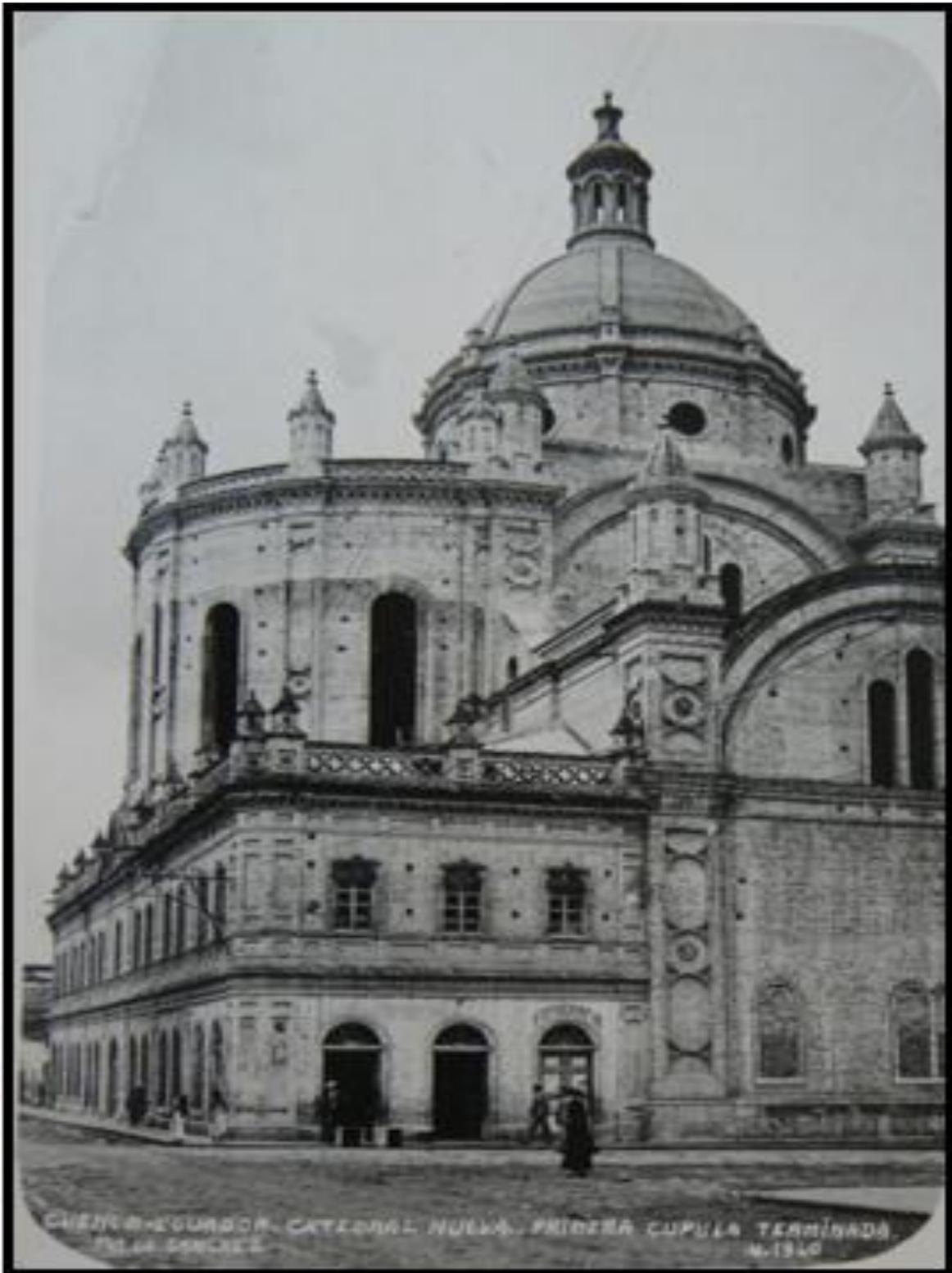


Ilustración 7: José Salvador Sánchez, 1940, “Catedral Nueva primera cúpula terminada”. Archivo fotográfico Dr. Miguel Díaz Cueva.



Ilustración 8: Catedral en construcción 1941. Fotografía publicada en Tesis de arquitectura



La asignación del impuesto a la sal no generaba los recursos suficientes para cubrir los gastos de la construcción, razón por la cual desde 1948 este impuesto fue sustituido por una asignación mensual de 20.000 sucres que los monopolios del estado debían entregar a la junta, con lo cual se pudo acelerar los trabajos aumentando el presupuesto en más de un 100%. En 1954 debido a que la obra todavía no estaba por concluirse, el Congreso decretó una prórroga de diez años para esta asignación, hasta que concluyera la obra.



Ilustración 9: Catedral en construcción 1945. Fotografía publicada en Tesis de arquitectura



Ilustración 10: Catedral en construcción. Archivo Fotográfico Dr. Miguel Díaz Cueva. (Una foto parecida fechada en Tesis como 1947)

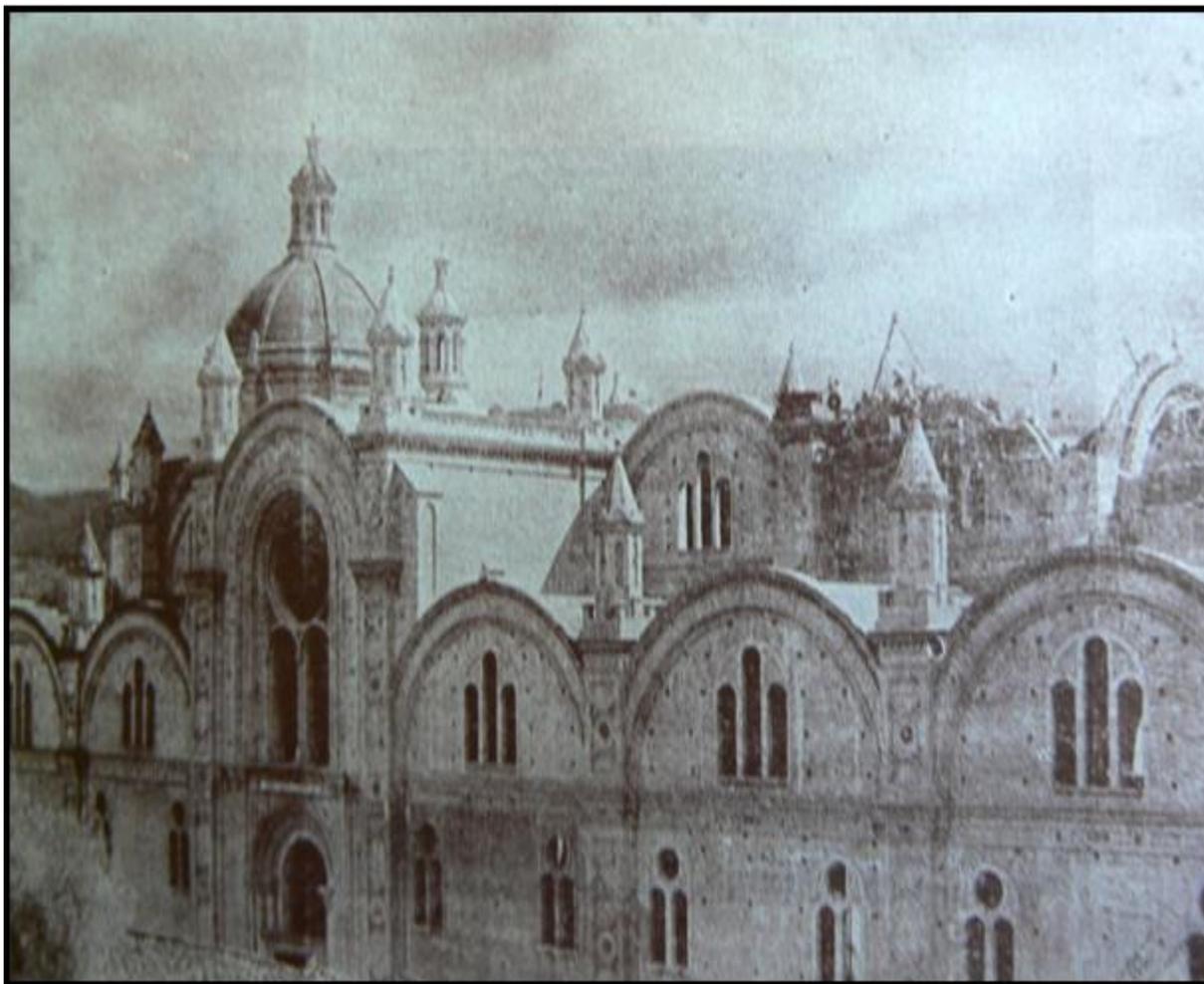


Ilustración 11: “Estado en el que se halla la edificación de la Nueva Catedral”. Fotografía publicada en Guía abreviada de Cuenca, 1948, s/p

En el año de 1955 las aportaciones mensuales por parte del gobierno ascendieron a 25.000 sucres mensuales hasta 1960. Además el Estado liberó de los derechos e impuestos aduaneros a la Junta de Urbanización, Ornato y Embellecimiento de Cuenca lo cual ayudó para importación de 1300 metros cuadrados de mármol que serviría para el piso interior. (Tómmerbakk, 2013)



Ilustración 12: Catedral en construcción. 1950. Fotografía publicada en Tesis de arquitectura



Ilustración 13: Alejandro Ortiz Cobos, 1953, "Catedral de la Inmaculada Concepción en construcción"



Ilustración 14: Catedral de la Inmaculada, Cuenca 1955. Archivo Fotográfico Dr. Miguel Díaz Cueva.

En las fotografías mostradas se puede observar que la parte exterior de la Catedral estaría prácticamente concluida en el año 1955, aunque para esta fecha ya existía la preocupación sobre la resistencia de las torres. En una sesión de la junta se recomendó contratar los servicios de un calculista para que estudiara el peso que soportaría la construcción con el levantamiento de las torres, sin embargo hasta la actualidad la obra exterior se detuvo allí.

En los siguientes años se firmaron varios contratos con el objetivo de terminar con todos los detalles decorativos de la parte interior de la Catedral, para esta labor se contó con varios artistas como el quiteño Francisco Albuja que se encargó de dorar con pan de oro la mayoría de altares y demás componentes de los mismos, también se contrataron profesionales en ebanistería y carpintería, etc. Como un dato importante sobre los materiales en el interior de la fábrica se debe resaltar que el mármol para el piso del presbiterio y la cruz central fue importado desde Carrara, Italia. En los años de 1961 a 1963 se realizaron trabajos para los acabados de la puerta situada en la calle Sucre y se hicieron las instalaciones eléctricas, para lo cual se aprovechó la posibilidad de hacer importaciones sin costo de material desde Alemania.

2.1.4 CUARTA ETAPA: Intervenciones del Arq. Gastón Ramírez

En la época de los 60 la Curia contrató al Arq. Gastón Ramírez para supervisar los trabajos de la Catedral Nueva, este fue el primer profesional que intervino en esta obra, aunque la estructura misma de la Catedral ya estuvo terminada gracias a las habilidades de maestros como Pascual Lojano y Luis Antonio Chicaísa.

Con la finalidad de concluir las torres propuestas en los planos originales del Hno. Juan, en el año de 1966 se realizó una reunión con varios profesionales de la ciudad sin llegar a concretarse dicho legado.

En el año de 1972 se realizó un estudio de suelos en el lugar donde se asienta la Catedral con la extracción de una calicata de 5 metros de profundidad junto a la torre sur, el análisis dio a conocer que los cimientos llegaban a 4 metros y el terreno era heterogéneo similar al que se encuentra bajo la Casa de Cultura.

Entre los años 1970-1972 Gastón realizó una propuesta para la culminación de las torres. La idea de este proyecto según los planos presentados era implementar un restaurante y un ascensor de acceso, este proyecto fue aprobado por el municipio en 1971. De este modo se dio inicio a los trabajos que requerían introducir columnas de hormigón para que ayuden con el peso de estas nuevas estructuras, para ello estas columnas iban incrustadas en las esquinas interiores de los muros de la torre, por lo que fue removido parte de la mampostería para el armado y fundido de las columnas. En el año de 1980 se realizaron estudios de resistencia en las torres, trabajo que estuvo a cargo del

Ingeniero peruano Fernando Oshiro, pero el Arzobispo Luna Tobar detuvo la obra hasta como la encontramos en la actualidad.



Ilustración 15: Ortiz, "La Nueva Catedral". Archivo fotográfico Dr. Miguel Díaz Cueva



En el siguiente plano a continuación se muestra las partes constitutivas de la catedral finalizada su construcción:

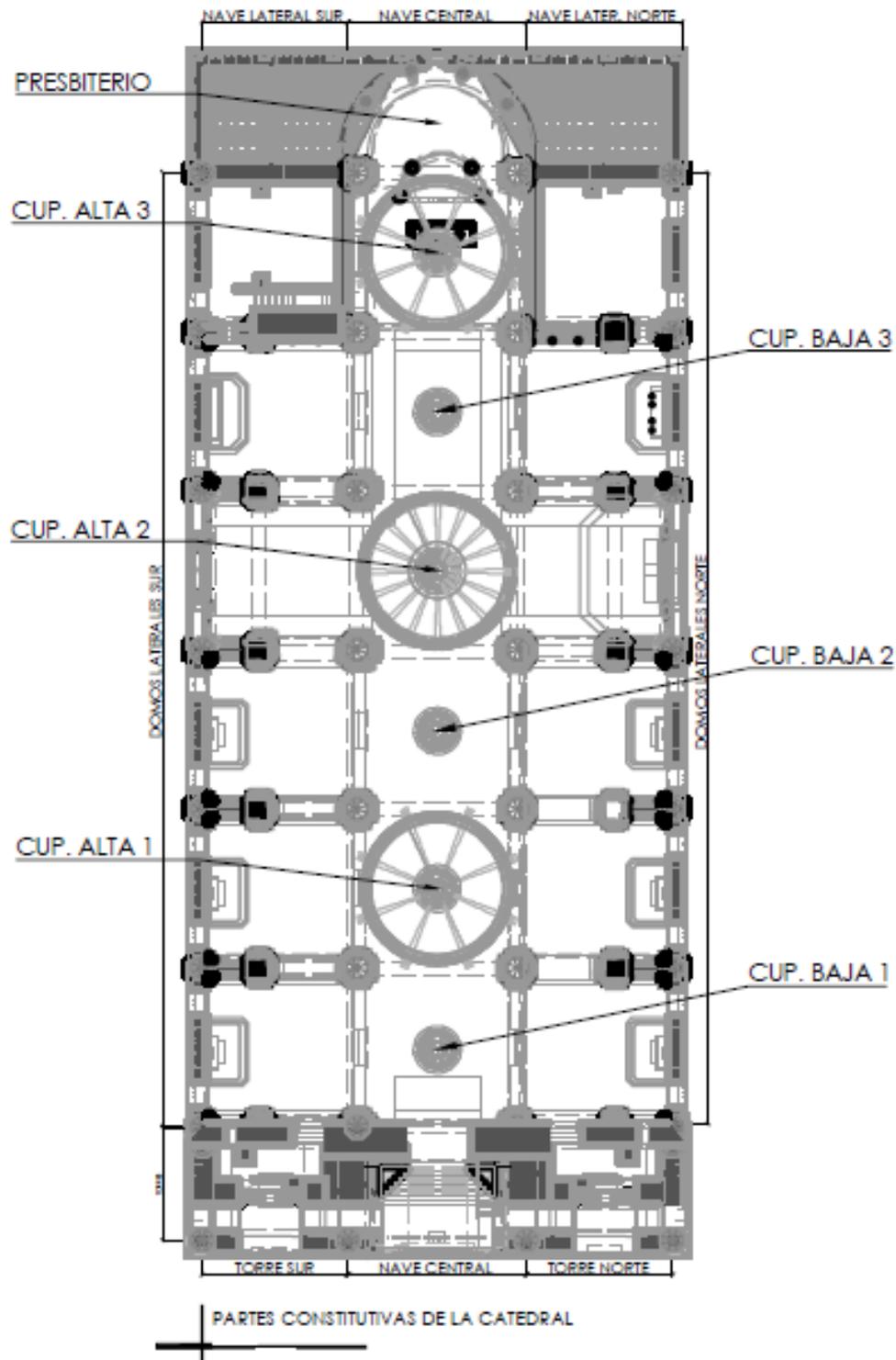


Ilustración 16: Plano de partes constitutivas de la Catedral

CAPÍTULO 3

3.1 ESTUDIO DE MATERIALES

La Catedral la Inmaculada Concepción de Cuenca, es una construcción que se asienta sobre una cimentación hecha de bloques de mármol y mampostería de piedra con mortero de cal, paredes de ladrillo, y en algunas partes revestido con elementos de mármol rosado de las cercanías de Cuenca.

De acuerdo a información recopilada de diferentes fuentes y a fotografías que muestran el avance de la construcción se demuestra que fue ejecutada paulatinamente de Oeste a Este, es decir, empezó con la fachada que da a la calle Padre Aguirre, después las fachadas laterales, pasando por el cuerpo mismo de la iglesia y finalmente la construcción de las torres que dan hacia la calle Benigno Malo.

La estructura de la Catedral se encuentra soportada por muros como contra fuerte y columnas en su mayoría de mampostería recubierta de mármol unidas por arcos de medio punto, cuya finalidad es transmitir las cargas de las bóvedas y cúpulas al suelo. Las naves laterales constan de un grupo de columnas menores que se unen a las columnas centrales por medio de arcos, y éstas a su vez soportan directamente a las cúpulas. Existen muros transversales que absorben los empujes de las cúpulas con el objetivo de verticalizar las cargas de la cubierta hacia el suelo, estos elementos son también conocidos como arbotantes.

Dentro de la descripción de los materiales utilizados a lo largo del proceso constructivo podemos citar los diferentes elementos de la edificación:

3.1.1 Cimentación: De acuerdo a datos históricos encontrados en registros del Archivo de la Curia se puede asegurar que la cimentación fue levantada con grandes bloques de mármol provenientes de las cercanías de Cuenca y piedras de agua traídas mediante mingas desde el sector de El Tejar, Balsay, Sayausí, una cantera en San Roque, del río Tomebamba y demás lugares aledaños a la obra. (Tómmerbakk, 2013)

El hormigón ciclópeo fue el material de construcción usado en la cimentación, ésta técnica consistía en colocar las piedras sobre el hormigón en masa, que se depositaba en el cimient. Al referirnos al hormigón en masa estamos hablando de un mortero de cal y arena, y los intersticios que iban quedando entre la escollera (pedazos de roca o bloques grandes de piedra) eran rellanados con piedras más pequeñas hasta que se conseguía homogenizar el conjunto.

Un estudio del suelo de cimentación proporcionado por el Arq. Gastón Ramírez realizado en Junio de 1972 detalla los siguientes datos del perfil del terreno:

- a) 1.5m de relleno de cascote de ladrillo y otros desperdicios de construcción
- b) 2.3 m de conglomerado constituido por grava muy alterada con cantos rodados gruesos.
- c) 1,2 m de conglomerado grueso con piedras de hasta 50 cm cementado con grava alterada y arena también alterada.

Resultados sobre capacidad portante del suelo y la constitución del perfil del mismo se hallan con más detalle en el Anexo 1.

Es necesario resaltar que la cimentación fue el único elemento que se realizó en una sola etapa, es decir, sin interrupciones que hayan dado lugar a un cambio en el comportamiento del elemento debido a una variación de los materiales, ya que materiales de diferentes épocas pueden presentar alteraciones en las propiedades mecánicas que afecten a la estructura y a su interacción con el suelo.

3.1.2 Paredes: Son de mampostería de ladrillo unido con mortero de cal, estos elementos se empezaron a levantar una vez concluida la cimentación; las paredes subterráneas para la zona de la cripta fueron conformadas con ladrillos y piedras más elaboradas. Las paredes de la cripta se levantaron en su totalidad durante el primer período de construcción de la Catedral que corresponde al Hno. Stiehle como se detalla en el Capítulo 2 de este mismo documento.

En un informe detallado por el Dr. Peña “Exposición de los trabajos ejecutados en la Catedral Nueva de Cuenca desde el 8 de febrero de 1909 hasta el 6 de agosto de 1918” se indica los avances que tuvo en la obra durante casi una década, del mismo informe se puede citar lo siguiente:

“Se comenzó por levantar la pared lateral de la igual por el lado Norte que da el Colegio Seminario desde la capilla central hacia el presbiterio o parte occidental, en una longitud de 48 metros. De estos los 20 metros se levantaron desde el zócalo que es de piedra marmórea de un metro de ancho por uno cincuenta de alto, y la pared de cal y ladrillo hasta la altura de once metros. Adyacente a esta pared se halla la capilla central que será del Santísimo, frente a la puerta lateral del lado Sur, que corresponde a la plazoleta del Carmen: en el centro de esta capilla se ha construido un arco de mármol de diez metros de alto y seis de diámetro, simétrico al de la puerta lateral. A los lados de esta

capilla se hallan las grandes columnas que trabadas a la pared principal, con sus capiteles concluidos y principados los arcos de la adyacente. Desde esta capilla hacia el presbiterio, se ha prolongado la pared con iguales columnas y capiteles, sobre la que ya se había construido anteriormente, en una longitud de 28 metros por 7 de altura. En el intervalo de esta se haya incluida la gran bóveda que tiene 16 metros de largo por 15 de ancho, inclusive el grueso de las paredes y columnas, con su diámetro interior de 12 metros. Esta bóveda cubre dos departamentos, el Coro menor de cantores y la Sala capitular, divididos o separados entre sí por una pared de ladrillo que da más consistencia a la grandiosa bóveda. Además sobre las paredes del ábside, cuyo diámetro es de 16 metros, se han levantado éstas, dos metros más, hasta dejar trazada las cinco ventanas detrás del presbiterio y sus columnas alternantes de afuera y adentro. En el lado Sur o sea del Evangelio, es esta trabajando actualmente, y a punto de concluirse, otra bóveda igual a la descrita, con la que ya se podía dar comienzo a las cornisas, capiteles y arcos de la nave central, que han de sostener la concha del ábside y la soberbia cúpula que ha de cubrir el presbiterio. Esta gran bóveda como la anterior se ha levantado desde un metro antes de los capiteles y sus paredes laterales tienen hasta dos metros de ancho sobre los capiteles entre un bóveda y la que ha de seguirla. También se han levantado las cuatro columnas que han de sostener la cúpula del crucero o centro de la iglesia. Estas columnas son de mármol y se han alzado a la altura de cinco metros sobre una base de dos metros en cuadro. Finalmente se han colocado las cornisas, tímpanos, balaustradas y torreones de los dos lados del ábside, cuyos departamentos laterales se hallan en su mayor parte concluidos y en servicio de la misma fábrica de la iglesia. Estos departamentos, tan útiles para la ejecución de los trabajos y que a la vez contribuyen al embellecimiento y ornato público, se pudieron concluir mediante el valioso objeto de más de 70 quintales de fierro acanalado obsequiado por el Ilmo. Obispo Polit, para su cubierta. Sea ésta la ocasión para agradecer a nuestro ilustre Prelado por este obsequio, y el de una magnífica máquina de hacer ladrillos con que cuenta ya la nueva Catedral para facilitar y economizar sus trabajos en adelante". (Tómmerbakk, 2013)

De esta manera podemos asegurar que las paredes y por lo tanto los ladrillos y conglomerante de la zona Oeste de la construcción (ubicada en la calle Padre Aguirre) presentan mayor antigüedad que los que se levantaron décadas más tarde.



Ilustración 17: Posición de colocación de ladrillos

La manera de colocación de ladrillos fue en forma de *soga*, es decir, cuando apoyado sobre su cara mayor la cara menor es perpendicular al paramento.

La fotografía a continuación muestra los espesores del mortero usados para levantar las diversas paredes que conforman la Catedral.



Ilustración 18: Espesor del mortero de cal

Los valores medidos se muestran en las siguientes tablas:

Posición del mortero: Sentido Vertical	Espesor del mortero
Primera fila	3, 5 cm
Segunda fila	3,0 cm
Tercera fila	2,0 cm
Valor Promedio	2,83 cm

Tabla 1: Espesor de mortero medido en sentido vertical

Posición del mortero: Sentido Horizontal	Espesor del mortero
Primera Columna	2,0 cm
Segunda Columna	1,50 cm
Valor Promedio	1,75 cm

Tabla 2: Espesor de mortero en sentido horizontal

3.1.3 Muros: Basándonos en las inspecciones realizadas a diferentes zonas de la Catedral en donde ha sido posible observar determinados espacios de la construcción que denotan la forma de constitución de los muros, han permitido constatar la presencia de piedras dentro de las paredes de ladrillo, hecho por el cual podemos decir que los muros que forman parte de la estructura de la Catedral, son los que antiguamente se los conocía como muros de carga.

Los muros de carga eran utilizados en las construcciones antiguas como catedrales, conventos, y demás obras que requerían que estas estructuras de muros sean capaces de soportar las cargas importantes que generan otros elementos de la construcción, estos elementos se ubican en las fachadas para ser utilizados como aislante acústico y térmico, además se caracterizan por estar conformados de piedra con un relleno de mortero de cal, los mismos que tienen encofrado de mampostería de ladrillo para brindar resistencia y confinamiento al muro.



Ilustración 19: Muros de carga (piedra confinada con paredes de ladrillo)

En las fotografías se observan oquedades dejadas para la colocación de los andamios que permitían alcanzar mayores alturas en la construcción, en su interior se visualizan las piedras de agua que poseen un encofrado de mampostería de ladrillo. En la zona de las torres también es posible observar la composición de los muros en su parte interna.

La cimentación donde se encuentran los muros de carga es conocida como zapata lineal o corrida, misma que desvía todos los esfuerzos transmitidos por arcos y bóvedas al suelo.

Se tiene constancia de lo antes expuesto en zonas como el interior de la torre Sur y en ciertos agujeros que fueron usados para la colocación de andamios en la zona del crucero o zona central de la Catedral en sus exteriores, lugares en

donde se observan los espesores de los muros conformados por piedras confinadas con paredes de ladrillo.

3.1.4 Cúpulas: En la nave central se puede identificar seis cúpulas tres bajas semiesféricas y tres altas peraltadas, mientras que las naves laterales están cubiertas por bóvedas de cañón. En la fachada posterior se destaca el ábside, su planta es circular cubierto por una semi bóveda, este elemento cilíndrico se encuentra adosado al cuerpo de la edificación. Estas estructuras constan de mampostería de ladrillo y en su parte externa se hallan recubiertas por azulejos.

Las cúpulas mayores se encuentran asentadas sobre una planta circular y están rematadas por linternas, éstas alcanzan una altura de cincuenta y tres metros, la cúpula mayor está situada sobre el crucero y tiene un diámetro de doce metros. Las cúpulas menores se apoyan directamente sobre los arcos.

Existen dos bóvedas de tipo helicoidal usadas exclusivamente en las escaleras que sirven de acceso a la torre Norte y Sur.

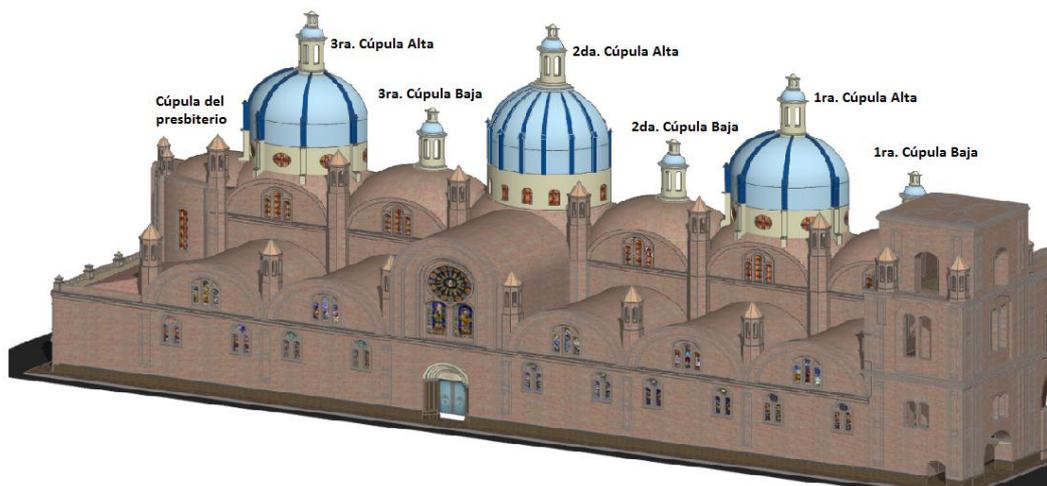


Ilustración 20: Modelo en 3D - Identificación de Cúpulas (Fuente Universidad de Cuenca)

Como una breve descripción de los materiales utilizados en la Catedral de Cuenca, cabe resaltar que todas las paredes, pilastras y columnas que soportan el peso de las cúpulas y bóvedas, son de mampostería de ladrillo provenientes de distintas parroquias rurales del Cantón Cuenca. De igual manera, las cúpulas altas y bajas, bóvedas de cañón y cruzadas, arcos longitudinales y transversales han sido construidas de mampostería de ladrillo. (Ministerio de Turismo, Ecuador, Atractivos Turísticos, Provincial Nacional,)

El estudio de los materiales de la Catedral Nueva de Cuenca contempla la caracterización de las diferentes propiedades físicas y mecánicas, para lo cual

es necesario realizar ensayos de laboratorio que definan los distintos parámetros propios de cada material.

La caracterización de los materiales requiere realizar investigaciones y ensayos de laboratorio que reflejen el sistema de construcción utilizado en la fábrica de la catedral; los ensayos llevados a cabo en laboratorio están enfocados a encontrar diferentes parámetros relacionados con los materiales existentes. Dentro de los elementos a estudiarse están:

- Ladrillos
- Morteros de cal
- Muretes de ladrillos
- Hormigón ciclópeo

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES DE LA FÁBRICA.

Para poder entender los daños que presenta hoy en día la Catedral de Cuenca es necesario conocer las propiedades y las partes constituyentes de la fábrica, las piezas, el mortero o ligante y la interfaz entre ambos, determinando sus características por separado y cuando los componentes forman parte de la fábrica compuesta.

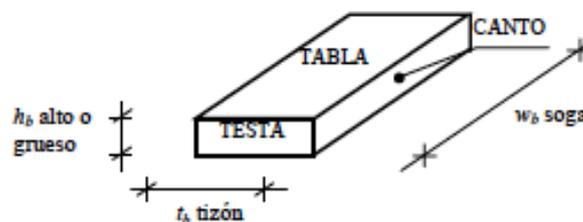


Ilustración 21: Nomenclatura para las dimensiones y caras de las piezas de fábrica

3.2.1 Propiedades mecánicas

La característica fundamental para determinar las propiedades mecánicas de la fábrica es la naturaleza de la piedra o ladrillo. Los tipos de piedra más utilizados son granitos, calizas, areniscas y en menor medida los mármoles. Las propiedades mecánicas fundamentales a efectos de análisis estructural son la densidad, el módulo de deformación longitudinal y la resistencia a la compresión, también se suele determinar directamente la resistencia a la flexotracción. Otras propiedades relacionadas con parámetros deformacionales (deformación de pico, deformación última, módulo de Poisson) o de fractura (energía de fractura) no son determinables en el campo sino en laboratorio.



3.2.1.1 Peso específico γ_b

En el análisis estructural, el peso específico determina la mayoría de las cargas gravitatorias que suponen la principal sollicitación en muros, torres de fábrica. Al referirse al peso específico, será el aparente, pues dicho peso es el que se utiliza en los cálculos.

Las siguientes tablas muestran como valor de referencia el peso específico de los principales tipos de piedras y ladrillo.

Tipo de piedra	Baker [21] mín-med-máx	Camuñas [26] medio	Hütte [27] mín-máx	Arredondo [28] mín-máx	PIET 70 [18]	UIC [29] mín - máx
Granito	25-26-28	28	23-27	26-27	26-30	26 - 28
Caliza	23-25-27	23	19-28	24-28	20	20 - 26
Arenisca	19-22-24	23	19-27	23-29	-	-
Mármol	25-27-28	27	19-28	27-28	-	-

Tabla 3: Valores de peso específico aparente de la piedra según diversos autores [kN/m³]

Tipo/Calidad del Ladrillo	UIC	Ponts en maçonnerie [30]
1 Ladrillo blando	17 - 19	Calidad inferior 14
2 Ladrillo medio	19 - 21	Calidad media 14 - 18
3 Ladrillo duro	20 - 22	Calidad buena 14 - 18
4 Ladrillo de clinker	21 - 23	Calidad excelente 18 - 22

Tabla 4: Valores del peso específico aparente del ladrillo según distintas fuentes [kN/m³]

3.2.1.2 Resistencia a compresión f_b

La resistencia a la compresión de las piezas es un índice de calidad válido para comparar distintas piedras entre sí y, a igualdad de dimensiones de las piezas, mortero y aparejo, incide sensiblemente en la resistencia de la fábrica. Sin embargo, por si misma no permite hacer afirmaciones definitivas sobre la resistencia a compresión de la fábrica de la que forma parte.

La resistencia se determina mediante ensayos de compresión simple sobre muestras extraídas de un elemento estructural o de bloques similares a los de la estructura que se estudia si se dispone de ellos.

Para el estudio de la fábrica de la Catedral se analizan dos elementos: la piedra y el ladrillo, en el caso de la piedra esta suele ser anisótropa en lo que a propiedades mecánicas se refiere y en el caso del ladrillo la



resistencia depende fundamentalmente de su composición y del proceso de cocido.

La siguiente tabla muestra valores de ensayos de compresión realizados con distintos tipos de piedra y por diferentes autores de los EEUU.

Tipo de piedra	Baker *	Arredondo **	Hütte **	Camuñas **
Granito	14-134-191	80-270	80-270	180
Caliza	25-65-166	80-150	25-190	60-130
Arenisca	30-64-105	10-180	15-320	50
Mármol	48-88-123	80-150	40-280	140

(*) Probetas cúbicas desecadas de 50.8 mm de lado. Valores mínimos, medios y máximos

(**) No se especifican las dimensiones de las probetas

Tabla 5: de resistencia a compresión de la piedra fb [N/mm²]

Para ladrillos el rango de variación de la resistencia es muy grande, según J. Morton sitúa el mínimo de 10 a 15 N/mm² y el máximo en 100 N/mm². Los valores de resistencia posible que se admite varían de 150 a 180 N/mm², esto es válido para ladrillos de arcilla. En la tabla a continuación se indican valores de resistencia de ladrillo según dos instituciones diferentes: UIC y Ponts en Maçonnerie.

Calidad del ladrillo		UIC		Ponts en Maçonnerie
1	Blando	4 – 8	Inferior	6 – 10
2	Medio	8 – 15	Medio	10 – 20
3	Duro	15 – 30	Bueno	20 – 30
4	Clinker	30 – 50	Excelente	35 – 70

(*) No se especifican las dimensiones de las probetas

Tabla 6: Valores de resistencia a compresión de ladrillos fb [N/mm²]

La mayoría de las normas especifican que el ensayo de compresión se realice sobre muestras desecadas, el contenido de agua puede influir en un 40% el resultado.

La mampostería de ladrillo cuando se encuentra sometida a esfuerzos de compresión presta una buena resistencia. El comportamiento y los modos de falla ante cargas axiales dependen de la interacción de las piezas y el mortero. Se puede interpretar que estos dos elementos, piezas y mortero tienen características esfuerzo-deformación diferentes, al ser sometidos a un mismo esfuerzo, se produce una interacción que

consiste en que el material menos deformable el ladrillo, restringe las deformaciones transversales del material más deformable el mortero, introduciéndole esfuerzos de compresión en dirección transversal. Por el contrario, en el material menos deformable se introducen esfuerzos transversales de tracción que disminuye su resistencia respecto a la que se obtiene en el ensayo de compresión simple del material aislado. Los ensayos de resistencia realizados se los muestra más adelante dentro de este capítulo. El gráfico siguiente muestra la curva esfuerzo-deformación de los materiales: mortero, ladrillo, mampostería.

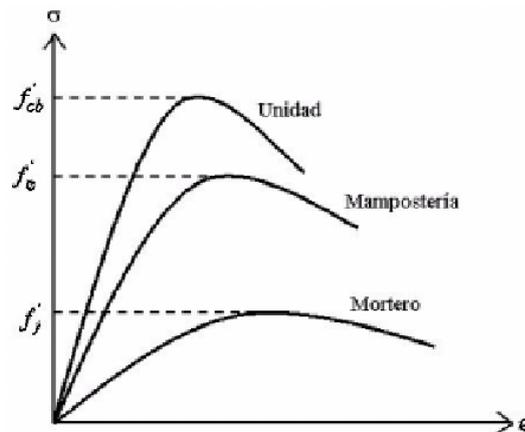


Ilustración 22: 6: Relación esfuerzo-deformación para mortero, ladrillo y los paneles de mampostería (Paulay y Priestley, 1992)

3.2.1.3 Resistencia a tracción f_{tb}

En la fábrica la resistencia a tracción está principalmente controlada por la resistencia a la adherencia desarrollada en las interfaces mortero-unidad.

Sinha (1983) investigó la relación entre la resistencia de cortante inicial y la resistencia a tracción f'_{to} , proponiendo la siguiente expresión empírica:

$$\tau_o = 0.80 \cdot f'_{to}{}^{0.56}$$

La expresión es válida para $f'_{to} \leq 0.6 \text{ MPa}$. Los autores observaron una buena correspondencia de esta ecuación con los resultados experimentales y con otras expresiones sugeridas por varios autores. La tabla a continuación muestra la resistencia a tracción de algunos materiales.



Tipo de piedra	Baker	Arredondo	Camuñas	Schubert [40]	UIC	Geotecnia y cimientos I [41]	Ponts en maçonnerie
Granito	8.7						
Caliza	17.4	3.3	10	-	5	5-10	-
Arenisca	14.2						
Mármol	15.2						
Ladrillo de arcilla	13.5	-	-	3 a 10	5		3.0

Tabla 7: Resistencia a tracción como fracción en % de la resistencia a compresión

3.2.1.4 Módulo de deformación longitudinal E_b

En la fábrica la deformabilidad es debida a una altísima proporción a su componente menos rígido como lo es mortero. Interesa, no obstante, conocer el módulo de elasticidad de las piezas puesto que la relación de rigideces entre piezas y mortero es un parámetro que determina el comportamiento del material compuesto.

Teniendo en cuenta el bajo nivel tensional de la fábrica, que aún en zonas de fuerte concentración de tensiones, difícilmente excede los 5 N/mm^2 , tiene sentido hablar del módulo de deformación longitudinal de las piezas como una constante del material. Baker da los siguientes valores.

Tipo de piedra	Baker	UIC	ASTM
Granito	8,500 – 32,000 - 67,500	10,000 – 100,000	47,000 (Barre)
Caliza	17,000 – 32,000 - 76,000	20,000 – 100,000	33,000 (Salem)
Arenisca	7,000 – 15,000 – 40,000	10,000 – 50,000	12,500 (Berea)
Mármol	25,000 – 48,000 – 82,000	-	76,000 (Tennessee)

Tabla 8: Valores orientativos del módulo de elasticidad de piedras E_b [N/mm^2]

Tipo de ladrillo	UIC	Ponts en maçonnerie
Ladrillo Blando	1,000 – 5,000	
Ladrillo Medio	5,000 – 10,000	
Ladrillo Duro	10,000 – 15,000	5,000 – 25,000
Ladrillo Clinker	15,000 – 20,000	

Tabla 9: Valores orientativos del módulo de elasticidad del ladrillo, E_b [N/mm^2]

3.2.1.5 Coeficiente de Poisson ν_b

La relación de Poisson para la mampostería ha sido muy poca estudiada, y lo que se tiene son recomendaciones de rangos de valores.

Piedra y ladrillo: $\nu = 0.10$ a 0.15

3.2.1.6 Energía de fractura G_f

Van der Pluijijm encontró valores de G_f entre 0.06 y 0.13 Nmm/mm² para ladrillos de arcilla y de silicato cálcico. Los valores de la resistencia a tracción variaban para esas muestras entre 1.5 y 3.5 N/mm².

3.2.1.7 Módulo de cortante G

El módulo de cortante G se lo puede calcular en función de los valores de E y ν_b , a través de la siguiente relación:

$$G = E / ((2(1 + \nu_b)))$$

3.3 MECANISMO RESISTENTE Y CRITERIOS DE ROTURA.

Antes de mostrar los resultados de los ensayos realizados es necesario conocer los diferentes criterios de rotura de la fábrica bajo esfuerzos de compresión.

La rotura de la fábrica bajo esfuerzos de compresión está directamente relacionada con la interacción que se produce entre la pieza y el ligante, interacción que depende de las diferentes propiedades deformacionales de ambos componentes.

Si analizamos una muestra de un prisma de fábrica sometido a compresión simple, de manera idealizada se obtendría tres tipos de tensiones, estas son: una tensión principal de compresión perpendicular al plano σ_{zb} y tensiones transversales de tracción σ_{xb} y σ_{yb} . De esta manera, el mortero está sometido a un estado de compresión triaxial, mientras que la pieza a una compresión vertical y a tracciones en el plano horizontal.

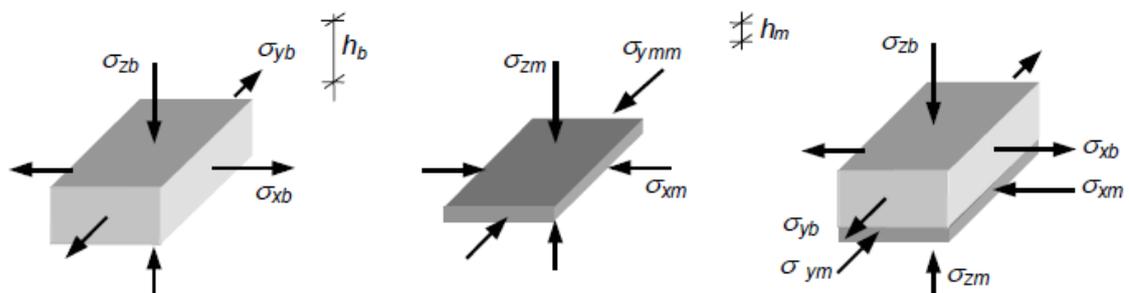


Ilustración 23: Estado tensional en la pieza y en el mortero en la fábrica sometida a esfuerzos de compresión

Las tensiones en ambas direcciones x e y del plano horizontal son iguales, tanto en el mortero como en la pieza. Esto no es una hipótesis sino una

consecuencia de relaciones de equilibrio, compatibilidad y del comportamiento “incrementalmente elástico”. (Jose Luis Martínez, 2001)

Planteando ecuaciones tanto de equilibrio, compatibilidad e igualdad de tensiones en el plano horizontal, llegamos a la hipótesis sobre cuál es la condición crítica de tensiones o deformaciones que produce la rotura y sobre cuál es la trayectoria de tensiones en pieza y mortero desde el comienzo del proceso de carga hasta la rotura.

En el caso de la pieza, para compresión pura se alcanza la rotura al alcanzar la tensión el valor de la resistencia a compresión uniaxial; en tracción biaxial la rotura se produce cuando las tensiones de tracción son iguales a la resistencia a tracción biaxial.

En el caso del mortero, para compresión pura se alcanza la rotura al alcanzar la tensión el valor de la resistencia a compresión uniaxial.

Todo lo antes mencionado es válido para un modelo constitutivo elástico para piezas y mortero.

Finalmente, tenemos que el valor de la resistencia a compresión de la fábrica depende de los parámetros elásticos de piezas y mortero, es decir, del módulo elástico de la pieza y mortero y de coeficiente de Poisson de la pieza y mortero.

3.3.1 Comportamiento tenso- deformacional $\sigma - \epsilon$

El comportamiento de la fábrica es no lineal, desde estados tempranos de carga. Esta no linealidad se la observa en las curvas $\sigma - \epsilon$.

Existen tres variables importantes en el comportamiento uniaxial de la fábrica: el nivel de confinamiento de la misma, el ángulo de incidencia del esfuerzo de compresión con respecto a los tendeles (capa de mortero que se extiende sobre cada hilera de ladrillos al construir un muro) y, el tiempo de actuación de la carga.

En el gráfico a continuación se muestra los valores $\sigma - \epsilon$ de las curvas propuestas por Priestley y Elder.

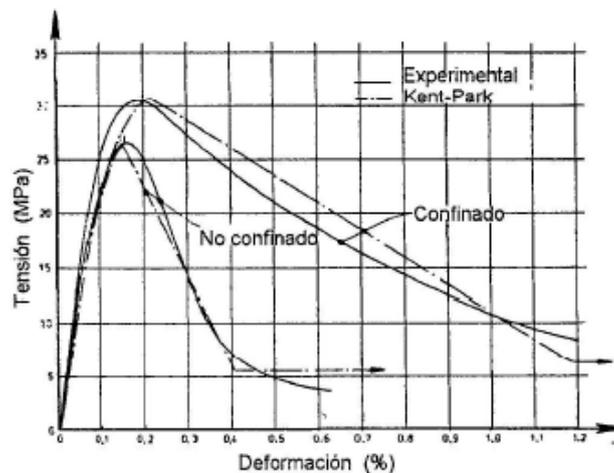


Ilustración 24: Curva $\sigma - \epsilon$ teórica y experimental (Priestley y Elder)

Teniendo en consideración los conceptos del comportamiento mismo de la fábrica a continuación se presenta los ensayos correspondientes y resultados obtenidos de los materiales para su caracterización.

3.4 ENSAYO DE ABSORCIÓN Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN LADRILLO

Descripción: El ladrillo fue el material más empleado en la ejecución de la Catedral, existen diferentes tipos de ladrillos provenientes de varios sectores de la ciudad. Las muestras usadas para los ensayos son sobrantes de la fábrica de la Catedral que por el paso del tiempo y forma de almacenaje no se encontraron en buen estado.

A partir de estas muestras se realizó ensayos de compresión para determinar el valor de resistencia máxima, ensayos de adherencia que indican la calidad del mortero y por último se efectuó un ensayo de absorción. Todas estas pruebas fueron realizadas como especifica la norma INEN y sus resultados fueron comparados con la misma para verificar su cumplimiento y obtener sus características.

3.4.1 Ensayo de Absorción: Se lo realiza con cinco muestras de ladrillos cortados con la ayuda de una amoladora, a fin de obtener una superficie uniforme de corte. Las muestras de ladrillos obtenidas son pesadas en una balanza electrónica y sumergidas en agua durante un período de 24 horas para eliminar los espacios ocupados por el aire (saturación) y así seguir con lo que explica la norma correspondiente.

3.4.1.1 Objetivo: “Determinar la masa de una muestra de ladrillo antes y después de ser sumergida en agua, estableciéndose la diferencia entre las dos masas como base para conocer el valor de la absorción de la humedad”. Norma INEN 296-1977-05. (Normas INEN para ladrillos)



Ilustración 25: Muestras de ladrillos sobrantes de la fábrica de la Catedral

Resulta importante destacar que para realizar el ensayo de absorción y posteriormente el de compresión el área expuesta de las muestras para la realización de estas pruebas no es un factor que pueda afectar los resultados obtenidos.

A continuación se muestra una tabla con las medidas descriptivas de las figuras expuestas las cuales pertenecen a los dos tipos de ladrillos utilizados en el ensayo:

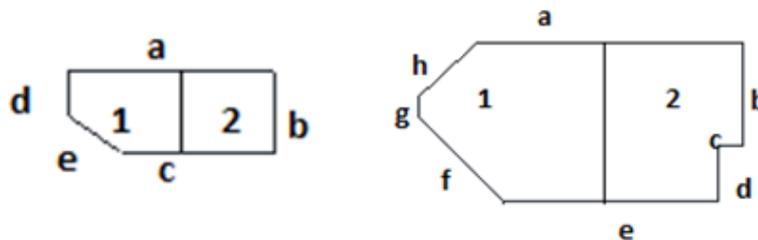


Ilustración 26: Representación de la forma de los ladrillos tomados de la Catedral

# Ladrillo	a(cm)	b	c	d	e	f	g	h	Área	Área 1	Área 2
6	32.5	13	24	7	12	-	-	-	397	186	211
1	32.6	13	23.8	7	12	-	-	-	397	186	211
2	32.8	13	23.9	7	12	-	-	-	397	186	211
3	31.8	12.5	2.8	6.8	25.8	14.5	2.5	9	655	299	356
4	32	12.6	2.9	6.9	26	14.6	2.2	9.5	655	299	356
5	32	12.5	3.2	6.9	25.5	14.4	2.5	9.8	655	299	356

Tabla 10: Dimensiones de los dos tipos de ladrillos tomados de la Catedral



3.4.1.2 Resultados del Ensayo: Luego de haber transcurrido el tiempo necesario para la realización del ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:

# Ladrillo	Peso Seco (gr)	Peso Saturado (gr)
1	1487	1746
2	1615	1910
6	1520	1766
3	3675	4338
4	3544	4196
5	3420	4094

Tabla 11: Pesos de las muestras secas y saturadas

La absorción de cada muestra expresada en % se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Absorción \%} = \frac{P_2 - P_1}{P_1} * 100$$

Siendo:

P1 = masa de la muestra desecada.

P2 = masa de la muestra después de 24 horas de sumergida.

% Absorción	
# Ladrillo	%
1	17.4
2	18.3
6	16.2
3	18.0
4	18.4
5	19.7

Tabla 12: Porcentaje de absorción obtenido



Tipo De Ladrillo	Resistencia mínima a la compresión MPa* (ver nota 1)		Resistencia mínima a la flexión MPa* (Ver nota 1)	Absorción máxima de humedad %
	Promedio de 5 unidades	Individual	Promedio de 5 unidades	Promedio de 5 unidades
macizo tipo A	25	20	4	16
macizo tipo B	16	14	3	18
macizo tipo C	8	6	2	25
hueco tipo D	6	5	4	16
hueco tipo E	4	4	3	18
hueco tipo F	3	3	2	25
Método de ensayo	INEN 294		INEN 295	INEN 296

Tabla 13: Requisitos de resistencia mecánica y absorción de la humedad que debe cumplir los ladrillos cerámicos

El porcentaje promedio de absorción obtenido es de 18% lo cual indica según la TABLA 12 del INEN 297 1977-05 que los ladrillos ensayados corresponden a la clasificación de **Ladrillo Macizo Tipo B**.

3.4.2 Ensayo de Compresión Simple: Este ensayo se lo efectúa mediante una compresión uniforme en sentido perpendicular a la cara de asiento como indica la norma, es importante que las caras de las muestras sean planas y paralelas, y en caso de no ser así se deberá colocar una capa de mortero de cal o azufre con el fin de producir una superficie sin rugosidades para de esta manera distribuir adecuadamente los esfuerzos durante el ensayo, algunos autores recomiendan se utilice tablas compensadas de 3mm de espesor.

3.4.2.1 Objetivo: “Se basa en la aplicación de una carga progresiva de compresión a una muestra de ladrillo, hasta determinar su resistencia máxima admisible”. Norma INEN 294-1977-05. (Normas para ladrillos, Anexo A)

A continuación se indica una fotografía del ensayo realizado en laboratorio:



Ilustración 27: Ensayo de Compresión Simple sobre muestras de ladrillos

3.4.2.2 Resultados del Ensayo: En el ensayo de compresión únicamente se tomo el valor de carga máxima soportada por cada una de las muestras.

Para estimar de una manera más exacta el área de asiento del mampuesto; se debe realizar al menos dos medidas del ancho y largo para determinar valores medios con los cuales se obtiene el área.

Los resultados obtenidos del ensayo a compresión se muestran en la siguiente tabla:

# Ladrillo	Peso (gr)	Carga (kgf)
2	1825	15816
6	1910	22328
1	1802	30809
3	4344	35598
4	4454	23331
5	4056	36261

Tabla 14: Peso y Carga de las muestras de ladrillos

Resistencia	Promedio
74.96 kg/cm ²	108.93
105.82 kg/cm ²	
146.01 kg/cm ²	
99.99 kg/cm ²	89.13
65.54 kg/cm ²	
101.86 kg/cm ²	

Tabla 15: Resultado de resistencia a la compresión

Con la resistencia promedio obtenida del ensayo y según la tabla 1 de la Norma INEN 297 1977-05 se clasifica al ladrillo como **Ladrillo Macizo Tipo C**; es necesario mencionar que éste resultado varía con la clasificación que se obtuvo según el ensayo de absorción, pudiendo clasificar a los ladrillos como tipo C (ladrillo fabricado a mano que puede presentar imperfecciones en sus caras exteriores). (Normas INEN para ladrillos)

3.5 ENSAYOS CON MORTEROS DE CAL

Mortero: Las propiedades mecánicas del mortero que más influyen en el comportamiento estructural de un elemento de mampostería son su deformabilidad y adherencia con las piezas. De la primera propiedad dependen en gran medida, las deformaciones totales del elemento de mampostería, mientras que la adherencia entre el mortero y las piezas definen la resistencia a cortante del elemento. (Adrián Tola, 2005)

Mortero de Cal: el mortero de cal es un material perfectamente plástico en el instante de colocación, endureciendo a las pocas horas, y que adquiere rigidez y resistencia a lo largo del tiempo. El mortero tiene 3 misiones dentro de la fábrica: (Jose Luis Martínez, 2001)

- Rellenar las juntas impidiendo el paso del agua.
- Regularizar el asiento entre bloques y repartir uniformemente las cargas.
- Colaborar, en su caso, a conducir las sollicitaciones horizontales hasta la cimentación.

La dosificación está en función del tipo de cal y la aplicación que se quiera dar al mortero. La dosificación se establece en volúmenes de las partes separadas por dos puntos, a la izquierda los volúmenes de cal, a la derecha de los dos puntos los volúmenes de arena. Por ejemplo, la dosificación 1:2 indica que utilizaremos un volumen de cal y dos de arena. De Vekey asegura que el óptimo de plasticidad se obtiene para una proporción ligante: árido de 1:3.

El mortero es el elemento más “débil” de la fábrica, el menos rígido, responsable de la mayor parte de la deformación instantánea y prácticamente toda la deformación diferida.

En la actualidad el uso de la cal, como material cementante ha perdido su utilidad debido a la aparición del cemento; ya que éste material presenta mejores resultados en cuanto a resistencia.

El principal componente de la cal es CaCO_3 , la cantidad o porcentaje que se encuentre presente en la cal, determinará la calidad dentro de los estudios de resistencia.

Para el análisis del tipo de mortero que fue empleado en la Catedral, se realizó el ensayo de compresión simple con varias muestras utilizando la cal de las dos caleras existentes que se encuentran en la ciudad, se puede citar dentro de éstas a una ubicada en el sector Racar y otra en Sinincay.

Peso específico γ_m : el peso específico de los morteros de cal varía entre 15 y 20kN/m^3 . (Jose Luis Martínez, 2001)

3.5.1 Ensayo de Compresión Simple f_m : La resistencia a compresión de los morteros está siempre referida a probetas de pequeño tamaño, cúbicas. Las pruebas de resistencia de mortero fueron realizadas en el laboratorio y ensayadas en fechas de distinto curado, así mismo teniendo cada una distintas dosificaciones con la finalidad de llegar a obtener similares características del mortero empleado en la construcción de la Catedral. La resistencia a compresión de un mortero se refiere a la resistencia de muestras de un tamaño convencional no confinadas, pero ésta resistencia no es identificable con la resistencia del mortero en la fábrica, sino es asumida como un índice de comparación que cuantifica la calidad del mortero y que puede ser utilizado en fórmulas empíricas ajustadas haciendo uso de este valor.

Como orden de magnitud de la resistencia de morteros de cal, De Vekey fija un rango de f_m entre 0.5 y 1.0 N/mm^2 para morteros, tanto de cal hidráulica como aérea, confeccionados en proporciones cal: arena 1:2 a 3.

ACI 530-99 clasifica los morteros (modernos) de cemento y cal en 4 categorías función de la dosificación o la resistencia a compresión a 28 días, Tabla 6.

Tipo de Mortero	Cemento	Cal	Arena*	f_m [N/mm^2]
M	1	0.25	2.8 a 3.8	17.0
S	1	0.25 a 0.50	2.8 a 4.5	12.5
N	1	0.50 a 1.25	3.4 a 6.8	5.0
O	1	1.25 a 2.50	5.1 a 10.5	2.5
K	1	2.50 a 4	7.9 a 12	0.5

(*) Entre 2.25 y 3.0 veces la suma de cal y cemento. Las proporciones se dan en volumen.

Tabla 16: Dosificación y resistencias especificados por ACI 530.1-99 ANS C270 [27.29] para morteros.

La resistencia a compresión del mortero depende de varios factores como la naturaleza de la piedra caliza empleada para elaborar la cal, el proceso de apagado, la naturaleza y la granulometría de los áridos, las condiciones de exposición a la intemperie, etc.

Las pruebas fueron realizadas siguiendo el procedimiento señalado por la Norma INEN 488:2009, la cual corresponde a “Cemento Hidráulico: Determinación de la resistencia a compresión de morteros con arista de 50mm” pero que en este caso será empleada para realizar morteros de cal bajo el mismo principio y metodología.



Ilustración 28: Ensayo de compresión simple en morteros de cal

3.5.1.1 Objetivo: “Obtener un valor de resistencia a la compresión del mortero de cal con características similares al utilizado en la Catedral durante su construcción”.

3.5.1.2 Resultados del Ensayo: Inicialmente se elaboraron muestras con un 100% contenido de cal (proveniente del sector de Racar), las cuales fueron ensayadas a los 7 y 28 días para obtener la curva esfuerzo deformación. Los resultados obtenidos de estos ensayos dieron valores bajos en cuanto a la resistencia que deberían presentar estos morteros debido a que en la actualidad no se cuenta con una cal de buena calidad como la utilizada en la construcción de catedral. Siendo de este modo necesario el empleo de otro aglomerante en este caso el cemento, mismo que tiene otras propiedades físicas y mecánicas diferentes a la cal, con lo cual se incrementará la resistencia. Es preciso mencionar que los valores bajos obtenidos en los ensayos de resistencia

Para continuar con los ensayos fue necesario el diseño de morteros con distintas dosificaciones, en las cuales estaría como variante primordial la cantidad de cemento; siguiente tabla se presentan las dosificaciones empleadas:

Relación	Contenido de cal %	Contenido de cemento %	Resistencia kg/cm ²
1:2	40	60	36.35
1:2	50	50	41.23

Tabla 17: Dosificación y Resistencia

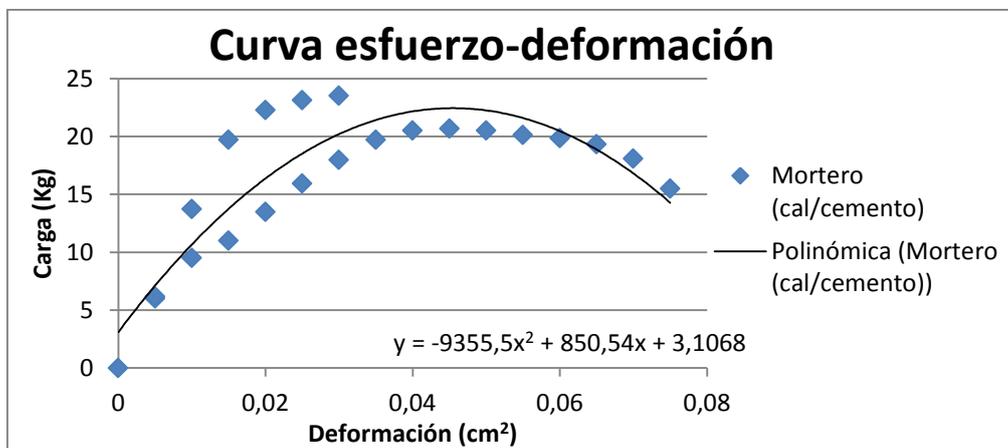


Ilustración 29: Curva esfuerzo - deformación (mortero cal - cemento)

La gráfica mostrada indica el comportamiento del mortero con una dosificación de 1:3 en una mezcla de cal, cemento, arena y agua a los 15 días. Con ésta gráfica es obtuvo una ecuación polinómica de cuarto orden.

3.6 ENSAYOS EN MAMPOSTERÍA DE LADRILLO

Mampostería: El tipo de mampostería (fabrica) presente en la Catedral es ladrillo con mortero de cal; la prueba que se utiliza para verificar la resistencia de la mampostería ($f'm$) es el ensayo destructivo de compresión bajo carga vertical.

Las estructuras de fábrica en general, bóvedas, pilas, torres, muros, etc., están sometidas a esfuerzos predominantes de compresión. Por este motivo se debe prestar mayor atención al mecanismo de rotura bajo este tipo de sollicitación y, por tanto, al valor de la resistencia a compresión de la fábrica.

3.6.1 Ensayo de compresión simple: Se lo realiza sobre muretes, es decir, sobre una pila de piezas superpuestas unidas por mortero, con una relación altura/espesor (h/t) aproximadamente igual a 4.

La rotura de la fábrica bajo esfuerzos de compresión está directamente relacionada con la interacción que se produce entre la pieza (ladrillo) y el ligante (mortero), interacción que depende de las diferentes propiedades deformacionales de ambos componentes. (Jose Luis Martínez, 2001)

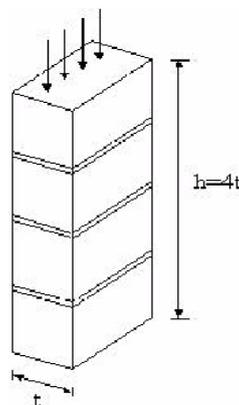


Ilustración 30: Representación de la relación altura/espesor del murete

La forma más común de fallo en este tipo de ensayo, es la aparición de grietas verticales en las piezas, generadas debido a las deformaciones transversales. Sin embargo existen otros tipos de fallas que se pueden presentar al variar la calidad y las propiedades de las unidades junto con el mortero.

Cuando se construye el murete es importante que las unidades estén saturadas para que no absorban el agua del mortero, produciendo una alteración de las características del mismo e impidiendo incluso que se

produzcan las reacciones químicas del cemento por falta de agua. (Adrián Tola, 2005)

En la siguiente tabla se citan algunos factores importantes que afectan la resistencia a compresión de la mampostería.

CARACTERÍSTICAS UNIDADES	CARACTERÍSTICAS DEL MORTERO	PANELES DE MAMPOSTERÍA
Resistencia Absorción Relación altura-espesor Geometría	Resistencia Espesor Relación agua/cemento Características de deformación Retentividad de agua	Colocación Hechura Dirección de carga Adherencia

Tabla 18: Factores que afectan la resistencia a compresión de la mampostería

3.6.1.1 Objetivo del Ensayo: “Obtener la resistencia máxima de la mampostería de ladrillo (fabrica), utilizando muestras de ladrillos sobrantes provenientes de la Catedral”.

3.6.1.2 Resultados del Ensayo: Las muestras fueron elaboradas con un mortero 100% cal y dos tipos diferentes de ladrillos como se indica a continuación, previo a la formación de los muretes se introdujeron los ladrillos en agua durante un tiempo de 24 horas para saturarlos y evitar que absorban agua del mortero. Una vez conformados los muretes se los mantuvo 8 días en condiciones ambientales normales debido a que el curado de la cal es aéreo; después de este proceso fueron sometidos al ensayo de compresión obteniendo los siguientes resultados:

COMPRESIÓN DE MURETES CON MORTERO DE CAL			
Muestra	Área (cm ²)	Carga (kgf)	Resistencia (kgf/cm ²)
Ladrillo pequeño	186	5809	31.23
Ladrillo grande	211	7495	35.52

Tabla 19: Ensayo de compresión de muretes de mampostería

La siguiente ilustración muestra una interacción de la fábrica (mortero, ladrillo, mampostería), obtenida a partir de los ensayos realizados de compresión, de esta manera queremos obtener una gráfica que nos permita conocer el comportamiento de los elementos bajo esfuerzos de compresión, como los que fueron determinados por Paulay y Priestley.

En el Anexo 2 se encuentra de forma más detallada el comportamiento de la fábrica bajo compresión simple. (Ver Anexo 2 Valor de la resistencia a compresión f).

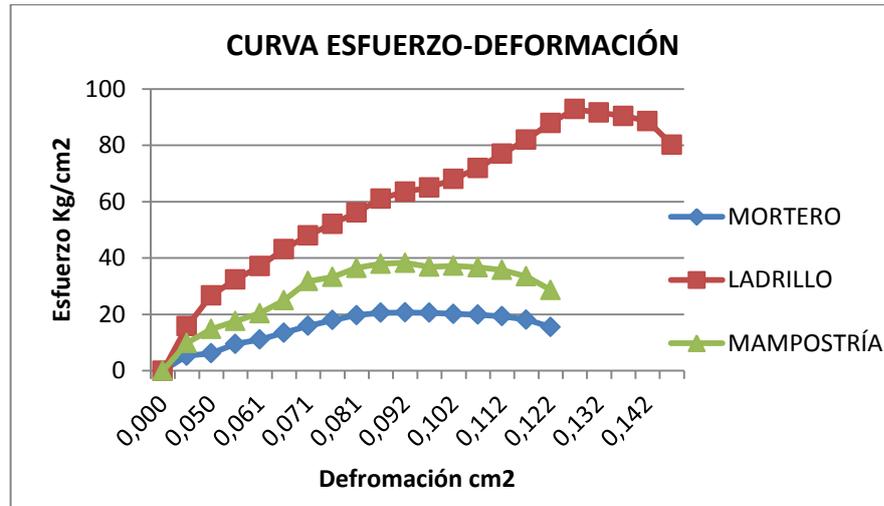


Ilustración 31: Curva esfuerzo-deformación para mortero, ladrillo y los paneles de mampostería.

Los valores correspondientes a este gráfico se muestran en el Anexo 2 (Tabla de Valores).

3.7 ENSAYOS DE CILINDROS DE HORMIGÓN CICLÓPEO

Hormigón Ciclópeo: Es un tipo de material de construcción que puede ser usado para cimentaciones, se lo realiza añadiendo piedras más o menos grandes del lugar con lo cual se va formando el hormigón y a medida que se van llenando los vacíos entre las piedras se consigue homogenizar el conjunto.

En las investigaciones realizadas acerca de la construcción de la catedral, se ha podido encontrar datos que indican que los muros de la fábrica fueron construidos a base de piedra, mortero y encofrado de ladrillo, a lo cual denominamos hormigón ciclópeo. Esta afirmación se ha podido corroborar gracias a las inspecciones realizadas en campo, ya que ha sido posible observar partes de la estructura que tienen esta constitución de materiales, un claro ejemplo de esto son las gradas de acceso a la torre sur de la catedral.



Ilustración 32: Gradas de acceso a la torre sur (hormigón ciclópeo)



3.7.1 Ensayos de Resistencia a Compresión: Con el objeto de realizar un ensayo que dé como resultado características aproximadas respecto a la resistencia del hormigón ciclópeo, fue necesaria la ejecución de probetas llevadas a una escala de laboratorio sustituyendo la piedra por grava.

Las probetas elaboradas para este ensayo están constituidas por mortero de cal-cemento-arena y árido grueso (grava). Según inspecciones e información recopilada referente a las dimensiones de los cimientos. Los materiales utilizados tienen las siguientes dimensiones:

Material	Piedra de Agua
Esc. Real Max.(cm)	30
Esc. Real Min.(cm)	10
Esc. Reducida Max (cm)	3
Esc. Reducida Min (cm)	1

Tabla 20: Escala real y reducida de la piedra de agua empleada

Material	Árido fino
Esc. Real Max.(cm)	1.4
Esc. Real Min.(cm)	2.85
Esc. Reducida Max (cm)	0.48
Esc. Reducida Min (cm)	0.95

Tabla 21: Escala real y reducida del árido fino

3.7.1.1 Objetivo del ensayo: “Elaborar probetas de hormigón ciclópeo con distintas dosificaciones que permitan caracterizar a los componentes que intervienen en este tipo de hormigón y de este modo determinar el módulo de Poisson conjuntamente con la resistencia máxima a compresión”.

3.7.1.2 Resultados de los ensayos: Las probetas realizadas en laboratorio fueron diseñadas con varias dosificaciones respecto al material cementante, con la finalidad de obtener resultados de resistencias propicias de acuerdo al hormigón ciclópeo de la época de construcción de la Catedral. En las siguientes tablas resumen se indican las dosificaciones empleadas para la elaboración de los cilindros (30x15cm):



MEZCLA N°1			
PIEDRA	MORTERO		
50%	50%		
DOSIFICACIÓN 	ARENA	CEMENTANTE	
	1	3	
	-----	CAL	CEMENTO
		60%	40%

Tabla 22: Dosificación de H° Ciclópeo 1:3 (60% Cal-40% Cem)

MEZCLA N°2			
PIEDRA	MORTERO		
50%	50%		
DOSIFICACIÓN 	ARENA	CEMENTANTE	
	1	2	
	-----	CAL	CEMENTO
		60%	40%

Tabla 23: Dosificación de H° Ciclópeo 1:2 (60% Cal-40% Cem)

MEZCLA N°3			
PIEDRA	MORTERO		
50%	50%		
DOSIFICACIÓN 	ARENA	CEMENTANTE	
	1	3	
	-----	CAL	CEMENTO
		50%	50%

Tabla 24: Dosificación de H° Ciclópeo 1:3 (50% Cal-50% Cem)

MEZCLA N°4			
PIEDRA	MORTERO		
50%	50%		
DOSIFICACIÓN 	ARENA	CEMENTANTE	
	1	2	
	-----	CAL	CEMENTO
		50%	50%

Tabla 25: Dosificación de H° Ciclópeo 1:2 (50% Cal-50% Cem)

MEZCLA N°5			
PIEDRA	MORTERO		
50%	50%		
DOSIFICACIÓN 	ARENA	CEMENTANTE	
	1	3	
	-----	CAL	CEMENTO
		40%	60%

Tabla 26: Dosificación de H° Ciclópeo 1:3 (40% Cal-60% Cem)

MEZCLA N°6			
PIEDRA	MORTERO		
50%	50%		
DOSIFICACIÓN 	ARENA	CEMENTANTE	
	1	2	
	-----	CAL	CEMENTO
		40%	60%

Tabla 27: Dosificación de H° Ciclópeo 1:2 (40% Cal-60% Cem)

En base a estos ensayos se pudo alcanzar una resistencia de 107.8 kg/cm² que corresponde a cilindros con 42 días de edad que pertenecen a la mezcla N°6, cuya curva esfuerzo-deformación se muestra a continuación:

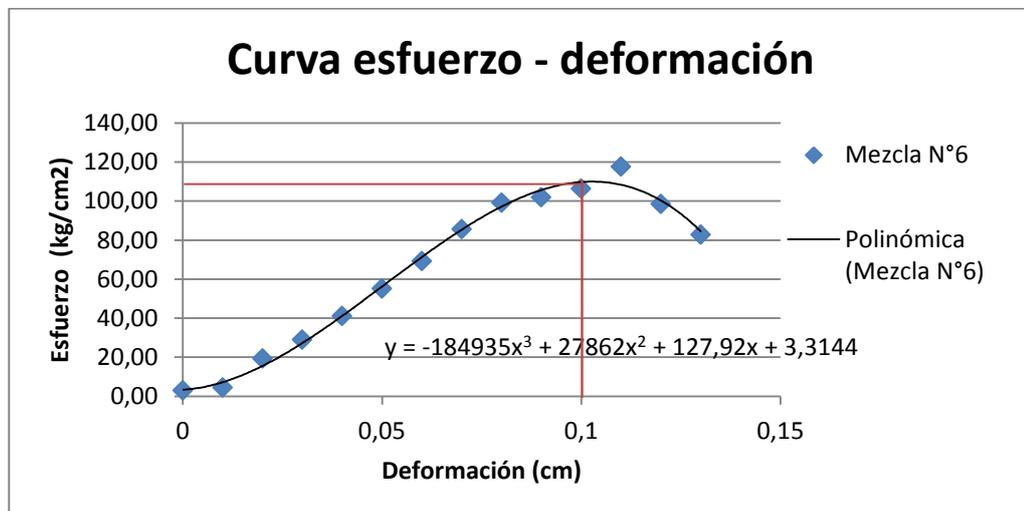


Ilustración 33: Curva esfuerzo-deformación

3.7.2 Ensayo del módulo de Poisson: El coeficiente de Poisson es la relación entre las deformaciones transversales y longitudinales que se producen en el espécimen sometido a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico. Las probetas elaboradas para este ensayo están constituidas por mortero de cal-cemento-arena y árido grueso (grava). Según inspecciones e información recopilada referente a las dimensiones de los cimientos, y con el objeto de realizar un ensayo que dé como resultado características similares respecto a la resistencia del hormigón ciclópeo, fue necesaria la ejecución de probetas llevadas a una escala de laboratorio.

Para determinar el módulo de Poisson se utilizaron cinco muestras con el fin de obtener un valor promedio, así como también es importante considerar un valor medio tanto de las alturas como de los diámetros en

los cilindros ensayados. A continuación se muestra en la fotografía el equipo requerido para esta prueba:

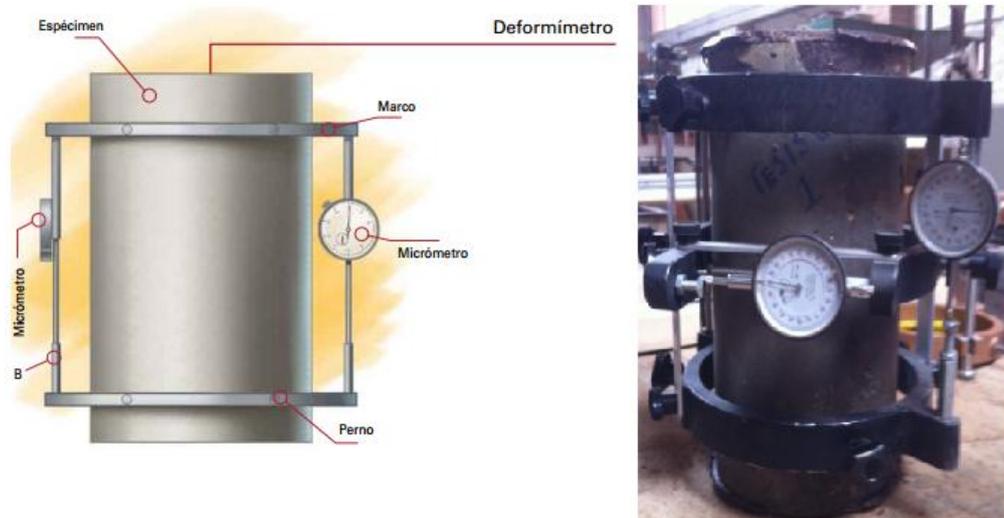


Ilustración 34: Muestra para el ensayo del módulo de Poisson

3.7.2.1 Objetivo del Ensayo: El objetivo es determinar experimentalmente la relación entre la deformación lateral y la deformación axial de una probeta aplicando carga axial.

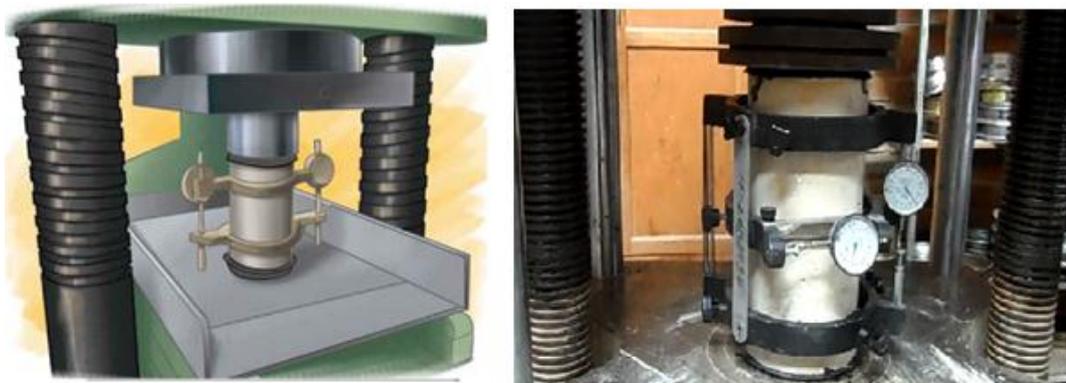


Ilustración 35: Ensayo módulo de Poisson

3.7.2.2 Resultados de los Ensayos: Previo al ensayo para la obtención del módulo de Poisson, se realizaron varios ensayos de compresión simple empleando las muestras con diferente dosificación antes mencionadas para el ensayo de compresión. Las probetas seleccionadas para determinar el módulo de Poisson fueron las que alcanzaron la mayor resistencia según su dosificación indicada. Los datos y resultados obtenidos de ésta práctica se detallan a continuación:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_1 - 0.000050} = \frac{44,73 - 19,60}{(0,17 - 0,05)/1000} = 209445,24 \text{ kg/cm}^2$$



Dónde:

E: módulo de elasticidad secante, en kg/cm²

S₂: esfuerzo correspondiente al 40% de la resistencia, en kg/cm²

ε₁: deformación unitaria longitudinal, producida en el esfuerzo S₂

La relación de Piosson redondeando al más próximo 0,01, se obtiene:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_1 - 0,00005} = \frac{0,03 - 0,01}{0,17 - 0,05} = 0,19$$

Dónde:

μ: Relación de Poisson

ε_{t2}: deformación unitaria trasversal, a mitad de la altura del espécimen, producida por el esfuerzo S₂

ε_{t1}: deformación unitaria trasversal, a mitad de la altura del espécimen, producida por el esfuerzo S₁



MODULO DE ELASTICIDAD H. CICLOPEO			
Def. Vertical	Def. Horizontal	Carga	Esfuerzo
mm	mm	kg	Kg/cm ²
0,00	0,00	0	0,00
0,01	0,00	802	4,54
0,02	0,00	1558	8,82
0,03	0,00	2402	13,59
0,04	0,01	2898	16,40
0,05	0,01	3463	19,60
0,06	0,01	3957	22,39
0,07	0,01	4470	25,30
0,08	0,01	4988	28,23
0,09	0,01	5229	29,59
0,10	0,02	5425	30,70
0,11	0,02	6281	35,54
0,12	0,02	6608	37,39
0,13	0,02	7029	39,78
0,14	0,03	7061	39,96
0,15	0,033	7467	42,25
0,16	0,037	7665	43,38
0,17	0,030	7905	44,73
0,18	0,043	8229	46,57
0,19	0,048	8419	47,64
0,2	0,054	8685	49,15
0,21	0,072	8977	50,80
0,22	0,082	9114	51,57
0,23	0,096	9360	52,97
0,24	0,12	9800	55,46

Tabla 28: Módulo Elástico del H.

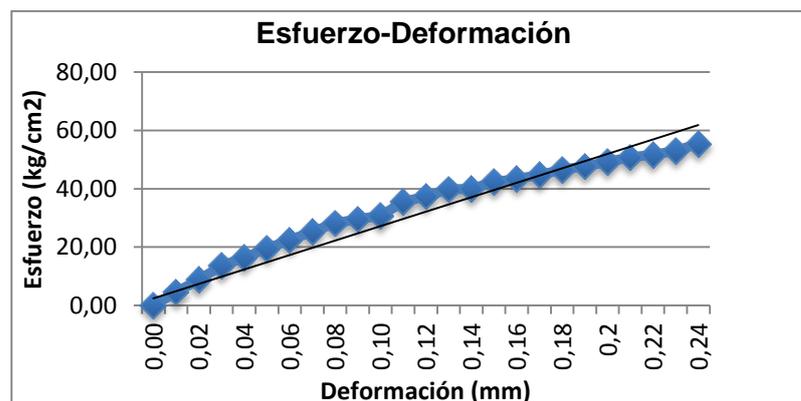


Ilustración 36: Curva esfuerzo-deformación Poisson

CAPÍTULO 4

4.1 RECOPIACIÓN DE DAÑOS Y PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES

4.1.1 Definición de Patología Estructural: Dentro de la definición de patología estructural se tienen tres conceptos claves:

- Identificar cual es el comportamiento defectuoso (enfermedad)
- Realizar un investigación de las posibles causas de ese comportamiento irregular (Diagnóstico)
- Plantear acciones inmediatas (Tratamiento)

Todo esto con el fin de garantizar las condiciones necesarias de seguridad que pueda ofrecer una edificación en función de su estructura.

La aparición de patologías de diferente naturaleza obliga la presencia en la estructura de uno o varios profesionales capacitados para tales fines con suficiente criterio para evaluar y diagnosticar el origen del daño, es por ésta razón que surge la necesidad de realizar diferentes tipos de inspecciones en las distintas zonas que comprende la estructura, es decir, en su parte interna y externa. Dependiendo del alcance que se desee señalar se pueden presentar éstas etapas en la inspección: inspección preliminar, inspección detallada, inspección especial e inspección rutinaria o de mantenimiento.

La Catedral Nueva de Cuenca es una estructura bastante antigua, los materiales usados y el método de construcción corresponden a diferentes épocas, debido a que su proceso constructivo duró alrededor de un siglo, es por ello que para realizar una futura intervención se ha visto la necesidad de llevar a cabo un levantamiento de daños y patologías, que faciliten información para determinar el origen y los efectos del deterioro que sufre la estructura.

El primer paso es efectuar una inspección visual, que permita ir detectando los diferentes estados en los cuales se encuentran los elementos estructurales que forman parte de la edificación.

La Catedral está constituida por una gran masa constructiva de ladrillos, posee grandes dimensiones 104.85 m en sentido longitudinal por 44.4 m en sentido transversal, pudiendo ser visible desde diferentes sectores de la ciudad, su orientación es Sudeste-Noroeste. Los espacios de la Catedral se desarrollan en cuatro niveles: cripta, planta baja, planta alta y planta de cubiertas y en su fachada se destacan sus dos torres gemelas (43 m) (Arq. Wilsón Pacurucu). Para realizar la inspección se dividió a la estructura de la siguiente manera:

- Nave Central: La de mayor altura, cubriendo la nave central se encuentran 6 cúpulas, 3 bajas semiesféricas y 3 alta peraltadas
- Nave Lateral Norte: Constituida por 5 bóvedas de cañón

- Nave Lateral Sur: Constituida por 5 bóvedas de cañón.

En la fachada posterior se destaca el ábside o cabecera (altar mayor), su planta es circular cubierta por una semi-bóveda, este elemento cilíndrico se encuentra adosado al cuerpo de la edificación. (Pablo Cordero, 1995) (Foerster, 1953) (G.) (Valdez) (M., 2001)

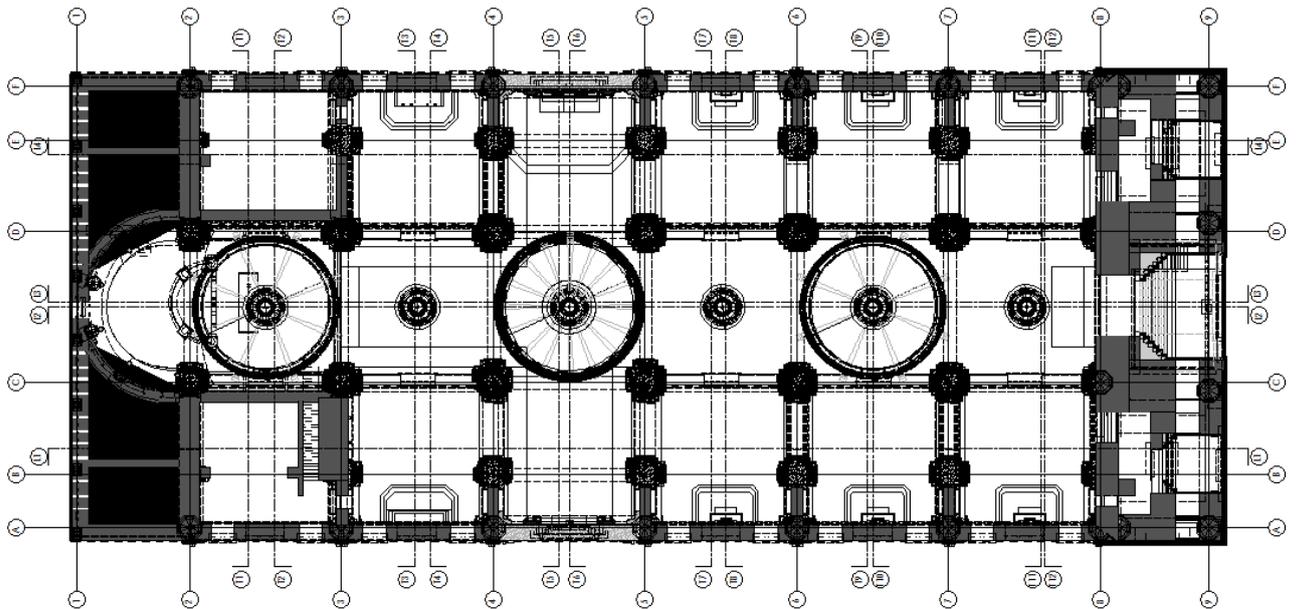


Ilustración 37: Planta de la Catedral Nueva

La metodología aplicada para la inspección preliminar se basó en varias visitas al interior y exterior de la Catedral, en cada una de ellas se fue observando los diferentes problemas que presenta la construcción, dentro de los cuales se mencionan los siguientes:

- Fisuras localizadas en la estructura
- Desprendimiento de enlucido
- Humedad en paredes, partes superiores de los domos, y parte de la cripta
- Presencia de vegetación al exterior de los domos

Como un dato importante en esta parte de la inspección fue la identificación de las columnas que están recubiertas con mármol y las que se han enlucido y pintado de manera que se asemeja al mármol.

Teniendo en cuenta que los daños observados requieren un análisis que señale cualitativa y cuantitativamente el estado en que se encuentran; se realizó una inspección detallada.

Las observaciones visuales del levantamiento de daños, cubre un conjunto de acciones que fueron seguidos en forma secuencial y programada, las cuales se detalla a continuación:

- Investigación documental
- Inspección visual detallada
- Levantamiento gráfico de daños
- Recuento fotográfico
- Planeamiento y definición de ensayos
- Diagnóstico de Patologías
- Informe de la inspección

Parte de la documentación requerida para este propósito fue encontrada en la Curia Arquidiocesana de Cuenca, dentro de los cuales tenemos:

- Planos originales de los diseños de la Catedral realizados por el Hno. Juan Stiehle
- Recopilación del estudio realizado por el Arq. Gastón Ramírez para la culminación de la Torres de la Catedral.
- Fotografías de la construcción en diferentes épocas
- Recopilación de notas y recortes de periódicos que contienen información sobre la construcción y la historia de su diseñador. Archivo digital realizado por el Arq. Gastón Ramírez entregado a la Curia.
- Libros de obra que contienen listas de materiales solicitados para la construcción.
- Adicional a la información encontrada en la curia, en una visita al archivo de los Padres Redentoristas se encontró un “Manual de Obras y Diseños” del Hermano Juan Stiehle. Ver el Anexo 3

Existen datos significativos de estudios de suelos realizados hace algunos años para el Proyecto de Culminación de las Torres de la Catedral a cargo del Arq. Gastón Ramírez, en los cuales se muestran valores de resistencia, carga portante y un perfil geológico del terreno de cimentación. Ver Anexo 1.

Las fotografías localizadas en diferentes documentos señalan que la construcción de la Catedral se inició desde el altar mayor en dirección hacia las torres, esto contribuye a identificar la edad de los materiales utilizados en las distintas zonas, además de permitirnos hacer una caracterización visual con un previo conocimiento de las técnicas de construcción empleadas en la época.

La siguiente etapa de la inspección tiene como objetivo realizar un inventario de los daños mediante un levantamiento, es decir, determinar el grado de deterioro del material, para lo cual fue necesario un plano de planta y de cubierta de la estructura para situar los distintos puntos donde estarían

localizados los daños; adicional a esto fue indispensable tomar anotaciones lo más precisas posibles indicando el área afectada, la longitud que cubre el daño, tamaño de las fisuras, características principales, zonas de humedades y manifestaciones externas de daño.

En esta fase es necesario seleccionar una nomenclatura y un glosario de términos que permita hacer una definición y clasificación de lo observado; en este caso se adoptó lo propuesto por el ACI 224R

Los criterios y definiciones de algunos de los términos relacionados con la calidad y durabilidad de la edificación que se usarán y definirán en el estudio son los siguientes:

4.1.1.1 Fisura: Se denomina fisura la separación incompleta entre dos o más partes con o sin espacio entre ellas. Su identificación se realizará según su dirección, ancho y profundidad utilizando los siguientes adjetivos: longitudinal, transversal, vertical, diagonal, o aleatoria. Los rangos de los anchos de acuerdo con el ACI son los siguientes:

Tipo	Medida
Fina	Menos de 1 mm
Media	Entre 1 y 2 mm
Anchas	Más de 2 mm
Grietas	Más de 3mm

4.1.1.2 Deterioros: Se denomina deterioro cualquier cambio de las propiedades físicas o químicas o ambas en la superficie o en el interior del elemento.

4.1.1.3 Desintegración: Deterioro en pequeños fragmentos o partículas por causa de algún deterioro.

4.1.1.4 Distorsión: Cualquier deformación de piezas.

4.1.1.5 Eflorescencia: Depósito de sales, usualmente blancas que se forman en las superficies.

4.1.1.6 Humedad: Debido al agua lluvia que filtra en la estructura.

Luego de tener claras éstas definiciones y como parte principal de la inspección se realizó una secuencia fotográfica acorde al levantamiento de daños, es decir, se tomo fotografías que ayuden a sustentar cada patología observada.

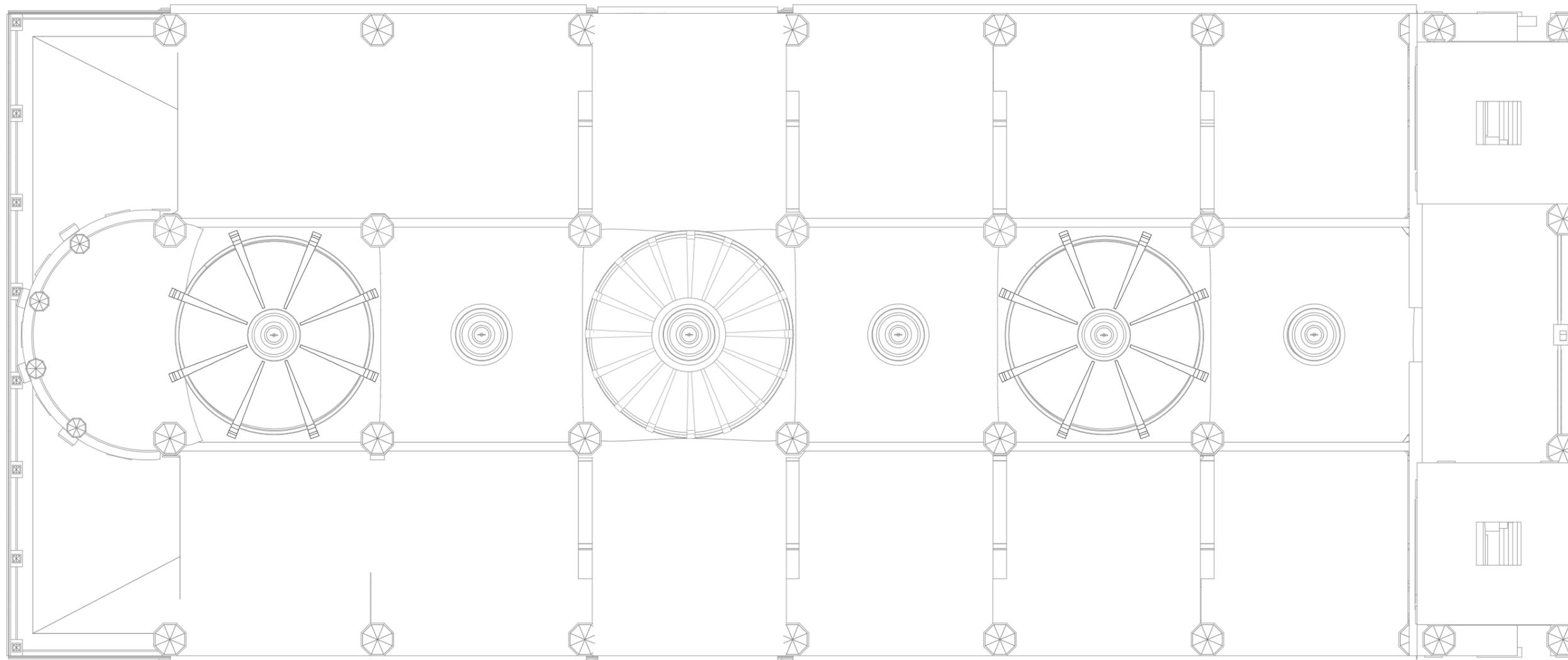
A continuación se muestran los planos que contienen cortes transversales y longitudinales de la estructura de la Catedral; en los mismos se encuentra localizadas las patologías existentes en cada sección. Los cortes fueron

tomados de los planos digitales proporcionados por la Universidad de Cuenca, trabajo que se realizó paralelamente.

Los diferentes cortes fueron obtenidos de los ejes longitudinales y transversales trazados en el plano para facilitar la localización e identificación de los daños presentes en la estructura; con este mismo objetivo se utilizó una nomenclatura descriptiva en cada fotografía según se trate de una fisura o una humedad.



PLANOS



PLANTA CUBIERTAS
N= + 51.00 m

ESCALA: 1:300

TESIS:

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LAS PATOLÓGICAS ESTRUCTURALES EN LA
NUEVA CATEDRAL INMACULADA CONCEPCIÓN DE CUENCA

CONTIENE:

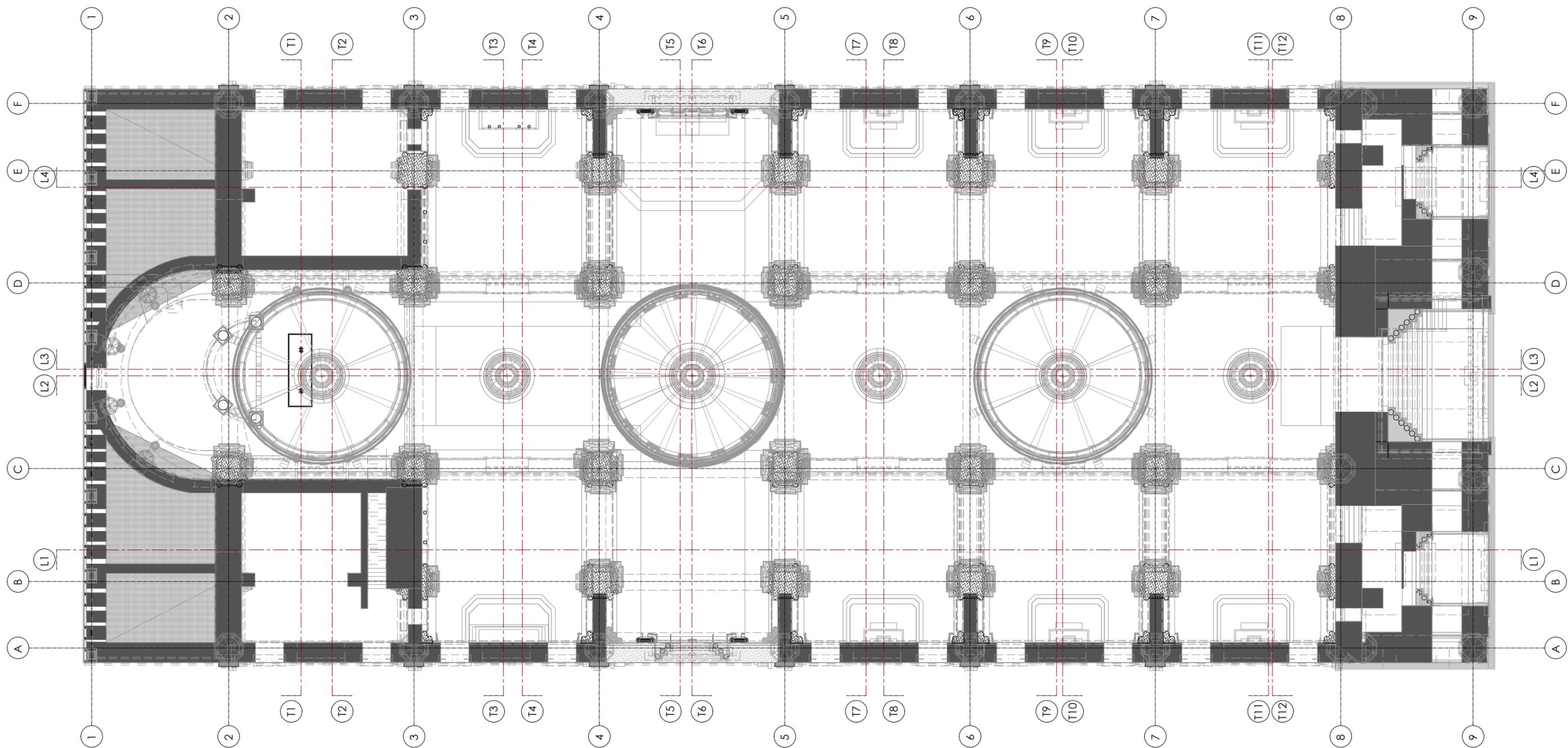
PLANTA DE CUBIERTAS

REALIZADO POR:

DAVID BRAVO C.
VERÓNICA MOLINA V.

LÁMINA:

1 / 3



PLANTA GENERAL

N= ±0.00m

ESCALA: 1:300

TESIS:

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LAS PATOLÓGICAS ESTRUCTURALES EN LA NUEVA CATEDRAL INMACULADA CONCEPCIÓN DE CUENCA

CONTIENE:

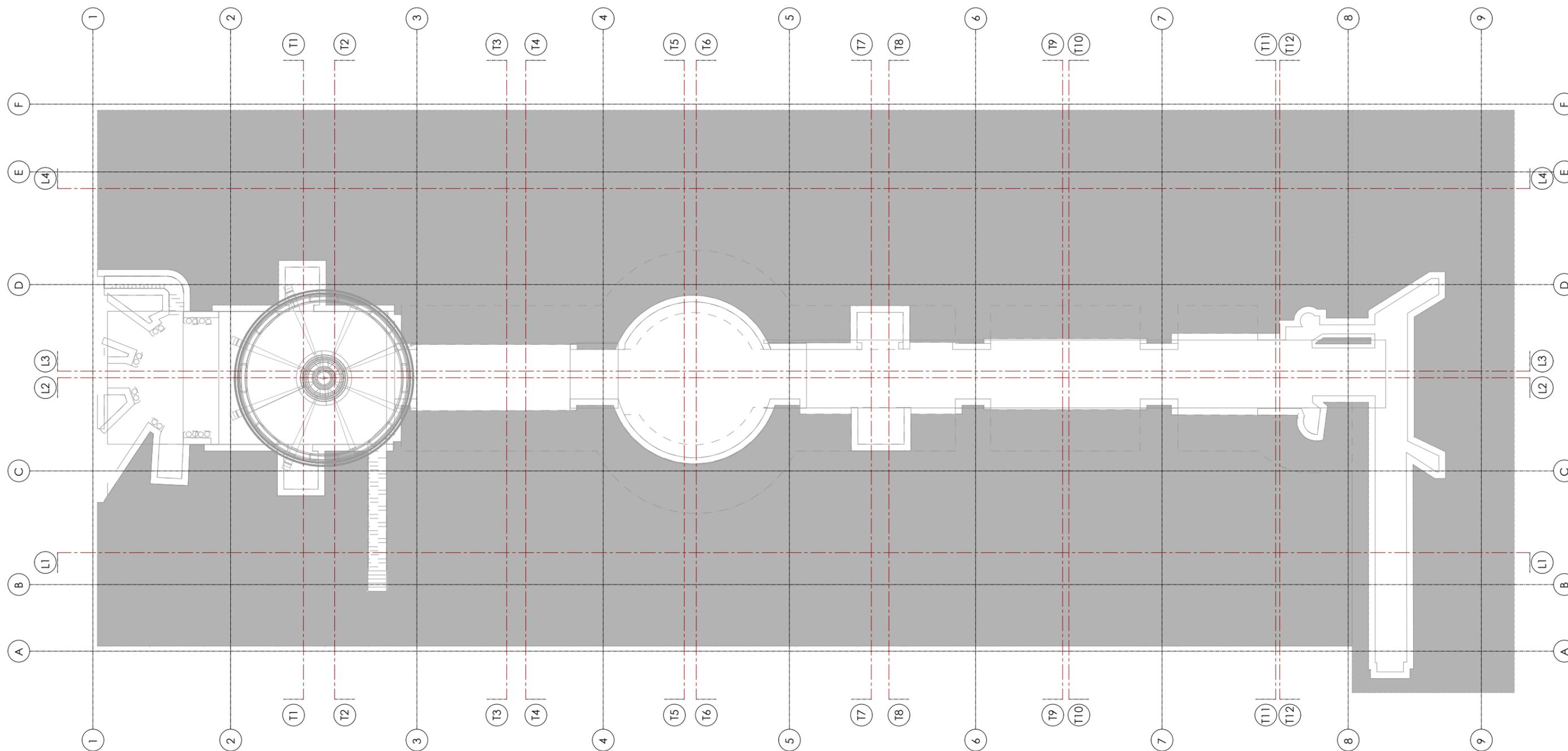
PLANO DE EJES Y CORTES

REALIZADO POR:

DAVID BRAVO C.
VERÓNICA MOLINA V.

LÁMINA:

2 / 3



PLANTA SUBSUELO

N= -4.70m

ESCALA: 1:300

TESIS:

DETERMINACIÓN DEL ORIGEN DE LAS PATOLÓGICAS ESTRUCTURALES EN LA NUEVA CATEDRAL INMACULADA CONCEPCIÓN DE CUENCA

CONTIENE:

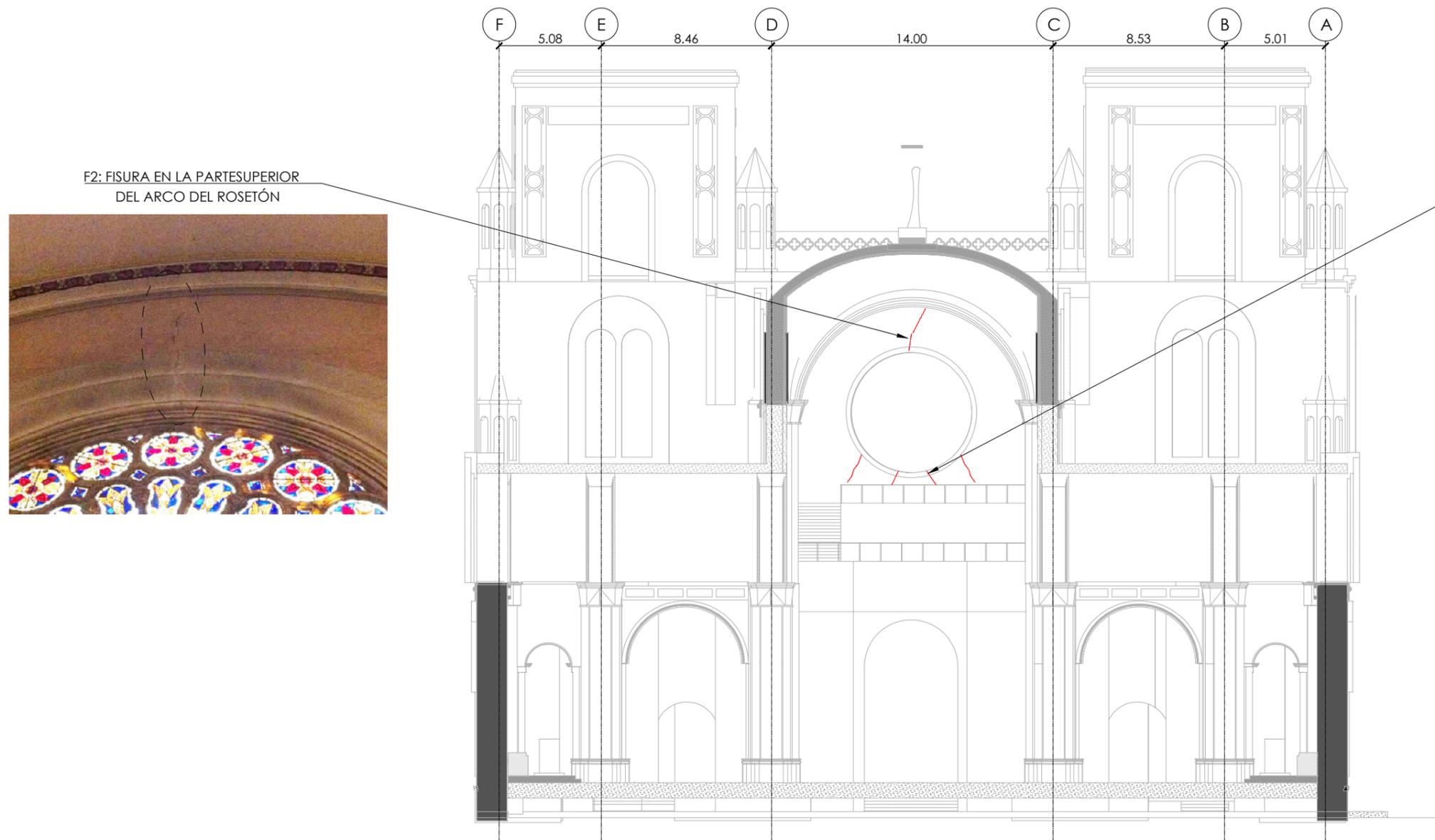
PLANO DE LA CRIPTA

REALIZADO POR:

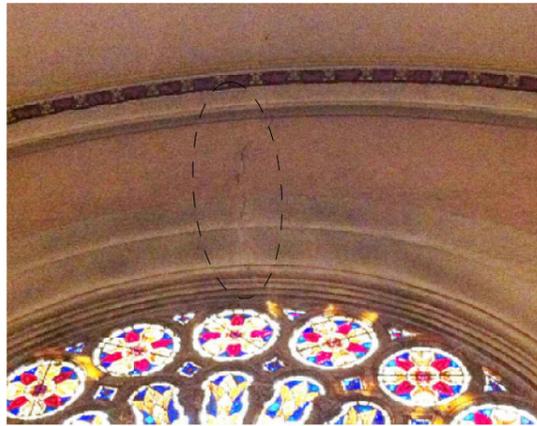
DAVID BRAVO C.
VERÓNICA MOLINA V.

LÁMINA:

3 / 3



F2: FISURA EN LA PARTESUPERIOR DEL ARCO DEL ROSETÓN

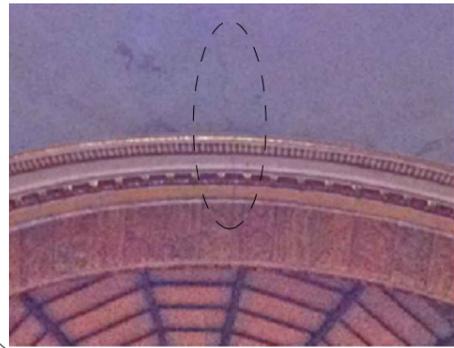


F1: FISURA EN LA PARTE INFERIOR DEL ANILLO DEL ROSETÓN



CORTE TRANSVERSAL - T12

ESCALA: 1:250



F5: FISURA BAJO EL ARCO Y CÚPULA



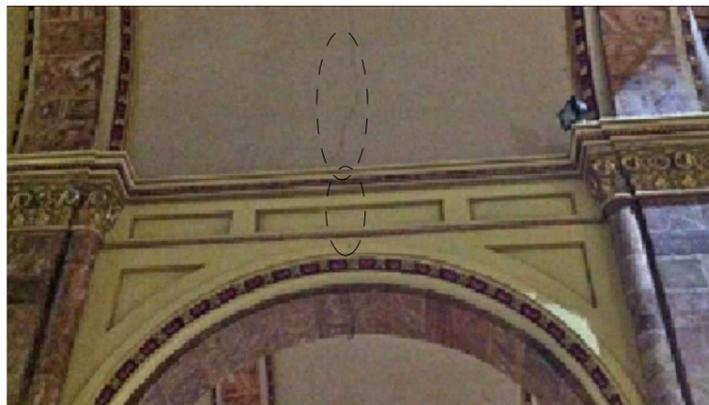
H3: HUMEDAD



H2: HUMEDAD



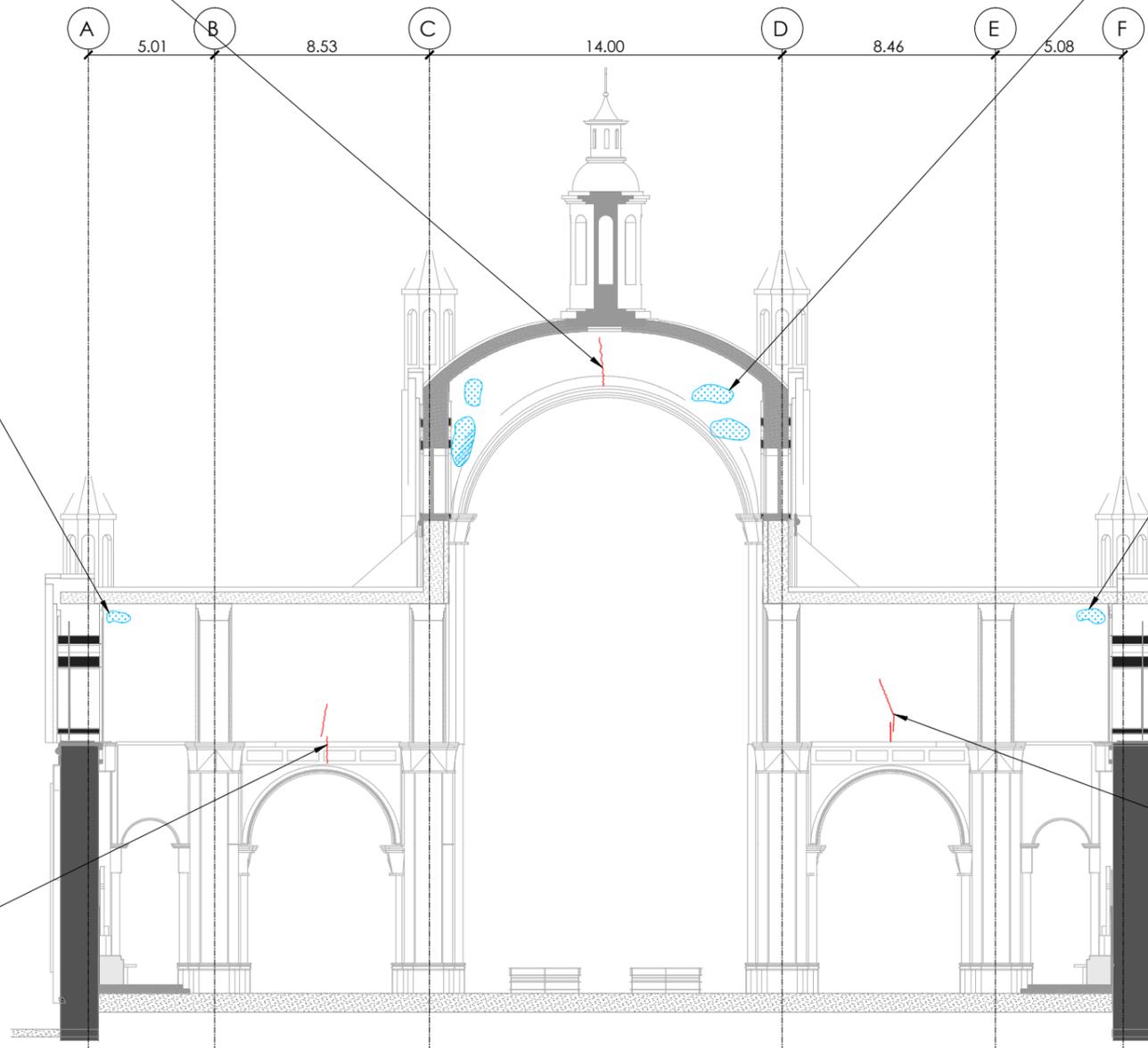
H1: HUMEDAD



F4: FISURA EN EL ARCO DER. QUE SE PROLONGA HACIA EL DOMO



F3: FISURA EN EL ARCO Y PARTE DEL DOMO



CORTE TRANSVERSAL - T11

ESCALA: 1:400

CÚPULA INTERVENIDA



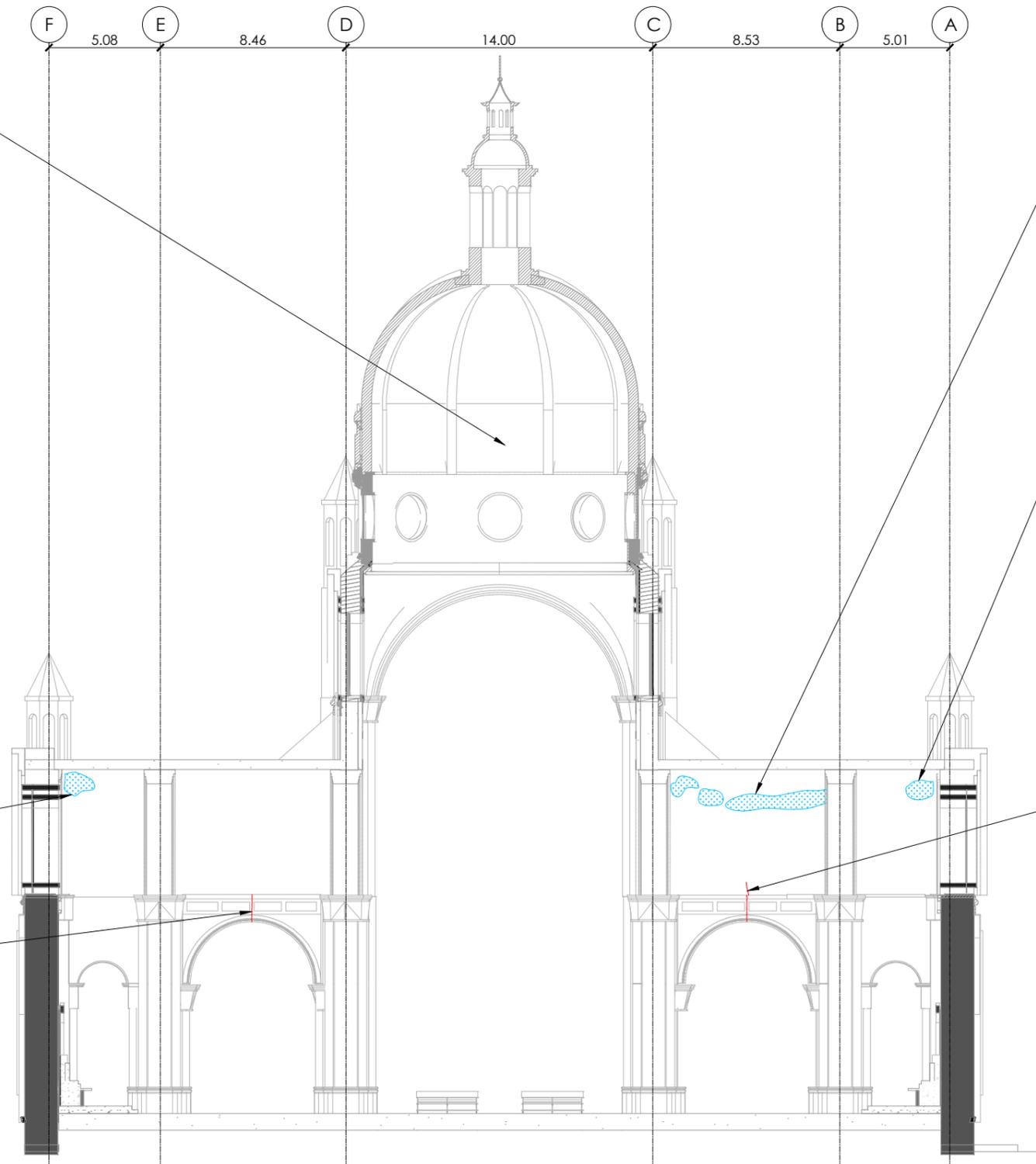
ENCOFRADO DE LA INTERVENCIÓN DE LA CÚPULA, QUE NO SE HA RETIRADO



H6: HUMEDAD



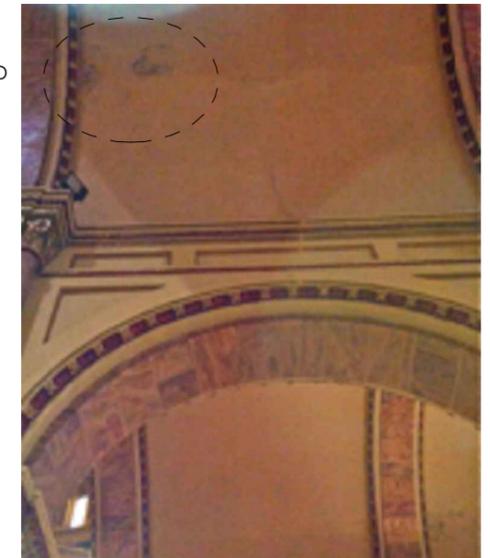
F7: FISURA QUE SE EXTIENDE HACIA EL DOMO



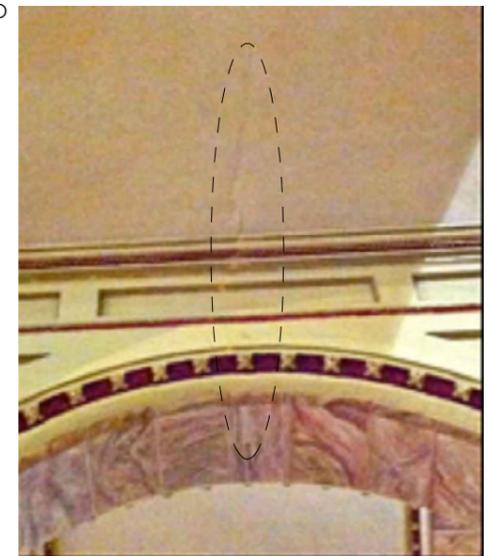
H5: HUMEDAD



H4: HUMEDAD

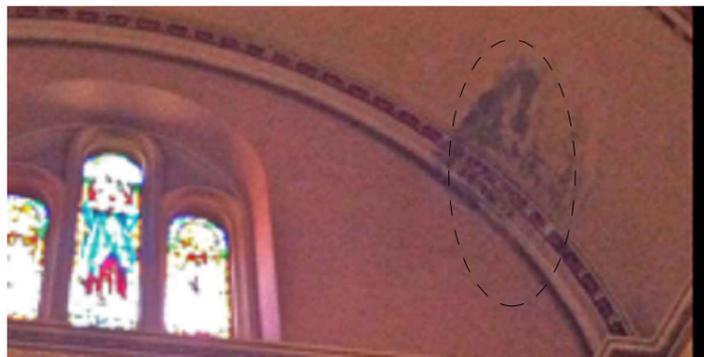
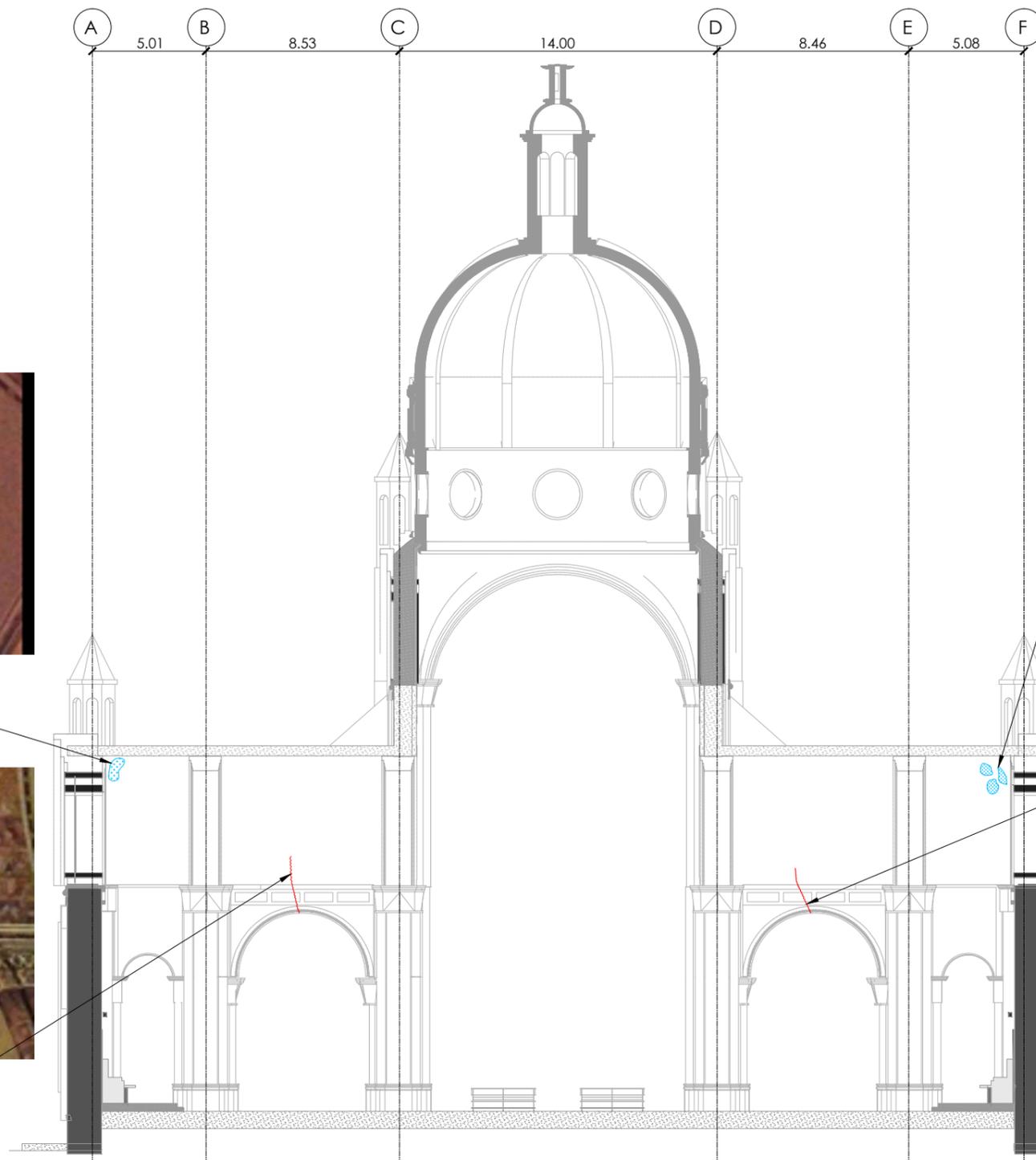


F6: FISURA EN EL ARCO Y PARTE DEL DOMO



CORTE TRANSVERSAL - T10

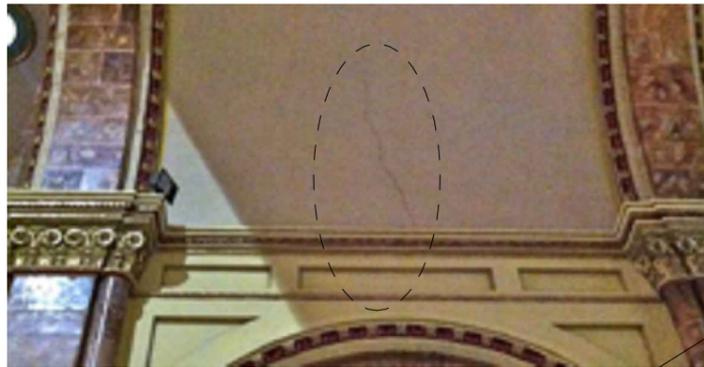
ESCALA: 1:250



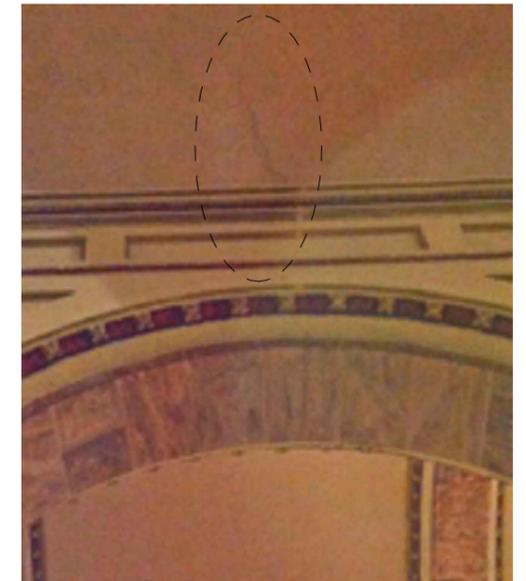
H8: HUMEDAD



H7: HUMEDAD



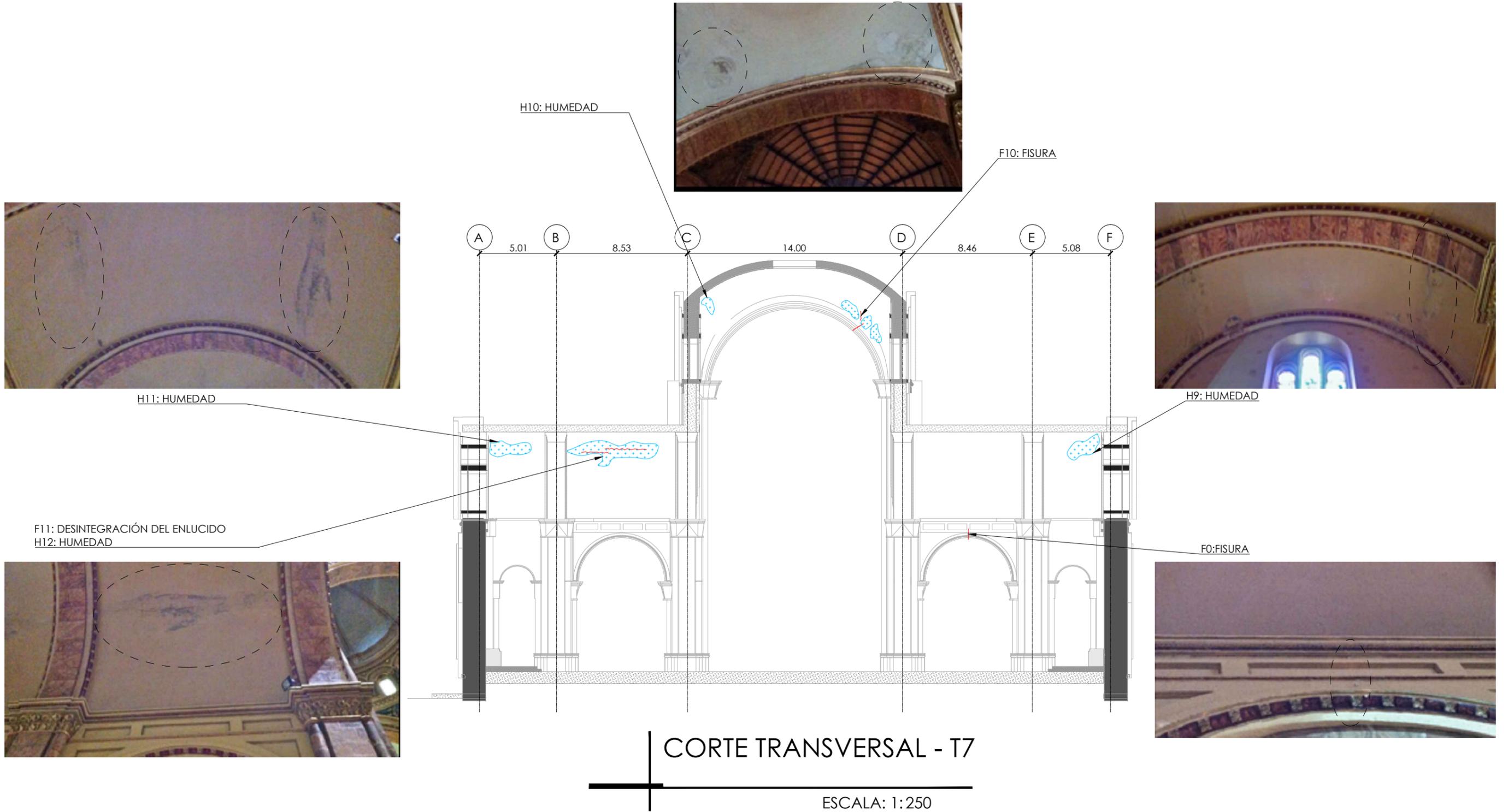
F9: FISURA



F8: FISURA

CORTE TRANSVERSAL - T9

ESCALA: 1:250



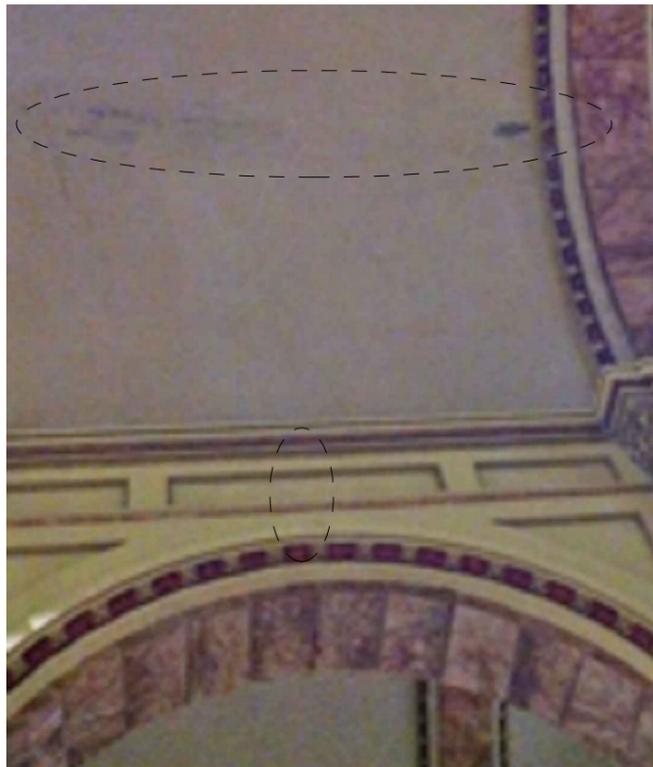
H15: HUMEDAD



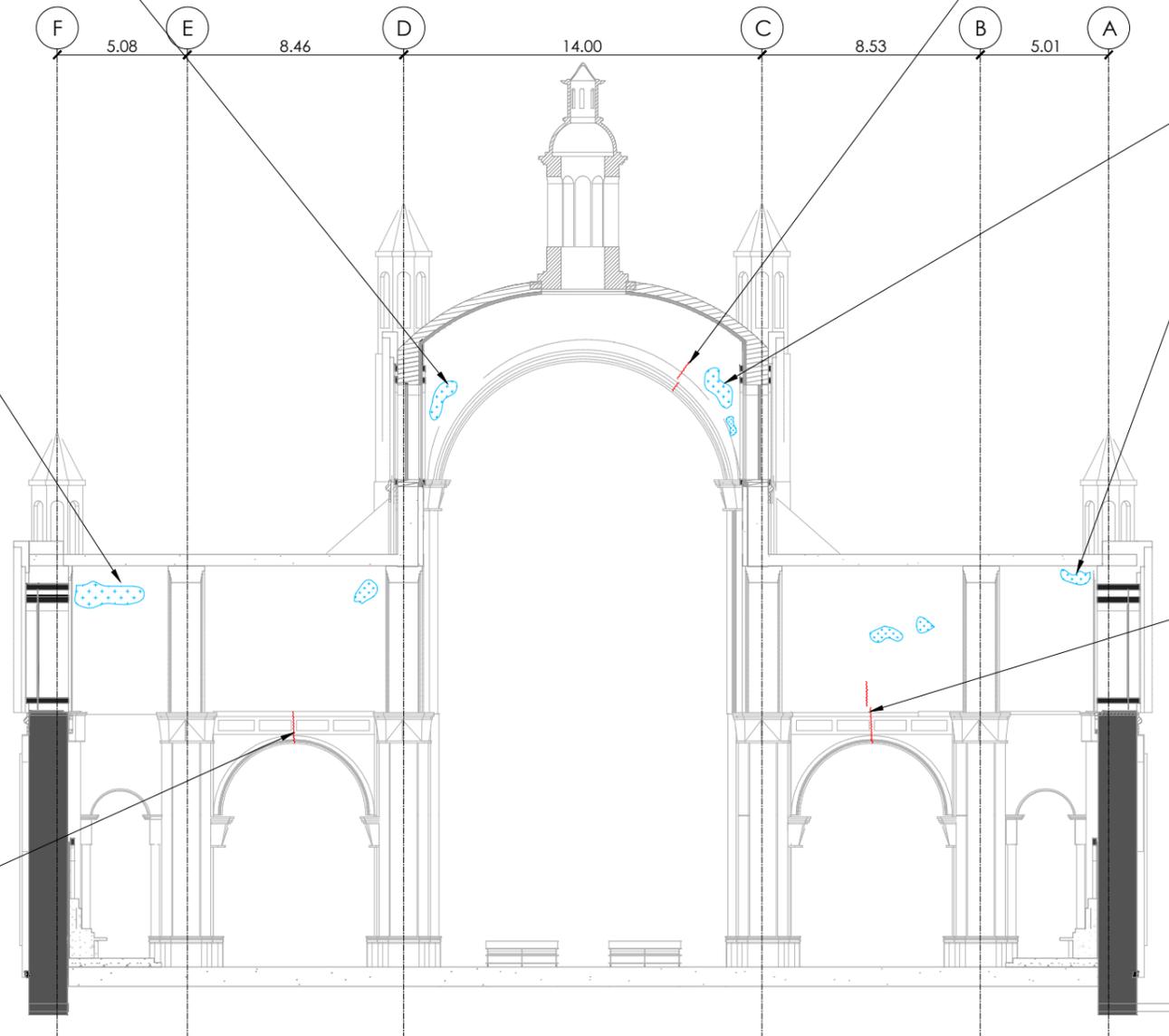
F13: FISURA SECCIONADA



H16: HUMEDAD



H14: HUMEDAD EN EL EXTREMO INFERIOR



H13: HUMEDAD



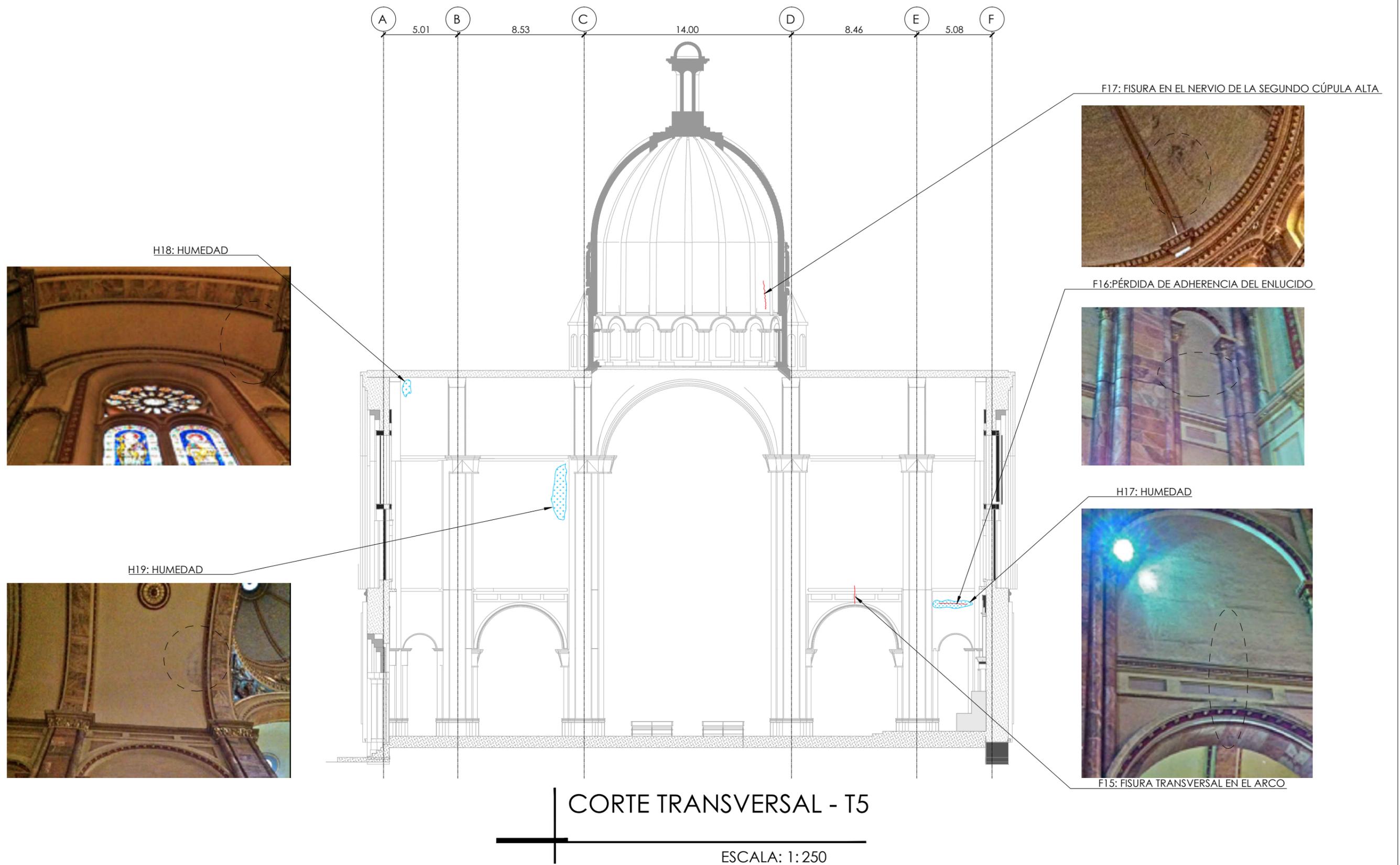
F12: FISURA SECCIONADA

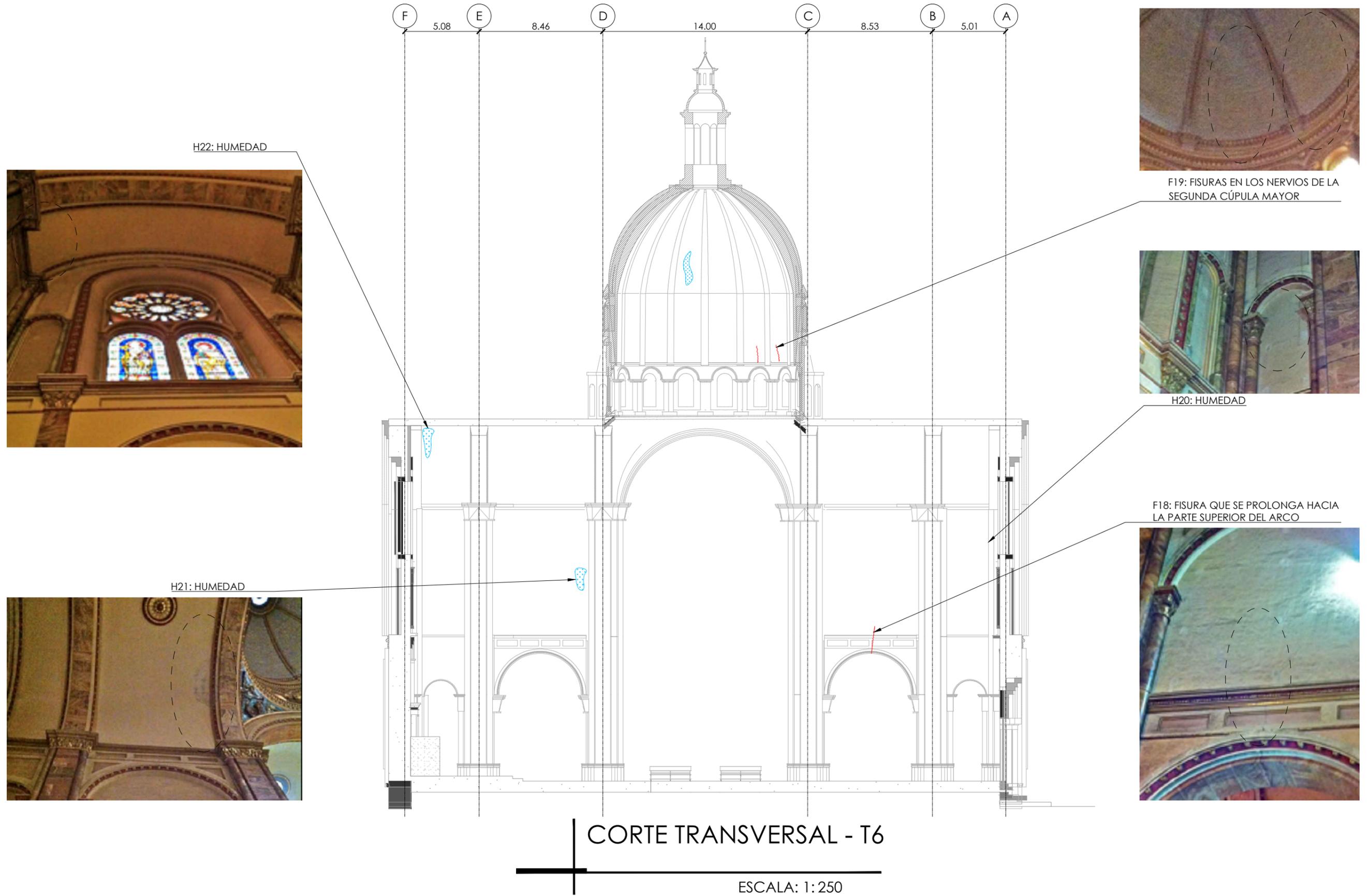


F14: FISURA

CORTE TRANSVERSAL - T8

ESCALA: 1:250







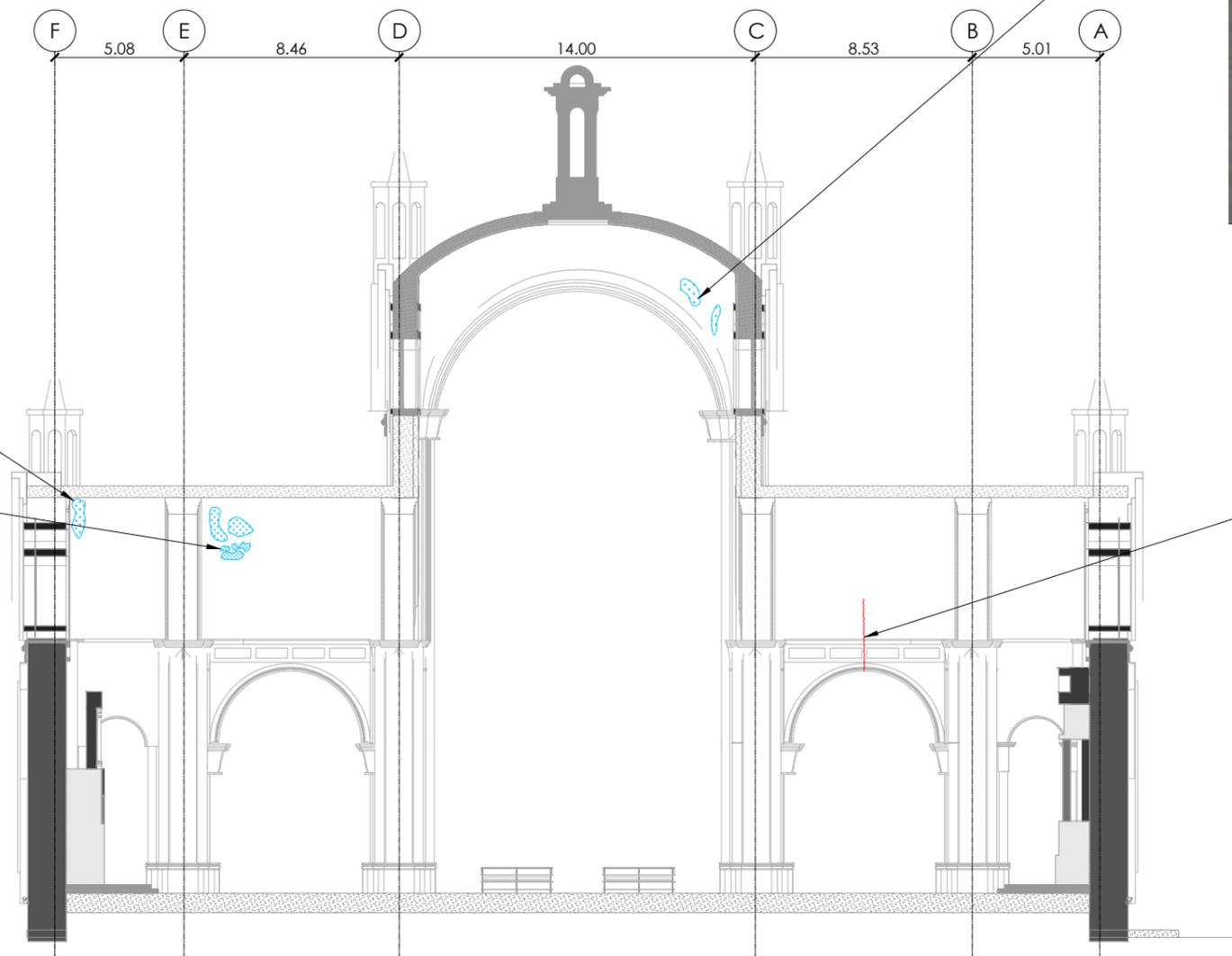
H23: HUMEDAD



H22: HUMEDAD EN LOS EXTREMOS DE LA CÚPULA



H24: HUMEDAD

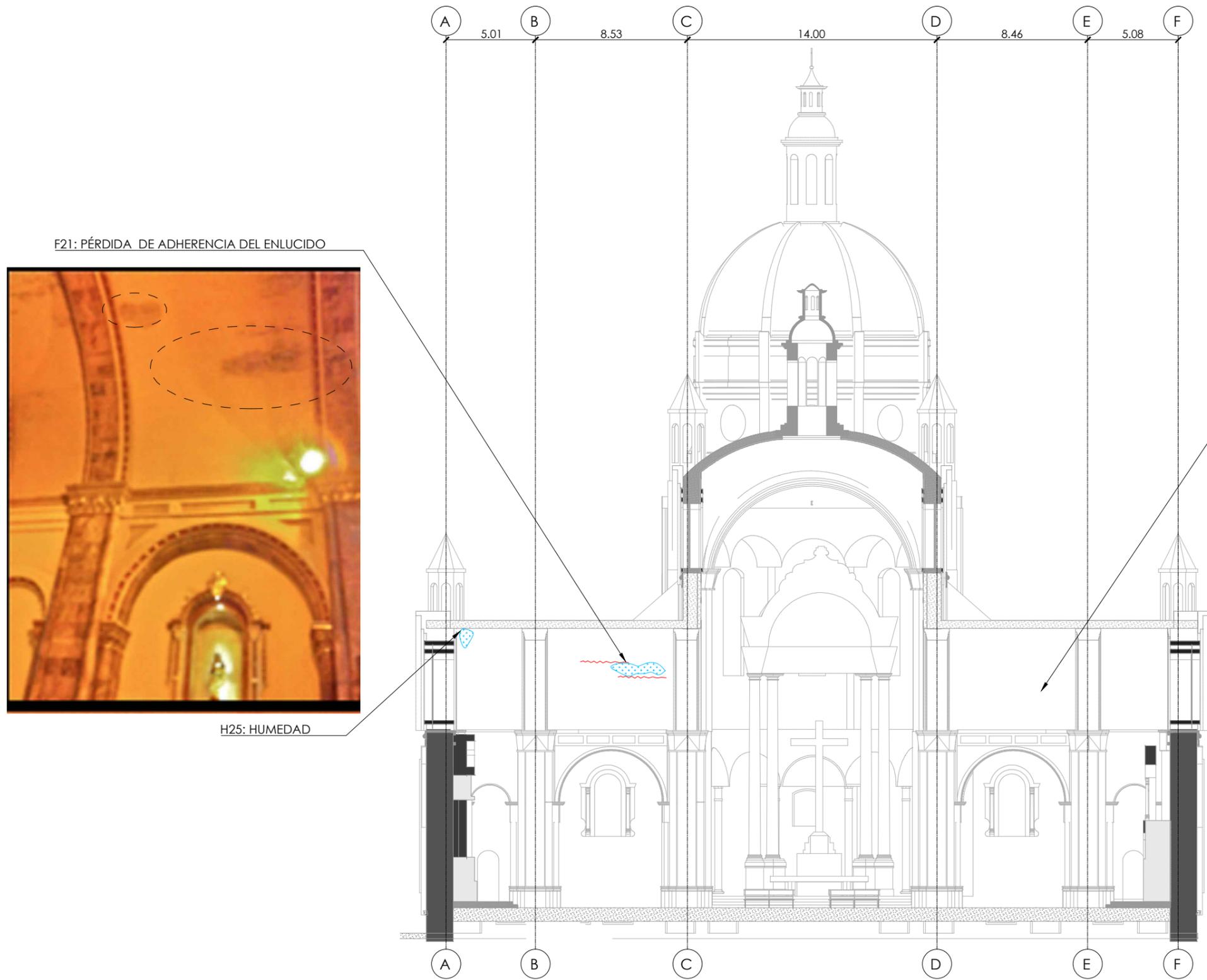


CORTE TRANSVERSAL - T4

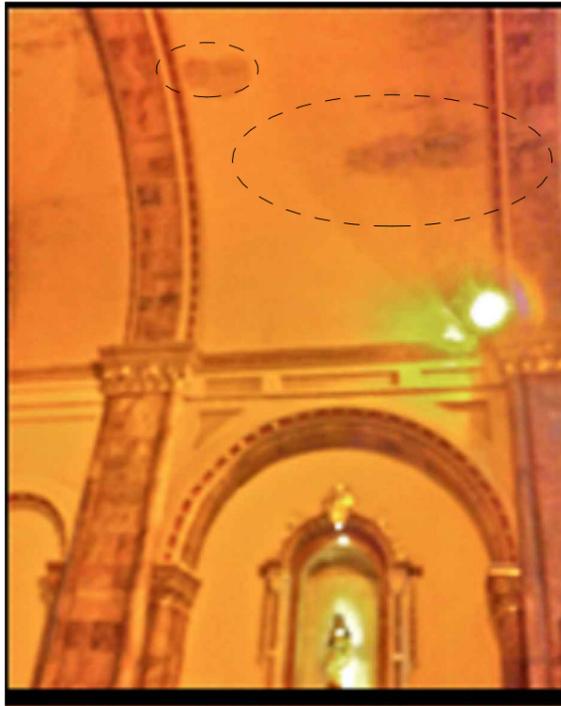
ESCALA: 1:250

F20: FISURA QUE NACE EN EL ARCO Y SE PROLONGA AL DOMO



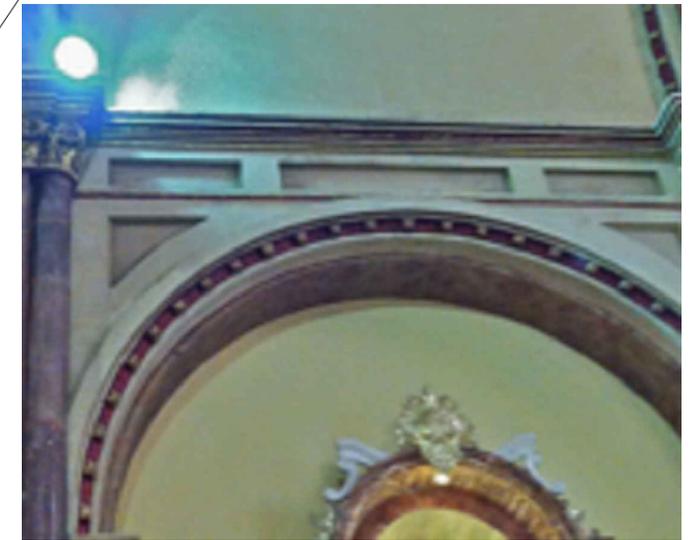


F21: PÉRDIDA DE ADHERENCIA DEL ENLUCIDO



H25: HUMEDAD

NO EXISTEN FISURAS NI HUMEDAD EN ESTA ZONA

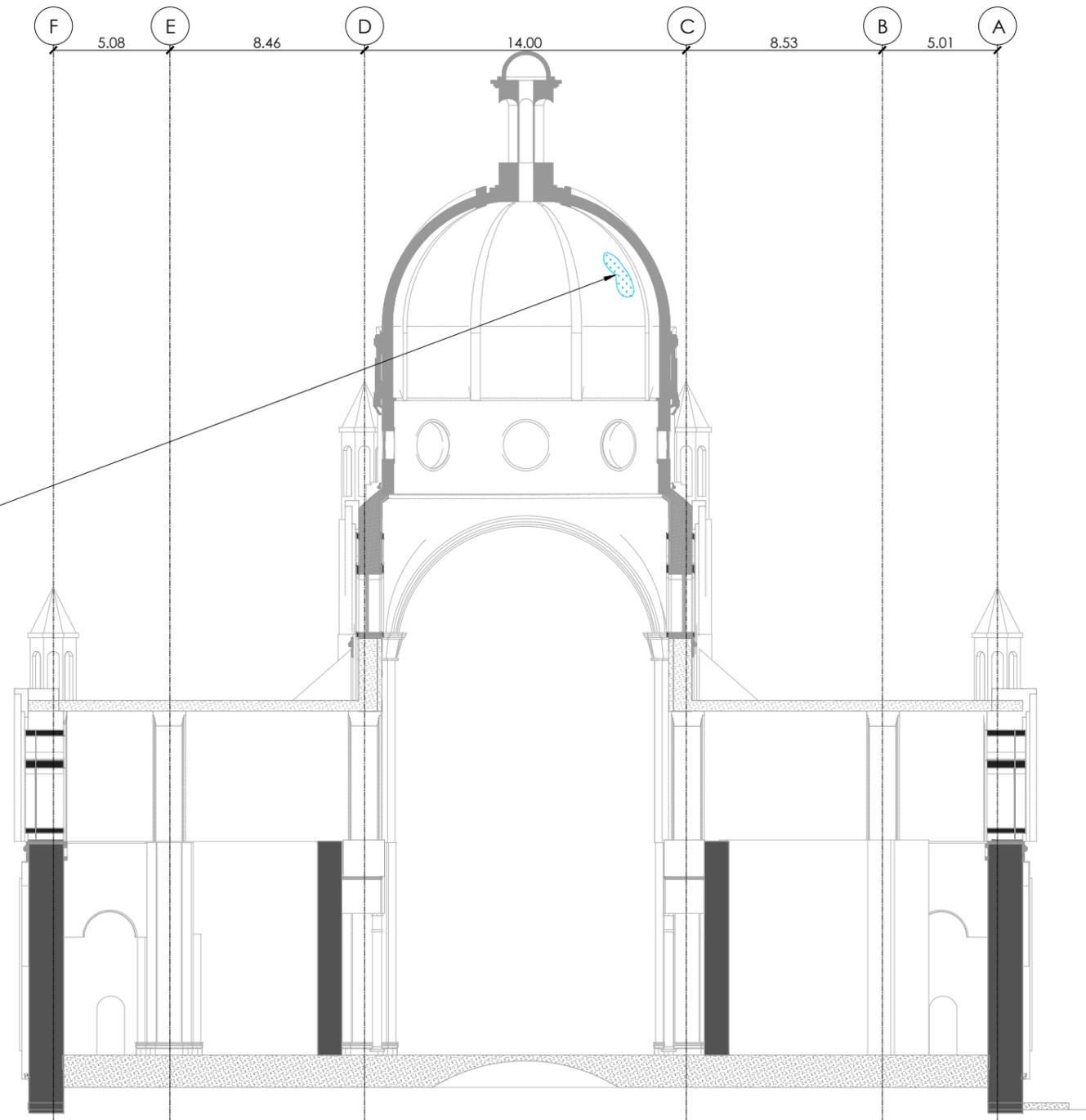


CORTE TRANSVERSAL - T3

ESCALA: 1:250

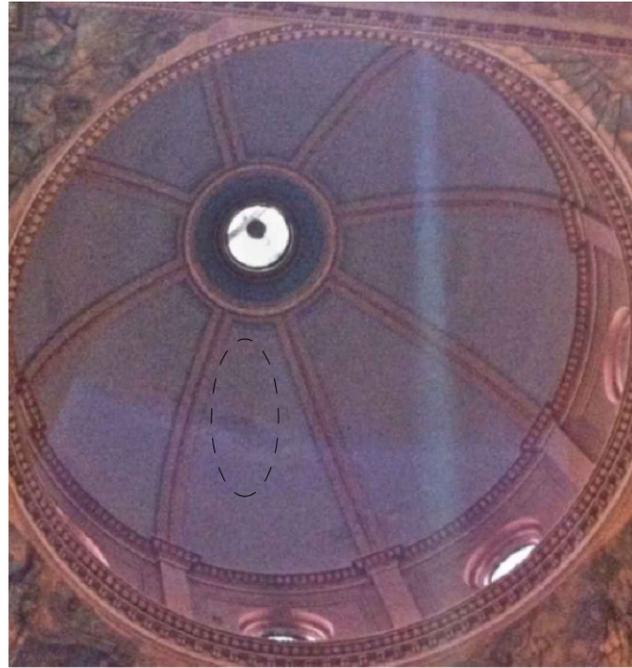


H26: HUMEDAD

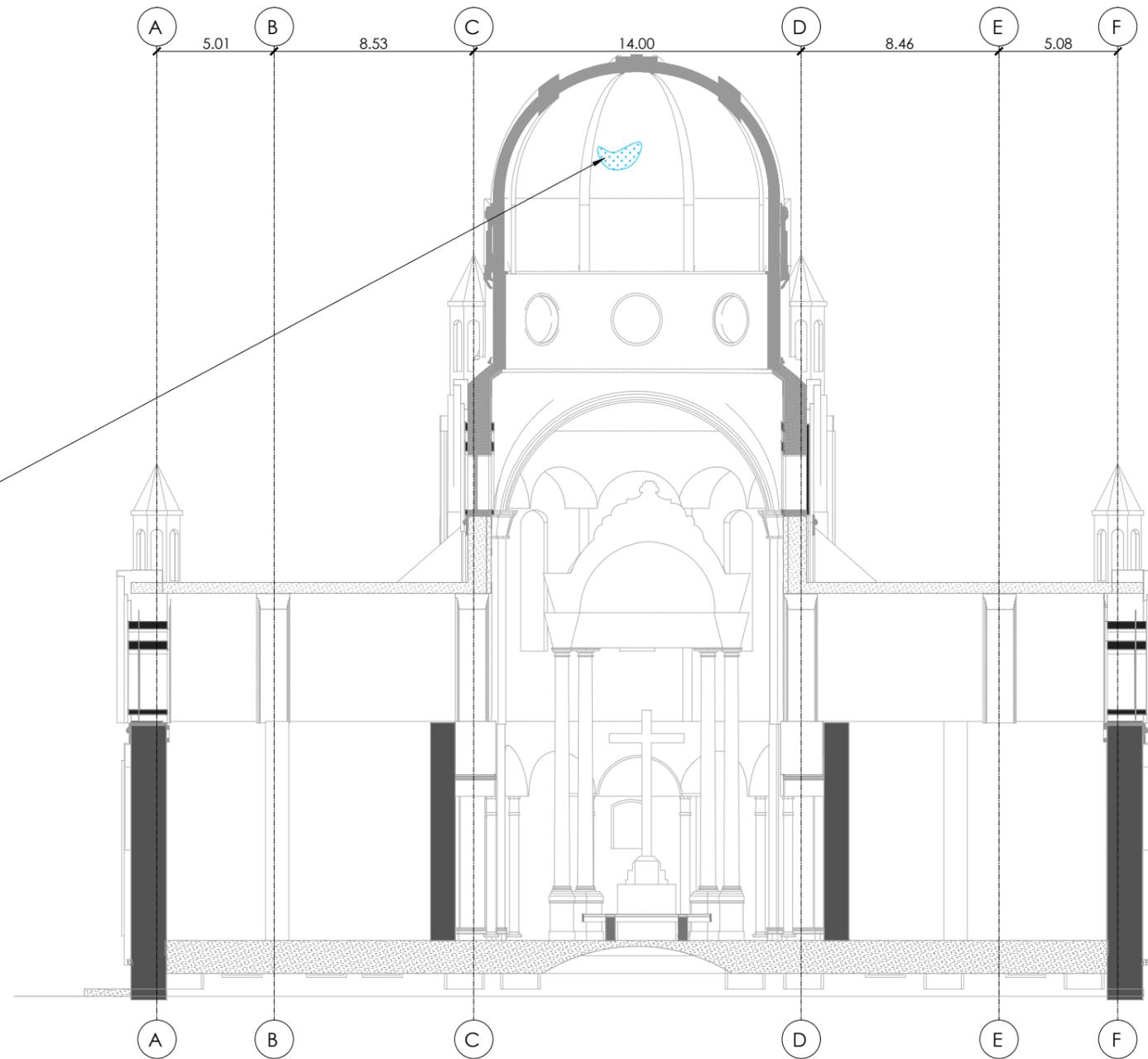


CORTE TRANSVERSAL - T2

ESCALA: 1:250

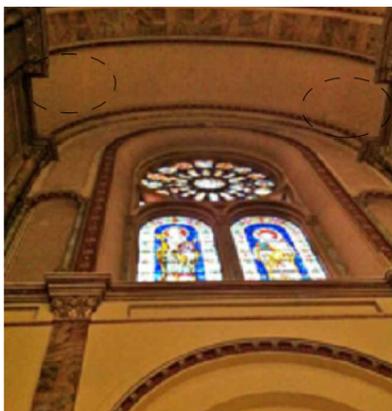
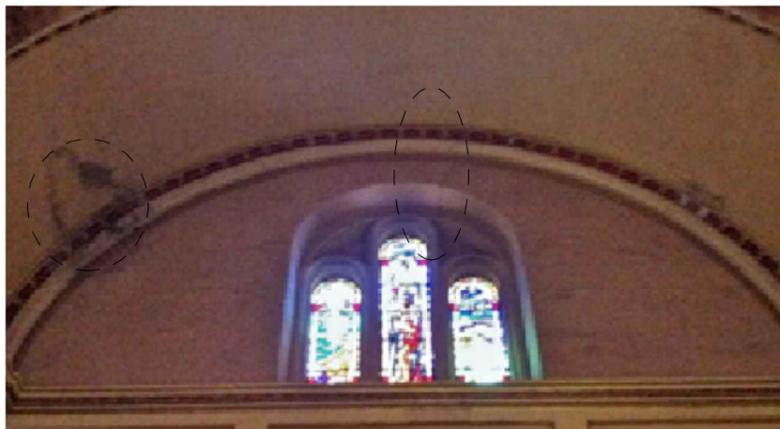


H27: HUMEDAD



CORTE TRANSVERSAL - T1

ESCALA: 1:250



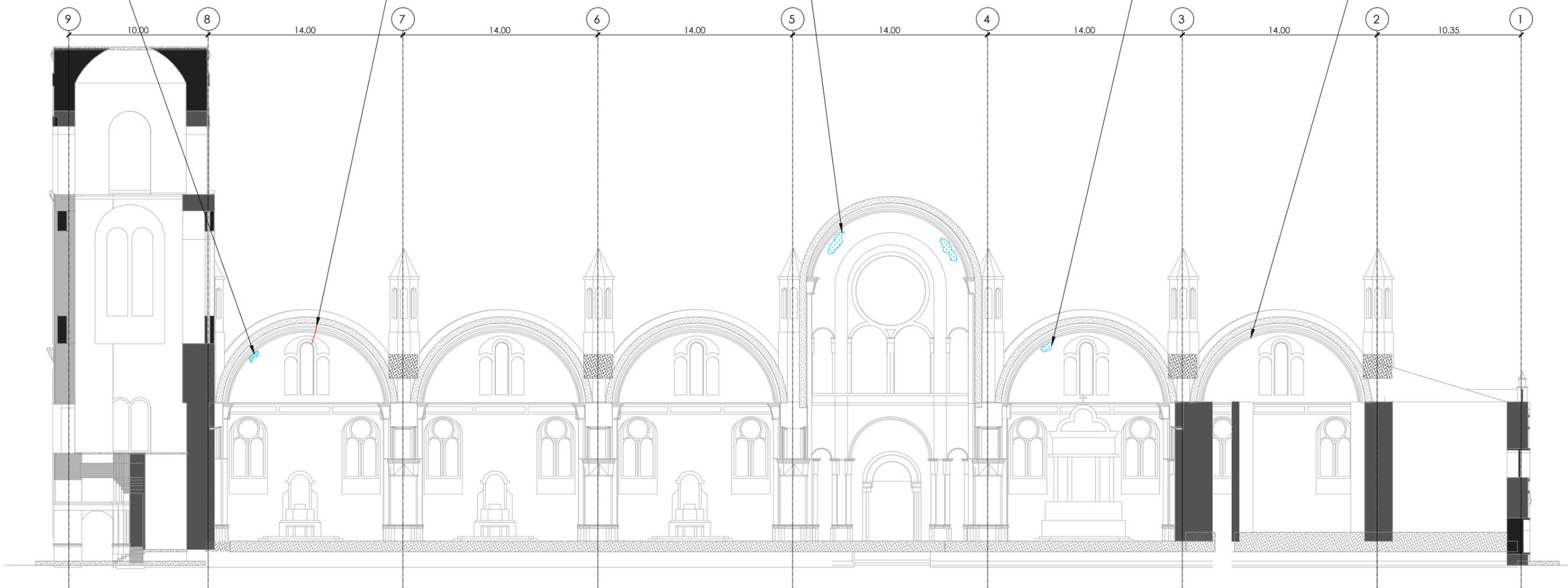
H29: HUMEDAD EN LOS EXTREMOS DEL ARCO DEL CRUCERO

HUMEDAD

H28: HUMEDAD

F22: FISURA SOBRE EL ARCO DE LA VENTANA

H30: HUMEDAD



CORTE LONGITUDINAL L1

ESCALA: 1:300

PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES EN LA CATEDRAL
LA INMACULADA CONCEPCIÓN DE CUENCA

CONTIENE:
CORTE LONGITUDINAL TORRE SUR

REALIZADO POR:
DAVID BRAVO C.
VERÓNICA MOLINA V.

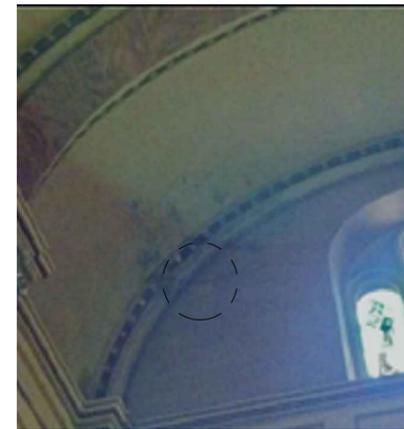
LÁMINA:
13 / 19



F23: FISURA EN EL ARCO DE LA VENTANA
H31: HUMEDAD EN AMBOS EXTREMOS



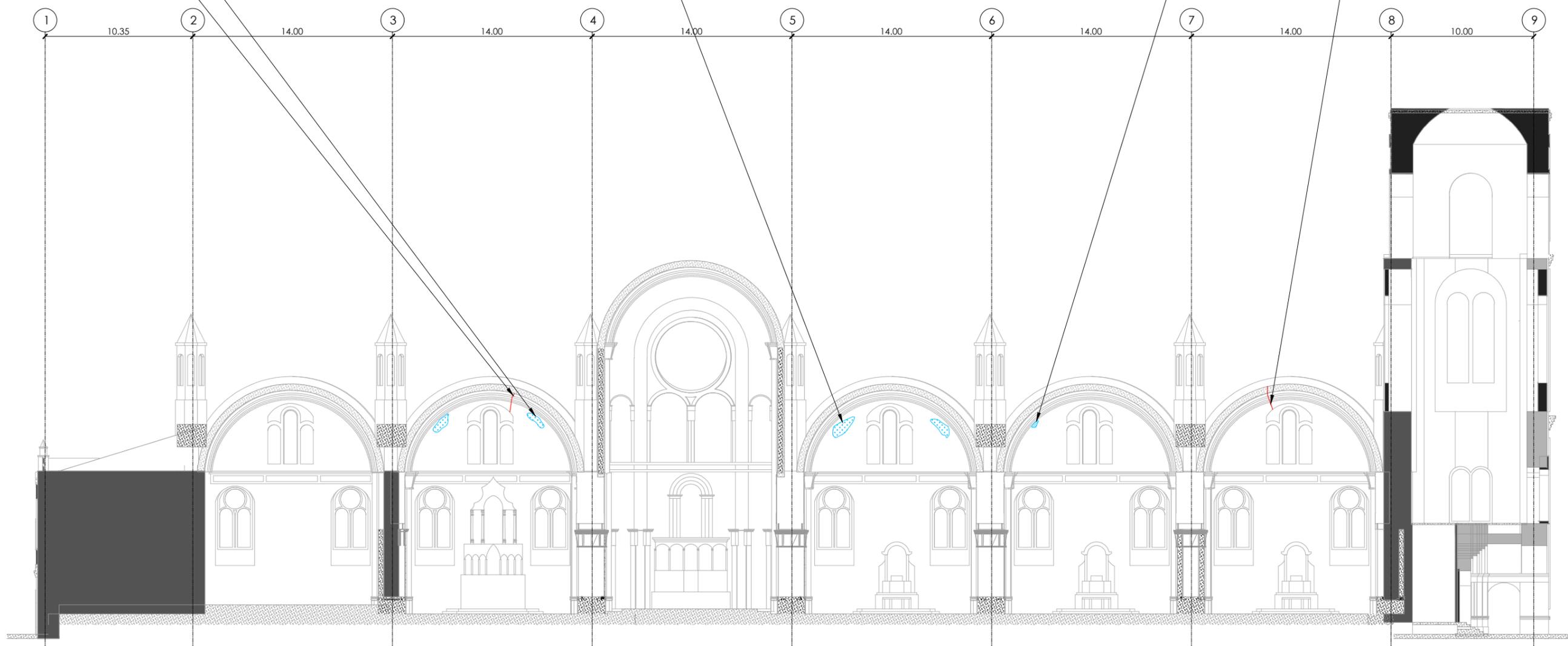
H32: HUMEDAD



H33: HUMEDAD

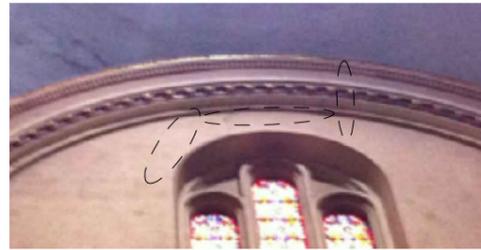


F24: FISURA QUE SE PROLONGA HACIA LA PARTE SUPERIOR DEL ARCO

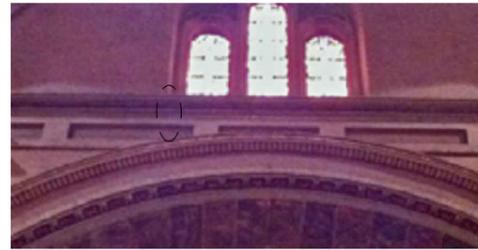


CORTE LONGITUDINAL L4

ESCALA: 1:300



F25: FISURA



F26: FISURA



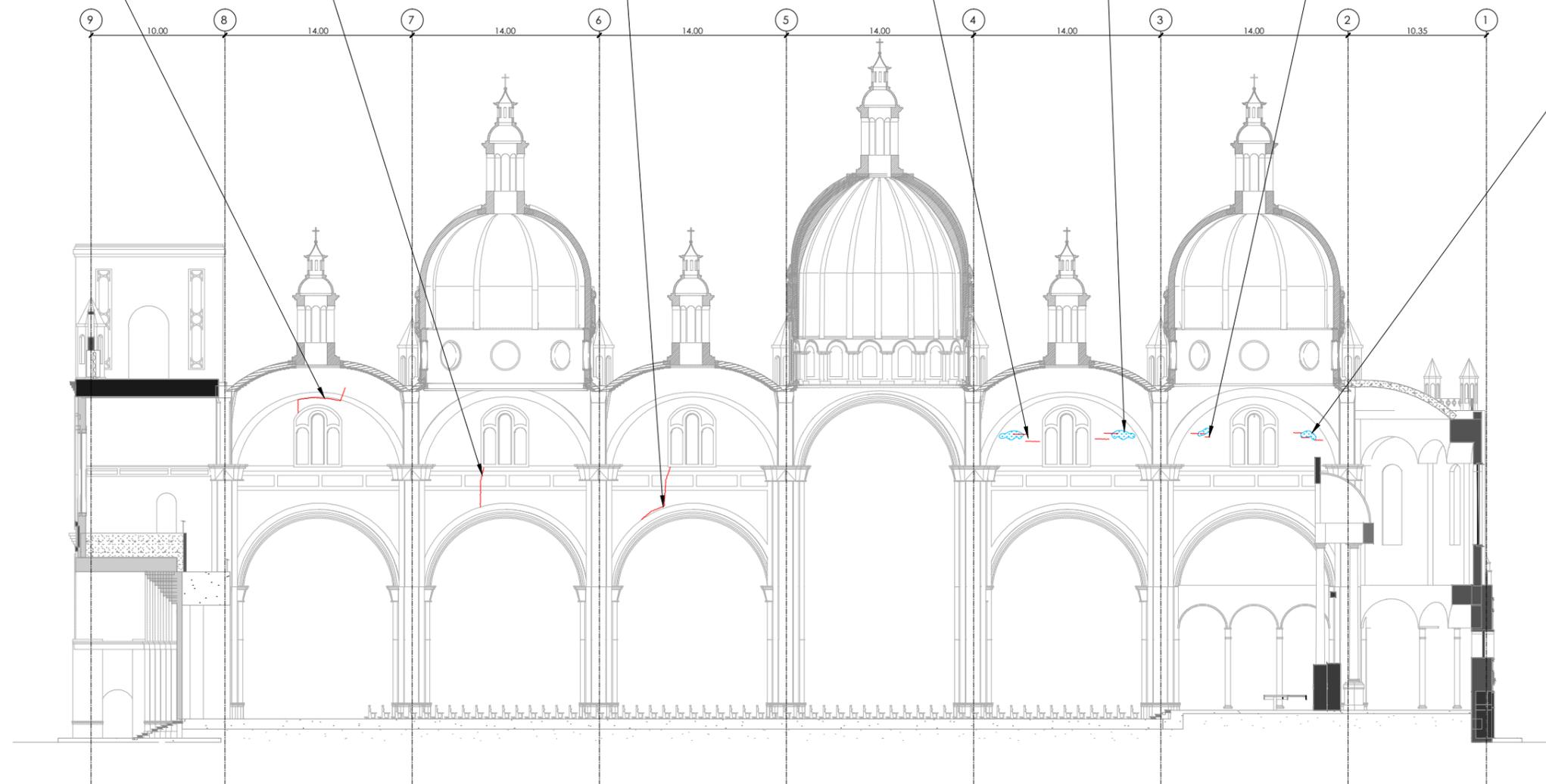
F27: FISURA



F28: PÉRDIDA DE ADHERENCIA DEL ENLUCIDO
H34: HUMEDAD

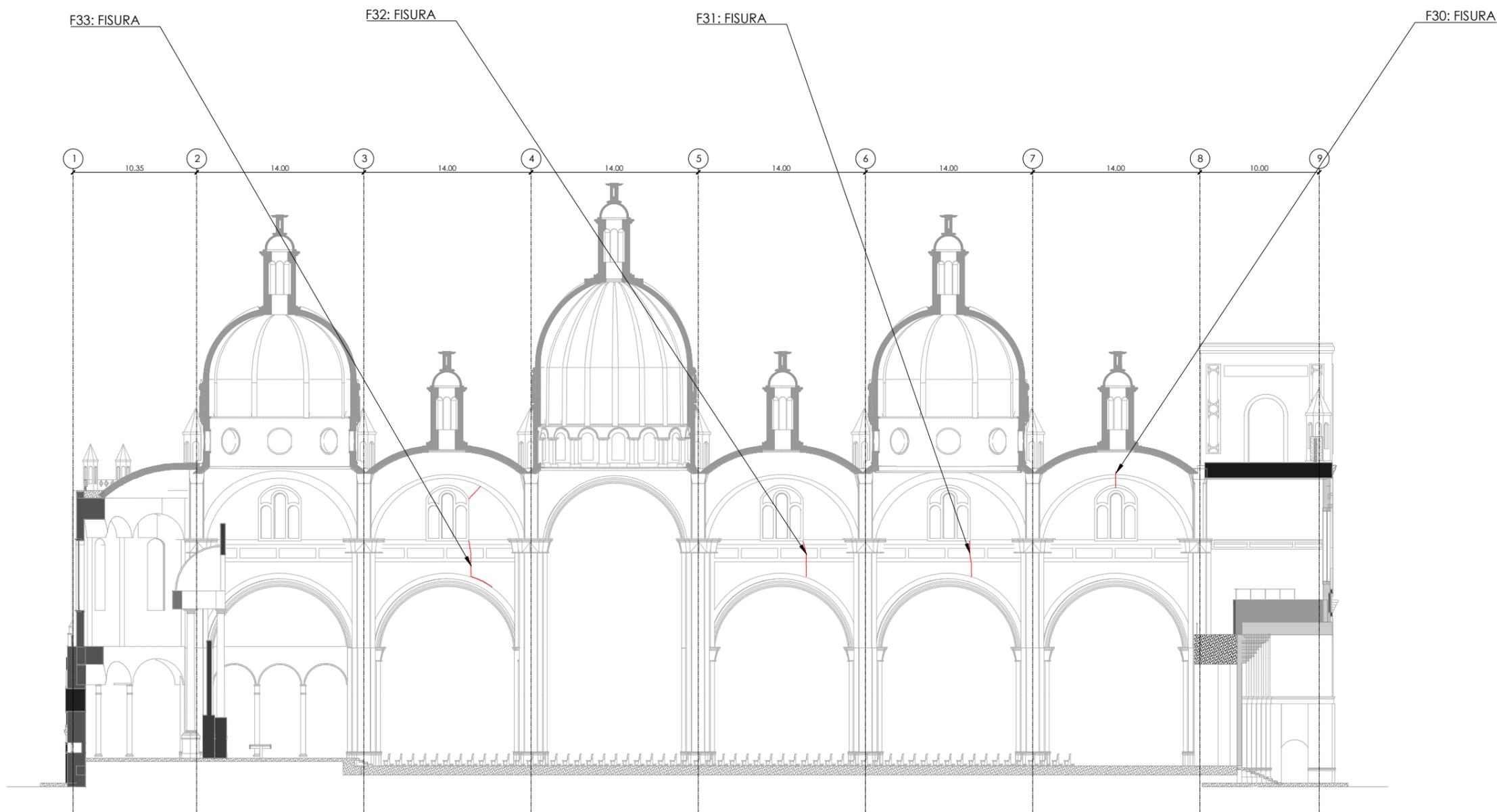
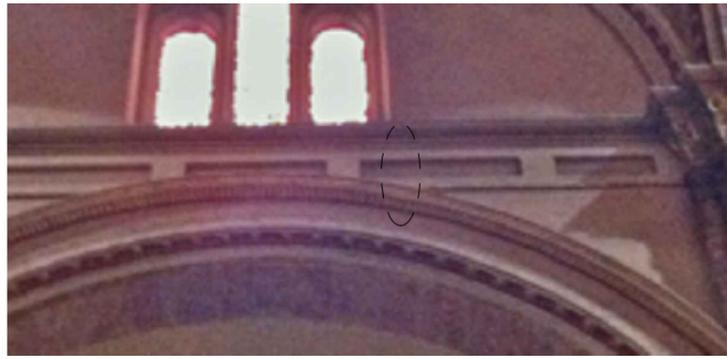
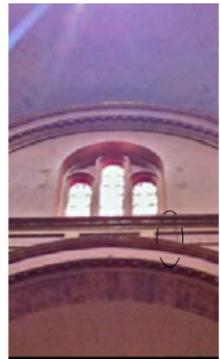


F29: PÉRDIDA DE ADHERENCIA DEL ENLUCIDO
H35: HUMEDAD



CORTE LONGITUDINAL L2

ESCALA: 1: 400

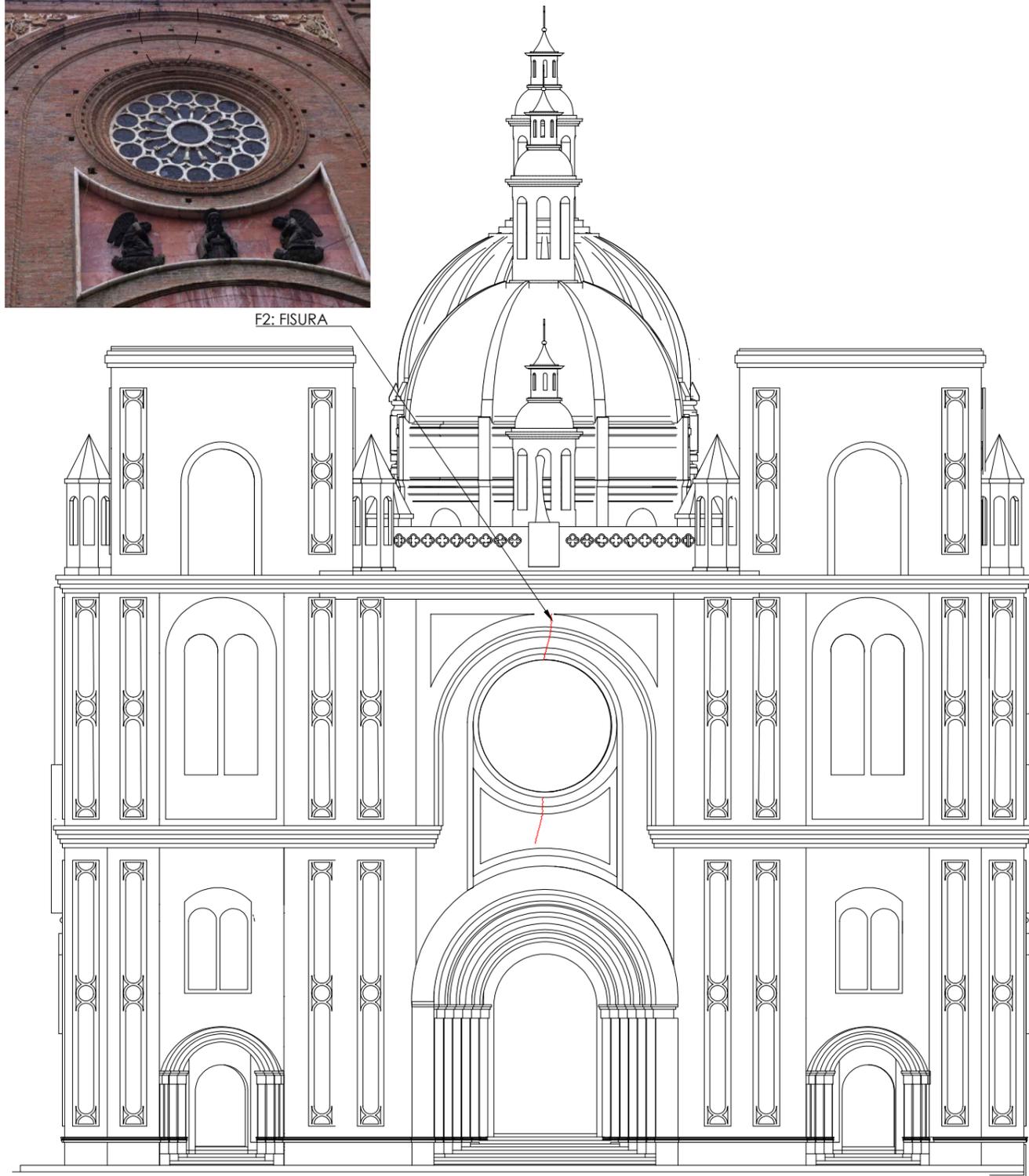


CORTE LONGITUDINAL L3

ESCALA: 1: 400

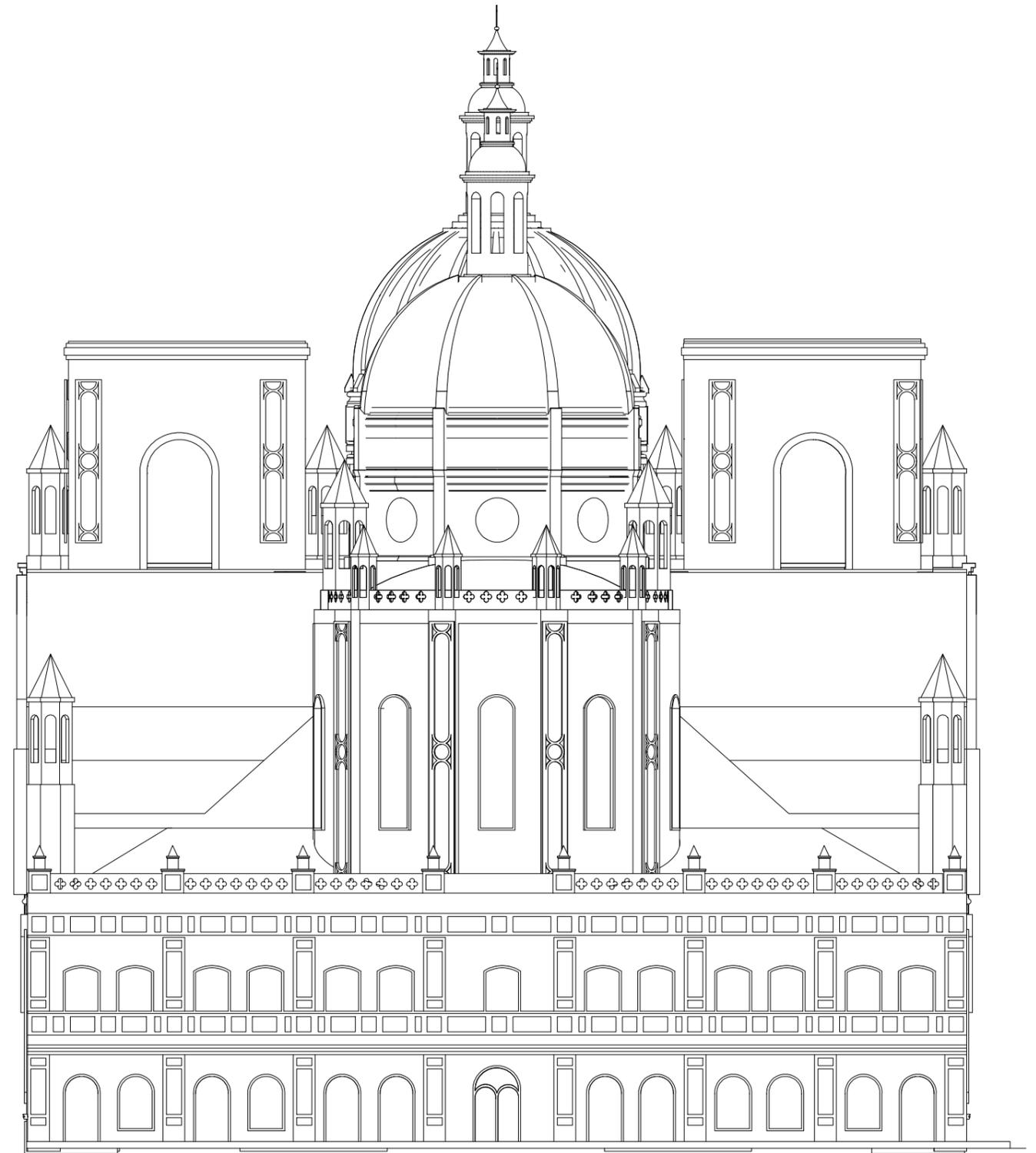


F2: FISURA



ELEVACIÓN FRONTAL CALLE BENIGNO MALO

ESCALA: 1:250



ELEVACIÓN POSTERIOR CALLE PADRE AGUIRRE

ESCALA: 1:250



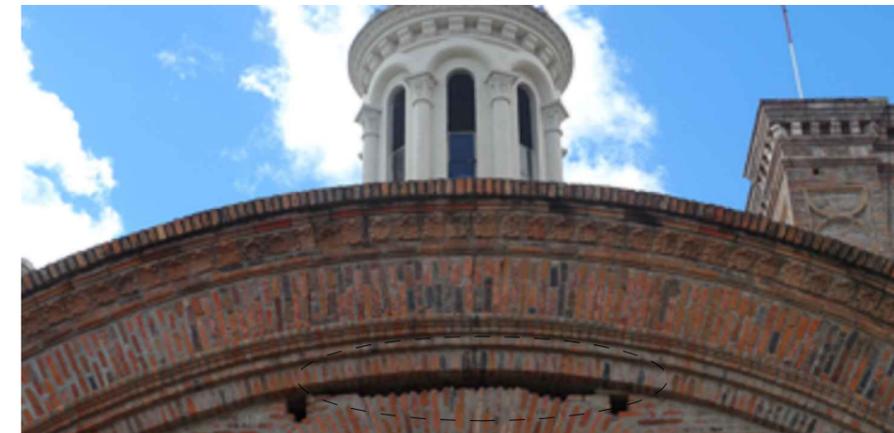
F34: FISURA SOBRE EL ARCO DE LA VENTANA
H36: HUMEDAD EN AMBOS EXTREMOS



F36: FISURA RELLENADA EN EL INFERIOR DE LA VENTANA

F35: FISURA SOBRE EL ARCO

H37: HUMEDAD



FALTANTE DE LADRILLOS
H38: HUMEDAD



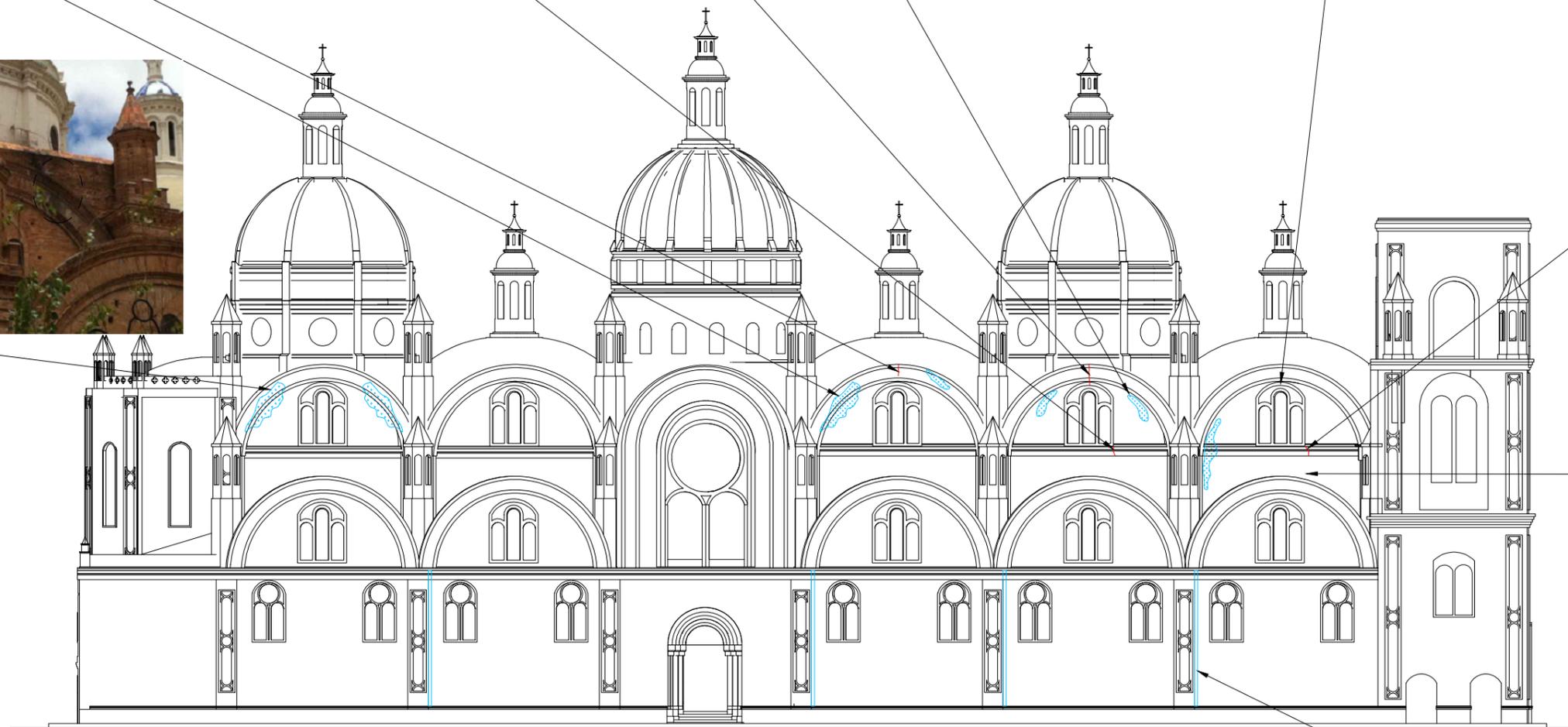
H42: HUMEDAD



F37: FISURA RELLENADA CON MORTERO DE CEMENTO



CRECIMIENTO DE MUSGO EN PARTE DE TODOS LOS DOMOS



ELEVACIÓN LATERAL CALLE SUCRE

ESCALA: 1:500

BAJANTES DE AGUA



F38: FISURAS EN LA PARTE SUPERIOR Y EXTREMO DERECHO DE LA VENTANA



F39: FISURAS EN LA PARTE SUPERIOR E INFERIOR DE LA VENTANA



F40: FISURA EN LA SEGUNDA CÚPULA ALTA



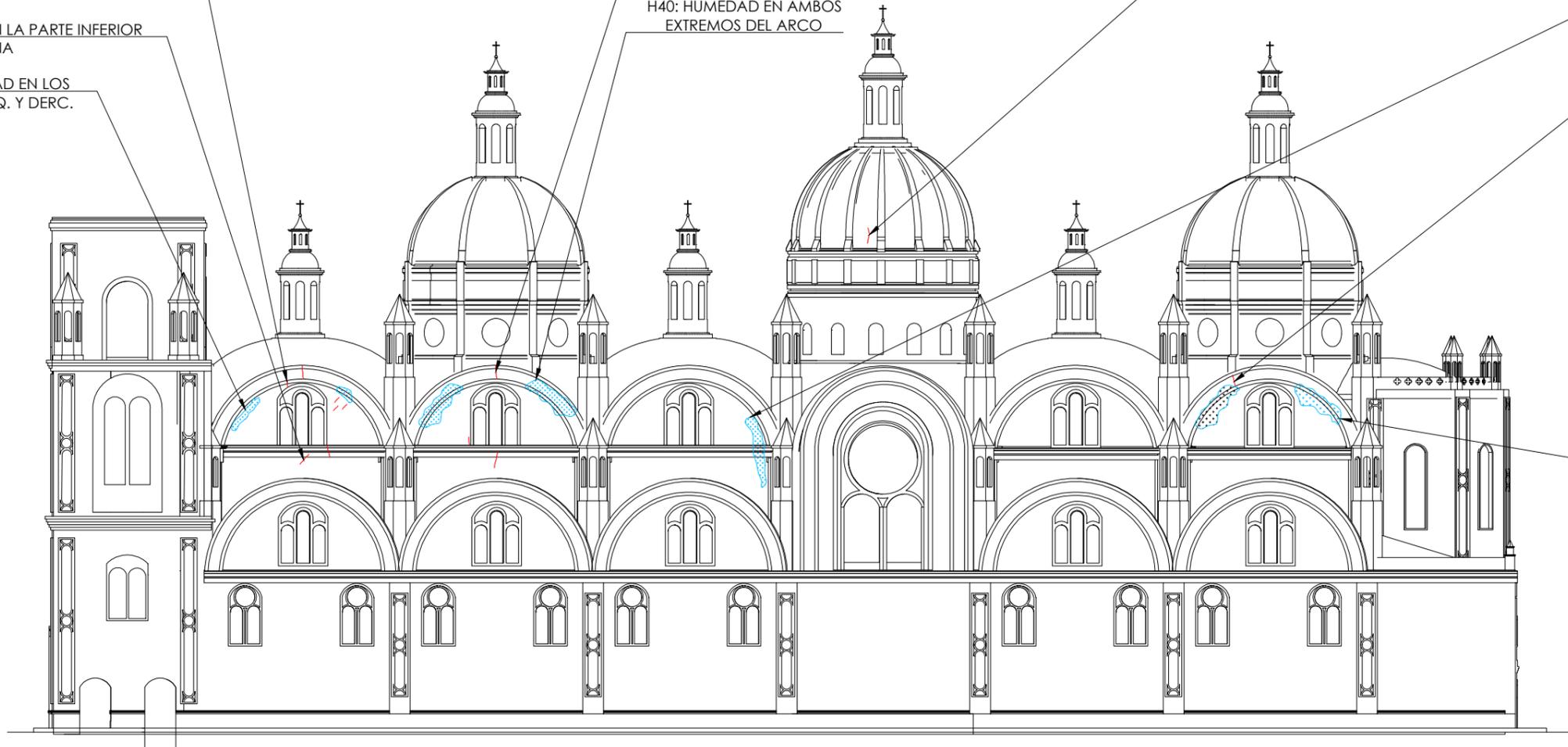
H41: HUMEDAD Y CRECIMIENTO DE VEGETACIÓN EN EL EXTREMO DERECHO

F41: FISURA EN LA PARTE INFERIOR DE LA VENTANA

H39: HUMEDAD EN LOS EXTREMOS IZQ. Y DERC.

H40: HUMEDAD EN AMBOS EXTREMOS DEL ARCO

F42: FISURA



H42: HUMEDAD

ELEVACIÓN LATERAL CALLE SANTA ANA

ESCALA: 1:500

Como se pudo observar, en los planos de corte se muestran de una manera específica con elementos que representan las fisuras y humedades en las diferentes zonas de la Catedral, y se adjuntan fotografías que ayuden a corroborar la existencia de éstos daños.

Las patologías existentes en la parte de la cripta de la catedral son identificadas mediante fotografías de las diferentes zonas de interés como se muestra a continuación.

4.2 LA CRIPTA

Es una construcción que se encuentra situada a cinco metros bajo la nave principal, a la cual se accede por una puerta de madera que se encuentra al lado izquierdo del altar mayor provisto de 32 gradas elaboradas con mármol de Carrara (Italia); es en este lugar donde reposan los restos y cenizas de hombres ilustres de la ciudad. Este espacio contempla 96 metros de largo y 12 metros de ancho correspondientes al altar de la capilla.

Haciendo un recorrido por la cripta es notable la presencia de humedad en las paredes y pisos de este lugar, en los cuales se observa un deterioro de la pintura, humedecimiento del enlucido sobre todo en la zona que limita con la calle Santa Ana. Según testimonios de las madres Sacramentinas en épocas de intensa lluvia se han suscitado inundaciones hasta de una altura de 50 cm.

En el año 2011 la calle Santa Ana fue intervenida realizando excavaciones, las cuales hoy en día se encuentran cubiertas con piedras y plásticos, sin haber tomado una medida apropiada para solucionar el problema de filtración de agua hacia el interior de la cripta.

A continuación se muestran fotografías de diferentes sectores de la cripta en los cuales se puede observar los daños ocasionados por el agua filtrada.

4.2.1 Capilla



Ilustración 38: Capilla

Descripción: En esta zona es preciso mencionar la presencia de una fisura que se localiza en la parte posterior del altar sobre la cubierta tras el Cristo Crucificado, además existe un cambio de coloración de la pintura lo que nos indica que hay humedad.

4.2.2 Segundo Tramo del Pasillo



Ilustración 39: Segundo pasillo

Descripción: Como se observa en la parte inferior de la fotografía en los bordes de las paredes hay unas pequeñas manchas y desprendimiento del enlucido producto de la filtración de agua.

4.2.3 Tercer Tramo del Pasillo

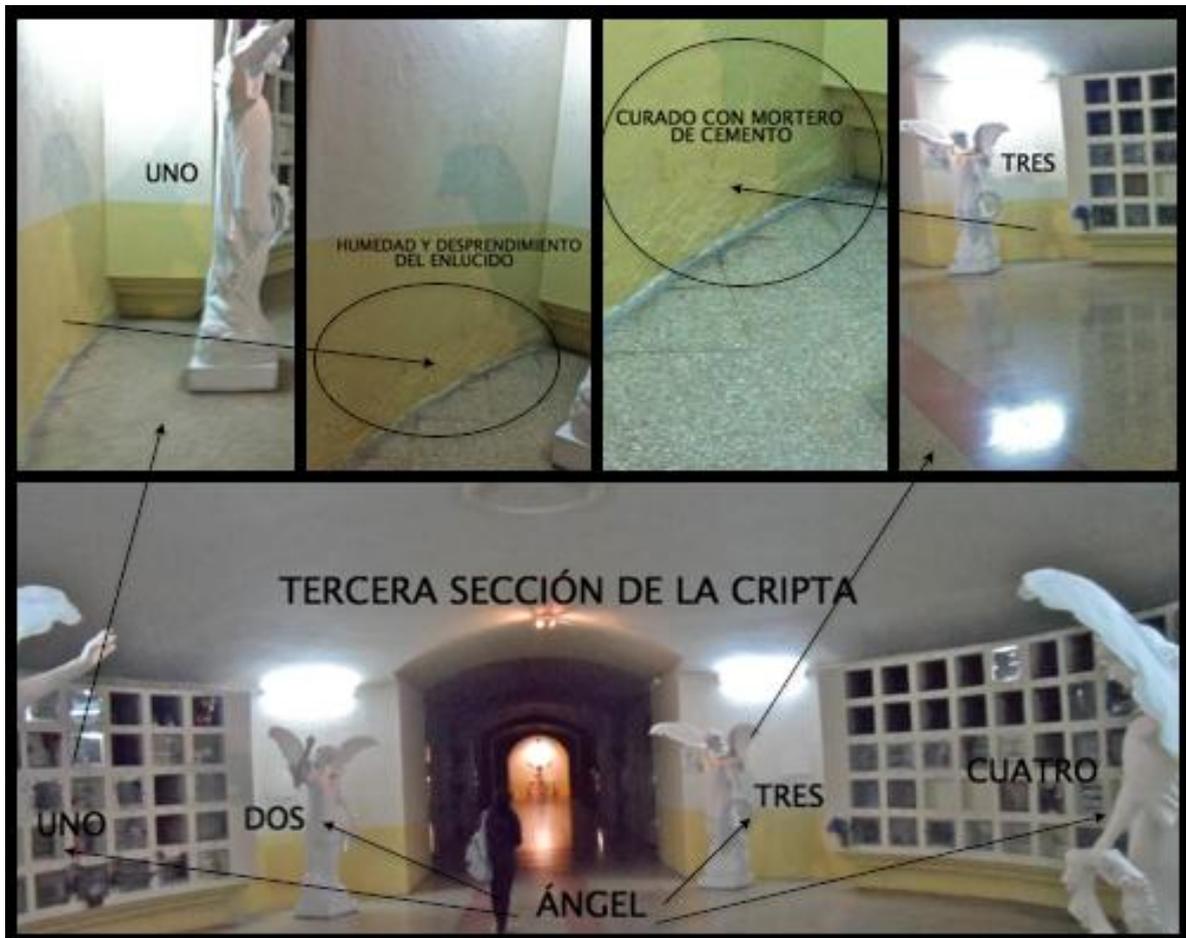


Ilustración 40: Tercer Pasillo

Descripción: Esta zona de la cripta presenta una forma circular en cuyas paredes y parte del piso existe humedad. Aquí se encuentran cuatro monumentos de ángeles como se puede apreciar en la imagen. En la parte posterior de los ángeles uno y tres (enumerados en la fotografía) se observa un deterioro de la pared por acción del agua. Debido a que este lugar es frecuentemente visitado día a día por turistas existen algunas zonas donde se ha intervenido con mortero de cemento como medida para rellenar los espacios que se han desprendido por motivo de la humedad.

4.2.4 Cuarto Tramo del Pasillo



Ilustración 41: Cuarto Pasillo

Descripción: En este tramo de la cripta se halla el mayor deterioro debido a la humedad, es claro observar en las fotografías el daño ocasionado en las paredes laterales derecha e izquierda.

4.2.5 Quinto Tramo del Pasillo



Ilustración 42: Quinto Pasillo

Descripción: A diferencia de los anteriores tramos, aquí se puede ver de una forma más clara el efecto que la filtración de agua ha causado en las baldosas que cubren el piso de la cripta. Existe la aparición de manchas de color café oscuro tanto en la parte izquierda como derecha de este pasillo; al llegar al final del pasillo en la zona lateral derecha se encuentra la imagen de Santa Ana y en su parte posterior hacia la pared también existe la presencia de humedad, como también sucede en su lado opuesto (hacia el acceso que da a la calle Sucre) en sus paredes.

4.3 SÍNTESIS DE LAS PATOLOGÍAS ANALIZADAS:

- La edificación de la Catedral de Cuenca muestra un alto nivel de deterioro pese al mantenimiento y refacciones que se han realizado, es claro observar que estas refacciones no han bastado para preservar la magnitud de la estructura, ya que el paso del tiempo ha dejado marcado ciertas alteraciones en sus materiales.
- Tanto en la parte exterior como interior de la estructura se observan daños como: fisuras estructurales tanto en cúpulas como en bóvedas, dentro de las que se destacan las fisuras presentes en la primera cúpula alta (intervenida) y segunda cúpula alta, además a nivel de arcos y mampostería soportante también se observa la aparición de fisuras; lo cual aumenta la vulnerabilidad de la estructura ya que causa disminución en la capacidad para absorber las cargas vivas y muertas actuantes, además de los efectos sísmicos.
- El humedecimiento en las paredes y bóvedas de ladrillo por la incorrecta evacuación del agua lluvia ha provocado que zonas internas como la correspondiente al quinto domo, parte superior izquierda del altar mayor y sobre todo la zona de la cripta, presenten una erosión en los ladrillos y su aglomerante, alterando así las propiedades físicas y mecánicas además de la capacidad de adherencia del mortero. Estos problemas se ven más acentuados en épocas de lluvia, colapsando los sistemas de evacuación de agua y causando pequeñas inundaciones en el subsuelo.
- En la parte externa de la catedral en la zona de los vértices de las ventanas que corresponden a los diferentes domos y parte de algunas cúpulas altas, se observan eflorescencias producto de las fisuras que han sido rellenadas con mortero de cemento, con el objeto de evitar filtraciones.
- Al caminar por las cubiertas de las bóvedas de ladrillo es claro observar la presencia de vegetación en zonas como: las bajantes de agua (en la fachada de la calle Sucre), paredes que forman los domos (tras la torre norte y sur), drenajes localizados en los extremos derecho e izquierdo de los domos y demás sitios en donde, debido al grado de deterioro de la estructura se ha generado un ambiente propicio para el crecimiento de este tipo de vegetación (interior de ambas torres), causando una alteración física, mecánica y química en los materiales. La presencia de

vegetación, especialmente en zonas donde se localizan los desagües causan contracciones y tracciones al momento que se incrustan las raíces en el mortero y la mampostería, ocasionando un desprendimiento de fragmento.

- Ciertos espacios que en su momento fueron utilizados como apoyo para la colocación de andamios en la actualidad sirven de refugio para diversos tipos de aves, produciendo cantidades de excremento que contienen sales solubles que son alimentos para los hongos y generación de bacterias, además que la cantidad de acidez cambia la coloración de las piezas que forman parte de los elementos estructurales llegando así a deteriorarlos. No obstante, hay que tomar en cuenta el riesgo que puede ocasionar a la salud con problemas en las vías respiratorias, a personas quienes visitan este Patrimonio.



CAPÍTULO 5

5.1 MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL

Con el objeto de realizar un análisis de los daños y patologías que presenta la Catedral Nueva de Cuenca se desarrolló un modelo idealizado en ordenador a través del método de los elementos finitos con elementos tipo Shell. Para ello se utilizó el software de cálculo estructural SAP 2000.

El modelo de la Catedral utilizado para el desarrollo de este proyecto fue realizado por el Ing. Fernando Zalamea docente de la Facultad de Ingeniería y director de la presente tesis. En la imagen que se presenta a continuación se puede observar el modelo estructural generado:

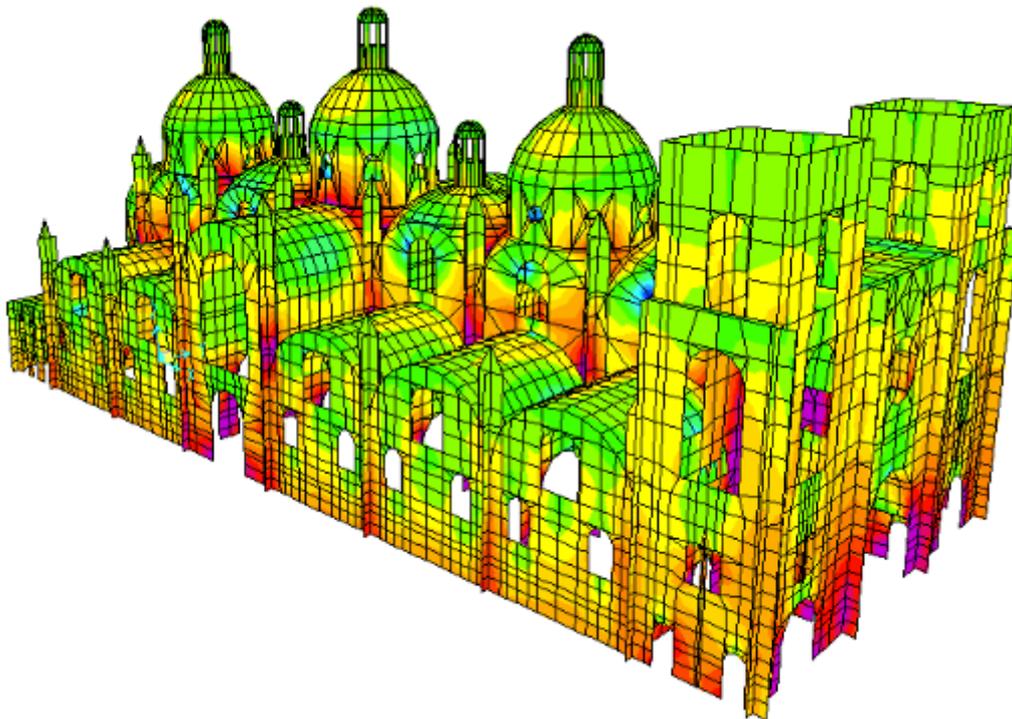


Ilustración 43: Modelo de la Catedral discretizado en SAP 2000.

Los planos del diseño original realizados por el Hermano Juan Stiehle presentan varios detalles arquitectónicos referente a fachadas y acabados del interior de la Catedral. En el modelo estructural, no se requiere representar este nivel de detalle, debido a que tiene poca influencia con respecto a su comportamiento estructural, sin embargo es preciso mencionar que se realizó un levantamiento topográfico y arquitectónico a detalle con la finalidad de tener datos más precisos en cuanto a dimensiones de los elementos estructurales.

Las dimensiones principales tomadas de los planos digitales de la topografía realizada son las siguientes:

- Largo: 104.85 m
- Ancho: 44.40 m
- Área de emplazamiento: 4655 m²
- Altura actual: 43.10 m (altura en las torres medida a partir del nivel de piso de la iglesia)
- Altura máxima: 51.00 m (altura en la cúpula central)

Como un dato importante cabe resaltar que la altura original de las torres en los planos del Hno. Juan era de 73 metros medidos a partir del nivel de piso. Las torres no llegaron a culminarse, aparentemente por dudas acerca de la resistencia de la cimentación, además de una visible grieta en la parte del rosetón. Ver Anexo 4

En el transcurso del tiempo desde la finalización de la construcción de la catedral se han presentado problemas de humedades, fisuras, cambios de coloración del enlucido debido a la filtración de agua, deterioro de la fábrica (ladrillo-mortero), todos estos cambios de la estructura son actualmente visibles en diferentes zonas las mismas que se detallaron en el Capítulo 4. Utilizando el modelo tridimensional generado se busca establecer si estas se originan por efectos gravitacionales y retracción. Efectos que son inherentes a la mampostería, dentro de este punto cabe mencionar que la geometría de la estructura juega un papel importante en la consecución de los esfuerzos de compresión, puesto que existen elementos como los arcos en los cuales a pesar de su geometría y de estar sometidos a esfuerzos de compresión también están propensos a ser sometidos a esfuerzos de tracción en la clave o parte central del arco.

5.1.1 Detalles del Modelo:

Para realizar una adecuada discretización de la estructura es importante considerar los sectores de mayor concentración de esfuerzos y las zonas de interés, en las cuales se deben tomar algunas consideraciones importantes como: espesores, formas de apoyo, materiales empleados, etc. Es por este motivo que para aproximar a la realidad los resultados del comportamiento suelo-estructura en el modelo se colocaron resortes en la zona de cimentación, ya que dependiendo del coeficiente de balasto utilizado se puede calibrar mejor la rigidez del terreno; debido a que este coeficiente permite conocer el asentamiento de la edificación en el terreno y la distribución de esfuerzos producidos en ciertos elementos de la cimentación.

Todo el modelo está constituido por elementos tipo SHELL que son elementos bidireccionales que conforman las cúpulas de la cámara principal además de

las paredes en los pórticos transversales y longitudinales. Los espesores de estas estructuras corresponden a las medidas reales tomadas del modelo arquitectónico tridimensional realizado en ARCHICAD.

Otros parámetros requeridos en el modelo son todos los concernientes al tipo de material empleado en la construcción entre los más importantes se tiene el módulo de elasticidad y coeficiente Poisson. Estos datos fueron ingresados al modelo tomando como referencia el estudio de materiales descrito en el Capítulo 3, sin embargo es necesario establecer los siguientes parámetros:

- **Coefficiente de Balasto:** Es un magnitud asociada con la rigidez del terreno, ya que permite conocer el asentamiento de una edificación pesada en el terreno, así como la distribución de esfuerzos en ciertos elementos de la cimentación. Este coeficiente se lo mide aplicando una carga vertical sobre una superficie y midiendo el hundimiento o desplazamiento a partir de la carga aplicada.
Para el caso del suelo en el cual está asentada la estructura de la Catedral, se asume un valor del coeficiente de balasto de 2 kg/cm^2 , valor que está basado en el perfil del suelo presentado en el anexo 1, correspondiente a un terreno arcilloso.
- **Módulo elástico de la mampostería de ladrillo:** Es un parámetro mecánico que se puede determinar por diferentes criterios. En el presente trabajo se ha considerado distintas propuestas empíricas de gran aplicación práctica, las cuales han sido desarrolladas por diferentes autores a partir de una gran cantidad de ensayos de laboratorio; estas propuestas varían entre $400 \text{ f}'\text{m} < E_m < 1000 \text{ f}'\text{m}$. La Tabla a continuación presenta un resumen de las propuestas más utilizadas, en donde $\text{f}'\text{m}$ representa la resistencia a compresión de la mampostería.

AUTORES	VALOR DE E_m
Paulay y Priestley, 1992	$750 \text{ f}'\text{m}$
San Bartolomé, 1990	$500 \text{ f}'\text{m}$
Sinha y Pedreschi, 1983	$1180 \text{ f}'\text{m}^{0.83}$
Hendry, 1990	$2116 \text{ f}'\text{m}^{0.50}$

Tabla 29: Valores del módulo de elasticidad de la mampostería de ladrillo

De acuerdo al confinamiento el valor de f_m puede venir dado por:

- Paredes sin confinamiento: f_m de 10 a 30 kg/cm^2 .
- Paredes medianamente confinadas: f_m de 15 a 35 kg/cm^2 .
- Paredes bien confinadas: f_m de 20 a 40 kg/cm^2

Considerando que la Catedral Nueva de Cuenca está estructurada con paredes bien confinadas, se asumirá un valor de $f_m = 40 \text{ kg/cm}^2$.

De esta forma:

$$E_m = 750 \cdot f_m = 750 \cdot 40 = 30.000 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_m = 300000000 \text{ kg/m}^2.$$

Sin embargo, los valores utilizados para el software del cálculo asumen una resistencia de un 50% más alta referente a la mampostería de ladrillo, lo cual se justifica debido a que el mortero de cal va adquiriendo mayor resistencia con el paso de tiempo.

- **Módulo de Poisson de la mampostería:** El módulo de Poisson para la mampostería de ladrillo se toma de la tabla a continuación:

Material	Coefficiente de Poisson
Ladrillo	0,15
Mortero	0,20

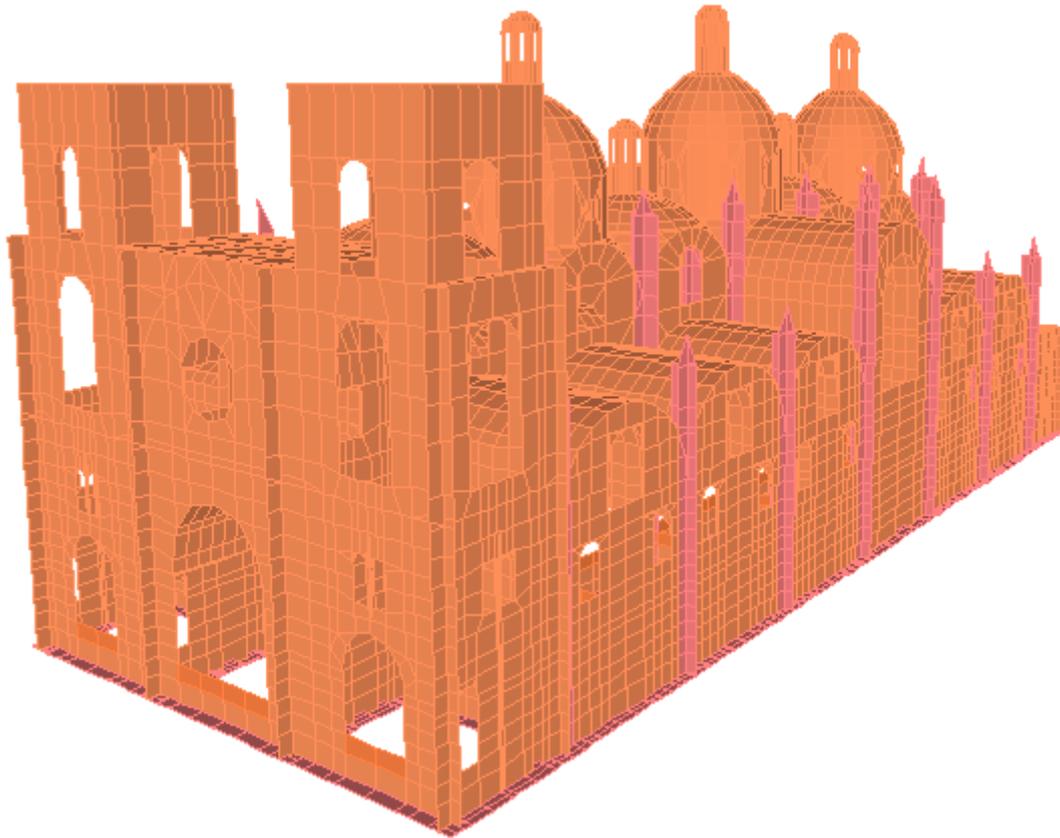
Asumiendo un valor de:

$$\nu = \text{Módulo de Poisson} = 0.20$$

Peso Específico de la mampostería: El peso específico de la mampostería de ladrillo se encuentra entre 1300 y 2200 kg/m^3 . El valor que se utilizó para definir el modelo de cálculo es 2000 kg/m^3 , valor asumido con criterio en distintas bibliografías referente a materiales de construcción.

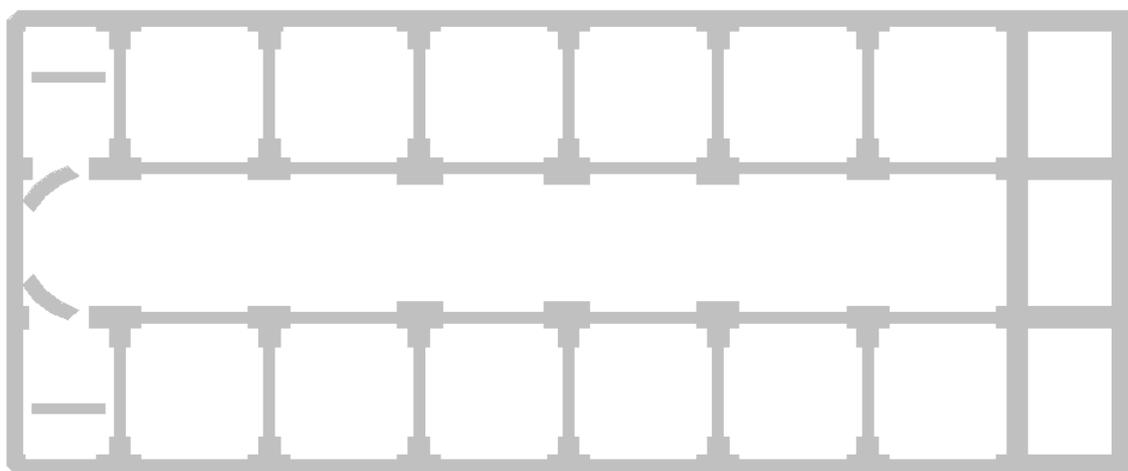


5.1.2 Presentación de Modelo Estructural en 3D SAP 2000



En el modelo se distinguen 6 pórticos en el sentido longitudinal y 9 pórticos en el sentido transversal. Tomando como referencia el plano de ejes y cortes realizados para la localización de las patologías Capítulo 4, estos pórticos se los muestra en los siguientes gráficos de corte realizados en SAP 2000.

5.1.2.1 Planta



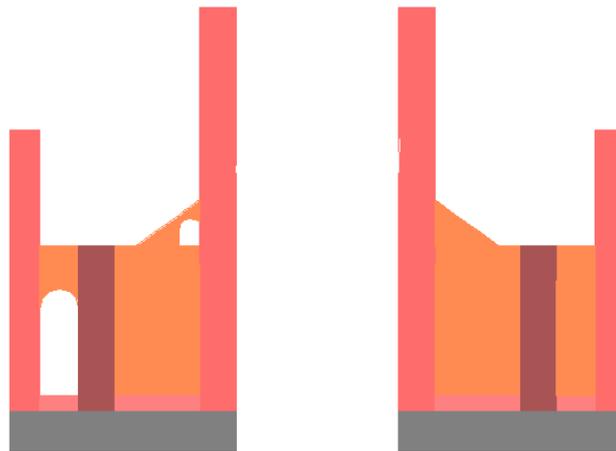


5.1.2.2 Secciones Transversales

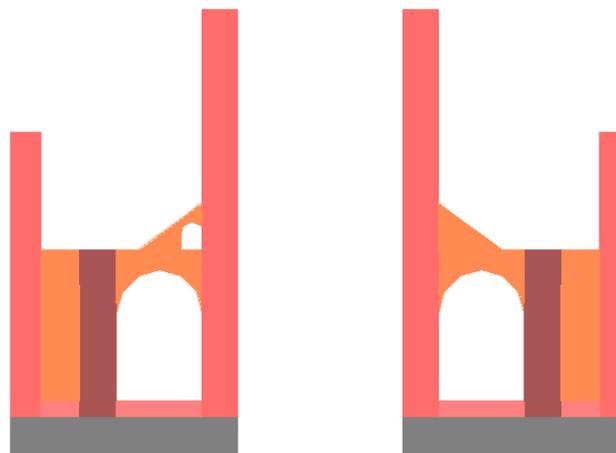
Eje 1



Eje 2

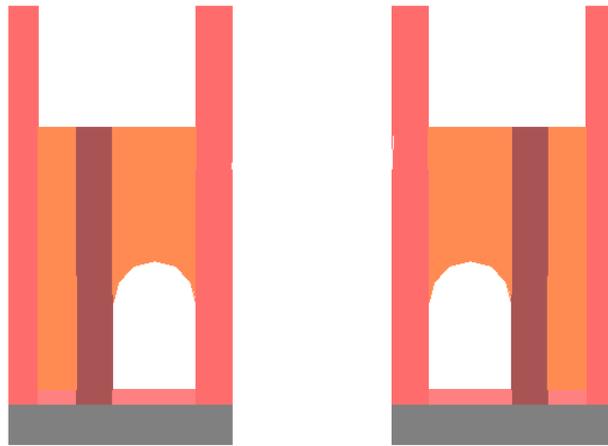


Eje 3

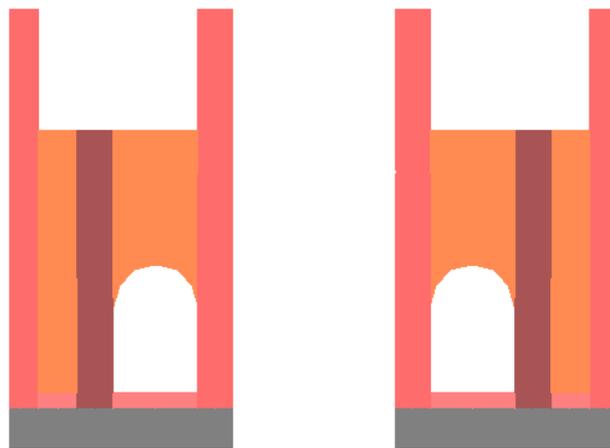




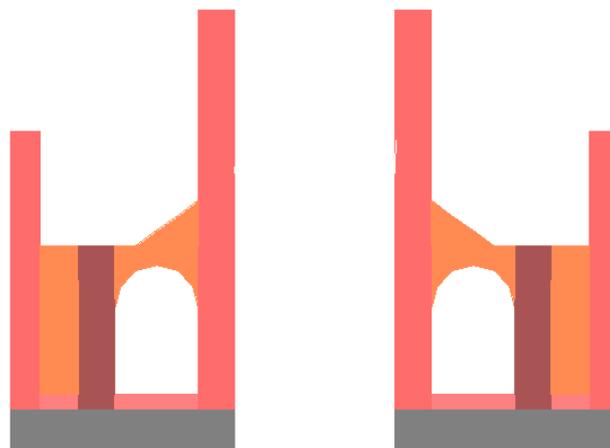
Eje 4



Eje 5

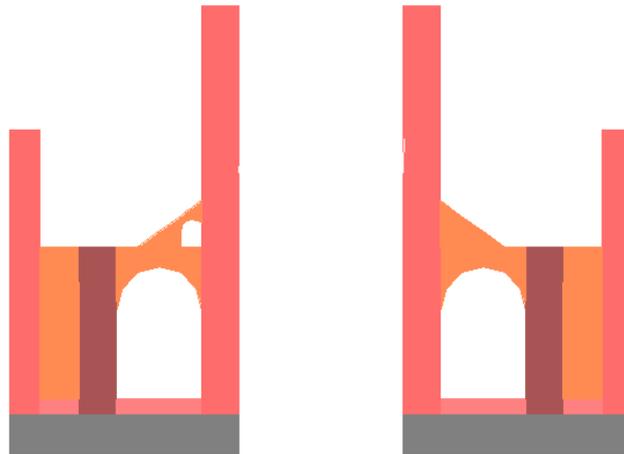


Eje 6

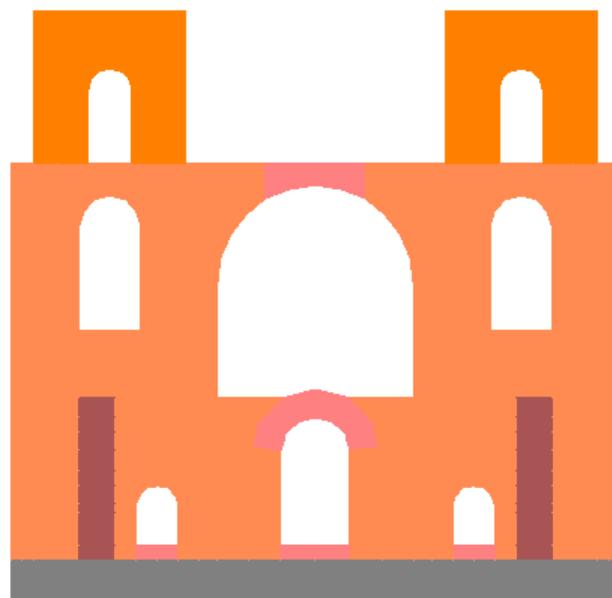




Eje 7

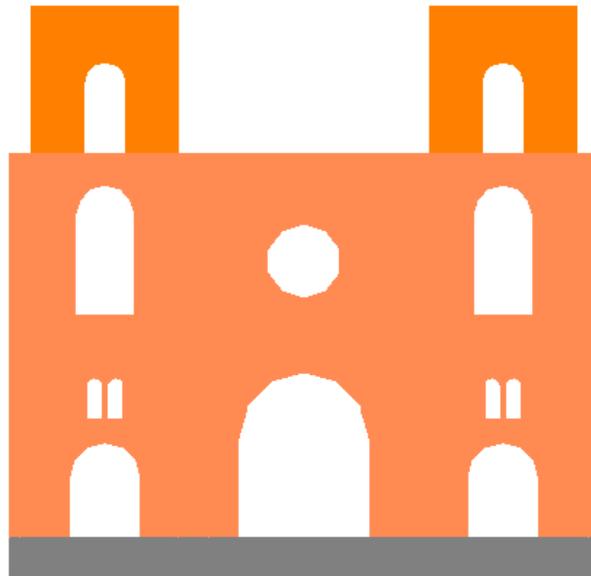


Eje 8



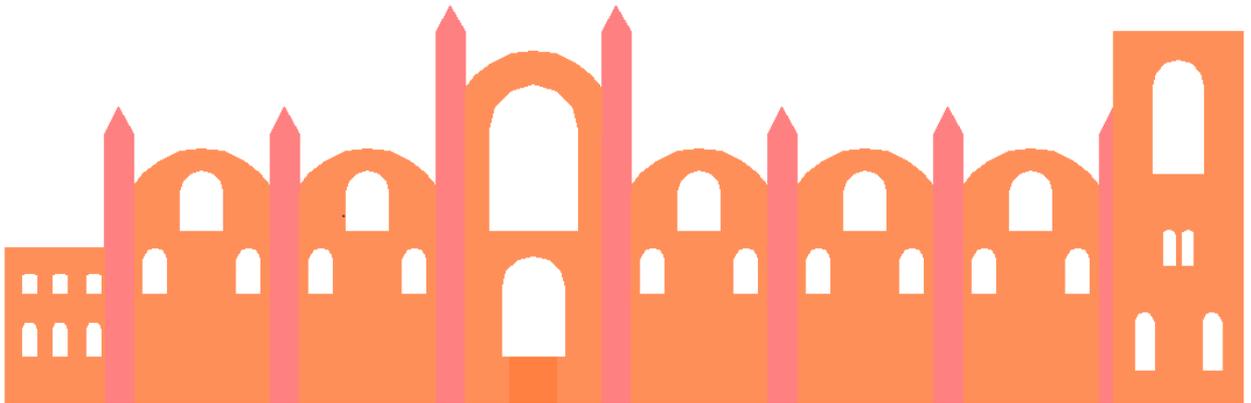


Eje 9



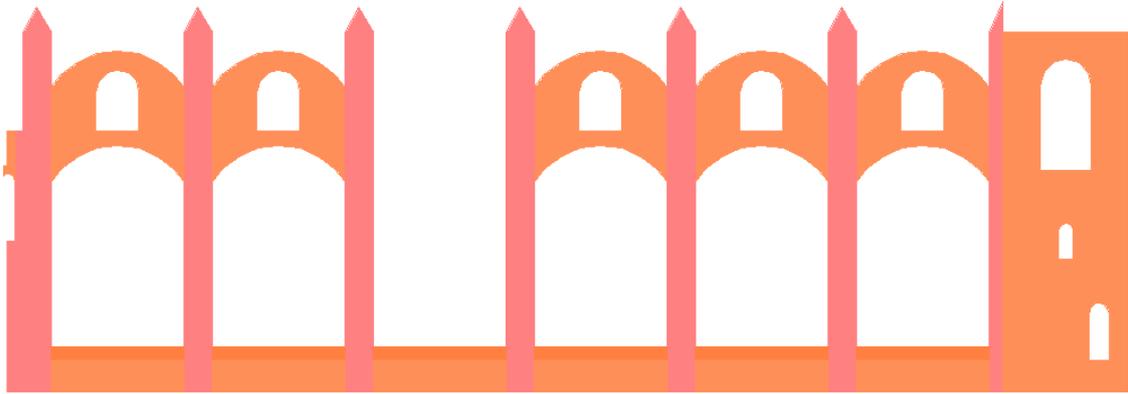
5.1.2.3 Secciones Longitudinales

Eje A

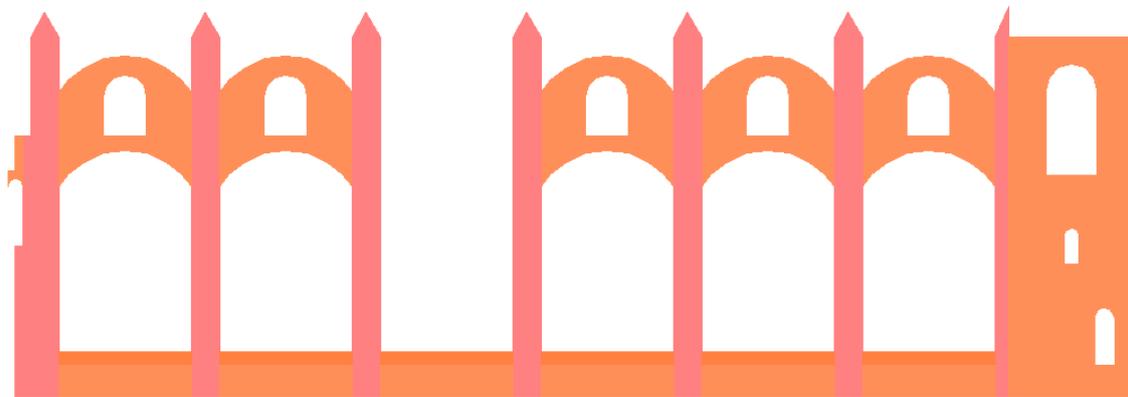




Eje C



Eje D



Eje F



5.1.2.4 Características de materiales y secciones empleados en el modelo

Los elementos estructurales que forman la fábrica de la Catedral presentan ciertas características que debieron ser consideradas al momento de asignar los materiales y espesores de paredes, para obtener valores más reales del comportamiento de los distintos elementos.

En lo que se refiere a materiales se tienen los siguientes:

- Mampostería de ladrillo
- Mampostería de ladrillo fisurada
- Mampostería de piedra

Las siguientes tablas muestran las propiedades de los materiales y espesores utilizados:

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES		
Nombre	Módulo elástico (kg/cm ²)	Módulo de Poisson
Mampostería de ladrillo	123100	0.2
Mampostería de ladrillo fisurada	153105	0.2
Mampostería de piedra	253105	0.2

Tabla 30: Propiedades de los materiales utilizados en el software SAP 2000

ESPEORES DE SECCIONES		
Nombre	Material	Espesor (cm)
Pared_30	Mamp. Ladrillo	30
Pared_50	Mamp. Ladrillo	50
Pared_70	Mamp. Ladrillo	70
Pared_100	Mamp. Ladrillo	100
Pared_160	Mamp. Ladrillo	160
Pared_160 Fis	Mamp. Ladrillo Fis	160
Torres_100	Mamp. Ladrillo	100
Bóvedas_100	Mamp. Ladrillo	100
Losa_100	Mamp. Ladrillo	100
Col_210	Mamp. Piedra	210
Cim	Mamp. Piedra	200
Muro	Mamp. Ladrillo Fis	300

Tabla 31: Espesores de las secciones utilizadas en el software SAP 2000

5.1.2.5 Descripción de las condiciones de apoyo suelo-cimentación

Una parte importante para obtener un modelo estructural que muestre las condiciones reales de una edificación, es conocer las condiciones de apoyo de la estructura.

Conocer de manera clara las condiciones de apoyo facilita o brinda una mejor interpretación del interacción suelo – estructura.

En el caso de la cimentación de la Catedral Nueva de Cuenca se asumió un análisis de la cimentación basado en la masa total de la estructura, es decir, se la dividió de acuerdo a la concentración de masa que tiene que soportar el suelo; con este criterio se tienen 4 grupos de elementos: el primero son todos los elementos que forman parte del altar mayor, un segundo grupo son lo que constituyen los pórticos longitudinales así como los que conforman los pórticos transversales y por último se tiene los elementos que componen las dos torres frontales.

El modelo originalmente contaba con resortes como elemento de apoyo en cada uno de los nodos de la base, pero debido a la poca manejabilidad que presentaban estos elementos de unión al momento de realizar cambios en cuanto a su rigidez, se optó por asignar resortes por unidad de área, es decir se colocaron los resortes según la necesidad de las áreas generadas.

5.1.2.6 Revisión y Modificación del modelo en SAP 2000.

Debido a la complejidad de la estructura el modelo carecía de algunos detalles estructurales que debían ser modificados y en algunos casos completados. Las zonas modificadas fueron:

1. Zona correspondiente al arco de la puerta en la entrada principal: En esta parte fue necesario completar el arco que se encuentra sobre el rosetón y sobre la entrada principal, ya que al no contar con este elemento los esfuerzos no eran transmitidos adecuadamente a los muros y columnas.

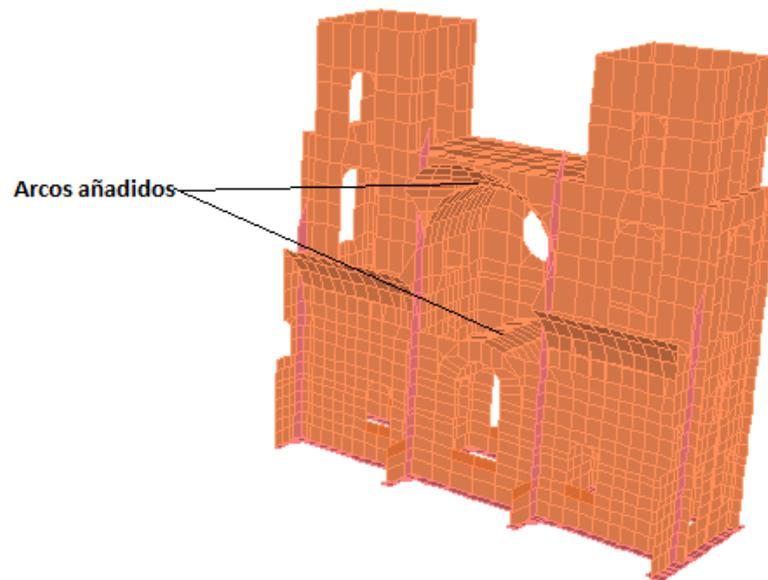


Ilustración 44: Secciones de arcos añadidos.

2. Zona de la terraza localizada en la parte posterior del altar mayor: Las losas que forman esta terraza fueron añadidas al modelo, ya que este no contaba con estos elementos que cubren la parte posterior de la estructura y por consecuencia la cúpula y los domos no tenían el apoyo necesario para poder transmitir las cargas hacia el suelo.

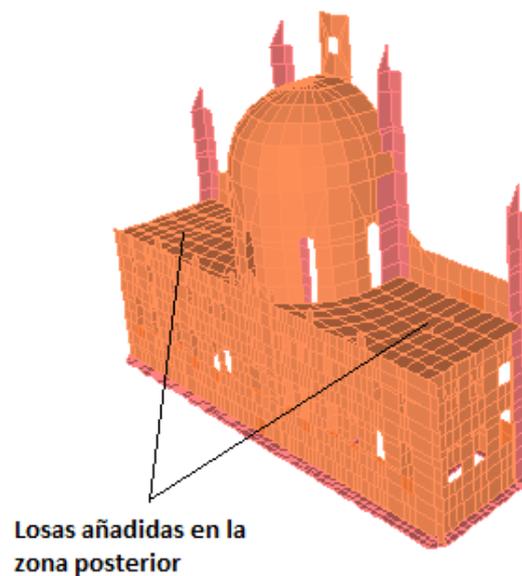
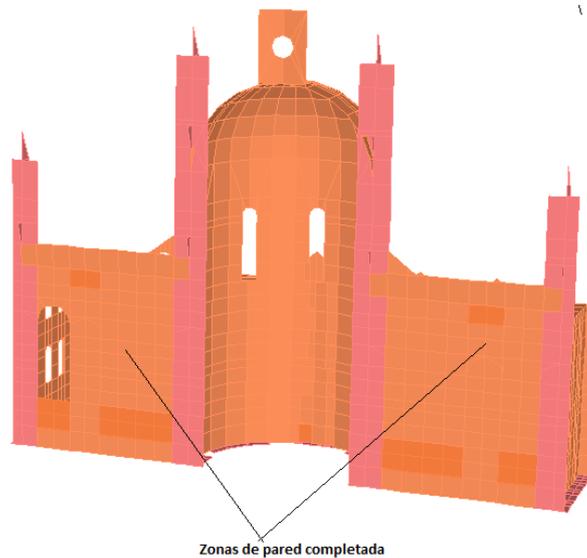


Ilustración 45: Losas añadidas en la zona posterior

3. Zona del eje transversal que limita el inicio del altar mayor: El modelo originalmente mostraba en este corte transversal la misma forma estructural de los demás ejes, es decir, la parte internas de las columnas estaba conformadas por arco de medio punto, lo cual en la realidad eran



paredes macizas de mampostería de ladrillo, por lo que en el modelo fue necesario rellenar estos vacíos para completar dichas paredes.



Zonas de pared completada

Ilustración 46: Zonas de pared completada

Con todas estas modificaciones el modelo generado en el programa estructural SAP 2000 fue utilizado para el análisis y comparación de las patologías existentes en la edificación como se muestra en el capítulo final de este documento.

CAPÍTULO 6

6.1 COMPARACIÓN DE LOS DAÑOS DETECTADOS CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO

6.1.1 Resultados obtenidos del modelo:

Basándonos en los planos de patologías descritos en el capítulo 4 y el modelo obtenido en el capítulo 5 podemos establecer una comparación de resultados. El objetivo de este capítulo es corroborar los resultados obtenidos de las patologías mediante el modelo en SAP bajo cargas gravitacionales, es decir, en el desarrollo de este capítulo se busca dar una justificación a la mayoría de los daños localizados en la Catedral Nueva de Cuenca. Sin embargo hay que tener en cuenta que las fisuras o grietas que no se puedan justificar como consecuencia de la acción de la gravedad sobre la geometría establecida, serán producidas por otras causas como: defectos constructivos, sismos, etc. Dichas causas caen fuera del trabajo de la presente tesis.

Para poder referenciar de manera más clara los esfuerzos producidos en cada uno de los elementos estructurales, es preciso utilizar un plano que ayude a diferenciar cada una de las zonas mediante ejes longitudinales y transversales. En el gráfico 59 se muestra el plano de planta general con sus respectivos ejes.

Adicionalmente se debe indicar algunos conceptos previos al análisis y descripción de los esfuerzos, la nomenclatura usada será la correspondiente a la indicada en el programa SAP:

- S11: Esfuerzos normales de compresión o tracción paralelos al eje longitudinal de la estructura.
- S22: Esfuerzos normales de compresión o tracción paralelos al eje transversal de la estructura.
- S33: Esfuerzos verticales de compresión o tracción.
- S12: Para elementos tipo SHELL es un esfuerzo de corte que actúa en el plano que forman los ejes 1 y 2.
- S13: Es un esfuerzo de corte que actúa en el plano normal al eje 1 y en dirección hacia el eje 3.
- S23: Es un esfuerzo de corte que actúa en el plano normal al eje 2 y en dirección hacia el eje 3.

De acuerdo a la teoría de la elasticidad, se cumplen las siguientes relaciones:

$$S12 = S21$$

$$S13 = S31$$

$$S23 = S32$$

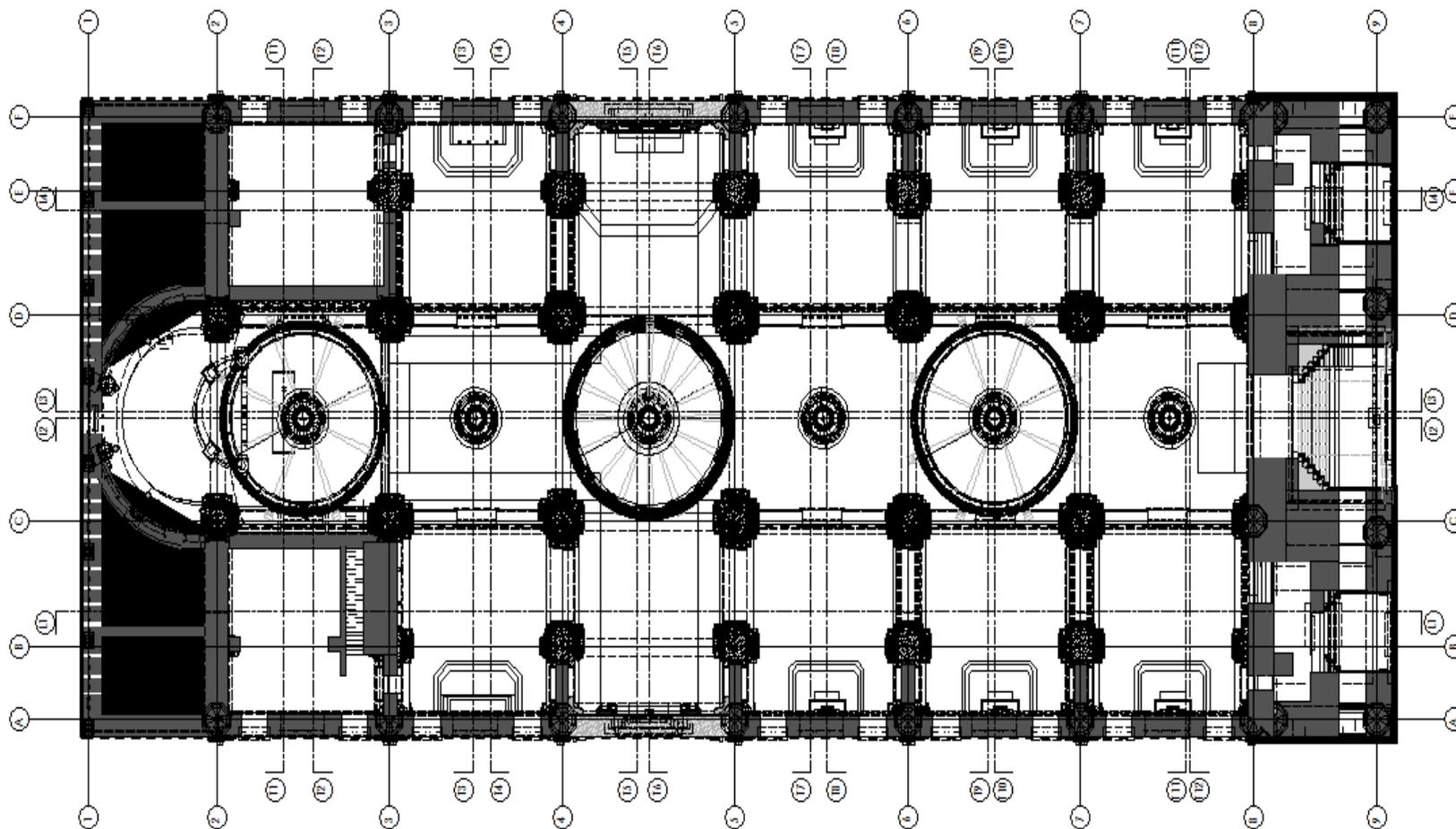


Ilustración 47: Plano General en planta de la Catedral de Cuenca



6.1.2 Esfuerzos producidos en los elementos estructurales bajo la acción de Carga Muerta (CM)

6.1.2.1 Base o Nivel de Piso: Analizando la base del modelo se observa que los esfuerzos más altos de compresión generados a partir de carga muerta, se localizan en las columnas interiores de la estructura; referenciándonos en el plano mostrado estas columnas se encuentran entre los ejes longitudinales C y D, y los ejes transversales 3 y 7. El rango en que varían estos esfuerzos va desde 15.7 a 19.06 kg/cm²; presentando un comportamiento semejante a la parte de las torres correspondiente al eje 9. Todo lo contrario sucede en la parte posterior de la Catedral, ya que los esfuerzos de compresión generados en esta zona varían del orden de 1.60 a 4.22 kg/cm².

La zona con mayores tracciones coincide con la zona donde se encuentran las mayores compresiones, y oscilan alrededor de 2.61 a 4.5 kg/cm²

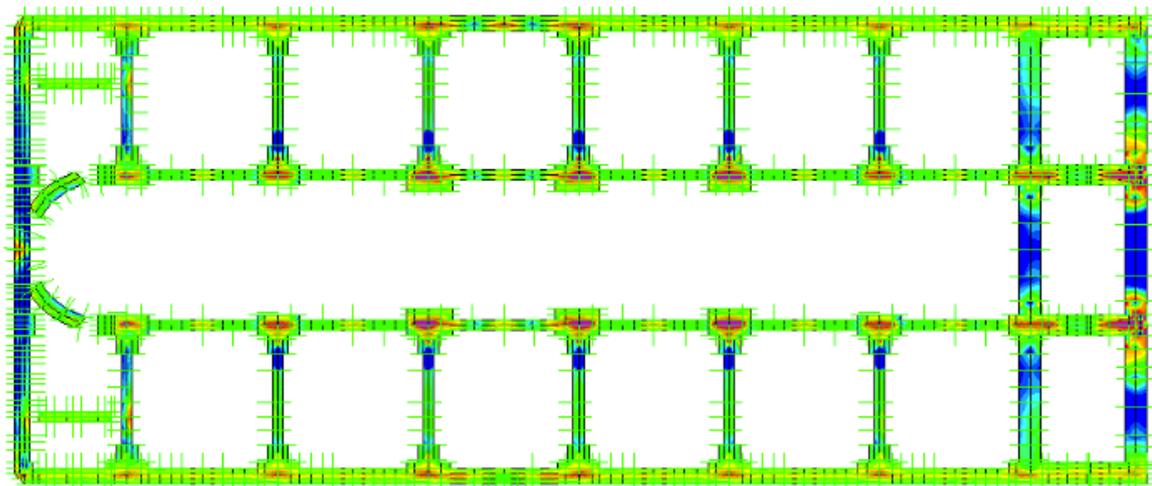


Ilustración 48: Esfuerzos de compresión y tracción en el nivel de piso

6.1.2.2 Pórticos Longitudinales

Pórtico longitudinal F comprendido entre los ejes 2 – 8

Los vértices inferiores pertenecientes a las ventanas localizadas en la fachada de la calle Santa Ana presentan esfuerzos máximos de compresión en los claros 3-4, 5-6 y 6-7 alcanzando valores de 8 y hasta 11 kg/cm². En la base de las columnas ubicadas entre los ejes 4 y 5 también existen esfuerzos altos de compresión con valores entre 9 y 11 kg/cm². Respecto a las tracciones generadas las máximas que se pueden observar llegan a un valor de 0.5 kg/cm² y están presentes en casi todos los arcos que comprende el pórtico longitudinal F.

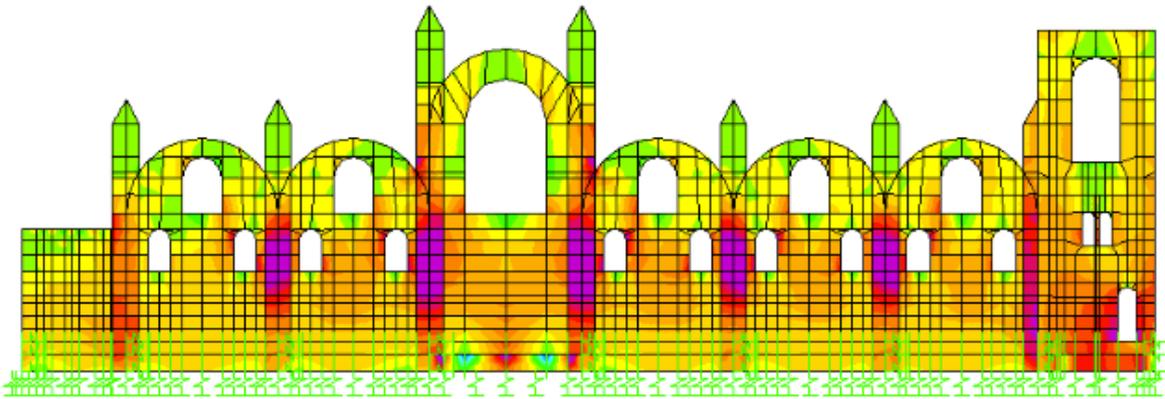


Ilustración 49: Esfuerzos en el eje longitudinal F

Pórtico longitudinal D comprendido entre los ejes 2 – 8

Los esfuerzos máximos de compresión se presentan en la base de las columnas 4, 5, 6, 7, llegando a un máximo de 11.23 a 17.49 kg/cm². La mampostería de ladrillo puede resistir con seguridad hasta 5 veces más estos valores a compresión.

En esta zona la tracciones se muestran en la clave de los arcos comprendidos entre los ejes 2 y 3, 6 y 7, alcanzando valores de 6 y 9 kg/cm². Cabe indicar que a partir de los 3 kg/cm² se espera la aparición de fisuras.

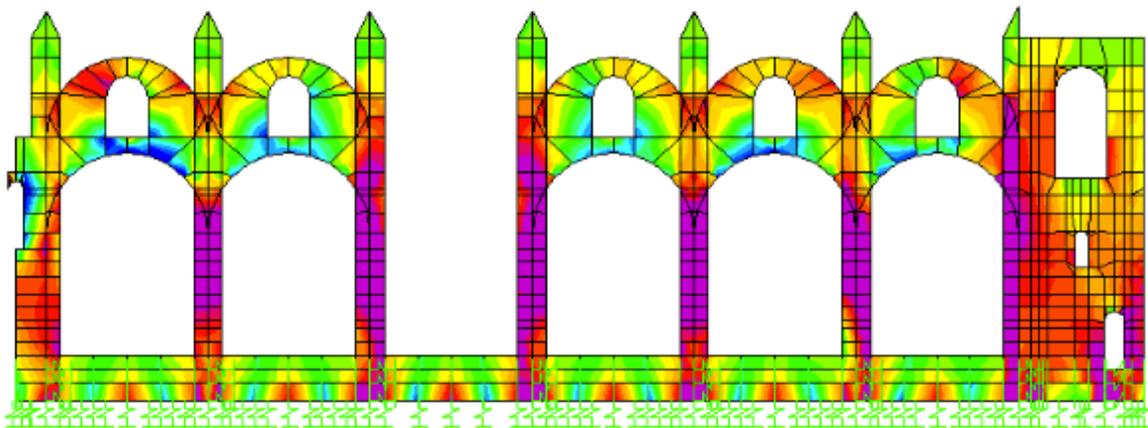


Ilustración 50: Esfuerzos en el eje longitudinal D

Pórtico longitudinal C comprendido entre los ejes 2 – 8

Los esfuerzos máximos de compresión se producen en la base de las columnas 4, 5, y 6 teniendo un rango de variación entre 19 y 22 kg/cm². En el caso de los esfuerzos de tracción estos se sitúan en los claros de los arcos superiores que comprenden los ejes 2 – 3 y 7 – 8 con valores desde 4 a 6 kg/cm², estas zonas son las de potenciales fisuras.

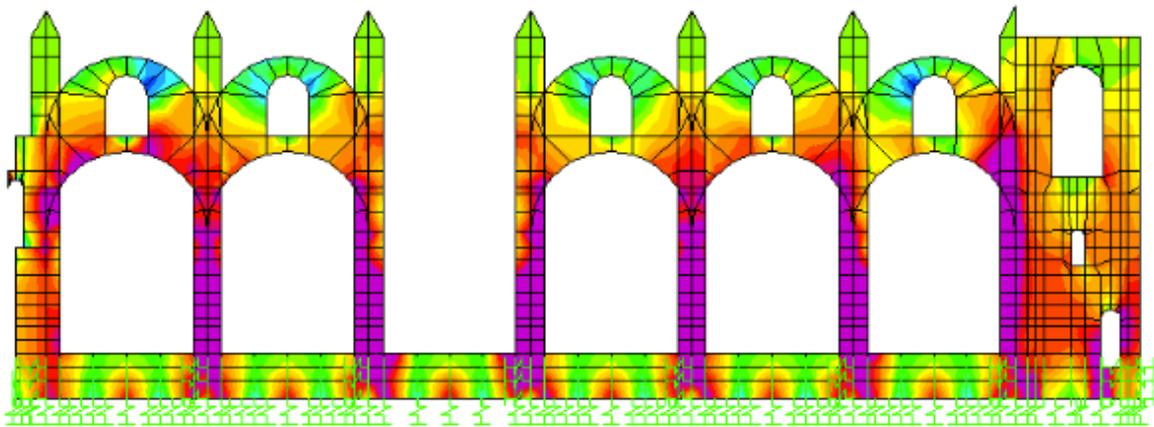


Ilustración 51: Esfuerzos en el eje longitudinal C

Pórtico longitudinal A comprendido entre los ejes 2 – 8

En este pórtico que corresponde a la fachada de la calle Sucre se presentan esfuerzos de compresión en la base de las columnas de los ejes 4 y 5, en un rango de variación de 9.40 a 11.93 kg/cm², además en la zona donde se ubica la puerta de acceso lateral, se observan esfuerzos de compresión que alcanzan valores de 12 y 13 kg/cm². En cuanto a esfuerzos de tracción no se observan valores significativos.

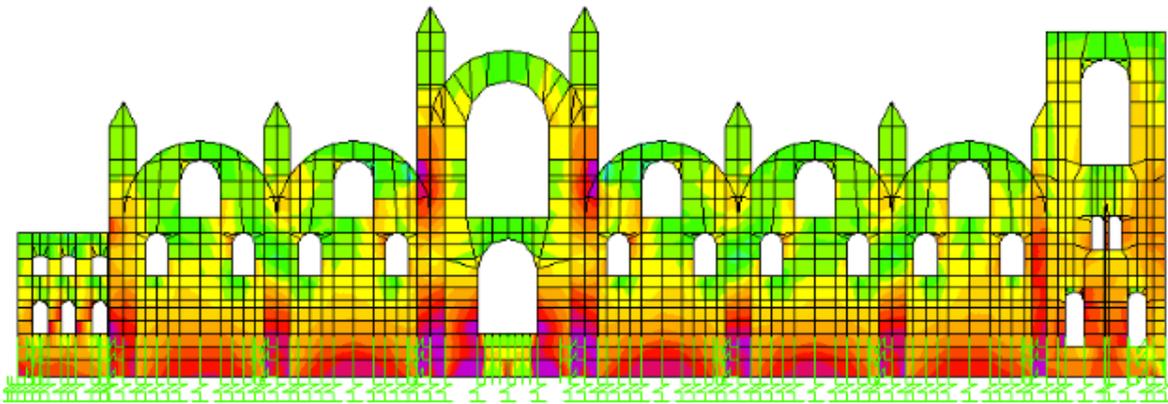


Ilustración 52: Esfuerzos en el eje longitudinal A

6.1.2.3 Pórticos Transversales

Pórtico Transversal 2 comprendido entre los ejes A – F

En este pórtico los esfuerzos de compresión máxima se encuentran en los laterales internos izquierdo y derecho de la zona donde se ubica el altar mayor, los valores oscilan entre 7 y 10 kg/cm². En este mismo pórtico en la parte superior de las columnas se generan esfuerzos de compresión que se encuentran alrededor de 12 y 16 kg/cm².

Analizando los esfuerzos de tracción, estos se presentan en la parte de la columna que sirve de apoyo al arco central (ejes C y D) tomando valores de hasta 4.71 kg/cm^2 . Por lo que esta zona es un área de potencial fisuramiento.

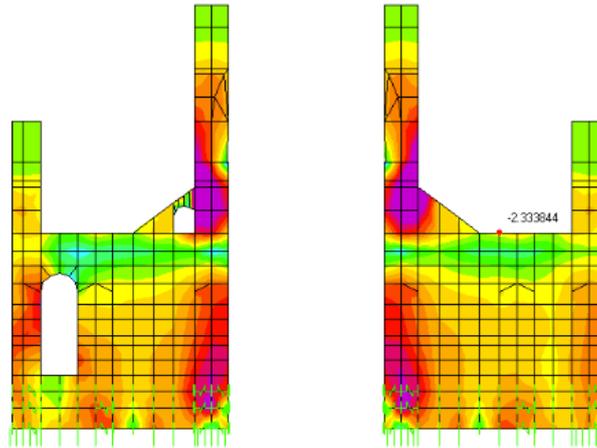


Ilustración 53: Esfuerzos en el eje transversal 2

Pórtico transversal 3 comprendido entre los ejes A – F

Los vanos comprendidos entre los ejes B – C y D – E presentan los mayores esfuerzos de compresión con valores de 14 y 16 kg/cm^2 . Mientras que las mayores tracciones se generan en la clave del arco central con un valor máximo de 9.71 kg/cm^2 . De manera que de acuerdo a los resultados debe producirse una fisura en dicha zona.

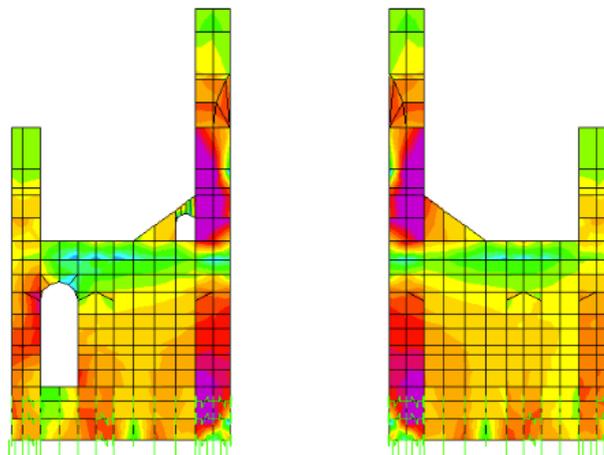


Ilustración 54: Esfuerzos en el eje 3

Pórtico transversal 4 comprendido entre los ejes A – F

Los esfuerzos máximos de compresión se producen en las columnas pertenecientes a los ejes longitudinales C y D, alcanzando valores de 15 kg/cm^2 .

Las tracciones máximas se encuentran en la clave de los arcos del domo que se ubican entre los ejes B – C y D – E, llegando a valores de 2.37 kg/cm^2 .

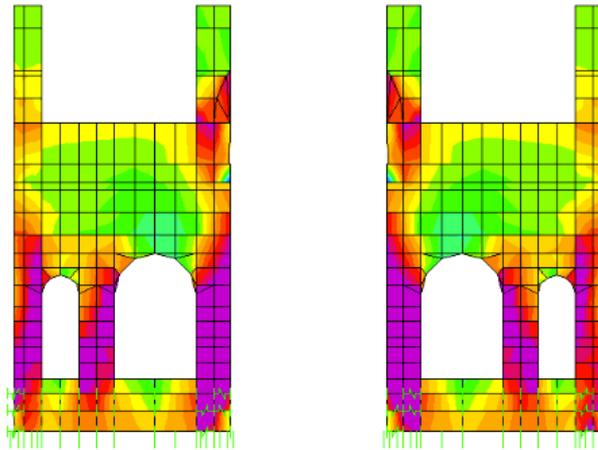


Ilustración 55: Esfuerzos en el eje 4

Pórtico transversal 5 comprendido entre los ejes A – F

Los esfuerzos máximos de compresión se producen en las columnas correspondientes a los ejes longitudinales C y D, alcanzando valores de 15 y 18 kg/cm^2 .

Las tracciones máximas se encuentran en la clave de los arcos del domo que se ubican entre los ejes B – C y D – E, llegando a valores de 4 y 5 kg/cm^2 . En esta zona se debe producir una fisura.

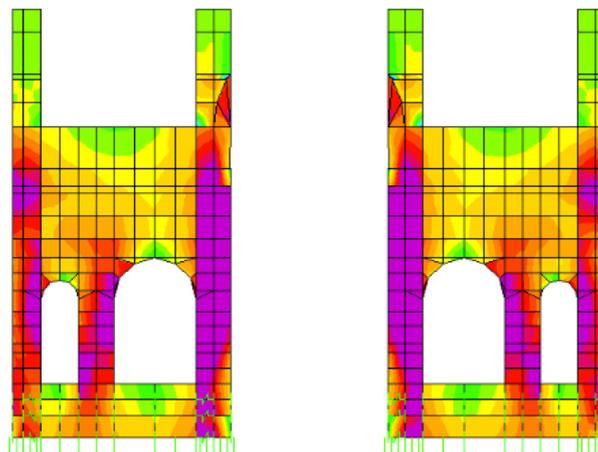


Ilustración 56: Esfuerzos en el eje 5

Pórtico transversal 6 comprendido entre los ejes A – F

Las compresiones máximas se generan a nivel de la base, en los puntos bajo las columnas de los ejes longitudinales C y D, tomando valores de 18 kg/cm^2 .

De manera similar que los anteriores pórticos, los esfuerzos de tracción se sitúan en el arco central, donde las tracciones alcanzan un valor de 6 kg/cm^2 . Se genera fisura.

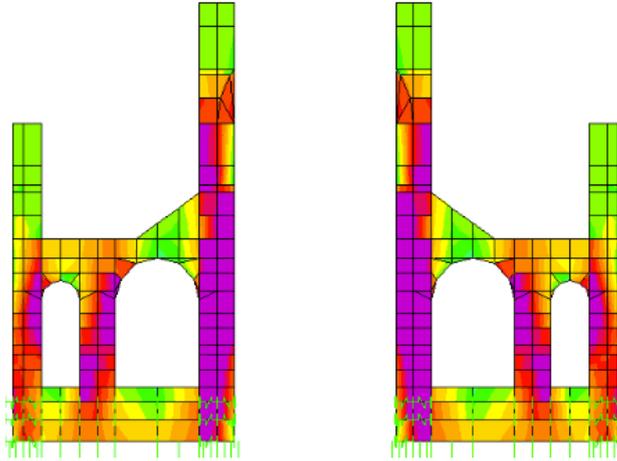


Ilustración 57: Esfuerzos en el eje 6

Pórtico transversal 7 comprendido entre los ejes A – F

Este pórtico tiene un comportamiento semejante al pórtico 6, con la única diferencia que la magnitud del esfuerzo a compresión aumenta a 20 kg/cm^2 . Los esfuerzos a tracción máximos, la magnitud y la ubicación son semejantes a los del pórtico anterior con una pequeña variación en su valor de 5 y 7 kg/cm^2 . Por tanto existe fisuración.

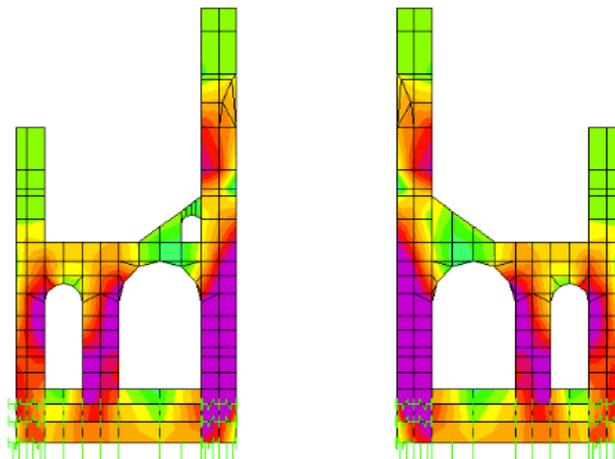


Ilustración 58: Esfuerzos en el eje 7

6.1.2.4 Sección Posterior

Los esfuerzos máximos de compresión no se encuentran en la pared posterior, sino en la base de sección cilíndrica que sirve de apoyo a la cúpula que cubre la zona del altar mayor, llegando a valores de 4 kg/cm^2 .

Si nos situamos en la zona de las ventanas en la parte posterior de la estructura cilíndrica, encontramos tracciones que oscilan entre 6 y 8 kg/cm^2 , y



como consecuencia de estos valores se espera la aparición de fisuras en esta zona.

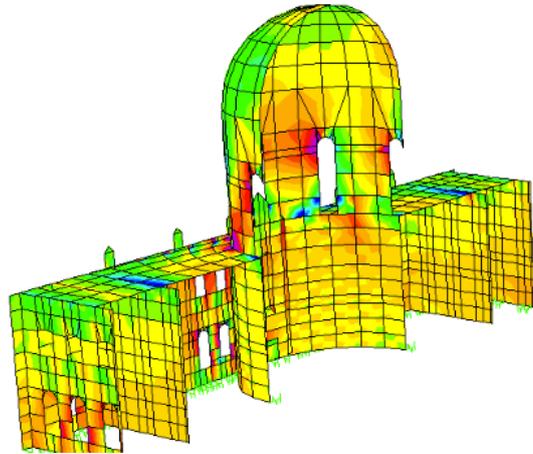


Ilustración 59: Esfuerzos parte posterior

6.1.2.5 Cúpulas

Primera Cúpula Alta

La zona en la cual se presentan los esfuerzos máximos de compresión se encuentra sobre los pórticos, donde se apoya el anillo estructural de la cúpula, alcanzando un valor máximo de 9.4 kg/cm^2 .

Las tracciones que se producen en esta cúpula se localizan en las zonas sobre las columnas centrales de la estructura, entre los ejes transversales 6 y 7, estos esfuerzos llegan a un valor que varía de 7 a 9 kg/cm^2 , ocasionando fisuras en esta zona.

Segunda Cúpula Alta

Esta cúpula es la más alta, los esfuerzos máximos de compresión se encuentran en las zonas de apoyo entre los ejes longitudinales C y D, el máximo esfuerzo corresponde a un valor de 12.2 kg/cm^2 .

Los esfuerzos e tracción máxima se encuentran en los mismos ejes que las compresiones, con la diferencia que se ubican sobre los marcos de las ventanas, con un valor máximo de 4.35 kg/cm^2 . Por lo que el software predice la aparición de fisuras.

Tercera Cúpula Alta

Las máximas compresiones se localizan en la unión de la cúpula con el eje transversal 3, alcanzando un valor máximo de 10.24 kg/cm^2 .

Las mayores tracciones se encuentran en el eje transversal 3 con un valor máximo de 5 kg/cm^2 .

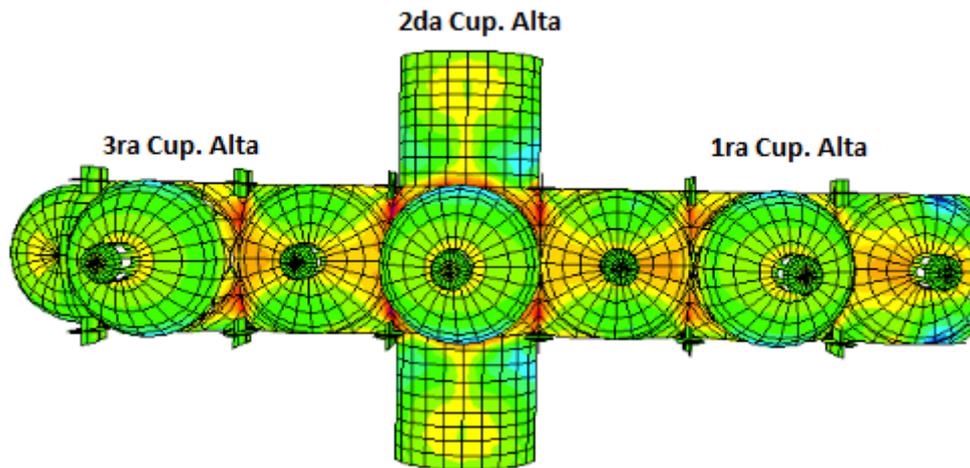


Ilustración 60: Esfuerzos de compresión cúpulas altas vista exterior

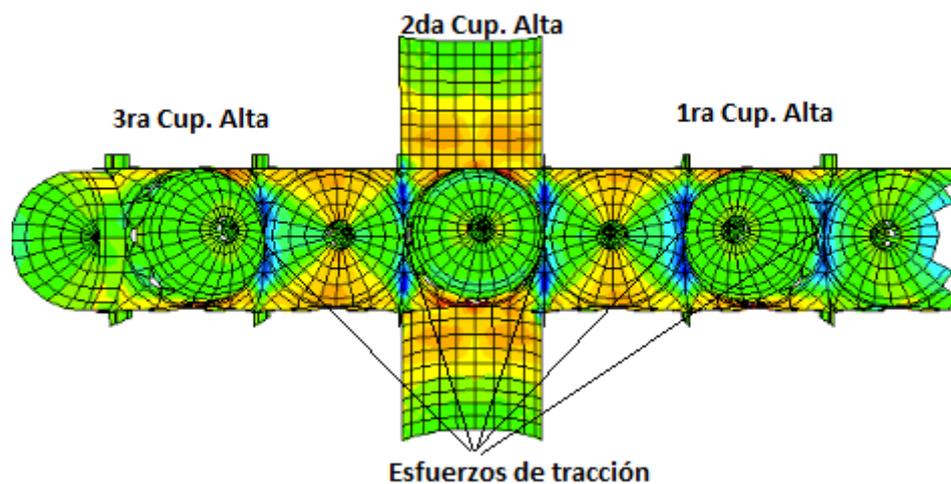


Ilustración 61: Esfuerzos de tracción cúpulas altas vista interior

Primera Cúpula Baja

Los esfuerzos máximos de compresión se encuentran localizados en el eje transversal 7, llegando a un valor de 2 y 4 kg/cm².

Las tracciones se presentan en el eje transversal 8, tomando un valor 5 kg/cm², lo cual indica fisuramiento.

Segunda Cúpula Baja

Los esfuerzos máximos de compresión corresponden a las zonas de apoyo en los ejes transversales 5 y 6, los cuales alcanzan valores de 4 y 6 kg/cm².

Las tracciones se generan en las zonas de unión con las cúpulas altas en los ejes longitudinales C y D, teniendo un valor mayor de 4.33 kg/cm² en el eje C.

Tercera Cúpula Baja

Los máximos valores de compresión se encuentran ubicados en la zona de apoyo de la cúpula, entre los ejes transversales 3 y 4, alcanzando valores de 8 kg/cm^2 .

Los esfuerzos máximos de tracción se producen en la unión de la cúpula con los pórticos longitudinales alcanzando valores de 5 kg/cm^2 .

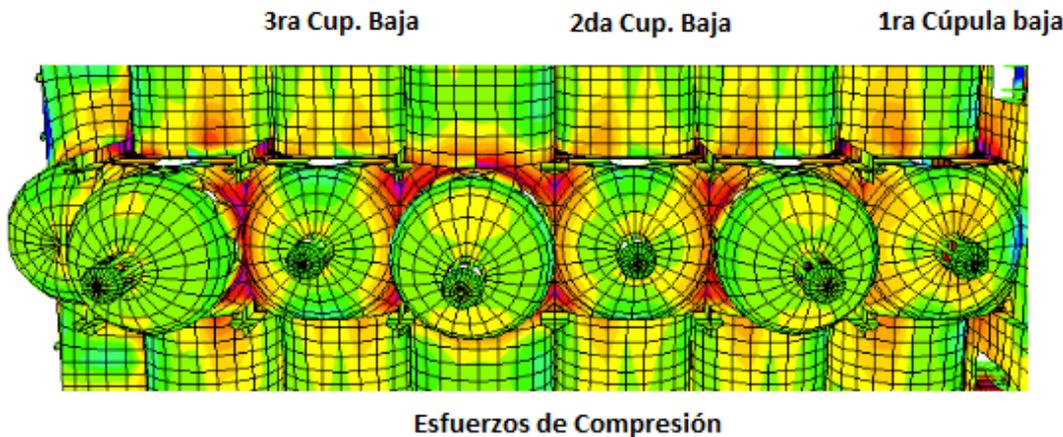


Ilustración 62: Esfuerzos de compresión cúpulas bajas vista exterior

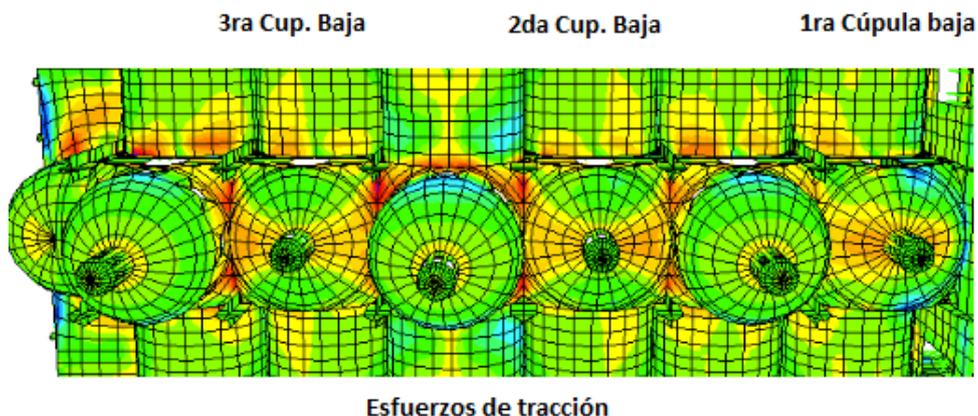


Ilustración 63: Esfuerzos de tracción cúpulas bajas vista exterior

6.1.2.6 Cúpula Posterior

Los esfuerzos máximos de compresión se generan en la zona de conexión de la cúpula y parte superior del pórtico 2, en donde se observan compresiones de hasta 9 kg/cm^2 . Otra zona que presenta compresiones significativas se halla localizada en la unión cúpula – losa (terraza), aquí se observan valores máximos de 15 kg/cm^2 .

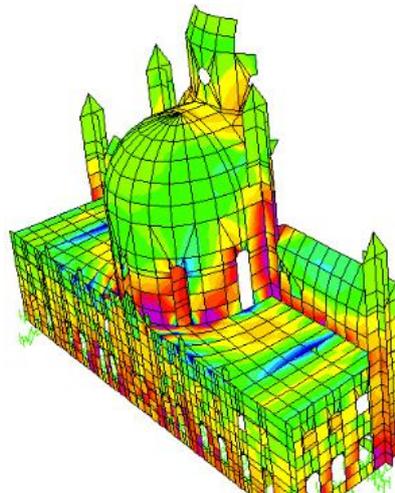


Ilustración 64: Esfuerzos de compresión en la cúpula posterior

Las tracciones ubicadas en la parte superior de la estructura cilíndrica tienen valores que oscilan entre 1.5 y 2 kg/cm². Otras tracciones se presentan en la unión de la losa con la fachada posterior que se localiza en la calle Padre Aguirre alcanzando un valor de 8 a 11 kg/cm².

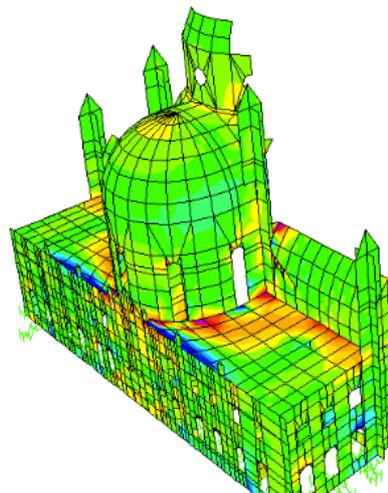


Ilustración 65: Esfuerzos de tracción en la cúpula posterior, zona del presbiterio

6.1.2.7 Torres

Los esfuerzos máximos de compresión que muestran las torres, son más significativos a partir de la terraza, es decir, a partir del nivel 32 m tomando como referencia el nivel de piso, el rango en que varían estos esfuerzos es de 0.5 a 2.5 kg/cm².

En la zona de la terraza donde se encuentra el monumento a Santa Ana, se localizan esfuerzos de compresión de 0.5 kg/cm². Otra zona que presenta compresiones importantes, es la ubicada en la parte central de las torres, aquí se tienen valores de 5 a 7 kg/cm²; estos esfuerzos corresponden al área de las columnas que sirven de apoyo en el eje C y D.

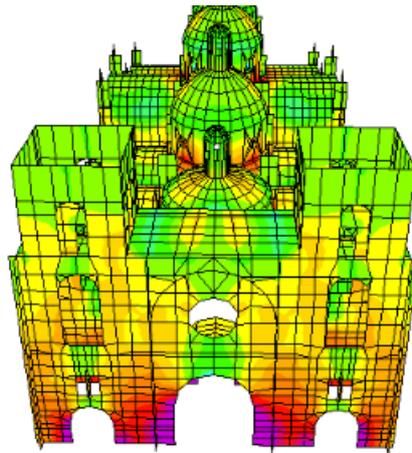


Ilustración 66: Esfuerzos de compresión en la terraza ejes C y D

Cabe resaltar que el arco que se encuentra bajo la terraza antes mencionada, distribuye los esfuerzos hacia los muros de las torres y éstos a su vez transmiten las cargas al suelo.

Las áreas que comprenden las paredes laterales de la entrada principal tienen un valor máximo de compresión de 7.2 kg/cm^2 . En las zonas de los muros entre los ejes C y D existen valores de compresión de 9 y 12 kg/cm^2 .

Las compresiones de los muros que se encuentran en los ejes A – C y D – F, alcanzan valores de 6 y 8 kg/cm^2 .

Como un dato importante cabe resaltar que la zona del rosetón tanto superior como inferior no presenta valores significativos en cuanto a tracciones, su valor máximo alcanza 1 kg/cm^2 .

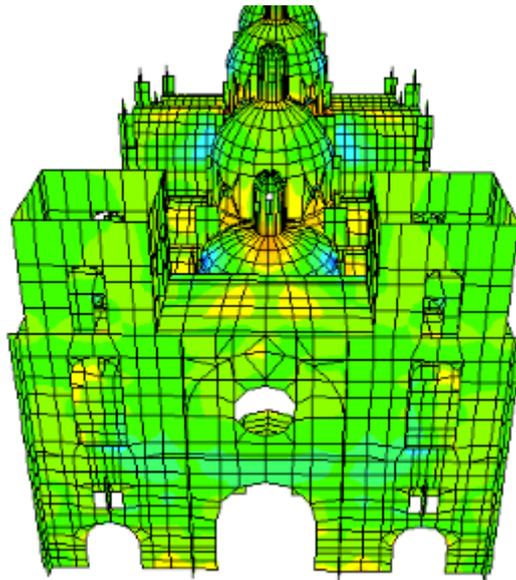


Ilustración 67: Esfuerzos de tracción

Los valores de tracción sobre el arco de la puerta en la entrada principal oscilan entre 1 y 2 kg/cm². Las zonas que presentan máxima tracción son las esquinas inferiores de las ventanas que se encuentran en la parte superior a un nivel de 19.67 m, a partir del nivel de piso, presentando valores de 1.5 hasta 3.5 kg/cm².

Los resultados anteriores se presentan en la siguiente tabla resumen, los valores resaltados corresponden a los máximos esfuerzos:

ESFUERZOS MÁXIMOS BAJO LA ACCIÓN DE CARGA MUERTA			
Lugares donde se analizan los esfuerzos		Esfuerzo máximo de compresión	Esfuerzo máximo de tracción
		kg/cm ²	kg/cm ²
Base		19.06	-----
Pórticos longitudinales	eje A	13	2
	eje C	22	-----
	eje D	17.49	-----
	eje F	11	0.5
Pórticos transversales	eje 2	16	-----
	eje 3	16	-----
	eje 4	15	2.37
	eje 5	18	-----



	eje 6	18	-----
	eje 7	20	-----
Cúpulas	1 ^a cup. Alta	9.4	-----
	2 ^a cup Alta	12.2	-----
	3 ^a cup Alta	10.24	-----
	1 ^a cup Baja	4	-----
	2 ^a cup Baja	6	-----
	3 ^a cup Baja	8	-----
Sección posterior		4	-----
Torres		12	3.5

Tabla 32: Resumen de máximos esfuerzos de compresión y tracción

6.1.3 Relación comparativa de las patologías existentes en la estructura de la Catedral Nueva de Cuenca con los esfuerzos obtenidos en el modelo bajo la acción de CM

Una vez analizadas las zonas donde se producen los esfuerzos máximos de tracción y compresión, y a la vez identificadas las fisuras en cada uno de los planos, se puede realizar entonces una comparación de resultados. El propósito de la comparación es justificar las patologías existentes y conocer las zonas vulnerables de la estructura para anticipar daños significativos en la misma.

Con este criterio a continuación se enumeran las diferentes fisuras y su relación con los esfuerzos de tracción generados en las distintas zonas de la Catedral:

6.1.3.1 Zona 1 - Fachada Calle Sucre

6.1.3.1.1 Vista Exterior:

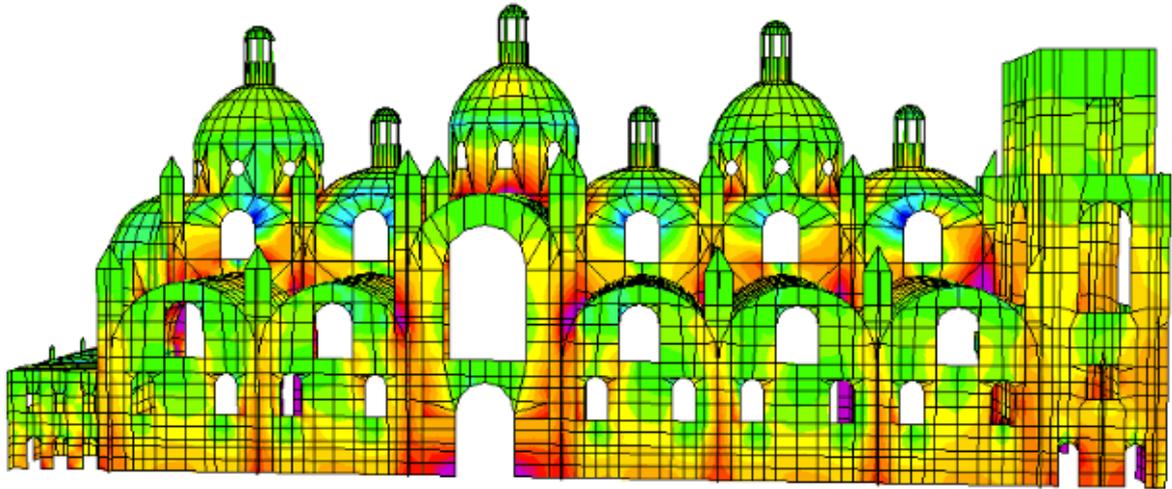


Ilustración 68: Esfuerzos fachada calle Sucre vista externa

En el gráfico se observa que en las zonas de los arcos de las ventanas que se encuentran cercanas al nivel de los anillos que apoyan las cúpulas altas y bajas, se presentan tracciones considerables, tanto en la parte superior de los arcos como en los vértices izquierdo y derecho. Estos esfuerzos han provocado la aparición de fisuras como las que se han identificado en la lámina 18 (F34, F35, F36, F37), en gran parte de esta zona se encuentran tracciones significativas que hacen de ella un lugar potencial para la generación de fisuras y progreso de las ya existentes.

6.1.3.1.2 Vista Interior:

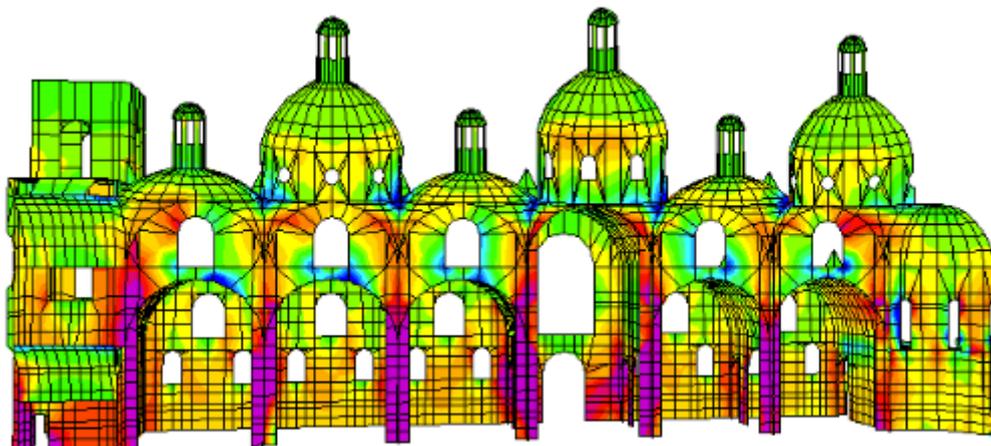


Ilustración 69: Esfuerzos fachada calle Sucre, vista interna

La zona correspondiente a la parte interna de la fachada Sucre muestra esfuerzos de tracciones tanto en las secciones de las ventanas bajas pertenecientes a los domos como las altas pertenecientes a las cúpulas. Las láminas 13 y 15 hacen referencia a esta zona, en ellas se puede observar las



siguientes fisuras: F22, F25, F26 y F27. Las tracciones que se destacan en este lugar coinciden con el ubicación de las fisuras: F22, F26, y F27, por lo que existe correspondencia entre los resultado del modelo y el estado actual de la estructura.

6.1.3.2 Zona 2 – Fachada Calle Santa Ana

6.1.3.2.1 Vista Exterior:

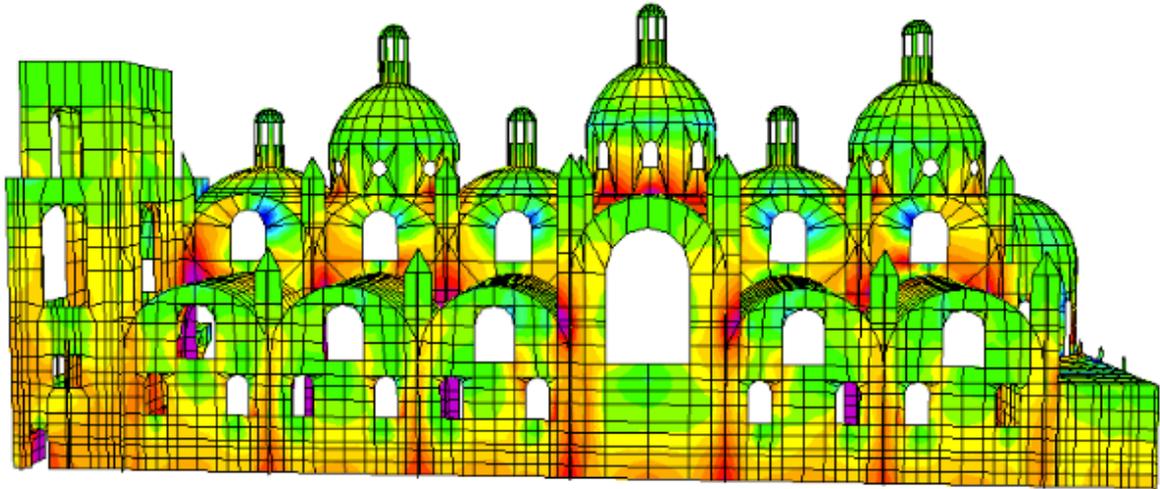


Ilustración 70: Esfuerzos fachada calle Santa Ana, vista externa

La fachada de la calle Santa Ana presenta un comportamiento semejante a la fachada anterior, en cuanto a esfuerzos de tracciones se refiere, las partes afectadas por estos esfuerzos coinciden una vez más con los arcos y zonas bajas de las ventanas en la parte exterior de las cúpulas altas y bajas. En la lámina 19 se encuentran localizadas las fisuras detectadas: F38, F39 y F40, las cuales se ajustan a las zonas donde se presentan las mayores tracciones en el modelo. Sin embargo, cabe indicar que bajo la tercera cúpula alta existen tracciones importantes que no se ven reflejadas en la realidad, aunque esta zona presenta problemas significativos de humedad no se observan fisuras a simple vista.



6.1.3.2.2 Vista Interior:

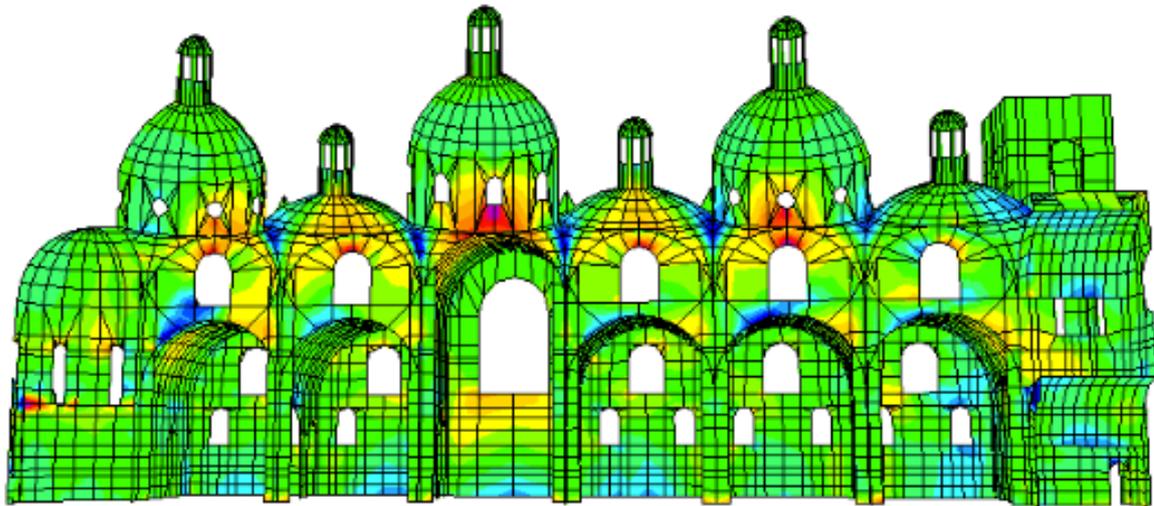


Ilustración 71: Esfuerzos en la fachada calle Santa Ana, vista interna

En el interior de esta fachada encontramos esfuerzos de tracción importantes en sitios como: vértice izquierdo y derecho de las ventanas bajo las cúpulas altas y bajas, zonas de las ventanas tanto de las que conforman los domos como las que forman parte de las cúpulas en la nave central. Las láminas 14 y 16 contienen las fisuras correspondientes a esta zona entre ellas tenemos las siguientes: F23, F24, F30, F31, F32 y F33, de todas estas fisuras citadas se puede mencionar la fisura 31 que se localiza en el inferior de la ventana en donde se observan tracciones que convierten a esta zona en un punto vulnerable. El mismo caso sucede en la zona ubicada entre los ejes transversales 2 – 3, zona en la cual existen altos esfuerzos de tracción pero que no se ven evidenciados en la estructura.

6.1.3.3 Zona 3 – Fachada frontal calle Benigno Malo

6.1.3.3.1 Vista Exterior:

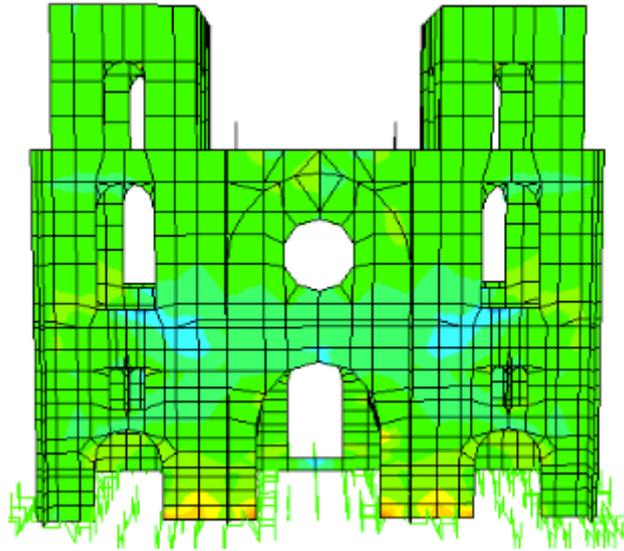


Ilustración 72: Esfuerzos en la fachada frontal, calle Benigno Malo

En la fachada frontal que da a la calle Benigno Malo se presenta la fisura localizada en la parte central del rosetón en sentido transversal (lámina 17), ésta fisura es quizá la más importante que se ha producido en esta magna estructura. La fisura tiene una abertura de consideración, ya que es posible observarla desde el nivel de la calle y también en su parte interior, aunque en esta zona donde se ubica el coro la fisura se encuentra rellanada ocultando su magnitud.

El comportamiento que se esperaría en el modelo no es el mismo observado en la estructura, es decir, la zona donde se halla esta fisura no corresponde a un sitio donde se generen esfuerzos de tracción importante, aunque cabe resaltar que sí existen tracciones que demuestran en un porcentaje bajo, la aparición de fisuras. En los vértices de los ventanales laterales al rosetón también se hallan tracciones considerables aunque no se observan fisuras visibles en la estructura, se podrían pensar que existen fisuras internas que son inapreciables.



6.1.3.3.2 Vista Interior:

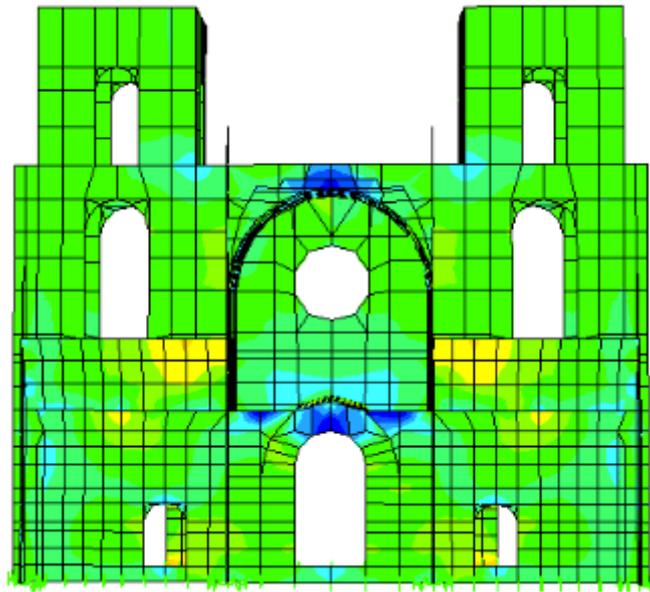


Ilustración 73: Esfuerzos fachada frontal calle Benigno Malo vista posterior

En la zona del coro en el interior de la Catedral se ubica el rosetón, que como ya mencionamos anteriormente presenta una importante fisura en la parte frontal y de igual manera presenta en su lado opuesto. Si nos ubicamos en la zona del coro y revisamos la lámina 1 notamos claramente las fisuras en lo alto y bajo del rosetón; esta zona muestra tracciones pequeñas en rango pero que respaldan las fisuras F1 y F2, sin embargo es posible observar zonas de tracciones altas en la parte superior de los arcos del rosetón y la puerta principal que no se manifiestan en la realidad, es decir, no hay fisuras visibles pero estas podrían encontrarse en el interior de la estructura.



6.1.3.4 Zona 4 – Fachada posterior calle Padre Aguirre

6.1.3.4.1 Vista Externa:

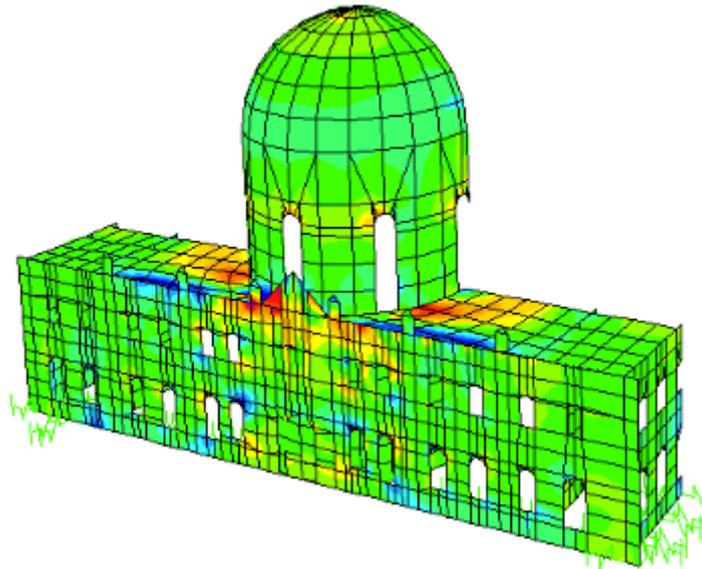


Ilustración 74: Esfuerzos en la fachada posterior calle Padre Aguirre

En la parte externa e interna de la fachada posterior en la calle Padre Aguirre se muestran tracciones en la zona superior e inferior de las ventanas, estos esfuerzos no se manifiestan en la estructura debido a que no alcanzan valores significativos que supongan la aparición de fisuras en la misma.

Tracciones importantes que puedan ser posibles puntos críticos en la zona posterior, se localizan en los puntos de unión de la losa, muro y pared de la estructura cilíndrica como se observa en la figura. Aunque el modelo presenta estas tracciones de posibles fisuras, la estructura no se encuentra afectada por ellas.



6.1.3.5 Zona 5 – Cúpulas Altas y Bajas

6.1.3.5.1 Vista Externa:

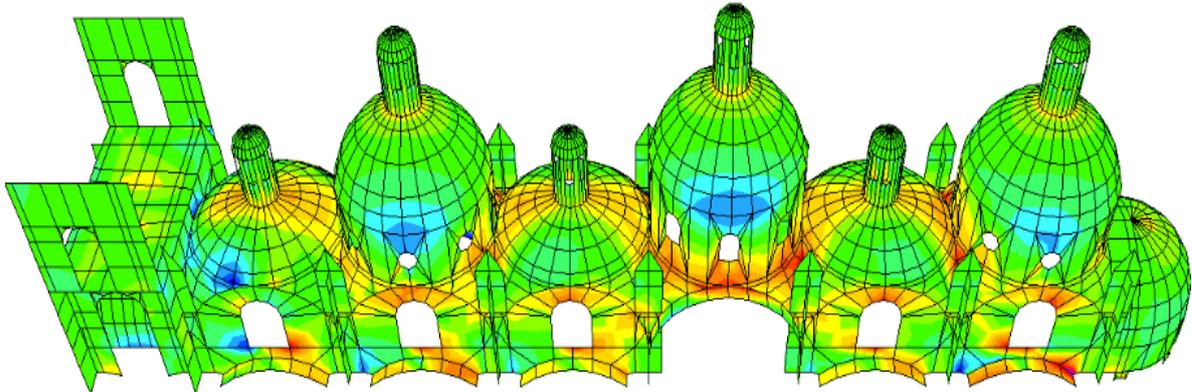


Ilustración 75: Esfuerzos en las cúpulas altas y bajas vista exterior

En la parte superior de la nave central de la Catedral encontramos las 6 cúpulas que conforman esta estructura, las tres cúpulas bajas semiesféricas presentan esfuerzos de tracción menores que las cúpulas altas, sin embargo estos esfuerzos han suscitado pequeñas grietas o fisuras presentes en la edificación, entre algunas de ellas podemos citar: F10 localizada en lámina 5, F13 localizada en lámina 6 éstas dos fisuras se encuentran en la segunda cúpula baja, F5 localizada en la lámina 2 y presente en la primera cúpula baja. Si analizamos el gráfico presentado del modelo, podemos observar que en la primera cúpula baja existen esfuerzos de tracción importantes representados por el color azul en la zona límite a los arcos donde se apoya la cúpula, en las dos cúpulas restantes se presentan tracciones en zonas similares pero en menor magnitud causando también fisuramientos.

En las tres cúpulas altas se presentan zonas de tracción considerables en la planta circular donde están apoyadas, debido a estos esfuerzos se observan fisuras en los azulejos que recubren estos elementos estructurales, en la lámina 19 se muestra la fisura F40 localizada en la segunda cúpula alta en dirección de las nervaduras. En este punto cabe resaltar que existen otras fisuras alrededor de las cúpulas mayores que no han podido ser documentadas debido al difícil acceso, sin embargo coinciden con las zonas críticas o sitios de mayor tracción que presenta el modelo.



6.1.3.5.2 Vista Interior:

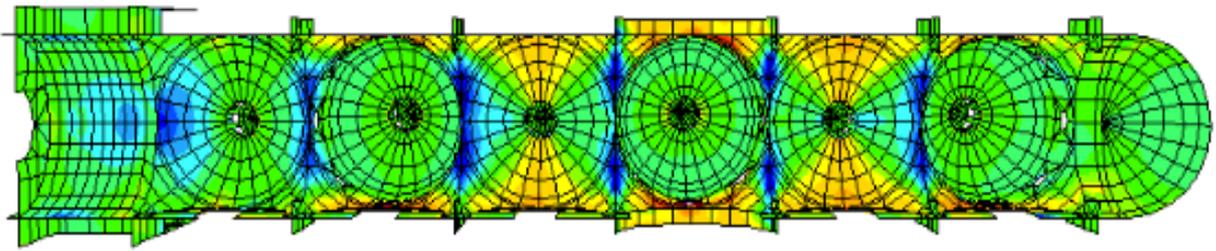


Ilustración 76: Esfuerzos en las cúpulas altas y bajas vista interior

En la parte interna de las cúpulas se encuentran esfuerzos de tracción que corresponden a las zonas de los arcos que sirven de apoyo a las cúpulas altas y bajas. Se puede observar que todos los pórticos transversales tienen un comportamiento similar de esfuerzos, por lo que es fácil detectar las zonas o puntos críticos donde se presentan las fisuras en la estructura. En las láminas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 que pertenecen a los cortes transversales en todo lo largo de la Catedral, se observan las siguientes fisuras: F5, F10, F13, F17, F19.

Como se muestra en el gráfico los puntos críticos (denotados por el color azul) son todos los arcos transversales que conforman la nave central de la Catedral en su parte interna, estos puntos coinciden con las fisuras localizadas en la estructura e identificadas en las láminas. Como un dato adicional, cabe mencionar que todos los arcos centrales tienen fisuras en su parte media, las cuales fueron observadas con binoculares de largo alcance pero muchas de ellas no pudieron evidenciarse por fotografías debido a los contrastes de luz que afectaron su visibilidad.

En lo que respecta a las paredes que forman las cúpulas, se debe indicar que estas también contienen fisuras en sus nervaduras, un claro ejemplo de esto se lo puede observar en la primera cúpula alta, la misma que ya atravesó una importante intervención por problemas de graves fisuras que paulatinamente iban aumentando su espesor provocando inestabilidad en la zona de apoyo (anillo de soporte); la medida de corrección para este problema fue la colocación de un cinturón de fibra carbono que ayude a reforzar la parte inferior de la cúpula para controlar el avance de la abertura en la misma.

Las demás cúpulas a pesar que no presentan tracciones de esta magnitud, tienen fisuras de consideración debido al comportamiento propio de la mampostería, por tanto deben también ser tratadas para evitar daños mayores en la estructura.

6.1.3.6 Zona 6 – Pórticos transversales vista interna

De manera similar que en los arcos centrales de la nave donde se hallan las cúpulas, en los arcos centrales de las dos naves laterales se observan esfuerzos de tracción en su parte media. Estas tracciones se ven reflejadas en las fisuras presentes en la estructura, las mismas que nacen en la clave del arco y algunas de ellas se prolongan hacia la parte superior en la pared del domo.

En las láminas: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 que contienen los cortes transversales de la estructura se puede observar las fisuras producidas por estos esfuerzos de tracción, entre las fisuras identificadas tenemos: F3, F4, F6, F7, F8, F9, F0, F14, F15, F18, F20. Todas estas fisuras coinciden con los puntos en donde se concentran los esfuerzos que superan el límite que admite la mampostería. Dichas tracciones se generan por el efecto de la fuerza de gravedad en la estructura de la Catedral.

Si bien, la forma de la catedral produce que las cargas gravitacionales de peso propio se transmitan generándose mayoritariamente compresiones en el material, existen ciertas zonas donde inevitablemente se generan tracciones. En éstas la estructura se fisura.

El modelo de cálculo comprueba que, la mayor parte de las fisuras encontradas están en zonas de tracción de la estructura cuando afecta el peso propio del material.

CAPÍTULO 7

7.1 CONCLUSIONES

1. La Catedral la Inmaculada Concepción es considerada uno de los símbolos representativos de la ciudad de Cuenca, el diseño, construcción y estructura misma han hecho de esta edificación una magna y reconocida obra a lo largo de los años. Haciendo un recuento de la etapa constructiva se rescatan los procesos rudimentarios y conocimientos empíricos utilizados para su levantamiento, además del ingenio y habilidad de los promotores de esta obra para resolver los problemas suscitados en las diferentes etapas de construcción. A pesar que la construcción duró alrededor de 70 años, cada una de las zonas no denotan cambios significativos que reflejen diferentes estilos y técnicas de construcción. Los elementos estructurales de mayor envergadura construidos son las cúpulas revestidas de azulejos, que en sí son las que identifican a esta obra desde cualquier punto de la ciudad. Sin embargo, a pesar de ser esta una de las construcciones más importantes en el ámbito cultural, social y religioso no se le ha dado el mantenimiento requerido.
2. En los datos encontrados en la investigación histórica constructiva de la Catedral, se pudieron rescatar los planos de diseño del Hno. Stihle en los cuales no se encontraban detalles técnicos referentes a la construcción de cimientos, muros, columnas, etc., que ayuden a disipar dudas sobre cómo fueron fabricados los distintos elementos. Una parte importante de la información encontrada en esta investigación se la obtuvo del archivo de la Curia Arquidiosesana de Cuenca; en donde documentan los libros de obra correspondientes a la construcción de la catedral. Dichos libros contienen registro de los gastos en cuanto a materiales, herramientas y lugares de adquisición, además se encuentra detallado el número de trabajadores, salarios y demás información que ha sido significativa para establecer el avance y los períodos de ejecución de la obra. Cabe indicar que algunos materiales como el mármol y herramientas como, martillos, cadenas de fierro galvanizado, poleas móviles, carretillas, etc fueron importadas a través de un colaborador del Hno. Juan llamado Carlos Ordóñez, quien adquirió estos materiales en Europa.
3. La construcción de la catedral fue realizada con técnicas empíricas, herramientas rudimentarias y maestros de obra, quienes tenían la difícil tarea de levantar esta edificación guiados únicamente por su conocimiento adquirido en el día a día. Por tanto, la ejecución de esta

obra se la realizó con maestros seleccionados que a pesar de no conocer técnicas y métodos avanzados de construcción supieron materializar los diseños del Hno, Sthiele con gran ingenio y habilidad, lo cual se ve reflejado en los alineamientos, plomos y acabados que tiene la Catedral Nueva de Cuenca.

La maqueta de la catedral que fue construida con las especificaciones de los planos y detalles dados por el Hno. Juan Sthiele antes de su muerte, fue un instrumento fundamental para el proceso de construcción.

4. Dentro de la procedencia de los materiales empleados en la fábrica de la catedral, se destacan sectores como Sinincay, Sayausí, Balsay y San Roque, de donde se obtenían las piedras de agua para el inicio de la construcción, otros sectores como: el Tejar proveían de ladrillos para la construcción. Durante el proceso de construcción se adquirieron varios terrenos para la producción de ladrillos, así también se compraron canteras y minas para la extracción de piedra y cal respectivamente. A pesar que se contaba con la propia producción de ladrillos, no era suficiente para abastecer los requerimientos de la construcción, es por este motivo que se hacían grandes pedidos de miles de ladrillos a diferentes personas fabricantes de este material. Como un dato importante que cabe destacar es el control de calidad aplicado en esa época durante todo el proceso constructivo, todos los ladrillos entregados de los diferentes sectores de la ciudad tenían requerimientos en cuanto a su resistencia, motivo por el cual muchas de las entregas fueron canceladas por no contar con las características requeridas en cuanto a su color, forma y superficie.

Los ladrillos solicitados para la construcción de la catedral tenían varios diseños del Hno. Sthiele para lo cual era necesario la compra de moldes con dichas formas.

En lo que se refiere a la cal también se realizada un control de su procedencia para garantizar las resistencia y fraguado del mortero.

5. El ladrillo, mármol, piedras de agua, cal y arena son los materiales fundamentales con los cuales se levantó la Catedral de Cuenca, a pesar que en tiempos pasados no se contaba con medios que garanticen la buena calidad de los materiales, se hacía lo posible por obtener siempre los mejores. Esta es una de las razones por las cuales la Catedral se considera una obra estructuralmente resistente, con elementos que transmiten adecuadamente los esfuerzos, aunque debido a fenómenos físicos y ambientales algunos materiales como los ladrillos presentan en

la actualidad un notable deterioro, como se observa en la pared de la cubierta de los domos ubicados tras la torre sur.

El estudio de materiales realizado en este proyecto de tesis reflejó como resultado una gran diferencia en cuanto a resistencia y propiedades de los mismos, ya que debido a la baja calidad que presentan hoy en día los materiales no fue posible obtener valores que se puedan utilizar como característicos de ellos; es posible justificar la baja resistencia del mortero de los ensayos debido a que el mortero de cal sigue adquiriendo resistencia a través de los años, por lo que un período de 28 días fraguado puede resultar poco tiempo para obtener unos buenos resultados de resistencia. Es por esta razón que los valores asumidos de los distintos materiales proceden de bibliografía recopilada referente a "Edificaciones de Fábrica". En este punto cabe resaltar, que las pruebas efectuadas con muestras de ladrillos sobrantes de la construcción, sí representan valores de resistencia cercanos a la realidad, aunque dichas muestras se encontraban deterioradas por el paso de los años.

6. En el análisis de patologías que se realizó tanto en el interior como exterior de la estructura, se observaron varios daños como: fisuras en bóvedas, a nivel de arcos internos en la mayoría de los domos y cúpulas, lo cual ocasiona un riesgo y hace que ciertas partes de la estructura sean vulnerables, es decir, estos daños causan una disminución en la capacidad que tiene la estructura al momento de absorber las cargas como el peso de la misma o cargas sísmicas en caso de suscitarse. Las fisuras dependiendo de la abertura que tengan son puntos críticos donde además se tienen problemas de penetración del agua lluvia.

Los arcos que forman los pórticos transversales de la estructura presentan fisuras en su clave, problema que se registra en la mayoría de ellos, constatando que el arco no solamente trabaja bajo esfuerzos de compresión, sino existen esfuerzos de tracción que se presentan por el efecto del peso propio y comportamiento de la fábrica, dichos esfuerzos hacen que las zonas correspondientes a las claves de los arcos sean consideradas como zonas de potencial fisuramiento.

7. Dentro de los daños observados, cabe indicar que existen numerosas zonas donde se registra infiltración de agua, un grave problema que enfrenta la zona de la cripta, ya que la circulación del agua en partes internas de la mampostería ha generado el debilitamiento de la misma y como consecuencia se tiene el desprendimiento del enlucido en sus paredes laterales. Esta infiltración del agua es causada por la incorrecta evacuación del agua lluvia. Otras zonas de visible afección por la humedad son las correspondientes a las paredes superiores de los

domos y cúpulas, destacando el quinto domo y primera cúpula baja como las áreas más afectadas. En la parte externa de la cubierta en las zonas donde se ubican las bajantes de agua y rejillas de desagüe, el crecimiento de vegetación aunque no se presenta como un problema grave, es preciso tomarlo en cuenta debido a que la vegetación como el musgo, genera retención de humedad y por consecuencia problemas en el deterioro de la estructura. Estos problemas de humedad que se presentan en las zonas mencionadas de la Catedral deben ser solucionados para conservar su geometría y evitar problemas de inestabilidad.

8. El modelo obtenido en este proyecto contempla todos los detalles constituyentes de la estructura, refiriéndose con esto a la cimentación, muros con cofre de mampostería, columnas rellanadas de H° Cicolópeo, paredes, espesores de mampostería en cúpulas y paredes, etc. Todo este conjunto de especificaciones se ven reflejadas en el buen funcionamiento de los elementos que actúan en la estructura bajo cargas gravitacionales.

El modelo de cálculo comprueba que la mayor parte de las fisuras encontradas están en zonas de tracción de la estructura cuando actúa el peso propio del material; sin embargo cabe indicar que algunas fisuras no justificadas en el modelo por la acción de esfuerzos de tracción pueden ser producto de la geometría establecida, defectos constructivos, esfuerzos laterales como sismos, etc. Siendo estas causas un trabajo que se encuentra fuera del alcance de la presente tesis.



ANEXOS

ANEXO 1

DATOS DEL SUELO DE CIMENTACIÓN ESTUDIO REALIZADO POR EL ING. MARCO ERAZO EL 6 DE JUNIO DE 1972

Estudio geológico del terreno de cimentación de la Catedral de Cuenca

Las observaciones correspondientes se realizaron en una calicata de cinco metros de profundidad excavada al pie de la torre Sur de la catedral cuyas cimentaciones están a cuatro metros.

Las características geológicas son similares a las del terreno donde se construyó la casa de la cultura que en términos generales, consiste en conglomerados alterados distinguiéndose una capa superficial con rodados que se cortan fácilmente con herramientas y más abajo otra, de rodados gruesos y resistentes.

En el presente caso, tenemos el siguiente perfil:

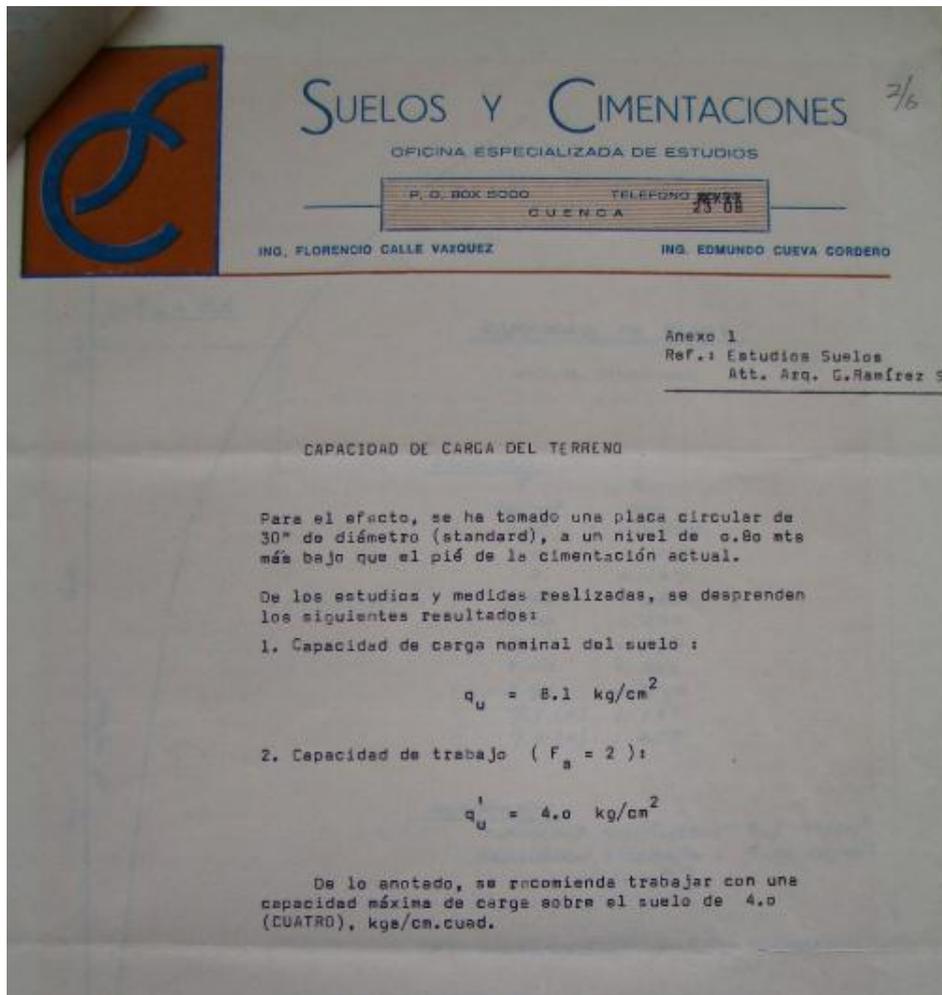
- d) 1.5m de relleno de cascote de ladrillo y otros desperdicios de construcción
- e) 2.3 m de conglomerado constituido por grava muy alterada con pocos rodados gruesos que se rompen fácilmente todo está cementado con arena arcillosa alterada.
- f) 1,2 m de conglomerado grueso con piedras de hasta 50 cm cementado con grava alterada y arena también alterada. El nivel de aguas freáticas debe estar antes de los 15 m dado el estado de humedad de la roca que contiene agua higroscópica. Es probable que a pocos metros más abajo se presente conglomerado más fresco aunque no se puede desechar la presencia de lentes pequeños de arcilla o arena arcillosa que no va a influir mayormente sobre el comportamiento del conjunto, cuyo espesor debe sobrepasar los 20 metros.



Capacidad soportante: En lo que respecta a la capacidad soportante de este tipo de terrenos es muy variable, los ensayos con penetrómetro no son apropiados por la heterogeneidad del terreno, es más conveniente una prueba de carga directa.



ESTUDIO REALIZADO POR “SUELOS Y CIMENTACIONES” ING. FLORENCIO CALLE – ING. EDMUNDO CUEVA.



Capacidad de carga del terreno: Para el efecto se ha tomado una placa circular de 30" de diámetro, a nivel de 0.8 metros más bajo que el pie de la cimentación actual.

De los estudios y medidas realizadas, se desprenden los siguientes resultados:

1. Capacidad de carga nominal del suelo:
 $q_u = 8.1 \text{ kg/cm}^2$
2. Capacidad de trabajo $F_s=2$
 $q'_u = 4.0 \text{ kg/cm}^2$

De lo anotado se recomienda trabajar con una capacidad máxima de carga sobre el suelo de 4.0 kg/cm².

ANEXO 2

COMPORTAMIENTO DE LA FÁBRICA

Valor de la resistencia a compresión f

La mayoría de los elementos estructurales de fábrica están sometidos a esfuerzos de compresión, estos esfuerzos y otros factores como la geometría y resistencia de las piezas, mezcla, la dosificación, la succión del ligante, el aparejo o taba, el tamaño de la probeta ensayada, etc han sido analizados durante varios años realizando ensayos y estudio teóricos de los cuales se puede concluir que la resistencia a compresión de la fábrica depende fundamentalmente de la resistencia a compresión de la pieza y el espesor relativo del tendel (Capa de mortero que se extiende sobre cada hilera de ladrillos al construir un muro para sentar la siguiente).

La heterogeneidad y anisotropía del material que compone la fábrica marca su comportamiento resistente, distinguiéndolo de otros materiales sin resistencia a tracción pero homogéneos como el hormigón en masa. La esencia del fenómeno reside en la distinta deformabilidad de piezas y mortero. Esta deformabilidad depende de la naturaleza y propiedades de los constituyentes y de la geometría relativa del aparejo (modo de colocación de los ladrillos). Los factores principales son:

- α (relación entre el grueso de las piezas y espesor de los tendeles h_m/h_b).
- La dimensión de las piezas
- La regularidad del aparejo

Varios ensayos han sido realizados para obtener fórmulas que proporcionen la resistencia de la fábrica a partir de las características geométricas y mecánicas de los componentes y su aparejo. Una de las fórmulas empíricas es:

$$f = K \cdot f_b^A \cdot f_m^B$$

Donde:

f : resistencia a compresión de la fábrica (N/mm^2)

f_b : resistencia a compresión de los bloques (N/mm^2)

f_m : resistencia a compresión del mortero (N/mm^2)

K , A , B : coeficientes que se ajustan experimentalmente (K varía entre 0.5 – 1.0, A tiene un valor de 0.60 y B alrededor de 0.25)

El ACI 530.99 propone la siguiente fórmula:

$$f = 2.8 + 0.2f_b \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

Para que ésta fórmula sea aplicable el tendel debe ser menor de 16 mm.

Comportamiento bajo esfuerzos de flexo-compresión y corte

Los elementos de fábrica como: muros, paneles, cúpulas, etc están sometidos a esfuerzos de flexo-compresión y corte en su plano, apareciendo en ellos estados de tensión biaxiales. Debido a la fuerte anisotropía existente en la fábrica, causada por la presencia de tendeles y por la propia anisotropía de las piezas, el comportamiento depende de la dirección de los esfuerzos con respecto a la dirección de los tendeles.

El estado exterior solicitante se definirá por los esfuerzos (M, N, V) en cada cara y por el ángulo que forma en dirección de los tendeles, el mismo que influye notoriamente en el comportamiento de la fábrica.

Mecanismo de rotura

Los mecanismos de rotura que se han obtenido en diferentes ensayos se presentan en la siguiente figura:

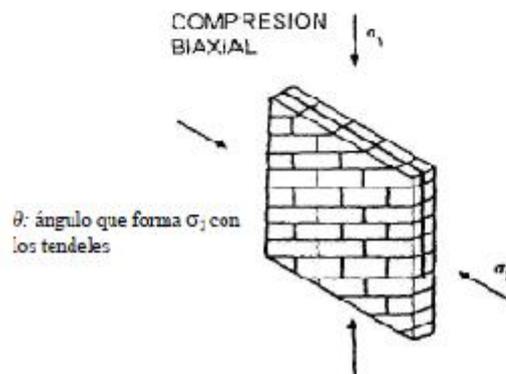
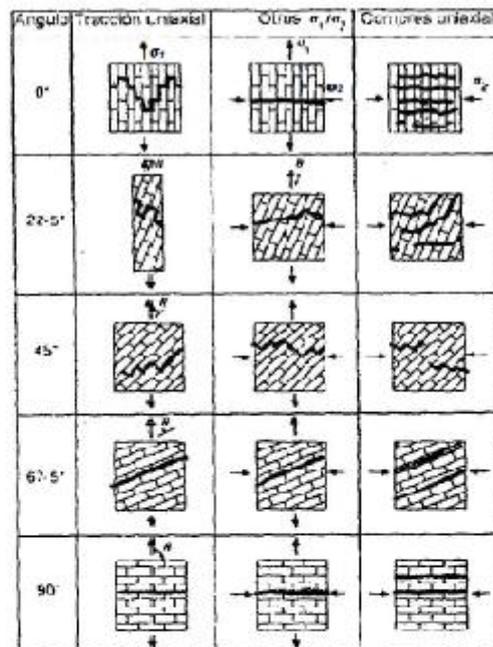


Ilustración 77: Mecanismos de rotura obtenidos por Page al ensayar a rotura los paneles bajo diferentes estados biaxiales de tensiones.

Según Hamid y Drysdale plantean que para la rotura de las piezas a tracción existen tres posibles mecanismos de rotura:

- Rotura a tracción de piezas y mortero
- Rotura a corte de los tendeles
- Rotura a corte de las llagas (juntas verticales)

Mann y Müller formulan un nuevo criterio para la fábrica con dos hipótesis:

- Por un lado la infinita rigidez de las piezas con respecto al mortero
- La segunda hipótesis considera que las juntas verticales son incapaces de transmitir tensiones tangenciales. Esta afirmación se base en que no suelen estar completamente rellenas y en que no se puede asegurar la adherencia al no estar comprimidas.

El estado tensional en la pieza y junta resulta de sumar dos estados independientes; uno proveniente de realizar un análisis elástico e isótropo de la fábrica bajo esfuerzos axiales, dando como resultado un estado de tensiones normales uniformes, el segundo proviene del cálculo de tensiones tangenciales y de la redistribución de las tensiones normales en pieza y junta bajo esfuerzos de corte dentro del planteamiento de piezas rígidas embebidas en una matriz deformable.

Bajo este estado tensional, los tres posibles mecanismos de rotura son:

- Rotura de tendeles: La rotura se produce por fallo friccional en los tendeles, dando lugar a una fisuración en escalera sin rotura de ladrillos
- Rotura por generación de estados de tracción – corte en las piezas: Corresponde al tramo intermedio, el agotamiento se alcanza cuando la máxima tensión principal alcanza la tensión de tracción de la pieza.
- Rotura a compresión de la fábrica: En el tramo final se representa la rotura cuando la tensión normal máxima (la media debida al esfuerzo axial y el incremento debido al esfuerzo de corte) alcanza la resistencia a compresión de la fábrica.

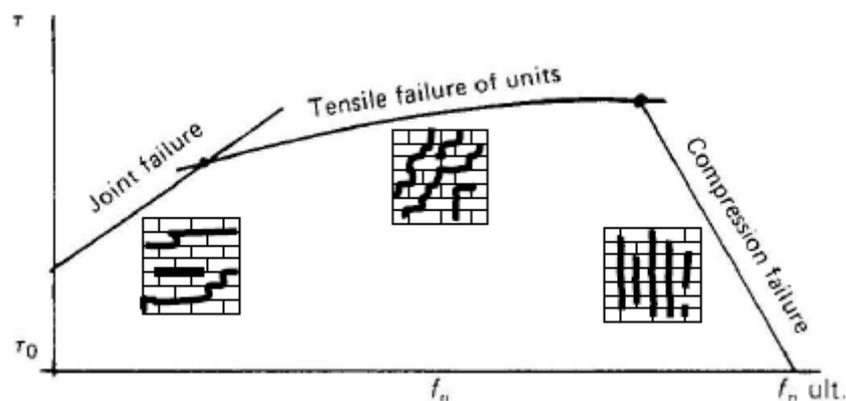


Ilustración 78: Envoltorio de rotura en ejes τ - σ . Mann y Müller.



TABLAS DE VALORES

Las tablas que se muestran a continuación corresponden a los resultados obtenidos de los ensayos realizados en: mortero, ladrillo y mampostería.

LADRILLOS	
Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación Unitaria
0.00	0.000
15.80	0.046
26.74	0.050
32.34	0.056
37.10	0.061
43.12	0.066
48.02	0.071
52.08	0.077
56.14	0.081
61.04	0.086
63.56	0.092
64.96	0.096
68.04	0.102
71.96	0.107
77.00	0.112
82.04	0.117
87.92	0.122
92.82	0.127
91.60	0.132
90.40	0.137



MORTEROS	
Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación Unitaria
0	0
5.32	0.02
6.16	0.025
9.52	0.03
11	0.035
13.48	0.04
15.92	0.045
17.96	0.05
19.72	0.055
20.52	0.06
20.68	0.065
20.52	0.07
20.12	0.075
19.84	0.08
19.32	0.085
18.08	0.09
15.48	0.095

88.60	0.142
80.20	0.148
117.74	0.152
126.28	0.158
138.18	0.163
141.26	0.167
155.40	0.173
155.68	0.178

MAMPOSTERIA	
Esfuerzo (kg/cm ²)	Deformación Unitaria
0.00	0.000
9.84	0.046
14.78	0.050
17.61	0.056
20.35	0.061
24.94	0.066
31.76	0.071
33.23	0.077
36.48	0.081
37.96	0.086
38.26	0.092
36.87	0.096
37.22	0.102
36.70	0.107
35.74	0.112
33.45	0.117
28.64	0.122

ANEXO 3

FOTOS DEL MANUAL DE OBRAS DEL HERMANO STIEHLE

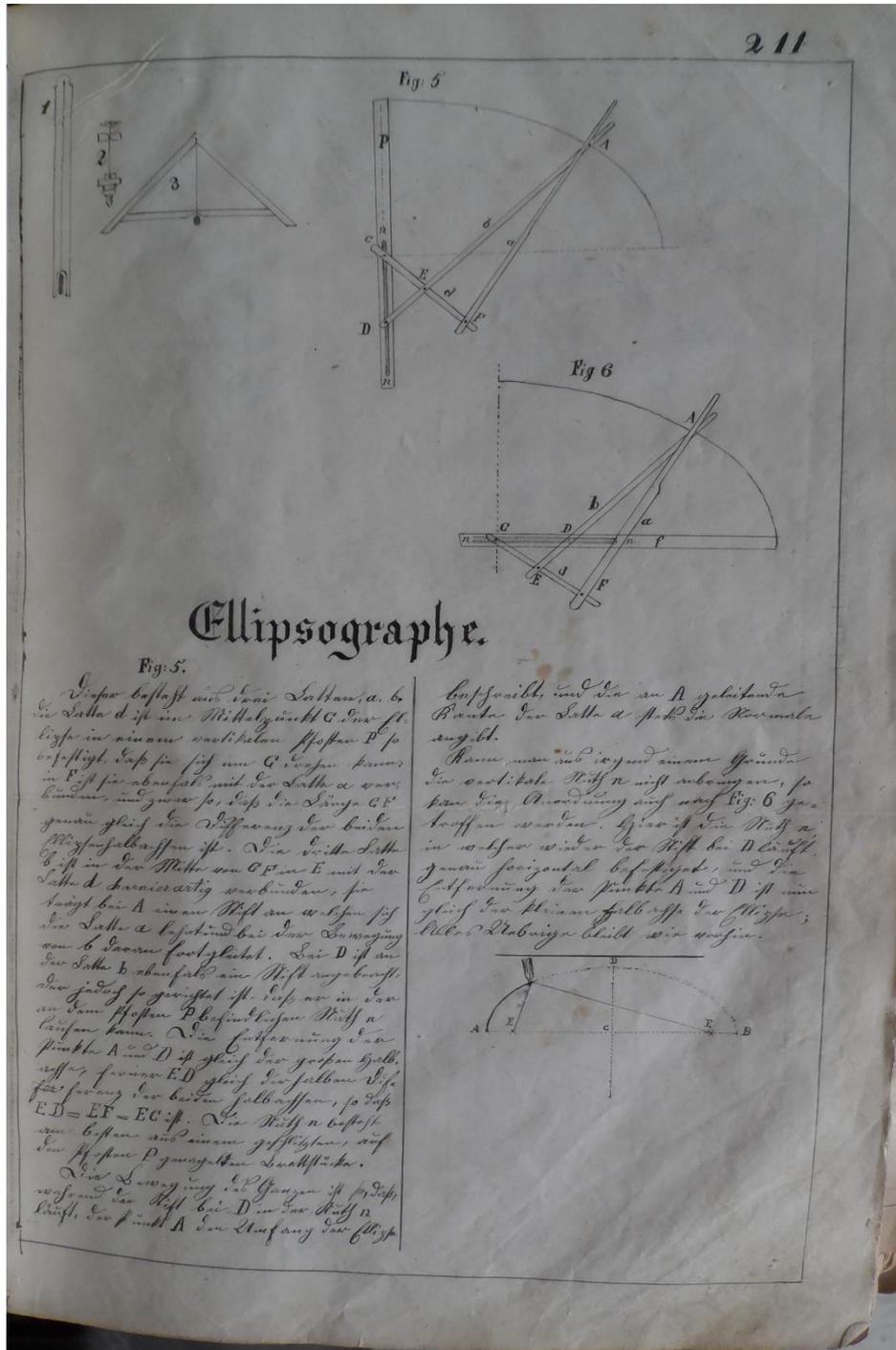


Ilustración 79: "Manual de Obras y Diseños" Hermano Juan Stiehle. p. 211

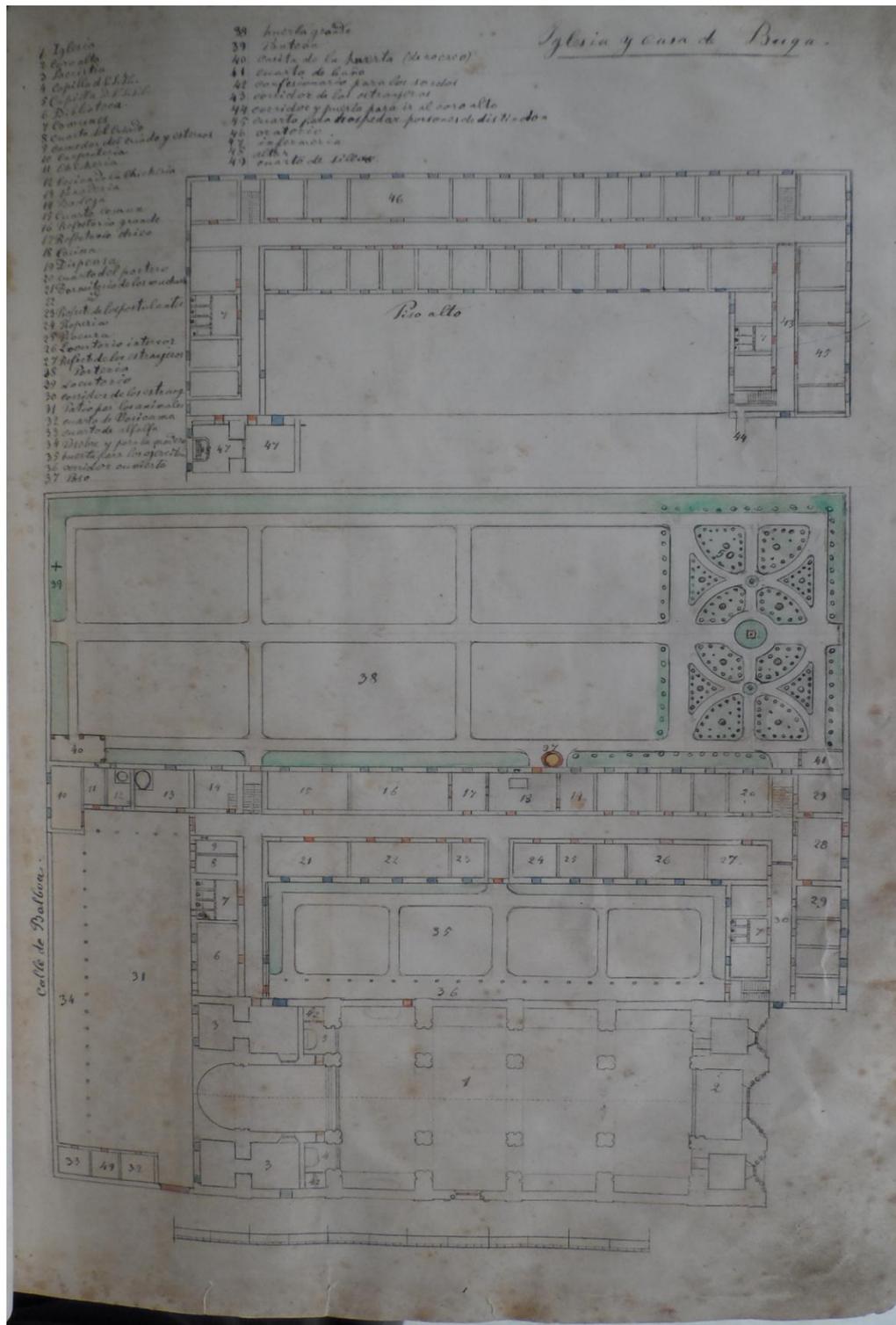


Ilustración 80: "Manual de Obras y Diseños" Hermano Juan Stiehle. p. s/n

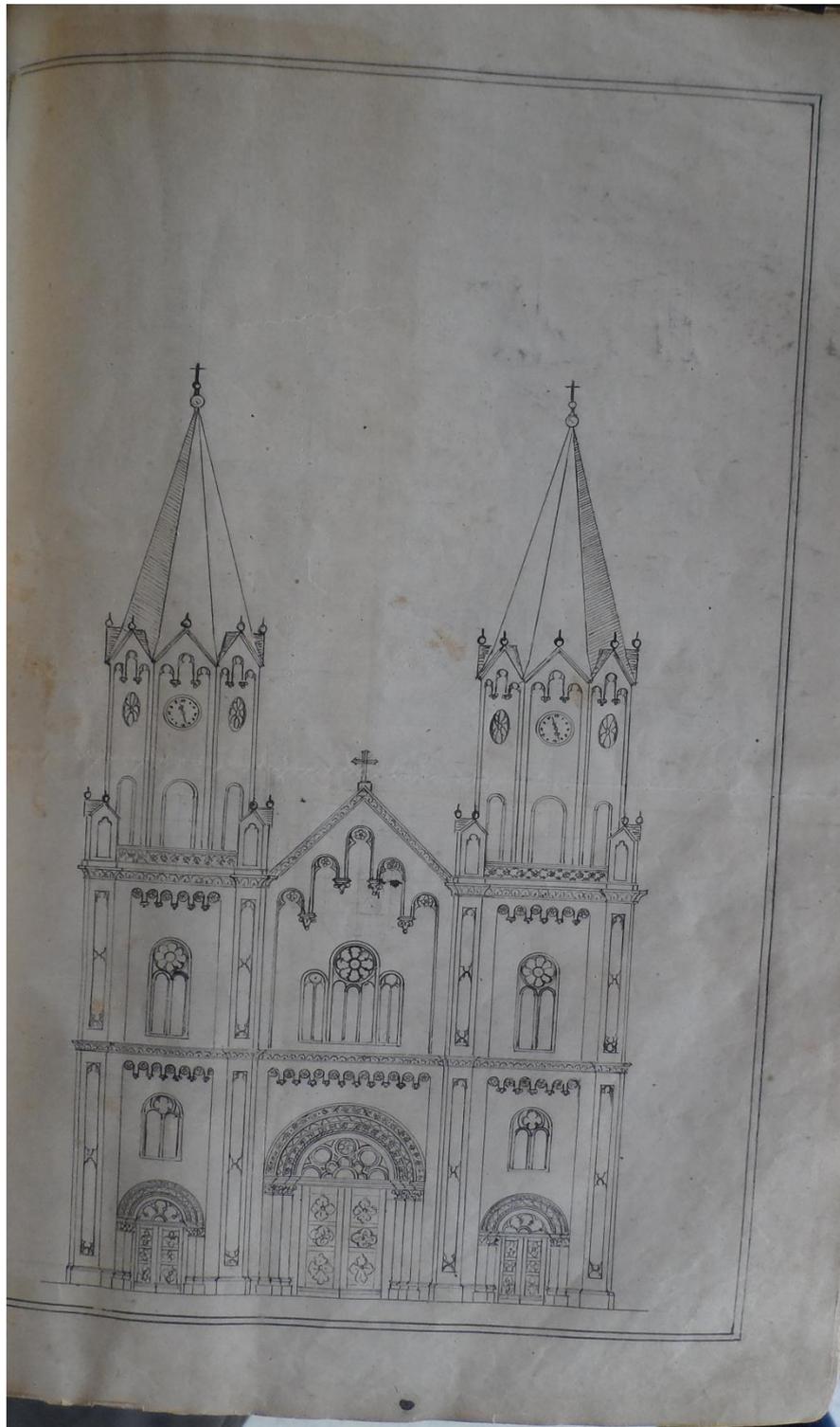


Ilustración 81: "Manual de Obras y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n

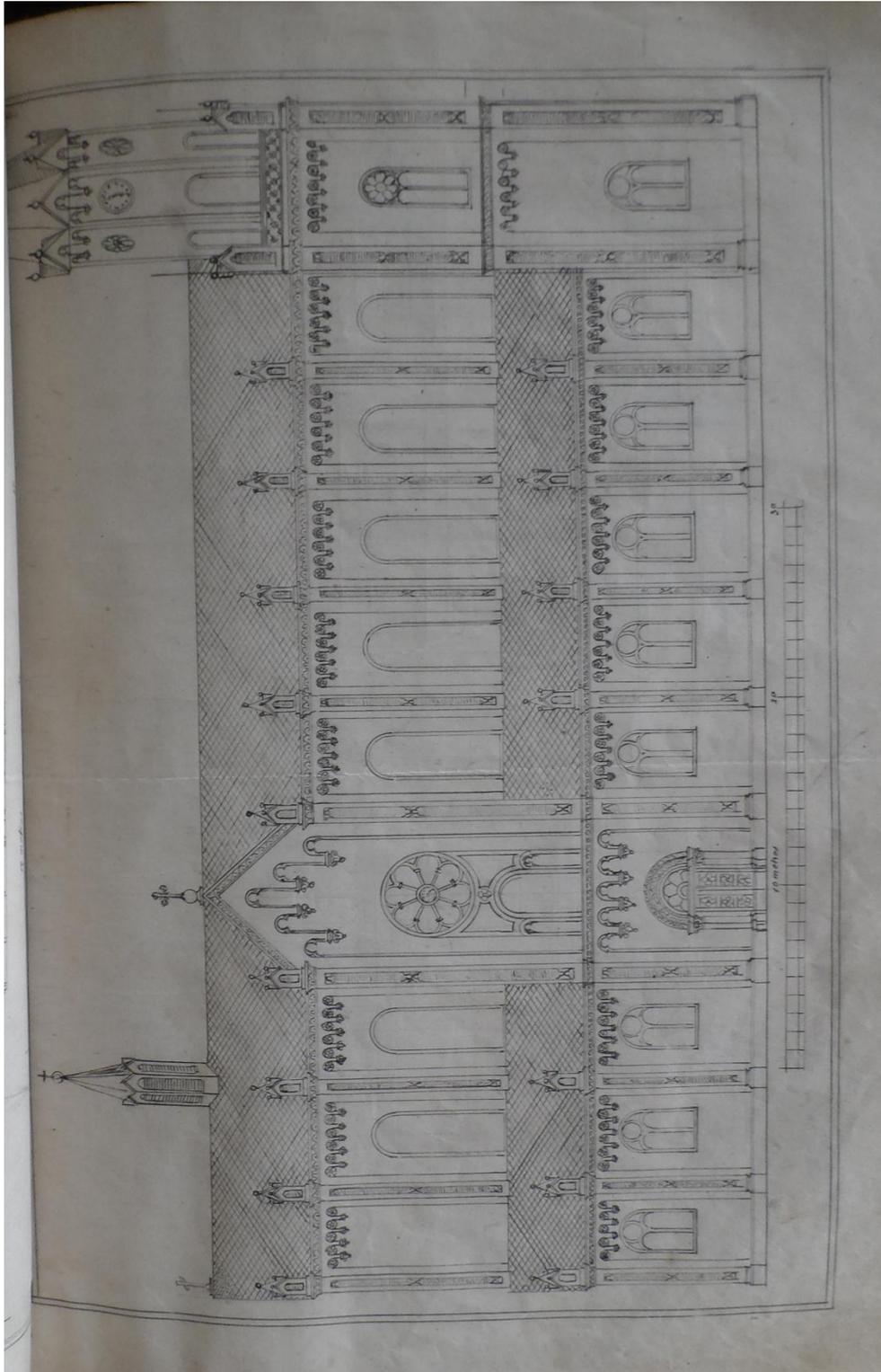


Ilustración 82: "Manual de Obras y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n

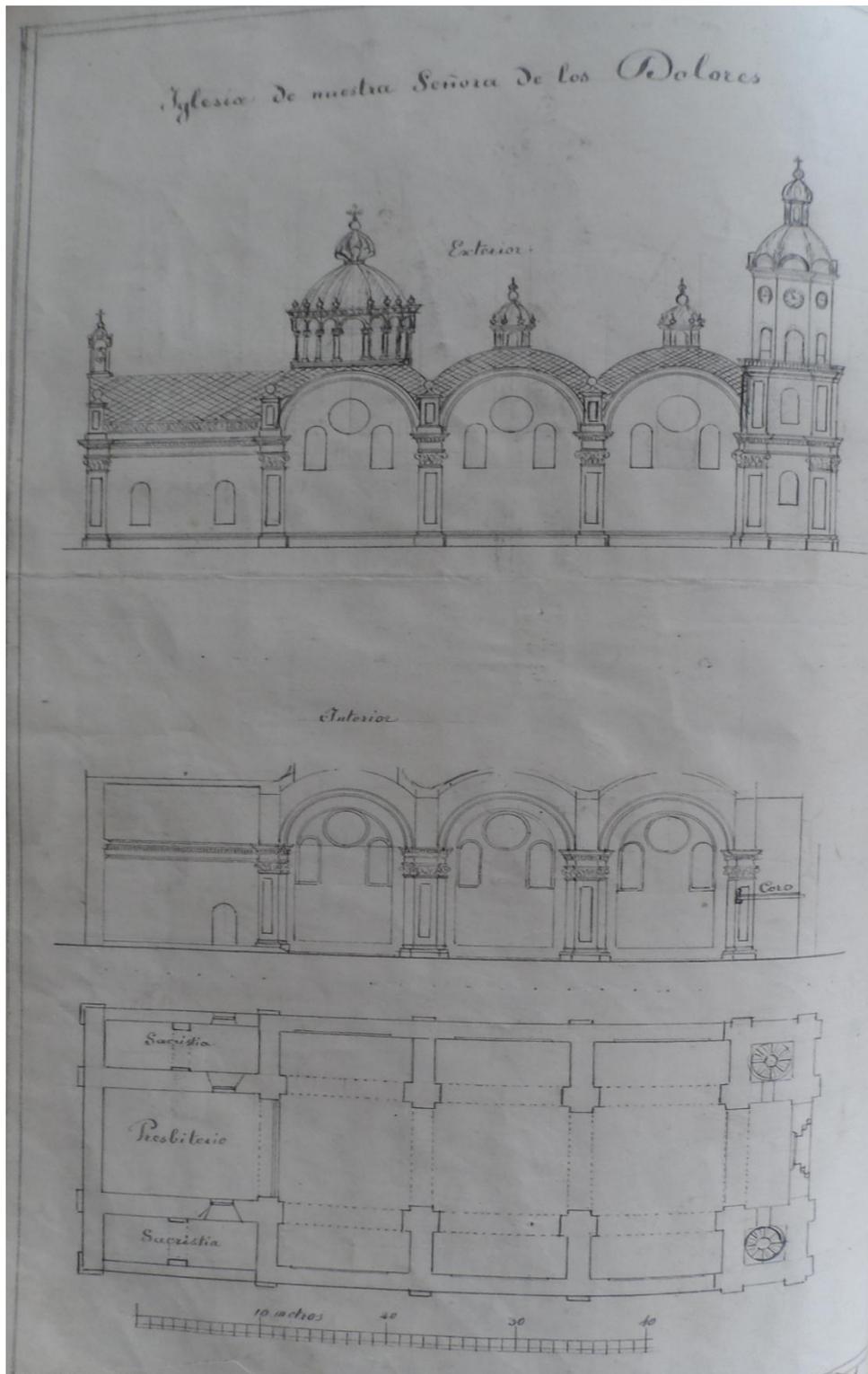


Ilustración 83: "Manual de Obras y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n

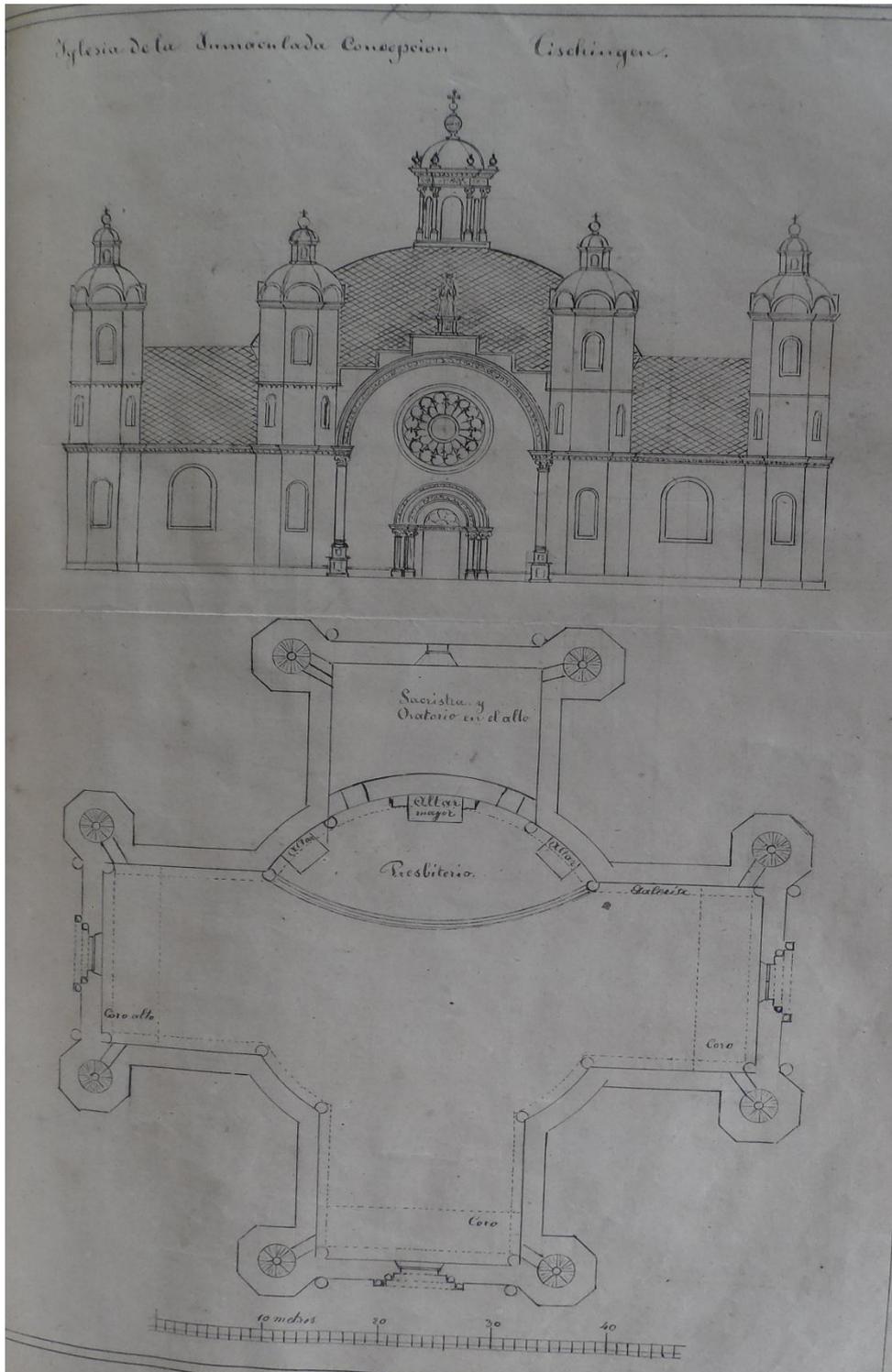


Ilustración 84: "Manual de Obras y Diseños" del Hermano Juan Stielhe.- p. s/p

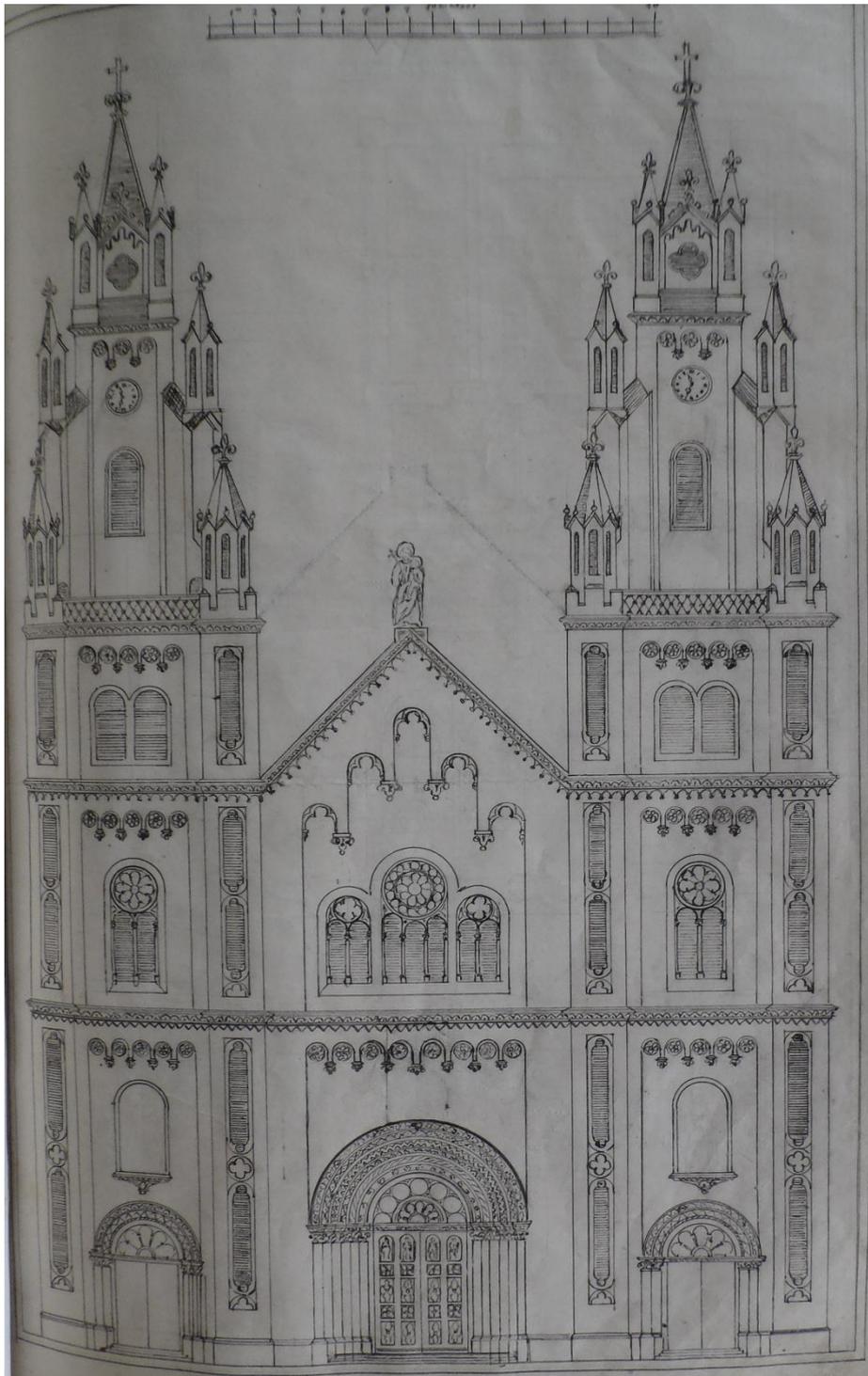


Ilustración 85: "Manual de Obras y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/p

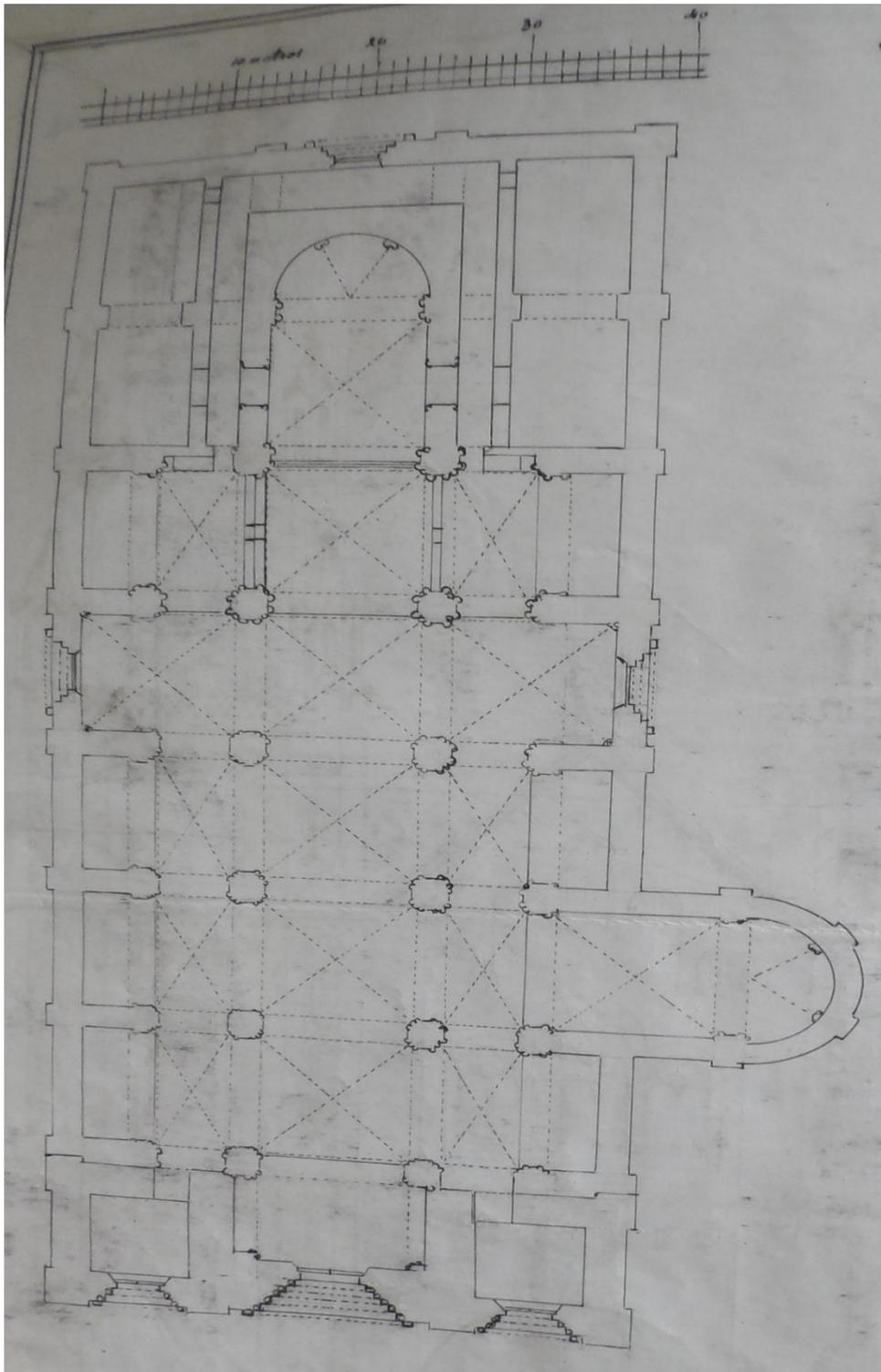


Ilustración 86: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/p

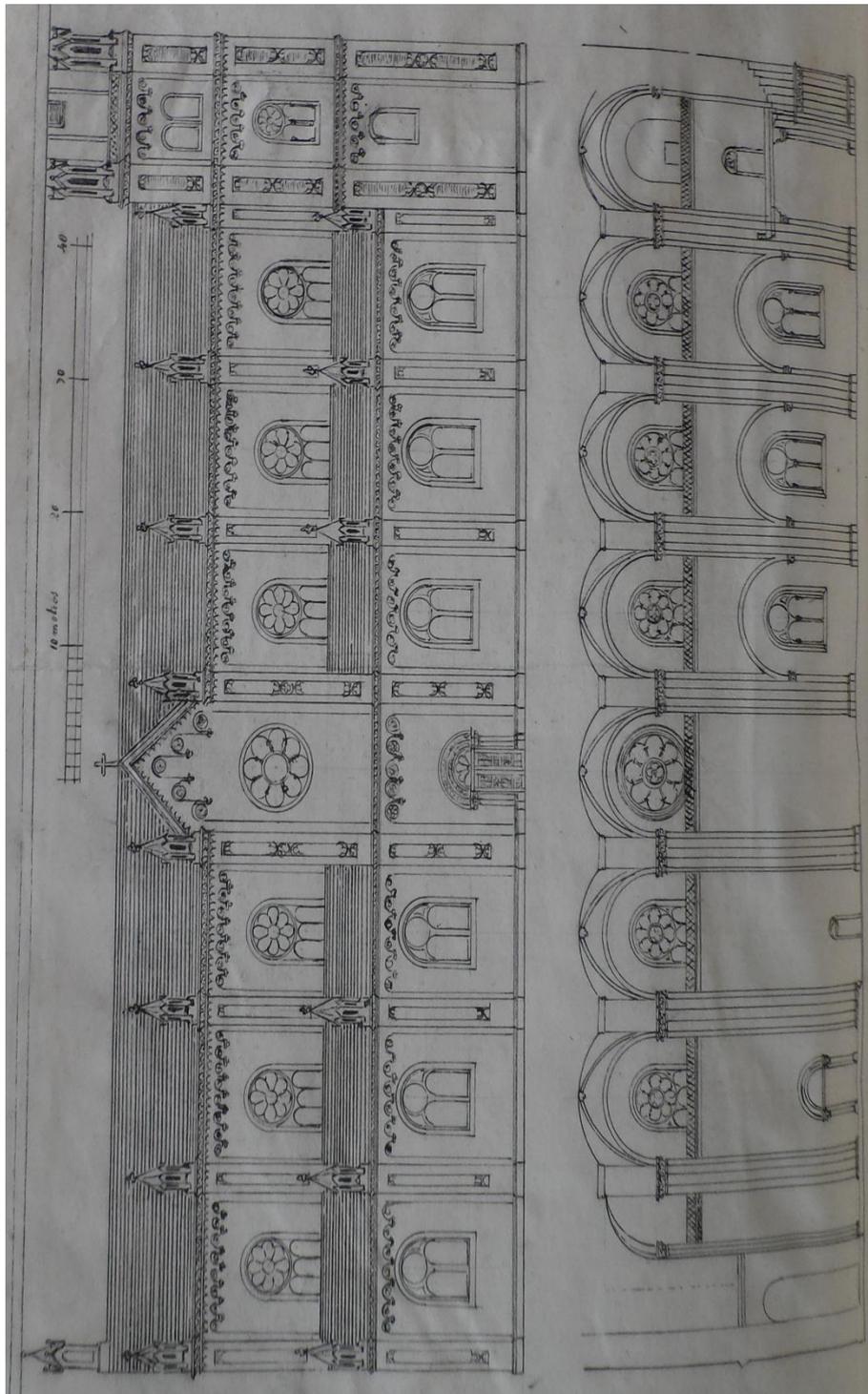


Ilustración 87: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/p



Ilustración 88: "Manual de Obra Y diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/p



Ilustración 89: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n

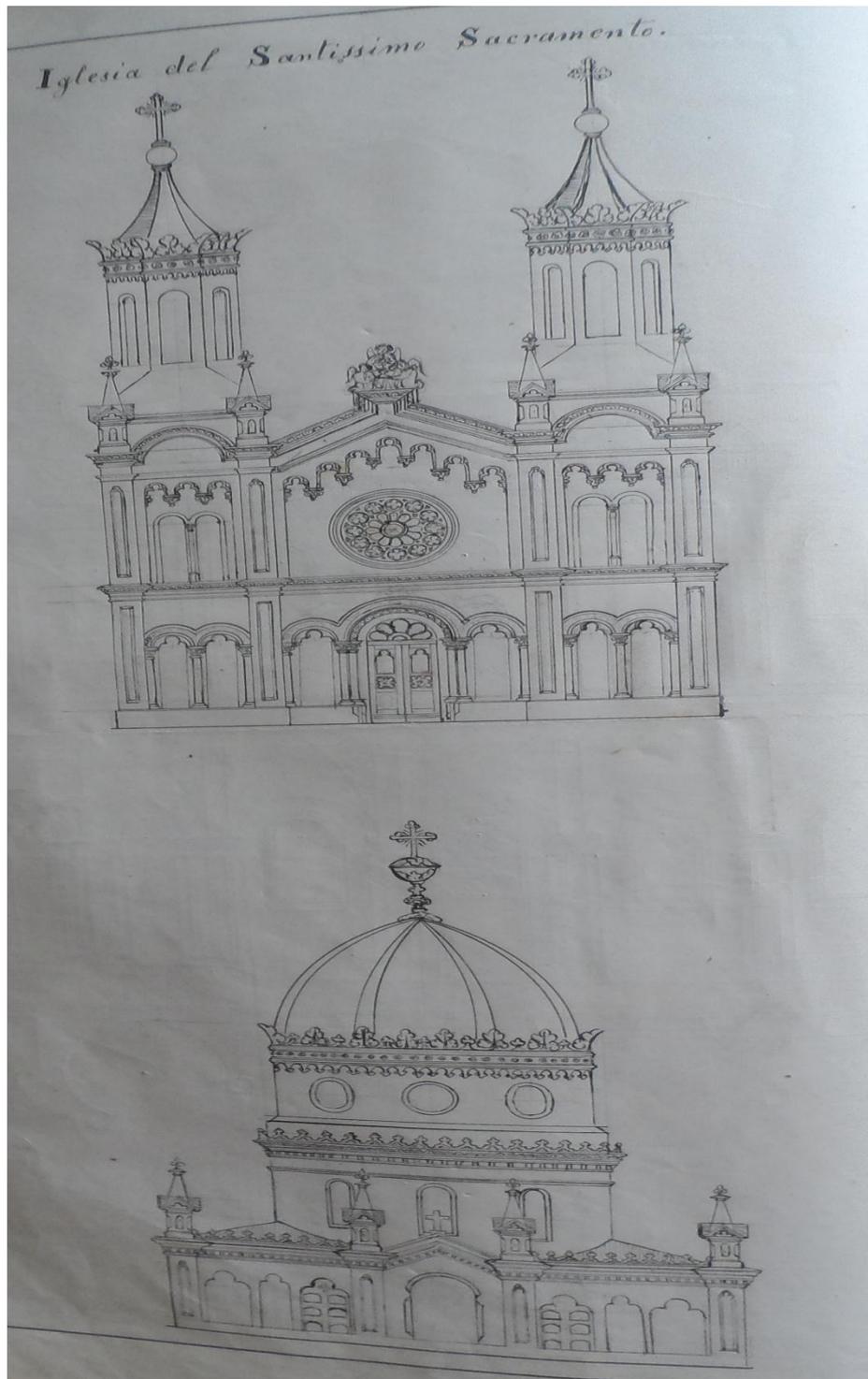


Ilustración 90: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n

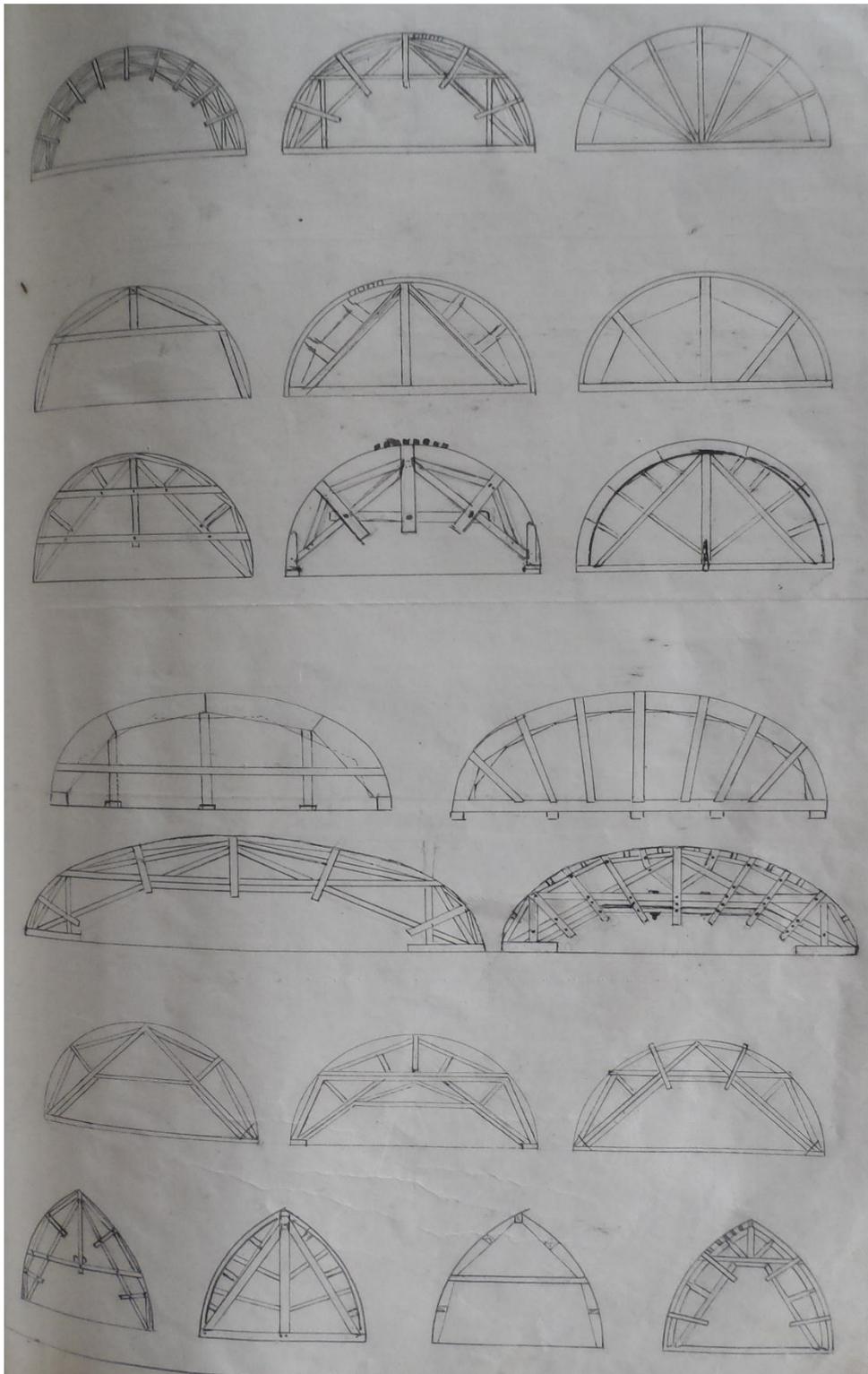


Ilustración 91: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. s/n

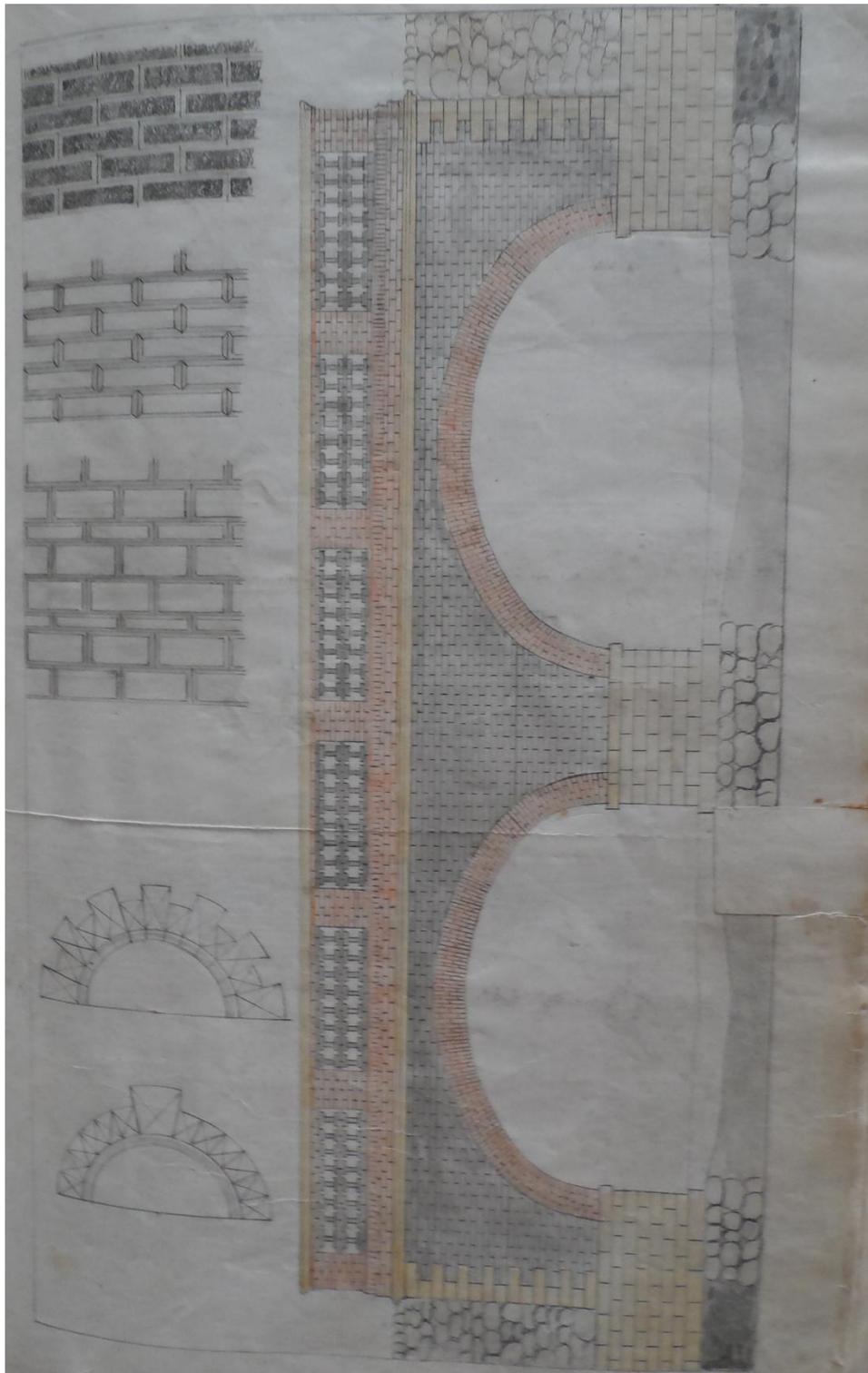


Ilustración 92: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p. 271

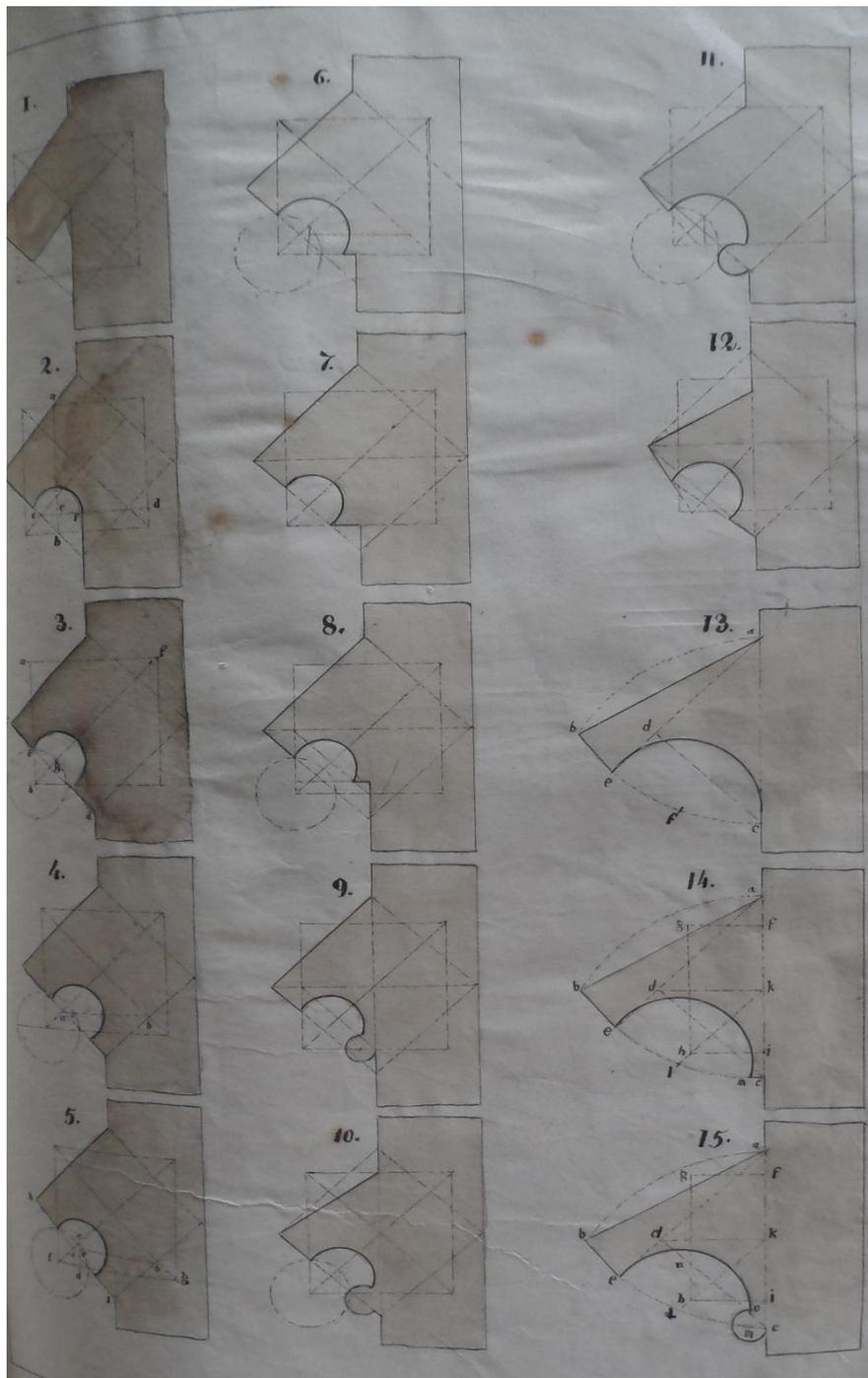


Ilustración 93: "Manual de Obra y Diseños" del Hermano Juan Stiehle. p.337

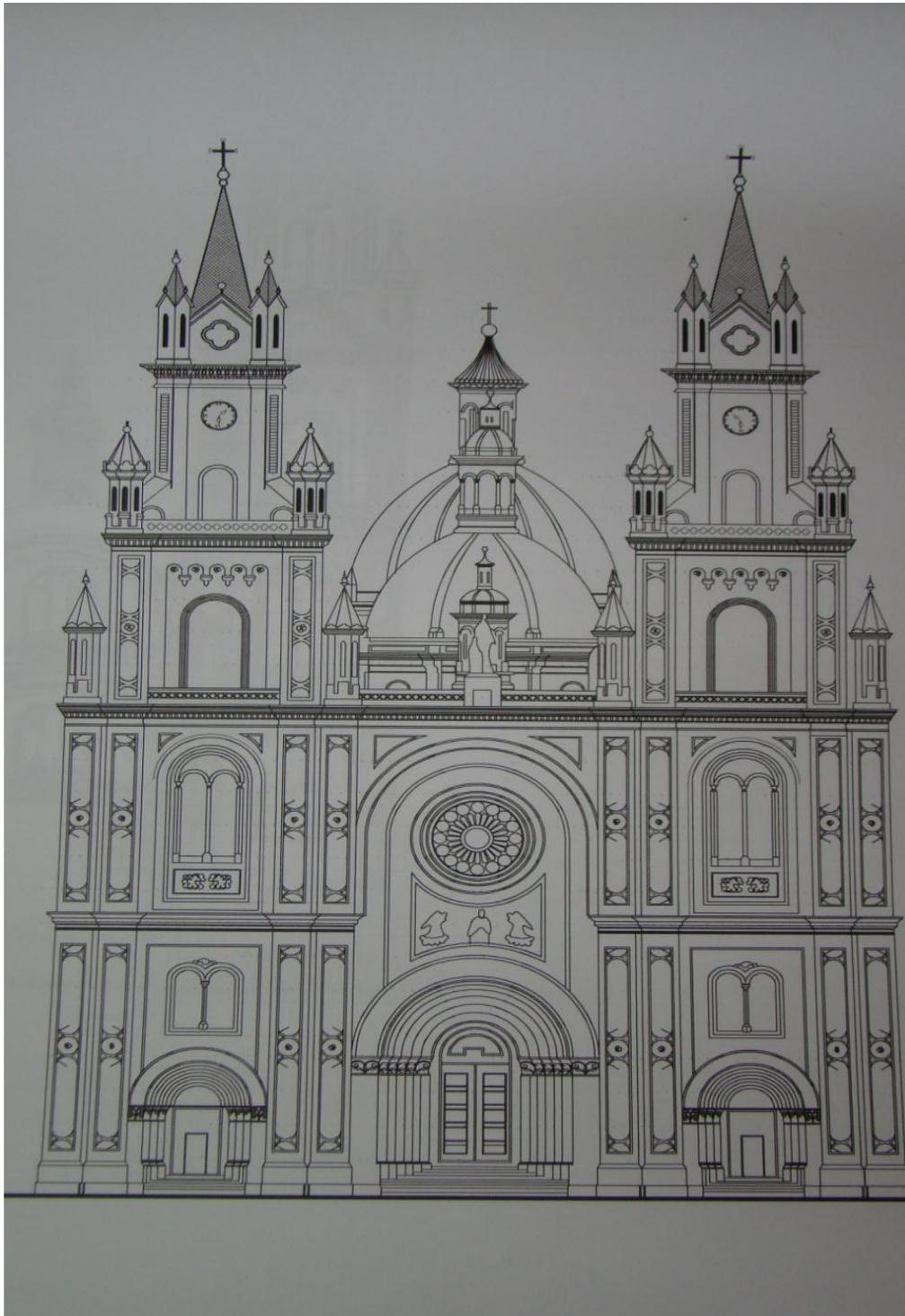
ANEXO 4
FOTOGRAFÍAS DE LOS PLANOS ORIGINALES DE LA CATEDRAL
NUEVA DE CUENCA DISEÑADOS POR EL HNO. STHIELE



Ilustración 94: Fachada Lateral Sur



Ilustración 95: Fachada Principal Este



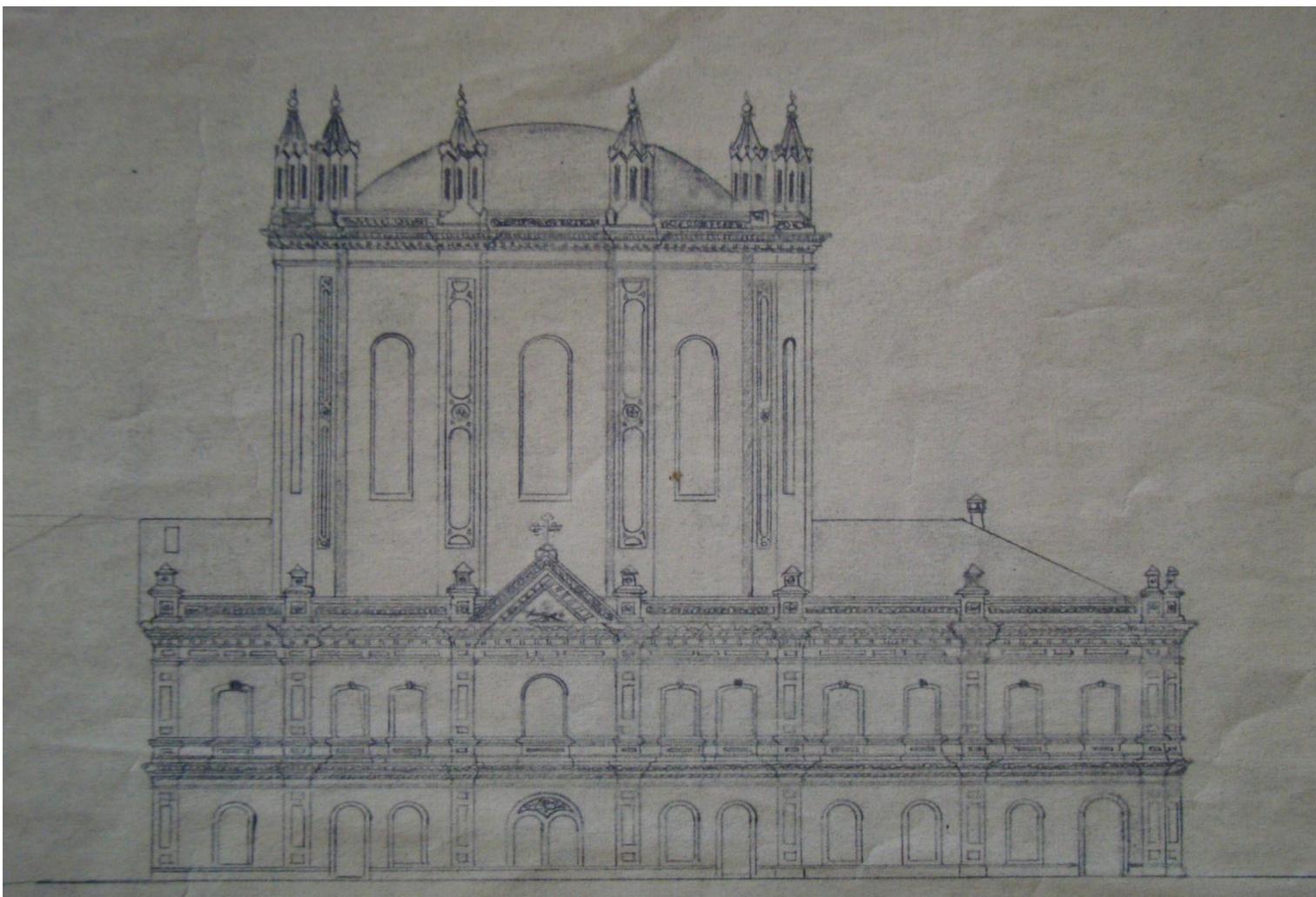


Ilustración 96: Fachada Posterior, Cubierta del Presbiterio



ANEXO 5

OBRAS REALIZADAS POR EL HNO. JUAN STHIELE



Ilustración 97: Iglesia de San Alfonso

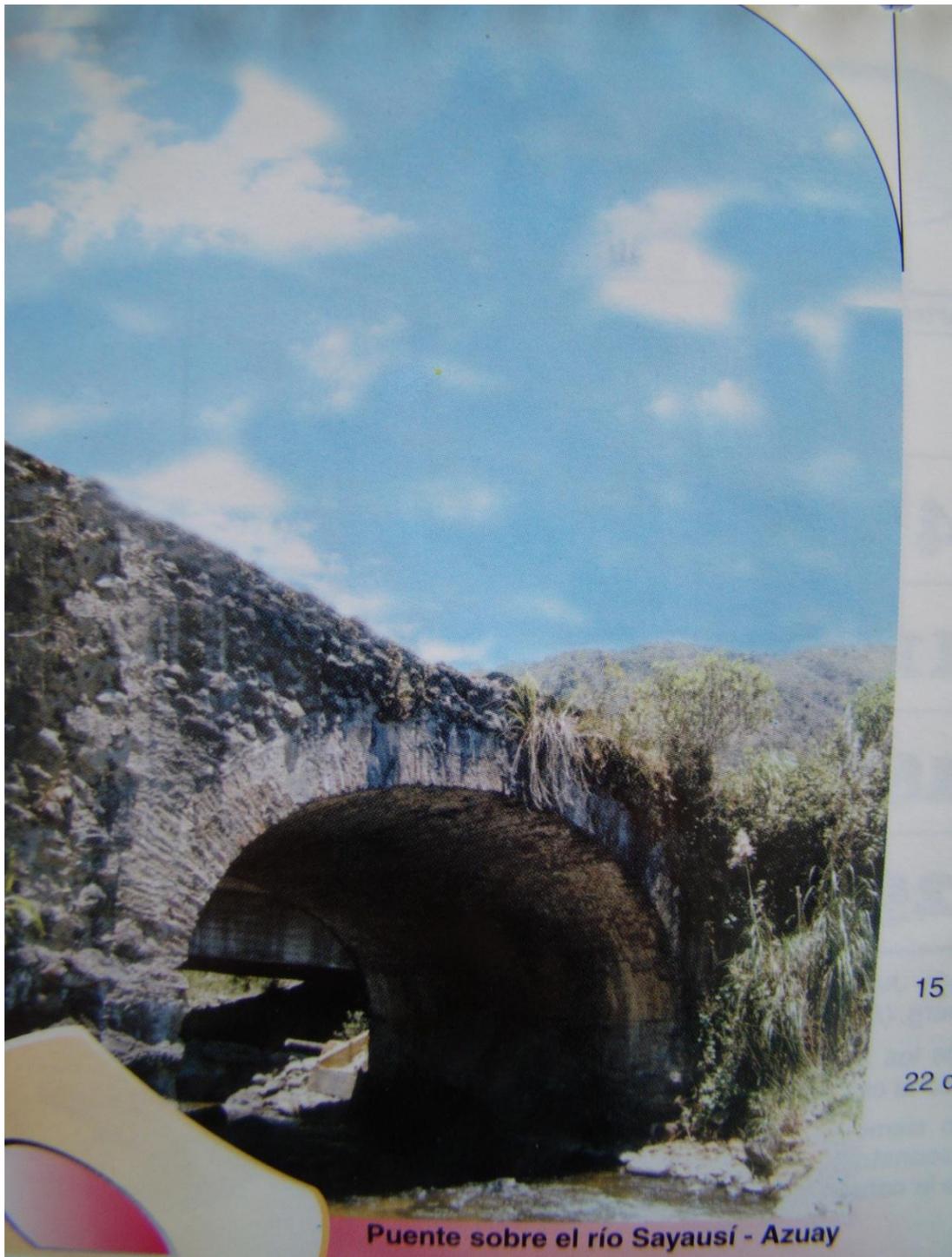


Ilustración 98: Puente sobre el río Sayausí - Azuay

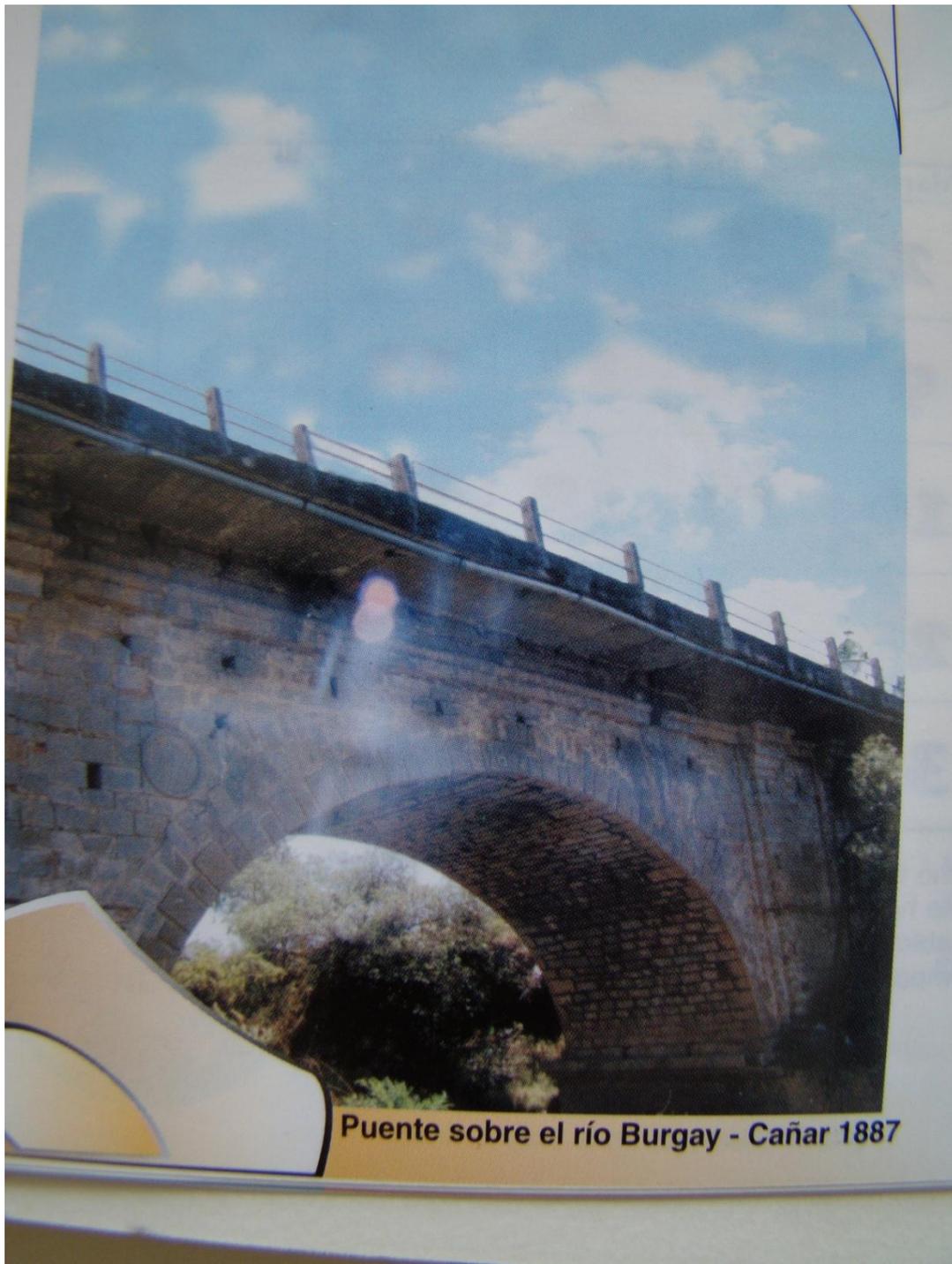


Ilustración 99: Puente sobre el río Burgay - Cañar

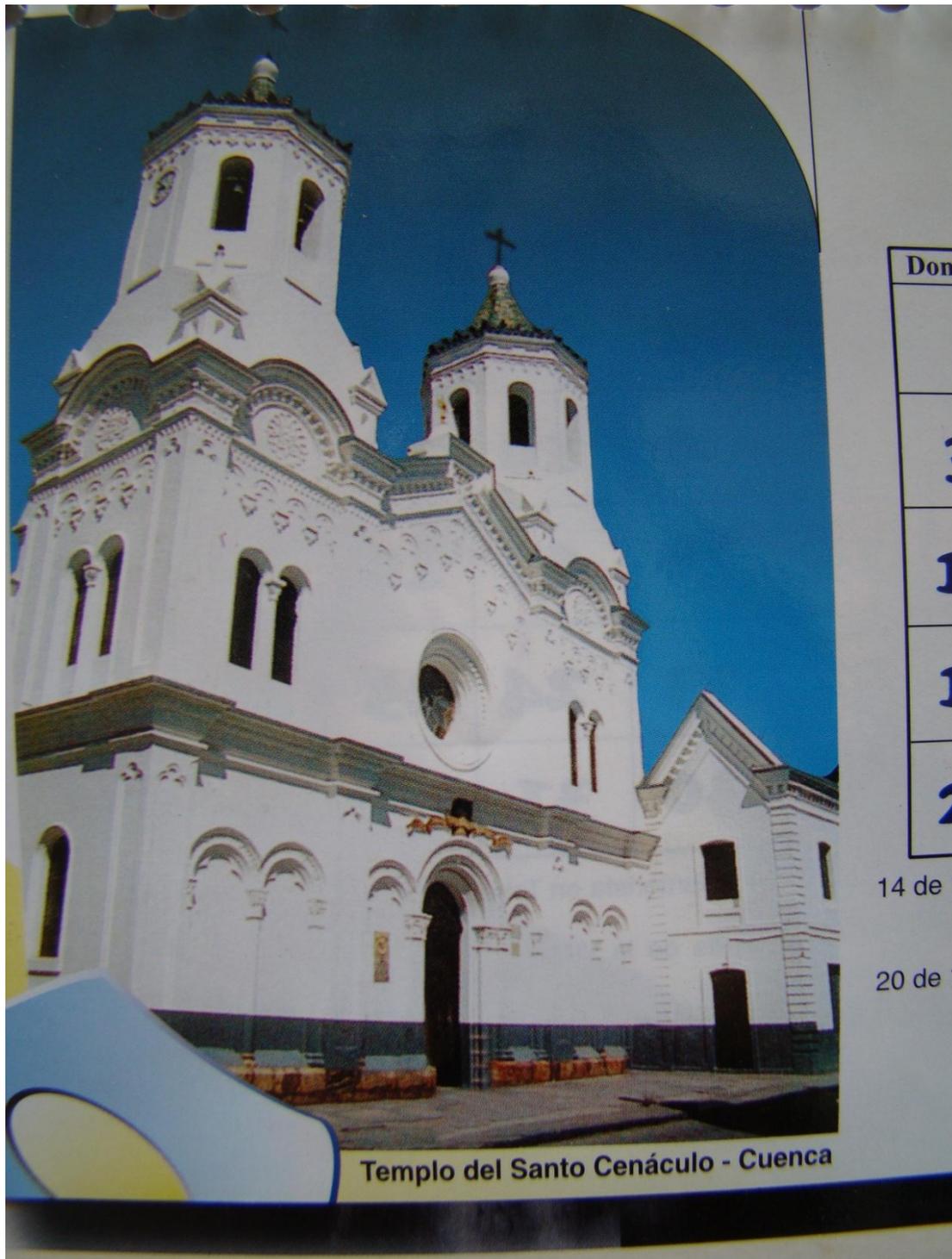


Ilustración 100: Templo del Santo Cenáculo

Bibliografía

Ministerio de Turismo, Ecuador, Atractivos Turísticos, Provincial Nacional, . (s.f.). *Catedral Nueva (La Inmaculada Concepción)*,p.53. Ecuador.

Normas para ladrillos, Anexo A.

Adrián Tola, P. C. (2005). *Tesis: Comportamiento Sísmico de la Catedral Nueva, La Inmaculada Concepción, de Cuenca*. Cuenca.

Arq. Wilsón Pacurucu, I. G. (s.f.). *La Catedral de la Inmaculada Concepción de la ciudad de Cuenca*. Cuenca, Azuay, Ecuador.

Foerster, I. M. (1953). *Materiales de Construcción*. Barcelona: Laobr.

G., F. M. *El Ladrillo en la Construcción*. CEAC.

(2001). Monografía sobre el análisis estructural de construcciones históricas de fábrica. En J. A.-C. Jose Luis Martínez. Madrid.

F. Orús Asso. *Materiales de Construcción. Aglomerantes*. Editorial DOSSAT, S. A. Madrid 1948.

M., I. H. (2001). *Scribd*. Recuperado el 25 de Mayo de 2013, de <http://es.scribd.com/doc/25134195/Evaluacion-de-Patologias-en-Estructuras-de-Concreto>

Normas INEN para ladrillos.

Pablo Cordero, M. C. (1995). *Tesis: Catedral de la Inmaculada, Forma, Función, Tecnología y Contexto*, Universidad de Cuenca,. Cuenca.

Tómmerbakk, M. (2013). *Estudio Histórico de la Catedral Nueva Inédito*. Cuenca, Azuay, Ecuadir.

ANH/C, Notaría 2ª, Mayor Cuantía, Libro# 690, 1909-1910, 17 de julio, 1909

ACA/C, *Expediente sin ingresar*, 1882- 1890

ACA/C, *Diario de gastos de la Catedral, 1884*, Caja 16, doc. 0529, fol. 13- 17

ACA/C, *Libro Auxiliar de gastos de la Iglesia Catedral, 1886*, Caja 17, doc. 0574, fol. 12- 13

ACA/C, *Documentos correspondientes al mes de diciembre de 1887*, Caja 18, doc. 0605

ACA/C, *Libro Auxiliar de gastos de la Iglesia Catedral, 1890*, Caja 21, doc. 0671, fol. 18- 24v.

ACA/C, *Libro Auxiliar de gastos de la Iglesia Catedral, 1888*, Caja 19, doc. 0607, fol. 12

ACA/C, *Libro Auxiliar de gastos de la Iglesia Catedral, 1887*, Caja 18, doc. 0592, fol. 12- 17v.

ACA/C, *Libro Auxiliar de gastos de la Iglesia Catedral, 1887*, Caja 18, doc. 0592, fol. 13- 17

ACA/C, *Libro Auxiliar de gastos de la Iglesia Catedral, 1892*, **Caja 23**, doc. 0729, fol. 16- 22

ACA/C, *Libro Auxiliar de gastos de la Iglesia Catedral, 1895*, Caja 28, doc. 0843, fol. 16- 22

ACA/C, *Libro Auxiliar de gastos de la Iglesia Catedral, 1894*, Caja 26, doc. 0784, fol. 16- 22v.

ACA/A, *Actas de Cabildos, 1877- 1890*, sin ingresar, 2 de agosto, 1897, fol. 75

M.M Polit, "Llamamiento", p 357

I. M. Peña, "Exposición de los trabajos ejecutados en la Catedral Nueva de Cuenca desde el 8 de febrero de 1909 hasta el 6 de agosto de 1918", p. 369,370

M. Carpio, *La Catedral de la Inmaculada de Cuenca*, p. 64



AHCA/C, *Recibos, junio, 1934*, Caja 44, doc. 1328

D. Hermida, "Llamamiento", p. 7

AHCA/C, Economía, *Planillas y recibos de la Catedral Nueva, 1935*, Caja 44, doc. 1330

ACA/C, Economía, *Planillas y recibos de la Catedral Nueva, 1935*, Caja 44, doc. 1334

L. Moscoso Vega, *La Catedral de la Inmaculada*, p. 27. En un artículo publicado por diario El Mercurio en 1967 se revela la importancia que tuvo este albañil para la obra: "Hace poco tiempo la sociedad de Arquitectos pidió por oficio al Dr. Palacios indicara cual es el Arquitecto encargado de la obra, pero él manifestó que la obra habría sido íntegramente plasmada por el albañil Chicaiza que casi había llegado a su término y si había algo que estaba mal realizado se dignaran indicarle. EL MERCURIO, *Señal de Dios y símbolo de un pueblo*, s/p

AHCA/C, Economía, *Planillas y recibos de la Catedral Nueva, 1937*, Caja 44, doc. 1338

Decreto promulgado en el Registro Oficial No. 50 de 20 de oct. 1948, no obstante en los presupuestos de la junta este aumento en el presupuesto ya se registraba desde 1945, lo que indicaría que el presupuesto abría subido con anterioridad, Junta de Urbanización, Ornato y Embellecimiento de Cuenca, Actas, 16 de enero de 1945.

Decreto Legislativo promulgado en el Registro Oficial No. 674 de 24 de nov. De 1954 archivado en: Junta de Urbanización, Ornato y Embellecimiento de Cuenca, contratos 1955-1959.

Junta de Urbanización, Ornato y Embellecimiento de Cuenca, Importaciones, 1952-1959

Archivo Personal Arq. Gastón Ramírez que ahora reposa en la Curia

Valdez, L. Á. *Cales y Cementos*. Barcelona: Gustavo Gill.