

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

METODOLOGIA BIM APLICADA À ANÁLISE
ESTRUTURAL DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO

LEONARDO LEOPOLDINO GONÇALVES

ORIENTADOR: LEONARDO DA SILVEIRA PIRILLO
INOJOSA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
CIVIL

BRASÍLIA/DF: MAIO/2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**METODOLOGIA BIM APLICADA À ANÁLISE
ESTRUTURAL DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO**

LEONARDO LEOPOLDINO GONÇALVES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**LEONARDO DA SILVEIRA PIRILLO INOJOSA, PROF. DR. (ENC/UNB)
(ORIENTADOR)**

**EVANGELOS DIMITRIOS CHRISTAKOU, PROF. DR. (ENC/UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**GILBERTO GOMES, PROF. DR. (ENC/UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**MÁRCIO AUGUSTO ROMA BUZAR, PROF. DR. (FAU/UNB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 06 DE MAIO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

GONÇALVES, LEONARDO LEOPOLDINO

Metodologia BIM Aplicada à Análise Estrutural do Patrimônio Histórico.

xvi, 95 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2022)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. BIM

2. Análise Estrutural

3. Patrimônio Histórico

4. Nuvem de Pontos

5. Igrejinha

6. Modelagem

I. ENC/FT/UnB

II. Título (bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GONÇALVES, L.L. (2022). *Metodologia BIM aplicada à análise estrutural do patrimônio histórico*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Leonardo Leopoldino Gonçalves

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Metodologia BIM Aplicada à Análise Estrutural do Patrimônio Histórico

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2022

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Leonardo Leopoldino Gonçalves

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por me apresentarem um amor incondicional, por viver em uma família unida e repleta de carinho, por me apoiarem em todas as etapas da minha formação, por lerem e relerem cada página desta monografia. Tudo que sou, devo a vocês.

Agradeço ao meu irmão, meu melhor amigo, com quem sempre pude dar boas risadas e compartilhar as alegrias e dificuldades da vida.

À minha namorada, por fazer a minha vida mais feliz, pelos cafunés, pela amizade e por me aguentar nos dias de maior mau humor desse projeto final.

Aos meus avós, por sempre fazerem seu neto se sentir criança e querido. Carinho especial aos meus dois avôs, que me inspiraram a seguir o caminho da engenharia civil.

A todos os familiares que me acompanharam e me incentivaram ao longo dessa jornada.

Agradeço aos meus amigos do “Biiiiir!”, a alegria da civil e sem os quais o curso não teria sido metade do que foi. Aos meus amigos de infância, pelos muitos e bons churrascos, e a todos os demais amigos que guardo no peito.

Agradeço ao meu professor orientador, pelos conselhos, pelos ensinamentos e por sua disposição e prestatividade durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço a UnB, em especial aos professores do ENC que marcaram minha graduação.

Ao Grupo FLUG, pela disponibilização da nuvem de pontos, e ao professor Lenildo, pelo auxílio no levantamento com uso de drone.

RESUMO

O patrimônio histórico edificado corresponde a uma vultosa esfera do conjunto de elementos que retratam a identidade e a cultura de uma sociedade. O denominado Modelo de Informação da Construção (BIM) é uma metodologia que tem adquirido ampla notoriedade em cumprir o papel de retratar as características físicas e armazenar informações de monumentos históricos. Uma das aplicações de grande utilidade do BIM é a análise estrutural, que pode ser realizada com base na própria representação gráfica da edificação. A análise estrutural possibilita a obtenção de parâmetros que são de grande valia para o estudo, manutenção, monitoramento e eventuais reparos de estruturas.

Este trabalho comparou dois modelos paralelos da Igreja Nossa Senhora de Fátima, em Brasília, e os resultados de suas respectivas análises estruturais. O primeiro modelo foi desenvolvido com base nas pranchas estruturais da edificação, o segundo, com base em métodos de levantamento precisos usualmente empregados em modelagens BIM de monumentos históricos, o escaneamento a laser terrestre e a aerofotogrametria. A metodologia adotada fundamentou-se em obter os resultados da análise de forma automática a partir da representação arquitetônica da edificação e de sua abstração analítica correspondente. A comparação física dos modelos evidenciou elevada similaridade dimensional. Os valores resultantes da análise estrutural apresentaram, entretanto, variações significativas para determinados esforços internos, evidenciando a influência das características próprias do processo de modelagem e da discretização da estrutura nos resultados dos cálculos.

Palavras-chave: BIM, Análise Estrutural, Patrimônio Histórico, Nuvem de Pontos, Igreja

ABSTRACT

The built heritage corresponds to a large sphere of the set of elements that portray the identity and culture of a society. The so-called Building Information Model (BIM) is a methodology that has gained wide notoriety in fulfilling the role of portraying the physical characteristics and storing information of historic monuments. One of BIM's useful applications is structural analysis, which can be performed based on the graphic representation of the building itself. The structural analysis makes it possible to obtain parameters that are of great value for the study, maintenance, monitoring, and eventual repair of structures.

This work compared two parallel models of the “Nossa Senhora de Fátima” church, known as “Igrejinha”, in Brasília, and the results of their respective structural analyses. The first model was developed based on the structural documents of the building, and the second one, based on accurate survey methods usually employed in historic BIM modeling, terrestrial laser scanning and aerophotogrammetry. The methodology adopted was based on automatically obtaining the analysis results from the architectural representation of the building and its corresponding analytical abstraction. The physical comparison of the models showed a high dimensional similarity. The resulting values of the structural analysis showed, however, significant variations for certain internal forces, demonstrating the influence of the modeling process and the discretization of the structure on the calculation results.

Keywords: BIM, Structural Analysis, Heritage, Point Cloud, Igrejinha

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	9
2.1. OBJETIVO GERAL.....	9
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1. BIM.....	10
3.1.1. Usos do BIM	10
3.1.2. Interoperabilidade.....	12
3.1.3. As Built	13
3.2. PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO EDIFICADO	14
3.2.1. HBIM	15
3.2.2. Contexto de Brasília	19
3.3. ANÁLISE ESTRUTURAL	22
3.3.1. HBIM como Ferramenta de Análise Estrutural do Patrimônio Histórico	25
4. METODOLOGIA.....	29
4.1. DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO	29
4.2. PROCEDIMENTO DE MODELAGEM	30
4.3. MÉTODO DE ANÁLISE DO SISTEMA ESTRUTURAL.....	33
4.4. ESCOLHA DOS SOFTWARES	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1. MODELO DE PROJETO.....	38
5.1.1. Modelo 1	38
5.1.2. Modelo 2	43
5.1.3. Modelo 3	53
5.2. MODELO DE NUVEM DE PONTOS	62
5.2.1. Nuvens de Pontos	63
5.2.2. Modelagem no Revit	67
5.2.3. Análise Estrutural	70
5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS.....	73
5.3.1. Comparação Dimensional	73
5.3.2. Comparação da Análise Estrutural	76

6. CONCLUSÕES.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Interoperabilidade entre <i>softwares</i> BIM de modelagem arquitetônica e estrutural. Fonte: FRANCO, 2020. p. 50.....	13
Figura 3.2 Aparelho de escaneamento a laser FARO Focus M 70 utilizado para modelagem <i>as built</i> do Catetinho, em Brasília. Fonte: ALMEIDA, 2021, p. 45.....	17
Figura 3.3 Igreja Nossa Senhora de Fátima. Fonte: Autor.	20
Figura 3.4 Elementos estruturais da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Fonte: INOJOSA, 2010, p. 100.	21
Figura 3.5 Vista aérea da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Out. 1990. Fonte: Acervo DEPHA.	22
Figura 3.6 Quatro níveis de abstração para uma estrutura na análise estrutural. Fonte: Martha, 2010, p. 3.....	23
Figura 3.7 Discretização de uma estrutura reticulada por métodos analíticos. Fonte: Ramaji; Memari, 2018, p. 120.	24
Figura 3.8 Discretização pelo Método dos Elementos Finitos para uma estrutura contínua. Fonte: Martha, 2010, p.9.....	24
Figura 3.9 Modelo de parede circular e cúpula das Quatro Cortes em Dublin, incluindo deformações. Fonte: Dore <i>et al.</i> , 2015. p. 355 - 356.	26
Figura 3.10 Simulação estrutural da fachada norte da <i>Basilica di Collemaggio</i> pelo MEF no <i>software</i> Midas. Fonte: Oreni <i>et al.</i> , 2014. p. 270 – 271.	27
Figura 3.11 Processamento estrutural de três modelos discretos pelo MEF do edifício <i>Paraboloide</i> . Fonte: Nieto-Julián; Antón; Moyano, 2020, p. 16.....	28
Figura 4.1 Sobreposição de modelos BIM do Museu do Catetinho elaborados por métodos distintos. Fonte: ALMEIDA, 2021, p. 61.	31
Figura 4.2 Sobreposição de modelos BIM do Museu do Catetinho elaborados por métodos distintos. Fonte: ALMEIDA, 2021, p. 62.	31
Figura 4.3 Cópia da planta e de cortes da estrutura da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Fonte: IPHAN – DF, obtido de INOJOSA, 2010, p. 107.	32
Figura 4.4 Deslocamentos estruturais calculados para o Bloco C da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB). Fonte: RIBEIRO <i>et al.</i> , 2020, p. 4.	34
Figura 4.5 Diagrama de momentos fletores da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima pelo programa SAP 2000. Fonte: INOJOSA, 2010, p. 113.....	34

Figura 5.1. Nomenclatura dos elementos estruturais vistos na planta baixa do térreo. Fonte: Autor.....	37
Figura 5.2. Nomenclatura dos elementos estruturais da cobertura. Fonte: Autor	37
Figura 5.3. Corte longitudinal da estrutura da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal, 2022.....	39
Figura 5.4. Planta de armação das lajes de cobertura. Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal, 2022.	39
Figura 5.5 Modelo 1, em suas representações física e analítica, respectivamente. Fonte: Autor.	40
Figura 5.6 Avisos gerados após o cálculo da estrutura do Modelo 1 pelo Robot Structural Analysis. Fonte: Autor.....	40
Figura 5.7 Representação da deformação de malha do Modelo 1. Fonte: Autor.	41
Figura 5.8 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y para o Modelo 1. Fonte: Autor	41
Figura 5.9 Representação analítica resultante da tentativa de modelagem das vigas de cobertura do Modelo 1 como invertidas. Fonte: Autor.....	42
Figura 5.10 Deformação de malha do Modelo 1 com vigas de cobertura invertidas. Fonte: Autor.....	42
Figura 5.11 Localização dos pilares P1 e P2 em projeto e no <i>software</i> de modelagem. Fonte: Autor.....	43
Figura 5.12 Alteração automática do modelo analítico resultante da movimentação dos pilares. Fonte: Autor	44
Figura 5.13 Guia “Propriedades” de uma viga analítica, com métodos de alinhamento inicial e final distintos. Fonte: Autor	45
Figura 5.14. Planta de formas e de armação das cintas (vigas baldrame). Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal, 2022.....	46
Figura 5.15. Vista lateral da laje de cobertura do Modelo 2. Fonte: Autor.	47
Figura 5.16. Descontinuidade do modelo analítico causada pela alteração manual das alturas inicial e final de uma viga de cobertura. Fonte: Autor.....	47
Figura 5.17. Parâmetros de verificação de consistência do modelo analítico / físico no Revit. Fonte: Autor.	48
Figura 5.18. Filtros visuais de nós analíticos conectados (em verde) e não conectados (em vermelho). Fonte: Autor.	49

Figura 5.19. Modelo 2 em suas representações física no Revit e analítica no Robot. Fonte: Autor.....	49
Figura 5.20 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do Modelo 2 pelo Robot Structural Analysis: “Os nós isolados foram encontrados”. Fonte: Autor.....	50
Figura 5.21 Vista lateral da da deformação de malha do Modelo 2. Fonte: Autor.....	50
Figura 5.22 Vista frontal da deformação de malha do Modelo 2. Fonte: Autor.....	51
Figura 5.23 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y para o Modelo 2. Fonte: Autor.....	51
Figura 5.24. Detalhe da armação no encontro dos pilares com a cobertura. Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal, 2022.....	52
Figura 5.25. Interpretação das seções transversais dos elementos em barra pelo Robot. Fonte: Autor.....	52
Figura 5.26. Representação física final do modelo estrutural da Igrejinha baseado em projeto. Fonte: Autor.....	53
Figura 5.27. Representação analítica final do modelo estrutural da Igrejinha baseado em projeto. Fonte: Autor.....	53
Figura 5.28. Representação da curvatura da laje de cobertura. Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal, 2022.....	54
Figura 5.29 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do Modelo 3 pelo Robot Structural Analysis: “Nó isolado”. Fonte: Autor.....	55
Figura 5.30 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do Modelo 3 pelo Robot Structural Analysis: “A coesão do modelo de cálculo foi fornecida pela definição das restrições cinemáticas nos pontos incoerentes da malha de elementos finitos”. Fonte: Autor.....	56
Figura 5.31. Interpretação das seções transversais dos elementos em barra pelo Robot para o modelo final. Fonte: Autor.....	56
Figura 5.32 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y para o Modelo 3, com as seções centralizadas. Fonte: Autor.....	57
Figura 5.33 Modelo analítico no Robot com as seções deslocadas conforme o modelo físico. Fonte: Autor.....	57
Figura 5.34 Representação das seções deslocadas conforme o modelo físico no Robot. Fonte: Autor.....	58
Figura 5.35 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y para o Modelo 3, com as seções deslocadas. Fonte: Autor.....	58

Figura 5.36 Configuração de posição da seção transversal no Robot. Fonte: Autor.....	60
Figura 5.37 Representação do modelo analítico baseado em projeto final no Robot. Fonte: Autor.....	60
Figura 5.38 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y para o modelo final baseado em projeto. Fonte: Autor.	61
Figura 5.39 Representação da deformação de malha do modelo final baseado em projeto. Fonte: Autor.....	61
Figura 5.40 Mapa de deslocamentos das lajes de cobertura para o modelo final baseado em projeto. Fonte: Autor.	62
Figura 5.41 Locais de posicionamento do equipamento para varredura completa da edificação. Fonte: Autor, Grupo Flug.....	63
Figura 5.42 Mapa de deslocamentos das lajes de cobertura para o modelo final baseado em projeto. Fonte: Autor, Grupo Flug.....	63
Figura 5.43 Ortomosaico do levantamento da Igrejinha por aerofotogrametria. Fonte: Autor.....	64
Figura 5.44 Drone empregado para o levantamento por aerofotogrametria. Fonte: Autor. 65	
Figura 5.45 Nuvem de pontos por escaneamento a laser terrestre importada para o Revit. Fonte: Autor.....	66
Figura 5.46 Nuvem de pontos por aerofotogrametria importada para o Revit. Fonte: Autor.	66
Figura 5.47 Sobreposição das nuvens de pontos. Fonte: Autor.	67
Figura 5.48 Detalhe da sobreposição das nuvens de pontos. Fonte: Autor.	67
Figura 5.49 Faixa de vista do térreo para as nuvens de pontos entre as alturas +1,10 m e +1,20 m. Fonte: Autor.	68
Figura 5.50 Corte vertical das nuvens de pontos. Fonte: Autor.	68
Figura 5.51 Sobreposição dos elementos físicos de modelo e da nuvem de pontos para uma faixa de vista do nível térreo. Fonte: Autor.	69
Figura 5.52 Modelo físico final por nuvem de pontos. Fonte: Autor.....	70
Figura 5.53 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do modelo por nuvem de pontos pelo Robot Structural Analysis: “Malha incoerente em arestas”. Fonte: Autor.....	71
Figura 5.54 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do modelo por nuvem de pontos pelo Robot Structural Analysis: “A coesão do modelo de cálculo foi fornecida pela definição das restrições cinemáticas nos pontos incoerentes da malha de elementos finitos”. Fonte: Autor.....	71

Figura 5.55 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do modelo por nuvem de pontos pelo Robot Structural Analysis: “A instabilidade (tipo 3) na direção UX do nó 127”. Fonte: Autor.....	72
Figura 5.56 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y para o modelo final por nuvem de pontos. Fonte: Autor.....	72
Figura 5.57 Representação da deformação de malha do modelo final por nuvem de pontos. Fonte: Autor.....	73
Figura 5.58 Mapa de deslocamentos das lajes de cobertura para o modelo final por nuvem de pontos. Fonte: Autor.	73
Figura 5.59 Comparação entre as dimensões de projeto e as extraídas da nuvem de pontos para o pilar P1. Fonte: Autor.	74
Figura 5.60 Comparação entre as dimensões de projeto e as extraídas da nuvem de pontos para o pilar P2. Fonte: Autor.	75
Figura 5.61 Verificação da simetria das vigas de cobertura. Fonte: Autor.	75
Figura 5.62 Sobreposição dos modelos de projeto e por nuvem de pontos em vista 3D. Fonte: Autor.....	75
Figura 5.63 Sobreposição das paredes estruturais do modelos de projeto e por nuvem de pontos em planta. Fonte: Autor.	76
Figura 5.64 Discretização da malha de elementos finitos para o modelo de projeto, à esquerda, e para o modelo de nuvem de pontos, à direita. Fonte: Autor.....	76
Figura 5.65 Deformações da estrutura da Igrejinha pelo Programa SAP 2000. Fonte: INOJOSA, 2010, p.116.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Principais usos BIM ao longo da vida útil de uma edificação. Fonte: CBIQ, 2016, v.1, p.104 adaptado de CIC GROUP, 2010.....	11
Tabela 3.2 Modelos de análise estrutural previstos na NBR 6118:2014. Fonte: Sabadin, 2018.	24
Tabela 4.1 Bens tombados individualmente em Brasília. Fonte: IPHAN, 2021.	29
Tabela 5.1 Comparação entre os resultados dos métodos de exportação por seções centralizadas e seções deslocadas. Fonte: Autor.	59
Tabela 5.2 Comparação entre os resultados dos modelos de projeto e de nuvem de pontos. Fonte: Autor.....	77

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
BIM	Modelo da Informação da Construção
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CBIQ	Coletânea Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras
CIC Group	Programa de Pesquisa de Construção Computadorizada Integrada
DAU	Departamento de Arquitetura e Urbanismo
DEPHA	Departamento do Patrimônio Histórico e Artístico
DF	Distrito Federal
GDL	<i>Geometric Descriptive Language</i>
GT Brasília	O Grupo de Trabalho para Preservação do Patrimônio Histórico e Cultural de Brasília
HBIM	Modelo da Informação da Construção Histórica
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
NB	Norma de Procedimento
NBR	Norma Brasileira
NOVACAP	Companhia Urbanizadora da Nova Capital
Robot	Robot Structural Analysis
TLS	Escaneamento a Laser Terrestre
UnB	Universidade de Brasília

1. INTRODUÇÃO

Um dos fatores de maior relevância para a formação da identidade de uma sociedade, de um país ou somente de um pequeno agrupamento de indivíduos é o seu passado, sua história, tudo aquilo que ao longo de gerações influenciou a cultura, o estilo de vida e o modo de pensar de seus integrantes. Atualmente, diversos elementos, materiais ou intangíveis, constituem um acervo de representações expressivas dessa história, contendo em si um valor cultural e antropológico relacionado às atividades humanas. Esse conjunto de elementos é o que podemos chamar de herança cultural (ABDELHAMID, 2019).

A herança arquitetônica é responsável por um quinhão significativo da composição da herança cultural, correspondendo a tudo aquilo que foi edificado com o objetivo de criar e limitar o espaço e que possua valor histórico. Exemplos de herança arquitetônica são monumentos, edifícios, sítios arqueológicos, cidades e vilarejos históricos etc. (ABDELHAMID, 2019). A conservação e preservação da herança arquitetônica configuram-se como um desafio já há muito tempo, especialmente em locais de origem e história muito antigas. Edificações, sejam elas quais forem, estão sujeitas tanto à ação natural das intempéries - como incidência de radiação solar, chuva, variações climáticas -, quanto a ações antropogênicas danosas - como guerras e vandalismo (CONTI *et al.*, 2020).

De forma a conservar suas características originais e manter seu valor adquirido ao longo de gerações, é fundamental a adoção de um processo de conhecimento, manutenção, gerenciamento e aprimoramento da herança arquitetônica (OSELLO; LUCIBELLO; MORGAGNI, 2018). Todas essas etapas fundamentam-se em documentações, registros e inventários do bem estudado. A constante atualização dessa documentação frequentemente é maçante e dispendiosa. Ademais, métodos de documentação tradicionais são insuficientes em processos de preservação e manutenção de maior complexidade (DORE; MURPHY, 2017).

Como ferramenta alternativa ao estudo, registro e manutenção de construções históricas, a metodologia de Modelo de Informação da Construção (BIM) tem adquirido ampla notoriedade internacionalmente (CUPERSCHMID *et al.*, 2018). O BIM é uma metodologia de modelagem que integra elementos paramétricos contidos de informação com representações visuais tridimensionais, proporcionando integração de dados, interdisciplinaridade, representação gráfica e gerenciamento construtivo jamais vislumbrados anteriormente no ramo da construção civil (EASTMAN *et al.*, 2014). Atualmente, o BIM é empregado com maior frequência na etapa de confecção de projetos, porém é uma ferramenta igualmente potente para as demais etapas do ciclo de vida de uma edificação (CIC GROUP, 2010).

O chamado Modelo de Informação da Construção Histórica (*Hystorical Building Information Modeling* – HBIM) consiste no emprego da metodologia BIM especificamente para a preservação do patrimônio histórico. O HBIM constitui um repositório de gerenciamento de um bem cultural, proporcionando a inserção e atualização de informações diretamente no modelo tridimensional. Associado a tecnologias específicas, proporciona igualmente a modelagem geométrica da edificação de forma precisa, sendo captados detalhes que seriam imperceptíveis em demais circunstâncias (POCOBELLI *et al.*, 2018). Suas aplicações são diversas. Exemplos são o registro dos diferentes tipos de degradações observados em uma estação ferroviária (Turco *et al.*, 2017) e a análise da resposta estrutural de uma ponte medieval sob o efeito de um carregamento (BANFI *et al.*, 2017).

A preservação e a manutenção da herança arquitetônica envolvem a garantia da segurança e funcionalidade da edificação, que estão diretamente relacionadas à integridade e à saúde da sua estrutura. Estruturas, especialmente as de edificações históricas, estão sujeitas a um

longo período de aplicação de cargas, variações de temperatura, acúmulo de deformações e diversas outras situações desfavoráveis - mudanças inapropriadas no uso da edificação, danos provocados por guerras, sismos, entre outros (DORE *et al.*, 2015; ORENI *et al.*, 2014). A estrutura, além de patologias associadas, pode ser relevante pela sua integração com a arquitetura do monumento, constituindo parte integrante da identidade visual do patrimônio histórico (INOJOSA, 2010).

Uma poderosa ferramenta para o estudo e a verificação de estruturas é a análise estrutural computacional. A estrutura, desde que corretamente parametrizada no modelo arquitetônico, pode ser exportada para um *software* específico que possibilita o processamento computacional, a fim de prever o seu comportamento sob determinadas condições. No contexto do patrimônio histórico, a análise estrutural pode ser empregada com fins de verificação da capacidade resistente e integridade de uma estrutura (ARAUJO *et al.*, 2020), auxílio na manutenção e operação da edificação (ORENI *et al.*, 2014) ou ferramenta de estudo da concepção estrutural de uma edificação (INOJOSA, 2010).

Neste trabalho, será estudada mais especificamente a conjuntura da herança arquitetônica de Brasília, que possui notável harmonia entre os projetos arquitetônicos e seus respectivos sistemas estruturais. A partir de um estudo de caso, serão discutidos diferentes processos de levantamento de edificações existentes para sua modelagem em BIM, a interoperabilidade entre os modelos computacionais arquitetônico e estrutural e as possibilidades de análise e processamento estrutural, sendo evidenciadas as características específicas da edificação histórica selecionada.

As próximas seções são estruturadas da seguinte forma: o item 2 apresenta os objetivos geral e específicos para este trabalho; o item 3, a revisão bibliográfica dos temas abordados; o item 4, a metodologia empregada; o item 5, os resultados da modelagem e das análises estruturais; o item 6, por fim, as conclusões.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Verificar a aplicabilidade do HBIM para modelagem e análise estrutural do patrimônio histórico, tendo como base um estudo de caso.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaboração de um modelo BIM da edificação estudada por meio da coleta de registros e documentações;
- Elaboração de um modelo BIM da edificação estudada por meio de métodos de levantamento arquitetônico de maior precisão;
- Associação de *software* de modelagem arquitetônica com *software* de processamento estrutural;
- Comparação dos resultados da análise estrutural para os dois modelos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. BIM

Uma parcela significativa do esforço de empreendimento de uma edificação consiste na correlação entre o seu projeto e a sua construção. Sejam quais forem as formas adotadas para a apresentação do projeto, as informações nele contidas deverão ser compartilhadas entre determinado número de indivíduos e organizações – projetista, cliente, construtor, subempreiteiros, entre outros – de maneira que o produto final seja satisfatório em termos de qualidade, preço e prazo. Quanto mais bem elaborado, compatibilizado e detalhado for o projeto, maiores as chances de a etapa de construção ocorrer de forma fluida e apresentar baixas ocorrências de problemas e imprevistos (EASTMAN *et al.*, 2014).

Os modelos tradicionais de elaboração de projeto são baseados em representações em documentos em papel. Podem ser confeccionados à mão ou auxiliados por computador (Computer Aided Design – CAD), seja em duas, seja em três dimensões. Tal tipo de representação em papel, principalmente em projetos mais complexos, apresenta características problemáticas. Ela dificulta o câmbio de informações entre as partes interessadas, é propícia a incompatibilidades entre os diferentes projetos (arquitetônico, estrutural, instalações prediais etc.), gera uma grande quantidade de retrabalho em casos de alterações (o mesmo ponto tem de ser modificado em plantas-baixas, cortes, vistas) e torna o levantamento de quantitativos de materiais uma tarefa dispendiosa (EASTMAN *et al.*, 2014).

A metodologia chamada Modelo da Informação da Construção (*Building Information Modeling* – BIM) surgiu como alternativa aos modelos tradicionais de elaboração de projeto e documentação de construções. Por vezes visto erroneamente apenas como uma representação tridimensional da edificação, o BIM corresponde a um processo que se estende a todo o ciclo de vida da edificação e tem como objetivo racionalizar o processo construtivo. No que se refere à modelagem, o BIM adota objetos paramétricos dotados de informação para a representação gráfica de elementos construtivos. Isso significa que, em vez de criar linhas e superfícies que ilustram determinado elemento (portas, janelas, pilares), o modelo BIM cria objetos que possuem atributos próprios e “sabem o que são”. Dessa forma, o elemento que tradicionalmente era representado por linhas passa a conter dados e regras associados, como suas dimensões espaciais, material construtivo, absorção luminosa, entre outros (EASTMAN *et al.*, 2014).

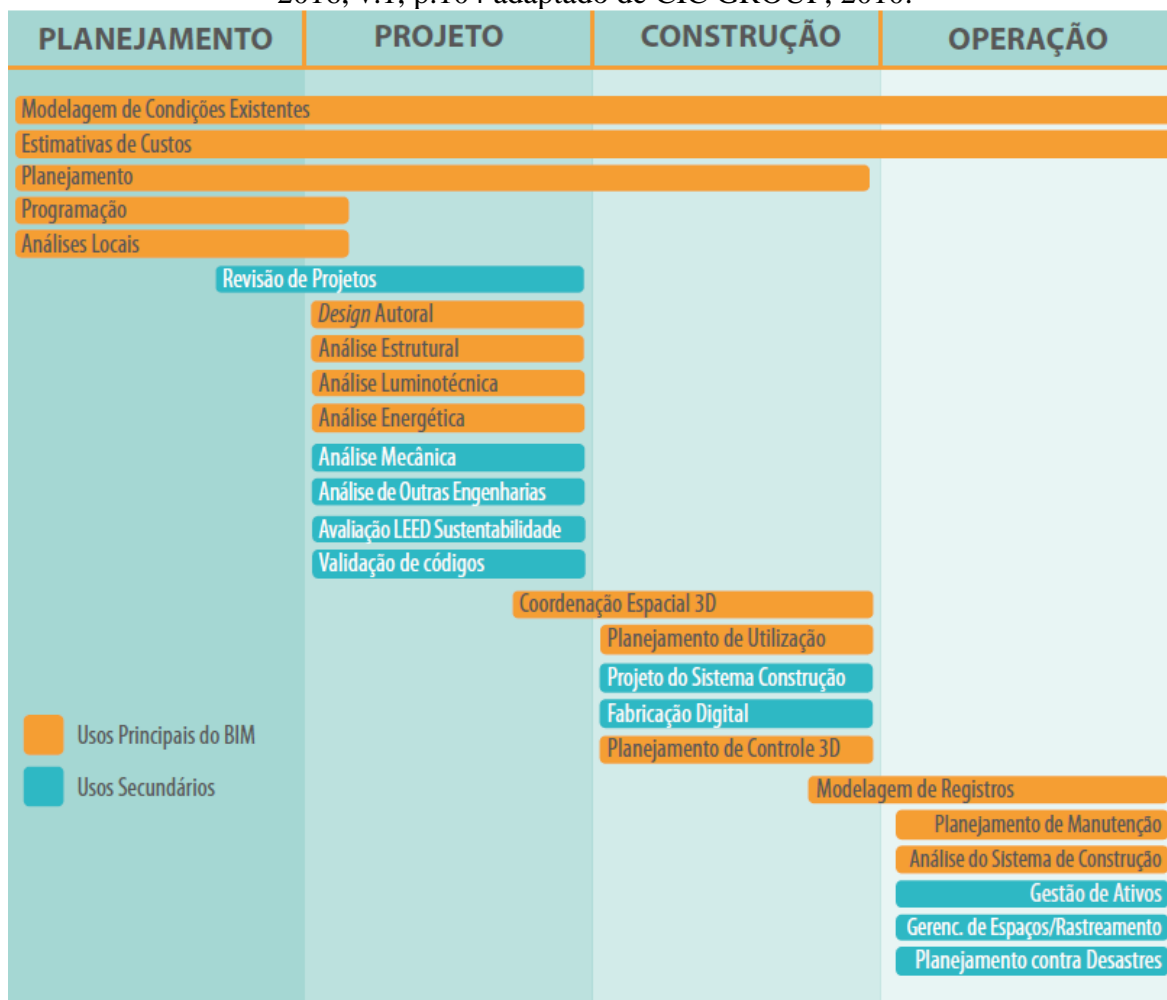
3.1.1. Usos do BIM

O Programa de Pesquisa de Construção Computadorizada Integrada da Pennsylvania State University (CIC Group) elaborou um dos manuais de referência de planos de execução de projetos em BIM (CIC GROUP, 2010). O manual estabelece que a primeira etapa para a implementação de um plano de execução eficiente é a definição dos usos do BIM para o projeto em questão. Um uso BIM pode ser classificado como “um método de aplicar o Modelo da Informação da Construção durante o ciclo de vida de uma edificação para atingir um ou mais objetivos específicos” (KREIDER; MESSNER, 2013, p. 156).

Por meio de estudos de casos de projetos, entrevistas com especialistas da indústria e revisão da literatura, os autores do Manual definiram os 25 principais usos BIM empregados no mercado. Os resultados, os quais foram traduzidos pela Coletânea Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras (CBIQ), são apresentados na Tabela 3.1. Os usos são

alocados de acordo com fases do ciclo de vida de uma edificação: planejamento (*plan*), projeto (*design*), construção (*construct*) e operação (*operate*). Destaca-se que os usos listados não são universais, porém refletem as principais aplicações do BIM identificadas na época da pesquisa.

Tabela 3.1 Principais usos BIM ao longo da vida útil de uma edificação. Fonte: CBIQ, 2016, v.1, p.104 adaptado de CIC GROUP, 2010.



O Manual sugere que sejam observados certos pontos antes da definição dos usos BIM. Primeiramente, deve-se determinar quais objetivos se pretende alcançar com a implementação do BIM, quais informações serão utilizadas nas fases posteriores do projeto e do ciclo de vida da edificação e quais tarefas serão executadas com o auxílio do BIM. Com essas considerações em mente, a equipe de projeto pondera os benefícios de implantação de um uso específico com os seus respectivos custos, de forma a definir os usos finais a serem adotados.

Por mais que tenham sido alocados em fases específicas em sua apresentação no Manual de Plano de Execução de Projetos em BIM da Pennsylvania State University, os usos BIM frequentemente podem ser alocados em múltiplas fases do ciclo de vida da edificação ou em fases diferentes das definidas pelo Manual (KREIDER; MESSNER, 2013).

Para o caso específico deste trabalho, que se insere no contexto de análise estrutural do patrimônio histórico edificado, será estudado mais profundamente o uso BIM de Análise Estrutural. Na Tabela 3.1, esse uso encontra-se alocado na etapa de projeto, contudo ele será empregado para a etapa de operação de edificações.

Análise estrutural é um processo no qual o software de modelagem analítica utiliza o modelo arquitetônico BIM original para determinar o comportamento de um dado sistema estrutural. Com a modelagem, padrões mínimos de projeto e análise estrutural são requeridos para otimização. [...] Este uso do BIM não precisa ser implementado a partir do início do projeto para ser benéfico. [...] A aplicação desta ferramenta de análise permite simulações de desempenho que podem aprimorar significativamente o projeto, o desempenho e a segurança das instalações ao longo de seu ciclo de vida (CIC Group, 2010, p.108).

Segundo Ramaji; Memari (2018), a análise estrutural é um dos tipos de uso do BIM mais comumente empregados entre os que envolvem análises de engenharia. Nesse contexto, o modelo estrutural analítico (a nomenclatura de modelos computacionais é aprofundada no item 4.4) é gerado a partir do modelo arquitetônico em BIM, também intitulado de modelo físico ou geométrico, sem a necessidade de construí-lo do zero. Tal prática, além de reduzir o tempo destinado à modelagem de estruturas, aumenta significativamente a precisão do modelo analítico. A análise estrutural é o uso BIM de segundo melhor custo-benefício (mais especificamente, relação valor / dificuldade) entre as análises de engenharia, precedido apenas pela análise de performance energética (MCGRAW HILL CONSTRUCTION, 2014 *apud* RAMAJI; MEMARI, 2018)

3.1.2. Interoperabilidade

A compreensão do BIM não somente como um modelo geométrico tridimensional, mas sim como um processo dinâmico aplicável a todas as etapas do ciclo de vida de uma edificação, evidencia a relevância das trocas de informações entre diferentes equipes e partes envolvidas no projeto. Tal intercâmbio ocorre naturalmente, seja qual for a metodologia adotada. O BIM busca, entretanto, torná-lo mais fluido e menos propenso a erros. O êxito da implantação do processo BIM provém da colaboração e da comunicação entre todos os envolvidos (SILVEIRA, 2014).

Por conseguinte, é essencial que as ferramentas computacionais permitam esse trabalho conjunto de forma adequada. As plataformas de modelagem suportam a incorporação de regras de controle do trabalho compartilhado, tornando-o mais seguro e eficiente. Entretanto, é frequente o emprego de ferramentas e *softwares* distintos para construção e análises do mesmo modelo. Conversões e adaptações de arquivos eletrônicos para formatos diferentes podem acarretar perda de informações ou ser demasiado dispendiosas (PAPADOPOULOS, 2014).

A interoperabilidade é o conceito que mensura a capacidade de transmissão de dados e utilização dos dados trocados entre dois ou mais sistemas ou componentes (CBIQ, 2016). Ela “se refere à troca de informações entre os diversos participantes de um projeto durante o ciclo de vida de um empreendimento, por meio da comunicação direta entre aplicações de *softwares*” (USACE, 2006 *apud* CBIQ, v. 3, p.75).

A Coletânea Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras (2016) ressalta que, apesar de inegáveis progressos terem sido alcançados, a interoperabilidade entre o conjunto dos *softwares* BIM está longe do ideal, que seria a inserção única de uma informação para atualização automática a todos os interessados e intercâmbio eletrônico de dados fluído e contínuo.

Um dos maiores avanços no incremento da interoperabilidade entre aplicações BIM foi o desenvolvimento do formato *Industry Foundation Classes* (IFC) pela BuildingSMART, organização internacional sem fins lucrativos. “O IFC pode ser considerado parte do esforço internacional de padronização ISO-STEP e foi desenvolvido utilizando a linguagem de modelagem de dados chamada EXPRESS, que é legível por máquinas e possui múltiplas implementações” (CBIQ, 2016, Vol.3, p. 77). O IFC não corresponde ao formato nativo de

nenhum *software*, mas viabiliza a transferência de informações entre programas de formatos nativos distintos.

3.1.2.1. Interoperabilidade no uso BIM de Análise Estrutural

A interoperabilidade é fundamental no emprego de análises estruturais classificadas como uso BIM. Para que estas atinjam seu pleno potencial, um elevado nível de interoperabilidade é requerido entre os *softwares* de modelagem arquitetônica e de processamento da estrutura (ATC, 2013 *apud* RAMAJI; MEMARI, 2018). Ramaji; Memari (2018) apontam que há uma vultosa demanda de mercado por análises estruturais empregadas como uso BIM, contudo, os modelos físico e analítico não apresentam interoperabilidade suficiente para a maioria dos *softwares* mais populares. Os autores citam como exceção o *software* Tekla, capaz de exportar modelos em formatos comuns aos programas de análise SAP2000 e STAAD, e a conexão existente entre o Autodesk Revit e o Robot Structural Analysis, que apresentam um fluxo de informações bidirecional.

Franco (2020) realizou um estudo sobre a interoperabilidade de modelos entre *softwares* de arquitetura (Autodesk Revit e GraphiSoft ArchiCAD) e *softwares* de análise e cálculo estrutural voltados para o mercado brasileiro (Eberick e TQS). Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 3.1, demonstrando a carência de interoperabilidade entre os programas, em particular na conversão do modelo arquitetônico para o modelo estrutural.

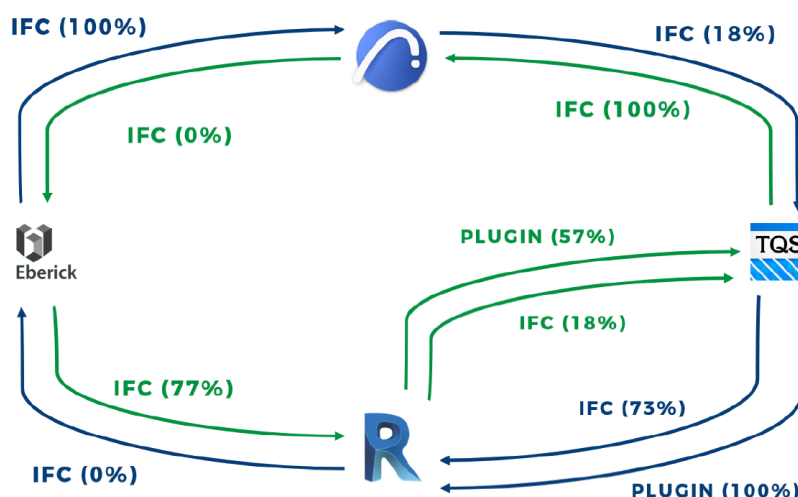


Figura 3.1 Interoperabilidade entre *softwares* BIM de modelagem arquitetônica e estrutural. Fonte: FRANCO, 2020. p. 50.

3.1.3. As Built

Uma grande vantagem do BIM em comparação aos métodos tradicionais de modelagem é o registro integrado de diferentes sistemas (arquitetônico, estrutural etc.) em um só arquivo. Essa integração, aliada a mudanças automáticas dos desenhos em duas dimensões e ao armazenamento de informações referentes aos elementos construtivos, simplifica a atualização do modelo original no caso de alterações do projeto durante a construção. Assim, é obtido um modelo final que coincide com a edificação efetivamente construída (em inglês, *as built*). Além da facilidade de alterações em projetos, certas tecnologias podem ser empregadas para criar um modelo preciso de edificações existentes. A digitalização de dados geométricos tridimensionais e dotados de informação convertidos em um modelo BIM

representa uma das abordagens de gerenciamento e monitoramento de edificações mais promissoras e de rápido desenvolvimento atualmente (KLEIN; LI; BECERIK-GERBER, 2012).

As ferramentas tradicionais de levantamentos de dados de construções edificadas são medidores de distância a laser, câmeras digitais e fitas métricas, pelas quais as dimensões dos componentes da edificação são obtidas e documentadas manualmente (JUNG *et al.*, 2014). As medições são determinadas a partir de pontos de referência previamente fixados (chamados de estações) de modo que a propagação de erros seja contida, já que a posição de cada ponto será determinada de forma independente da dos demais. Essa metodologia é denominada “triangulação”, sendo a mais precisa entre as que empregam ferramentas tradicionais (POCOBELLI *et al.*, 2018). Segundo Klein; Li; Becerik-Gerber (2012) e Anil *et al.* (2011), tal levantamento manual de campo é bastante trabalhoso, demorado e tendencioso a erros. Akinci *et al.* (2006) destacam igualmente que, como os conjuntos de dados são frequentemente interpretados manualmente, eles não são integrados eletronicamente no modelo virtual.

Em resposta às limitações mencionadas, novas metodologias foram aplicadas ao levantamento de dados espaciais de construções com o objetivo de gerar resultados automatizados e precisos. JUNG *et al.* (2014) citam como principais métodos a fotogrametria e o escaneamento a laser. Além desses, pode-se citar a *Light Detection And Ranging* (LiDAR) como alternativa pertinente, porém de menor precisão (YANG *et al.*, 2020).

A fotogrametria consiste na sobreposição de imagens em duas dimensões de alta resolução para permitir uma modelagem tridimensional do objeto capturado. O escaneamento a laser consiste na detecção de milhões a bilhões de pontos do ambiente que circunda o *scanner*, os quais têm sua coordenada geométrica registrada. Essas duas metodologias serão abordadas em mais detalhes nos itens 3.2.1.1 e 3.2.1.2.

Atualmente, pode ser encontrado na literatura o termo *as-is* (“como é”) para designar modelagens de edificações existente auxiliadas por processos que representem o seu estado atual com precisão, de maneira que o termo *as built* ficaria reservado a um modelo da construção em sua fase pós-inauguração (BARBOSA; VIEIRA, 2021). Entretanto, devido à utilização muito mais difundida do termo *as built*, este será empregado neste trabalho para descrever o estado atual de uma edificação, independentemente da fase corrente de seu ciclo de vida.

3.2. PRESERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO EDIFICADO

O conceito de patrimônio histórico ou patrimônio cultural abarca tudo aquilo que pode ser considerado como “bem ou o conjunto de bens, sejam eles de natureza material ou imaterial, [...] que fazem referência ou identificam uma identidade, ação e memória dos diferentes grupos da sociedade brasileira, cuja conservação é de interesse público” (BRASIL, 1988 *apud* BARBOSA; VIEIRA, 2021, p.13).

A preservação do patrimônio histórico surgiu como tema de relevância pela primeira vez no Brasil na década de 1920. Sua manifestação inicial se deu na esfera política, com a busca de conservar e resguardar monumentos e artefatos considerados de valor. Atualmente, o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) é a autarquia governamental responsável pela preservação do patrimônio histórico. Ele define a preservação como a gestão prática do patrimônio fundamentada em mecanismos de identificação, proteção e gerenciamento (ALMEIDA, 2021).

Considerando como patrimônio histórico edificado, também intitulado de herança arquitetônica, a parcela do patrimônio histórico concebida com o objetivo de criar e limitar

o espaço (ABDELHAMID, 2019), certas particularidades envolvem o seu processo de preservação e manutenção. (PUPIM NETO *et al.*, 2019 *apud* BARBOSA; VIEIRA, 2021). Uma particularidade relevante é a necessidade de documentar e inventariar o monumento. A documentação do patrimônio histórico é a coleção sistemática de elementos tanto tangíveis quanto intangíveis de estruturas e ambientes de valor cultural e antropológico, envolvendo as técnicas de coleta, processamento técnico e disseminação de informações. O objetivo dessa prática é prover informações que possibilitarão a adequada conservação, manutenção e monitoramento de um dado artefato ou construção (DORE; MURPHY, 2017; EPPICH *et al.*, 2007 *apud* DORE; MURPHY, 2017; BRYAN *et al.*, 2009).

São empregadas atualmente diversas metodologias para a criação e o gerenciamento de documentações e inventários no Brasil. Segundo Cuperschmid *et al.* (2018), políticas de conservação efetivas requerem uma documentação mais ampla do que um único inventário tradicional (registro momentâneo de um bem patrimonial). Para tanto, frequentemente se faz necessária a adoção de metodologia que possibilite alimentação regular de uma base de dados e gestão contínua do monumento histórico (CUPERSCHMID *et al.*, 2018).

3.2.1. HBIM

Uma maneira promissora de gerenciar a documentação e o registro do patrimônio histórico edificado é o emprego da metodologia BIM para gerar modelos precisos e dotados de informação (CUPERSCHMID *et al.*, 2018). O BIM aplicado à manutenção e à preservação do patrimônio histórico edificado é usualmente intitulado de HBIM (*Historical Building Information Modelling*).

O termo HBIM foi proposto inicialmente por Murphy, Mcgovern e Pavia (2009). Os autores apresentaram o HBIM como um exercício de engenharia reversa, em que elementos constituintes de um monumento são mapeados (recomenda-se o uso das técnicas de escaneamento a laser e fotogrametria) e posteriormente interpretados como objetos paramétricos no modelo BIM. O artigo foca especificamente no processo de modelagem de edifícios históricos. Em 2013, Dore e Murphy definiram o HBIM como “um *plug-in* para o *software* ArchiCAD, uma ferramenta BIM, empregando objetos de biblioteca paramétricos e técnicas de modelagem procedural para automatizar o estágio de modelagem geométrica” (COGIMA *et al.*, 2020, DORE, MURPHY, 2013 *apud* COGIMA *et al.*, 2020, p. 118).

A principal exigência no uso do BIM para representação e levantamento da arquitetura histórica é a qualidade do modelo e sua confiabilidade em relação à geometria. Uma segunda condição envolve a adição de um banco de dados abrangente de notas históricas sobre cada componente, incluindo materiais e intervenções realizadas ao longo do tempo. Se os modelos forem capazes de atender a essas exigências, evitando processos computacionais trabalhosos, nos próximos anos o HBIM desempenhará um papel fundamental na restauração, representação e comunicação do patrimônio cultural edificado (QUATTRINI *et al.*, 2015).

Pocobelli *et al.* (2018), Dore; Murphy (2017), Logothetis; Delinasiou; Stylianidis (2015), Yang *et al.*, (2020) e Barbosa; Vieira (2021) produziram cinco artigos sobre revisões bibliográficas extensivas do HBIM e o seu estado da arte, os quais servirão de base para os parágrafos seguintes.

Pocobelli *et al.* (2018) ressaltam que a conservação de edificações é um processo complexo e de múltiplos níveis, que requer a colaboração de diferentes especialistas. Os autores listam o que consideram os sete principais tipos de informação a serem potencialmente incluídos em um modelo HBIM:

- Dados geométricos, como dimensões e volumetria;

- Estilo arquitetônico, o qual pode abarcar componentes específicos da edificação e técnicas construtivas;
- Caracterização dos materiais;
- Degradação de elementos, sendo que diferentes tipos de degradação podem ser definidos;
- Intervenções, as quais devem ser planejadas de acordo com o item anterior e o detalhamento de seu plano de ação pode ser realizado com o auxílio de hachuras, símbolos e tabelas;
- Levantamento de danos estruturais, caso o edifício os apresente;
- Coleta de dados, e possível simulação, de parâmetros do ambiente e seus futuros efeitos na composição do edifício.

Como apontado no item 3.1.3, o levantamento da primeira informação listada (dados geométricos da edificação, como dimensões e volumetria), considerado o mais importante por Quattrini *et al.*, (2015), pode ser obtido de forma precisa e prática com o auxílio de tecnologias específicas. As principais tecnologias e metodologias adotadas para modelagem do patrimônio histórico edificado são descritas nos itens 3.2.1.1 e 3.2.1.2, sendo que a tendência atual da modelagem HBIM é a combinação de fotogrametria digital com escaneamento a laser (POCOBELLI *et al.*, 2018).

3.2.1.1. Escaneamento a laser

Os métodos de escaneamento (ou varredura) a laser podem ser subdivididos em duas áreas: aéreo e terrestre. (BARBOSA; VIEIRA, 2021). Entretanto, a varredura aérea apresenta maior dificuldade em atender as demandas de detalhes e precisão geométrica requeridas para aplicações em patrimônio cultural edificado. Dados obtidos em terra são, portanto, mais frequentemente empregados, podendo ser integrados com dados aéreos para complementação da representação espacial (YANG *et al.*, 2020).

O escaneamento a laser terrestre (*terrestrial laser scanning* – TLS) é um dos métodos mais eficazes de coleta de dados para a modelagem *as built* precisa de um edifício. O TLS é capaz de registrar automaticamente milhões de pontos tridimensionais referentes ao objeto mapeado praticamente em tempo real. Ele mede distâncias e ângulos do sensor ao objeto escaneado com uma precisão que pode variar de milímetros a centímetros. (DORE; MURPHY, 2017). Um exemplo de aparelho destinado à varredura a laser terrestre é ilustrado na Figura 3.2.

O TLS pode operar por três princípios diferentes: triangulação, tempo de voo e comparação de fase. Os três tipos de aparelhos geram como produto uma nuvem de pontos tridimensional do objeto analisado, porém o alcance e a precisão de cada método variam. O TLS constitui uma solução precisa, eficiente e de fácil utilização para adquirir dados tridimensionais (3D) para modelagens *as built*, sendo a sua principal desvantagem o custo relativamente elevado de obtenção e operação dessa tecnologia (DORE; MURPHY, 2017).

Vale frisar que a nuvem de pontos gerada como produto do TLS, apesar de apresentar notável precisão espacial, pode acarretar em arquivos virtuais grandes e pesados, de tal forma que a importação e utilização de sua forma bruta para *softwares* BIM seja inviável (BARBOSA; VIEIRA, 2021). Portanto, diversos trabalhos, como os de Quattrini *et al.* (2015), Rodríguez-moreno *et al.* (2018), Murphy; McGovern; Pavia, (2013), entre outros, abordam o processo de simplificação, remoção de ruídos e demais preparos realizados em nuvens de pontos para sua conversão em modelos BIM geometricamente precisos e dotados de informação. O item 3.2.1.3 aborda especificamente os processos de preparo da nuvem de pontos.



Figura 3.2 Aparelho de escaneamento a laser FARO Focus M 70 utilizado para modelagem *as built* do Catetinho, em Brasília. Fonte: ALMEIDA, 2021, p. 45.

3.2.1.2. Fotogrametria

Fotogrametria corresponde ao processo de determinação de medidas precisas e dados tridimensionais a partir de fotografias. Técnicas fotogramétricas utilizam imagens captadas de diferentes locais, de forma a registrar a geometria tridimensional de um objeto ou edificação. Essa metodologia tem se tornado popular para a modelagem de edifícios existentes, especialmente no que tange ao patrimônio histórico edificado. Câmeras digitais de baixo custo, processamento computadorizado potente e maior disponibilidade de *software* fotogramétrico comercial e de código aberto estão impulsionando muitas novas aplicações para esta tecnologia. (DORE; MURPHY, 2017)

Uma das principais vantagens da fotogrametria em relação à digitalização a laser é a adição de imagens de alta qualidade e de informações coloridas aos dados resultantes (alguns *scanners* mais modernos, entretanto, já incorporam essas mesmas características – ALMEIDA, 2021). Destaca-se também a possibilidade de obtenção de informações de forma indireta, sem necessidade de deslocamento por parte do profissional (BARBOSA; VIEIRA, 2021). Os princípios da fotogrametria são similares tanto para a fotogrametria aérea quanto para a fotogrametria de alcance próximo (com base no solo). Embora essas técnicas possam ser realizadas com câmeras digitais de baixo custo, o processamento computacional necessário nesses casos pode ser incômodo. Os dados de saída dos levantamentos fotogramétricos são similares aos obtidos pelo escaneamento a laser e incluem imagens ortográficas, nuvens de pontos, modelos de superfície triangulada e modelos de superfície texturizada (DORE; MURPHY, 2017).

3.2.1.3. Nuvem de pontos e modelagem

O principal resultado gerado pelos métodos de levantamento de escaneamento a laser e fotogrametria é a nuvem de pontos. Aos pontos são atribuídas coordenadas geométricas

específicas, por vezes sendo registradas informações adicionais (altimetria, cor) dependendo da solução de levantamento empregada. Para que as nuvens possam ser adequadamente importadas para o *software* BIM, há a necessidade de processá-las previamente. As operações mais comuns são: eliminação de ruídos, que consiste em detectar e eliminar itens escaneados que não fazem parte do estudo; registro de nuvens de pontos, que é a mescla de diferentes nuvens de um mesmo objeto capturadas de locais distintos; e malhagem, cujo objetivo é criar superfícies por triangulação para posteriormente serem convertidas em um modelo BIM (POCOBELLI *et al.*, 2018).

Pocobelli *et al.* (2018) frisam que a tarefa de processamento da nuvem de pontos é longa e complexa, porém há tentativas de automatizá-la. A automatização do processamento de nuvens de pontos e sua conversão em um modelo BIM é um ramo em que as pesquisas em HBIM são fortemente ativas. Uma automatização completa pouparia o responsável pela preservação do monumento de uma tarefa desgastante, que muitas vezes o desencorajaria de empregar semelhantes tecnologias. Exemplos são o *plug-in GreenSpider* e o emprego de *Non Uniform Rational Basis Splines* como modelo matemático para descrição de superfícies (POCOBELLI *et al.*, 2018).

Outro desafio a ser vencido é a criação de objetos paramétricos que representem de forma satisfatória os componentes de uma edificação histórica, frequentemente complexos e dotados de muitos detalhes. A linguagem de programação que rege a modelagem de objetos paramétricos é a *Geometric Descriptive Language* (GDL). Códigos em GLD foram desenvolvidos para a geração de bibliotecas específicas para emprego em modelos HBIM. Algumas dessas bibliotecas, inclusive, são direcionadas a localidades específicas, como a da cidade de Jidá, na Arábia Saudita (POCOBELLI *et al.*, 2018).

O tema da criação de objetos paramétricos dotados de informação é diretamente relacionado ao gerenciamento de metadados. Metadados correspondem justamente ao conjunto de dados e parâmetros que descrevem os objetos ou a ele estão relacionados, porém expressos em forma de tabelas, planilhas e imagens. Metadados típicos que podem ser inseridos em modelos voltados à preservação do patrimônio histórico são: fotografias de arquivos, textos e documentos inventariados (como relatos da história do edifício e relatórios de intervenções prévias), relatórios de degradação, caracterização dos materiais e dados arquitetônicos. Todos os metadados que podem potencialmente ser incorporados ao BIM têm o objetivo principal de propiciar uma maior compreensão dos edifícios patrimoniais (POCOBELLI *et al.*, 2018).

3.2.1.4. Limitações

A padronização do registro de informações em um modelo BIM é um desafio enfrentado pela indústria da arquitetura, engenharia e construção, tarefa ainda mais árdua quando se trata de edifícios históricos existentes, em razão de sua natureza frequentemente complexa e irregular (DORE; MURPHY, 2017). Nesses casos, a própria representação virtual de componentes e materiais é dificultada, pois suas características e geometria não são representativas para uma biblioteca típica de *softwares* em BIM. Isso porque essas bibliotecas têm como finalidade principal a concepção e elaboração de projetos de novos edifícios (LOGOTHETIS; DELINASIOU; STYLIANIDIS, 2015).

Nenhum pacote de *software* comercial é atualmente capaz de cumprir plenamente os requisitos de modelagem tridimensional de edificações históricas e de gerenciamento das informações dos objetos paramétricos a ela relacionados.

Por fim, a maioria dos profissionais da área de patrimônio histórico apresenta considerável falta de conhecimento e treinamento em tecnologias da informação (BRUNO; RONCELLA, 2019 *apud* BARBOSA; VIEIRA, 2021).

Juntamente com as dificuldades de modelagem expostas no item 3.2.1.3 e de aquisição das soluções tecnológicas dos itens 3.2.1.1 e 3.2.1.2, esses foram os principais gargalos encontrados para a limitação do emprego do HBIM em edifícios históricos.

3.2.2. Contexto de Brasília

Brasília, Capital da República desde 1960, apresenta características únicas no que se refere ao seu patrimônio histórico. O Grupo de Trabalho para Preservação do Patrimônio Histórico e Cultural de Brasília (GT Brasília), sob autoridade do IPHAN, afirma que Brasília é “o maior acervo de arquitetura e urbanismo modernos” (IPHAN, 2016, p. 8). A Capital foi reconhecida como patrimônio cultural nas esferas de proteção distrital, nacional e mundial, sendo o primeiro conjunto urbano do século XX a ser reconhecido como patrimônio cultural da humanidade. Nela, são diversos os marcos de grandes nomes da arquitetura moderna, como Lúcio Costa, Oscar Niemeyer e Joaquim Cardozo (IPHAN, 2016). As breves constatações apresentadas evidenciam como, apesar de bastante jovem para o padrão de cidades, Brasília corresponde a um grande marco na história do patrimônio cultural brasileiro.

Certas particularidades da Capital, especialmente o fato de ela ter sido planejada, apresentando uma ideia urbanística e uma configuração em larga escala bem definidas, contribuíram para o seu tombamento como conjunto urbano. O planejamento de Lúcio Costa para o plano piloto envolvia uma configuração espacial e urbana dividida em zonas de ocupações setoriais. Essas zonas se dividem em residencial, bucólica, gregária e monumental (COSTA, 1991 *apud* FARIAS; JUNQUEIRA, 2018). A área tombada da capital inclui as Regiões Administrativas do Plano Piloto, Cruzeiro, Sudoeste / Octogonal e Candangolândia (FARIAS; JUNQUEIRA, 2018).

Lima (2012) salienta que Brasília apresenta a inserção do seu sítio patrimonial justamente em seu centro econômico, institucional e simbolicamente ativo. Tal característica vai no sentido contrário ao observado na maior parte das cidades que possuem patrimônio histórico significativo, nas quais a vida econômica localiza-se fora da área patrimonial. Esta, portanto, direciona-se praticamente de forma exclusiva ao turismo. A posição central do sítio patrimonial da capital acarreta maior complexidade à preservação do patrimônio histórico, sobretudo quando se contempla a cidade como um fenômeno urbano ativo e ainda em expansão.

Além de suas características urbanísticas, Brasília é notável por seu patrimônio arquitetônico material, compreendendo edifícios e monumentos que constituem marcos na arquitetura moderna. Inojosa (2010, 2019) evidencia a estreita relação da arquitetura com a estrutura em diversos monumentos da capital (Palácio do Planalto, Supremo Tribunal Federal, Igreja Nossa Senhora de Fátima, Catedral, entre outros). A colaboração do arquiteto Oscar Niemeyer com o engenheiro Joaquim Cardozo possibilitou uma criatividade plástica e uma leveza das formas estruturais raras vezes observadas anteriormente no contexto brasileiro.

Parte significativa dos monumentos da capital se valeu da liberdade de formas e clareza de volumes possibilitada pelo concreto armado como material estrutural. As origens do concreto remontam ao século XIX, porém apenas no século XX começou a ser empregado de forma mais ampla e comercial. Unindo as características mais favoráveis de seus elementos constituintes (resistência à compressão do concreto e resistência à tração do aço) e suas particularidades construtivas, o concreto armado possibilita a criação de “formas variadas que se adequam tanto aos anseios criativos da arquitetura, quanto às necessidades do sistema estrutural ideal para a distribuição racional das cargas” (SALVADORI, 2011 *apud* INOJOSA, 2019, p. 66). O patrimônio histórico edificado de Brasília é uma grande demonstração de uniões elegantes entre arquitetura e estrutura.

3.2.2.1. Igrejinha Nossa Senhora de Fátima

A Igrejinha Nossa Senhora de Fátima foi escolhida como estudo de caso para este trabalho (ver item 4.1). A Igrejinha se localiza em Brasília, entre as superquadras 307 e 308 sul, e é um bem tombado individualmente pelo IPHAN. Sua construção foi iniciada em 26 de outubro de 1957 e sua inauguração ocorreu no dia 28 de junho de 1958. O projeto arquitetônico foi concebido por Oscar Niemeyer e o projeto estrutural foi confiado ao engenheiro Joaquim Cardozo, que se ocupava com o cálculo de grande parte dos edifícios durante a construção de Brasília (INOJOSA, 2010). A estrutura e a forma arquitetônica da Igreja Nossa Senhora de Fátima, apesar de baseadas em elementos construtivos tradicionais (pilares, vigas e lajes em concreto armado), resultam em uma geometria criativa, inusitada e dotada de movimento, como ilustrado pela Figura 3.3.



Figura 3.3 Igreja Nossa Senhora de Fátima. Fonte: Autor.

A inspiração para a arquitetura da Igrejinha foi o “formato dos chapéus de abas largas das freiras da Congregação das Irmãs Vicenta Maria” (LEAL, 2008 *apud* INOJOSA, 2010, p. 99). Além de sua configuração espacial, o monumento é ilustre pelo revestimento externo das paredes, composto por painéis de azulejos concebidos pelo artista plástico Athos Bulcão. Os painéis são formados por duas figuras dispostas de forma intercalada, uma representando a Pomba da Paz, em branco, e a outra a Estrela de Belém, em preto, ambas sobre um fundo azul.

Primeiro templo católico da cidade, a Igrejinha se enquadra nas diretrizes do Relatório do Plano Piloto de Brasília, que estabeleceu como zonas residenciais uma sequência de amplas quadras, intituladas de superquadras, divididas em setores Sul e Norte. As superquadras abarcariam diversos espaços, monumentos e equipamentos destinados a promover a socialização e atividades básicas dos moradores, tais como escolas, igrejas, cinemas e comércio local (ARAKAKI; AZAMBUJA; MORALES SÁNCHEZ, 2015).

A Igrejinha Nossa Senhora de Fátima foi concluída aproximadamente dois anos antes da inauguração de Brasília. A construção adiantada se deve a dois motivos principais: o atendimento da necessidade religiosa dos indivíduos que migraram para o planalto central e

um desejo particular da então Primeira-dama Sarah Kubistchek, a qual havia feito uma promessa em razão de uma doença que acometia sua filha (INOJOSA, 2010).

Em termos gerais, a estrutura da Igrejinha é constituída por duas paredes estruturais (azuis), três pilares externos (vermelhos) e a cobertura (verde), conforme a Figura 3.4.

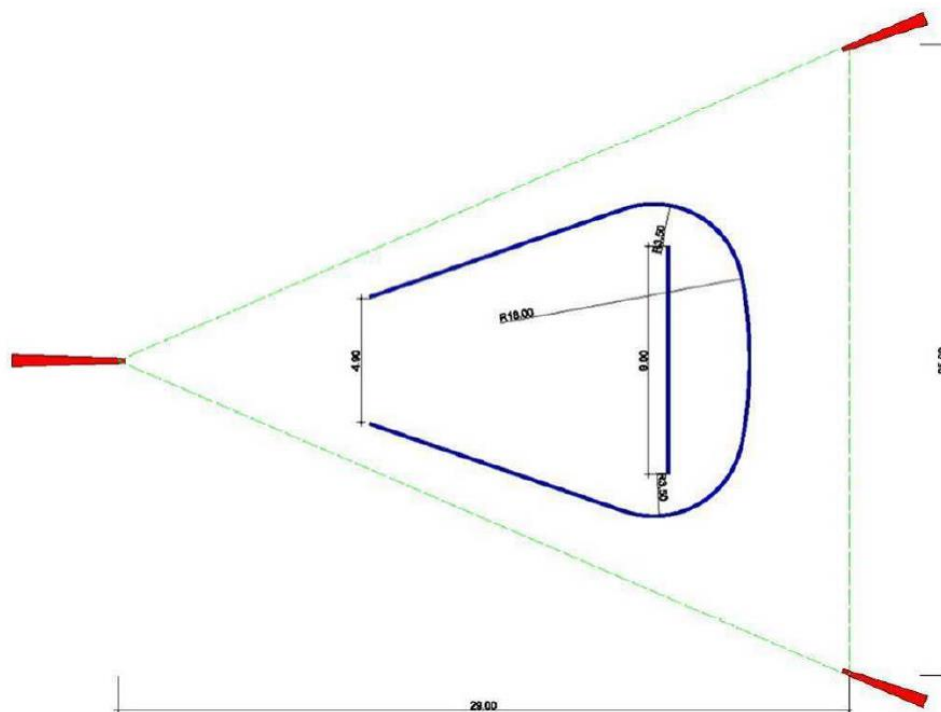


Figura 3.4 Elementos estruturais da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. Fonte: INOJOSA, 2010, p. 100.

A solução estrutural adotada para o monumento respeita a ideia de leveza buscada por Niemeyer. A cobertura é triangular e curva, apresentando espessura variável ao longo de seu comprimento (10 cm no trecho curvo central e de 25 cm a 30 cm nas extremidades - ARAKAKI; AZAMBUJA; MORALES SÁNCHEZ, 2015). Sua cobertura é constituída por quatro lajes e cinco vigas invertidas, as quais não são visíveis para o observador no plano térreo. Nesse plano, ao se avistar a estrutura lateralmente, tem a impressão de que a laje é mais espessa; o que ele observa, entretanto, são as vigas laterais externas. As cinco vigas partem de um mesmo ponto, no encontro com o pilar P1 (pilar à esquerda na Figura 3.4), e se estendem até o outro bordo da cobertura. Assim como a laje, apresentam altura variável, de 90 cm em seu trecho central e de 25 cm nas extremidades – nestas, vigas e lajes convergem para a mesma altura (INOJOSA, 2010, 2019). Os elementos descritos podem ser visualizados na Figura 3.5.

Os três pilares “possuem seção transversal trapezoidal variável, determinada por uma curva na direção de sua altura”. Outros elementos de sustentação são as duas paredes estruturais indicadas em azul na Figura 3.4. As demais alvenarias foram executadas com blocos cerâmicos, por apresentarem somente funções de delimitação espacial e vedação. É notável a integração de componentes estruturais como parte da concepção plástica do projeto arquitetônico (ARAKAKI; AZAMBUJA; MORALES SÁNCHEZ, 2015, p. 66).



Figura 3.5 Vista aérea da Igreja Nossa Senhora de Fátima. Out. 1990. Fonte: Acervo DEPHA.

Considerando os pontos percorridos, torna-se clara a importância da Igreja como patrimônio histórico da Capital, assim como sua riqueza estrutural.

3.3. ANÁLISE ESTRUTURAL

A estrutura de uma edificação corresponde ao conjunto de seus elementos constituintes que, interligados, dão-lhe sustentação e estabilidade. A estrutura deve ser capaz de “receber solicitações externas, absorvê-las internamente e transmiti-las até seus apoios, onde estas solicitações externas encontrarão seu sistema estático equilibrante” (SUSSEKIND, 1977). Seja na etapa de projeto, seja no estudo de edificações existentes, a análise da estrutura de uma edificação é fundamental para compreender o seu comportamento e garantir sua funcionalidade e segurança. Análise estrutural pode ser definida como a obtenção de diversos parâmetros que expressem o comportamento da estrutura em questão, tais como campos de tensões, deformações e deslocamentos. Os principais dados a serem determinados por uma análise estrutural são os esforços internos e externos (cargas e reações de apoio), as tensões internas, os deslocamentos e correspondentes deformações resultantes do carregamento aplicado (MARTHA, 2010), conceitos aos quais se presumirá que o leitor está familiarizado.

Luiz Fernando Martha, em seu livro “Métodos Básicos da Análise de Estruturas” (2010), estipula quatro níveis de abstração para a criação de um modelo que represente de forma satisfatória o desempenho de uma estrutura real. A criação de um modelo provém da necessidade de estabelecer simplificações da representação dos elementos estruturais e premissas quanto ao seu comportamento mecânico, de forma a possibilitar cálculos matemáticos. Esses níveis podem ser observados na Figura 3.6 Quatro níveis de abstração para uma estrutura na análise estrutural.

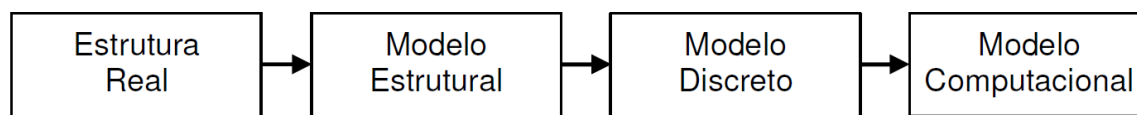


Figura 3.6 Quatro níveis de abstração para uma estrutura na análise estrutural. Fonte: Martha, 2010, p. 3.

O segundo nível de abstração, o modelo estrutural, consiste no modelo analítico que torna possível representar a estrutura de forma matemática, sendo essa uma das etapas mais relevantes de todo o processo. Essa etapa inclui a adoção de certas hipóteses, que equivalem a uma idealização do comportamento da estrutura. São elas: hipóteses sobre a geometria do modelo, sobre as condições de suporte da estrutura, sobre o comportamento dos materiais e sobre os carregamentos atuantes (MARTHA, 2010).

O modelo discreto é aquele concebido nas considerações das metodologias de cálculo. Os métodos de análise estrutural devem subdividir o modelo analítico contínuo em elementos discretos aos quais possam ser atribuídos parâmetros ou variáveis específicos. Martha (2010) evidencia que, no caso de estruturas contínuas e de condições de contorno irregulares, o método discreto comumente empregado é o Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF discretiza a estrutura em subdomínios, denominados “elementos finitos”, de geometria simples – quadrados ou triângulos.

Os modelos discretos de estruturas reticuladas – aquelas que podem ser representadas de maneira aceitável por um modelo de barras, incluindo barras, grelhas e pórticos – e de estruturas contínuas apresentam importante diferença de concepção. Os primeiros possuem solução exata (ou analítica) de acordo com a formulação matemática da Teoria da Elasticidade, enquanto os segundos constituem uma aproximação dessa solução analítica. Por esse motivo, frequentemente são denominados de “métodos analíticos” e “métodos numéricos”, respectivamente (MARTHA, 2010). A Figura 3.7 exemplifica um modelo discreto reticulado, a Figura 3.8 um modelo discreto em elementos finitos.

Por fim, o modelo computacional foi incluído pelo autor devido à ampla utilização de computadores e *softwares* para auxílio de análises estruturais. Ele corresponderá à interpretação virtual dos modelos anteriores, em forma de códigos de visualização e processamento da estrutura.

A análise de estruturas pode ser vista atualmente como uma simulação computacional do comportamento de estruturas. [...] é importante ter em mente que não se concebe atualmente executar as tarefas de análise estrutural, mesmo para o caso de estruturas reticuladas, sem o uso de computador e de Computação Gráfica. (MARTHA, 2010, p. 10)

Diversos métodos e teorias foram desenvolvidos para descrever o comportamento de estruturas de acordo com determinados modelos. Os primeiros se aplicavam a estruturas isostáticas e reticuladas. A complexidade dos métodos aumentou com o tempo, eventualmente sendo aplicados à estruturas hiperestáticas e contínuas (MARTHA, 2010).

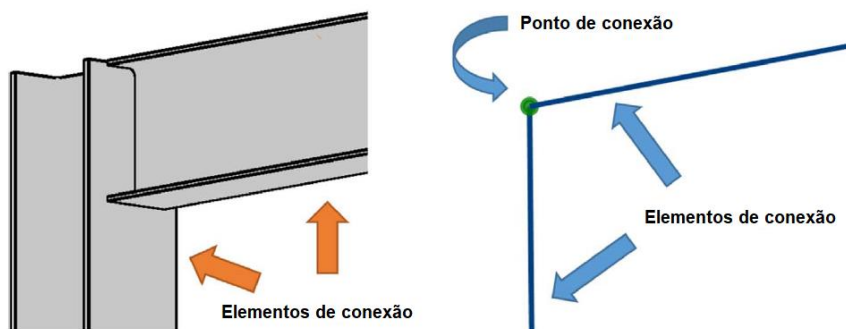


Figura 3.7 Discretização de uma estrutura reticulada por métodos analíticos. Fonte: Ramaji; Memari, 2018, p. 120.

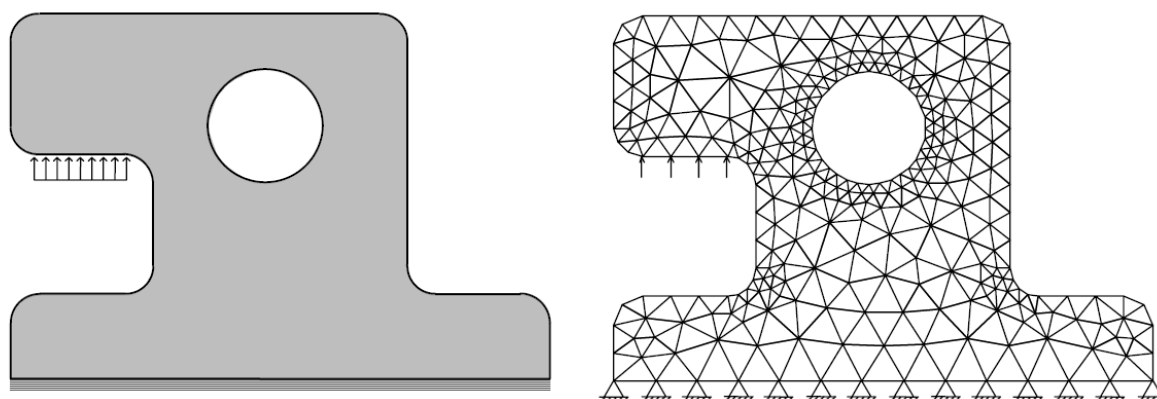


Figura 3.8 Discretização pelo Método dos Elementos Finitos para uma estrutura contínua. Fonte: Martha, 2010, p.9.

Atualmente, estão à disposição métodos que permitem a análise de estruturas extremamente complexas com elevada precisão, sobretudo com o auxílio de algoritmos e ferramentas virtuais. Sabadin (2018) listou e discorreu sobre os modelos previstos na NBR 6118:2014, “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento”, os quais são apresentados na Tabela 3.2. A NBR 6118:2014 “define os critérios gerais e requisitos básicos que regem o projeto das estruturas de concreto simples, armado e protendido, sejam elas de edifícios, pontes e viadutos, obras hidráulicas [...] etc.” (CARVALHO, FILHO, 2017, p.28)

Tabela 3.2 Modelos de análise estrutural previstos na NBR 6118:2014. Fonte: Sabadin, 2018.

Modelos de Análise - NBR 6118:2014	
Modelo	Observações
1. Método dos Elementos Finitos	O modelo deve ser discretizado o suficiente para que não haja erros na análise.
2. Comportamento dos Materiais	São admitidas as análises linear, linear com redistribuição, plástica e não linear.

3. Vigas Contínuas	Modelo clássico de viga contínua e modelo melhorado, considerando a solidariedade dos pilares com a viga. Apenas podem ser adotados segundo determinados critérios.
4. Trechos Rígidos	Admite-se a utilização de um trecho rígido na região comum ao cruzamento de dois ou mais elementos.
5. Vãos Efetivos de Vigas	São estabelecidos os critérios para o cálculo do vão efetivo de vigas.
6. Grelhas e Pórticos Espaciais	Os pavimentos dos edifícios podem ser calculados como grelhas para o estudo das cargas verticais, desde que os pilares sejam considerados análogos ao prescrito na teoria de vigas contínuas.
7. Placas	É permitida a análise de estruturas de placas caso haja manutenção da seção plana após a deformação, em faixas suficientemente estreitas, e os elementos sejam representados por seu plano médio.

O modelo de análise empregado neste trabalho foi o Método dos Elementos Finitos, de acordo com o funcionamento computacional do *software* selecionado (item 4.4). Hasan; Torky; Rashed (2019) destacam que a maioria dos programas de análise estrutural atuais são baseados no Método dos Elementos Finitos.

Sabadin (2018) aponta que, sobretudo na etapa de projeto, análises estruturais deficitárias, frequentemente oriundas da excessiva confiança de profissionais em programas de cálculo estrutural, podem resultar em diversas falhas. Essas se estendem do superdimensionamento, acarretando desperdício de recursos, ao subdimensionamento, acarretando perda de segurança e de estabilidade da estrutura.

Na elaboração de projetos, a análise estrutural constitui fator determinante para o dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais. Já no caso de edificações existentes, ela pode desempenhar diferentes papéis: verificação da capacidade resistente de uma estrutura (ARAUJO *et al.*, 2020), auxílio na manutenção e operação da edificação (planejamento de intervenções estruturais, apuração da relação entre esforços internos e patologias observadas, identificação de regiões críticas da estrutura - RIBEIRO *et al.*, 2020; ABBATE; INVERNIZZI; SPANÒ, 2020; ORENI *et al.*, 2014) ou ferramenta de estudo da concepção estrutural de uma edificação (INOJOSA, 2010).

3.3.1. HBIM como Ferramenta de Análise Estrutural do Patrimônio Histórico

Como exposto no item 3.1.1, a análise estrutural é um dos usos do BIM mais promissores dentre os classificados como análises de engenharia. No contexto da preservação do patrimônio histórico edificado – HBIM, diferentes trabalhos recorreram a esse Uso em sua metodologia. Exemplos de aplicações do HBIM como ferramenta de análise estrutural do

patrimônio histórico são apresentados a seguir, assim como eventuais limitações e pontos de aprimoramento identificados.

Dore *et al.* (2015) confeccionaram um modelo HBIM das Quatro Cortes em Dublin, Irlanda, construção clássica do século XVIII que foi parcialmente destruída durante a guerra civil no país em 1922. Os autores, pioneiros e referências em HBIM, apresentaram como objetivos efetuar a análise estrutural e de conservação do edifício e ilustrar virtualmente a extensão do dano e da deterioração atuais. Para modelagem da edificação, adotaram-se dois fluxos de trabalho: o primeiro, baseado em documentações e registros históricos, e, o segundo, baseado no escaneamento a laser da estrutura interna e externa da cúpula danificada pela guerra.

Um exemplo de comportamento estrutural identificado a partir do modelo de varredura a laser é apresentado pela Figura 3.9. É possível observar a parede circular, cuja deformação é evidente na seção à direita da Figura 3.9, em sua verdadeira condição. Os autores atribuem os deslocamentos a características dos materiais empregados e movimentações naturais da estrutura. Nesse artigo, apesar de intitulado “Simulações estruturais e análises de conservação – HBIM”, a estrutura não foi processada, apenas foram verificadas deformações observáveis no modelo de escaneamento a laser.

Oreni *et al.* (2014) também discutiram sobre o tema ao estudar a *Basilica di Collemaggio* em Áquila, Itália. A edificação foi seriamente danificada por um terremoto em 2009. Os autores empregaram tanto o escaneamento a laser quanto a fotogrametria para construir uma rede geodésica e um sistema de referências robusto, devido à complexidade e ao tamanho da basílica.

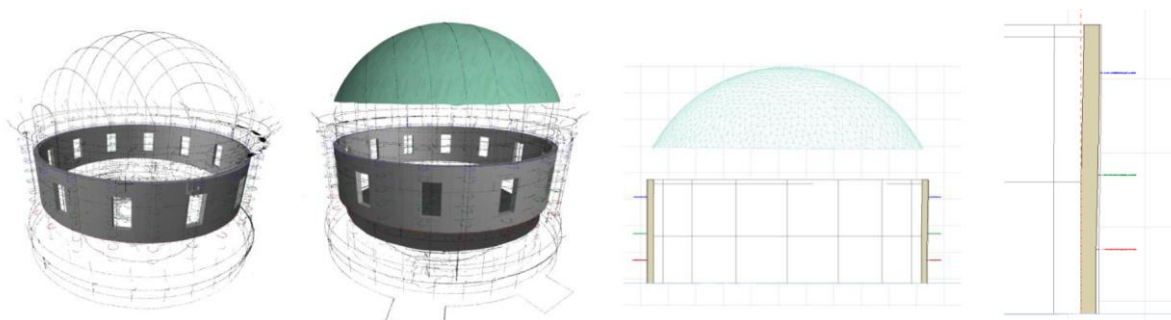


Figura 3.9 Modelo de parede circular e cúpula das Quatro Cortes em Dublin, incluindo deformações. Fonte: Dore *et al.*, 2015. p. 355 - 356.

A modelagem tridimensional da estrutura a partir de múltiplas nuvens de pontos foi realizada nos *softwares* Rhinoceros e Bentley Pointools. Ela foi dividida de acordo com a lógica construtiva dos elementos estruturais. Em seguida, o modelo foi exportado para o Midas, *software* de análise estrutural baseado no Método dos Elementos Finitos. Os sólidos gerados no Rhinoceros foram discretizados de acordo com bibliotecas padrão do Midas (vigas, barras etc.). A malha de elementos finitos e representações visuais dos resultados da análise estrutural da fachada norte da basílica podem ser observados na Figura 3.10. Apesar de a estrutura ter sido efetivamente processada a partir de um modelo HBIM, os resultados da análise estrutural não são discutidos no artigo, que direciona maior foco ao procedimento de modelagem.

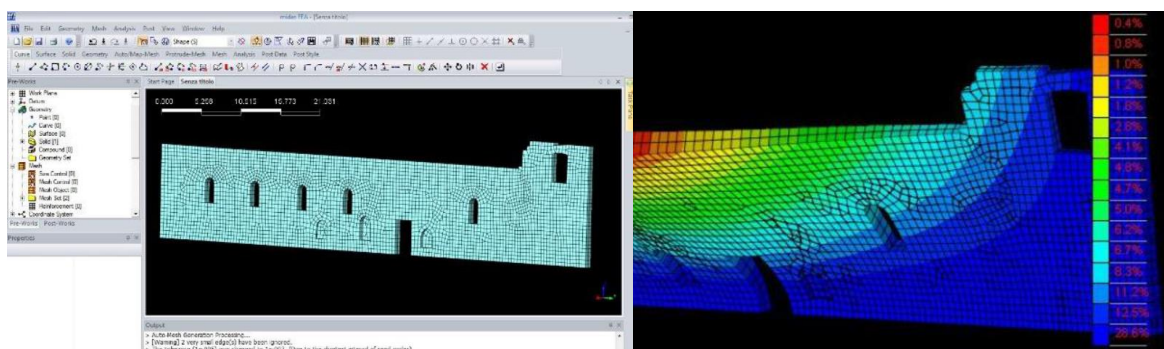


Figura 3.10 Simulação estrutural da fachada norte da *Basilica di Collemaggio* pelo MEF no *software* Midas. Fonte: Oreni *et al.*, 2014. p. 270 – 271.

Trabalhos mais recentes que se inserem nesse contexto são os de Nieto-Julián; Antón; Moyano (2020), Abbate; Invernizzi; Spanò (2020), Ribeiro *et al.* (2020). Há igualmente registros na literatura de análises estruturais associadas a modelos BIM, porém fora do escopo do patrimônio histórico edificado (CUNHA; RIBEIRO; ARAÚJO, 2019; PAPADOPOULOS, 2014; SILVEIRA, 2014) assim como relevantes análises estruturais de monumentos históricos que não adotam a metodologia HBIM como aqui preconizada - geração do modelo estrutural analítico a partir do modelo arquitetônico geométrico (FAGUNDES; TEATINI; CLÍMACO, 2001; INOJOSA, 2010).

Abbate; Invernizzi; Spanò (2020) seguiram a mesma linha de Dore *et al.* (2015), analisando as deformações evidentes pelo modelo originado de escaneamento a laser e fotogrametria em comparação com um modelo teórico, sem deformações, construído a partir de medidas de fontes documentais. A estrutura não foi processada. Esses artigos foram incluídos nesta revisão bibliográfica porque, apesar de a análise estrutural não ter sido efetivamente empregada de acordo com o apresentado pelo item 3.3, eles alcançaram como resultado o valor real de dois parâmetros fundamentais que uma análise estrutural se propõe a estimar: deslocamentos e deformações.

Nieto-Julián; Antón; Moyano (2020) e Ribeiro *et al.* (2020) retrataram a análise estrutural de maneira mais aprofundada. Os primeiros elaboraram o modelo tridimensional da estrutura estudada (chamada “Paraboloide” e localizada em Casale Monferrato, Itália) com base na integração de escaneamento a laser terrestre com métodos baseados em imagem: fotogrametria de curto alcance e veículos aéreos não tripulados. Em seguida, o modelo já parametrizado foi exportado do Autodesk Revit para o Autodesk Simulation Mechanical, sem dificuldades de interoperabilidade.

Para a análise estrutural pelo MEF no Simulation Mechanical, os autores discretizaram a estrutura de três formas diferentes, podendo ser compreendidas como três dimensões. A primeira considera a geometria tridimensional dos elementos em sua integralidade (3D), a segunda simplifica o modelo para elementos bidimensionais de casca (2D) e a terceira para um modelo de barras (o artigo utiliza o termo “vigas”) de mesma seção e comprimento variável (1D).

Os três modelos discretos foram aplicados primeiramente para um dos pilares da estrutura, atribuindo-se condições de contorno específicas de acordo com cada dimensão. O carregamento aplicado correspondeu apenas ao peso próprio. Uma vez verificada a

aplicabilidade dos modelos discretos de um único elemento ao MEF, a estrutura foi inteiramente processada (Figura 3.11), adotando-se as mesmas considerações listadas. Nieto-Julián; Antón; Moyano (2020) concluíram que, para o estudo de caso específico, o modelo 2D é o que apresenta melhor equilíbrio entre esforço de processamento computacional e acurácia da análise estrutural. Os autores destacam que fenômenos locais requerem modelos de dimensões mais elevadas (2D ou 3D) para serem capturados corretamente.

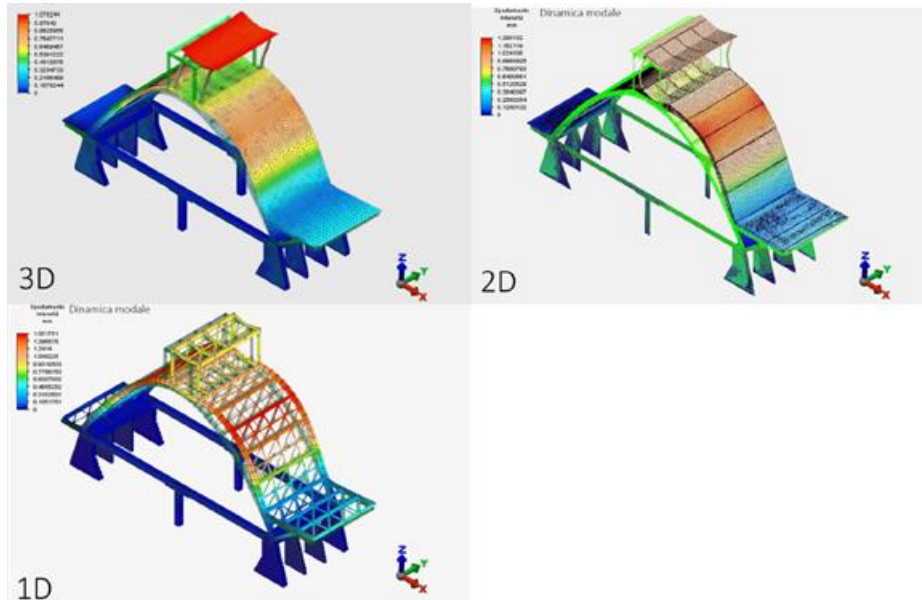


Figura 3.11 Processamento estrutural de três modelos discretos pelo MEF do edifício *Paraboloide*. Fonte: Nieto-Julián; Antón; Moyano, 2020, p. 16.

Ribeiro *et al.* (2020) realizaram a análise estrutural do Bloco C da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. A modelagem se deu por métodos de levantamento tradicionais. Os autores integraram a modelagem arquitetônica no *software* Autodesk Revit com o Autodesk Robot Structural Analysis. Foram obtidos os deslocamentos e o dimensionamento da estrutura proposto pelo *software*, a título de comparação com as dimensões existentes dos elementos estruturais. Um diferencial desse trabalho foi a inserção no modelo BIM de graus de degradação e dados de deterioração da estrutura para fins de manutenção.

4. METODOLOGIA

4.1. DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

Para a definição do estudo de caso deste trabalho, foram levantadas edificações em Brasília que se enquadrassem na classificação de patrimônio histórico (bens tombados individualmente, de acordo com o registro do IPHAN), listadas na Tabela 4.1. Dentre os monumentos, foi dada preferência àqueles que apresentam estrutura aparente ou facilmente identificável, de forma que a elaboração subsequente do modelo fosse mais precisa e compreensível. Dada a inclinação do arquiteto Oscar Niemeyer, que projetou quantidade considerável dos monumentos da Capital, de empregar elementos estruturais como parte constituinte da arquitetura acabada, restaram abundantes as opções.

Tabela 4.1 Bens tombados individualmente em Brasília. Fonte: IPHAN, 2021.

Bens Tombados Individualmente em Brasília	
1	Conjunto Urbanístico de Brasília
2	Catedral Metropolitana de Brasília
3	Placa de Ouro oferecida à Rui Barbosa
4	Catetinho e Coleção Arqueológica João Alfredo Rohr
5	Teatro Nacional
6	Igrejinha Nossa Senhora de Fátima
7	Casa de Chá
8	Congresso Nacional
9	Conjunto Cultural da República
10	Conjunto Cultural Funarte
11	Edifício do Touring Club do Brasil
12	Espaço Lúcio Costa
13	Espaço Oscar Niemeyer
14	Memorial dos Povos Indígenas
15	Memorial JK
16	Conjunto dos Ministérios e anexos
17	Museu da Cidade
18	Conjunto do Palácio da Alvorada (incluindo a capela)
19	Palácio da Justiça
20	Palácio do Planalto
21	Palácio Itamaraty e anexos
22	Palácio Jaburu
23	Panteão da Liberdade e Democracia
24	Pombal
25	Praça dos Três Poderes
26	Quartel General do Exército
27	Supremo Tribunal Federal

Averiguaram-se a acessibilidade e as dimensões das edificações listadas. Aquelas que possuem livre acesso e um entorno amplo e desobstruído favorecem o processo de

levantamento arquitetônico para modelagem, seja qual for o método adotado dentre os descritos no item 3.2.1. Dimensões reduzidas e uma configuração menos complexa, além de igualmente favorecer o levantamento, tornam mais didática a análise do comportamento estrutural da edificação escolhida.

Levando em conta as ponderações apresentadas, foi selecionada a Igreja Nossa Senhora de Fátima, mais conhecida como “Igrejinha”, como estudo de caso. A Igrejinha se localiza em Brasília, entre as superquadras 307 e 308 sul. Levando em conta as informações expostas no item 3.2.2.1, nota-se que a edificação atende plenamente aos requisitos estabelecidos nesta seção: bem tombado individualmente, estrutura aparente e empregada como elemento integrante da arquitetura acabada, livre acesso ao público, entorno desimpedido e dimensões modestas.

4.2. PROCEDIMENTO DE MODELAGEM

Foram construídos dois modelos paralelos do sistema estrutural da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima. O primeiro foi baseado na coleta de registros do projeto estrutural original, o segundo, em uma nuvem de pontos elaborada pela associação de escaneamento a laser terrestre com aerofotogrametria por drone. Os dois modelos foram então comparados, tanto com relação às suas características físicas e diferenças dimensionais quanto com relação aos resultados da análise estrutural. O sistema estrutural foi processado com auxílio de *software* de análise, associado ao software de modelagem arquitetônico (ver item 4.44.4). A elaboração de dois modelos paralelos, um baseado em documentação histórica e um por nuvens de pontos, também foi empregada por Almeida (2021) e Dore *et al.* (2015). A Figura 4.1 e a Figura 4.2 ilustram a sobreposição dos modelos retratados no trabalho de Almeida (2021), que apresentam diferenças significativas entre si.

O primeiro modelo da Igreja Nossa Senhora de Fátima foi elaborado a partir do registro dos projetos originais, que tiveram sua disponibilidade verificada pelas dissertações de Inojosa (2010) e Arakaki (2012). Os desenhos utilizados por Inojosa (2010) foram cedidos pelo IPHAN – DF (Figura 4.3), enquanto Arakaki (2012) apresenta como referência o Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Companhia Urbanizadora da Nova Capital – DAU/NOVACAP, pelo Arquivo Público do Distrito Federal. A revisão bibliográfica revelou que a disponibilidade de arquivos e projetos relacionados à Igrejinha era suficiente.

A fonte dos dados de projeto da Igrejinha empregados neste trabalho foi o Arquivo Público do DF. Ele foi selecionado devido à grande quantidade de pranchas disponíveis em seu acervo, em particular, vinte e duas pranchas do projeto estrutural. O projeto estrutural abarca plantas de locação, armação, formas e detalhamento dos elementos estruturais. Esse primeiro modelo, baseado nos registros reunidos, foi intitulado de “modelo de projeto”.

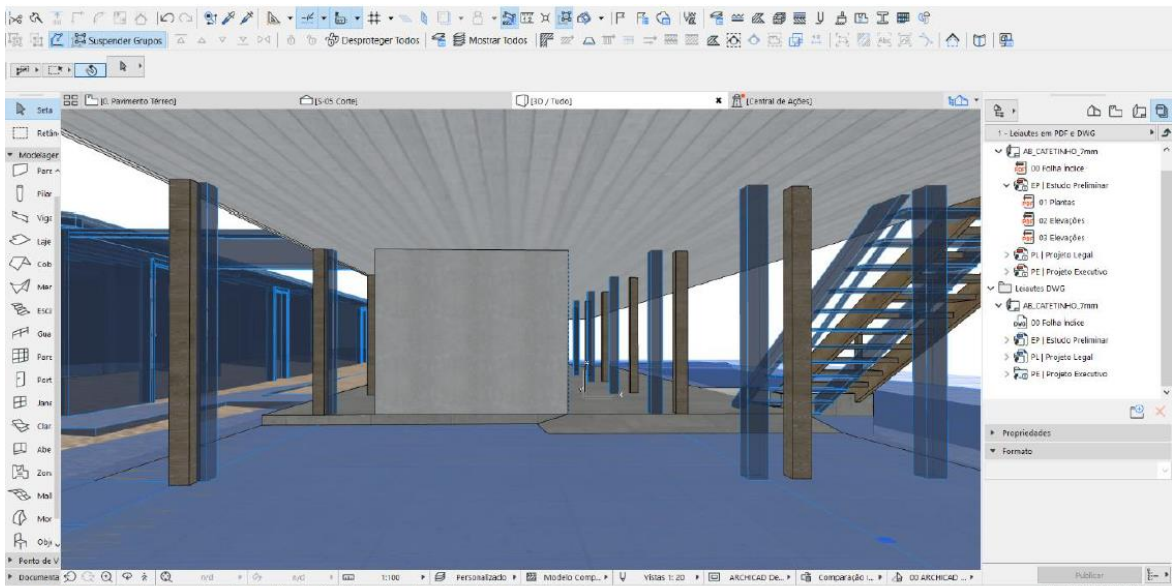


Figura 4.1 Sobreposição de modelos BIM do Museu do Catetinho elaborados por métodos distintos. Fonte: ALMEIDA, 2021, p. 61.

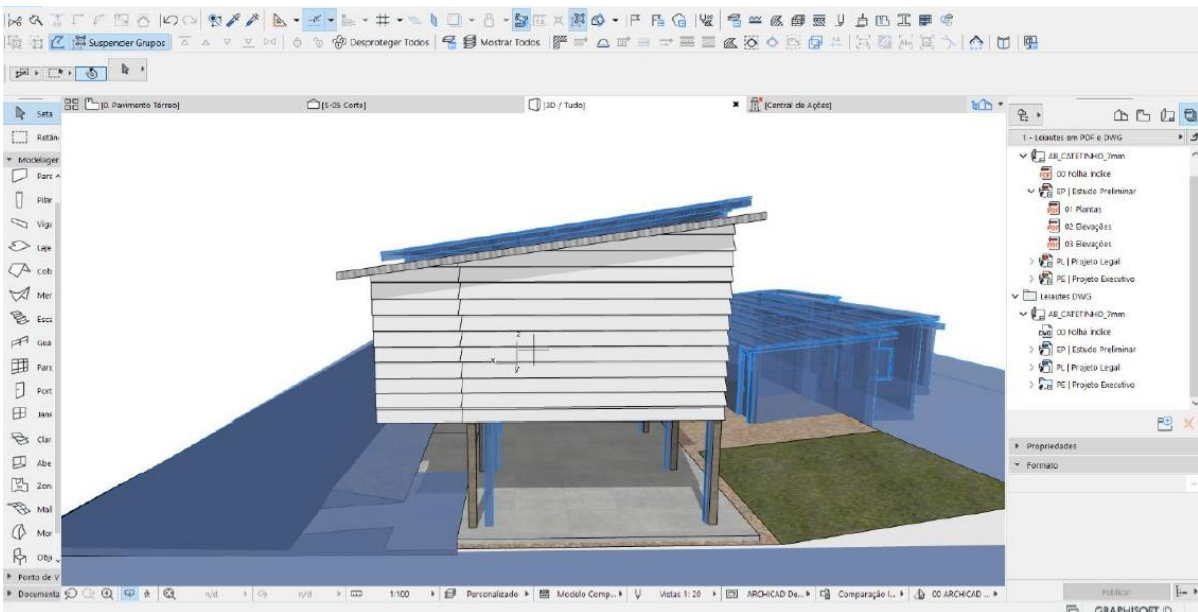


Figura 4.2 Sobreposição de modelos BIM do Museu do Catetinho elaborados por métodos distintos. Fonte: ALMEIDA, 2021, p. 62.

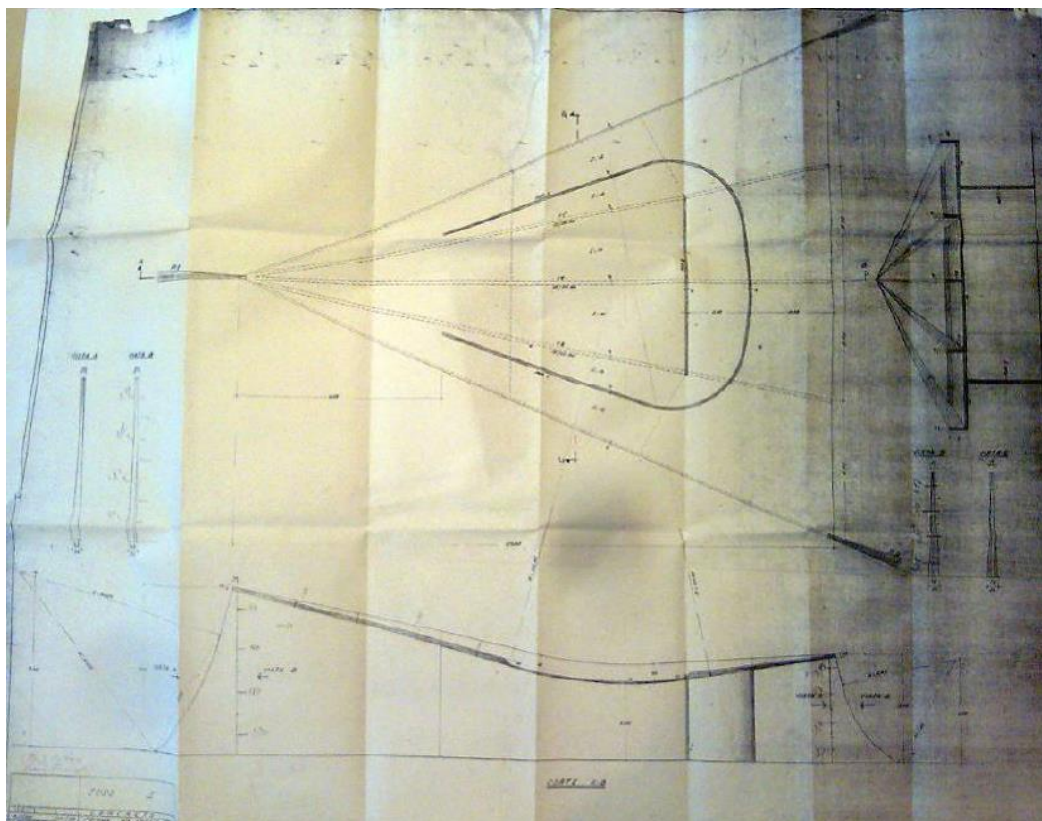


Figura 4.3 Cópia da planta e de cortes da estrutura da Igreja Nossa Senhora de Fátima.
Fonte: IPHAN – DF, obtido de INOJOSA, 2010, p. 107.

O segundo modelo, intitulado de “modelo de nuvem de pontos”, foi elaborado com o auxílio das técnicas de escaneamento a laser e aerofotogrametria. As duas tecnologias geram como resultado uma nuvem de pontos com coordenadas geométricas associadas e demais informações, como dados de intensidade e cor. Foi possível obter, dessa forma, um modelo preciso da geometria atual da Igreja Nossa Senhora de Fátima. Destaca-se que as características da edificação discutidas no item 4.1 favoreceram o processo de levantamento. A modelagem por nuvem de pontos já foi realizada para a Igreja Nossa Senhora de Fátima no artigo de Oliveira, Zanoni e Pellegrino (2022), porém com maior foco na a representação arquitetônica da edificação.

A nuvem de pontos pode ser importada para grande parte dos *softwares* de modelagem arquitetônica em BIM frequentemente empregados no setor de arquitetura, engenharia e construção (ALMEIDA, 2021). Uma vez importada, foram modelados elementos e objetos paramétricos a partir da nuvem. Nenhuma das soluções de automatização de modelagem discutidas em 3.2.1.3 foram adotadas, dado que as dimensões e quantidades de ambientes e os detalhes da edificação são reduzidos. Destaque-se que as diferenças entre os modelos por coleta e nuvem de pontos, como aqui descritos, serão apenas geométricas. As informações adicionadas, como regras de atributos e dados descritivos de cada objeto (material constituinte, por exemplo) foram as mesmas para ambos. Não foram modeladas as aberturas das paredes estruturais, a fim de evitar a influência de efeitos localizados no resultado global. O peso próprio da estrutura no *software* de análise (item 4.3) será diretamente extraído dos materiais definidos no modelo físico.

Definiu-se que, tanto quanto possível, todo o esforço de construção do sistema estrutural seria concentrado no *software* de modelagem arquitetônica. Este já estabelece uma relação automática dos elementos estruturais físicos criados com a sua interpretação analítica, que corresponde ao segundo nível de abstração definido em 3.3. O denominado modelo analítico

pode também ser ajustado manualmente pelo usuário, caso ele julgue que a interpretação do *software* não se adequa às particularidades da estrutura estudada. Toda a discretização do modelo analítico (terceiro nível de abstração definido em 3.3) foi reservada ao *software* de análise estrutural, de forma que se pudesse comparar suas leituras automáticas de estruturas analíticas oriundas de modelos físicos distintos.

A necessidade de interpretação automática da estrutura pelo *software* de análise influencia de maneira direta a modelagem física dos seus elementos constituintes. Primeiramente, estes devem apresentar um correspondente analítico, caso contrário não serão considerados no cálculo. Além disso, devem ser prontamente reconhecidos pelo *software* de análise, sem redefinições de formas ou seções transversais. Tal redefinição pode resultar em considerável retrabalho, dependendo da magnitude da edificação, e vai contra a eliminação de redundâncias proporcionada pela metodologia BIM. Esses fatores limitam as possibilidades de recursos utilizados, como a criação de famílias personalizadas.

Foram utilizadas somente ferramentas nativas dos *softwares* de modelagem e de análise. A utilização de *plugins* ou programas adicionais pode facilitar o processo de interpretação automática da estrutura, porém este trabalho buscou avaliar a capacidade própria dos programas de representar e analisar geometrias complexas, característica de monumentos históricos.

4.3. MÉTODO DE ANÁLISE DO SISTEMA ESTRUTURAL

A estrutura foi definida diretamente a partir dos modelos físicos previamente concebidos, o primeiro pela coleta de dados e análise documental e o segundo pela nuvem de pontos. Para o primeiro caso, obtém-se a estrutura em seu estado pós-construção de acordo com a idealização de projeto. Para o segundo, obtém-se uma configuração espacial precisa da estrutura em seu estado atual.

Como comentado no item 3.3, métodos mais precisos para avaliação de capacidade resistente de estruturas envolvem processos complexos e dispendiosos, como ensaios de prova de carga e instalação de sensores de deslocamento. É somente buscado, entretanto, compreender o comportamento estrutural da edificação, isto é, identificar os carregamentos nela atuantes, os esforços resultantes dos carregamentos e a forma como estes se distribuem nos elementos estruturais.

A partir de estudo das características físicas e de utilização da Igreja, assim como para simplificação da comparação entre os modelos, estabeleceu-se como carga atuante para o cálculo dos esforços internos somente o peso próprio da estrutura. Demais ações aplicáveis ao estudo de caso são um acréscimo de carga permanente, cargas variáveis e efeitos de vento. Contudo, a combinação das diferentes ações ou avaliação de casos de carga separadamente dificultaria o processo de confrontação dos resultados da análise estrutural e o tornariam mais propenso a erros.

Cargas permanentes adicionais são provenientes de eventuais sistemas de revestimento e impermeabilização da cobertura, porém de difícil avaliação sem informações referentes aos seus materiais constituintes. A carga variável se enquadra na categoria relativa a coberturas com acesso apenas para manutenção ou inspeção, definida pela Tabela 10 da NBR 6120:2019, “Ações para o cálculo de estruturas de edificações”, como 1 kN/m^2 . A título de comparação, uma laje maciça de concreto armado de 30 cm de espessura apresenta carga distribuída de aproximadamente $7,35 \text{ kN/m}^2$, de acordo com a mesma norma. Levando em conta a baixa estatura da Igreja Nossa Senhora de Fátima (oito metros de altura em seu ponto mais elevado), não são esperados efeitos de vento significativos. Como a edificação apresenta elementos estruturais robustos, julgou-se que adoção unicamente do peso próprio é representativa do comportamento da edificação.

Como não foram encontradas em projeto informações relativas à resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}), estipulou-se um valor de 25 MPa, compatível com o momento histórico de construção da Igrejinha. O peso específico do concreto armado foi definido como 2.500 kg/m³, conforme a NBR 6120:2019. O módulo de elasticidade e o coeficiente de poisson foram extraídos da NBR 6118:2014, com valores de 24 GPa e 0,20, respectivamente. Todas essas variáveis foram inseridas no *software* de modelagem arquitetônica e posteriormente interpretadas pelo *software* de análise. A discretização do modelo analítico e o cálculo da estrutura foram realizados de maneira automática por *software* de análise, cujo funcionamento é baseado no Método dos Elementos Finitos. Foi priorizada a representação visual dos esforços internos e deslocamentos calculados, aliada a valores críticos representativos. Averiguou-se então se uma modelagem com auxílio de métodos de levantamento de maior precisão apresenta diferenças significativas de comportamento estrutural em relação a uma modelagem baseada em projeto. Representações dos resultados de análises estruturais semelhantes são apresentadas nas Figuras 4.4 e 4.5.

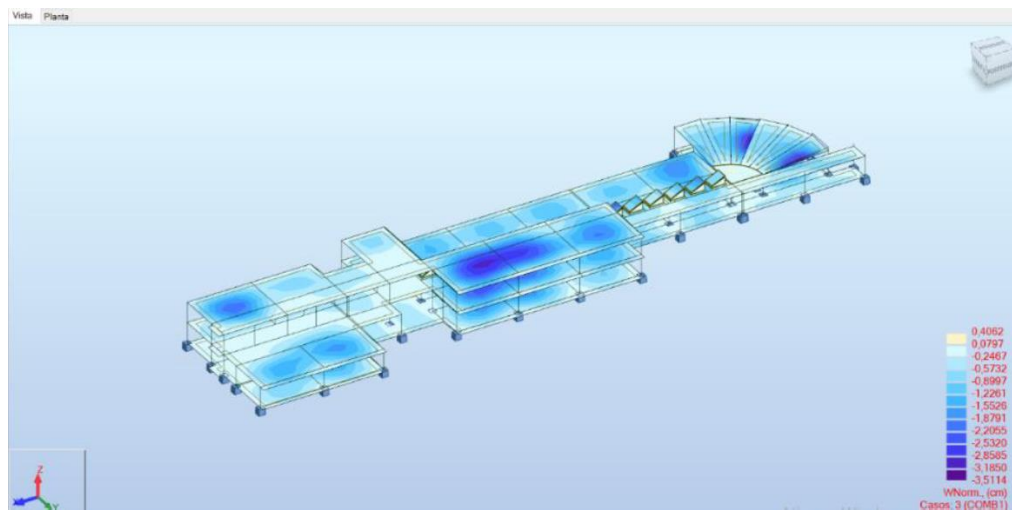


Figura 4.4 Deslocamentos estruturais calculados para o Bloco C da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB). Fonte: RIBEIRO *et al.*, 2020, p. 4.

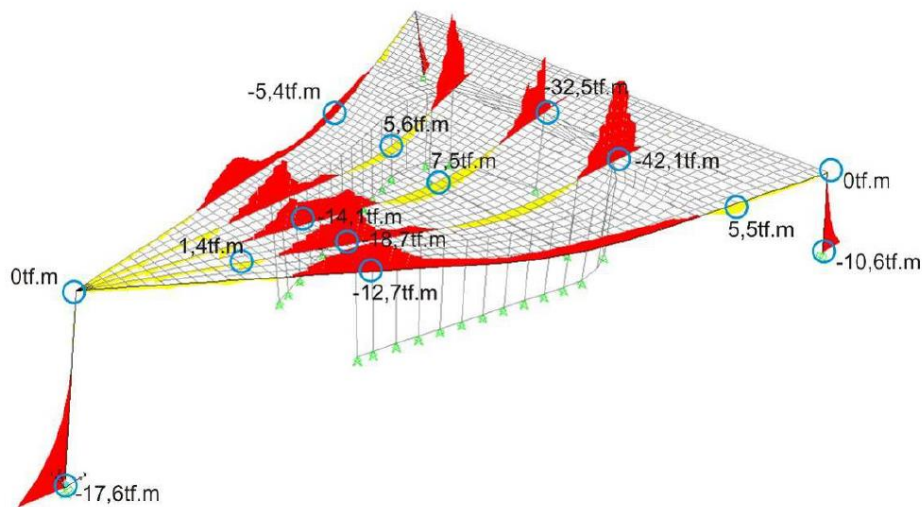


Figura 4.5 Diagrama de momentos fletores da Igrejinha Nossa Senhora de Fátima pelo programa SAP 2000. Fonte: INOJOSA, 2010, p. 113.

4.4. ESCOLHA DOS SOFTWARES

Foram utilizados dois *softwares* para cumprimento da metodologia estabelecida. O primeiro foi empregado para criação do modelo arquitetônico da edificação, o segundo, para a análise estrutural do modelo criado. Uma vez que a análise estrutural se valeu inteiramente de informações provenientes do *software* de modelagem arquitetônica como dados de entrada, torna-se indispensável uma interoperabilidade satisfatória entre os programas.

Segundo Logothetis; Delinasiou; Stylianidis, (2015), os *softwares* comerciais para modelagem arquitetônica em BIM mais populares são: GraphiSoft ArchiCAD, Autodesk Revit, Bentley MicroStation V8i e Tekla Structures. O *software* selecionado foi o Autodesk Revit, classificado por Brumana *et al.* (2017) como o programa BIM abrangente mais utilizado mundialmente, sendo produto líder inclusive no mercado brasileiro (CBIQ, Vol. 3, 2016). De fato, o Revit foi a solução de modelagem adotada em grande parte dos artigos selecionados para a revisão bibliográfica de HBIM neste trabalho: De Oliveira *et al.* (2021), Ribeiro *et al.* (2020), Rodríguez-Moreno *et al.* (2018), Quattrini *et al.* (2015), Barazzetti *et al.* (2015), Osello; Lucibello; Morgagni, (2018), dentre outros.

Revit: O Revit Architecture é o mais conhecido e atual líder de mercado para o uso do BIM em projetos de arquitetura. Ele foi introduzido pela Autodesk em 2002, depois da aquisição do programa de uma empresa iniciante. [...] A versão revisada aqui é a 9.1. O Revit é uma família de produtos integrados que atualmente inclui o Revit Architecture, o Revit Structure e o Revit MEP. Ela inclui interfaces gbXML para simulação de energia e análise de cargas; interfaces diretas com o ROBOT e o RISA para análises estruturais e a habilidade de importar modelos do SketchUp, uma ferramenta de projeto conceitual, e outros sistemas que exportam arquivos DXF. [...] O Revit baseia-se nos cortes 2D como uma forma de detalhar a maior parte dos conjuntos.

Pontos fortes do Revit: É fácil de aprender e sua funcionalidade é organizada em uma interface bem projetada e amigável. Ele possui um amplo conjunto de bibliotecas de objetos desenvolvidas por terceiros. É a interface preferida para interfaces de ligação direta, devido a sua posição no mercado. Seu suporte bidirecional a desenhos permite a geração e o gerenciamento de informações com base em atualizações tanto do desenho quanto de vistas do modelo; ele dá suporte a operações simultâneas no mesmo projeto; e inclui uma excelente biblioteca de objetos que suporta uma interface multiusuário.

Pontos fracos do Revit: O Revit é um sistema baseado em memória, o que o faz ficar significativamente mais lento para projetos maiores que cerca de 220 megabytes. Ele possui limitações nas regras paramétricas que lidam com ângulos. Ele também não suporta superfícies curvas complexas, o que limita sua habilidade de dar suporte a projetos com elas ou referências a esse tipo de superfícies (EASTMAN *et al.*, 2014, p. 58).

Apesar de Eastman *et al.* (2014) pontuarem a modelagem de superfícies curvas complexas como uma deficiência do *software*, os autores anteriormente citados foram capazes de gerar desenhos satisfatórios no Revit de edificações históricas de geometria intrincada (como a cúpula de uma basílica). Outra vantagem do emprego do Revit a ser considerada é a facilidade de obtenção de licença educacional.

Uma vez selecionado o programa para criação do modelo arquitetônico, buscaram-se soluções de análise estrutural de edificações que fossem compatíveis com esse *software* e que atendessem os objetivos estabelecidos para este trabalho. A própria Autodesk sugere a integração do Revit com o *software* Robot Structural Analysis (por vezes, se empregará somente a abreviação “Robot”), também de seu domínio. Os dois programas apresentam fluxo bidirecional de informações, de forma que cada modelo possa ser importado automaticamente pela outra aplicação sem necessidade de conversão e compatibilização manuais de arquivos (AUTODESK INK., 2013).

O Robot é uma aplicação gráfica utilizada para modelagem, análise e dimensionamento de vários tipos de construção, podendo ser empregado para estruturas em concreto, aço e

madeira. O programa apresenta as funcionalidades de projeto, cálculos estáticos, verificação de resultados e desenvolvimento de documentação e pranchas estruturais (PASHECHKO; LATOS, 2015). Os cálculos podem ser baseados no método dos elementos finitos, portanto o *software* é capaz de realizar análises lineares e não-lineares, estáticas e dinâmicas. Apresenta interface intuitiva e fluxo de trabalho simples (SILVA, 2016).

“Modelo analítico” é a nomenclatura usualmente adotada na literatura para se referir ao modelo interpretado pelo Robot (AUTODESK INK., 2013, RAMAJI; MEMARI, 2018, SILVEIRA, 2014, PAPADOPOULOS, 2014), a qual havia sido previamente apresentada no item 4.2. Serão empregados os termos “modelo físico” ou “modelo arquitetônico” para se referir ao modelo construído com auxílio do Revit.

Grandes vantagens da adoção do Robot são a sua interoperabilidade direta com o Revit, seu manuseio acessível e a disponibilidade de licença educacional. A principal desvantagem do *software* é a ausência da regulamentação da norma brasileira em sua base de programação, diferentemente de outras soluções de análise estrutural (SILVA, 2016). Certos parâmetros, contudo, podem ser alterados de forma a cumprir os requisitos estabelecidos pela NBR 6118:2014, demandando um esforço de configuração inicial. Tal abordagem foi utilizada nos trabalhos de Silva (2016) e Ribeiro *et al.* (2020). Como não serão realizados dimensionamentos ou detalhamentos de peças e armaduras, consideravelmente mais dependentes de determinações normativas que a análise estrutural, considerou-se que o *software* se adequa ao objetivo estabelecido nesta metodologia sem a necessidade de ajustes ou verificações laboriosas. Foram utilizadas as versões estudantis de 2021 para ambos os *softwares*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de padronizar as nomenclaturas das seções seguintes, todos os elementos estruturais da Igreja Nossa Senhora de Fátima serão denominados conforme as Figuras 5.1 e 5.2. A letra P se refere a “pilar”, L a “laje”, V a “viga” e a abreviação “Par” a “Paredes”.

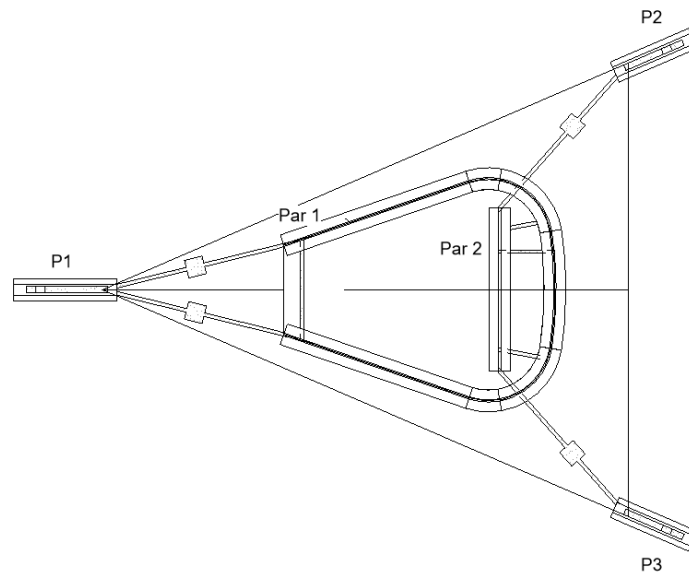


Figura 5.1. Nomenclatura dos elementos estruturais vistos na planta baixa do térreo. Fonte: Autor.

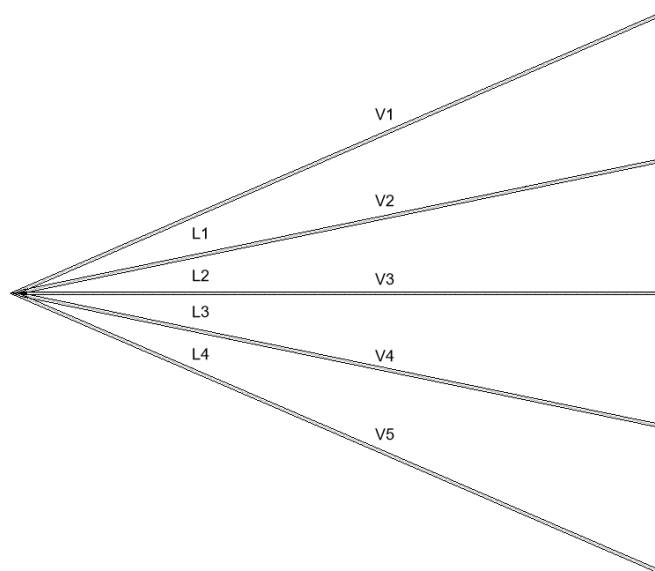


Figura 5.2. Nomenclatura dos elementos estruturais da cobertura. Fonte: Autor

5.1. MODELO DE PROJETO

A construção do modelo estrutural da Igrejinha baseada em projeto, conforme mencionado na seção XX, ocorreu de forma gradual. A fim de melhor compreender as especificidades da interoperabilidade entre o *software* de modelagem e o *software* de análise, assim como da discretização e do cálculo automático da estrutura por este, simplificações foram adotadas. Esse procedimento possibilita que erros de processamento sejam identificados de forma mais precisa, assim como suas causas. Partiu-se de uma versão da edificação amplamente simplificada, em que nenhuma curvatura ou variação de espessura foi considerada. Graus de complexidade foram progressivamente adicionados com base nos aprendizados do modelo anterior. Os modelos foram denominados Modelo 1, Modelo 2 e Modelo 3 (ou modelo final), em ordem crescente de aperfeiçoamento.

5.1.1. Modelo 1

Para o Modelo 1, foram empregadas apenas famílias nativas ao Revit, disponibilizadas pela própria Autodesk. Todos os elementos estruturais foram modelados como planos, paralelos aos eixos principais (x, y e z) e de seção transversal constante. Em vez de buscar representar a edificação da forma mais fiel possível no modelo físico, uma maior relevância foi atribuída ao modelo analítico, o qual é efetivamente interpretado pelo *software* de cálculo. Ademais, buscou-se que a representação analítica da estrutura fosse gerada de forma adequada automaticamente, sem a necessidade de ajustes manuais.

5.1.1.1. Fundação

A fundação foi composta por sapatas retangulares simplificadas, atribuídas aos pilares e às paredes. As sapatas, assim como outras famílias de fundação, são interpretadas pelo Robot Structural Analysis como apoios fixos. Sua inclusão é essencial para o cálculo da estrutura, pois, caso contrário, o *software* considerará que a estrutura se encontra suspensa, sem apoio algum. Mantiveram-se as maiores dimensões das sapatas em planta e estipulou-se uma altura de 60 cm para todas. Não foram modeladas as vigas baldrame nesta etapa.

5.1.1.2. Paredes estruturais e pilares

As paredes estruturais, por não apresentarem nenhuma dificuldade evidente tanto em sua modelagem quanto em sua representação analítica, tiveram sua geometria em planta preservada. O Revit apresenta ferramentas de desenho curvo para o desenvolvimento das paredes, o que possibilitou que a forma projetada fosse fielmente reproduzida. Os pilares P1, P2 e P3 foram considerados como retangulares, de largura igual à média das larguras e de mesmo comprimento da base. A locação dos pilares se deu de forma a alinhar seu ponto de inserção no desenho (eixo no qual o modelo analítico é automaticamente posicionado) com as extremidades da laje. O ponto de inserção é, por padrão, o centro geométrico do pilar, o que difere notoriamente do projeto. Entretanto, como a coluna analítica foi corretamente representada, nenhum esforço para aproximar o modelo físico da realidade foi efetuado nesta etapa.

5.1.1.3. Lajes e vigas de cobertura

A laje de cobertura foi admitida como plana. Foi escolhido o mesmo nível do topo dos pilares P2 e P3, de +5,00 m, para o seu posicionamento. Seu formato triangular correspondeu à

projeção horizontal da laje em planta. Foi estabelecida uma espessura constante de 25 cm, a mesma de suas extremidades frontal e posterior originais (Figura 5.3). Ademais, por mais que por vezes se aluda à laje de cobertura como um elemento único, na realidade ela é constituída por quatro lajes delimitadas pelas vigas de cobertura, conforme ilustrado pela Figura 5.4. A modelagem seguiu a mesma lógica, a fim de garantir uma adequada reprodução do quadro estrutural.



Figura 5.3. Corte longitudinal da estrutura da Igreja Nossa Senhora de Fátima. Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal, 2022.

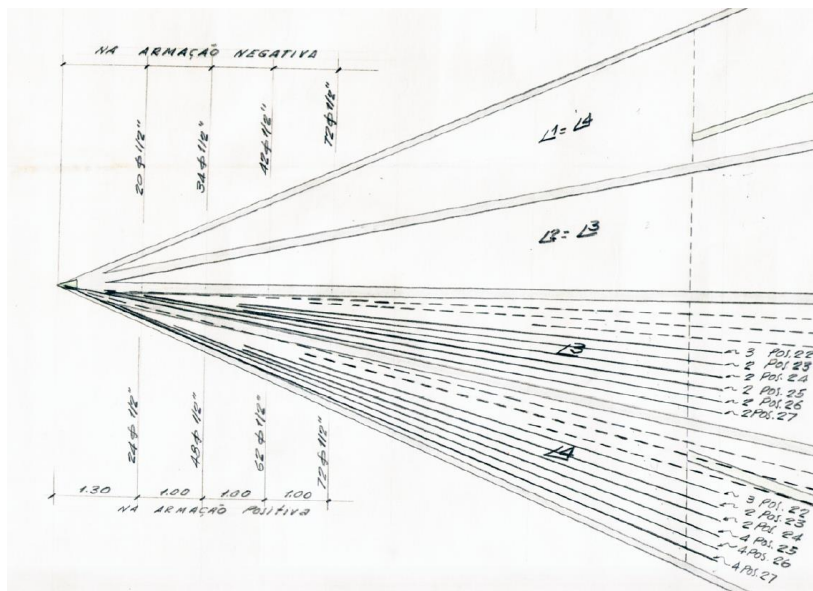


Figura 5.4. Planta de armação das lajes de cobertura. Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal, 2022.

Por fim, as vigas foram igualmente aplainadas, a seção transversal adotada foi de 15 x 58 cm (altura média dos valores extremos, de 25 cm e 90 cm) para as vigas intermediárias e 10 x 58 cm para as vigas de borda. As vigas não foram representadas como invertidas; seguiu-se o procedimento de modelar todos os elementos conforme o padrão de inserção das famílias nativas do Revit. Os modelos físico e analítico podem ser visualizados na Figura 5.5.

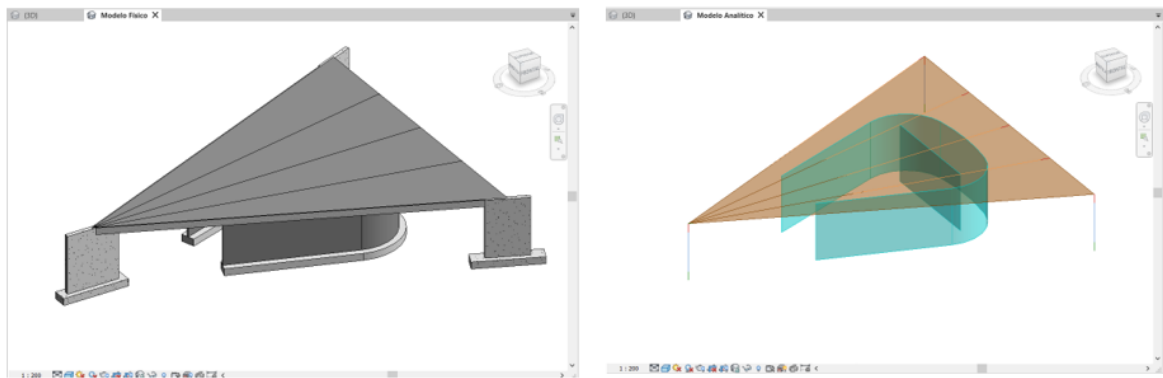


Figura 5.5 Modelo 1, em suas representações física e analítica, respectivamente. Fonte: Autor.

5.1.1.4. Análise estrutural

Em seguida, o modelo foi exportado para o Robot. Mantiveram-se as configurações padrão de envio sugeridas pelo Revit, que são “Direção da integração com o Autodesk Robot Structural Analysis: Enviar Modelo”, “Tipo de integração: Integração direta”, “Especificar o caso que contém o peso próprio: DL1”. O DL1, nomenclatura automática do programa para o caso de carga de peso próprio (*dead load*, em inglês), está diretamente associado às propriedades físicas do material estrutural atribuído aos elementos. O tempo de execução do comando foi de 12 segundos e nenhum aviso foi emitido.

Sem nenhuma alteração de atributos ou configurações, foi efetuado o cálculo da estrutura. A malha de elementos finitos foi gerada automaticamente. Nota-se que determinadas regiões apresentaram refinamento de malha superior a outras, de acordo com a interpretação do *software* do comportamento estrutural e de zonas de concentração de tensões. A operação resultou em único aviso – “As condições de apoio nos nós não são compatíveis” –, conforme exposto na Figura 5.6. Verifica-se que os pontos destacados correspondem à transição do trecho retilíneo da Parede 1 para o trecho curvo. Como a ocorrência foi apresentada como um aviso e não como um erro, o *software* foi capaz de processar a estrutura. Foram averiguados os resultados somente do caso de carga de peso próprio, ilustrados pelas Figura 5.7 e Figura 5.8.

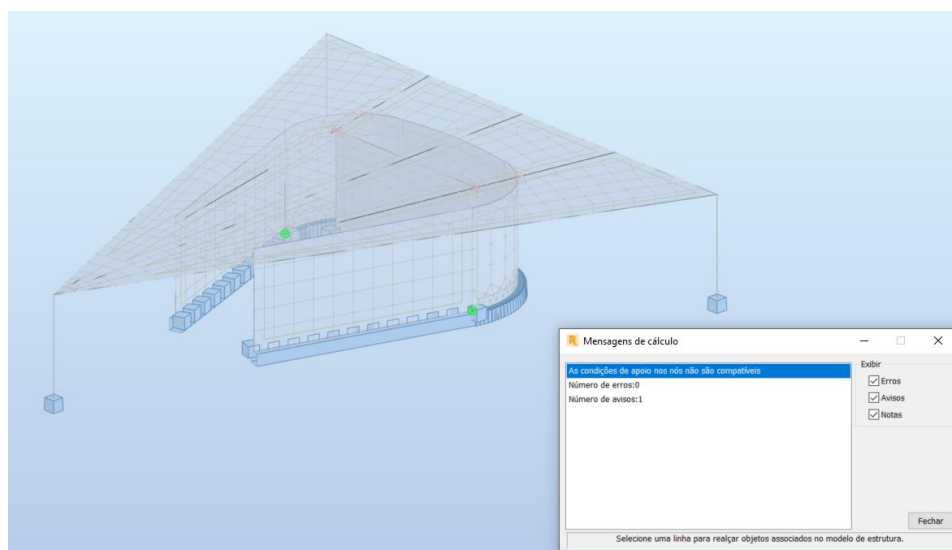


Figura 5.6 Avisos gerados após o cálculo da estrutura do Modelo 1 pelo Robot Structural Analysis. Fonte: Autor.

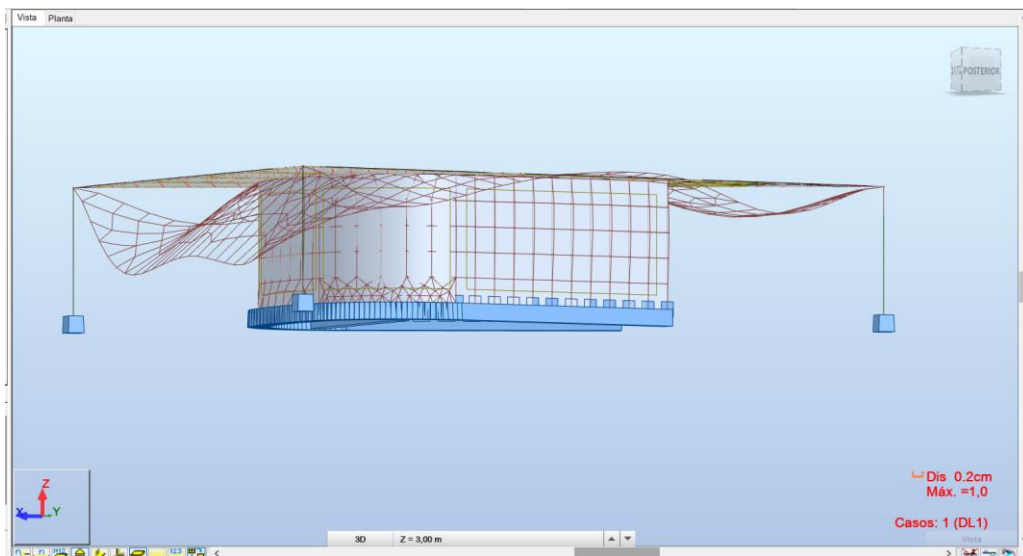


Figura 5.7 Representação da deformação de malha do Modelo 1. Fonte: Autor.

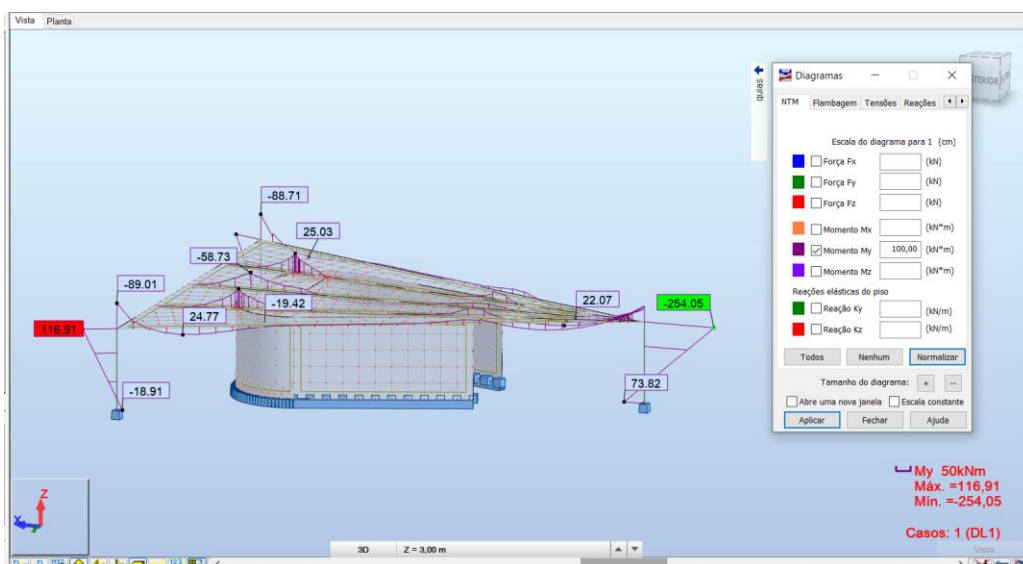


Figura 5.8 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y e para o Modelo 1. Fonte: Autor

Os resultados fornecidos pelo *software* foram considerados como aceitáveis. Não se analisou a precisão dos valores de esforços e deslocamentos propriamente ditos, apenas o comportamento global de deformação das barras e o formato do diagrama de momento fletor ao redor do eixo y. Nota-se conformidade entre as regiões de momento positivo e negativo com as particularidades da estrutura.

A fim de elucidar como essas representações auxiliam na verificação da consistência do modelo, será apresentado um exemplo de modelagem inadequada. Ao longo do processo de construção do Modelo 1, foi realizada uma tentativa de modelar as vigas da cobertura como invertidas. Como a sua interpretação analítica, assim como para pisos estruturais, é alinhada por padrão ao topo do elemento físico, o modelo analítico resultante do processo descrito foram barras pairando sobre um plano. Visto que não havia nenhum tipo de conexão entre os componentes, criaram-se vínculos analíticos entre os nós das extremidades das vigas e da laje. Vínculos analíticos são elementos que conectam dois nós analíticos separados. O resultado pode ser visualizado na Figura 5.9.

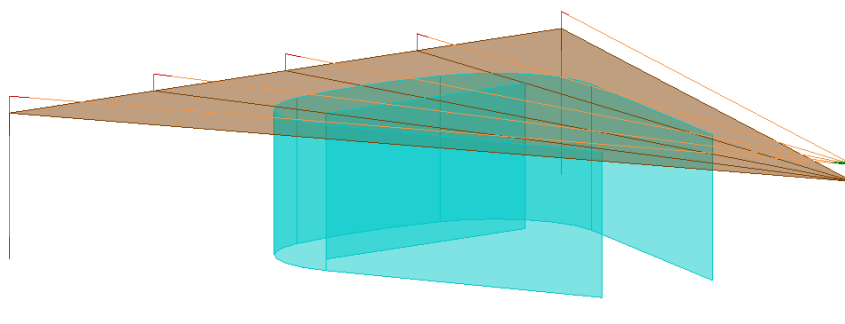


Figura 5.9 Representação analítica resultante da tentativa de modelagem das vigas de cobertura do Modelo 1 como invertidas. Fonte: Autor

A estrutura foi então exportada para o Robot e calculada. A partir da representação gráfica da deformação da malha, acionada pela guia “Flambagem” da ferramenta “Diagramas de Barras”, obteve-se o resultado ilustrado pela Figura 5.10.

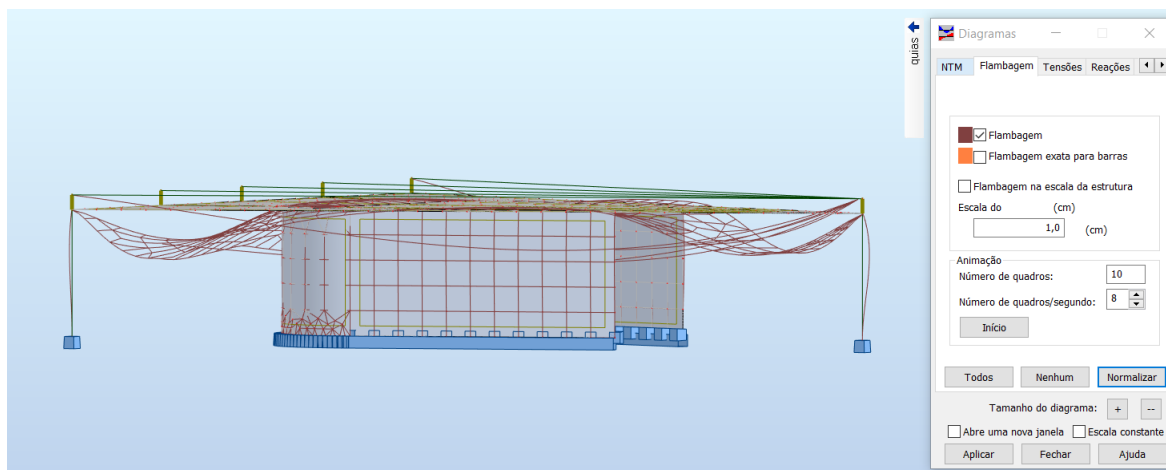


Figura 5.10 Deformação de malha do Modelo 1 com vigas de cobertura invertidas. Fonte: Autor

Constatou-se que o fato de as vigas e a laje analíticas não estarem locadas no mesmo plano ocasionou uma completa separação dos seus comportamentos sob carga. É possível observar que a deformação das vigas se dá como em um caso biapoiado, em que os vínculos rígidos correspondem aos seus apoios. Elas se deslocam sem consideração da sustentação fornecida pelas paredes estruturais. Depreende-se, portanto, que as vigas e as lajes analíticas associadas devem ser modeladas em um mesmo plano, criando uma malha contínua. Esse tipo de visualização auxilia a detecção de erros patentes na modelagem da estrutura ou nos resultados fornecidos pelo *software*.

A adequação da representação das vigas de cobertura como invertidas foi reservada ao Modelo 2. Uma vez aprovado o primeiro modelo, conforme representado pela Figura 5.5, iniciou-se a elaboração do segundo, com grau de complexidade mais elevado.

5.1.2. Modelo 2

O Modelo 2 buscou alcançar uma representação do modelo físico ligeiramente mais realista, o que exigiu adaptações manuais dos respectivos elementos analíticos. As principais alterações em relação ao Modelo 1 foram a incorporação de inclinação à laje de cobertura para manutenção das alturas originais dos pilares, a adequação da posição dos pilares em planta e a inclusão dos demais elementos de fundação, em especial as vigas baldrame. As mesmas simplificações de geometria das sapatas e pilares empregadas no Modelo 1 foram empregadas. A espessura da laje permaneceu a mesma, assim como a seção transversal das vigas de cobertura. Estas, entretanto, foram igualmente inclinadas, a fim de acompanhar o perfil da laje, e representadas como invertidas.

5.1.2.1. Pilares

Inicialmente, a posição dos pilares P1, P2 e P3 foi alterada. Eles foram movidos de forma que sua locação correspondesse à especificada em projeto, com 30 cm de apoio para a laje. A representação dos pilares na prancha estrutural original e no Revit está ilustrada pela Figura 5.11.

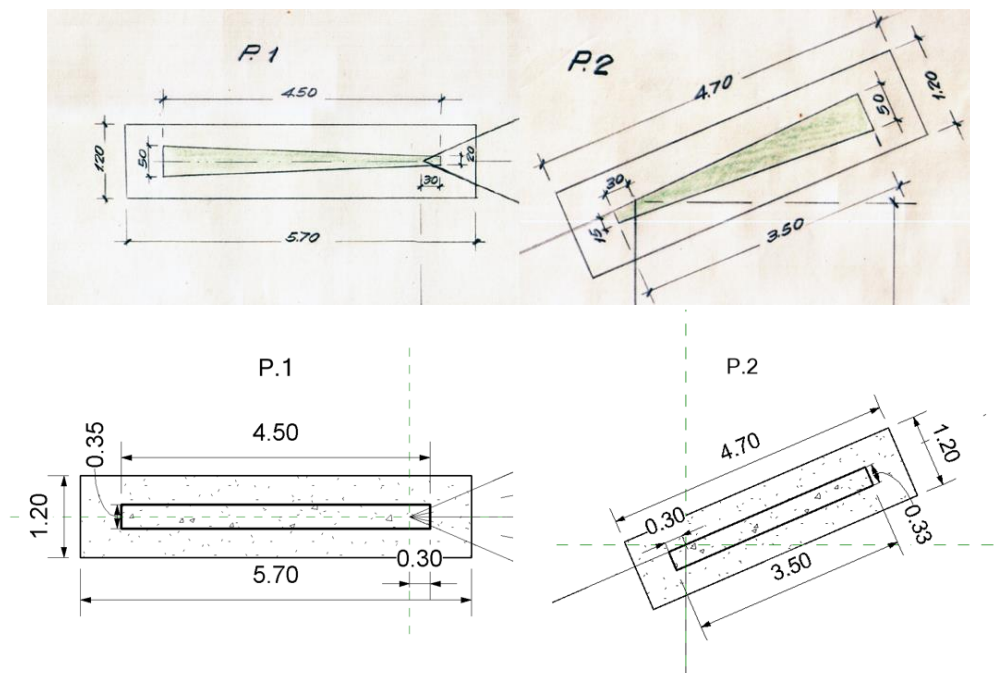


Figura 5.11 Locação dos pilares P1 e P2 em projeto e no *software* de modelagem. Fonte: Autor

Como mencionado no item 5.1.1, o Revit alinha o eixo analítico dos pilares estruturais com o seu ponto de inserção no modelo, que por padrão é o seu centro geométrico. Uma vez que o pilar tem sua posição alterada no modelo físico, o modelo analítico é automaticamente atualizado. Assim, a coluna analítica que antes estava alinhada com a extremidade da laje é movida para acompanhar o centro geométrico do pilar. As vigas analíticas, que já se encontravam conectadas ao topo do pilar no modelo anterior, acompanham o seu movimento, o que não acontece com a laje – Figura 5.12. Cria-se, portanto, uma descontinuidade entre o sistema de lajes e vigas, além de uma representação estrutural incoerente (a interpretação analítica da viga se estende além das fronteiras do elemento físico).

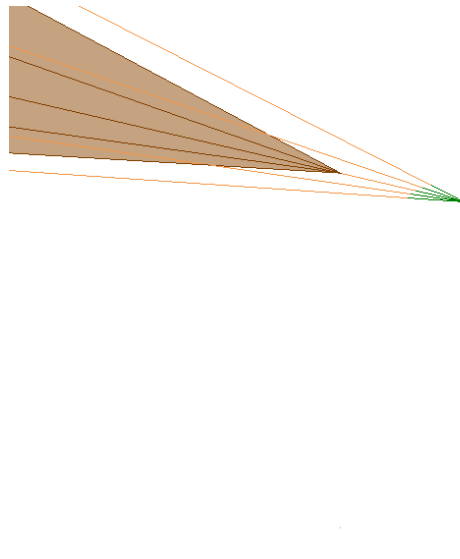


Figura 5.12 Alteração automática do modelo analítico resultante da movimentação dos pilares. Fonte: Autor

Tais questões apresentam relevância no contexto de análise estrutural em BIM, pois evidenciam a influência direta do procedimento de modelagem dos elementos na interpretação final do *software* de análise. Modelos analíticos impróprios podem ser originados de pequenas alterações no modelo físico. No caso do Modelo 2, a representação analítica dos pilares teve de ser modificada manualmente. Destaca-se que é possível alterar a origem de inserção de elementos de uma família e, conseqüentemente, seu alinhamento analítico, porém nenhuma alteração em famílias foi realizada nesta etapa. As ferramentas de ajuste analítico apresentadas no item 5.1.2.2 foram empregadas para alinhar o eixo analítico dos pilares com as extremidades da laje de cobertura.

5.1.2.2. Ajustes do modelo analítico

O ajuste de um modelo analítico pode ser realizado de diferentes formas no Revit. A primeira maneira é a ferramenta “ajuste analítico”. Ela permite que nós de elementos sejam movidos manualmente e que vínculos analíticos sejam criados. É possível também alterar o alinhamento pela guia “Propriedades” quando um elemento analítico está selecionado, conforme ilustrado na Figura 5.13.

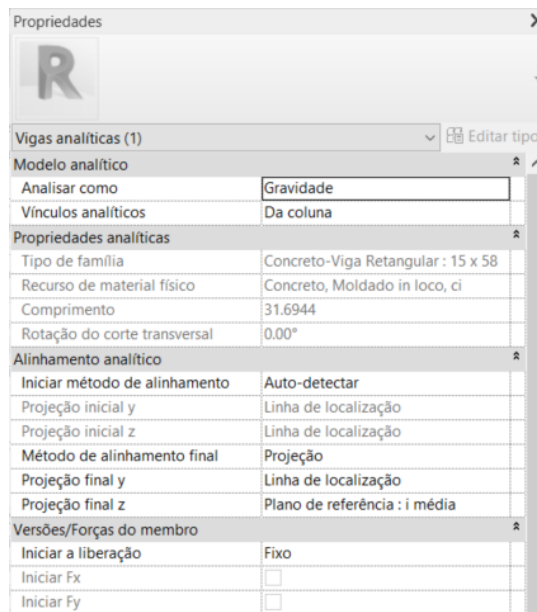


Figura 5.13 Guia “Propriedades” de uma viga analítica, com métodos de alinhamento inicial e final distintos. Fonte: Autor

Os métodos da propriedade de alinhamento de representações analíticas de elementos estruturais são estabelecidos por padrão como “Auto-detectar”. Em elementos isolados, aplicando essa configuração, as representações analíticas serão consistentes. Uma viga analítica será sempre alinhada com sua face de topo, centralizada em sua largura e terá o mesmo comprimento da peça física, por exemplo. Contudo, dependendo das características do modelo conjunto, o *software* poderá adaptar o alinhamento de acordo com a sua interpretação, ajustando-o para o que considerar a posição mais adequada.

A autodetecção de alinhamentos analíticos apresenta vantagens e desvantagens. Em determinados casos, a propriedade “Auto-detectar” resulta em interpretações estruturais adequadas e poupa esforços de ajuste manual por parte do usuário. Alterações do modelo físico, como pequenos desalinhamentos de elementos estruturais, são automaticamente corrigidas no modelo analítico. Em estruturas mais complexas, entretanto, em que estão presentes curvas, inclinações ou grande quantidade de níveis distintos, o modelo analítico dificilmente será inteiramente representado de maneira precisa. A Autodesk apresenta as seguintes recomendações:

As configurações de relação automática do software devem refletir como o usuário pretende gerenciar o vínculo entre os modelos físico e analítico ao longo do tempo, à medida que as mudanças ocorrem. As configurações automáticas de relação são regras predefinidas que o software utiliza para criar automaticamente uma simplificação analítica mais precisa do modelo físico. Contudo, essa simplificação analítica é subjetiva e os engenheiros podem querer um modelo de análise definido de forma que se adapte às suas expectativas e exigências individuais. Portanto, o usuário pode ajustar manualmente o modelo analítico. Ao editar o modelo analítico, é criada uma relação personalizada entre o modelo físico e o modelo analítico, mantendo-os sincronizados conforme as mudanças ocorrem. A Autodesk recomenda que o usuário do Revit usufrua da relação automática ao criar primeiro um modelo físico e o ajuste posteriormente conforme a sua necessidade (AUTODESK, INC., 2014, p. 13).

Quando a propriedade de alinhamento analítica de um elemento estrutural é fixada a um nível, eixo ou plano de referência, a sua interpretação analítica está desassociada do objeto físico em determinados aspectos. Pode-se modelar uma viga física horizontal e configurar sua correspondente analítica como inclinada, por exemplo. Isso facilita a adequada conexão entre elemento distintos.

5.1.2.3. Vigas baldrame

Em seguida, foram adicionadas as vigas baldrame previstas em projeto, assim como seus blocos quadrangulares de suporte. As vigas baldrame fazem o intertravamento entre as duas paredes estruturais e os três pilares. Elas apresentam seção transversal de 20 x 80 cm, com exceção das vigas V4 e V6 (conforme numeração definida pela Figura 5.14), que interligam as Paredes 1 e 2 em sua região posterior e apresentam seção de 20 x 40 cm. Os blocos são interpretados pelo *software* de análise como pontos intermediários de apoio para as vigas. Não foram detectadas complicações de modelagem nessa etapa. Destaca-se, entretanto, a necessidade de locar corretamente os blocos, pois eles não são automaticamente vinculados às vigas e não acompanham eventuais mudanças de posição. Blocos e sapatas locados na base de pilares, por outro lado, apresentam vínculo automático.

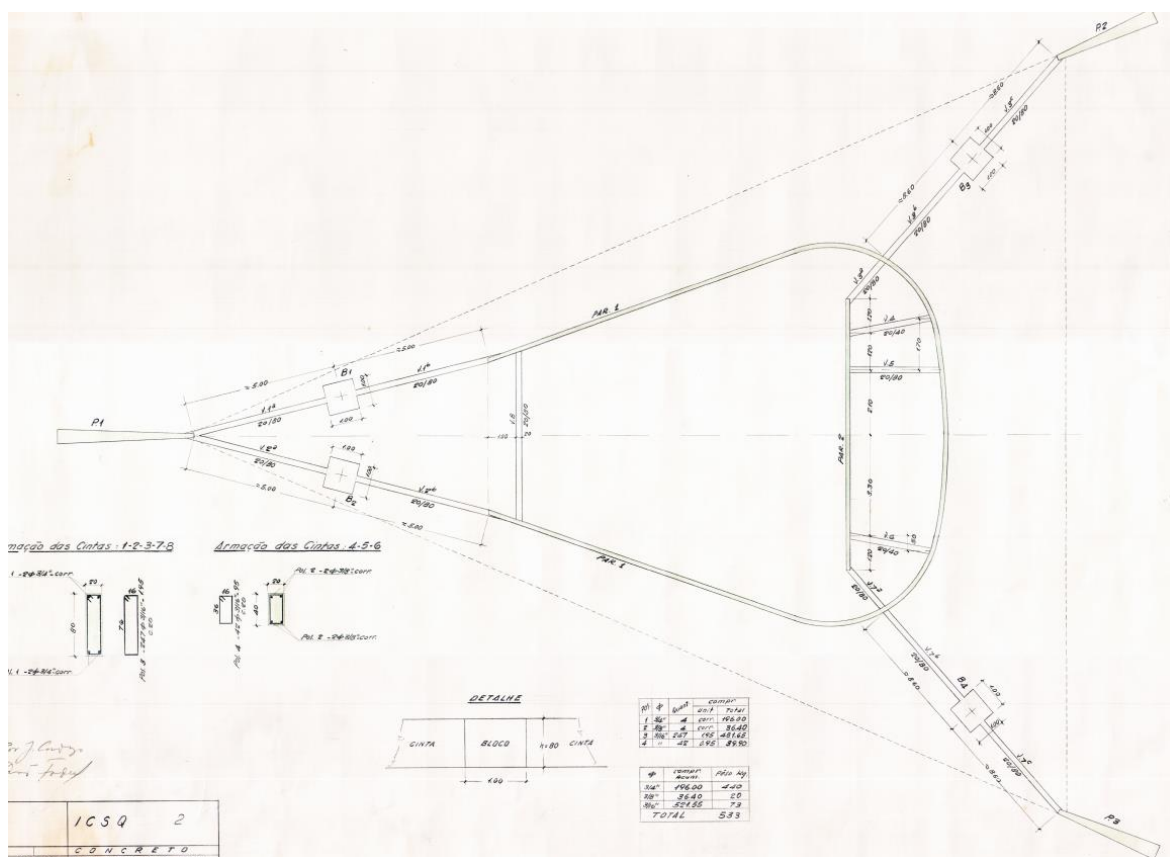


Figura 5.14. Planta de formas e de armação das cintas (vigas baldrame). Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal, 2022.

5.1.2.4. Lajes e vigas de cobertura

Para o ajuste da laje, foi empregada a ferramenta “seta de inclinação”, que permite atribuir uma inclinação específica à laje ou alturas aos pontos inicial e final. Essa ferramenta é a única que resulta em uma alteração automática do plano horizontal da superfície analítica correspondente no Revit. Estipulou-se uma inclinação média à laje, mantendo as alturas originais dos três pilares, conforme a Figura 5.15. Analisando as dimensões assinaladas em projeto, tem-se um desnível de 3,00 m (nível +8,00 m do pilar P1 e nível +5,00 m dos pilares P2 e P3) para 29,00 m de comprimento total, resultando em uma inclinação de 10,34%. As paredes estruturais, que já haviam sido anexadas às lajes de cobertura no modelo anterior, foram automaticamente ajustadas.

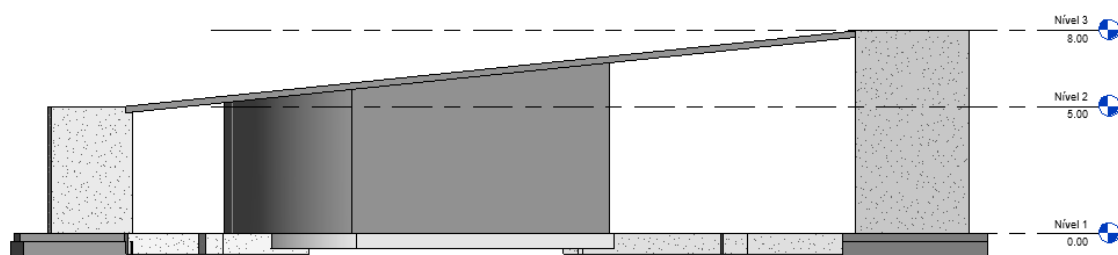


Figura 5.15. Vista lateral da laje de cobertura do Modelo 2. Fonte: Autor.

As vigas foram modeladas inicialmente em uma vista de planta, paralela ao plano horizontal. Em seguida, tiveram seu alinhamento em relação ao eixo z (eixo vertical) modificado na aba “propriedades”, a fim de serem representadas como inclinadas e invertidas no modelo físico. A autodetecção do alinhamento analítico não locou as vigas exatamente no mesmo plano das lajes, portanto sua posição foi fixada a um plano de referência. Foi observado que, apesar de a determinação manual da altura das vigas analíticas tê-las alinhado corretamente, suas extremidades não se mantiveram na exata posição especificada em planta, causando uma pequena descontinuidade - Figura 5.16.

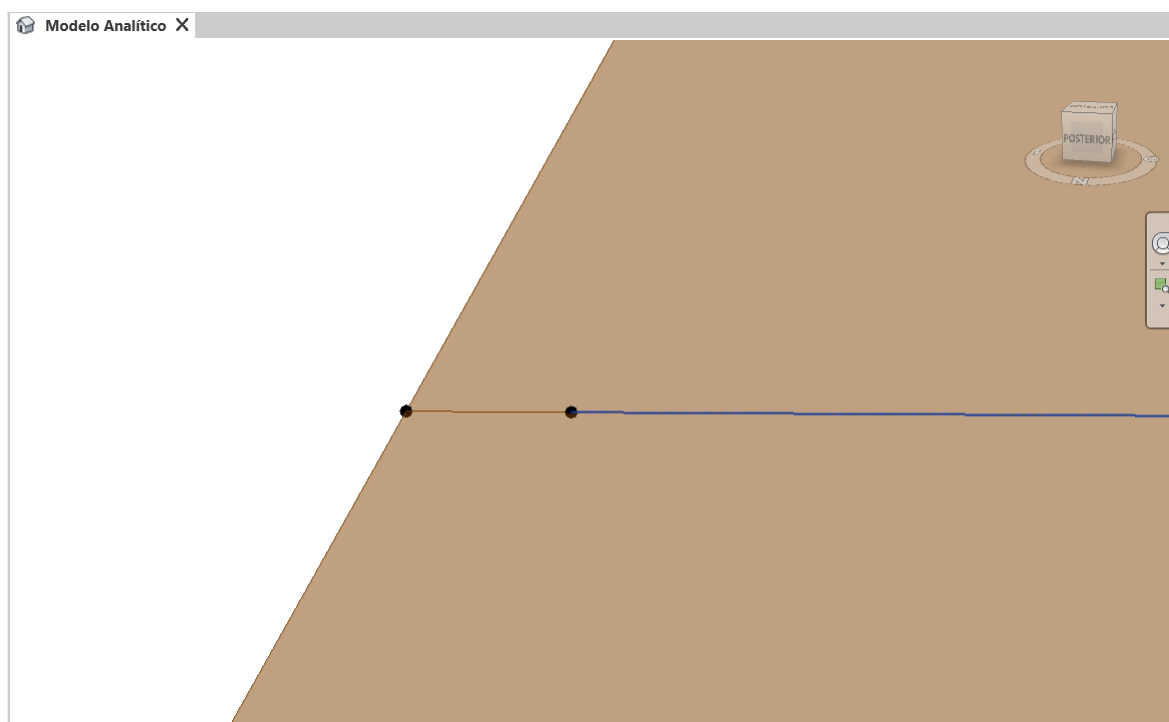


Figura 5.16. Descontinuidade do modelo analítico causada pela alteração manual das alturas inicial e final de uma viga de cobertura. Fonte: Autor.

A descontinuidade observada não apresenta grandes obstáculos para a interpretação futura do *software* de análise, pois este irá considerar que um pequeno trecho da laje não está diretamente apoiado na viga. Entretanto, a fim de garantir o máximo de robustez do modelo analítico, é recomendável que, sempre que possível, os nós de elementos adjacentes estejam sobrepostos. Na situação descrita, foi possível obter esse resultado ao se fixar a projeção final da viga analítica no eixo y a um outro plano de referência. Outra possibilidade seria modelar as vigas em uma vista vertical (elevação ou corte), fixando sua posição em planta a

um eixo ou plano de referência e definindo suas alturas inicial e final no momento da inserção do elemento.

5.1.2.5. Verificação da consistência do modelo

Uma vez finalizado o Modelo 2 e realizados todos os ajustes analíticos pertinentes, é possível verificar a consistência do modelo. Tal esforço é sempre vantajoso na modelagem de estruturas no Revit, especialmente em casos em que o modelo analítico é alterado manualmente. O *software* apresenta uma ferramenta de verificação automática de consistência, em que determinados parâmetros, indicados na Figura 5.17, podem ser ajustados.

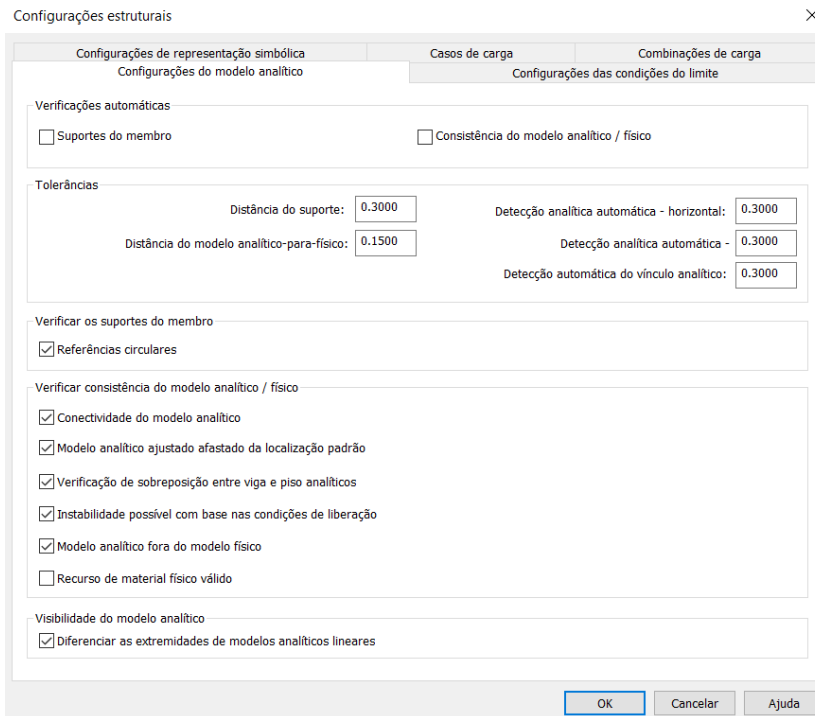


Figura 5.17. Parâmetros de verificação de consistência do modelo analítico / físico no Revit. Fonte: Autor.

Outra forma de verificação, de grande auxílio no processo de modelagem, é a adição de filtros visuais. Os seguintes filtros com base em regras estão disponíveis nas configurações de visibilidade: nós analíticos conectados, nós analíticos não conectados, conexões aprovadas e conexões rejeitadas. Como as conexões, como definidas no *software*, são aplicáveis principalmente a estruturas metálicas, foram utilizados os filtros de nós. Eles permitem uma identificação imediata de elementos com nós isolados, representados em vermelho, enquanto os nós conectados serão representados em verde - Figura 5.18.

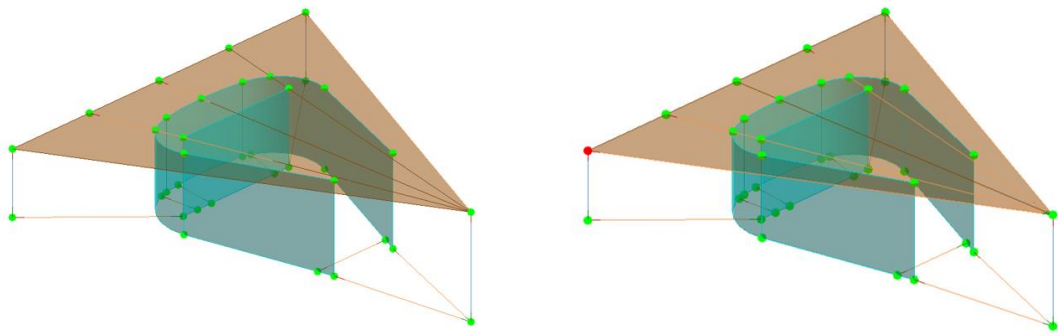


Figura 5.18. Filtros visuais de nós analíticos conectados (em verde) e não conectados (em vermelho). Fonte: Autor.

5.1.2.6. Análise estrutural

Após atestada a consistência do modelo, este foi exportado para o Robot, mantidas as configurações padrão de exportação. Os modelos físico e analítico podem ser visualizados na Figura 5.19.

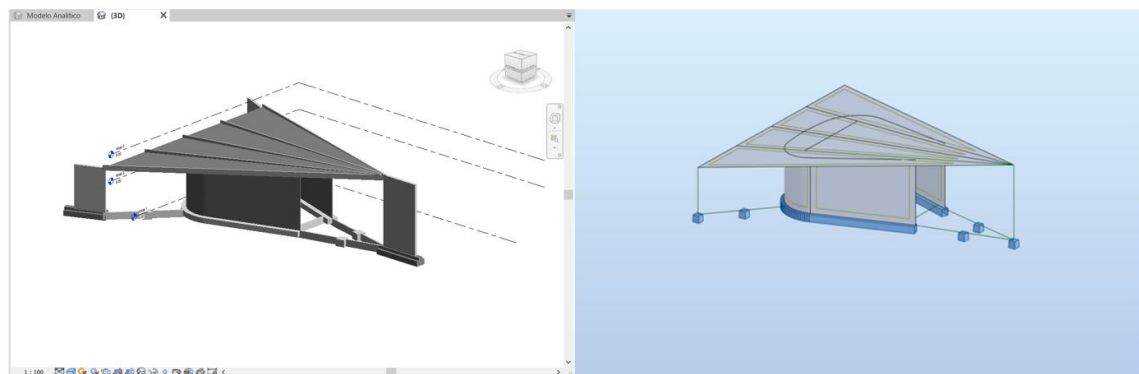


Figura 5.19. Modelo 2 em suas representações física no Revit e analítica no Robot. Fonte: Autor.

No Robot, foi então executada a ferramenta de cálculo da estrutura. Novamente, as configurações padrão foram mantidas, como geração automática da malha de elementos finitos. Buscou-se realizar o mínimo de ajustes manuais possível no *software* de análise, de forma que o esforço de modelagem se concentre no *software* arquitetônico. Em comparação com o Modelo 1, quatro avisos a mais foram exibidos após o cálculo da estrutura. O conjunto de avisos está listado a seguir:

- Nó isolado
- As condições de apoio nos nós não são compatíveis
- O elemento não está atribuído a um andar
- Os nós isolados foram encontrados
- Um nó isolado com atributos adicionais foi encontrado

Observa-se que a adição de níveis de complexidade à estrutura, por mais que sejam tomadas as devidas precauções, dificulta a interpretação do modelo pelo *software* de análise de

maneira automática. Os nós isolados detectados são oriundos da dificuldade de discretização da parede curva no processo de criação da malha, conforme a Figura 5.20. O nó isolado com atributos adicionais corresponde a um dos pontos de apoio da mesma parede. As condições de apoio não compatíveis são as mesmas detectadas no Modelo 1, nos locais de transição da parede estrutural retilínea para a parede curva. Destaca-se ainda que o elemento no qual os nós isolados foram encontrados não sofreu nenhuma alteração desde a adaptação do modelo anterior, em que nenhum erro foi verificado. Esse fato evidencia a influência das particularidades do conjunto da estrutura na discretização de cada componente.

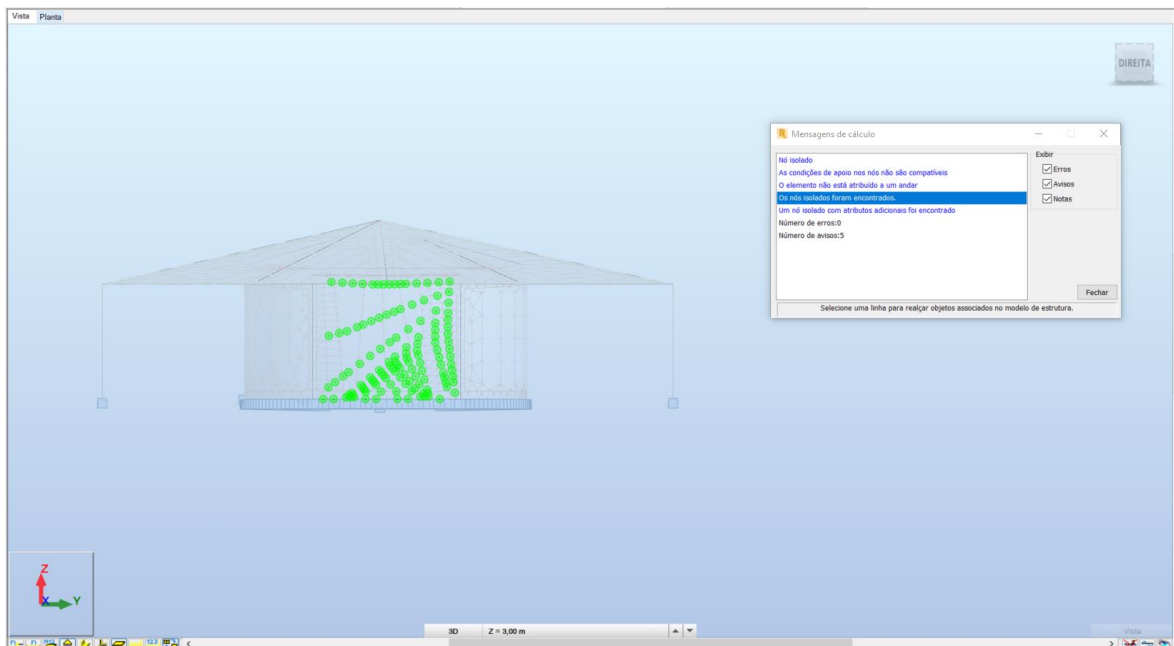


Figura 5.20 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do Modelo 2 pelo Robot Structural Analysis: “Os nós isolados foram encontrados”. Fonte: Autor.

Os resultados foram então exibidos com auxílio da ferramenta “diagramas para barras”. A representação da malha deformada pode ser visualizada nas Figura 5.21 e Figura 5.22. Assim como no Modelo 1, o comportamento global de deformações e de geometria do diagrama de momentos fletores foram brevemente inspecionados e julgados como aceitáveis.

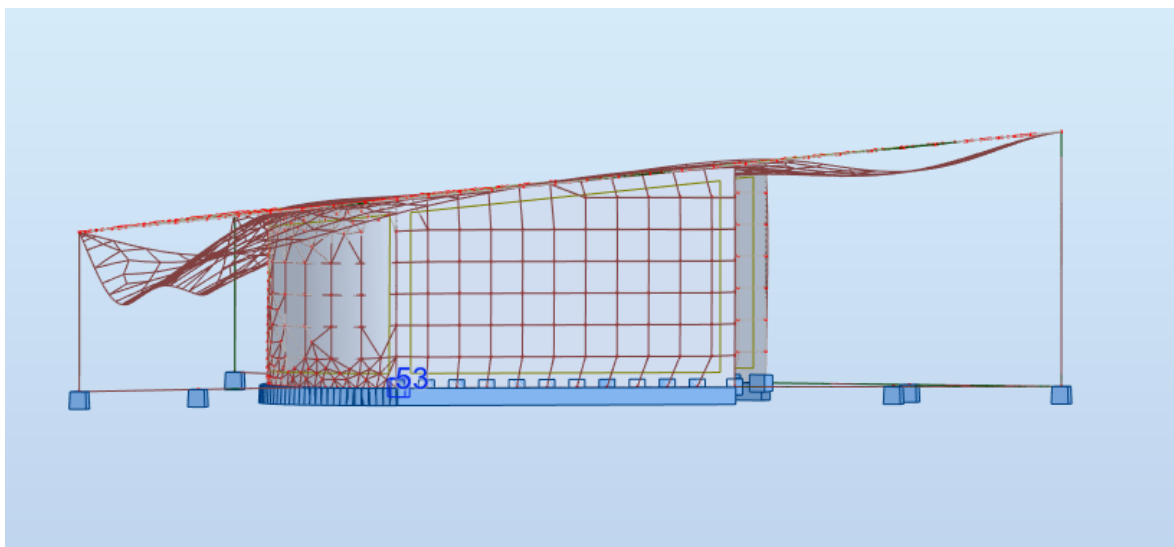


Figura 5.21 Vista lateral da da deformação de malha do Modelo 2. Fonte: Autor.

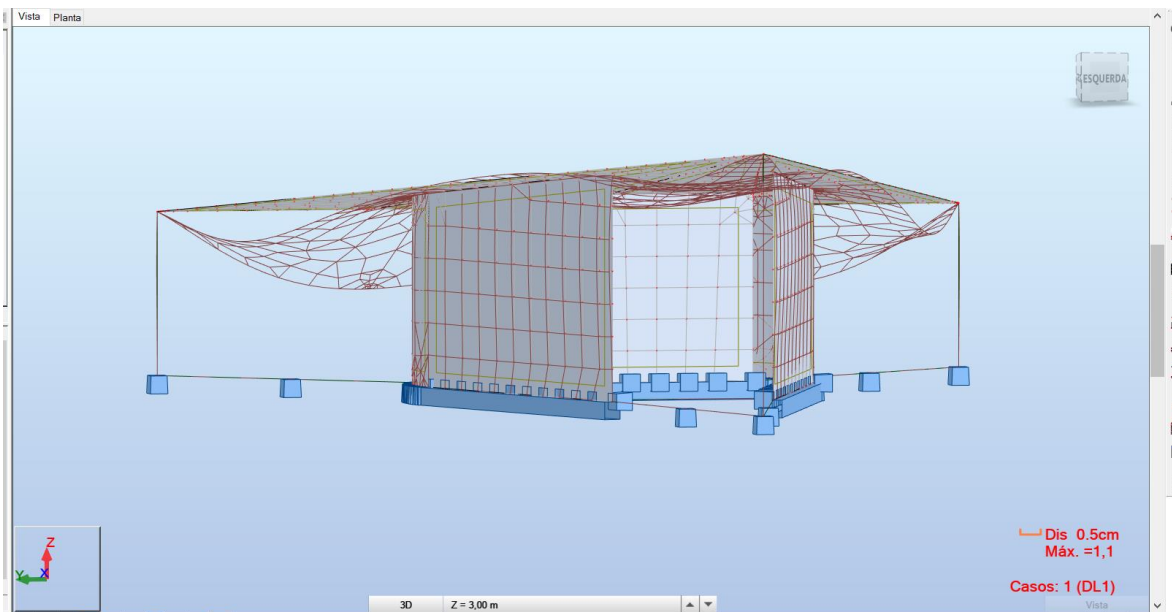


Figura 5.22 Vista frontal da deformação de malha do Modelo 2. Fonte: Autor.

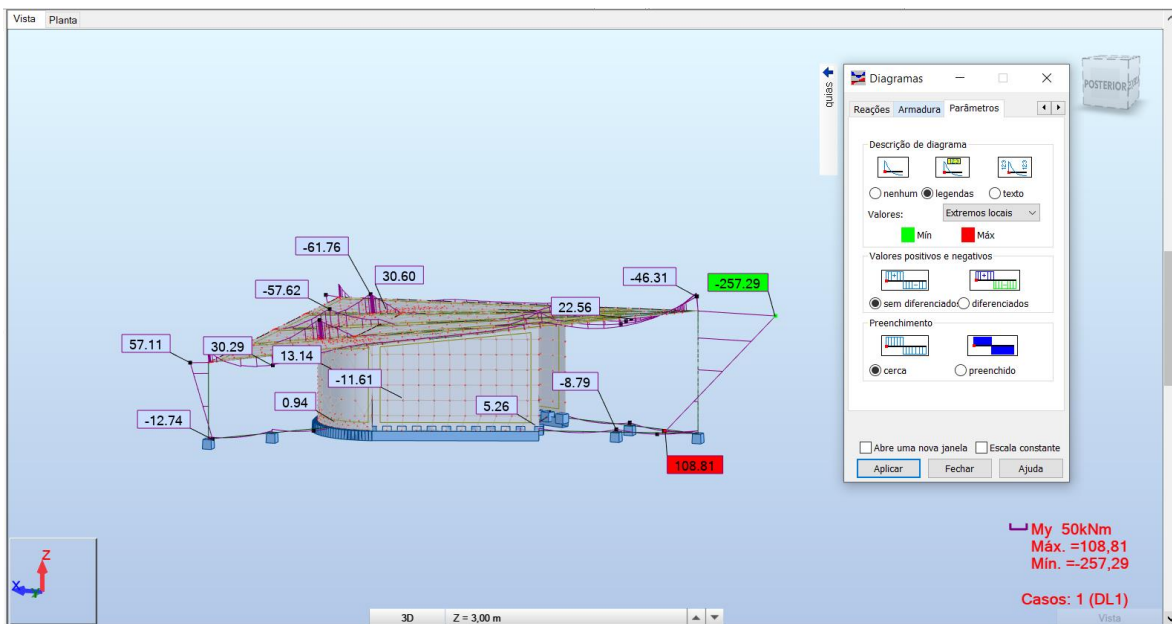


Figura 5.23 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y para o Modelo 2. Fonte: Autor

Uma análise mais detalhada dos diagramas da Figura 5.23 revelou, entretanto, dois pontos de aprimoramento para o próximo modelo. Primeiramente, os valores calculados de momento fletor concentrados na fração superior dos pilares P1, P2 e P3 se apresentaram significativamente elevados. No topo do pilar P1, é observado inclusive o valor máximo de momento na estrutura. Esse comportamento não é compatível com as características reais da edificação, na qual os topos dos pilares correspondem ao trecho mais reduzido de sua seção transversal – 30 cm de comprimento e 20 cm de largura para o apoio da laje de cobertura em comparação com os 4,50 m de comprimento e 50 cm x 20 cm de largura em sua base. A inércia do trecho superior não é capaz de absorver e transmitir a magnitude de momento fletor calculada. Definiu-se, portanto, que as ligações dos pilares com a laje de cobertura serão rotuladas. A Figura 5.24 apresenta um detalhe de projeto da ligação do topo dos pilares com a cobertura.

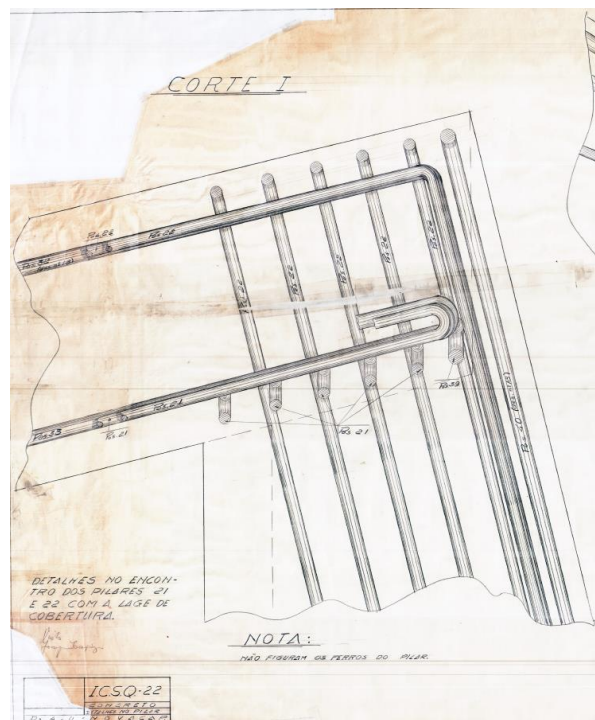


Figura 5.24. Detalhe da armação no encontro dos pilares com a cobertura. Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal, 2022.

O segundo ponto observado foi que o Robot, em suas configurações padrão, desconsidera o alinhamento da seção transversal com o eixo analítico estabelecido no Revit. As seções transversais são locadas de acordo com o seu centro geométrico, conforme a Figura 5.25. Em determinadas situações, como a representação das vigas como invertidas, a posição da seção transversal em relação ao eixo analítico não influenciará de forma significativa os resultados da análise. Em outros casos, como o de excentricidades na transferência de cargas para pilares, os esforços resultantes podem variar expressivamente. Buscar-se-á, portanto, transferir de maneira automática o alinhamento definido no *software* de modelagem, a fim de que informações não sejam perdidas no processo de exportação da estrutura.

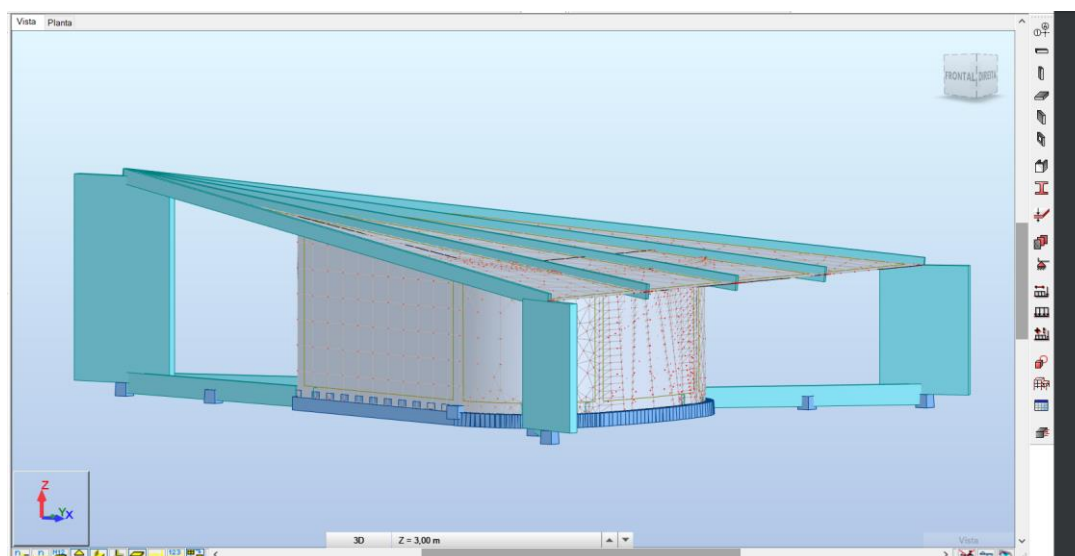


Figura 5.25. Interpretação das seções transversais dos elementos em barra pelo Robot. Fonte: Autor.

5.1.3. Modelo 3

O Modelo 3 correspondeu ao modelo final da Igrejinha no Revit, no qual suas características particulares foram representadas da forma mais precisa possível no limite de um esforço de modelagem moderado. Destaca-se que representações ainda mais precisas podem ser obtidas ao fragmentar determinados elementos em segmentos cada vez menores, porém considerou-se que o pequeno ganho de precisão resultante desse aprimoramento não justifica o incremento significativo do respectivo esforço de modelagem. As representações física e analítica do Modelo 3 no Revit podem ser visualizadas na Figura 5.26 e na Figura 5.27, respectivamente.

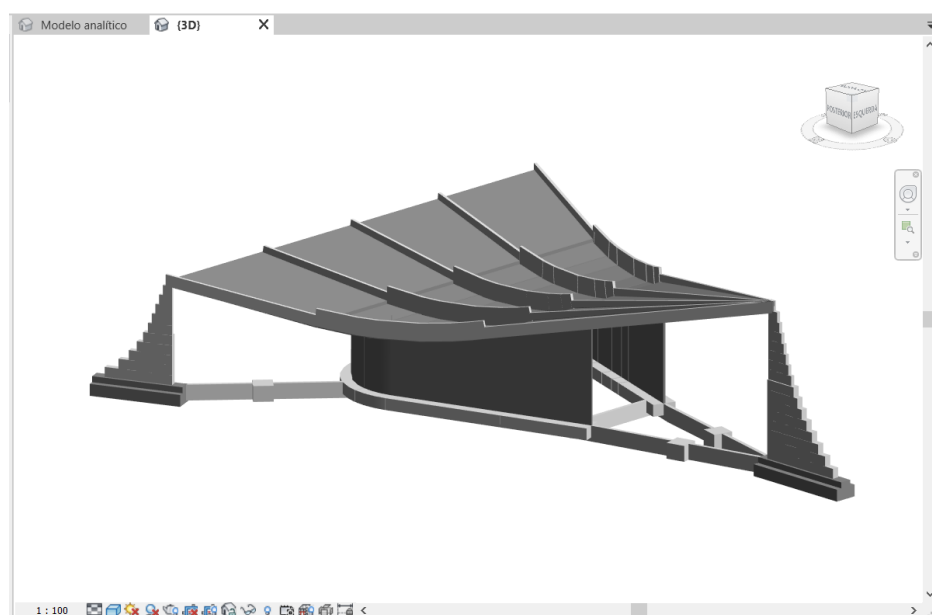


Figura 5.26. Representação física final do modelo estrutural da Igrejinha baseado em projeto. Fonte: Autor.

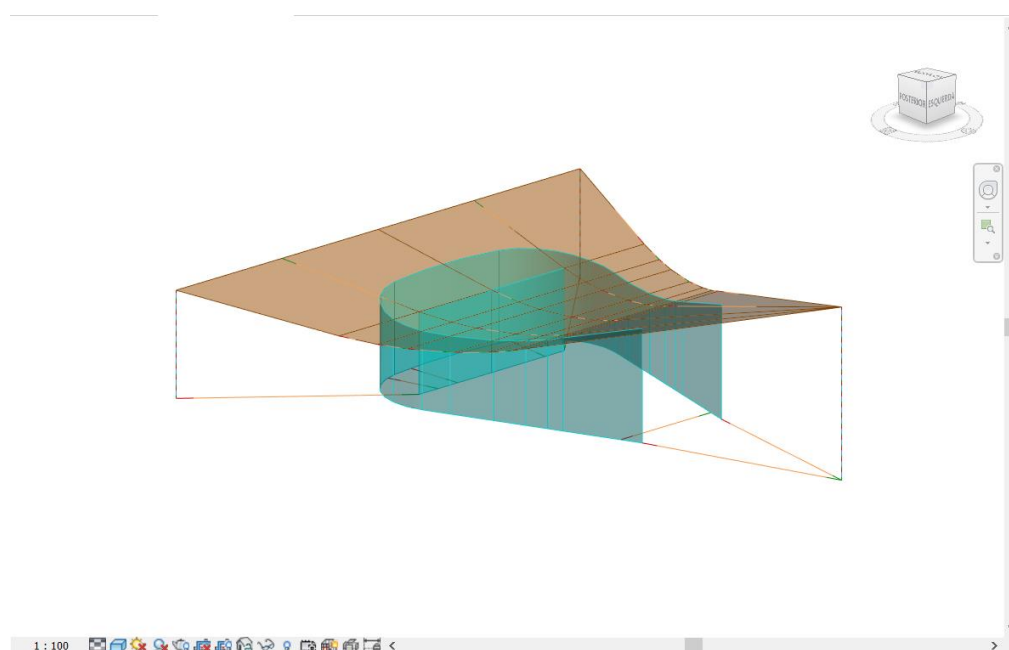


Figura 5.27. Representação analítica final do modelo estrutural da Igrejinha baseado em projeto. Fonte: Autor.

5.1.3.1. Modelagem no Revit

Em comparação com o Modelo 2, foram incorporadas aproximações do trecho curvo da laje de cobertura e da geometria dos pilares. As curvaturas exatas não puderam ser obtidas porque o Revit apenas admite projeções planares de pisos analíticos e porque o processo de exportação para o Robot, como adotado neste trabalho, apenas é bem-sucedido quando todos os elementos estruturais apresentam seções transversais comuns aos dois *softwares*. Seções de geometria complexa criadas por meio de famílias no Revit não são reconhecidas sem o uso de *plug-ins* ou de sua definição manual pela ferramenta “definição de seção” no próprio Robot. Como descrito no item 4.2, este trabalho buscou concentrar os esforços de modelagem no *software* arquitetônico, o que tornou a simplificação de seções transversais necessária.

A metodologia para representação das curvas foi a mesma no caso dos pilares, vigas e lajes. Todos foram subdivididos em segmentos menores, retilíneos e de seção transversal uniforme, de forma que a geometria final se aproximasse da curvatura projetada. Para os pilares, foram definidos segmentos de 50 cm de altura. Para as lajes e vigas da cobertura, foram definidos segmentos de 20 cm de altura no trecho curvo central. As porções retilíneas das lajes e vigas foram mantidas como elementos únicos, tendo sido necessário especificar uma altura média de 58 cm para as vigas nesses locais (sua altura em projeto varia de 25 cm a 90 cm).

Cinco níveis foram criados para a definição dos segmentos intermediários de lajes e vigas, com as seguintes alturas: +3,50 m, +3,70 m, +3,90 m, +4,10 m, +4,30m. A partir da interseção desses níveis com o desenho do corte da cobertura – Figura 5.28, foram criados planos de referência inclinados correspondentes ao fundo das lajes e vigas. Não foram criados níveis específicos para os pilares, suas referências foram fixadas aos níveis 0,00 m e +5,00 m, atribuindo-se deslocamentos de topo e de base de meio em meio metro. O comprimento de cada segmento de pilar também foi definido pela interseção de sua altura com o desenho de sua vista lateral baseada no projeto.

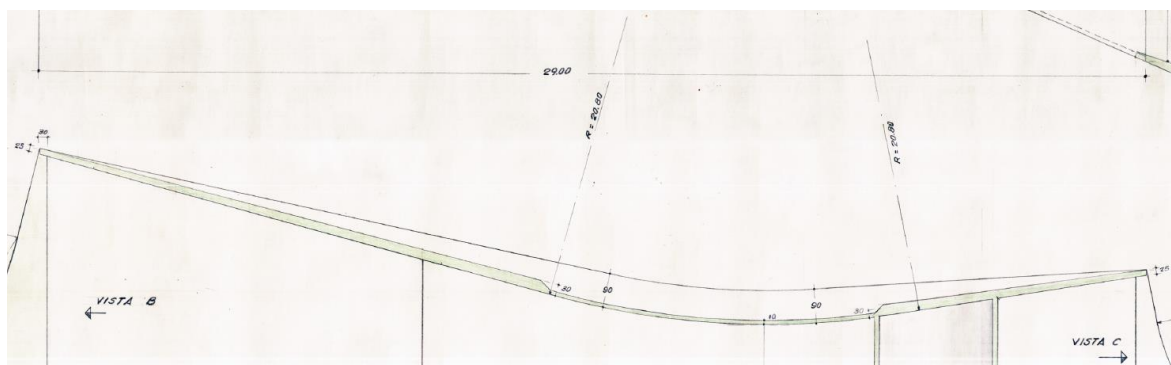


Figura 5.28. Representação da curvatura da laje de cobertura. Fonte: Arquivo Público do Distrito Federal, 2022.

Observou-se que a continuidade das paredes estruturais ocasionou problemas de anexação com as diversas lajes de cobertura construídas. Em determinados trechos, a representação analítica das paredes não era estendida até o plano analítico da laje, de forma que o *software* de análise não consideraria aquela região como um apoio. Para corrigir essa falha, as paredes estruturais foram divididas em trechos iguais aos da projeção horizontal dos segmentos de lajes e vigas, a fim de que seu método de extensão superior pudesse ser definido por um plano de referência único.

Além das adaptações descritas, foram rotuladas as conexões pilar – laje, devido à incompatibilidade do diagrama de momento fletor observado no Modelo 2 com as

características de apoio observadas na realidade. A rótula pode ser definida no próprio Revit, ao se alterarem as propriedades do pilar analítico. É possível liberar ou restringir as forças e/ou momentos fletores nos eixos x, y e z, tanto na base quanto no topo. Os momentos em todas as direções foram liberados no topo dos três pilares, em um apoio denominado pelo *software* de fixado.

5.1.3.2. Análise estrutural

Todos os ajustes analíticos necessários à consistência do modelo foram realizados com auxílio das ferramentas apresentadas no item 5.1.2.2. A estrutura foi então exportada para o Robot e calculada, sendo gerados os seguintes avisos:

- Nó isolado
- A coesão do modelo de cálculo foi fornecida pela definição das restrições cinemáticas nos pontos incoerentes da malha de elementos finitos
- As condições de apoio nos nós não são compatíveis
- O elemento não está atribuído a um andar
- Os nós isolados foram encontrados

As Figuras 5.29 e 5.30 apresentam os nós isolados identificados e os pontos incoerentes da malha de elementos finitos. Assim como no Modelo 2, um trecho curvo da parede apresentou nós isolados pela discretização automática. Os pontos incoerentes da malha coincidem com os apoios fornecidos pela Parede 1 para as vigas de cobertura V2, V3 e V4. Apesar de o número de avisos gerados ser o mesmo do Modelo 2, é ratificada a dificuldade do Robot em gerar malhas conexas para certas associações estruturais complexas, especialmente na presença de elementos curvos. Essa constatação é corroborada pelo fato de que grande parte dos avisos observados se referem às paredes estruturais curvas, que não sofreram nenhuma alteração desde o primeiro modelo, a não ser de sua extensão superior. A detecção de nós isolados, por exemplo, ocorreu inclusive em trechos curvos distintos nos diferentes modelos. O Robot apresenta configurações que permitem ao usuário corrigir os avisos destacados, como ajustes manuais da malha de elementos finitos. A eliminação dos erros de processamento, entretanto, não faz parte do escopo deste trabalho, que busca comparar as interpretações automáticas de diversos modelos importados do Revit.

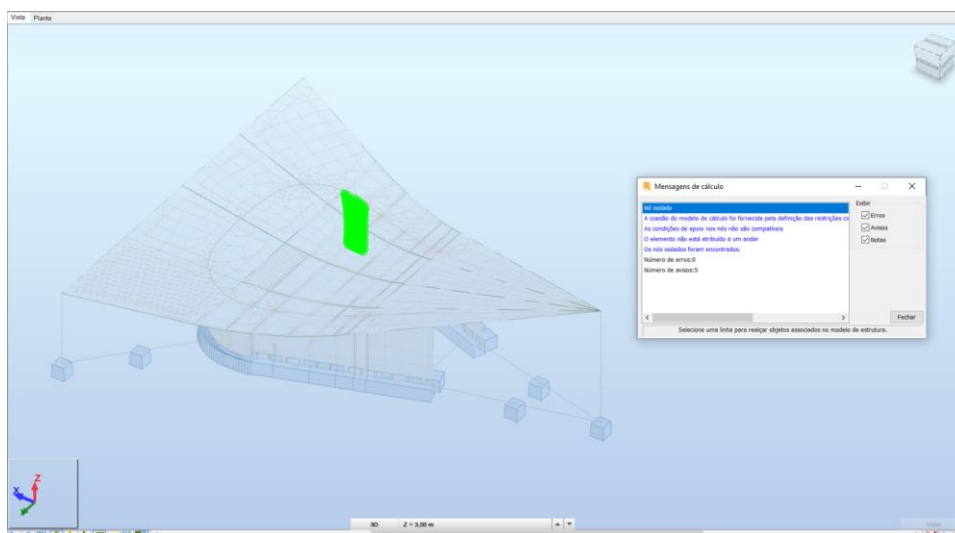


Figura 5.29 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do Modelo 3 pelo Robot Structural Analysis: “Nó isolado”. Fonte: Autor.

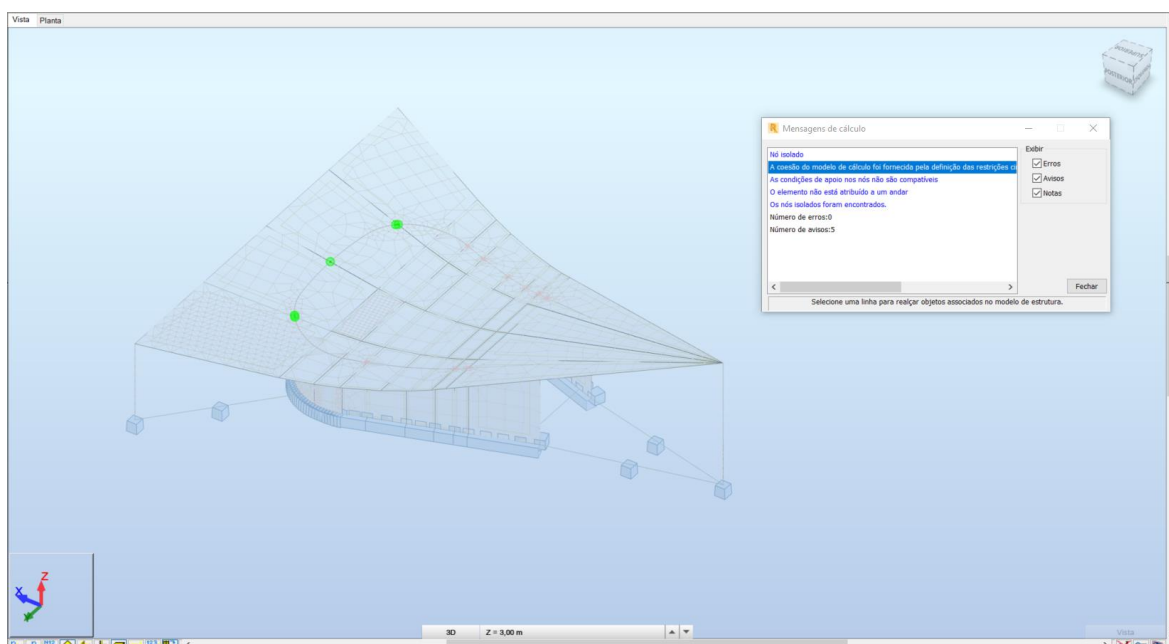


Figura 5.30 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do Modelo 3 pelo Robot Structural Analysis: “A coesão do modelo de cálculo foi fornecida pela definição das restrições cinemáticas nos pontos incoerentes da malha de elementos finitos”. Fonte: Autor.

Conforme abordado no Modelo 2, uma característica prejudicial ao modelo no processo de exportação para o Robot é a perda da informação da localização da seção transversal em relação ao eixo analítico. A Figura 5.31 ilustra a distribuição automática das seções no Robot, todas centralizadas. Essa simplificação gera resultados falhos, especialmente no caso dos pilares. A geometria real dos pilares induz uma transferência de esforços de maneira não centralizada, inclusive, o centro geométrico da região inferior da seção do pilar está localizado a mais de dois metros de distância do ponto de aplicação da carga. Excentricidades dessa magnitude são incompatíveis com os valores de momento resultantes do cálculo, que podem ser visualizados na Figura 5.32.

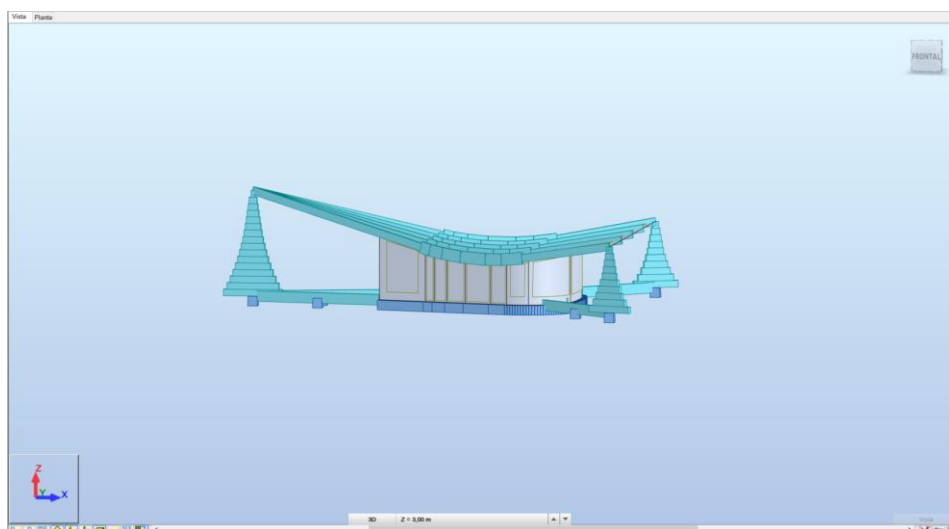


Figura 5.31. Interpretação das seções transversais dos elementos em barra pelo Robot para o modelo final. Fonte: Autor.

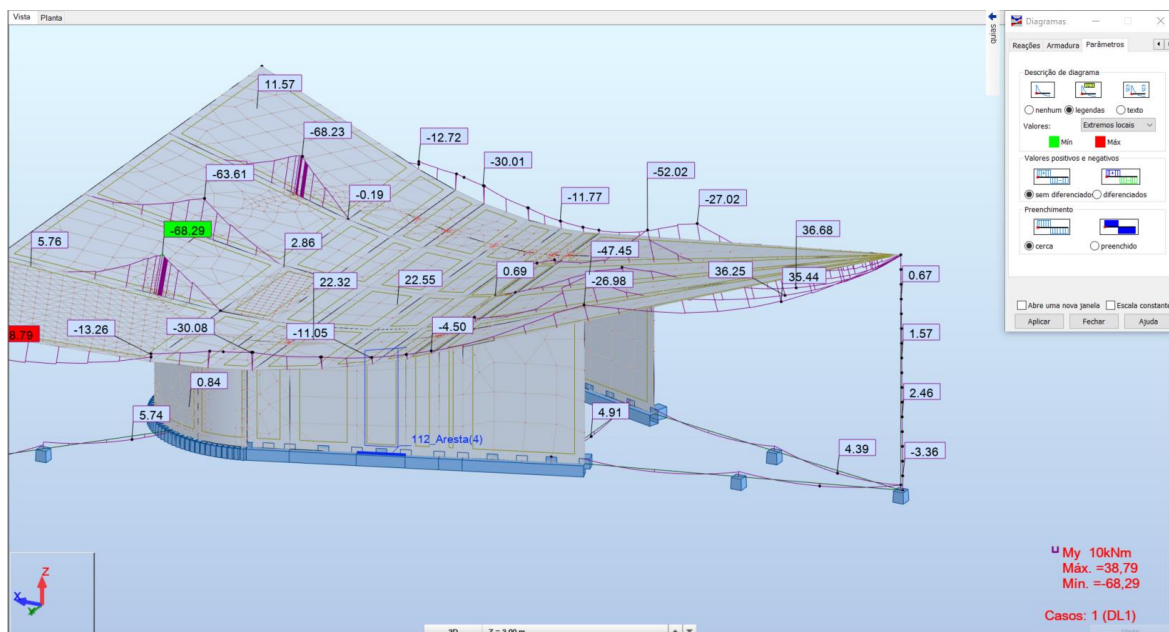


Figura 5.32 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y e para o Modelo 3, com as seções centralizadas. Fonte: Autor

O Revit apresenta uma configuração própria para levar o alinhamento da seção transversal em conta, porém tal configuração não se encontra acessível de maneira clara ao usuário. É necessário manter a tecla “Ctrl” pressionada ao selecionar o comando “Vínculo para o Robot Structural Analysis” de forma que opções adicionais de envio sejam exibidas. Dentre elas, é possível selecionar o item “Usar deslocamentos do modelo de desenho como analítico”. A estrutura analítica será reproduzida conforme os ajustes realizados no modelo físico, como ilustrado pela Figura 5.33.

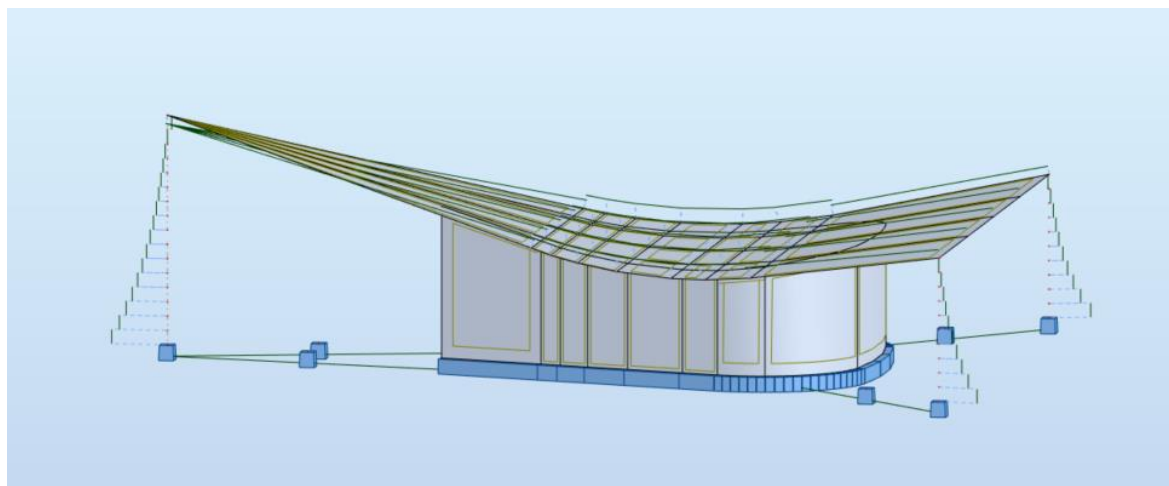


Figura 5.33 Modelo analítico no Robot com as seções deslocadas conforme o modelo físico. Fonte: Autor

Verificou-se que esse processo, apesar de poupar considerável esforço decorrente de ajustes manuais, pode ocasionar certos problemas. Primeiramente, a visualização da forma das seções mostra-se incoerente, como verificado na Figura 5.34. Todas as seções das barras foram conferidas e suas dimensões encontravam-se corretas, conforme definidas no Revit. Atribuiu-se, portanto, a representação gráfica incorreta a uma falha computacional do

software. Essa falha não interfere diretamente nos cálculos estruturais, porém pode trazer insegurança ao usuário.

Outra desvantagem da ativação da opção “Usar deslocamentos do modelo de desenho como analítico” é a descontinuidade dos diagramas de esforços, como representado na Figura 5.35. Esse efeito foi majorado pela segmentação de elementos estruturais para a representação de curvas. As segmentações, quando associadas a deslocamentos da seção transversal, podem prejudicar a coesão do modelo e influenciar nos resultados do cálculo estrutural.

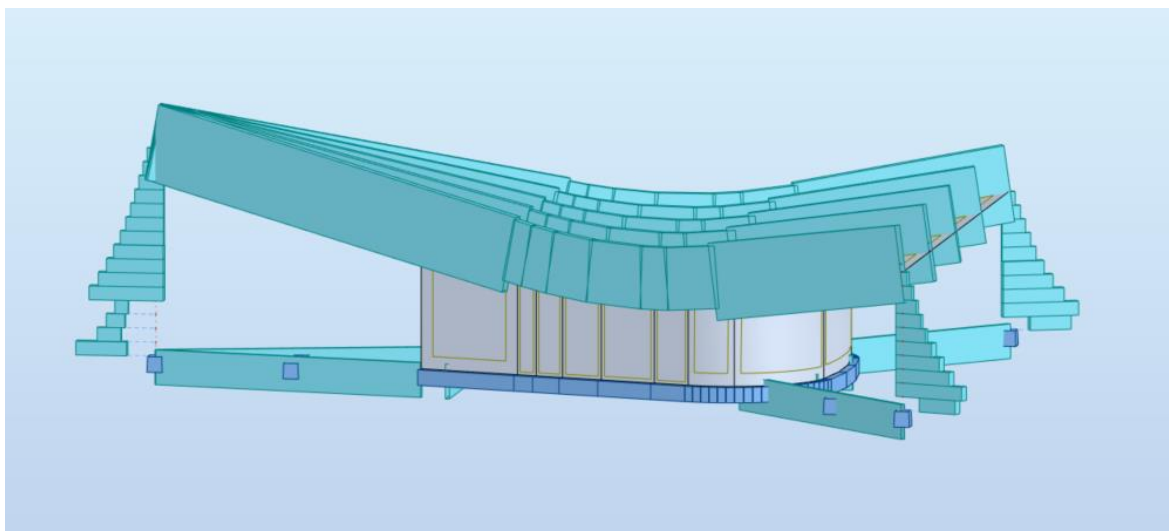


Figura 5.34 Representação das seções deslocadas conforme o modelo físico no Robot.
Fonte: Autor.

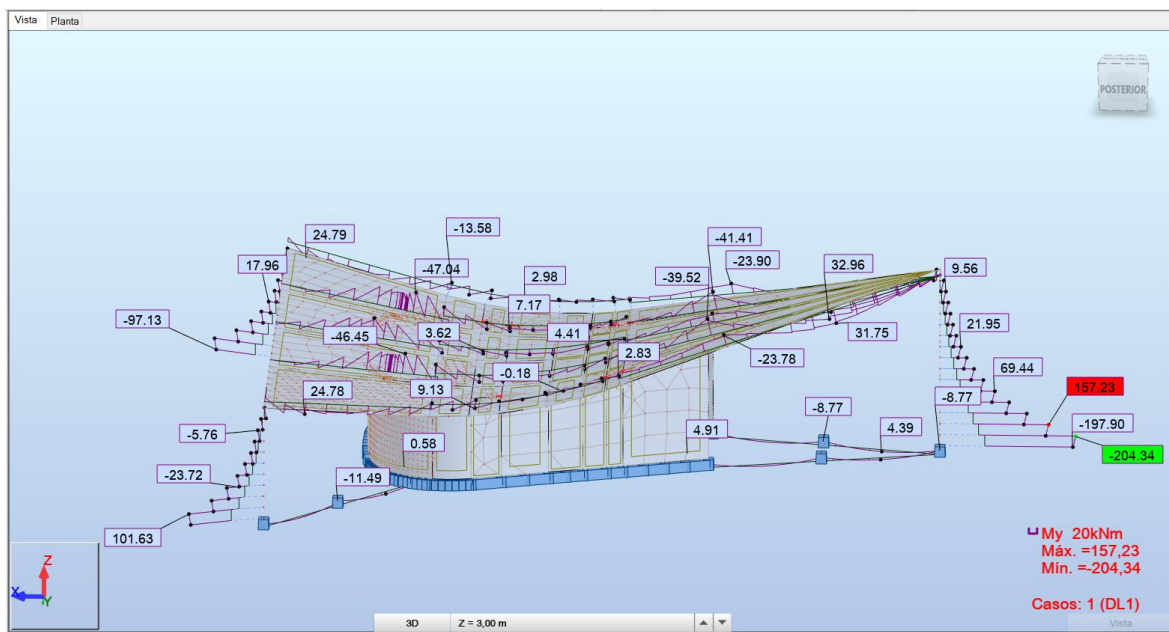


Figura 5.35 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y para o Modelo 3, com as seções deslocadas. Fonte: Autor.

5.1.3.3. Comparação dos métodos de exportação

Para comparação dos dois procedimentos de exportação, foi elaborada a Tabela 5.1, que contém valores representativos da análise estrutural e do esforço computacional de processamento. Os eixos x, y e z são definidos conforme os quadrantes do canto inferior

esquerdo da Figura 3.1, em azul, verde e vermelho, respectivamente. O eixo x, horizontal, corresponde à direção longitudinal da Igrejinha, o eixo y corresponde à direção transversal e o eixo z é o eixo vertical. F representa uma força de reação no apoio, M, momento fletor e V, quando associado a um eixo, esforço cortante.

Tabela 5.1 Comparação entre os resultados dos métodos de exportação por seções centralizadas e seções deslocadas. Fonte: Autor.

	Seções Centralizadas	Seções Deslocadas	Diferença
Tempo de exportação	23 s	38 s	65%
Tempo de processamento	9 s	9 s	0%
Número de avisos gerados	5	5	0%
Fz - P1	238,42 kN	236,15 kN	1%
Fz - P2	140,29 kN	134,27 kN	4%
Fz - P3	140,60 kN	134,55 kN	4%
My - Base P1	-20,62 kNm	206,68 kNm	1102%
My - Base P2	39,74 kNm	-79,17 kNm	299%
My - Base P3	40,21 kNm	-79,82 kNm	299%
Mx - Base P1	0,01 kNm	-0,01 kNm	200%
Mx - Base P2	-19,57 kNm	14,18 kNm	172%
Mx - Base P3	19,76 kNm	-14,41 kNm	173%
My Máx. - Lajes de Cobertura	59,56 kNm	54,07 kNm	9%
My Min. - Lajes de Cobertura	-18,12 kNm	-18,24 kNm	1%
Mx Máx. - Lajes de Cobertura	63,83 kNm	52,50 kNm	18%
Mx Min. - Lajes de Cobertura	-31,93 kNm	-21,19 kNm	34%
My Máx. - V1, V5	38,79 kNm	31,75 kNm	18%
My Min. - V1, V5	-30,08 kNm	-23,90 kNm	21%
My Máx. - V2 - V4	36,68 kNm	32,96 kNm	10%
My Min. - V2 - V4	-68,29 kNm	-47,04 kNm	31%
Vz Máx. - V1 - V5	38,34 kN	111,78 kN	192%
Vz Min. - V1 - V5	-37,81 kN	-50,57 kN	34%
Deslocamento Máx.	1,20 cm	0,80 cm	33%

A última coluna da Tabela 5.1 apresenta a diferença percentual dos resultados gerados pelos dois métodos de exportação, tomando como base o método padrão (seções centralizadas). Nota-se que um simples ajuste de configuração na interpretação do modelo pode resultar em valores de esforços significativamente distintos. Mais especificamente, é observada grande variação dos momentos fletores nas bases dos pilares e do esforço cortante máximo das vigas de cobertura. Para os demais esforços e reações, a máxima variação observada foi de 34%, nos valores mínimos de momento ao redor do eixo x das lajes de cobertura e de esforço cortante das vigas V1 a V5.

A análise comparativa evidencia falhas nos dois métodos. Em primeiro lugar, a centralização das seções praticamente elimina momentos fletores originados da excentricidade característica da seção transversal do pilar. Quando as seções foram consideradas como deslocadas, o momento em y na base do pilar P1 teve seu sentido invertido e seu módulo foi aumentado em mais de 10 vezes. Outras reações de momento nos pilares sofreram variações de duas a três vezes em relação ao valor original. Tais divergências são profundamente significativas para a análise estrutural.

Já com relação ao modelo de seções deslocadas, o conjunto lajes / vigas de coberturas apresentou igualmente variações de esforços, de magnitude menor que no caso do momento dos pilares, mas ainda significativas. Uma discrepância de 34% na avaliação dos esforços solicitantes característicos corresponde a quase toda a margem de segurança definida por norma para a majoração dos esforços de cálculo, de 40%. Atribuíram-se as divergências entre os modelos à perda de continuidade da malha integrada de lajes e vigas: os deslocamentos dos eixos das barras causaram uma oscilação no método de cálculo que não justifica qualquer diferença de comportamento de vigas regulares para vigas invertidas na prática. Além disso, os momentos fletores críticos atuantes na cobertura resultantes do método de seções deslocadas foram consistentemente inferiores aos encontrados no método de seções centralizadas, não estando a favor da segurança.

Julgou-se, portanto, que nenhum dos métodos de exportação para o *software* de análise cumpre plenamente os requisitos necessários para uma análise estrutural adequada. Dessa forma, para definição do modelo final, será adotado o método de exportação padrão (seções centralizadas) e a posição das seções transversais dos pilares será ajustada manualmente no Robot. A associação da malha de vigas e lajes da cobertura é assim preservada e os momentos fletores resultantes de excentricidades do pilar são levados em conta. Na guia “Geometria – Atributos Adicionais – Deslocamentos”, é possível definir no Robot a posição da seção transversal de barras em relação ao eixo analítico, conforme a Figura 5.36.

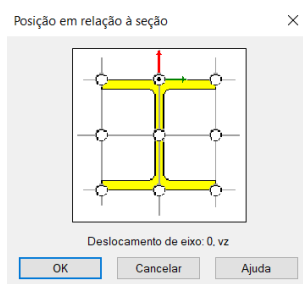


Figura 5.36 Configuração de posição da seção transversal no Robot. Fonte: Autor

5.1.3.4. Modelo final da estrutura no Robot

O modelo final da igreja construído com base no projeto, já com os devidos ajustes de seções de pilares, pode ser visualizado na Figura 5.37.

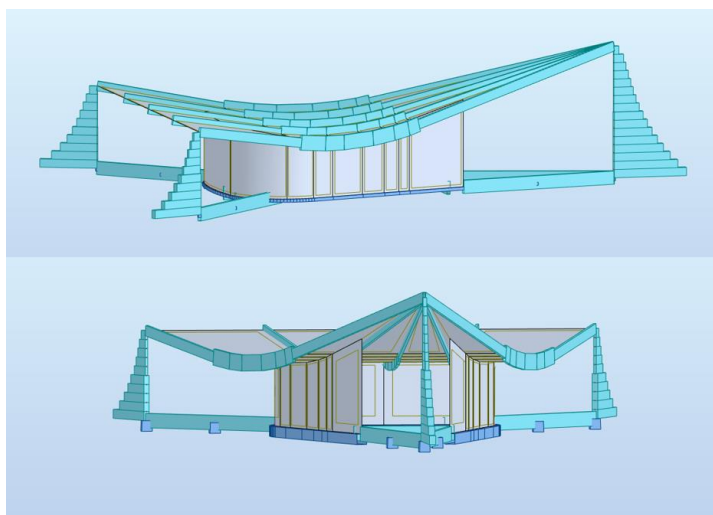


Figura 5.37 Representação do modelo analítico baseado em projeto final no Robot. Fonte: Autor

As Figuras 5.38, 5.39 e 5.40 ilustram respectivamente os diagramas de momentos fletores em y, a deformação da malha estrutural e mapas de deslocamentos das lajes de cobertura, julgados como representativos do comportamento estrutural da Igrejinha. Seus esforços são listados de forma mais detalhada posteriormente, na Tabela 5.2, para a comparação entre os modelos baseado em projeto e por nuvem de pontos.

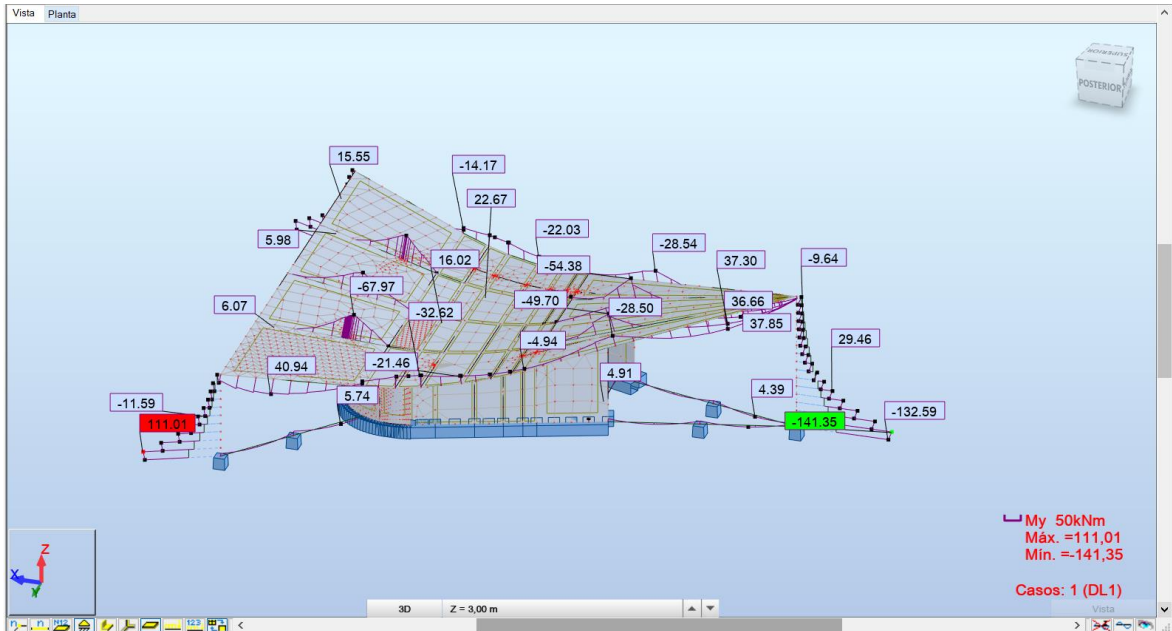


Figura 5.38 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y para o modelo final baseado em projeto. Fonte: Autor.

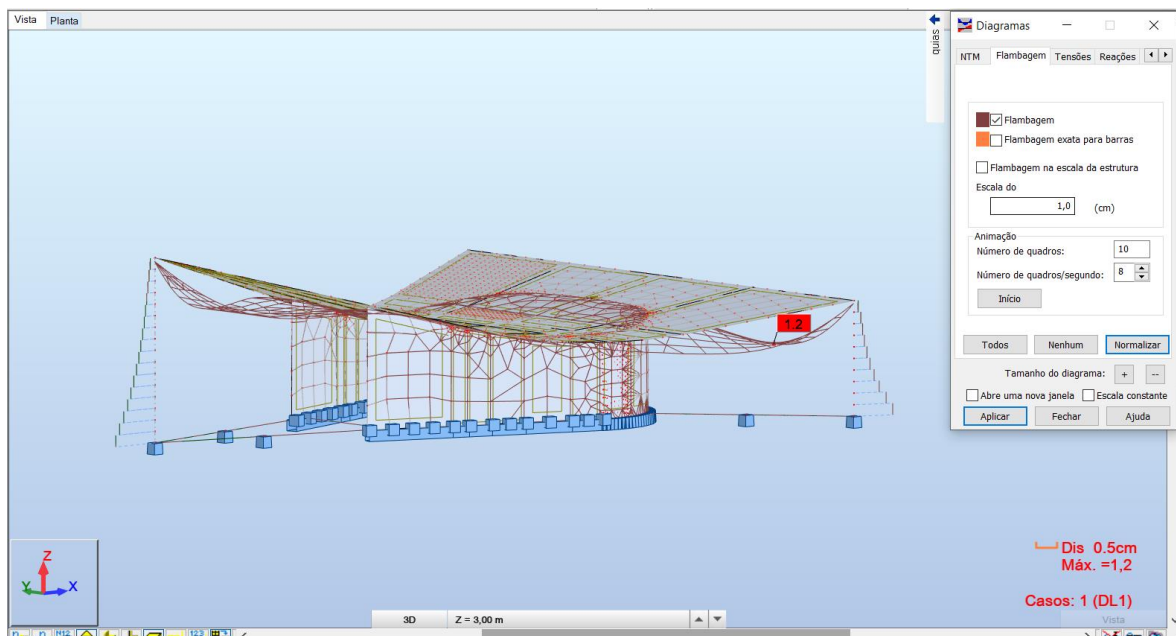


Figura 5.39 Representação da deformação de malha do modelo final baseado em projeto. Fonte: Autor.

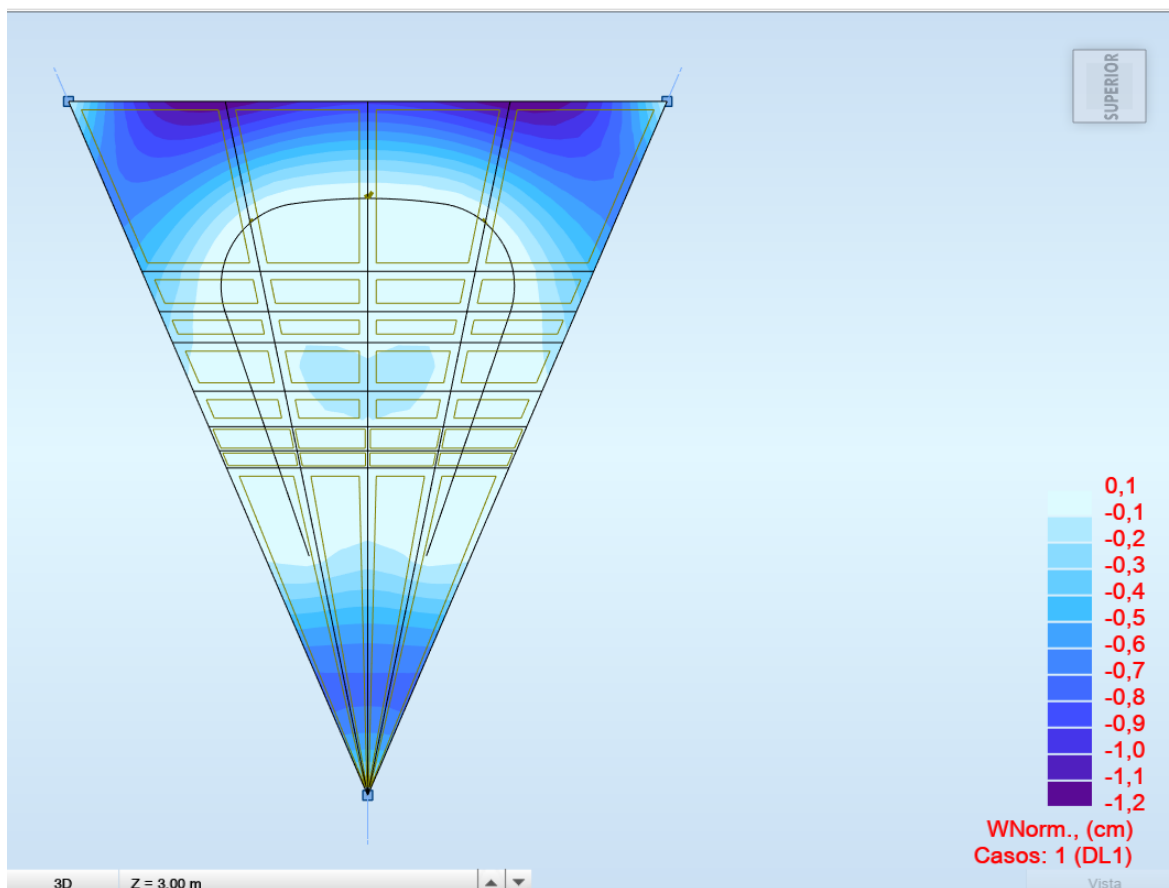


Figura 5.40 Mapa de deslocamentos das lajes de cobertura para o modelo final baseado em projeto. Fonte: Autor.

5.2. MODELO DE NUVEM DE PONTOS

A construção do modelo de nuvem de pontos ocorreu posteriormente ao modelo de projeto, de sorte que as etapas intermediárias (Modelos 1 e 2) não foram aplicadas. A mesma metodologia adotada para o modelo final de projeto foi empregada. Os elementos curvos (lajes e vigas de cobertura e pilares) foram segmentados em trechos retilíneos de menor dimensão e seção uniforme, com o objetivo de aproximar a geometria real da edificação sem a necessidade de configurações externas ao *software* de modelagem. Definiram-se segmentos de 50 cm de altura para os pilares e de 20 cm de altura para as lajes e vigas. As paredes estruturais tiveram sua projeção em planta preservada, inclusive as curvaturas. Sua extensão superior foi vinculada às lajes de cobertura.

Todos os elementos estruturais cujas dimensões podiam ser diretamente obtidas pela nuvem foram modelados com suas dimensões reais. A espessura das paredes estruturais foi mantida conforme o projeto - 12 cm, porém o seu desenvolvimento seguiu a linha central extraída da nuvem. A nuvem de pontos fornece somente a espessura da parede acabada, incluindo os respectivos sistemas de revestimento (reboco, argamassa de assentamento, cerâmicas etc.). Os elementos de fundação, que não podem ser obtidos pelo levantamento por serem subterrâneos, foram inteiramente baseados no projeto. Pequenos ajustes foram realizados para que a fundação se conectasse adequadamente aos componentes da superestrutura.

5.2.1. Nuvens de Pontos

Conforme mencionado no item 4.2, foram empregados dois métodos distintos para a composição da nuvem de pontos final: o escaneamento a laser terrestre e a fotogrametria aérea por drone.

5.2.1.1. Escaneamento a laser terrestre

A nuvem de pontos por escaneamento a laser terrestre foi disponibilizada ao autor pelo Grupo Flug, que já havia realizado o levantamento para um trabalho anterior (Referência). O equipamento empregado foi o “FARO® Focus Laser Scanners S70, [...] que gera 500 mil pontos por segundo, com precisão de 3mm para a distância de 10 metros, pegando uma esfera de raio de 70 metros. A nuvem carrega informação de coordenada, cor e intensidade.” Para cobrir a edificação como um todo, foram realizadas vinte varreduras em localizações distintas. As vinte nuvens de pontos foram então condensadas em uma única, a qual foi efetivamente importada para o Revit. Nas Figuras 5.41 e 5.42, é possível visualizar os pontos de alocação do aparelho e um exemplo de uma vista gerada por ele.



Figura 5.41 Locais de posicionamento do equipamento para varredura completa da edificação. Fonte: Autor, Grupo Flug.

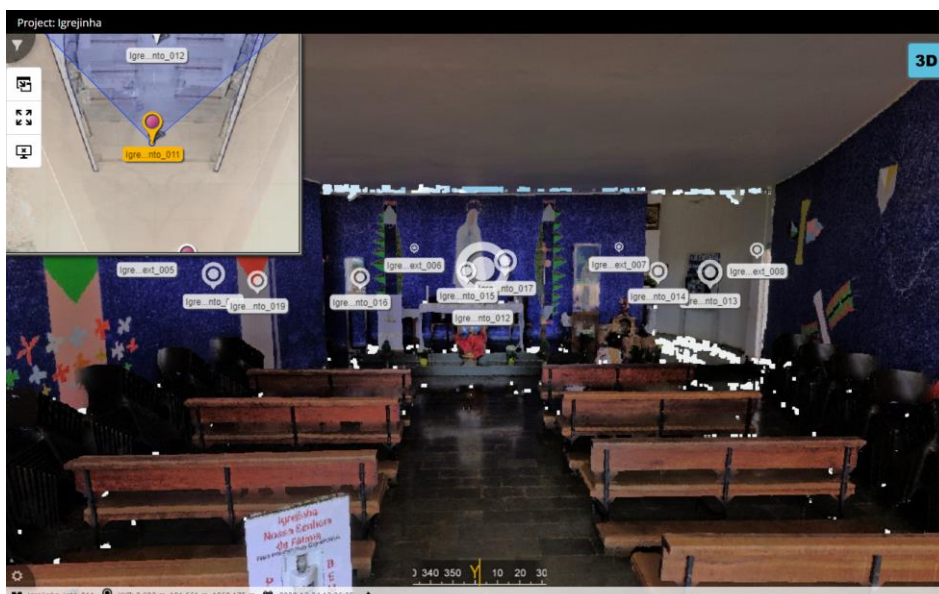


Figura 5.42 Mapa de deslocamentos das lajes de cobertura para o modelo final baseado em projeto. Fonte: Autor, Grupo Flug.

5.2.1.2. Aerofotogrametria com uso de drone

O levantamento por aerofotogrametria foi realizado posteriormente, em janeiro de 2022, com o uso de drone equipado com câmera de alta resolução. Ele ocorreu por volta das 10:30 da manhã, um horário em que a influência da projeção de sombras no resultado final é reduzida. A altura média de voo foi de 50 m, a fim de evitar quaisquer árvores existentes na proximidade. O drone percorreu a Igreja em diferentes direções, registrando um total de mais de 200 fotos de alta resolução. Os registros fotográficos foram posteriormente processados pelo *software* “PhotoScan” para criação da nuvem de pontos. O ortomosaico resultante do processamento pode ser visualizado na Figura 5.43 e o drone empregado está representado na Figura 5.44.

Esse processo foi necessário para a obtenção de informações relativas à cobertura da edificação. O escaneamento a laser terrestre não é capaz de fornecer, por exemplo, a espessura da laje de cobertura ou quaisquer informações sobre as três vigas invertidas centrais, que não podem ser visualizadas do plano térreo. A nuvem de pontos por aerofotogrametria, por outro lado, não contém dados relativos a elementos que não possam ser visualizados em uma vista elevada, como a delimitação dos ambientes internos ou o contorno da face inferior da laje de cobertura. A associação das duas técnicas proporciona uma representação completa da edificação.



Figura 5.43 Ortomosaico do levantamento da Igreja por aerofotogrametria. Fonte: Autor.



Figura 5.44 Drone empregado para o levantamento por aerofotogrametria. Fonte: Autor.

5.2.1.3. Associação das nuvens de pontos

As duas nuvens de pontos foram importadas separadamente para o Revit, sem serem condensadas em uma única. Isso se deu pelo fato de o georreferenciamento do equipamento de escaneamento ser ligeiramente diferente do georreferenciamento do drone, de forma que a sobreposição das nuvens não foi satisfatória. Todos os tratamentos prévios de nuvens de pontos foram realizados no *software* Autodesk® ReCap™, versão estudante. Como, para atingir o perfeito alinhamento, seriam necessários ajustes manuais, determinou-se que os ajustes seriam realizados no próprio *software* de modelagem. Assim, as nuvens poderiam ser ativadas ou desativadas separadamente conforme a necessidade do usuário.

Antes da importação, foram apenas realizadas limpezas básicas dos arquivos, como remoção dos elementos no entorno da edificação (árvores, passeios para pedestres etc.), que não são relevantes para a análise estrutural em si. Para o caso da nuvem de pontos por drone, foi mantida somente a cobertura da Igrejinha. No caso de elementos redundantes, captados por ambos os métodos – pilares, por exemplo –, foi dada preferência à nuvem de pontos por escaneamento a laser. Este é o método reconhecido como mais preciso pela literatura atualmente (seção 3.2.1.1.)

As nuvens de pontos finais, já importadas para o Revit e devidamente alinhadas, são apresentadas separadamente e sobrepostas pelas Figuras 5.45, 5.46 e 5.47. Verificou-se pequena disparidade de dimensões, como exemplificado pela Figura 5.48. A nuvem de pontos por aerofotogrametria, representada em cinza, exibe dimensões ligeiramente superiores, especialmente no sentido transversal. A diferença de largura média verificada foi de aproximadamente 10 cm.



Figura 5.45 Nuvem de pontos por escaneamento a laser terrestre importada para o Revit.
Fonte: Autor.



Figura 5.46 Nuvem de pontos por aerofotogrametria importada para o Revit. Fonte: Autor.



Figura 5.47 Sobreposição das nuvens de pontos. Fonte: Autor.

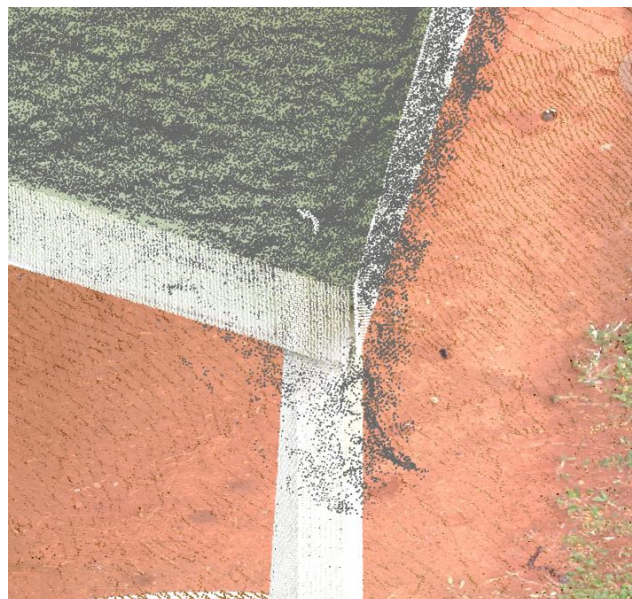


Figura 5.48 Detalhe da sobreposição das nuvens de pontos. Fonte: Autor.

5.2.2. Modelagem no Revit

Para a modelagem, foram utilizados recursos como cortes e configurações de faixas de vista para plantas baixas. Tais ferramentas permitem a exibição de porções ou planos específicos da nuvem de pontos. As Figura 5.49 e Figura 5.50 apresentam uma faixa de vista do térreo entre as alturas +1,10 m e +1,20 m e um corte vertical voltado para o interior da Igrejinha, respectivamente. A profundidade do corte também pode ser ajustada, mostrando uma faixa mais estreita (como a da Figura 5.49) ou mais ampla da nuvem.

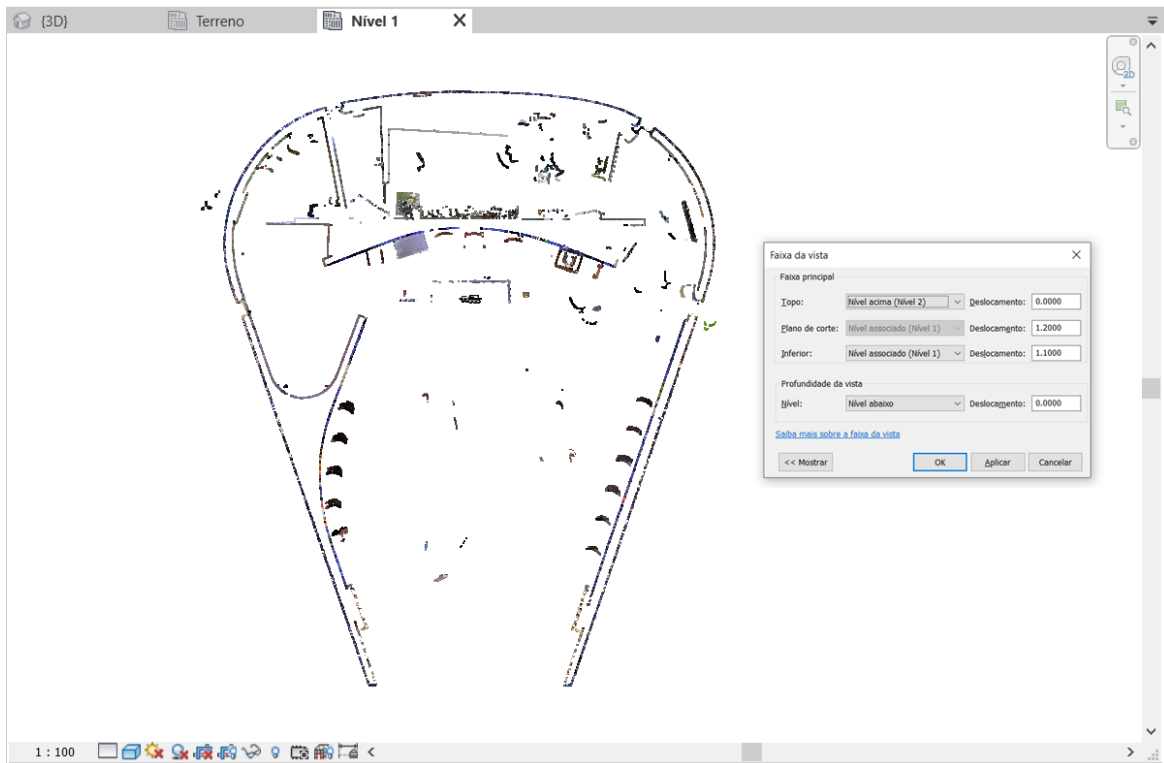


Figura 5.49 Faixa de vista do térreo para as nuvens de pontos entre as alturas +1,10 m e +1,20 m. Fonte: Autor.

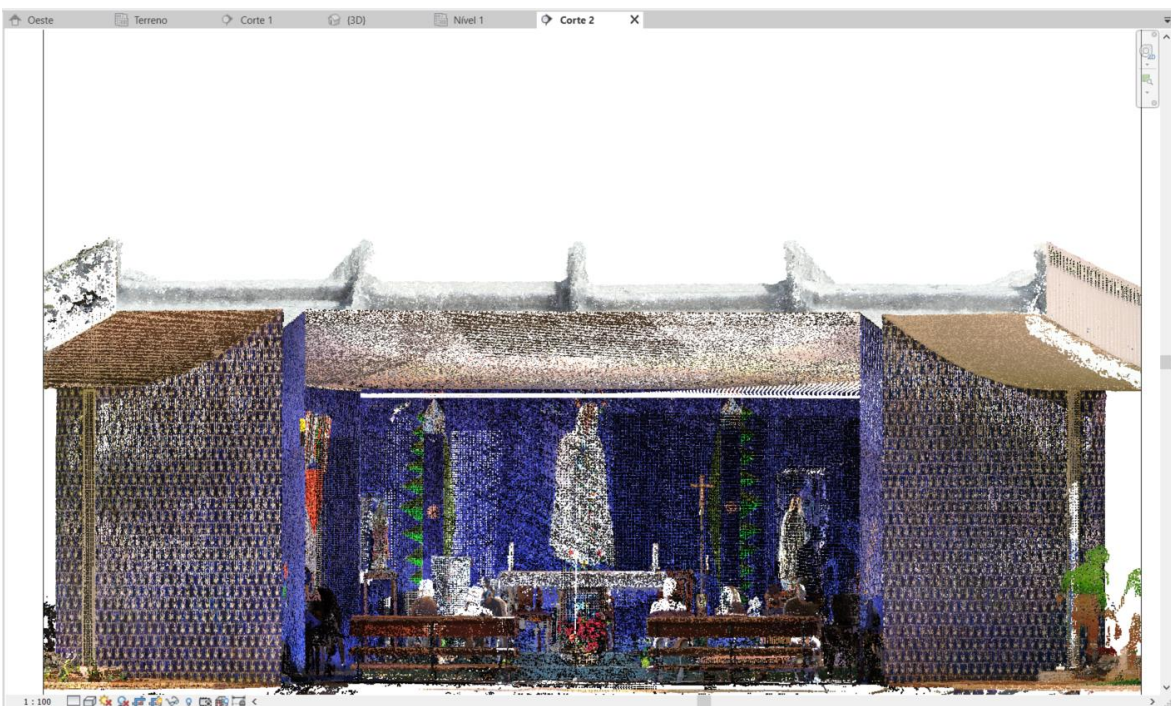


Figura 5.50 Corte vertical das nuvens de pontos. Fonte: Autor.

Os elementos estruturais são então inseridos de forma a se enquadrar da melhor maneira possível na vista da nuvem. A Figura 5.51 exemplifica a modelagem das paredes, empregando-se a mesma vista da Figura 5.49. Vale ressaltar que qualquer modelagem baseada em nuvens de pontos envolve determinado nível de perda de informação. Por maior que seja a quantidade de detalhes adicionada ao modelo, determinadas nuances das

edificações reais captadas pelos aparelhos não serão passíveis de serem incorporadas. Um exemplo é a variação da espessura de paredes ou outros componentes similares.

Para o estudo de caso em questão, os mesmos segmentos definidos para o modelo baseado em projeto apresentarão seções transversais uniformes. Tal simplificação muitas vezes não corresponde ao que se constata na nuvem de pontos. Buscou-se, contudo, adotar as dimensões mais representativas e que melhor se adequassem às características da edificação real. Ademais, não é esperado que mudanças milimétricas na geometria de elementos causem diferenças significativas na análise estrutural.

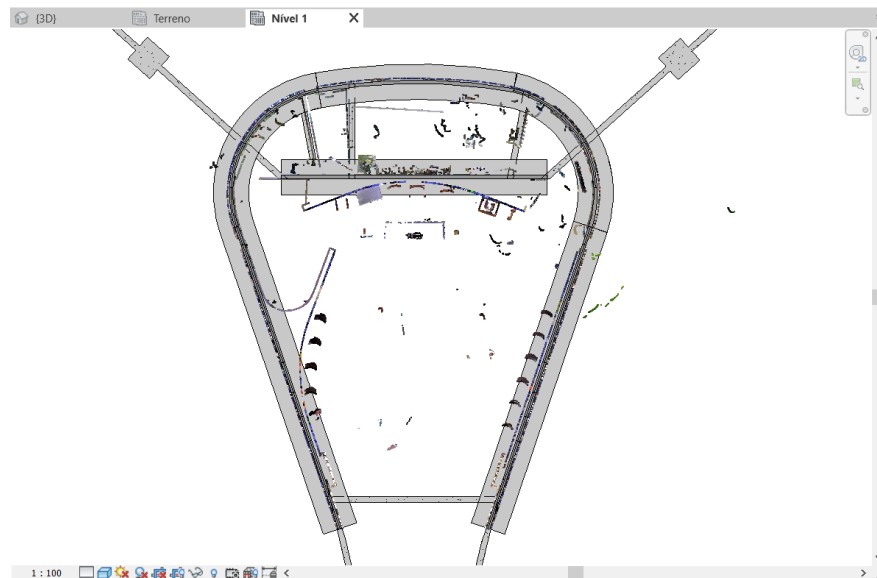


Figura 5.51 Sobreposição dos elementos físicos de modelo e da nuvem de pontos para uma faixa de vista do nível térreo. Fonte: Autor.

O modelo final baseado nas nuvens de pontos pode ser visualizado na Figura 5.52, com e sem sobreposição com a nuvem de pontos. Dentre as disparidades mais visíveis, destacam-se as extremidades das vigas de cobertura, que, pela adoção de uma altura média em seus trechos retilíneos, despontam nos trechos em que a altura real atinge o seu valor mínimo. Despontam também da nuvem de pontos as quinas dos segmentos retangulares dos pilares, os quais, a fim de manter a projeção em planta de base, tiveram suas respectivas seções extrudadas para cima. Tais simplificações, conforme anteriormente descritas na seção XX, foram necessárias para a interpretação do *software* de análise sem a necessidade de configurações externas ao *software* de modelagem, que frequentemente podem se relevar complexas.

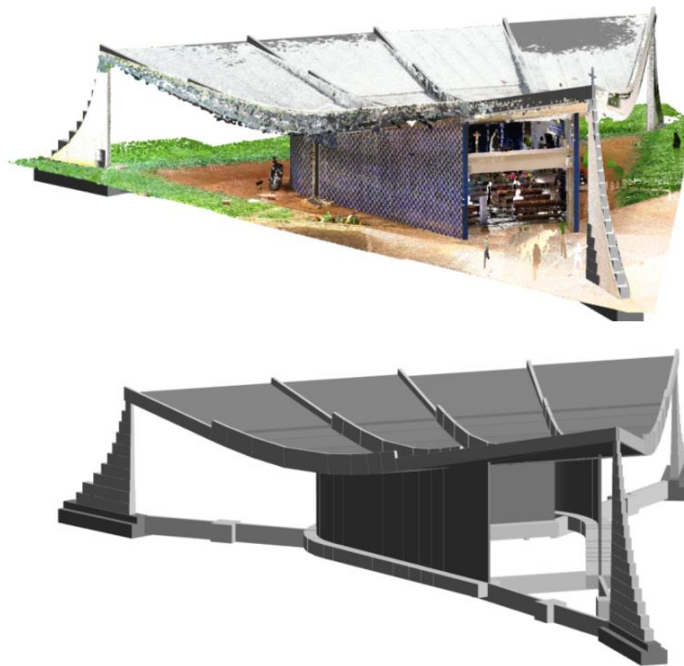


Figura 5.52 Modelo físico final por nuvem de pontos. Fonte: Autor.

5.2.3. Análise Estrutural

A estrutura foi então exportada para o Robot Structural Analysis. O método de exportação empregado foi o mesmo definido na seção 5.1.3.4, em que as configurações padrão são mantidas e os deslocamentos das seções transversais dos pilares são ajustados manualmente. O cálculo da estrutura resultou nos seguintes avisos:

- Nó isolado
- Malha incoerente em arestas
- A coesão do modelo de cálculo foi fornecida pela definição das restrições cinemáticas nos pontos incoerentes da malha de elementos finitos
- As condições de apoio nos nós não são compatíveis
- O elemento não está atribuído a um andar
- Os nós isolados foram encontrados
- Um nó isolado com atributos adicionais foi encontrado
- A instabilidade (tipo 3) na direção UX do nó 127

Em comparação com o modelo final baseado em projeto, três avisos a mais foram emitidos. Depreende-se que, além de geometrias complexas, um grande número de variações dimensionais entre os elementos associados e a perda de simetria perfeita da edificação são outros aspectos que dificultam a interpretação automática da estrutura pelo Robot. Os nós isolados foram muito similares aos do Modelo 1, baseado em projeto (Figura 5.20). Os pontos de malha incoerente corresponderam a encontros de painéis de lajes e vigas, assim como do apoio da Parede 1 para as vigas V2 e V4. As Figuras 5.53, 5.54 e 5.55 ilustram as regiões a que os avisos se referem.

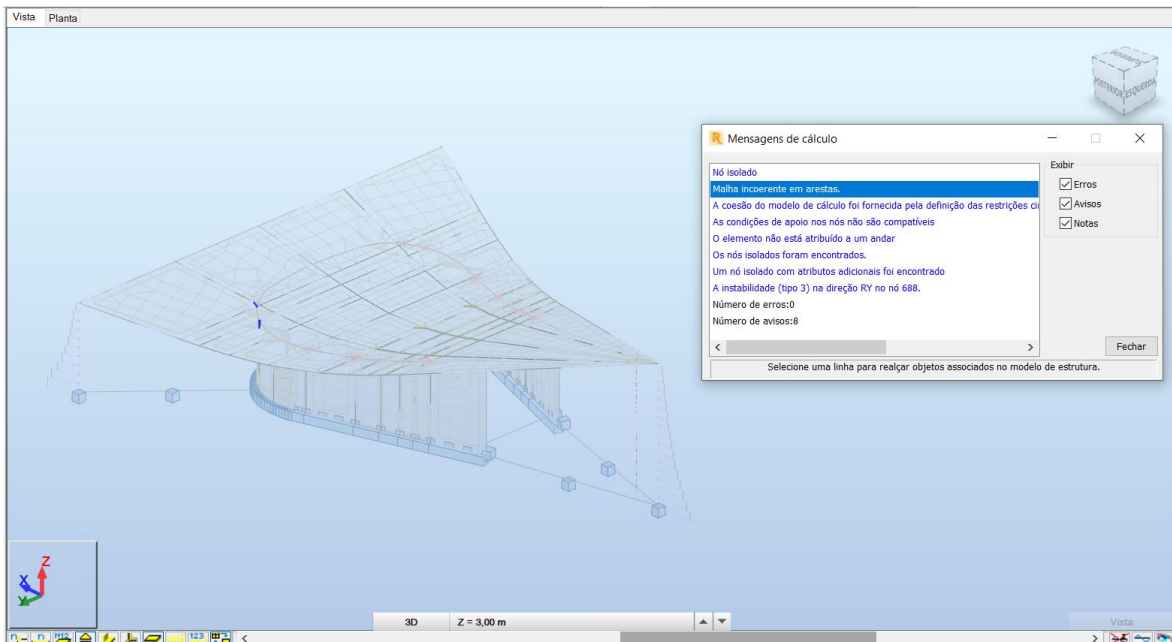


Figura 5.53 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do modelo por nuvem de pontos pelo Robot Structural Analysis: “Malha incoerente em arestas”. Fonte: Autor.

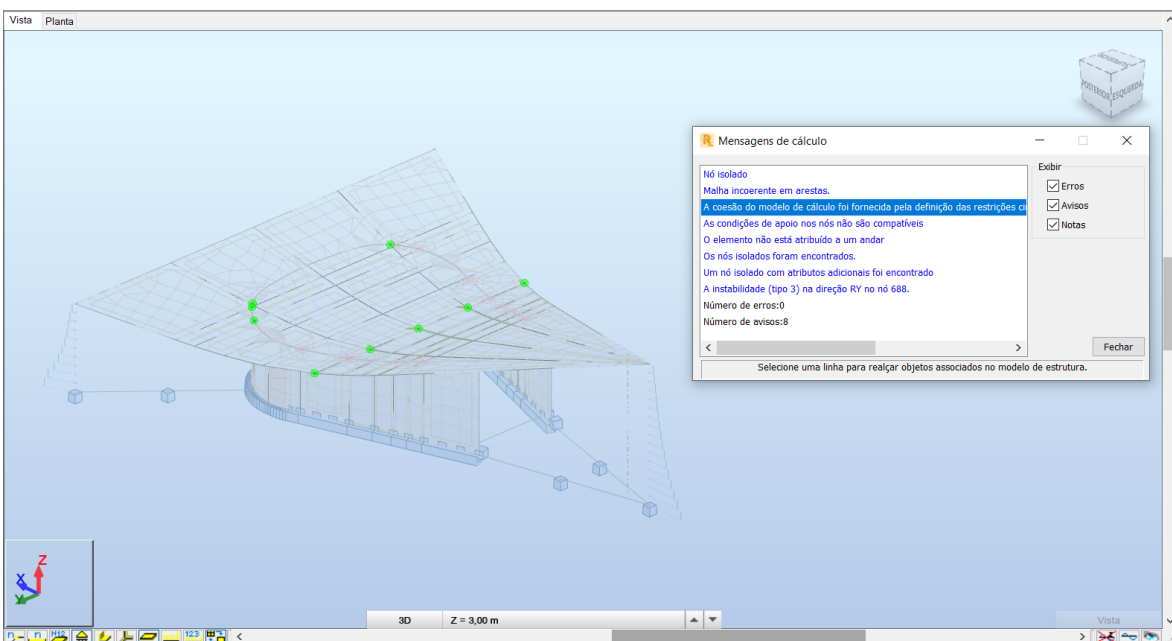


Figura 5.54 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do modelo por nuvem de pontos pelo Robot Structural Analysis: “A coesão do modelo de cálculo foi fornecida pela definição das restrições cinemáticas nos pontos incoerentes da malha de elementos finitos”. Fonte: Autor.

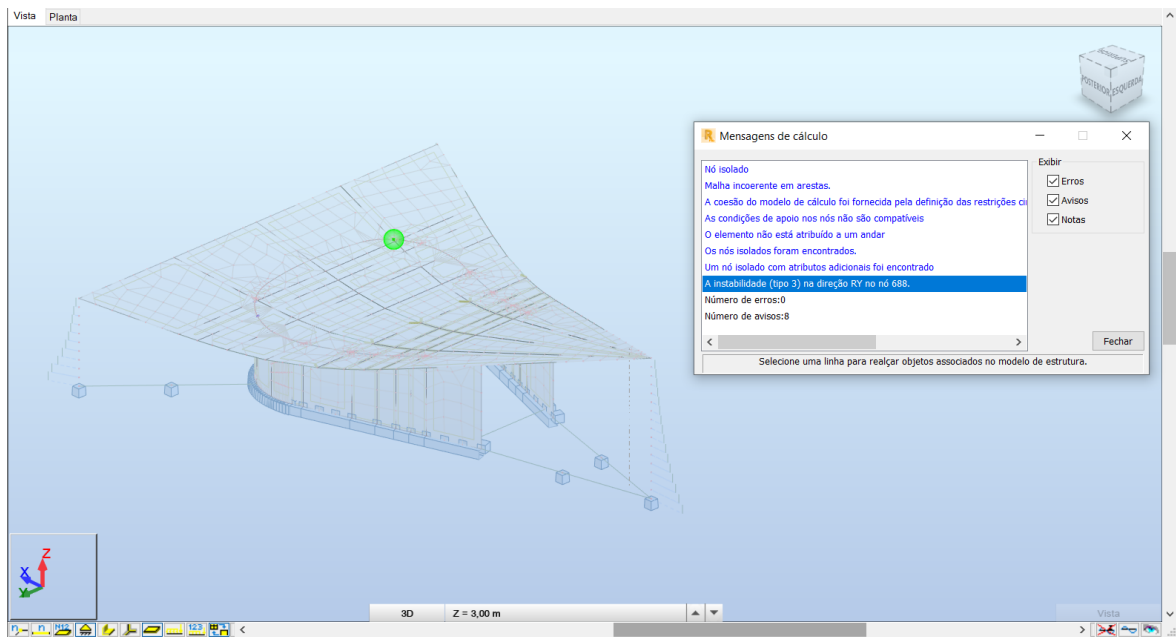


Figura 5.55 Aviso gerado após o cálculo da estrutura do modelo por nuvem de pontos pelo Robot Structural Analysis: “A instabilidade (tipo 3) na direção UX do nó 127”. Fonte: Autor.

As Figuras 5.56, 5.57 e 5.58 ilustram respectivamente os diagramas de momentos fletores em y, a deformação da malha estrutural e mapas de deslocamentos das lajes de cobertura, julgados como representativos do comportamento estrutural da Igrejinha. Seus esforços são listados de forma mais detalhada posteriormente, na Tabela 5.2, para a comparação entre os modelos.

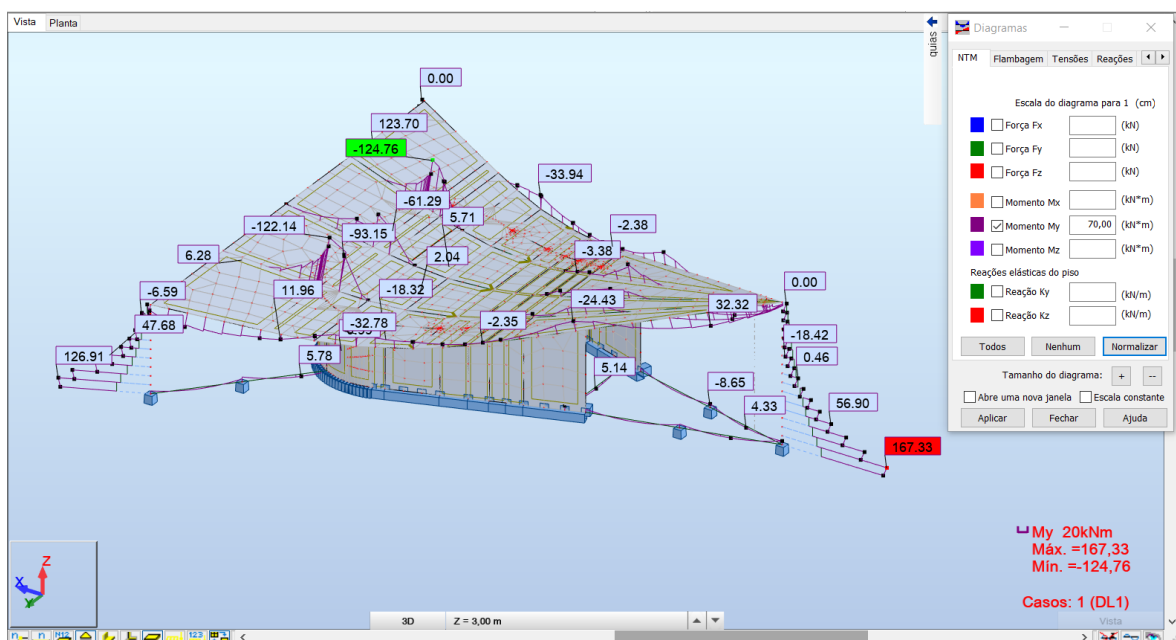


Figura 5.56 Representação do diagrama de momentos fletores ao redor do eixo y para o modelo final por nuvem de pontos. Fonte: Autor.

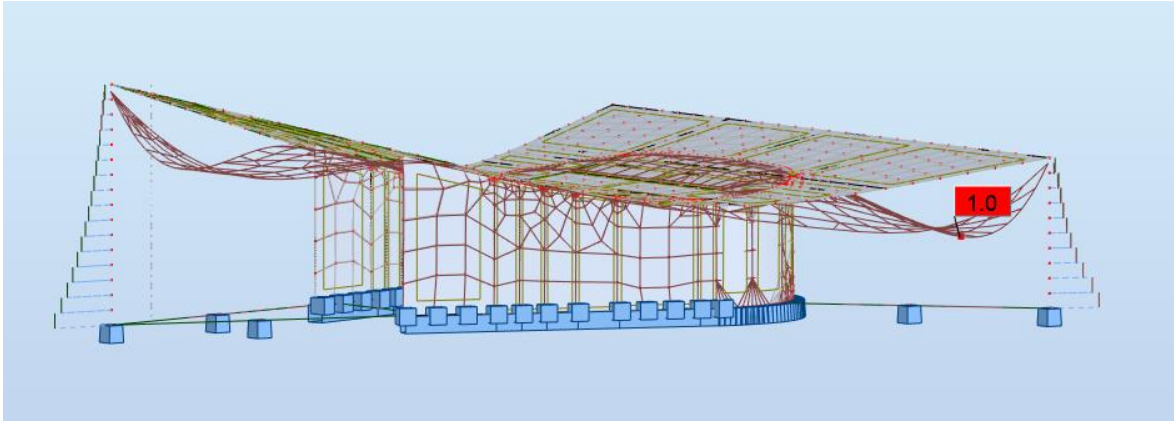


Figura 5.57 Representação da deformação de malha do modelo final por nuvem de pontos.
Fonte: Autor.

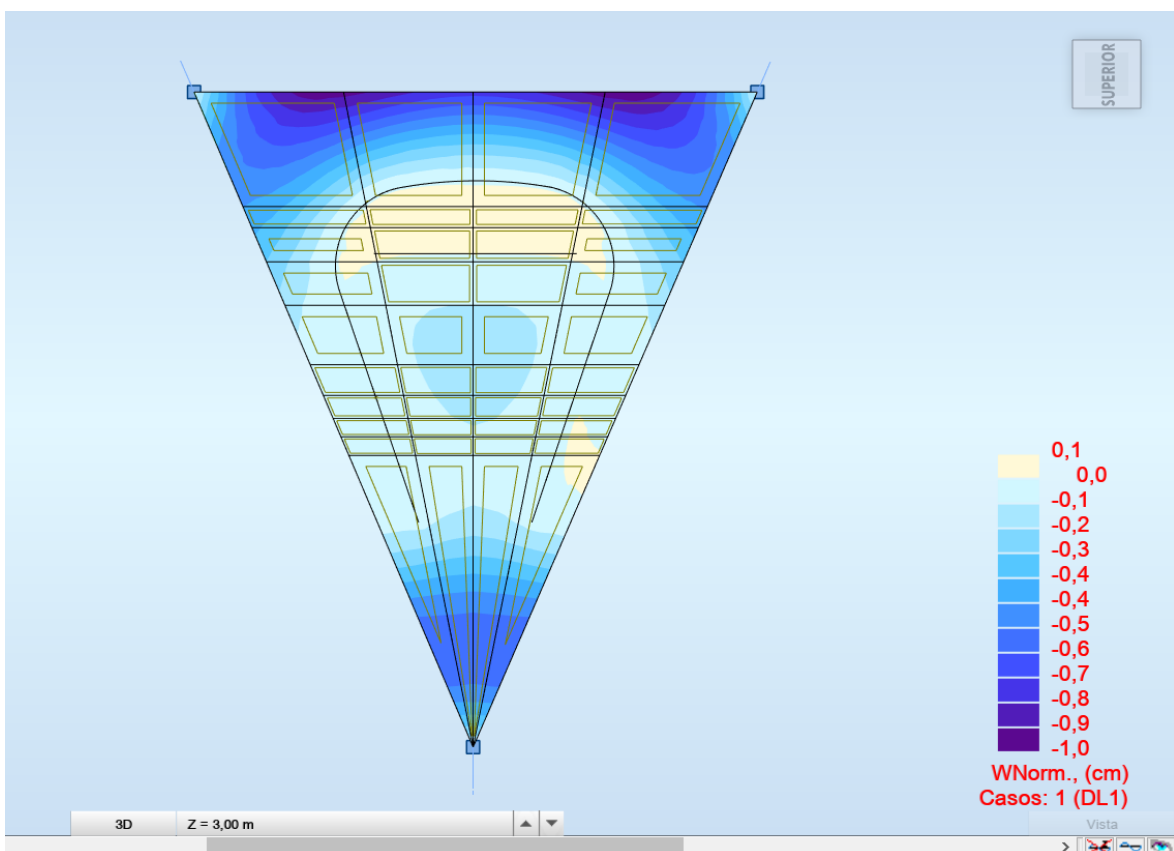


Figura 5.58 Mapa de deslocamentos das lajes de cobertura para o modelo final por nuvem de pontos. Fonte: Autor.

5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS

5.3.1. Comparação Dimensional

Em comparação com as prescrições de projeto, poucas diferenças de dimensões foram identificadas na edificação real. O comprimento longitudinal real constatado foi de 29,12 m, a largura, 25,05 m (29 x 25 m em projeto). As alturas previstas para as extremidades da laje de cobertura, de 8 m e 5m, corresponderam efetivamente às alturas dos pilares, sendo acrescida a espessura da laje para determinação da altura total (Figuras 5.59 e 5.60). Os

pilares P2 e P3 encontram-se em nível ligeiramente superior ao pilar P1, aproximadamente + 0,20 m, porém foi mantida a referência do nível 0,00 m para a determinação de sua extensão superior (+ 5,00 m). As faces verticais dos pilares afiguram-se perfeitamente apuradas. A base do pilar P1 apresenta dimensões idênticas às especificadas. A base dos pilares P2 e P3 apresentam comprimento ligeiramente menor, de 3,38 m em comparação aos 3,50 m originais, provavelmente com o objetivo de manter a mesma curvatura apesar da diferença de nível.

Em relação à cobertura, o traçado das vigas invertidas é praticamente simétrico em relação ao eixo central, porém pequenas variações foram observadas. A Figura 5.61 apresenta a comparação dos eixos das vigas V1 e V2 espelhados para as vigas V4 e V5. A altura das vigas no trecho curvo é de 92 cm, somente 2 cm superior à medida de projeto. Quanto à largura, a nuvem de pontos por drone apresenta certa oscilação de geometria e dimensão dependendo do trecho, mas os 15 cm especificados em projeto constituem um valor representativo adequado. As espessuras médias das lajes foram constatadas como 32,5 cm no trecho próximo ao pilar P1, 20 cm no trecho curvo central (em projeto, eram especificados 10 cm) e 30 cm no trecho final, próximo aos pilares P2 e P3.

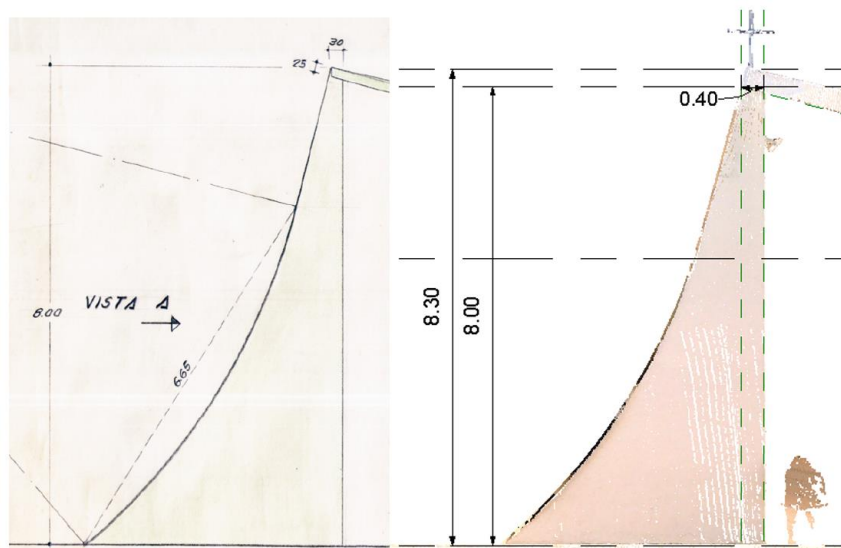


Figura 5.59 Comparação entre as dimensões de projeto e as extraídas da nuvem de pontos para o pilar P1. Fonte: Autor.

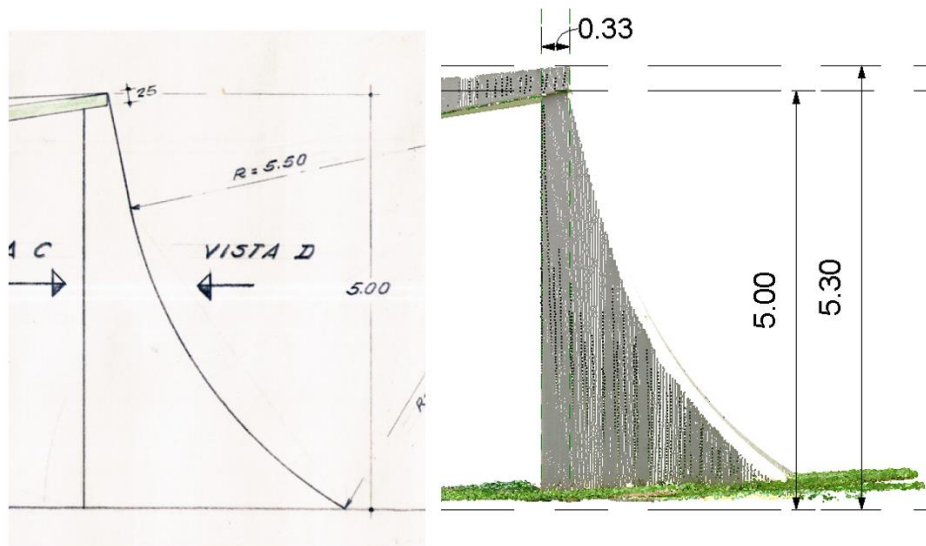


Figura 5.60 Comparação entre as dimensões de projeto e as extraídas da nuvem de pontos para o pilar P2. Fonte: Autor.

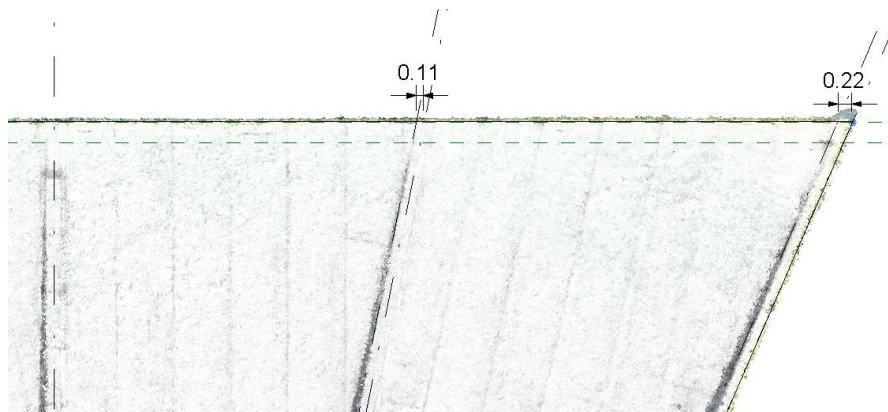


Figura 5.61 Verificação da simetria das vigas de cobertura. Fonte: Autor.

Observa-se que, com exceção de certos detalhes, o projeto foi adequadamente seguido para a construção da Igreja Nossa Senhora de Fátima. É notável a correspondência de dimensões e de formas, inclusive com relação a curvaturas de elementos. Para uma comparação visual, os modelos resultantes da análise de projeto e da nuvem de pontos foram sobrepostos, conforme as Figura 5.62 e Figura 5.63. Eles estão representados em estrutura de arames e em formas sólidas, respectivamente. Verifica-se substancial similaridade entre os modelos.

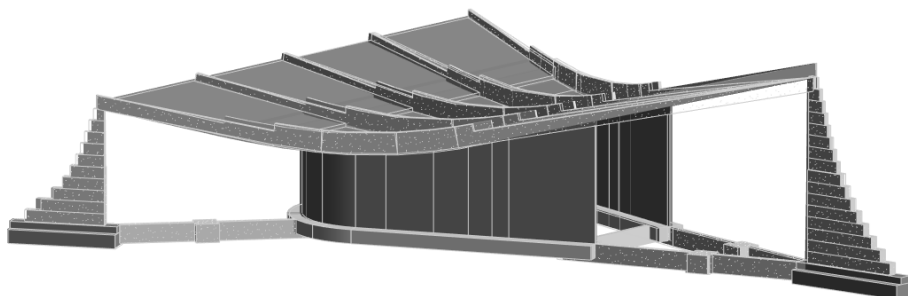


Figura 5.62 Sobreposição dos modelos de projeto e por nuvem de pontos em vista 3D. Fonte: Autor.

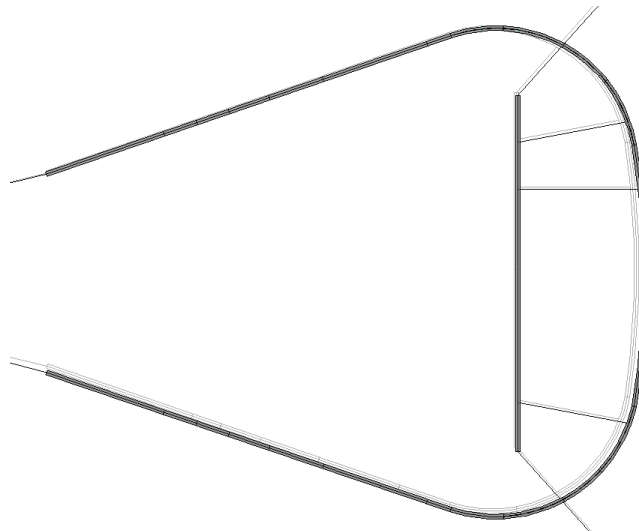


Figura 5.63 Sobreposição das paredes estruturais do modelos de projeto e por nuvem de pontos em planta. Fonte: Autor.

5.3.2. Comparação da Análise Estrutural

Uma vez averiguada a correspondência física entre os dois métodos de modelagem, foram comparados os resultados da análise estrutural. A priori, é esperado um nível igualmente elevado de similaridade. A Figura 5.64 ilustra a discretização automática do Robot para o modelo de projeto, à esquerda, e para o modelo de nuvem de pontos, à direita. Curiosamente, a malha resultante para o modelo de projeto apresentou maior grau de assimetria, apesar de o modelo físico ser perfeitamente simétrico. Nota-se que determinadas regiões apresentaram um refinamento automático da malha, como pontos de apoio da laje sobre as paredes estruturais. A Tabela 5.2 condensa valores representativos da análise estrutural e do esforço computacional de processamento de ambos.

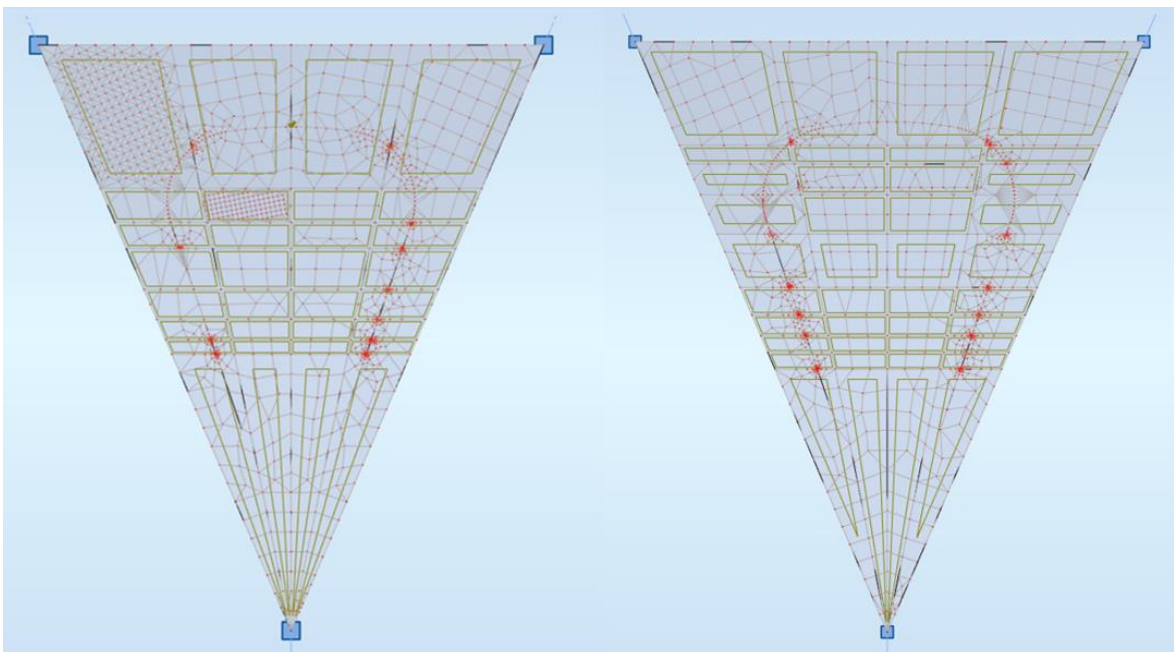


Figura 5.64 Discretização da malha de elementos finitos para o modelo de projeto, à esquerda, e para o modelo de nuvem de pontos, à direita. Fonte: Autor.

Tabela 5.2 Comparação entre os resultados dos modelos de projeto e de nuvem de pontos.
Fonte: Autor.

	Projeto	Nuvem de Pontos	Diferença
Tempo de exportação	23 s	30 s	30%
Tempo de processamento	9 s	12 s	33%
Número de avisos gerados	5	8	60%
Fz - P1	232,41 kN	251,20 kN	8%
Fz - P2	135,54 kN	154,32 kN	14%
Fz - P3	135,82 kN	153,30 kN	13%
My - Base P1	328,44 kNm	356,80 kNm	9%
My - Base P2	-99,86 kNm	-108,86 kNm	9%
My - Base P3	-99,74 kNm	-107,22 kNm	7%
Mx - Base P1	0,01 kNm	-0,07 kNm	800%
Mx - Base P2	42,12 kNm	46,51 kNm	10%
Mx - Base P3	-42,09 kNm	-45,73 kNm	9%
My Máx. - Lajes de Cobertura	61,10 kNm	86,56 kNm	42%
My Min. - Lajes de Cobertura	-18,90 kNm	-31,48 kNm	67%
Mx Máx. - Lajes de Cobertura	63,93 kNm	76,50 kNm	20%
Mx Min. - Lajes de Cobertura	-33,50 kNm	-50,65 kNm	51%
My Máx. - V1, V5	40,94 kNm	47,68 kN	16%
My Min. - V1, V5	-30,08 kNm	-33,94 kN	13%
My Máx. - V2 - V4	37,87 kNm	32,62 kNm	14%
My Min. - V2 - V4	-67,97 kNm	-124,76 kNm	84%
Vz Máx. - V1 - V5	36,26 kN	117,00 kN	223%
Vz Min. - V1 - V5	-36,18 kN	-71,95 kN	99%
Deslocamento Máx.	1,20 cm	1,00 cm	17%

As divergências de valores de esforços internos calculados para os dois modelos revelaram-se significativas. Dois processos de modelagem idênticos em seu procedimento e com pequena variação na geometria final da edificação resultaram em variações de 20% a 67% de magnitude de momentos fletores atuantes nas lajes de cobertura, de 84% no momento negativo crítico das vigas V2 a V4 e de 99% e 223% para os esforços cortantes críticos nas vigas da cobertura. Verifica-se, pelas Figuras 5.54, 5.55 e 5.56, que há correspondência direta de pontos de flutuação de valores de esforços e de erros identificados na malha. A maior variação, de 800%, não foi julgada como relevante, devido ao momento fletor ao redor do eixo x na base do pilar P1 ser praticamente nulo em ambos os casos.

Já outros esforços apresentaram variações admissíveis, da ordem de grandeza de 10%, como as reações de apoio dos pilares e os demais momentos fletores críticos das vigas de cobertura. Apesar de a magnitude dos valores ter diferido, o comportamento global da estrutura foi semelhante nos dois casos, com representações de malha deformada e formatos de diagramas de esforços congruentes. Ao se comparar os resultados obtidos com os de Inojosa (2010), ilustrados nas Figuras 4.5 e 5.65, observa-se elevada similaridade do comportamento global da estrutura.

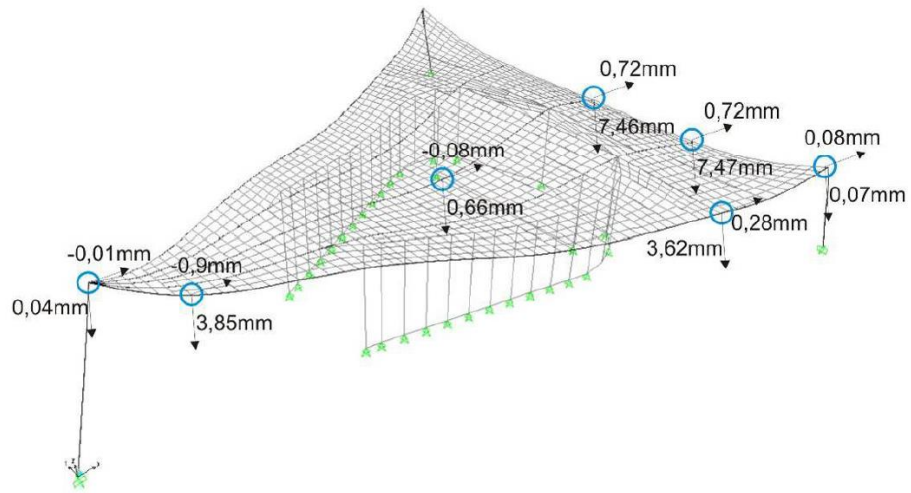


Figura 5.65 Deformações da estrutura da Igrejinha pelo Programa SAP 2000. Fonte: INOJOSA, 2010, p.116.

6. CONCLUSÕES

A sobreposição dos modelos de projeto e de nuvens de pontos, assim como a confrontação de medidas representativas, evidenciaram elevado nível de correspondência entre a edificação projetada e seu estado real atual. Diferenças pontuais foram identificadas, como alturas distintas nas extremidades da laje de cobertura, pequena assimetria das vigas de cobertura e desigualdade do traçado das paredes estruturais curvas em aproximadamente uma vez a sua espessura. De maneira geral, a edificação real apresentou-se ligeiramente maior que as suas especificações de projeto.

Verificada a similaridade dimensional, foram comparados os resultados da análise estrutural a partir de parâmetros representativos. Em termos de esforço computacional, não se observaram diferenças expressivas, o processamento ocorreu de maneira veloz. A criação automática da malha de elementos finitos para o modelo de nuvem de pontos gerou três avisos a mais que o modelo de projeto. Aliada ao aumento do número de avisos durante o desenvolvimento dos modelos de projeto simplificados, infere-se que a atribuição de graus de complexidade à estrutura dificulta sua interpretação automática pelo Robot.

Os resultados apresentaram, para determinados parâmetros, diferenças significativas entre si. Destacam-se como mais sensíveis a variações os momentos fletores das lajes de cobertura, o momento mínimo das vigas centrais invertidas e sobretudo o esforço cortante nas vigas invertidas (o esforço cortante foi igualmente o mais sensível na comparação de métodos de exportação). Já outros parâmetros apresentaram diferenças mais brandas entre os modelos, como as reações de apoio dos pilares, os demais momentos críticos das vigas de cobertura e o valor máximo de deslocamentos.

Concluiu-se, levando em conta a similaridade dos modelos físicos, que as características próprias do processo de modelagem no *software* arquitetônico influenciam de forma relevante o resultado final fornecido pelo *software* de análise, sobretudo quando erros são verificados durante o processamento da estrutura. A correspondência de pontos incoerentes da malha de elementos finitos com a manifestação de valores de esforços distintos é uma forte evidência de que a discretização automática pelo *software* de análise interfere nos cálculos. O resultado deve, portanto, ser analisado de forma crítica pelo usuário. Apesar da variação significativa de determinados esforços internos, o comportamento global da edificação permaneceu o mesmo, com representações de deslocamentos e formatos de diagramas similares.

Portanto, caso a intenção da análise seja a identificação de regiões críticas da estrutura e a compreensão das suas características e funcionamento de uma maneira geral, a metodologia adotada neste trabalho mostrou-se adequada. Caso se deseje, entretanto, obter esforços atuantes, calcular deslocamentos e avaliar a capacidade resistente de elementos estruturais de maneira precisa, recomenda-se que sejam aplicados procedimentos adicionais. Estes podem partir de um simples aperfeiçoamento da malha de elementos finitos gerada automaticamente pelo *software* de cálculo até a realização de ensaios elaborados, como provas de carga.

Destaque-se que, neste trabalho, apenas se fez uso das ferramentas nativas dos *softwares* selecionados, não tendo sido exploradas possibilidades de aperfeiçoamento do modelo estrutural no próprio Robot Structural Analysis. Verificou-se igualmente que a precisão propiciada pelas nuvens de pontos não foi plenamente desfrutada, uma vez que simplificações de seções e geometrias se revelaram necessárias. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se que sejam definidas metodologias que possibilitem a conversão automática de geometrias complexas do modelo físico para um modelo discreto de análise, com menos suscetibilidade a pequenas variações dimensionais. Um modelo mais

preciso da geometria da Igrejinha pode igualmente ser construído para validação dos parâmetros calculados, que inevitavelmente resultaram de modelos com certo grau de simplificação.

Considerando a extrapolação da metodologia adotada para demais edificações históricas, alguns pontos devem ser levantados. Primeiramente, a dificuldade de modelagem de elementos estruturais de geometria complexa que sejam prontamente interpretados pelo *software* de análise pode inviabilizar uma representação acurada da estrutura de construções de maior proporção que a Igrejinha, na qual a segmentação manual de elementos curvos foi factível. É reforçada, portanto, a necessidade de se estudarem maneiras de criar modelos de cálculo diretamente a partir de elementos físicos de geometria inusual. É verificada também a insuficiência das ferramentas nativas dos *softwares* selecionados para realizar tal tarefa.

Em segundo lugar, muitos monumentos históricos não possuem qualquer registro de seus sistemas estruturais. Considerou-se o comportamento global da estrutura modelada pelas nuvens de pontos como apropriado, validando o emprego da metodologia exposta para casos em que a edificação seja levantada sem informações de projeto e elevada precisão de valores de esforços não seja exigida. Em monumentos em que a estrutura não seja visualmente identificável, métodos adicionais de investigação devem ser adotados, os quais se encontram fora do escopo deste trabalho.

A despeito das ressalvas apresentadas, a possibilidade de converter uma captura precisa da realidade em um modelo paramétrico, e desse modelo derivar-se um modelo estrutural, representa um grande avanço para a documentação e para análise de edificações históricas. Efetivamente, a própria documentação se torna fonte direta de modelos de análise, centralizando informações e possibilitando o seu uso de maneiras nunca antes vislumbradas. Esse processo possibilita uma base de dados de gestão contínua aliada à representação visual tridimensional do patrimônio histórico, otimizando o desenvolvimento de inventários e da aplicação de informações para fins de conservação do patrimônio.

Apreciando os conceitos de HBIM expostos ao longo deste trabalho, tem-se que a análise estrutural é uma de numerosas possibilidades da modelagem gráfica paramétrica de edificações históricas. A integração de representações estruturais com o modelo arquitetônico de maneira precisa é uma matéria ainda em desenvolvimento, porém de grande interesse e valia para a preservação de construções. Outras análises de engenharia e usos BIM podem ainda ser incorporados, enriquecendo o modelo como um todo. O aprimoramento de modelos HBIM apresenta elevado potencial de alavancar o processo de documentação, operação e manutenção do patrimônio histórico edificado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBATE, E.; INVERNIZZI, S.; SPANÒ, A. HBIM parametric modelling from clouds to perform structural analyses based on finite elements: a case study on a parabolic concrete vault. *Applied Geomatics*, 2020.
- ABDELHAMID, T. G. Digital Techniques for Cultural Heritage and Artifacts Recording. *Resourceedings*, v. 2, n. 2, p. 72, 2019.
- ALMEIDA, A.S. HBIM – Modelagem de informação para preservação de patrimônio. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 82p, 2021.
- ANIL, E. B. et al. Assessment of the quality of as-is building information models generated from point clouds using deviation analysis. *Three-Dimensional Imaging, Interaction, and Measurement*, v. 7864, n. May 2014, p. 78640F, 2011.
- ARAKAKI, S. R. Igreja Católica de Superquadra: origens da concepção arquitetônica. Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. 184 p., 2012.
- ARAKAKI, S. R.; AZAMBUJA, E. B. DE C.; MORALES SÁNCHEZ, J. M. Forma arquitetônica e função estrutural da Igreja Nossa Senhora de Fátima em Brasília. *Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo*, n. 15, p. 63–70, 2015.
- ARAUJO, C. et al. Verificação de segurança e dimensionamento de reforço em fibra de carbono em estrutura de concreto armado. p. 36–53, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: Brasil. ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: Brasil. ABNT, 2019.
- AUTODESK INC. Integrating Autodesk Revit, Revit Structure, and Robot Structural Analysis Professional. p. 1–29, 2014.

- BANFI, F. et al. Historic bim: A new repository for structural health monitoring. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, v. 42, n. 5W1, p. 269–274, 2017.
- BARAZZETTI, L. et al. HBIM and augmented information: Towards a wider user community of image and range-based reconstructions. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, v. 40, n. 5W7, p. 35–42, 2015.
- BARBOSA, B.; VIEIRA, K. H-BIM no controle e avaliação do Patrimônio Histórico : Revisão Bibliográfica. v. 25, p. 13–24, 2021.
- BRUMANA, R. et al. HBIM challenge among the paradigm of complexity, tools and preservation: The basilica Di collemaggio 8 years after the earthquake (L’aquila). International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, v. 42, n. 2W5, p. 97–104, 2017.
- BURCU AKINCI, FRANK BOUKAMP, CHRIS GORDON, DANIEL HUBER, CATHERINE LYONS, K. P. A Formalism for Utilization of Sensor Systems and Integrated Project Models for Active Construction Quality Control. p. 1–25, 2006.
- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Fundamentos BIM - Parte 1: Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras. Brasília: CBIC, 2016.
- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Colaboração e integração BIM - Parte 3: Implementação do BIM para Construtoras e Incorporadoras. Brasília: CBIC, 2016.
- CARVALHO, ROBERTO CHUST. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado : segundo a NBR 6118:2014. 4 ed. 415 p., 2017.
- CIC GROUP. BIM Project Execution Plan Guide. CIC Group The Pennsylvania State University, v. 53, 160 p., 2010.
- COGIMA, C. K. et al. Scan-to-HBIM aplicado à igreja da Pampulha de Oscar Niemeyer. Gestão & Tecnologia de Projetos, v. 15, n. 1, p. 117–134, 2020.

- CONTI, A. et al. HBIM for the preservation of a historic infrastructure: the Carlo III bridge of the Carolino Aqueduct. *Applied Geomatics*, n. ii, 2020.
- CUNHA, A. M.; RIBEIRO, D. M.; ARAUJO, T. T. Etapas para elaboração do projeto estrutural de um galpão metálico utilizando ferramentas bim: Revit & Robot. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO. 6 p., 2019
- CUPERSCHMID, A. R. M. . et al. Casa de Vidro: BIM e Gestão do Patrimônio Histórico Arquitetônico. . *Cadernos do PROARQ (UFRJ)*, n. October, p. 177–198, 2018.
- DE OLIVEIRA, A. C. F. et al. A case study to explore the synergy between HBIM and BEM for maintenance of historical buildings. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, v. ahead-of-p, n. ahead-of-print, 2021.
- DORE, C. et al. Structural simulations and conservation analysis-historic building information model (HBIM). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, v. 40, n. 5W4, p. 351–357, 2015.
- DORE, C.; MURPHY, M. Current state of the art historic building information modelling. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, v. 42, n. 2W5, p. 185–192, 2017.
- EASTMAN, C. et al. *Manual de Bim: Um Guia prático de Modelagem da informação da Construção para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores*. Tradução: Cervantes Gonçalves Ayres Filho et al. Porto Alegre: Bookman, 2014.
- FAGUNDES, D.; TEATINI, J. C.; CLÍMACO, S. *Catedral De Brasília: Histórico De Projeto/ Execução E Análise Da Estrutura*. p. 1–4, 2001.
- FARIAS, N. C. DE; JUNQUEIRA, L. D. M. ANÁLISE DAS TRANSFORMAÇÕES DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO DO CONJUNTO URBANÍSTICO DE BRASÍLIA / DF: Olhares e relatos sobre a Vila Planalto ANALYSIS OF THE TRANSFORMATIONS OF HISTORIC URBAN SET OF. p. 5–32, 2018.

- FRANCO, Í.A. *Estudo da Interoperabilidade utilizando a metodologia BIM*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 52 p, 2020.
- HASAN, A. M. M.; TORKY, A. A.; RASHED, Y. F. Geometrically accurate structural analysis models in BIM-centered software. *Automation in Construction*, v. 104, n. May, p. 299–321, 2019.
- INOJOSA, L. DA S. P. *O Protagonismo da Estrutura na Concepção da Arquitetura Moderna Brasileira*. 252 p., 2019.
- INOJOSA, L. DA S. P. *O Sistema Estrutural na Obra de Oscar Niemeyer*. 159 p., 2010.
- IPHAN. *GT Brasília - Memórias Da Preservação Do Patrimônio Cultural Do Distrito Federal*. 2016.
- IPHAN. Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Sistema Integrado de Conhecimento e Gestão – SICG. Disponível em: <<http://portal.iphan.gov.br/portal/montarPaginaSecao.do?id=14897&retorno=paginaIphn>>. Acesso em: 18 de outubro de 2021.
- JUNG, J. et al. Productive modeling for development of as-built BIM of existing indoor structures. *Automation in Construction*, v. 42, p. 68–77, 2014.
- KLEIN, L.; LI, N.; BECERIK-GERBER, B. Imaged-based verification of as-built documentation of operational buildings. *Automation in Construction*, v. 21, n. 1, p. 161–171, 2012.
- KREIDER, R. G.; MESSNER, J. I. *The Uses of BIM: Classifying and Selecting BIM Uses*. The Pennsylvania State University, p. 0–22, 2013.
- LIMA, J. W. DE. *O patrimônio histórico modernista - Identificação e valoração de edifício não tombado de Brasília - O caso do edifício sede do Banco do Brasil*. 2012.
- LOGOTHETIS, S.; DELINASIOU, A.; STYLIANIDIS, E. Building information modelling for cultural heritage: A review. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 2, n. 5W3, p. 177–183, 2015.

- MARTHA, L. F. Métodos básicos da análise de estruturas. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio. 312 p., 2010.
- MURPHY, M.; MCGOVERN, E.; PAVIA, S. Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, v. 27, n. 4, p. 311–327, 2009.
- MURPHY, M.; MCGOVERN, E.; PAVIA, S. Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 76, p. 89–102, 2013.
- NIETO-JULIÁN, J. E.; ANTÓN, D.; MOYANO, J. J. Implementation and Management of Structural Deformations into Historic Building Information Models. *International Journal of Architectural Heritage*, v. 14, n. 9, p. 1384–1397, 2020.
- OLIVEIRA, J. P.; ZANONI, V. A. G.; PELLEGRINO, P. Levantamento com scanner à laser na modelagem da Igrejinha: um estudo do nível de desenvolvimento-LOD. *Anais Patrimônio 4.0: conectando dimensões da realidade*, 1. ed., p. 80–93, 2022.
- ORENI, D. et al. Survey turned into HBIM: The restoration and the work involved concerning the Basilica di Collemaggio after the earthquake (L’Aquila). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 2, n. 5, p. 267–273, 2014.
- OSELLO, A.; LUCIBELLO, G.; MORGAGNI, F. HBIM and virtual tools: A new chance to preserve architectural heritage. *Buildings*, v. 8, n. 1, p. 1–12, 2018.
- PAPADOPOULOS, N. A. Nicolas Alexandros Papadopoulos Avaliação da metodologia BIM através de um estudo de caso. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio., 2014.
- PASHECHKO, M.; LATOS, A. Beam–To-Column Connection Calculations Using Robot Software. *Advances in Science and Technology Research Journal*, v. 9, n. 27, p. 45–49, 2015.

- POCOBELLI, D. P. et al. BIM for heritage science: a review. *Heritage Science*, v. 6, n. 1, p. 23–26, 2018.
- QUATTRINI, R. et al. From tls to hbim. high quality semantically-aware 3d modeling of complex architecture. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, v. 40, n. 5W4, p. 367–374, 2015.
- RAMAJI, I. J.; MEMARI, A. M. Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models. *Automation in Construction*, v. 90, n. January 2016, p. 117–133, 2018.
- RIBEIRO, T. T. et al. Análise de estruturas de concreto usando BIM para manutenção. *CILAMCE*, 2020.
- RODRÍGUEZ-MORENO, C. et al. From point cloud to BIM: an integrated workflow for documentation, research and modelling of architectural heritage. *Survey Review*, v. 50, n. 360, p. 212–231, 2018.
- SABADIN, M. H. Comparação Entre Solicitações Obtidas Pelo Tqs E Pelo Autodesk Robot Structural Analysis : Aplicação a Um Edifício De Pequeno. 2018.
- SILVA, F. G. F. DA. Análise comparativa do desempenho de diferentes programas de cálculo automático de estruturas: Aplicação ao caso de um edifício em concreto armado. p. 319, 2016.
- SILVEIRA, V. Análise do modelo BIM numa perspectiva do projeto de estruturas. Tese de Mestrado, 2014.
- SÜSSEKIND, J.C. Curso de Análise Estrutural – Vol. 1: Estruturas Isostáticas, Editora Globo, Porto Alegre, 1977.
- YANG, X. et al. Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. *Journal of Cultural Heritage*, v. 46, p. 350–360, 2020.