

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDREZA FERREIRA DE SANTANA

**PROCESSO DE MODELAGEM E ANÁLISE ESTRUTURAL DE
EDIFÍCIO MULTIPAVIMENTOS EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO
UTILIZANDO A TECNOLOGIA BIM**

CAMPO MOURÃO

2019

ANDREZA FERREIRA DE SANTANA

**PROCESSO DE MODELAGEM E ANÁLISE ESTRUTURAL DE
EDIFÍCIO MULTIPAVIMENTOS EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO
UTILIZANDO A TECNOLOGIA BIM**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, para obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Orientador: Prof. Me. Angelo Giovanni Bonfim Corelhano

CAMPO MOURÃO

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

**PROCESSO DE MODELAGEM E ANÁLISE ESTRUTURAL DE EDIFÍCIO
MULTIPAVIMENTOS EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO UTILIZANDO A
TECNOLOGIA BIM**

por

Andreza Ferreira de Santana

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 13h50min do dia 25 de junho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Douglas Fukunaga Surco
(UTFPR)

Prof. Dr. Jeferson Rafael Bueno
(UTFPR)

**Prof. Me. Angelo Giovanni Bonfim
Corelhano**
(UTFPR)
Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr(a). Paula Cristina de Souza

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico esta, bem como todas
as minhas demais conquistas,
aos meus amados pais e minha
irmã que, com muito carinho e
apoio, não mediram esforços
para que eu chegasse até esta
etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela minha vida e por permitir que eu chegasse até aqui, através de sua graça e bondade.

Aos meus pais, Isael e Mariza, e a minha irmã, Bianca, que são minha base, meu porto seguro, minha força diária e que proporcionaram essa oportunidade de estudo. Sem vocês tudo seria diferente, sou eternamente grata por todas as orações, apoio e confiança.

A toda minha família, que incentivaram meus estudos e contribuíram de alguma forma para minha formação e, principalmente, pelo carinho.

As minhas companheiras de república, Valéria, Nathália e Gabriela, por estarem sempre ao meu lado, por acreditarem em mim e por me aguentarem nos momentos difíceis.

Aos meus colegas de turma e amigos, por fazerem os meus dias serem mais leves e divertidos durante a graduação, pela vivência diária e experiências compartilhadas.

A todos aqueles que de alguma forma acompanharam, ajudaram e vivenciaram junto comigo o desenvolvimento deste trabalho, pela compreensão e apoio.

Ao meu orientador professor Giovanni, por toda paciência, incentivo e conhecimento transmitido durante o curso e principalmente no trabalho de conclusão de curso.

Aos professores da UTFPR Campus Campo Mourão por todo conhecimento transmitido ao longo destes anos de graduação.

A todos vocês, por fazerem parte da minha vida e por contribuírem para minha formação humana e profissional, minha eterna gratidão.

RESUMO

O uso do concreto pré-moldado na construção civil é sinônimo de praticidade. É um método construtivo dedicado a construções de médio e grande porte e que necessitam de velocidade na execução. A indústria de pré-moldados está em um constante processo de evolução, de acordo com a industrialização das atividades de engenharia. Em busca de meios que acelerem o processo de trabalho e aperfeiçoem os métodos de análise, a plataforma BIM veio para auxiliar os projetistas através da versatilidade e objetividade de seus *software*. O BIM é um conceito que trabalha o compartilhamento de informações parametrizadas através dos projetos de construções que permitem visualização 3D da estrutura, o que permite avaliar e analisar tudo o que acontece com os elementos e mostra ao usuário todas as incompatibilidades que podem ocorrer durante a modelagem. Com intuito de incentivar o uso BIM alinhado ao uso dos elementos pré-moldados, este trabalho apresenta um processo de modelagem e análise estrutural através dos *software Autodesk Revit* e *Autodesk Robot*, descrevendo todas etapas desde a concepção da estrutura até a apresentação dos resultados finais.

Palavras-chave: concreto pré-moldado; modelagem estrutural; *Autodesk Revit*; *Autodesk Robot*; análise estrutural.

ABSTRACT

The use of precast concrete in civil construction is synonymous of practicality. It's a constructive method dedicated to medium and large buildings that require speed in execution. The precast industry is in a constant process of evolution, according to the industrialization of engineering activities. In search of ways to accelerate the work process and improve analytical methods, the BIM platform has come to assist designers through the versatility and objectivity of their software. BIM is a concept that works on the sharing of parameterized information through construction projects that allow 3D visualization of the structure, which allows to evaluate and analyze everything that happens with the elements and shows the user all the incompatibilities that may occur during modeling. In order to encourage the use of BIM in the use of precast elements, this work presents a structural modeling and analysis process through Autodesk Revit and Autodesk Robot software, describing all stages from the design of the structure to the presentation of the final results.

Keywords: precast concrete; structural modeling; Autodesk Revit; Autodesk Robot; structural analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Exemplo de padrões de seções transversais
- Figura 2 – Exemplo de ligação isostática (articulada)
- Figura 3 – Exemplo dos pinos duplos e Neoprene para viga
- Figura 4 – Exemplo de ligação semirrígida por concretagem vertical
- Figura 5 – Exemplo de ligação semirrígida de alto coeficiente de restrição a rotação
- Figura 6 - Coeficiente de arrasto para ventos com baixa turbulência
- Figura 7 - Coeficiente de arrasto para ventos com alta turbulência
- Figura 8 - Velocidade básica do vento
- Figura 9 – Variações do relevo
- Figura 10 – Exemplo de mudança de esquema estático durante construção
- Figura 11 – Torção na viga devido à falta de retilineidade
- Figura 12 – Torção devido a excentricidade horizontal entre viga e consolo
- Figura 13 – Força horizontal no apoio
- Figura 14 - Planta baixa dos pilares do pavimento térreo e superior
- Figura 15 - Estrutura 3D do Bloco H da UTFPR – Campus Campo Mourão
- Figura 16 - Interface inicial do Autodesk Revit
- Figura 17 - Inserir um projeto arquitetônico como vínculo no Revit
- Figura 18 - Criação de eixos
- Figura 19 - Inserção de pilares
- Figura 20 - Carregar uma família de pilares
- Figura 21 - Editar uma família de pilares
- Figura 22 - Inserção de vigas
- Figura 23 - Carregar uma família de vigas
- Figura 24 - Editar uma família de vigas
- Figura 25 - Inserção de lajes
- Figura 26 - Editar uma família de lajes
- Figura 27 - Ajuste do modelo analítico
- Figura 28 - Utilização da ferramenta “Plano de referência” para delimitar o ajuste analítico das barras.
- Figura 29 - Ajuste analítica das barras (antes)
- Figura 30 - Ajuste analítica das barras (depois)
- Figura 31 - Orientação dos eixos locais das vigas

Figura 32 - Adição de vínculos

Figura 33 - Vínculos adicionados

Figura 34 - Vista 3D do modelo analítico

Figura 35 - Exportação da estrutura para o Robot

Figura 36 - Janela de confirmação de envio

Figura 37 - Mapeamento de elementos no Robot

Figura 38 - Acesso a ferramenta “Preferências do trabalho” no *Robot*

Figura 39 - Criação de material

Figura 40 - Definição de propriedades do material

Figura 41 - Conferência de seções e alterando/criando uma seção

Figura 42 - Adição de apoios na estrutura

Figura 43 - Definição da laje

Figura 44 - Adição de um tipo de laje e inserindo características

Figura 45 - Definição do modelo da laje

Figura 46 - Adição das características do modelo da laje

Figura 47 – Estrutura com as lajes

Figura 48 - Casos de carga

Figura 49 - Seleção de caso de carga

Figura 50 - Definição de carregamentos

Figura 51 - Inserção dos carregamentos

Figura 52 - Definição das combinações

Figura 53 - Combinações

Figura 54 - Solicitação de cálculo da estrutura

Figura 55 - Comando Diagrama para barras

Figura 56 – Definição dos parâmetros para os diagramas

Figura 57 – Planta com a locação dos pilares analisados

Figura 58 – Diagrama de esforço normal para o pilar P5

Figura 59 – Diagrama de esforço normal para o pilar P9

Figura 60 – Diagrama de esforço normal para o pilar P14

Figura 61 – Diagrama de momento fletor em torno do eixo y para o pilar P5

Figura 62 – Diagrama de momento fletor em torno do eixo y para o pilar P9

Figura 63 – Diagrama de momento fletor em torno do eixo y para o pilar P14

Figura 64 – Diagrama de momento fletor em torno do eixo y para a viga V2

Figura 65 – Diagrama de momento fletor em torno do eixo y para a viga V4

Figura 66 – Deslocamento horizontal da estrutura

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sistemas estruturais em concreto pré-moldado para edifícios de múltiplos pavimentos

Quadro 2 – Aspectos que devem ser considerados no projeto e na análise estruturais

Quadro 3 – Dimensões dos pilares e vigas

Quadro 4 – Coeficientes e velocidade característica do vento para cada pavimento

Quadro 5 – Área de influência e força do vento em cada pavimento

Quadro 6 – Combinações para análise dos casos críticos da estrutura

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ações permanentes diretas consideradas separadamente

Tabela 2 – Ações permanentes diretas agrupadas

Tabela 3 – Efeitos de recalques de apoios e retração dos materiais

Tabela 4 – Ações variáveis consideradas separadamente

Tabela 5 – Ações variáveis consideradas conjuntamente

Tabela 6 – Valores dos fatores de combinação (Ψ_0) e de redução (Ψ_1 e Ψ_2) para as ações variáveis

Tabela 7 – Peso específico dos materiais de construção

Tabela 8 – Valores mínimos das cargas acidentais verticais

Tabela 9 - Parâmetros meteorológicos

Tabela 10 - Valores mínimos para o fator S_3

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
SINDUSCON-CE	Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado do Ceará
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
kN	Quilo Newton
m	Metros
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 JUSTIFICATIVA	19
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
4.1 CONCRETO PRÉ-MOLDADO	20
4.1.1 Definição	20
4.1.2 Vantagens e desvantagens	21
4.1.3 Ligações	22
4.1.4 Projeto Estrutural	27
4.1.5 Aplicação em edifícios multipavimentos	29
4.2 BIM (<i>Building Information Modeling</i>)	30
4.2.1 <i>Autodesk Revit</i>	32
4.2.2 <i>Autodesk Robot Structural Analysis Professional</i>	33
4.3 AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES	33
4.3.1 Combinações últimas das ações	34
4.3.1.1 Combinações últimas normais	34
4.3.1.2 Combinações últimas especiais ou de construção	35
4.3.2 Combinações de utilização das ações	35
4.4 CARGAS VERTICAIS	39
4.5 AÇÕES HORIZONTAIS	42
4.6 ANÁLISE ESTRUTURAL	47
5 MATERIAIS E MÉTODOS	53
5.1 MATERIAIS	53
5.2 MÉTODO	53
6 ROTEIRO DE MODELAGEM ESTRUTURAL APLICANDO A TECNOLOGIA BIM	
55	
6.1 MODELAGEM ESTRUTURAL NO <i>REVIT</i>	55
6.1.1 Modelo arquitetônico	55
6.1.2 Definições preliminares à modelagem	58
6.1.3 Lançamento dos elementos estruturais	59

6.1.4 Ajuste do modelo analítico	64
6.1.5 Exportação para o <i>Robot</i>	69
6.2 ANÁLISE ESTRUTURAL NO <i>ROBOT</i>	70
6.2.1 Definições preliminares	70
6.2.2 Definições das cargas e combinações	77
6.2.3 Cálculos da estrutura.....	82
6.2.4 Análise estrutural.....	84
7 CONCLUSÃO	90
REFERÊNCIAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

A ABNT NBR 9062:2017 estabelece elemento de concreto pré-moldado como “Elemento moldado previamente e fora do local de utilização definitiva da estrutura conforme especificações estabelecidas [...]” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017, p. 04). É um modelo estrutural que pode ser formado por lajes, vigas e pilares, visando a industrialização da construção civil.

A utilização das estruturas pré-moldadas na construção civil é uma das soluções adotadas em muitas obras, com opções rápidas e fabricação ágil. Tem o intuito de reduzir o tempo de construção com a empregabilidade de peças pré-moldadas no canteiro de obras, conquistando alta produtividade de mão de obra, devido a este processo ser mais industrializado do que a técnica convencional. Com isso, diminui o custo da obra e a minimização da geração de resíduos por ser uma “construção seca”: seus elementos chegam prontos para serem alocados nos locais previamente dispostos no projeto estrutural.

No Brasil, o histórico da utilização do concreto pré-moldado tem grandes avanços, o setor industrial dá preferência à utilização desses elementos devido a agilidade na construção de grandes galpões e pavilhões, são estes tipos de edificações que, geralmente, grandes vãos necessitam ser vencidos e a imposição de uma estrutura robusta, condição esta que os elementos de concreto pré-moldado conseguem atender. O setor urbano também utiliza o pré-moldado como solução eficaz para suas obras, como por exemplo, edifícios públicos (hospitais, universidades), estações de trem e metrô e os estabelecimentos comerciais.

Segundo o DIÁRIO DO NORDESTE (2018) de acordo com o presidente do Sindicato da Indústria da Construção Civil do Ceará (Sinduscon-CE), o modelo pode reduzir até 20% no valor das obras e 50% no tempo de trabalho.

O emprego das peças pré-moldadas aumenta de acordo com o desenvolvimento tecnológico e social do país, ocasionando maior oferta de equipamentos, valorização da mão de obra e rigoroso controle de qualidade das peças (EL DEBS, 2000).

O crescimento econômico do país é fundamental para que este mercado tenha uma alta procura, não é algo impossível, pois a técnica já é utilizada, mas pode vir a ser empregada em larga escala quando a economia brasileira estiver mais estável.

E para contribuir ainda mais a utilização da pré-moldagem, o desenvolvimento de bons e eficientes projetos estruturais é essencial. Atualmente, o BIM (*Building Information Modeling*) é um processo que vem sendo bastante empregado nos projetos de engenharia, é o carro chefe quando o assunto é compatibilização de projetos e eficiência em compartilhamento de informações, pois é uma plataforma organizada e com modelagem parametrizada.

A proposta de um modelo eficiente e eficaz de projeto estrutural em concreto pré-moldado é uma alternativa que possa alavancar o crescimento dessa solução no mercado da construção civil brasileiro, ainda mais devido a tantas vantagens que a pré-moldagem oferece. Com isso, o objetivo deste trabalho é demonstrar um roteiro para análise estrutural em concreto pré-moldado a partir de um modelo previamente estabelecido, com auxílio computacional dos seguintes *software* da plataforma BIM: *Autodesk Revit*, responsável pela concepção do modelo arquitetônico da edificação proposta, sendo possível a criação de elementos estruturais que facilitam o envio de informações necessárias para o *software Autodesk Robot Structural Analysis* responsável pela análise estrutural do modelo, realizando o tratamento dos dados e plotando os resultados da análise que compõe o projeto estrutural.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Elaborar um roteiro para análise estrutural em concreto pré-moldado para um edifício multipavimentos com emprego do processo BIM, via *software Revit e Robot Structure*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar o modelo de estudo com o lançamento da estrutura pré-moldada e dos carregamentos nos elementos estruturais de acordo com as normas de projeto;
- Analisar brevemente os tipos de ligações;
- Demonstrar o passo a passo da preparação do modelo físico e ajustes do modelo analítico no *Revit* e exportação para o *Robot*;
- Apresentar os resultados da análise estrutural.

3 JUSTIFICATIVA

Analisando o mercado da construção civil, prezando por alta produtividade na mão de obra e redução no tempo de execução, implantar o sistema pré-moldado é uma solução que traz praticidade e velocidade às obras. O mercado brasileiro necessita investir em tecnologias que tragam versatilidade no canteiro de obras. A proposta de elevar a busca por projetos estruturais que visam a utilização da pré-moldagem acarreta um avanço no setor da construção civil, diminuindo o uso do convencional concreto armado moldado *in loco*.

As ferramentas computacionais são de uso imprescindível, visto que, torna o dia a dia de trabalho nos escritórios de projetos de engenharia mais compreensível e produtivo. Sendo assim, a realização de um projeto sem ferramentas da computação se tornou uma tarefa muito difícil e inviável em termos comerciais (MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS, 2007).

Com o intuito de aumentar a visibilidade do mercado de concreto pré-moldado e, com isso, incentivar a procura por projetos estruturais voltados a este nicho, o desenvolvimento deste trabalho propõe alinhar a utilização do processo BIM por meios dos *software Revit* e *Robot*, através da modelagem e análise estrutural, respectivamente, com os processos relacionados ao projeto deste tipo de estrutura, elaborando um roteiro de análise estrutural correlatas as principais etapas de modelagem nos *software*.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 CONCRETO PRÉ-MOLDADO

4.1.1 Definição

“O concreto tem se destacado como o material de construção mais adequado a inúmeras situações, devido a suas características estéticas, de resistência e durabilidade” (MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS, 2007, p.509). É um fator diferencial para as empresas que utilizam a técnica pré-moldada, é o ponto-chave quando o assunto é qualidade e desempenho, por ser um material moldável.

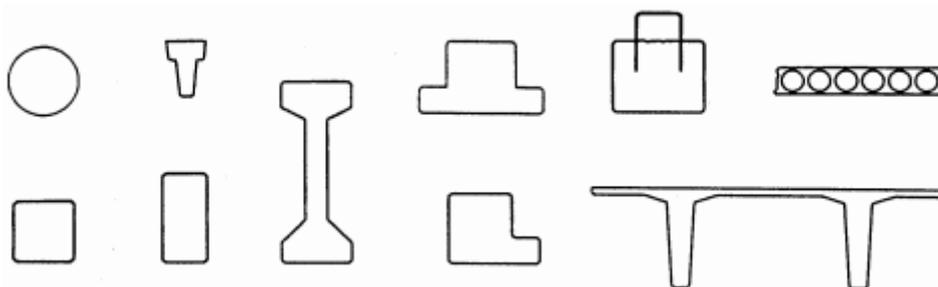
EL DEBS (2000) afirma que: “a pré-moldagem é caracterizada como um processo de construção em que a obra, ou parte dela, é moldada fora de seu local de utilização definitivo”.

Cabe destacar que existe uma distinção entre elemento pré-moldado e elemento pré-fabricado. De acordo com ABNT NBR 9062:2017, a diferença entre o pré-moldado e o pré-fabricado dá-se quanto ao controle de qualidade, ambos são produzidos fora da obra e com boas características de resistência e segurança, entretanto, o pré-fabricado é executado na indústria, em instalações permanentes de empresas destinadas a este fim e que atendam as especificações descritas em norma e com um rigoroso controle de qualidade.

O processo de fabricação dos elementos pré-moldados busca padronizar seus elementos e variar as seções transversais de modo que as mesmas possam ser aproveitadas da melhor maneira possível e otimizar o processo construtivo.

ACKER (2002) destaca que os elementos típicos padronizados são: pilares, vigas e lajes de piso e, geralmente, essa padronização se define em aos detalhes, dimensões e geometria das seções transversais. O comprimento, dimensões e capacidade de carga dos elementos não se aplica a essa padronização, fazendo com que o projetista defina a melhor opção conforme o projeto e de acordo com catálogo dos fabricantes. A Figura 1 exemplifica alguns padrões de seções dos elementos pré-moldados.

Figura 1 – Exemplo de padrões de seções transversais.



Fonte: ACKER (2002)

4.1.2 Vantagens e desvantagens

Assim como todo e qualquer material, o concreto pré-moldado possui vantagens e desvantagens de utilização. Existem diversos fatores que podem classificar a aplicação da pré-moldagem como viável ou inviável.

De acordo com EL DEBS (2000) as vantagens relacionadas à utilização da pré-moldagem são decorrentes da facilidade de execução e grande reutilização das fôrmas, emprego de seções com melhor aproveitamento dos materiais, maior produtividade de mão de obra, maior controle de qualidade e redução significativa do cimbramento.

Em busca de melhor aproveitamento do tempo durante a execução das obras, a pré-moldagem tem destaque à frente da tradicional técnica de moldagem convencional. ACKER (2002) destaca mais uma vantagem de utilização: o menor tempo de construção, sendo metade do tempo necessário para a construção moldada no local. Cada vez mais os projetos estão se tornando mais complexos e, com isso, a busca por uma alternativa que viabilize sua execução é maior.

Cabe salientar que existem também as desvantagens da utilização dos elementos pré-moldados. De acordo com MELLO, PREVEDELO, e MASUTTI (2015) restrições relacionadas ao transporte dos equipamentos e montagem das peças, movimentação no interior dos canteiros de obras e a dificuldade de mobilidade em grandes centros são características que inibem o uso desses elementos.

PORTO (2010) destaca que um dos fatores que ainda limitam o uso deste processo construtivo é que existem poucas empresas especializadas na área de pré-moldados, e que a maioria delas se encontram distantes dos grandes centros urbanos.

“Acho que é ainda a questão dos custos, das distâncias. O Brasil é um país muito grande. Temos regiões muito afastadas – como a Amazônia – onde, às vezes, torna-se muito difícil entrar com os pré-moldados como solução” (PORTO, 2010, p. 18).

As ligações entre os elementos também representam pequenas dificuldades para se trabalhar com a pré-moldagem. Para EL DEBS (2000) as ligações mais simples ocasionam o uso de estruturas com solicitações menores, ao passo que ligações com o intuito de apresentar o monolitismo das estruturas pré-moldadas são, em geral, mais caras e trabalhosas. Estes fatores não devem ser considerados uma restrição ao uso da pré-moldagem, e, sim, o valor a pagar para obter facilidade e versatilidade da execução dos elementos.

4.1.3 Ligações

De acordo com EL DEBS (2000) as ligações são as partes mais importantes no projeto das estruturas de concreto pré-moldado e são de fundamental importância tanto para a produção como para o comportamento da estrutura.

Para EBELING (2006) a escolha do tipo de ligação entre os elementos pode provocar consideráveis diferenças em relação ao tempo de montagem da estrutura e seu comportamento final. É necessário analisar as propriedades das ligações e verificar a melhor alternativa para implantar na estrutura, uma vez que, a observação desses fatores é de suma importância pois implica no dimensionamento das ligações e algumas considerações devem ser revistas em projeto.

“Do ponto de vista estrutural algumas propriedades são relevantes, tais como: o tipo de vinculação (articulada, rígida ou semirrígida), as tensões principais a serem transmitidas pela ligação (compressão, tração, cisalhamento e etc.), se a ligação é conformada por encaixes, recortes e chaves, ou se por conectores metálicos, solda e parafusos.” (EBELING, 2006, p. 2).

De acordo com ACKER (2002) o papel das ligações é conectar os elementos pré-moldados formando um sistema eficaz e capaz de resistir às forças atuantes na estrutura. É responsabilidade do projetista ter noção das ações que atuarão nos elementos e o funcionamento das ligações.

“Para desenvolver adequadamente o projeto estrutural, os projetistas devem conhecer o fluxo de forças ao longo da estrutura quando submetida às ações

verticais e horizontais, bem como compreender como as ligações interagem com os elementos dentro do sistema estrutural como um todo. “ (ACKER, 2002, p.33).

Para complementar a introdução ao conceito de ligações, EL DEBS (2000) apresenta as classificações das ligações. Para este trabalho será discutida a classificação de ligações quanto à vinculação.

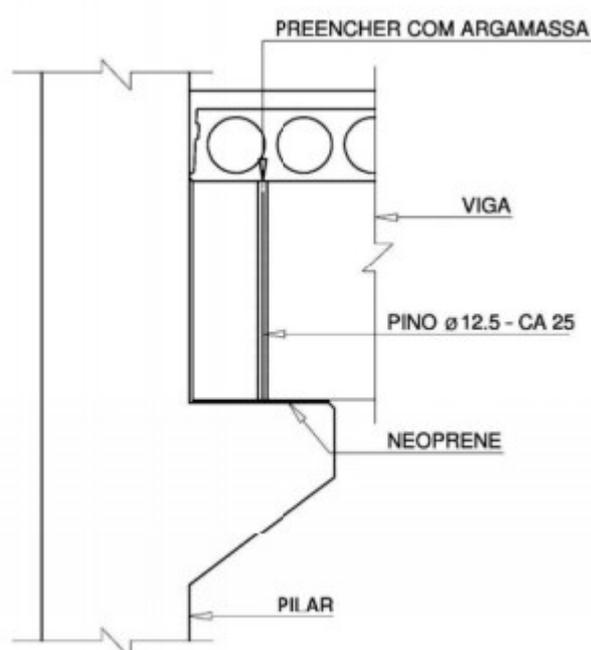
- a) Quanto a vinculação
 - Ligação articulada – não transmite momento fletor
 - Ligação rígida – transmite momento fletor
 - Ligação semirrígida – transmite parcialmente os momentos fletores
- b) Quanto ao emprego de concreto e argamassa no local
 - Ligação seca
 - Ligação úmida
- c) Quanto ao esforço principal transmitido
 - Ligação solicitada por compressão
 - Ligação solicitada por tração
 - Ligação solicitada por cisalhamento
 - Ligação solicitada por momento fletor
 - Ligação solicitada por momento de torção
- d) Quanto à colocação de material de amortecimento
 - Ligação dura – ligação com solda ou concreto moldado no local (do original em inglês *hard*)
 - Ligação macia – com a intercalação de material de amortecimento (do original em inglês *soft*).

As ligações articuladas são definidas pelo MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS (2007) como ligação isostática (tipo 1). Este tipo de ligação é caracterizado por não transmitir momento fletor e esforços horizontais à estrutura. Para que seja efetiva a trabalhabilidade e eficiência da ligação os deslocamentos não podem ser muito grandes, pois o contato entre o pilar e a viga pode ocasionar transmissão de esforços.

As peças são apoiadas em aparelhos de Neoprene com espessura de 1 cm, permitindo pequenos deslocamentos relativos entre elas. Para impedir o tombamento e auxiliar no posicionamento das vigas são colocados pinos de aço liso CA-25.

Para a fixação dos pinos, o furo é preenchido com argamassa comum e quando ocorre a retração, a mesma deixa espaços para a deformação dos pinos, que possui baixa resistência à compressão em relação aos deslocamentos horizontais. A Figura 2 representa um exemplo deste tipo de ligação.

Figura 2 – Exemplo de ligação isostática (articulada).



Fonte: (MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS, 2007).

As ligações rígidas, também conhecidas por engastadas, são aquelas onde o fator de restrição à rotação é superior a 0,85 e, com isso, considerada como é feito no concreto moldado no local.

A execução deste tipo de ligação é feita com a concretagem do nó existente entre a viga e o pilar, podendo deixar seus arranques e após a montagem das peças o engaste é realizado (Munte Construções Industrializadas, 2007).

No modelo estrutural, MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS (2007) destaca que as ligações não dependem somente da execução, a restrição à rotação é um fator bastante importante para definir seu engastamento.

“É importante salientar que as ligações são classificadas e consideradas no modelo estrutural conforme sua resposta às solicitações e não conforme sua execução, ou seja, qualquer ligação, com luva, furos passantes, soldas e chapas e outros tipos, que porventura apresentem restrições à rotação maiores que 0,85, serão consideradas engastadas. ” (MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS, 2007, p.53).

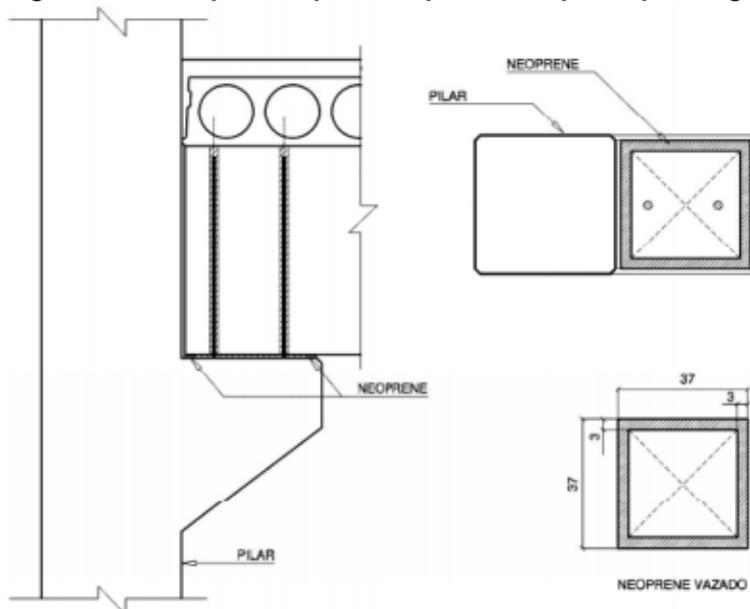
As ligações semirrígidas apresentam certa capacidade em resistir aos momentos fletores, também conhecidas por possuírem propriedades de semi-engastamento. O fator de restrição à rotação deste tipo de ligação deve estar compreendido entre os valores 0,15 e 0,85 (Munte Construções Industrializadas, 2007).

MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS (2007) cita três exemplos de tipos de ligações semirrígidas, sendo elas:

- a) “Ligação por binário formado pelos pinos: esta consideração, de baixa eficiência, e, portanto, com fator de restrição à rotação baixo, se caracteriza pelo funcionamento do pino (de um ou ambos) trabalhando sob tração e parte da região do console trabalhando sob compressão, de maneira a efetivar o binário resistente.
- b) Ligação por concretagem vertical: as ligações por concretagem vertical se caracterizam pela concretagem entre o pilar e a viga. Ou seja, elas não apresentam uniões resistentes a esforços de tração na região inferior da viga, junto ao pilar (normalmente comprimida pelo momento negativo).
- c) Ligação por concretagem vertical e solda: as ligações com solda são as mais sofisticadas e realmente possibilitam condições mais próximas do engaste perfeito. A ligação difere muito pouco da ligação com concretagem na vertical simples, pois todos os detalhes são iguais, apenas acrescidos de chapas de aço posicionadas na parte inferior das vigas, soldadas sobre outra chapa colocada no apoio (MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS, 2007, p. 46-51).

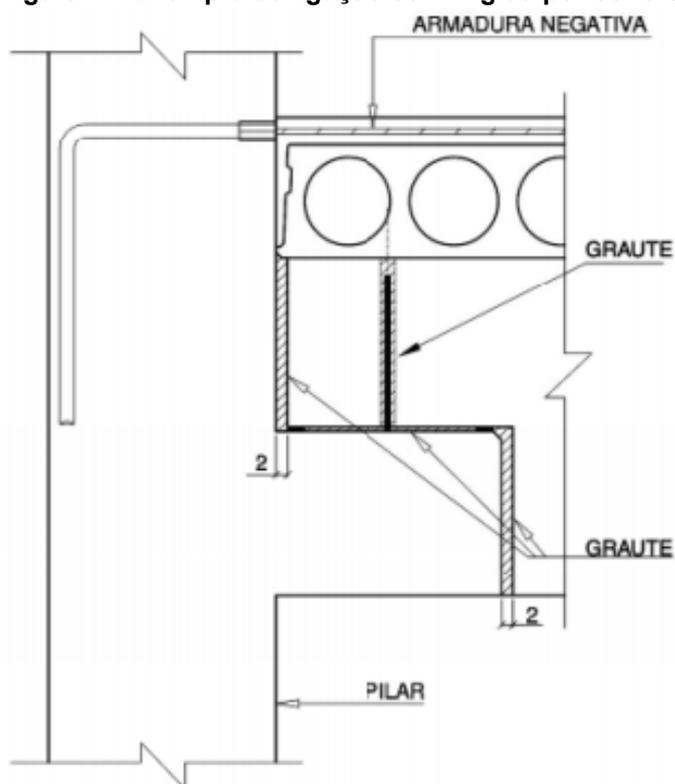
Os procedimentos mais detalhados quanto à execução desse tipo de ligação não serão discutidos à diante, pois cabe a pesquisa apenas relatar brevemente alguns dos tipos de ligações. A Figura 3, Figura 4 e a Figura 5 servem de exemplos dos tipos de ligações semirrígidas citadas nos itens a, b e c, respectivamente.

Figura 3 – Exemplo dos pinos duplos e Neoprene para viga.



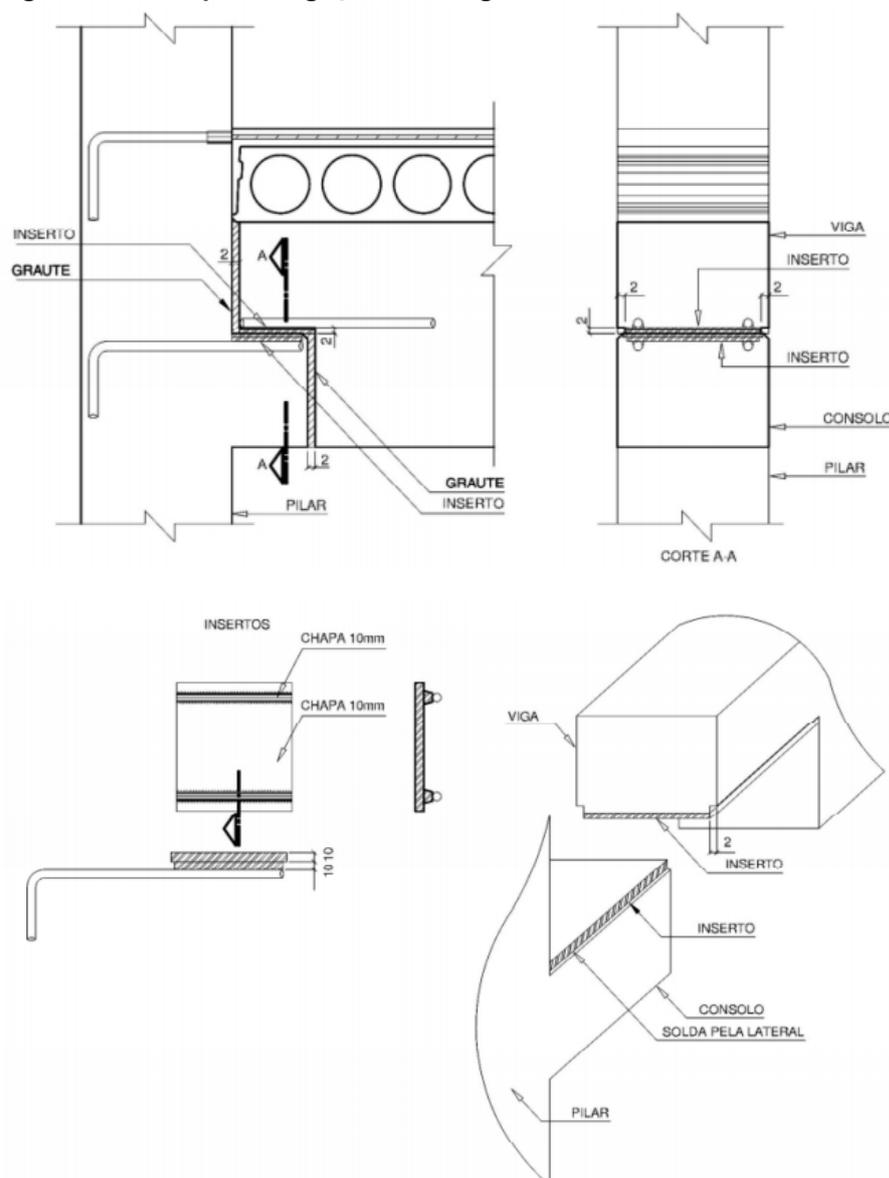
Fonte: Adaptado MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS (2007).

Figura 4 – Exemplo de ligação semirrígida por concretagem vertical.



Fonte: Adaptado MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS (2007).

Figura 5 – Exemplo de ligação semirrígida de alto coeficiente de restrição a rotação.



Fonte: Adaptado MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS (2007).

4.1.4 Projeto Estrutural

A concepção do projeto estrutural dos elementos em concreto pré-moldado apresenta algumas particularidades em relação ao projeto estrutural de concreto convencional. Deve-se atentar quanto aos princípios e recomendações, forma dos elementos, análise estrutural, transporte e montagem das peças e análise dos tipos de ligações (El Debs, 2000, p. 23).

As situações transitórias estão relacionadas às etapas de desmoldagem, armazenamento, transporte e montagem dos elementos, e devem ser consideradas

durante a fase de projeto pois as mesmas podem apresentar solicitações inadequadas e que podem acarretar situações prejudiciais na fase definitiva das peças.

Algumas orientações são de extrema importância e devem ser empregadas durante a idealização do projeto estrutural constituído por elementos de concreto pré-moldado.

O primeiro princípio a ser considerado é a concepção do projeto da obra prevendo a utilização da pré-moldagem. É fundamental deixar claro a aplicação da técnica afim de evitar problemas no decorrer da obra. El Debs (2000) destaca que o intuito de realizar essa previsão é ter um melhor aproveitamento do concreto pré-moldado com base nas características da obra, entretanto, nada impede que seja empregada a técnica sem a previsão, a consequência serão certos prejuízos, sendo eles maiores ou menores dependendo da situação.

Quanto as interações da estrutura com as outras partes da construção El Debs (2000) afirma que deve ser prevista a compatibilização dos projetos, sendo eles: as instalações (hidráulicas, elétricas, águas pluviais, ar condicionado, etc.), assim como o posicionamento das esquadrias e outros elementos do entorno, visto que improvisações não são conciliáveis.

El Debs (2000) propõe ainda a minimização do número de ligações, sendo este outro princípio indispensável que deve nortear o projeto estrutural dos elementos de concreto pré-moldado, uma vez que as mesmas representam uma dificuldade deste tipo de estrutura.

A minimização do número de tipos de elementos tem por objetivo buscar padronização durante a produção das peças e reduzir as variações, ou seja, visa a fabricação em série. Com isso há redução de custos, pois há possibilidade de reutilização das fôrmas. Albuquerque e El Debs (2005) mencionam que o projeto estrutural deve buscar ser racional e ter um padrão de elementos.

“O projeto estrutural para ser mais racional deve procurar sempre a padronização das seções dos elementos, este aspecto é sempre cobrado por parte dos fabricantes, não se pode pensar em consumo deve-se pensar como em uma linha de montagem tem que haver repetição. Deve-se partir da premissa que a racionalização dos custos é a diretriz de projeto.” (ALBUQUERQUE e EL DEBS, 2005, p. 9-10)

E por fim, a utilização de elementos com a mesma faixa de peso visa também a racionalização da montagem dos elementos e uma melhor condição logística. Para

El Debs (2000) a variação de peso dos elementos implica em dimensionar um equipamento para a montagem destes elementos mais pesados, fazendo com que haja gastos com mais de um equipamento para transporte, aumentando assim os custos para execução da obra, e o intuito é que seja utilizado um mesmo equipamento para a montagem de toda estrutura ou grande parte dela.

Em busca da industrialização do processo construtivo, os princípios apresentados devem ser entendidos como caminhos que levem a concepção de um projeto estrutural eficaz e não como metas. Caso algum item não seja obedecido, isso não resulta em uma solução desapropriada e nem torna inviável o emprego da pré-moldagem (El Debs, 2000).

4.1.5 Aplicação em edifícios multipavimentos

Os edifícios com multipavimentos quando comparados aos edifícios de um pavimento apresentam boas características para a implantação do sistema estrutural pré-moldado. Entretanto, o número de ligações aumenta devido a utilização de vários elementos que, possivelmente, convergem para um mesmo nó, com isso, a garantia da estabilidade global da estrutura tem custo elevado.

Estas ponderações, de forma geral, transmite a ideia de que a utilização da pré-moldagem nos edifícios com multipavimentos não seja adequada, apesar de não serem analisados aspectos particulares de cada sistema (El Debs, 2000).

O Quadro 1 apresenta a classificação dos sistemas estruturais dos elementos pré-moldados para edifícios com multipavimentos.

Quadro 1 – Sistemas estruturais em concreto pré-moldado para edifícios de múltiplos pavimentos.

Sistemas estruturais de esqueleto	<ul style="list-style-type: none"> • com elementos de eixo reto (elementos tipo pilar e tipo viga) • com elementos compostos de trechos de eixo reto (elementos que incluem parte do pilar e parte da viga) • em pavimentos sem vigas (elementos tipo pilar e tipo laje)
Sistemas estruturais de parede portante	<ul style="list-style-type: none"> • com grandes painéis de fachada • com painéis da altura do pavimento • com elementos tridimensionais

Fonte: Adaptado EL DEBS (2000)

De acordo com a funcionalidade da edificação que se relaciona com o sistema estrutural a ser empregado EL DEBS (2000) destaca que os edifícios multipavimentos podem ser classificados em três grupos:

- Grupo 1 – edifícios industriais, comerciais e de estacionamento
- Grupo 2 – edifícios de escritório, escolas e hospitais
- Grupo 3 – hotéis e edifícios residenciais

Em destaque para o Grupo 1 - edifícios industriais, comerciais e de estacionamento, as características das edificações pertencentes a este grupo são relacionadas a grandes vãos e cargas de uso elevada e flexibilidade quanto ao *layout* e a necessidade de ampliações. O sistema estrutural que melhor se encaixa nesta situação é o de esqueleto.

As características do Grupo 2 são relativas à importância do *layout* e a estética da edificação, cargas de uso são reduzidas em relação ao Grupo 1 e os sistemas estruturais mais adequados são: de esqueleto e os mistos (parede portante na fachada).

O Grupo 3 possui cargas de uso bem reduzidas em relação aos grupos citados acima e, a preocupação sobre cuidados com o *layout* não é necessária e com a estética é consideravelmente importante. O sistema estrutural que se adequa a este modelo é o de parede portante.

4.2 BIM (*Building Information Modeling*)

O BIM é um conjunto de processos que possibilitam a inserção de dados, a modelagem, o armazenamento, consolidação e fácil acesso ao grupo de informações sobre uma edificação dentro de uma plataforma da tecnologia da informação aplicada à construção civil. Concretizada em forma de ferramentas, chamadas de *software*, possibilitam o manuseio e o processo dos dados do ciclo de vida de uma edificação (Catelani, 2016).

Os *software* da plataforma BIM verificam automaticamente a maioria das incompatibilidades entre os projetos ou entre elementos de um modelo. Assim que surge a interferência, o usuário é notificado e o mesmo é indicado sobre o local exato onde está ocorrendo conflito.

Este conceito visa adequar as fases do projeto de forma que compatibilize todos os projetos, sendo eles arquitetônico, elétrico, hidráulico, estrutural, etc. e não haja conflito entre eles, minimizando os problemas (COLOMBO, 2014).

“O conceito BIM é embasado, essencialmente, em uma metodologia de troca e compartilhamento de informações durante todas as fases do ciclo de vida de uma edificação (projeto, construção, manutenção, demolição e reciclagem), ao permitir explorar e estudar alternativas desde a fase conceitual de um empreendimento, mantendo o modelo final atualizado até à sua demolição (...)” (COLOMBO, 2014, p. 8).

A plataforma BIM permite o usuário explorar visualmente o conceito do projeto e avaliar economicamente a execução de uma construção, ou seja, analisar a viabilidade da obra gerenciando custos para obter os melhores resultados.

Atualmente, o BIM é subdividido em:

- 3D - Visualização: Representação tridimensional do empreendimento como um todo, que engloba tanto os aspectos arquitetônicos, quanto os elementos mecânicos. Neste modelo, tem-se todas as informações para caracterização do projeto e posicionamento espacial deste. Outro grande benefício é o poder de compatibilização de projetos, onde é possível encontrar conflitos entre eles. Neste trabalho foi abordado apenas o uso do BIM 3D.
- 4D - Tempo: A variável tempo é adicionada ao projeto, para determinar o cronograma da obra.
- 5D - Custo: Cada elemento pode ser vinculado a um valor, que em conjunto com a tabela de quantitativos permite determinar o orçamento necessário para execução da obra.
- 6D - Sustentabilidade: É possível realizar estimativas de consumo de energia, análise de bem-estar no ambiente em desenvolvimento, entre outras diversas funções.
- 7D - Gestão: Neste item possibilita fazer uma análise de todo o ciclo de vida do projeto e da gestão das instalações. Permitindo o controle de garantia de equipamentos, planos de manutenção, informações de fornecedores, custos de operação, entre outros.

Neste trabalho foi abordado apenas o uso do BIM 3D.

4.2.1 Autodesk Revit

O *Autodesk Revit* é um *software* que faz parte da plataforma BIM e permite o desenvolvimento e criação de projetos na concepção de um modelo tridimensional que faz associação aos componentes construtivos de uma edificação (esquadrias, mobílias, objetos em geral, etc.)

“O *Revit* revolucionou o mundo da modelagem de informações de construção criando uma plataforma que utilizava um ambiente de programação visual para criar famílias paramétricas e permitir que um atributo de tempo fosse adicionado a um componente para permitir que uma 'quarta dimensão' de tempo fosse associada ao edifício.” (tradução livre) (BERGIN, 2012).

O *Revit* dá suporte para a elaboração de projetos multidisciplinares, documentando a construção de forma que todas as informações necessárias estejam inseridas num ambiente exclusivo no *software*. Por ser um dos *software* que compõe a plataforma BIM, possibilita a importação e exportação de arquivos, vinculando seus dados com formatos variados, por exemplo, DWG, DGN, IFC (AUTODESK, 2017a).

A ferramenta permite que técnicos, *designers*, arquitetos e engenheiros tenham espaço para trabalhar em modelos específicos de suas respectivas áreas. No campo da arquitetura proporciona a visualização em alto impacto, criando modelos tridimensionais e renderizações realísticas, trazendo o projeto o mais próximo da realidade pois permite um alto nível de detalhamento e isso faz com que a ideia do projetista fique mais clara e transpasse de forma rápida e transparente ao cliente.

O *software* oferece suporte aos engenheiros estruturais possibilitando a criação de modelos estruturais inteligentes com inúmeros detalhes, de forma que o projeto seja modelado o mais próximo de como será executado na prática. Composto por várias funções que auxiliam na simulação de sistemas estruturais formando o modelo físico estrutural e, a partir deste modelo é criado automaticamente o modelo analítico estrutural (AUTODESK, 2018).

“Um modelo analítico é uma representação 3D simplificada da descrição completa de engenharia de um modelo físico estrutural. O modelo analítico consiste nestes componentes estruturais, geometrias, propriedades do material e cargas, que juntos formam um sistema de engenharia.” (AUTODESK, 2018)

Para facilitar o trabalho dos engenheiros, o *Revit* permite a exportação do modelo analítico para outros *software* que realizam análise estrutural, visto que é necessária para fins de dimensionamento e análise comportamental da estrutura.

4.2.2 Autodesk Robot Structural Analysis Professional

O *Autodesk Robot* é um *software* da plataforma BIM que consiste em realizar análises e modelagens estruturais planas e tridimensionais, que auxiliam o trabalho dos engenheiros testando os efeitos de cargas estruturais sobre as edificações com estruturas de concreto, madeira ou metálica.

O *software* possui vários recursos para a análise estrutural, permite o compartilhamento de informações com o *Revit* pois possui vínculo bidirecional com o mesmo, possibilitando realizar alterações no modelo físico estrutural e manter atualizado na área de trabalho do *Robot* (AUTODESK, 2017b).

É uma ferramenta dinâmica, simula os carregamentos de diversas ações atuantes na estrutura e proporciona uma variedade de maneiras para expor os resultados das análises estruturais ao usuário de forma clara e objetiva.

4.3 AÇÕES E COMBINAÇÕES DE AÇÕES

As estruturas em geral são solicitadas por ações classificadas como permanentes, variáveis e excepcionais, entretanto, a probabilidade destas ações ocorrerem simultaneamente é baixa, correspondem a valores de 25% a 35% de probabilidade no sentido desfavorável, por isso, faz-se necessário realizar a combinação destas ações. As ações devem ser combinadas quantas vezes forem necessárias e calculadas para situações distintas, afim de garantir a segurança da edificação para a ocorrência mais desfavorável conforme ABNT NBR 8681:2003.

A ABNT NBR 8681:2003 define as ações permanentes, variáveis e excepcionais, respectivamente, como:

- “Ações permanentes: Ações que ocorrem com valores constantes ou de pequena variação em torno de sua média, durante praticamente toda a vida da construção. A variabilidade das ações permanentes é medida num conjunto de construções análogas.

- Ações variáveis: Ações que ocorrem com valores que apresentam variações significativas em torno de sua média, durante a vida da construção.
- Ações excepcionais: Ações excepcionais são as que têm duração extremamente curta e muito baixa probabilidade de ocorrência durante a vida da construção, mas que devem ser consideradas nos projetos de determinadas estruturas. ” (ABNT NBR 8681:2003, p. 1-2).

As ações permanentes são divididas em dois grupos:

- Ações permanentes diretas: peso próprio dos elementos construtivos, peso de equipamentos fixos, empuxo devido ao peso próprio de terras e outras ações permanentes aplicadas.
- Ações permanentes indiretas: protensão, retração de materiais e recalques de apoios.

As ações variáveis podem ser consideradas como: cargas acidentais (provindas do uso da edificação), os efeitos do vento, da mudança de temperatura, pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas e demais forças.

As ações excepcionais são decorrentes de explosões, enchentes, choques de veículos, incêndio, etc (ABNT NBR 8681:2003).

4.3.1 Combinações últimas das ações

De acordo a ABNT NBR 8681:2003 as combinações últimas que verificam a estrutura quanto ao limite de ruptura podem ser classificadas em:

- Combinações últimas normais;
- Combinações últimas especiais;
- Combinações últimas excepcionais.

As combinações últimas excepcionais não são tão abordadas neste trabalho em relação as demais combinações porque não serão utilizadas para os avanços desta pesquisa.

4.3.1.1 Combinações últimas normais

É necessário analisar as ações permanentes e verificar se são favoráveis ou desfavoráveis em relação às ações variáveis, assim, escolher o coeficiente de ponderação adequado. A Equação 1 apresenta o cálculo das combinações últimas normais.

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{gi,k} + \gamma_q [F_{q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} F_{qj,k}] \quad (1)$$

Onde:

γ_{gi} é o coeficiente de ponderação das ações permanentes;

$F_{gi,k}$ é o valor característico das ações permanentes;

γ_q é o coeficiente de ponderação de ações variáveis;

$F_{q1,k}$ é o valor característico da ação variável principal;

$\Psi_{0j} F_{qj,k}$ é o valor reduzido de combinação das ações variáveis secundárias.

4.3.1.2 Combinações últimas especiais ou de construção

Para determinar o valor das combinações últimas especiais, utiliza-se a Equação 2:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} F_{gi,k} + \gamma_q [F_{q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j,ef} F_{qj,k}] \quad (2)$$

Onde:

$\Psi_{0j,ef}$ é o fator de combinação efetivo das ações variáveis secundárias;

$F_{qj,k}$ é o valor característico das ações variáveis secundárias.

Quando a ação variável tiver tempo de duração muito curto, o fator $\Psi_{0j,ef}$ equivale ao fator Ψ_{2j} . Caso contrário, compara-se a Ψ_0 .

4.3.2 Combinações de utilização das ações

A ABNT NBR 8681:2003 define que o estado limite de serviço de uma estrutura é atingido quando as condições de uso normal da edificação não são atendidas: as deformações e vibrações excessivas, danos que afetam a estética causando desconforto ao usuário. A determinação do ELS é feita a partir das combinações de utilização das ações, sendo elas: quase permanente, frequente e rara.

Como o intuito deste trabalho não será a análise das combinações de ELS para a estrutura, as mesmas foram apresentadas, porém não serão discutidas no decorrer da pesquisa, embora não devem ser desconsideradas para efeitos de cálculos de dimensionamento e análise estrutural dos elementos pré-moldados.

4.3.3 Coeficientes de ponderação para combinações últimas

4.3.3.1 Coeficientes de ponderação para as ações permanentes

De acordo com a ABNT NBR 8681:2003 os coeficientes de ponderação γ_g tem objetivo de aumentar ou reduzir os valores característicos das ações permanentes. No caso de situação desfavorável em relação às ações variáveis, isto é, quando ambas agirem no mesmo sentido, o coeficiente deve majorar a ação, caso contrário, deve minorar a ação. A Tabela 1 apresenta os valores dos coeficientes de ponderação para as ações permanentes quando as ações forem consideradas separadamente. Utiliza-se os coeficientes da Tabela 2 quando consideradas agrupadas. E por fim, a Tabela 3 são os casos de efeitos de recalque de apoios e retração de materiais.

Tabela 1 – Ações permanentes diretas consideradas separadamente

Combinação	Tipo de ação	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Peso próprio de estruturas metálicas	1,25	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,30	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados ¹⁾	1,35	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,40	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos ²⁾	1,50	1,0
Especial ou de construção	Peso próprio de estruturas metálicas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,20	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados ¹⁾	1,25	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,30	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos ²⁾	1,40	1,0
Excepcional	Peso próprio de estruturas metálicas	1,10	1,0
	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	1,15	1,0
	Peso próprio de estruturas moldadas no local	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados ¹⁾	1,15	1,0
	Elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	1,20	1,0
	Elementos construtivos em geral e equipamentos ²⁾	1,30	1,0

¹⁾ Por exemplo: paredes e fachadas pré-moldadas, gesso acartonado.
²⁾ Por exemplo: paredes de alvenaria e seus revestimentos, contrapisos.

Tabela 2 – Ações permanentes diretas agrupadas

Combinação	Tipo de estrutura	Efeito	
		Desfavorável	Favorável
Normal	Grandes pontes ¹⁾	1,30	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral ²⁾	1,35	1,0
	Edificação tipo 2 ³⁾	1,40	1,0
Especial ou de construção	Grandes pontes ¹⁾	1,20	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral ²⁾	1,25	1,0
	Edificação tipo 2 ³⁾	1,30	1,0
Excepcional	Grandes pontes ¹⁾	1,10	1,0
	Edificações tipo 1 e pontes em geral ²⁾	1,15	1,0
	Edificação tipo 2 ³⁾	1,20	1,0

¹⁾ Grandes pontes são aquelas em que o peso próprio da estrutura supera 75% da totalidade das ações.
²⁾ Edificações tipo 1 são aquelas onde as cargas acidentais superam 5 kN/m².
³⁾ Edificações tipo 2 são aquelas onde as cargas acidentais não superam 5 kN/m².

Fonte: ABNT NBR 8681:2003

Tabela 3 – Efeitos de recalques de apoios e retração dos materiais

Combinação	Efeitos	
	Desfavoráveis	Favoráveis
Normal	$\gamma_c = 1,2$	$\gamma_c = 0$
Especial ou de construção	$\gamma_c = 1,2$	$\gamma_c = 0$
Excepcional	$\gamma_c = 0$	$\gamma_c = 0$

Fonte: ABNT NBR 8681:2003

4.3.3.2 Coeficiente de ponderação para as ações variáveis

Em casos que a combinação da ação variável tende a aliviar a estrutura, a mesma pode ser desprezada de acordo com a ABNT NBR 8681:2003. Os coeficientes de ponderação para as ações variáveis são apresentados na Tabela 4, quando consideradas separadamente e, na Tabela 5, quando agrupadas.

Tabela 4 – Ações variáveis consideradas separadamente

Combinação	Tipo de ação	Coefficiente de ponderação
Normal	Ações truncadas ¹⁾	1,2
	Efeito de temperatura	1,2
	Ação do vento	1,4
	Ações variáveis em geral	1,5
Especial ou de construção	Ações truncadas ¹⁾	1,1
	Efeito de temperatura	1,0
	Ação do vento	1,2
	Ações variáveis em geral	1,3
Excepcional	Ações variáveis em geral	1,0

¹⁾ Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico de modo que o valor dessa ação não pode superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado na tabela 4 se aplica a esse valor limite.

Fonte: ABNT NBR 8681:2003

Tabela 5 – Ações variáveis consideradas conjuntamente

Combinação	Tipo de estrutura	Coefficiente de ponderação
Normal	Pontes e edificações tipo 1	1,5
	Edificações tipo 2	1,4
Especial ou de construção	Pontes e edificações tipo 1	1,3
	Edificações tipo 2	1,2
Excepcional	Estruturas em geral	1,0

¹⁾ Quando as ações variáveis forem consideradas conjuntamente, o coeficiente de ponderação mostrado na tabela 5 se aplica a todas as ações, devendo-se considerar também conjuntamente as ações permanentes diretas. Nesse caso permite-se considerar separadamente as ações indiretas como recalque de apoio e retração dos materiais conforme tabela 3 e o efeito de temperatura conforme tabela 4.

Fonte: ABNT NBR 8681:2003

4.3.3.3 Valores dos fatores de combinação e de redução

A Tabela 6 apresenta os fatores de combinação e de redução que tem por objetivo minorar o valor característico das ações variáveis levando em consideração o período de ocorrência.

Tabela 6 – Valores dos fatores de combinação (Ψ_0) e de redução (Ψ_1 e Ψ_2) para as ações variáveis

Ações	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2 ^{3), 4)}
Cargas acidentais de edifícios			
Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ¹⁾	0,5	0,4	0,3
Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,7	0,6	0,4
Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento			
Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura			
Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos			
Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
Pontes rodoviárias	0,7	0,5	0,3
Pontes ferroviárias não especializadas	0,8	0,7	0,5
Pontes ferroviárias especializadas	1,0	1,0	0,6
Vigas de rolamentos de pontes rolantes	1,0	0,8	0,5
¹⁾ Edificações residenciais, de acesso restrito. ²⁾ Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ³⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para Ψ_2 o valor zero. ⁴⁾ Para combinações excepcionais onde a ação principal for o fogo, o fator de redução Ψ_2 pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7.			

Fonte: ABNT NBR 8681:2003

4.4 CARGAS VERTICAIS

A ABNT NBR 6120:1980 caracteriza os valores mínimos para carga permanente (pelo peso próprio da estrutura e dos elementos construtivos fixos e instalações permanentes) de acordo com a Tabela 7 e valor mínimo para carga acidental (atua sobre a estrutura da edificação em função do seu uso: pessoas, móveis, materiais diversos, veículos etc.), indicado na Tabela 8.

Tabela 7 – Peso específico dos materiais de construção

Materiais		Peso específico aparente (kN/m ³)
1 Rochas	Arenito	26,0
	Basalto	30,0
	Gneiss	30,0
	Granito	28,0
	Mármore e calcáreo	28,0
2 Blocos artificiais	Blocos de argamassa	22,0
	Cimento amianto	20,0
	Lajotas cerâmicas	18,0
	Tijolos furados	13,0
	Tijolos maciços	18,0
	Tijolos sílico-calcáreos	20,0
3 Revestimentos e concretos	Argamassa de cal, cimento e areia	19,0
	Argamassa de cimento e areia	21,0
	Argamassa de gesso	12,5
	Concreto simples	24,0
	Concreto armado	25,0
4 Madeiras	Pinho, cedro	5,0
	Louro, imbuia, pau óleo	6,5
	Guajuvirá, guatambu, grápia	8,0
	Angico, cabriuva, ipê róseo	10,0
5 Metais	Aço	78,5
	Alumínio e ligas	28,0
	Bronze	85,0
	Chumbo	114,0
	Cobre	89,0
	Ferro fundido	72,5
	Estanho	74,0
	Latão	85,0
	Zinco	72,0
6 Materiais diversos	Alcatrão	12,0
	Asfalto	13,0
	Borracha	17,0
	Papel	15,0
	Plástico em folhas	21,0
	Vidro plano	26,0

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6120:1980

Tabela 8 – Valores mínimos das cargas acidentais verticais

continua

Locais		Carga
1 Arquibancadas		4
2 Balcões	Mesma carga da peça com a qual se comunicam ¹	-
3 Bancos	Escritórios e banheiros	2
	Salas de diretoria e de gerência	1,5
4 Bibliotecas	Sala de leitura	2,5
	Sala para depósito de livros	4
	Sala com estantes de livros a ser determinada em cada caso ou 2,5 kN/m ² por metro de altura observado, porém o valor mínimo de	6
5 Casas de máquinas	(incluindo o peso das máquinas) a ser determinada em cada caso, porém com valor mínimo de	7,5
6 Cinemas	Plateia com assentos fixos	3
	Estúdio e plateia com assentos móveis	4
	Banheiro	2
7 Clubes	Sala de refeições e de assembleia com assentos fixos	3
	Sala de assembleia com assentos móveis	4
	Salão de danças e salão de esportes	5
	Sala de bilhar e banheiro	2
8 Corredores	Com assento ao público	3
	Sem assento ao público	2
9 Cozinhas não residenciais	A ser determinada em cada caso, porém com o mínimo de	3
10 Depósitos	A ser determinada em cada caso e na falta de valores experimentais	-
11 Edifícios residenciais	Dormitórios, sala, copa, cozinha e banheiro	1,5
	Dispensa, área de serviço e lavanderia	2
12 Escadas	Com acesso ao público	3
	Sem acesso ao público	2,5
13 Escolas	Anfiteatro com assentos fixos	
	Corredor e sala de aula	3
	Outras salas	2
14 Escritórios	Sala de uso geral e banheiro	2
15 Forros	Sem acesso a pessoas	0,5
16 Galerias de arte	A ser determinada em cada caso, porém com o mínimo	3
17 Galerias de lojas	A ser determinada em cada caso, porém com o mínimo	3
18 Garagens e estacionamentos		
	Para veículos de passageiros ou semelhantes com carga máxima de 25 kN por veículo	3
19 Ginásios de esportes	-	5
20 Hospitais	Dormitórios, enfermarias, sala de recuperação, sala de cirurgia, sala de raio X e banheiro	2
	Corredor	3

Tabela 8 – Valores mínimos das cargas acidentais verticais **conclusão**

21 Laboratórios	Incluindo equipamentos, a ser determinado em cada caso, porém com o mínimo	3
22 Lavanderias	Incluindo equipamentos	3
23 Lojas	-	4
24 Restaurantes	-	3
25 Teatros	Palco	5
	Demais dependências: cargas iguais às específicas para cinemas	-
26 Terraços	Sem acesso ao público	2
	Com acesso ao público	3
	Inacessível a pessoas	0,5
	Destinados a heliportos elevados: as cargas deverão ser fornecidas pelo órgão competente do Ministério da Aeronáutica	-
27 Vestíbulo	Sem acesso ao público	1,5
	Com acesso ao público	3

¹ Ao longo dos parapeitos e balcões devem ser consideradas aplicadas uma carga horizontal de 0,8 kN/m na altura do corrimão e uma carga vertical mínima de 2 kN/m.

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6120:1980

4.5 AÇÕES HORIZONTAIS

As ações horizontais que agem em edifícios são relacionadas ao vento e desaprumo. A ação do vento é caracterizada pela ABNT NBR 6123:1988. Neste trabalho o desaprumo será desconsiderado, portanto não haverá discussões em relação a este assunto.

A força de arrasto em virtude do vento é determinada pela Equação 6:

$$F_v = q \cdot C_A \cdot A_F \quad (6)$$

Onde:

q é a pressão de obstrução;

C_A é o coeficiente de arrasto;

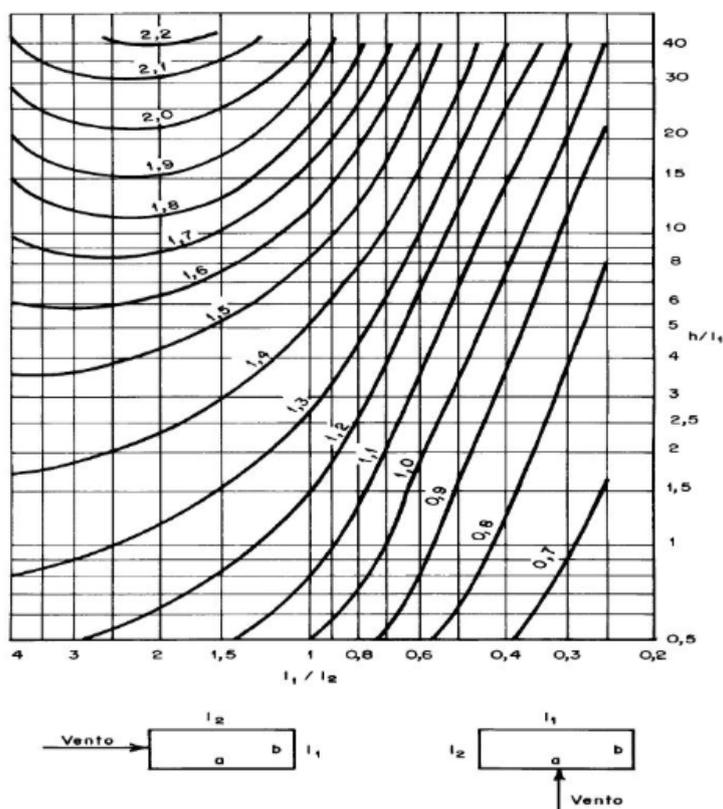
A_F é a área de incidência em m².

Segundo a ABNT NBR 6123:1988 o coeficiente de arrasto é calculado por meio dos gráficos ilustrados nas Figuras 6 para ventos com baixa turbulência e Figura 7 para ventos com regime turbulento. O regime do vento para uma edificação pode ser

estimado de alta turbulência quando sua altura não excede a duas vezes a altura média das edificações ao redor estendendo-se estas na direção do vento incidente uma distância mínima:

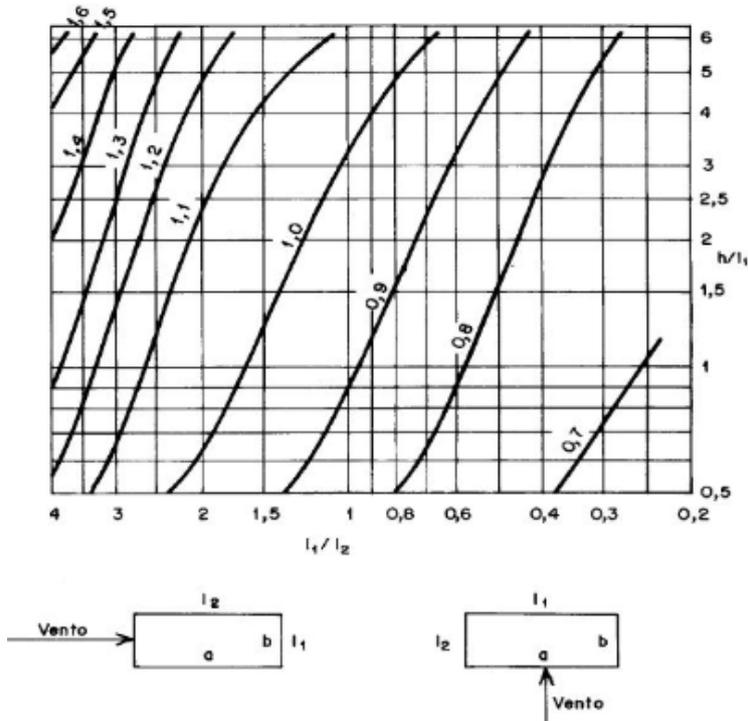
- 500 metros para edificações até 40 metros de altura;
- 1000 metros para edificações até 55 metros de altura;
- 2000 metros para edificações até 70 metros de altura;
- 3000 metros para edificações até 80 metros de altura.

Figura 6 - Coeficiente de arrasto para ventos com baixa turbulência.



Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988

Figura 7 - Coeficiente de arrasto para ventos com alta turbulência.



Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988

A pressão de obstrução devido ao vento é determinada pela Equação 7:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (7)$$

Onde:

V_k é velocidade característica do vento (m/s).

A velocidade característica é calculada pela Equação 8:

$$V_k = S_1.S_2.S_3.V_0 \quad (8)$$

Onde:

V_0 é a velocidade básica do vento calculada de acordo com o gráfico da Figura 8;

S_1 é o fator topográfico;

S_2 é o fator de rugosidade e regime de escoamento;

S_3 é o fator estatístico.

Figura 8 - Velocidade básica do vento.

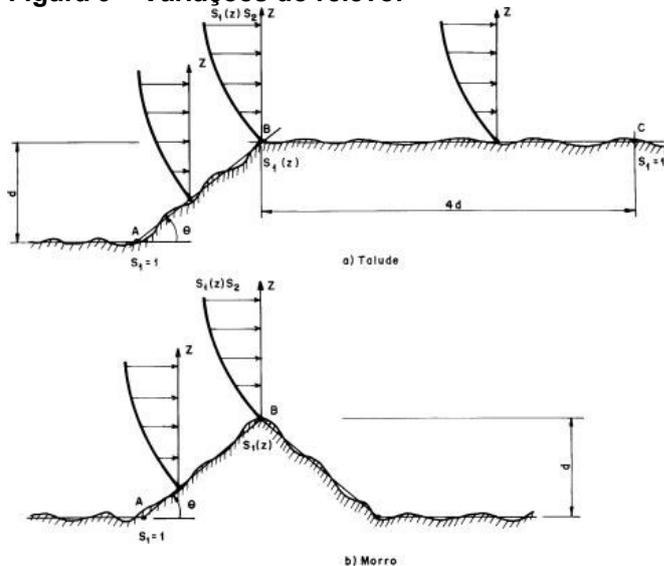


Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988

O fator topográfico S_1 considera as variações do terreno e é determinado conforme o seguinte modo (ver Figura 9), de acordo com a ABNT NBR 6123:1988:

- Se $\theta \leq 3^\circ$, $S_1 = 1$
- Se $6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$, $S_1(z) = 1 + (2,5 - z/d) \operatorname{tg}(\theta - 3^\circ)$
- Se $\theta \geq 45^\circ$, $S_1(z) = 1 + (2,5 - z/d)0,31$

Figura 9 – Variações do relevo.



Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988

O fator S_2 considera o efeito da rugosidade do terreno, a velocidade do vento e as dimensões da edificação. A ABNT NBR 6123:1988 classifica a rugosidade do terreno em cinco categorias:

- I - Superfícies Lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente;
- II - Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Obstáculos com altura média abaixo de 1,0 metros;
- III - Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos. Obstáculos com altura média de 3,0 metros;
- IV - Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Altura média dos obstáculos de 10 metros;
- V - Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Obstáculos com altura média de 25 metros ou mais.

Ainda conforme a ABNT NBR 6123:1988 a dimensão da edificação é classificada em três classes:

- Classe A – Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical seja inferior a 20 metros;
- Classe B - Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 metros;
- Classe C - Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 metros.

O cálculo de S_2 é apresentado pela equação 9:

$$S_2 = bFr\left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (9)$$

Onde:

z é a altura a ser calculado o vento;

b é obtido na tabela 9;

Fr é obtido na tabela 9;

p é obtido na tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros meteorológicos

Categoria	z (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,100	1,110	1,120
		p	0,060	0,065	0,070
II	300	b	1,000	1,000	1,000
		Fr	1,000	0,980	0,950
III	350	p	0,085	0,090	0,100
		b	0,940	0,940	0,930
IV	420	p	0,100	0,105	0,115
		b	0,860	0,850	0,840
V	500	p	0,120	0,125	0,135
		b	0,740	0,730	0,710
		p	0,150	0,160	0,175

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988

O grau de segurança necessário para uma edificação e sua vida útil é apresentado pelo fator estatístico S_3 . Os valores mínimos que podem ser adotados estão definidos na tabela 10.

Tabela 10 - Valores mínimos para o fator S_3

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988

4.6 ANÁLISE ESTRUTURAL

A análise estrutural é umas das fases mais importantes durante a elaboração do projeto estrutural e consiste na previsão do comportamento da estrutura. Os resultados da análise são indispensáveis para o início do dimensionamento de qualquer tipo de estrutura, pois o projetista se baseia nos valores obtidos dos esforços, deslocamentos e deformações para dimensionar os elementos estruturais (Martha, 2010).

O projeto estrutural em concreto pré-moldado assim como outros sistemas estruturais têm em vista assegurar a estabilidade e a rigidez da edificação. Em relação às estruturas moldadas no local, os elementos pré-moldados requerem maior cuidado e atenção uma vez que há ligações articuladas envolvidas na estrutura (El Debs, 2000).

EL DEBS (2000) propõe que os aspectos listados no Quadro 2 também devem ser avaliados durante o projeto e análise dos elementos pré-moldados.

Quadro 2 – Aspectos que devem ser considerados no projeto e na análise estruturais.

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">a) Comportamento dos elementos isoladamenteb) Possíveis mudanças do esquema estáticoc) Análise do comportamento da estrutura prontad) Incertezas na transmissão de forças nas ligaçõese) Ajustes na introdução de coeficientes de segurançaf) Disposições construtivas específicas |
|---|

Fonte: Adaptado EL DEBS (2000)

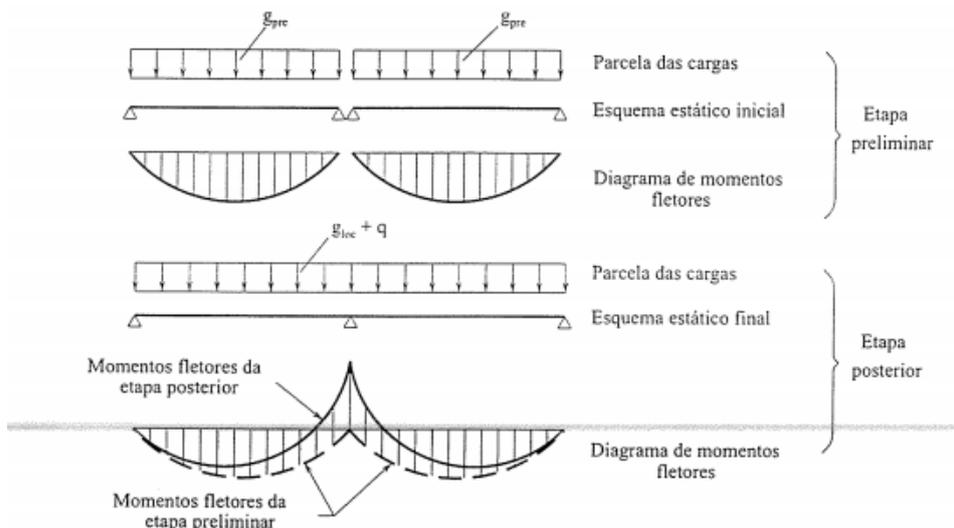
A necessidade de analisar o comportamento dos elementos isoladamente se relaciona à questão das situações transitória (desmoldagem, armazenamento, transporte e montagem) dos elementos pré-moldados, que deve ser atendida no projeto estrutural e, principalmente, na etapa de desmoldagem onde o concreto pode ainda não ter atingido resistência de projeto.

O efeito dinâmico, relacionado à movimentação da estrutura, também deve ser considerado nesta fase, onde é mensurado através de um coeficiente, podendo ser maior ou menor que 1, de acordo com a situação mais desfavorável (El Debs, 2000).

As mudanças no esquema estático da estrutura são associadas às etapas construtivas da obra e das fases de execução das ligações. EL DEBS (2000) exemplifica o caso de continuidade estrutural, onde a primeira etapa consiste na viga simplesmente apoiada com pequenas parcelas de forças atuantes na estrutura e, após o estabelecimento da continuidade, o esquema estático é a viga contínua com

atuação das parcelas de forças restantes. A Figura 10 apresenta a mudança do esquema estático explicado acima.

Figura 10 – Exemplo de mudança de esquema estático durante construção.



Fonte: EL DEBS (2000)

Dois aspectos devem ser considerados na análise do comportamento da estrutura pronta: modelagens do comportamento da estrutura e das ligações.

EL DEBS (2000) relata que o cálculo da estrutura pronta é o mesmo cálculo da estrutura moldada no local, avalia-se o comportamento elástico linear do material e a não linearidade física, sendo esta última não muito usual.

As ligações, são efetuadas como perfeitamente rígidas, porém o comportamento efetivo das mesmas pode não condizer com a idealização prevista no início, o que pode ser suposto considerando a deformabilidade das ligações.

EL DEBS (2000) afirma que as incertezas na transmissão de forças nas ligações são referentes aos desvios geométricos da estrutura, posicionamento dos elementos e apoios, variações volumétricas (fluência, retração e variação de temperatura), torções na viga devido à falta de retlineidade e devido a excentricidade horizontal entre viga e consolo que acontecem nos elementos.

Ainda sobre as incertezas na transmissão de forças nas ligações EL DEBS (2000) afirma que:

“A viga, idealizada como simplesmente apoiada, deve ter vínculos que promovam restrição à rotação ao longo do seu eixo para resistir às ações que produzam momentos de torção, como vento e cargas assimétricas. Como consequência, os desvios na montagem da viga também produzem esse tipo

solicitação. Dessa forma, os apoios da viga devem ser projetados para os esforços adicionais devido a essas incertezas no posicionamento da viga.” (EL DEBS, 2000, p.76).

De acordo MC-CEB/90 apud El Debs (2000, p.76) tanto para vigas quanto pilares, os apoios e paredes devem ser projetados para momento de torção accidental. (Ver Figura 11).

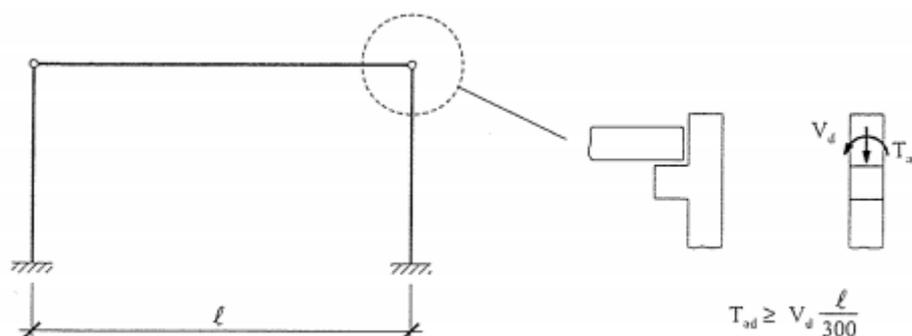
$$T_{ad} \geq V_d L/300$$

Onde:

V_d é o componente vertical da reação de apoio;

L é o vão da viga.

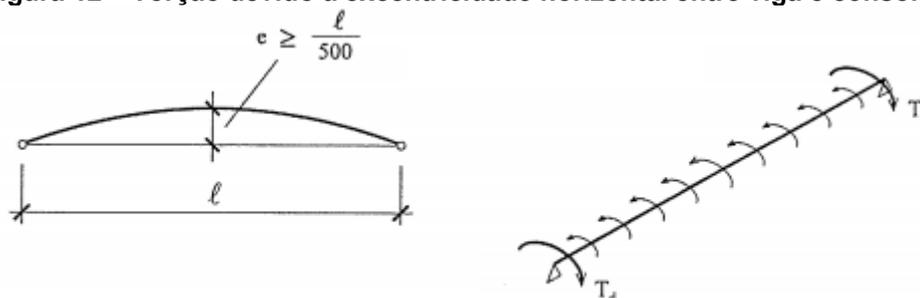
Figura 11 – Torção na viga devido à falta de retilneidade.



Fonte: Adaptado EL DEBS (2000)

Deve-se considerar os desvios do dimensionamento dos elementos. Em caso de viga MC-CEB/90 apud El Debs (2000, p.76) orienta que a estabilidade lateral devido à flexão e à torção deve ter estudos mais aprofundados considerando excentricidade não intencional no meio do vão como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Torção devido a excentricidade horizontal entre viga e consolo.

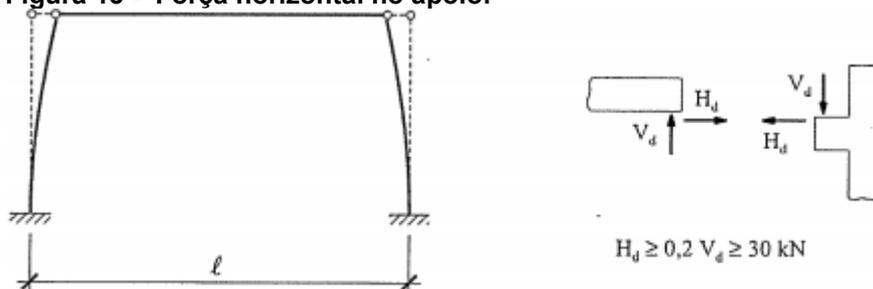


Fonte: Adaptado EL DEBS (2000)

A Figura 13 mostra a variação do comprimento de uma viga devido a aplicação de uma força horizontal entre a viga e o pilar. O recomendado em MC-CEB/90 para uma força horizontal mínima no dimensionamento do apoio da viga é descrito a seguir:

$$H_d \geq 0,2V_d \geq 30\text{kN}$$

Figura 13 - Força horizontal no apoio.



Fonte: Adaptado EL DEBS (2000)

Nos elementos pré-moldados, EL DEBS (2000) cita que: “a intensidade das solicitações nos elementos pode ser menor, comparada com a das estruturas de concreto moldado no local, devido ao fato de que parte da retração dos elementos já ocorreu quando da sua utilização da estrutura.”. Isso significa que, por mais que sejam executadas juntas de dilatação mais espaçadas nos elementos pré-moldados, não implica que seja desconsiderado os efeitos de retração e variação de temperatura na análise estrutural.

Sobre os ajustes na introdução dos coeficientes de segurança EL DEBS (2000) menciona que as medidas relacionadas à segurança são as mesmas que regem as estruturas moldadas no local, entretanto, algumas diferenças são notadas nos coeficientes de ponderações de resistência dos materiais, devido algumas particularidades, os mesmos podem ser reduzidos para os elementos pré-moldados desde que exista um grande controle durante a execução. Essa regra não se aplica aos elementos moldados no local.

A ABNT NBR 9062:2017 ainda é omissa em relação ao coeficiente de ponderação das resistências para os elementos pré-moldados e, a ABNT NBR 6118:2014 também não menciona o valor do coeficiente γ_c para estes elementos. EL DEBS (2000) faz referência a versão antiga da ABNT NBR 6118:1982 onde diz que:

“[...] pode-se invocar a NBR-6118/82, que indica coeficiente de ponderação da resistência do concreto, $\gamma_c = 1,3$, para peças pré-moldadas em usina,

executadas com cuidados rigorosos. Caso não seja feito este controle emprega-se o mesmo valor das estruturas de concreto moldado no local que é, em geral, $\gamma_c = 1,4$. Observa-se que quase sempre existem condições de efetuar um melhor controle de execução em elementos pré-fabricados. “ (EL DEBS, 2000, p.78).

E por fim, quanto às disposições construtivas específicas dos elementos pré-moldados, EL DEBS (2000) menciona que alguns parâmetros são semelhantes aos empregado nas estruturas moldadas no local e existem outras particulares das peças pré-moldadas.

“Para disposições construtivas, como dimensões mínimas, armaduras mínimas, espaçamentos máximos e mínimos da armadura, cobrimento da armadura etc., aplicam-se, em geral, as regras das estruturas de concreto moldado no local. Entretanto, podem ser consideradas algumas particularidades, justificando tratamento à parte, com base em estudos específicos. ” (EL DEBS, 2000, p. 79)

As particularidades relacionadas aos elementos pré-moldados que se resumem em recomendações específicas e devem ser consultadas antes de realizar o projeto estão listadas abaixo:

- Diâmetro da armadura longitudinal de pilares em concreto protendido;
- Painéis alveolares empregados em lajes;
- Cobrimento da armadura;
- Tubos, postes e dormentes pré-moldados;
- Comprimento mínimo de apoio de viga e de componentes de laje.

EL DEBS (2000) propõe que, ao utilizar um grande número de repetições de elementos ou de um tipo de ligações é interessante, por questões de garantia de comportamento estrutural e otimização do projeto, realizar dimensionamento ou verificação com base em resultados experimentais.

5 MATERIAIS E MÉTODO

5.1 MATERIAIS

Para realização deste trabalho foram utilizados os seguintes *software*:

- *Autodesk Revit 2018* (versão estudante);
- *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018* (versão estudante).

5.2 MÉTODO

A metodologia deste trabalho propôs a modelagem de um edifício multipavimentos por meio do processo BIM com o auxílio dos *software* da plataforma *Autodesk: Revit e Robot*.

Definido o tipo da edificação e o número de pavimentos, iniciou-se o processo da modelagem estrutural física através de um modelo arquitetônico previamente estabelecido e realiza-se o lançamento da estrutura no *Revit Structure*.

Foi realizada uma pré-análise através de um pequeno protótipo composto por quatro pilares, quatro vigas e uma laje, onde os cálculos foram verificados manualmente para validação dos resultados obtidos pelo *software*.

A modelagem estrutural analítica ocorre de forma dinâmica conforme o modelo estrutural físico foi produzido. Geralmente, são necessários alguns ajustes no modelo analítico, devido ao posicionamento automático que o próprio *software* faz do eixo de apoio das vigas no eixo dos pilares. O ajuste é feito mudando o tipo de vinculação da estrutura, será demonstrado um passo a passo de como realizar estes procedimentos. Após todos os ajustes serem feitos, o modelo é exportado para o *Robot*.

No *Robot* são aplicados os carregamentos atuantes na estrutura: cargas permanentes, carga acidental e vento, de acordo com as normas ABNT NBR 6120:1980, ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 6123:1988. As combinações das ações são definidas pelo usuário de acordo a ABNT NBR 6118:2014.

A modelagem de vigas e pilares foi representada com elementos de barras de pórtico tridimensional e as lajes foram modeladas através de elementos bidimensionais tipo casca, com análise via MEF.

Delimitado todos os dados, o usuário solicita o cálculo dos esforços da estrutura, os resultados são coletados e são indicados através da seleção dos

diagramas de esforços e deslocamentos. Com isso, são apresentados os resultados da análise estrutural.

6 ROTEIRO DE MODELAGEM ESTRUTURAL APLICANDO A TECNOLOGIA BIM

6.1 MODELAGEM ESTRUTURAL NO *REVIT*

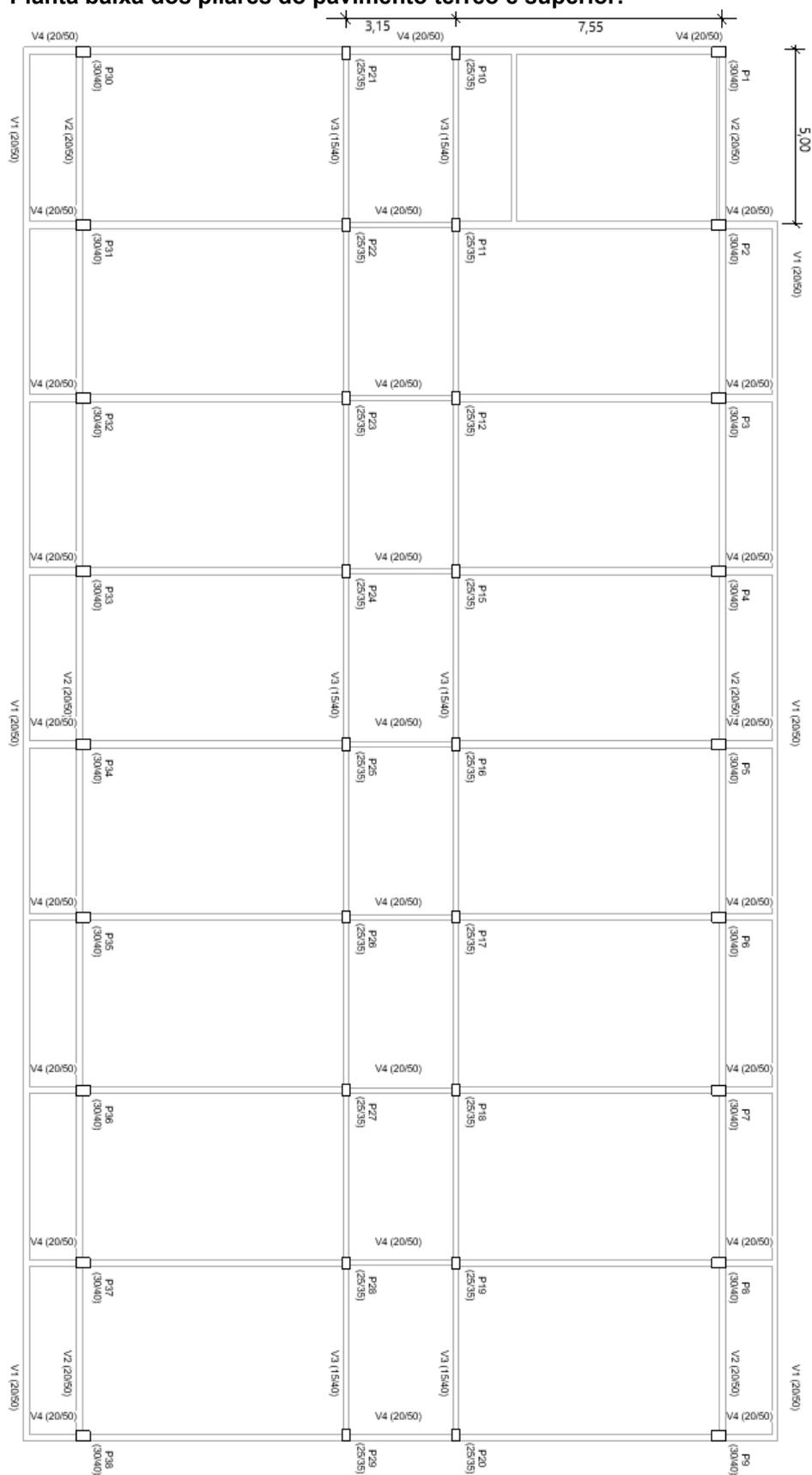
6.1.1 Modelo arquitetônico

O roteiro de modelagem estrutural iniciou-se com o projeto arquitetônico de um edifício universitário (Bloco H da UTFPR – Campus Campo Mourão) em concreto pré-moldado com resistência característica de 35 MPa.

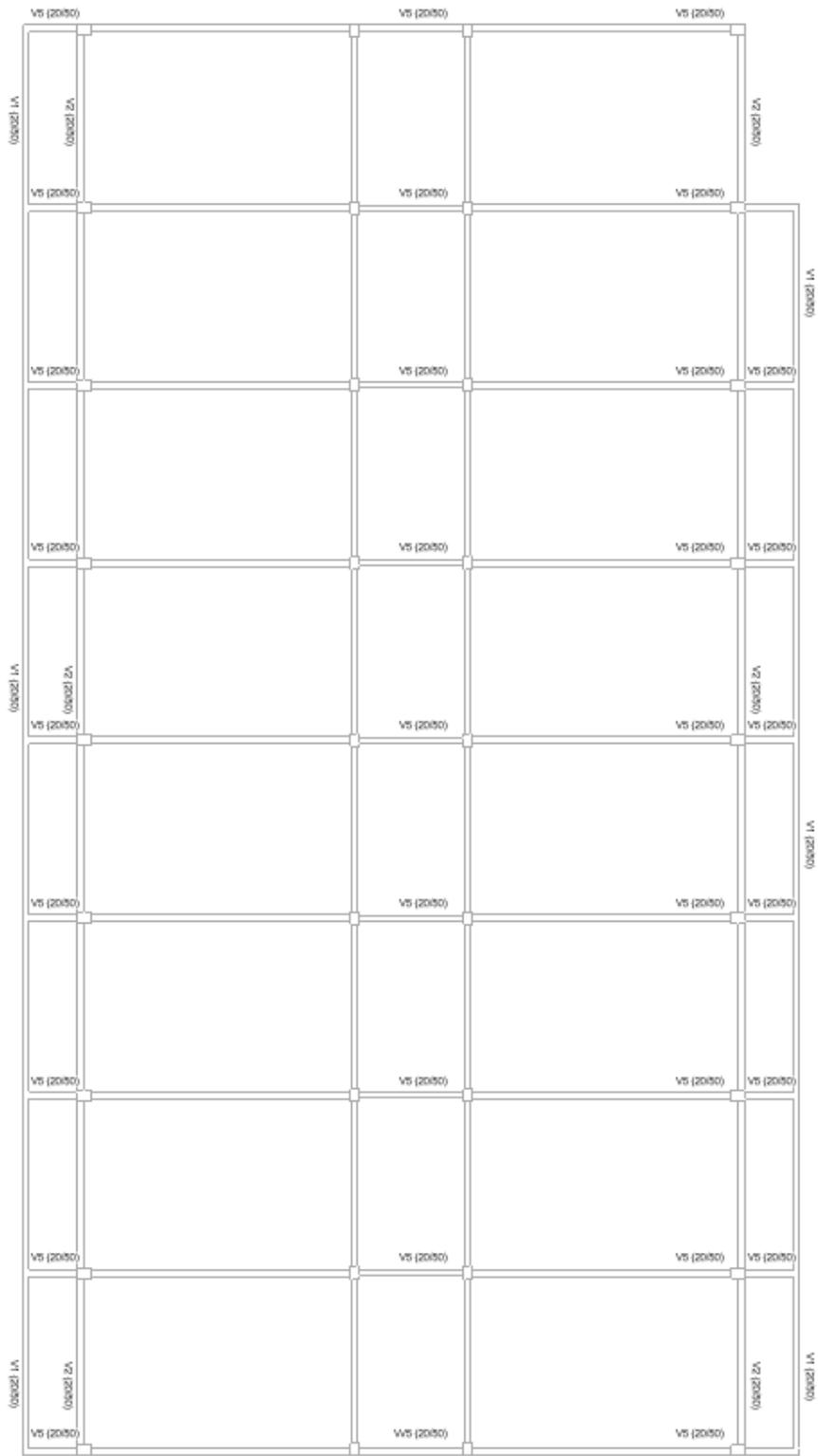
O projeto do edifício foi desenvolvido no *template* arquitetura do *Revit*. A edificação é composta de dois pavimentos, sendo o andar térreo constituído por banheiros, depósito de materiais de limpeza (DML), laboratórios e salas de aula, e o pavimento superior possui banheiros, DML, departamentos de graduação e salas de aula. As etapas referentes ao processo de modelagem arquitetônica não foram abordadas por não serem o foco deste trabalho.

As figuras 14 e 15 representam e alguns detalhes da planta arquitetônica e a estrutura tridimensional da edificação.

Figura 14 - Planta baixa dos pilares do pavimento térreo e superior.



Pavimento térreo



Pavimento superior

Fonte: Autoria própria

Figura 15 - Estrutura 3D do Bloco H da UTFPR – Campus Campo Mourão.



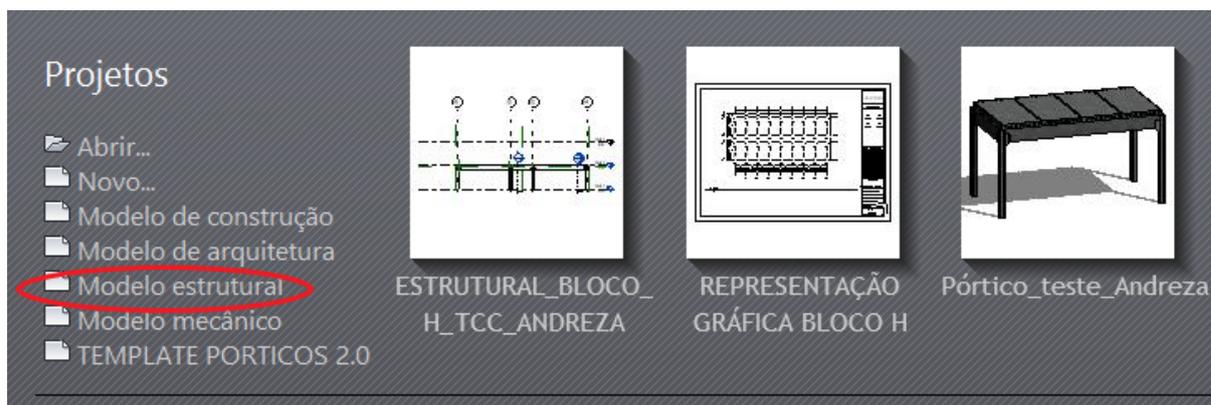
Fonte: Autoria própria

6.1.2 Definições preliminares à modelagem

Antes de iniciar a modelagem dos elementos estruturais, alguns procedimentos foram feitos: primeiramente, o projeto idealizado no modelo de arquitetura do *Revit* foi vinculado ao modelo estrutural para o lançamento dos elementos estruturais.

A Figura 16 exibe a *interface* inicial do *software Revit* onde apresenta os modelos que podem ser criados e os arquivos recentes que foram desenvolvidos. E para iniciar o processo, basta clicar na opção “Modelo estrutural”.

Figura 16 - *Interface* inicial do *Autodesk Revit*.

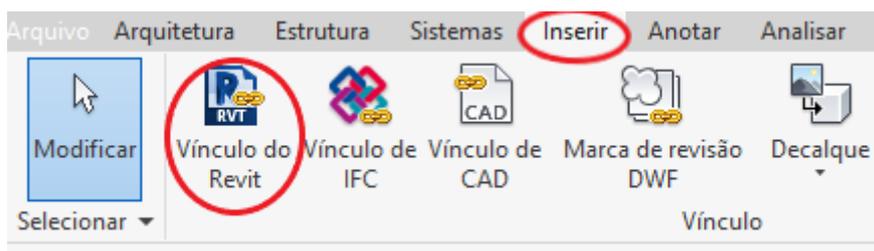


Fonte: Autoria própria

Com o modelo estrutural aberto é possível vincular o modelo arquitetônico, isto é, importar o arquivo para que este sirva de base para a modelagem estrutural.

Como mostra a Figura 17, dentro do *Revit*, no menu “Inserir”, clique em “Vínculo do Revit” e selecione o arquivo com o projeto arquitetônico. Este procedimento garante que qualquer mudança feita no projeto arquitetônico seja atualizada no modelo estrutural, de forma a prevenir possíveis incompatibilidades em relação aos elementos estruturais, por exemplo.

Figura 17 - Inserir um projeto arquitetônico como vínculo no *Revit*.



Fonte: A autoria própria

Alguns ajustes de caráter prático podem ser realizados para que o usuário se sinta mais confortável para iniciar a modelagem, por exemplo: aspectos de visibilidade e renomear as plantas do projeto. Porém, se não forem feitos, as etapas subsequentes não serão prejudicadas. Após a vinculação do modelo arquitetônico, o processo de lançamento dos elementos estruturais pode ser iniciado.

O *Revit* permite importar um conjunto de elementos com características semelhantes que auxiliam na execução do projeto de acordo com suas especificações. O conjunto de elementos com propriedades em comum, conhecidas como parâmetros e representação gráfica relacionada é chamado de família. Suas variações são caracterizadas por modelos e tipos. O *Revit* possui uma biblioteca com vários tipos de famílias e, entre elas, existe alguns elementos pré-moldados, que foram utilizados para a modelagem estrutural do edifício. E por permitir a importação destas famílias, é possível que o usuário adicione mais elementos para diversificar ainda mais a biblioteca e caso necessite de elementos que não possuem na mesma.

6.1.3 Lançamento dos elementos estruturais

Ao passo que as famílias foram parametrizadas e ajustadas conforme as dimensões e especificações necessárias é dado início ao lançamento dos elementos

estruturais que compõem o projeto. As vigas e pilares utilizados da modelagem e suas respectivas dimensões estão descritas no Quadro 3.

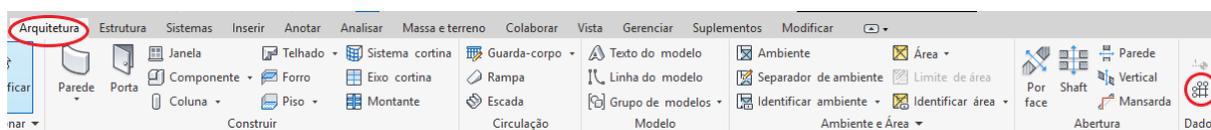
Quadro 3 – Dimensões dos pilares e vigas.

ELEMENTOS	DIMENSÕES (cm)
PILARES	30x40
	25x35
VIGAS	20x50
	15x40

Fonte: Autoria própria

Para facilitar o lançamento dos elementos é indicado a criação de eixos de orientação, afim de identificar de forma correta o posicionamento de pilares e facilitar a locação dos mesmos. No menu “Arquitetura”, clique no ícone “Eixos”, conforme mostra a Figura 18 e crie o sistema de eixos de acordo com a planta arquitetônica, de forma que cada cruzamento de eixos corresponda ao posicionamento de um pilar.

Figura 18 - Criação de eixos.



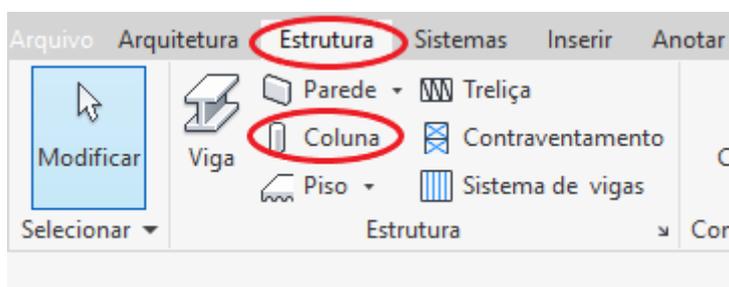
Fonte: Autoria própria

Para inserir os pilares do edifício, no menu “Estrutura”, clique no ícone “Coluna” (ver figura 19) e em seguida “Carregar família” no menu “Modificar” (ver figura 20) para inserir a família de pilares pré-moldados. Para a modelagem do edifício foi necessário realizar alguns ajustes manuais em relação a variação da seção transversal dos elementos, isto é, a criação de parâmetros nas famílias de vigas, pilares e lajes que constituem o edifício, visto que há mais de um tipo de seção de pilares e vigas. Estes parâmetros estão relacionados à base, altura e comprimento da seção transversal de vigas, pilares, lajes e consolos.

Este procedimento pode ser feito após o lançamento dos elementos estruturais. No caso dos pilares, posteriormente à inserção do primeiro elemento e mantendo o mesmo selecionado, clique no ícone “Editar família” e (ver figura 21) uma nova janela será aberta. Nela contém a imagem tridimensional do pilar, as vistas e propriedades, que podem ser configuradas de acordo a necessidade do usuário.

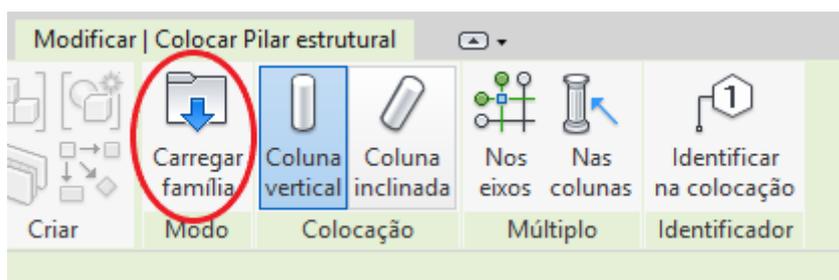
Após os ajustes serem feitos e o pilar carregado novamente no projeto, dá-se continuidade no lançamento dos elementos.

Figura 19 - Inserção de pilares.



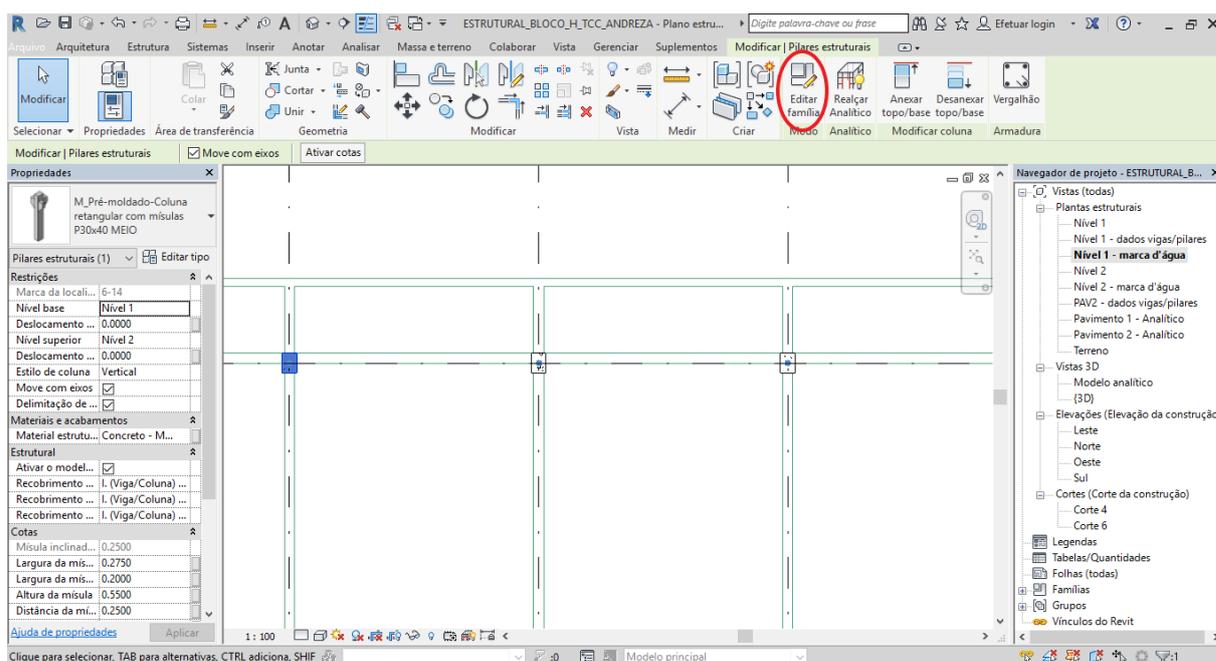
Fonte: Autoria própria

Figura 20 - Carregando família de pilares.



Fonte: Autoria própria

Figura 21 - Editar uma família de pilares.

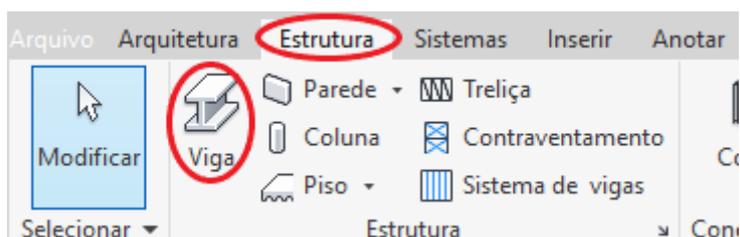


Fonte: Autoria própria

Com a disposição dos pilares completa, inicia-se o lançamento das vigas, sendo bem semelhante ao lançamento dos pilares.

Como mostra a Figura 22, no menu “Estrutura”, clique no ícone “Viga” e, em seguida “Carregar família” no menu “Modificar (ver figura 23), para inserir a família de vigas pré-moldadas.

Figura 22 - Inserção de vigas.



Fonte: Autoria própria

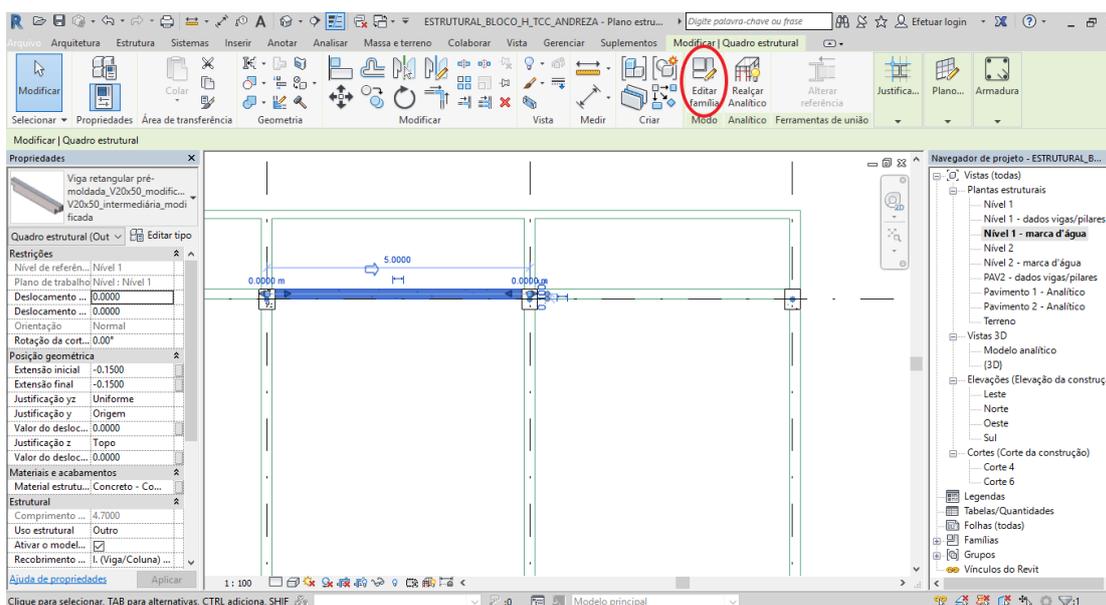
Figura 23 - Carregar uma família de vigas.



Fonte: Autoria própria

Assim como nos pilares, as vigas necessitam de ajustes manuais e podem ser repetidos os mesmos procedimentos de edição de família descritos acima e apresentados na Figura 24.

Figura 24 - Editar uma família de vigas.



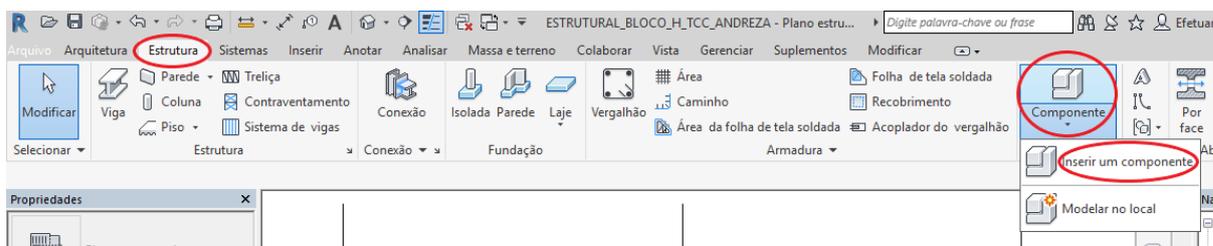
Fonte: Autoria própria

Por fim, a laje é inserida. Neste modelo, foi utilizada a laje alveolar, elemento pré-moldado característico por conter vãos em seu interior, nomeados alvéolos.

O processo de inserção do elemento laje e edição de família é um pouco semelhante do que foi descrito para pilares e vigas, porém há algumas considerações. No menu “Estrutura”, clique no ícone “Componente” e, em seguida, na opção “Inserir um componente” e busque a família de lajes pré-moldadas. Selecione o modelo desejado e insira de forma que as extremidades da laje sejam apoiadas na direção do menor vão. Caso haja a necessidade de edição, clique em “Editar família”, faça as alterações necessárias e carregue o elemento novamente ao projeto.

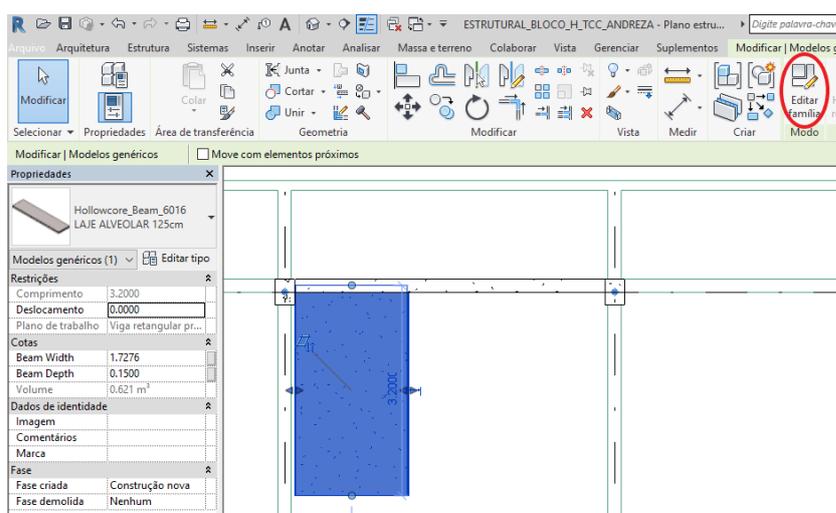
O processo para inserção e edição das lajes é descrito nas Figuras 25 e 26.

Figura 25 - Inserção de lajes.



Fonte: Autoria própria

Figura 26 - Editar uma família de lajes.



Fonte: Autoria própria

Diferentemente dos pilares e vigas, o elemento inserido de laje não gerou um modelo analítico, apenas o modelo físico. Para este trabalho, foi definida a inserção da laje dentro do *software* que realizou a análise estrutural, o *Robot*, por critérios de facilidade e preferência.

6.1.4 Ajuste do modelo analítico

Os processos descritos anteriormente são caracterizados como criação de modelo físico. Conforme a criação do modelo físico, ou seja, o posicionamento dos elementos estruturais, o modelo analítico é criado automaticamente. O modelo analítico corresponde à representação dos eixos da edificação. Em termos de análise estrutural, é muito importante que este modelo esteja bem definido em projeto, pois o comportamento da estrutura dependerá de suas definições e propriedades.

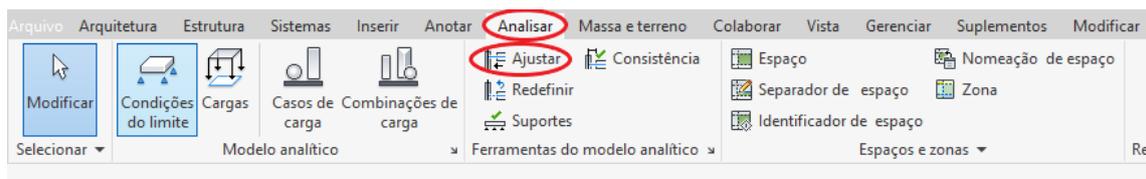
É comum que exista a necessidade de realizar ajustes no modelo analítico, devido ao posicionamento automático que o próprio *software* realiza, na maioria das vezes, sendo o encontro de eixo do pilar com eixo da viga, considerando continuidade de momentos. No edifício modelado, por se tratar de uma estrutura pré-moldada, seus apoios se comportam como rótulas, na maioria das vezes. Com isso, há a necessidade de realizar os ajustes de acordo com o projeto, devido a excentricidade do eixo das vigas com o eixo dos pilares em certos locais.

Devido a esta e demais considerações especiais, as barras analíticas das vigas foram ajustadas até o topo dos consolos dos pilares, de forma que suas extremidades

coincidissem até a metade do comprimento dos mesmos e, a altura das colunas analíticas dos pilares corresponde à altura das barras analíticas das vigas.

O procedimento para o ajuste analítico é feito da seguinte maneira: no menu “Analisar”, clique no ícone “Ajustar” (ver figura 27). É possível observar as barras coloridas e editá-las de acordo com a necessidade.

Figura 27 - Ajuste do modelo analítico.



Fonte: Autoria própria

O usuário pode realizar os ajustes em planta ou nas elevações do projeto (norte, sul, leste ou oeste), isso vai de acordo com a maior facilidade de manuseio do *software*. No menu “Modificar”, possui ferramentas que facilitam na edição das barras e colunas analíticas.

Foi utilizado a ferramenta “Plano de referência” para delimitar o posicionamento correto das barras e colunas analíticas, isto é, até qual pontos suas extremidades deveriam alcançar (ver figura 28).

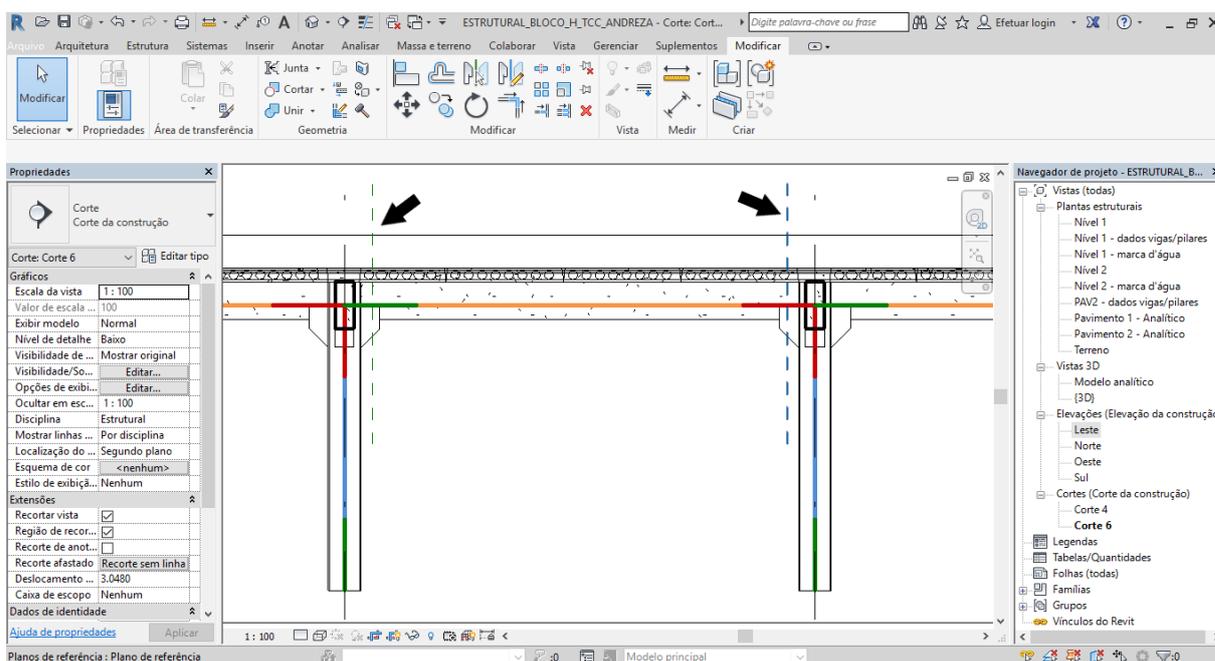
A Figura 29 apresentam uma parte da estrutura antes do ajuste e já delimitada com os planos de referência e a Figura 30, mostra como ficou o ajuste das barras de uma das vistas da estrutura. É aconselhável ocultar da vista os elementos físicos de forma que fique mais limpa a visualização do usuário para os elementos analíticos, afim de evitar ajustes errôneos.

Figura 28 - Utilização da ferramenta “Plano de referência” para delimitar o ajuste analítico das barras.



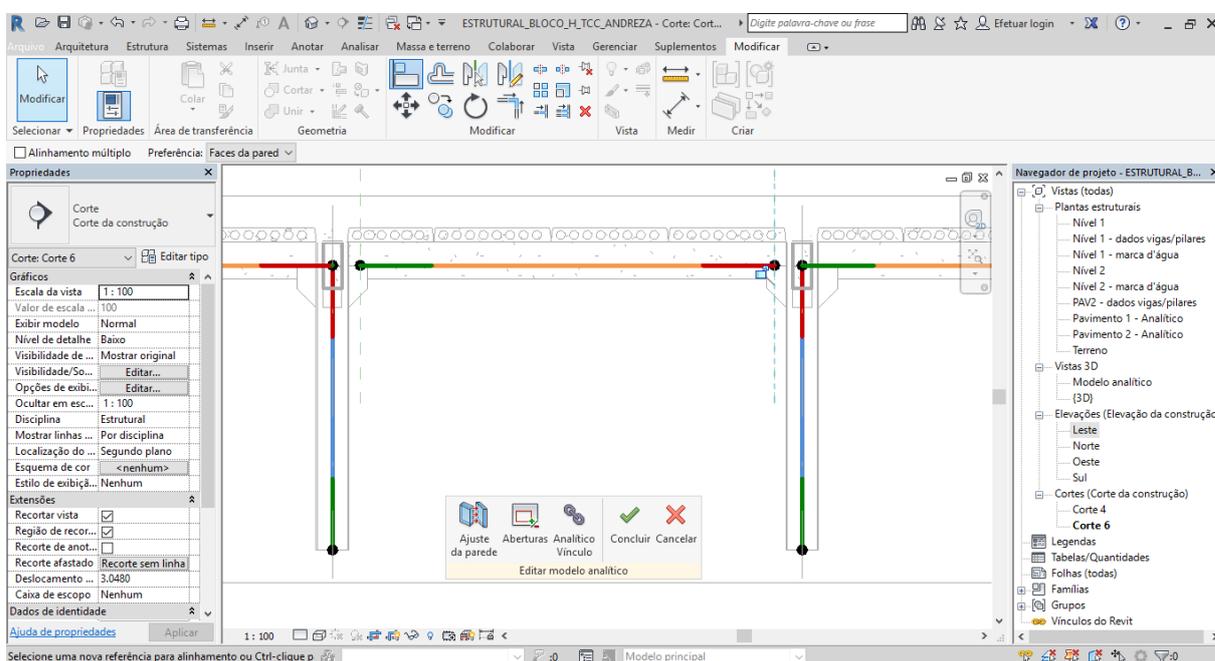
Fonte: Autoria própria

Figura 29 - Ajuste analítica das barras (antes).



Fonte: Autoria própria

Figura 30 - Ajuste analítica das barras (depois).

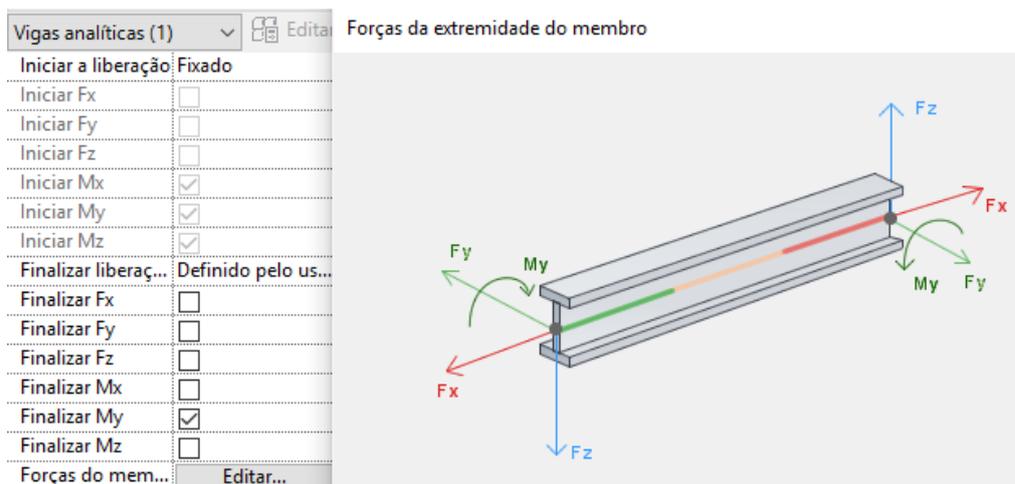


Fonte: Autoria própria

O tipo de vinculação utilizada nas peças pré-moldadas é a articulada, que pode ser relacionada à rotulação, isto é, não há transmissão de momento fletor entre seus elementos. Durante o ajuste analítico, os vínculos analíticos foram adicionados, simbolizando as rótulas e suas restrições foram definidas dentro do *Revit*. De acordo

com a orientação padrão dos eixos, sendo os eixos X e Y formando o plano e Z representando o eixo vertical, foi liberada a rotação no eixo Y local afim de representar a ligação rotulada e, restringida a rotação dos demais eixos (ver figura 31).

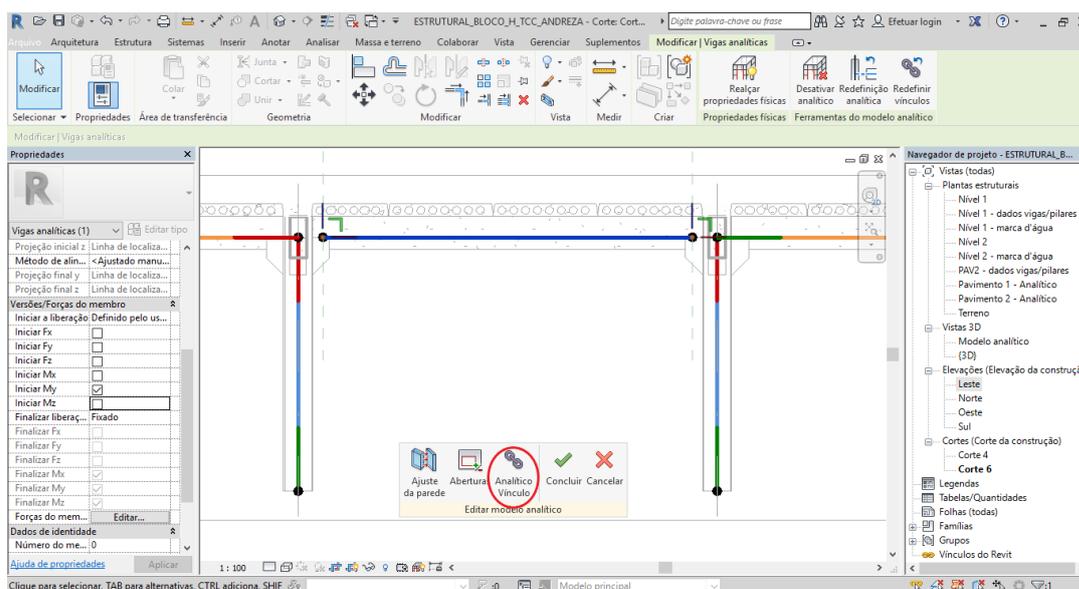
Figura 31 - Orientação dos eixos locais das vigas.



Fonte: Autoria própria

Ainda dentro da ferramenta “Ajustar”, para inserir os vínculos, basta clicar em “Analítico vínculo” (ver figura 32) e seleccionar a extremidade da coluna analítica (pilar) e, em seguida, a extremidade da barra analítica (viga).

Figura 32 - Adição de vínculos.

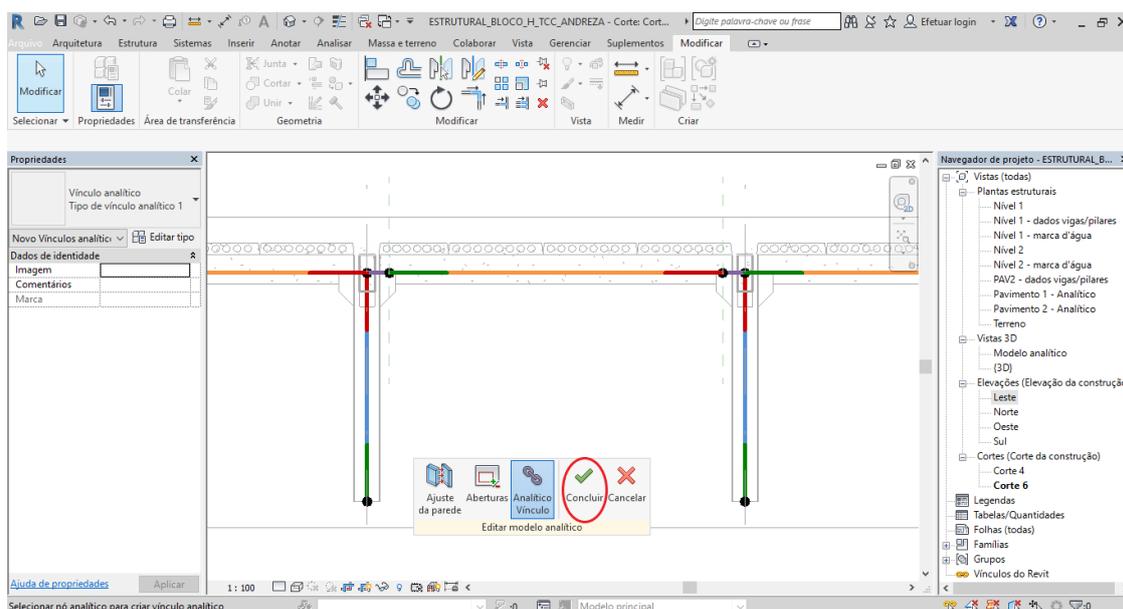


Fonte: Autoria própria

Após o ajuste ser realizado, as linhas que representam o Plano de referência podem ser deletadas, selecionando-as e apertando a tecla “Delete” no teclado e o ajuste deve ser salvo, clicando em “Concluir” (ver figura 33).

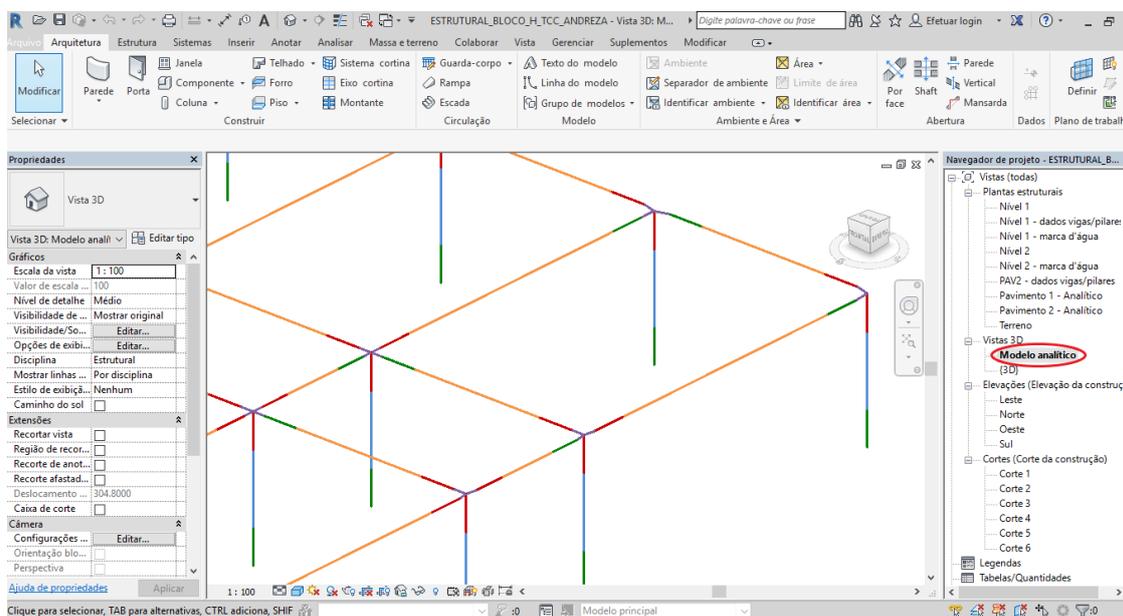
Para ver o modelo analítico, afim de verificar a disposição das barras e vínculos, vá na guia “Navegador de projeto” na aba “Vistas 3D” e um duplo clique em “Modelo Analítico” (ver figura 34).

Figura 33 - Vínculos adicionados.



Fonte: Autoria própria

Figura 34 - Vista 3D do modelo analítico.

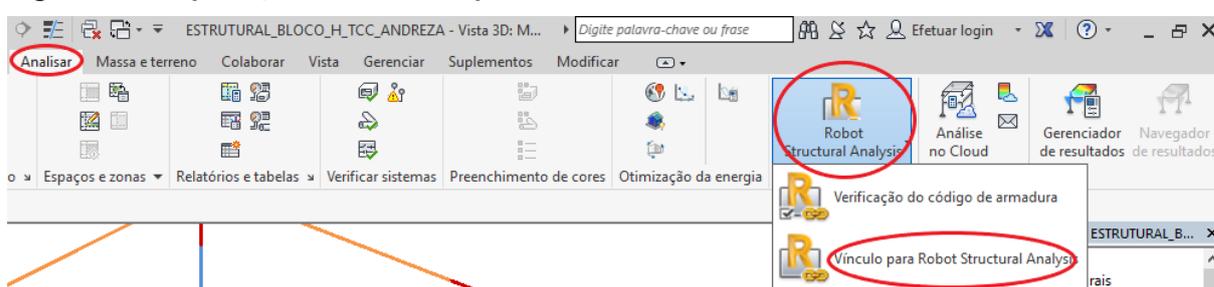


Fonte: Autoria própria

6.1.5 Exportação para o *Robot*

Após todas as definições de vinculação serem definidas e os ajustes cabíveis realizados, o modelo está pronto para ser exportado para o *Robot*. No menu “Analisar” clique no ícone “*Robot Structural Analysis*” e, em seguida, na opção “Vínculo para o *Robot Structural Analysis*” de acordo com a Figura 35.

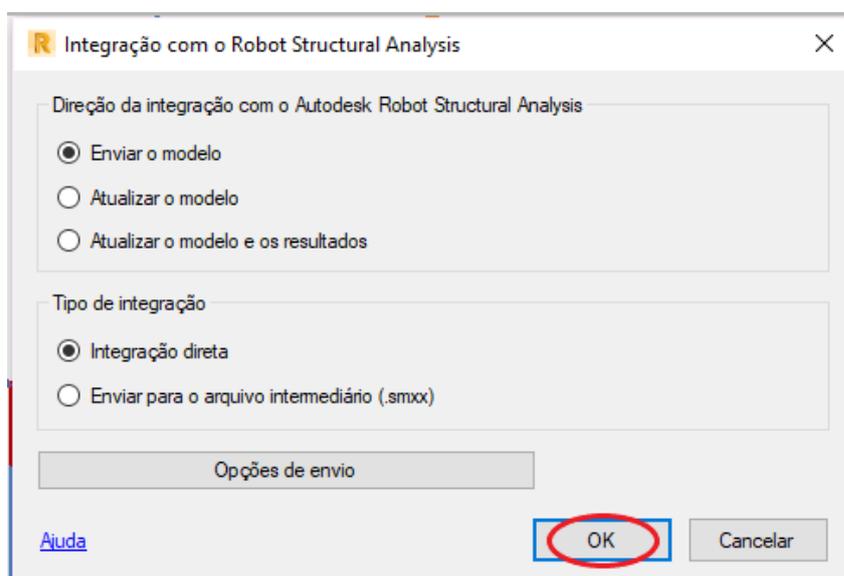
Figura 35 - Exportação da estrutura para o *Robot*.



Fonte: Autoria própria

A tela de integração com o *Robot* é exibida. Em “opções de envio” é possível ignorar ou não o peso próprio da estrutura e ainda, em qual caso de carga pretende considerar o peso próprio, conforme a figura 36. Após clicar em OK o modelo é exportado e o *Robot* abrirá automaticamente.

Figura 36 - Janela de confirmação de envio.



Fonte: Autoria própria

6.2 ANÁLISE ESTRUTURAL NO *ROBOT*

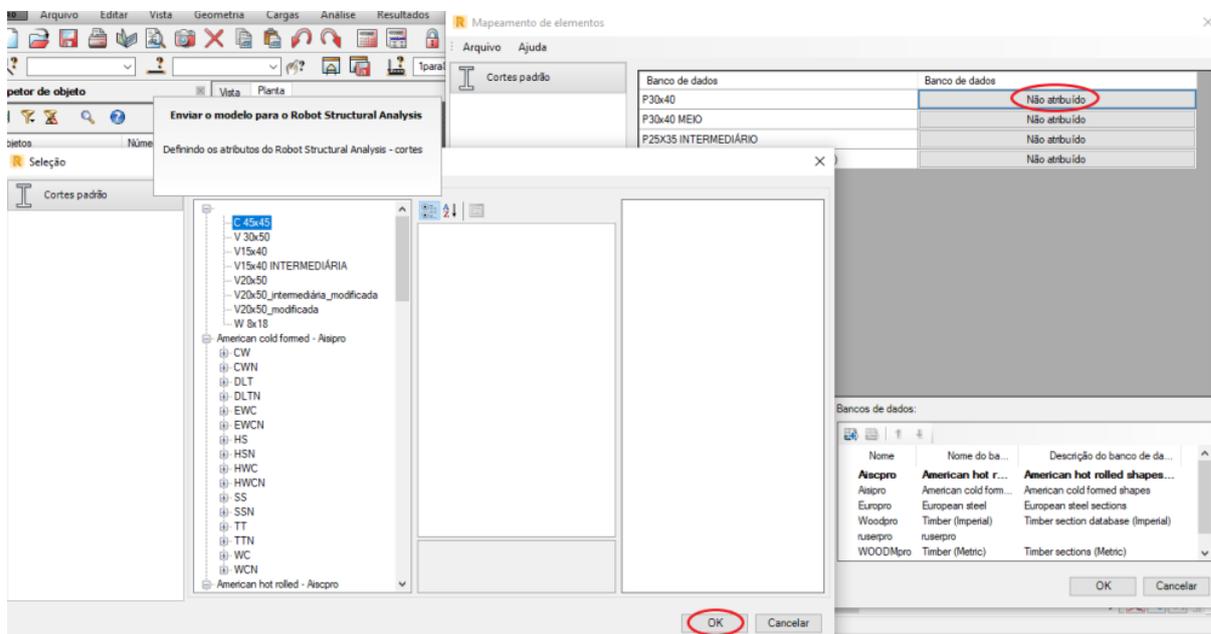
6.2.1 Definições preliminares

Os carregamentos foram definidos no *Robot*, por questões de preferência e facilidade, porém nada impede que o usuário faça estes procedimentos no *Revit*.

Ao abrir o *Robot*, seguinte tela é aberta (ver figura 37), isso ocorreu devido ao *software* não ter reconhecido algumas seções inseridas no *Revit*. Isso acontece devido a utilização de versões diferente entre os *software* ou, ainda, pela ausência de seções pré-definidas no banco de dados do *Robot*.

Basta o usuário clicar em “Não atribuído” selecionar uma seção, de preferência, da mesma geometria que a desconhecida e confirmar clicando em “OK”, independente das dimensões, pois as mesmas poderão ser alteradas/criadas posteriormente. O processo deve ser repetido para todas as seções desconhecidas pelo *software*.

Figura 37 - Mapeamento de elementos no *Robot*.

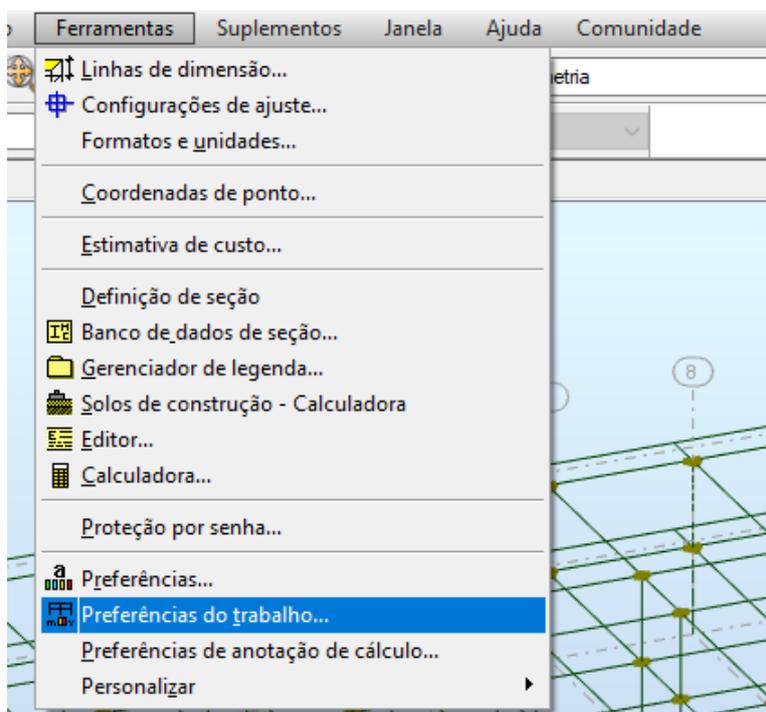


Fonte: Autoria própria

No *Robot*, foram definidas as propriedades do material e suas características. No menu “Ferramentas”, clique em “Preferências do trabalho” (ver figura 38), em seguida na aba “Material”, nesta tela exibe os tipos de materiais que o *software*

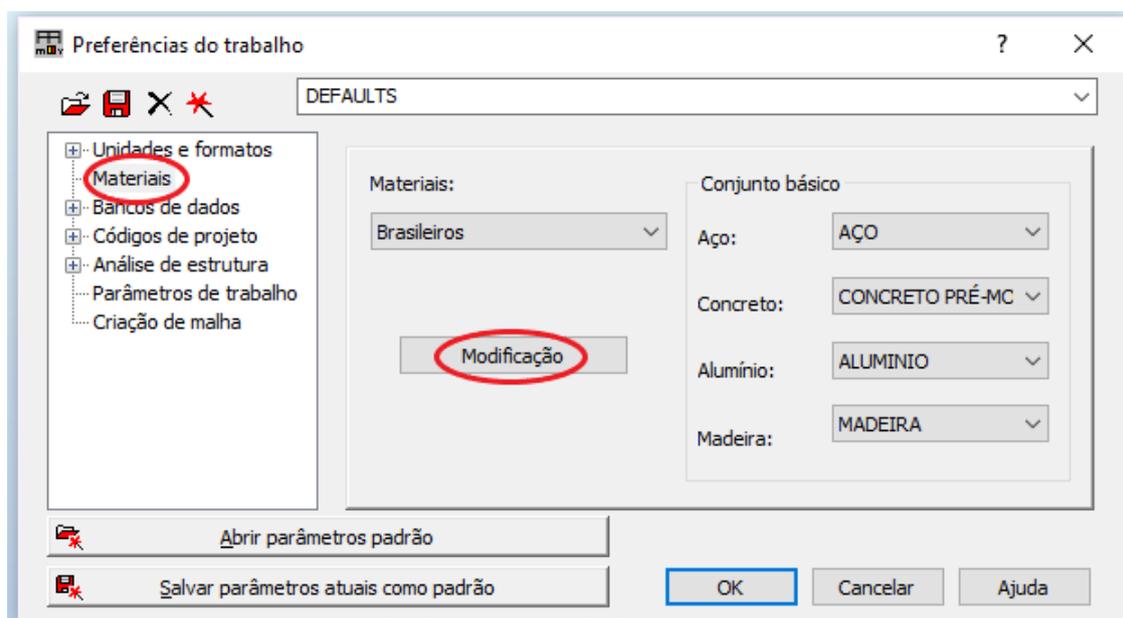
trabalha. Clique em “Modificação” e na aba “Concreto”. É possível inserir os dados relacionados com módulo de elasticidade e resistência do concreto, sendo fatores imprescindíveis na análise estrutural. Após este processo, clique em “Adicionar” e “OK”. (ver figuras 39 e 40).

Figura 38 - Acesso a ferramenta “Preferências do trabalho” no Robot.



Fonte: Autoria própria

Figura 39 - Criação de material.



Fonte: Autoria própria

Figura 40 - Definição de propriedades do material.

Definição de material

Aço **Concreto** Alumínio Madeira Outros

Nome: CONCRETO PRI Descrição: 35 MPa

Elasticidade

Módulo de Young, E: 38811,80 (MPa)
Coeficiente de Poisson, v: 0,2
Módulo de cisalhamento, G: 15524,72 (MPa)

Resistência

Características: 35,00 (MPa)
Amostra: Cilíndrico

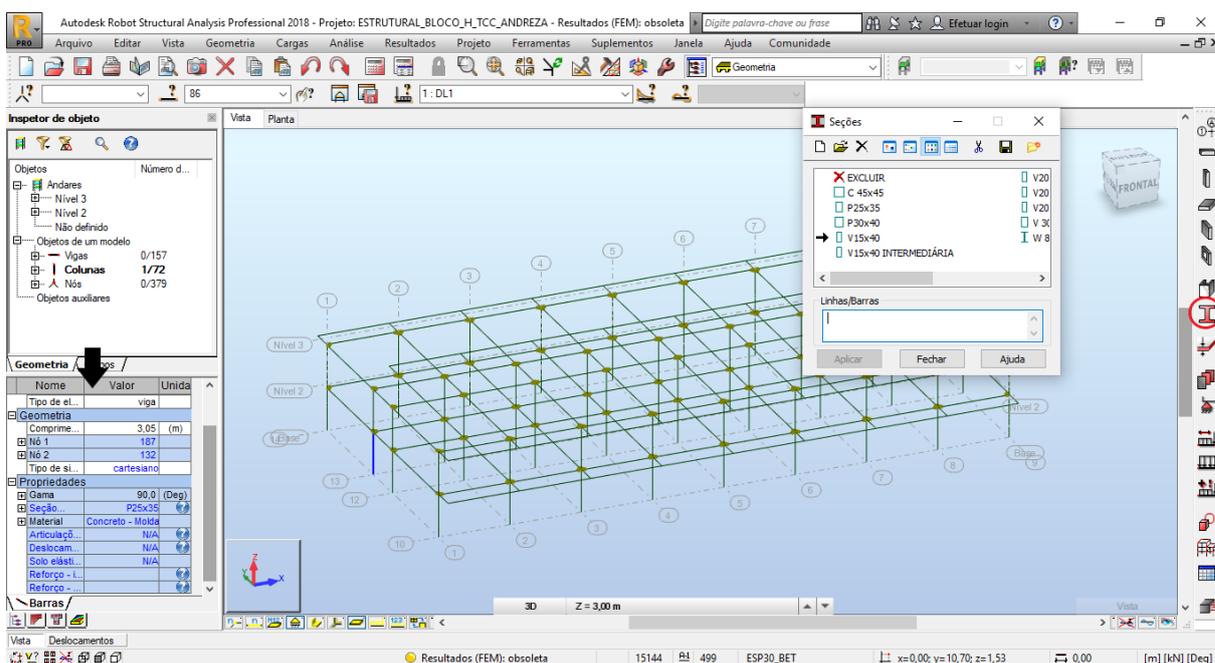
Peso específico (peso unitário): 25,00 (kN/m³)
Coef. de expansão térmica: 0,000010 (1/°C)
Relação de amortecimento: 0,15

Adicionar Excluir OK Cancelar Ajuda

Fonte: Autoria própria

Após definidos estes parâmetros, é ideal fazer a conferência das seções dos pilares e vigas e das articulações (vínculos) no painel esquerdo. Caso haja necessidade de alterar/criar alguma seção, clique no ícone “Seções da barra”. Nesta tela é exibida as seções existentes em projeto e demais seções pré-definidas do *Robot*, conforme mostra a figura 41. Na janela das Seções, é possível criar uma nova seção, definindo o seu material e dimensões, assim como editar uma seção existente, com um duplo clique sobre a seção que pretende modificar.

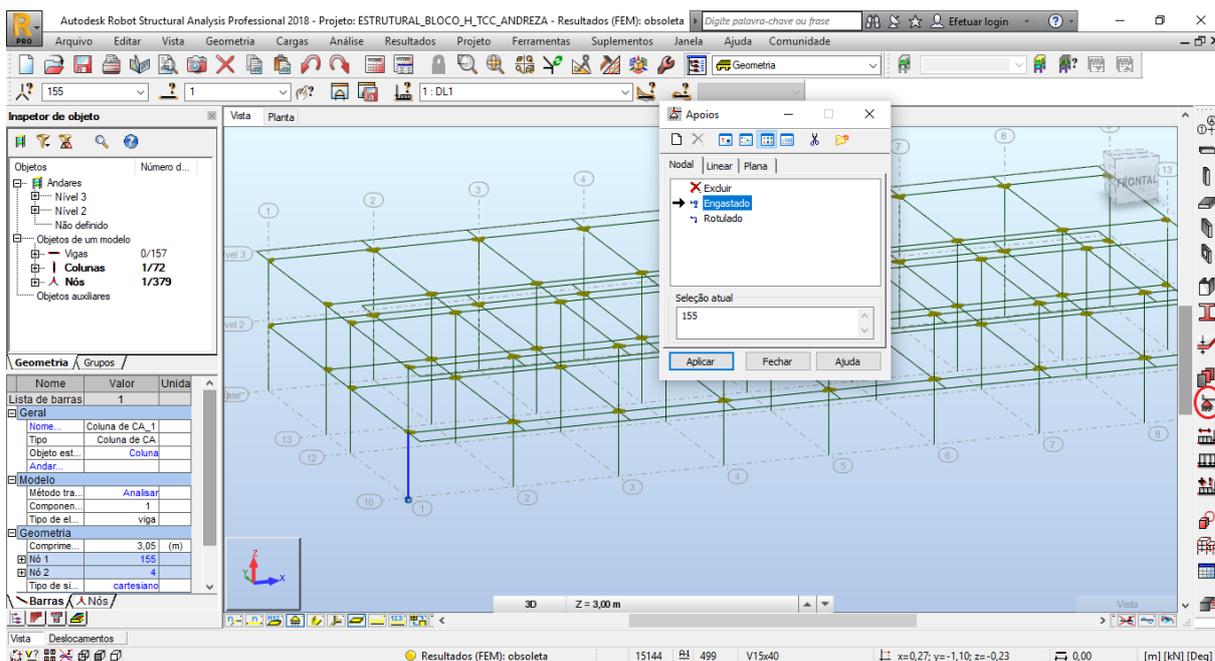
Figura 41 - Conferência de seções e alterando/criando uma seção.



Fonte: Autoria própria

O próximo passo é a definição dos apoios. Na barra lateral direita, clique no ícone “Apoios” e selecione o melhor apoio que representa a estrutura modelada. Neste caso, selecione a opção “Engastado” e clique na base dos pilares para inserir o apoio, conforme mostra a Figura 42.

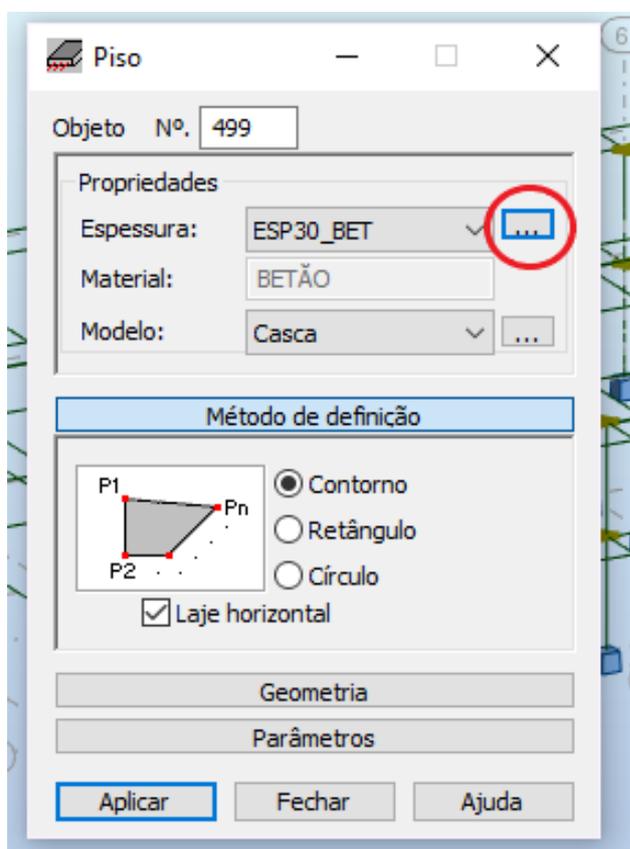
Figura 42 - Adição de apoios na estrutura.



Fonte: Autoria própria

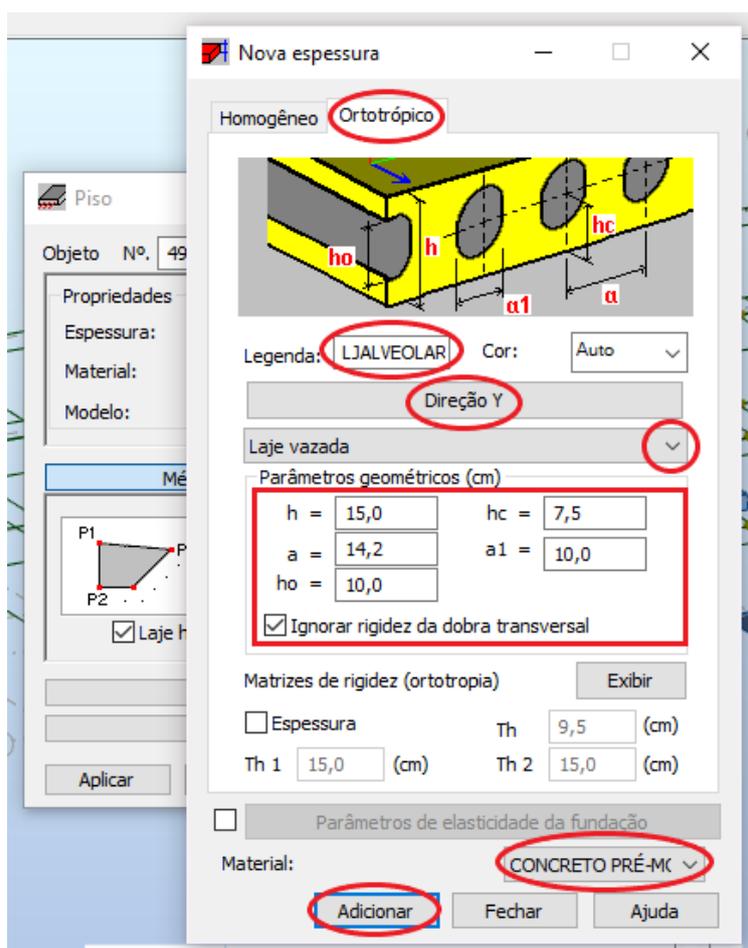
Para inserir a laje, clique no ícone “Pisos”, a tela de configuração das propriedades é aberta. De acordo com a Figura 43, clique no ícone “...” para definir o tipo de laje. Na aba “Ortotrópico” insira a legenda com o título da laje a ser utilizada, definir a direção da ortotropia, selecione a direção Y. Em seguida, as opções em destaque são as que devem ser definidas: selecione o tipo de laje, neste caso será a laje vazada que representa a laje alveolar e, em seguida, apresentar os parâmetros geométricos da laje. A Figura 44 apresenta todos os passos que devem ser seguidos e por fim clique em “Adicionar”.

Figura 43 - Definição da laje.



Fonte: Autoria própria

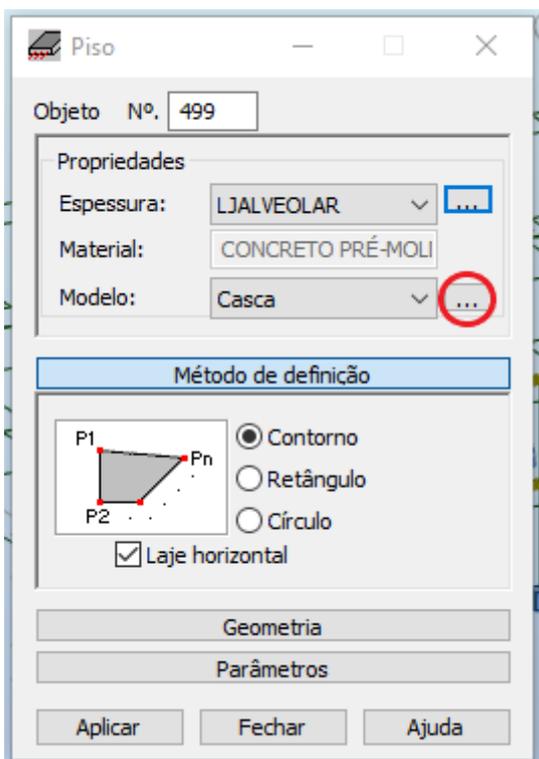
Figura 44 - Adição de um tipo de laje e inserindo características.



Fonte: Autoria própria

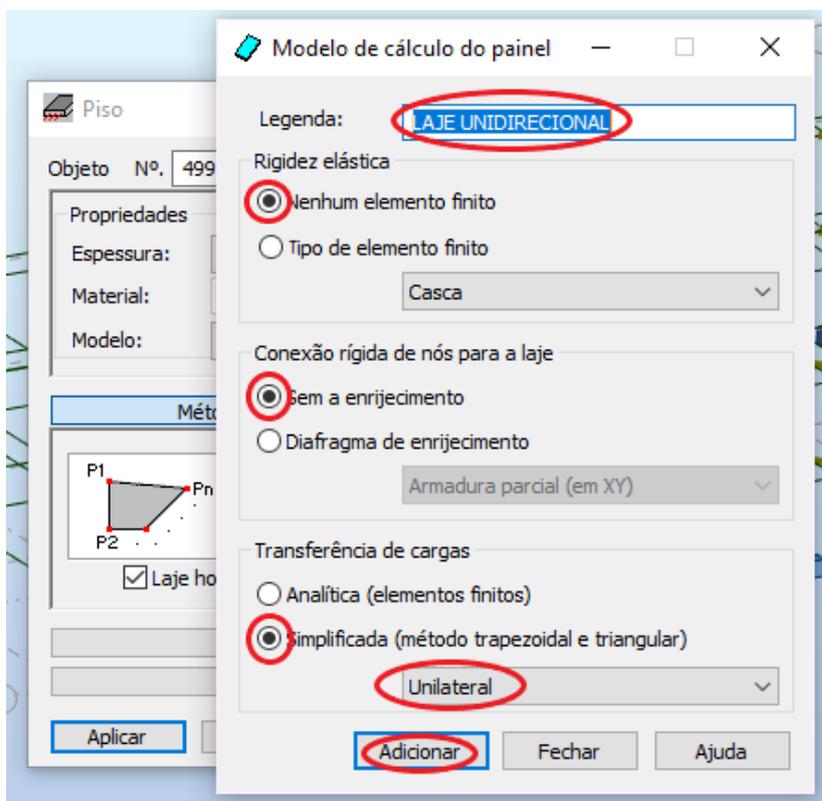
O próximo passo é definir o modelo da laje, foi utilizado o modelo unidirecional. Clique em “...” conforme a Figura 45 crie uma legenda para identificar o modelo de laje, e selecione as opções em destaque como mostra a Figura 46 e clique em “Adicionar”.

Figura 45 - Definição do modelo da laje.



Fonte: Autoria própria

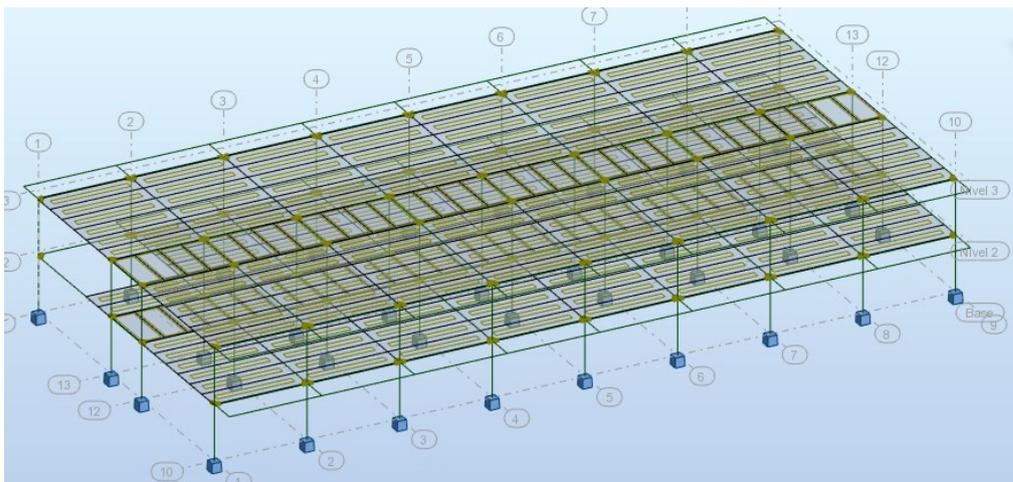
Figura 46 - Adição das características do modelo da laje.



Fonte: Autoria própria

Com todos os parâmetros definidos, a laje está pronta para o lançamento. Na opção “Método de definição” selecione a opção “Retângulo” e insira a laje marcando os pontos iniciais no sentido oposto ao vão de apoio, ou seja, pelo maior vão, para que a distribuição de cargas seja no sentido do menor vão. A Figura 47 apresenta a estrutura após a inserção das lajes.

Figura 47 – Estrutura com as lajes.



Fonte: Autoria própria

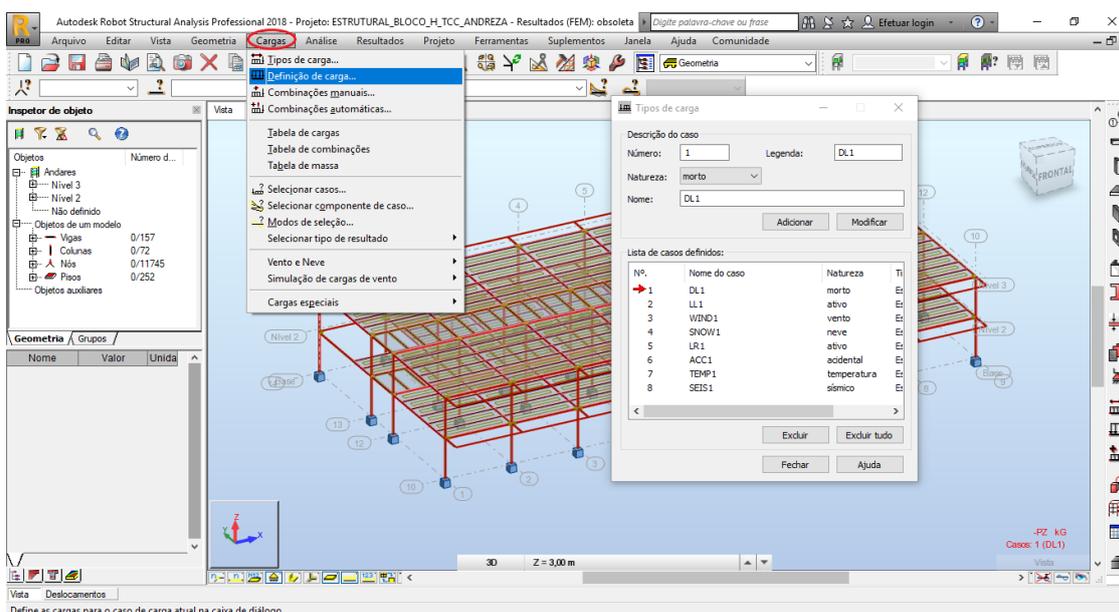
Nesta configuração, a laje está pronta para o lançamento dos carregamentos e definição dos casos de carga e combinações.

6.2.2 Definições das cargas e combinações

Para a análise estrutural do edifício, os casos de carga a serem definidos foram: permanente (peso próprio dos elementos estruturais, revestimento e parede), acidental (carga de pessoas e mobílias) e o vento (nas direções X e Y).

Os casos de cargas são definidos no menu “Cargas”, em seguida clique em “Tipos de cargas”. A tela exibe os casos de carga pré-definidos do *Robot*, o usuário pode renomear as cargas para melhor identificação ou manter as próprias configurações do *software*, sendo o caso DL1 (morto, também conhecida como permanente), LL1 (carga ativa, também conhecida por acidental) e WIND (vento) conforme apresenta a figura 48. Os demais casos não são foco deste trabalho, por isso não serão comentados.

Figura 48 - Casos de carga.



Fonte: Autoria própria

Para o caso DL1, o peso próprio dos elementos o próprio *software* calcula de acordo com as propriedades do material definidas anteriormente. Apenas a carga de revestimento deve ser inserida e para o cálculo foi considerada uma espessura de 0,03 m e o peso específico do revestimento (19 kN/m^3). O produto destes valores resulta em uma carga de $0,57 \text{ kN/m}^2$.

Para o caso LL1, a carga accidental mínima de acordo com a NBR 6120, para escolas (corredores e salas de aula) é de 3 kN/m^2 .

Para o caso do vento, a carga a ser considerada nas direções do plano, em x e y, são calculadas de acordo com as características do local da edificação, considerando os fatores topográficos, de rugosidade e regime de escoamento e estatísticos para determinar a velocidade característica, além dos coeficientes de arrasto (C_a) obtidos através dos ábacos dos ventos de baixa e alta turbulência, fator de rajada (F_r), pressão de obstrução (q) que influenciam no cálculo da força de arrasto (F_v).

Para o cálculo do fator topográfico (S1) foi consideração a variação do terreno e velocidade básica do vento (ver Figura 8). Para o efeito da rugosidade e escoamento (S2), o edifício foi classificado na Categoria IV - Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Altura média dos obstáculos de 10 metros e na Classe B - Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal

esteja entre 20 e 50 metros, de acordo com a largura e comprimento, sendo 18,65m x 40,30 m, respectivamente. E por fim, para o fator estatístico (S3), o edifício foi classificado no Grupo 2, que descreve uma edificação com alto teor de ocupação. Os cálculos foram realizados de acordo com ABNT NBR 6123:1988. O Quadro 4 apresenta todos os coeficientes e resultado da velocidade característica do vento e o Quadro 5 são as áreas de influência e os resultados da força do vento para cada pavimento do edifício. As cargas em destaque são as cargas que serão inseridas no *software*.

Quadro 4 – Coeficientes e velocidade característica do vento para cada pavimento.

Nível	Z (m)	S1	S2	S3	V0	Vk (m/s)	q
1	3,30	1,00	0,73	1,00	45,00	32,60	0,65
2	6,60	1,00	0,79	1,00	45,00	35,60	0,76

Fonte: Autoria própria

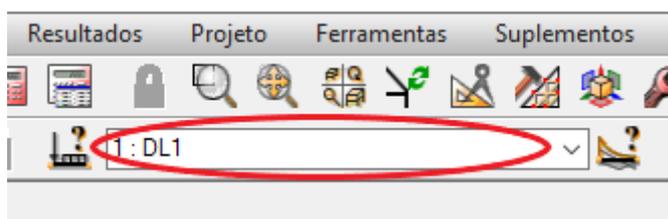
Quadro 5 – Área de influência e força do vento em cada pavimento.

Nível	Afx (m ²)	Afy (m ²)	Fvx (kN/m)	Fvy (kN/m)	Ca(x) = 0,80 Ca(y) = 1,20 Fr = 0,98
1	61,55	132,99	1,72	2,59	
2	61,55	132,99	2,05	3,07	

Fonte: Autoria própria

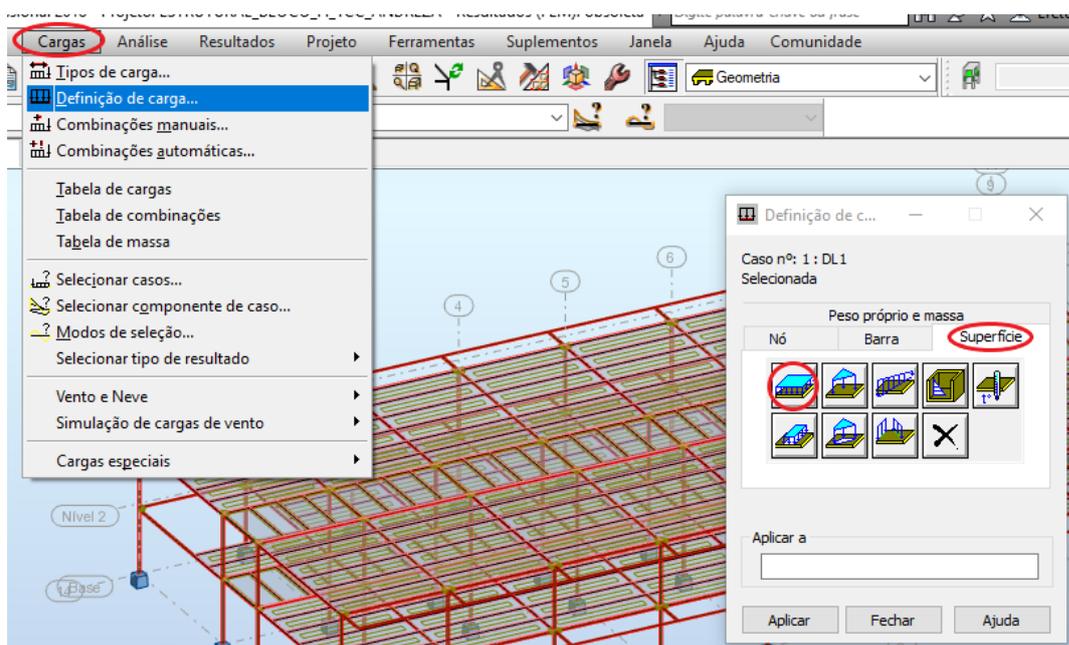
Para inserir as cargas, os respectivos casos devem estar previamente selecionados (ver figura 49) e no menu “Cargas”, clique em “Definição de cargas” e na janela aberta, clique na aba “Superfície” (ver figura 50) e insira o valor do carregamento com o sinal negativo para representar a direção do mesmo e clique em “Adicionar” e em seguida sobre as lajes da estrutura (ver figura 51).

Figura 49 - Seleção de caso de carga.



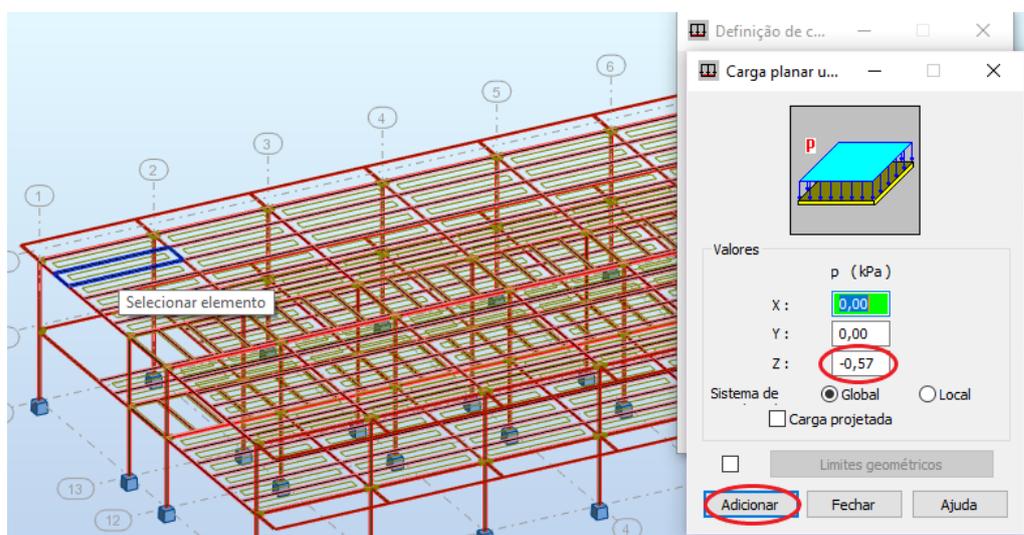
Fonte: Autoria própria

Figura 50 - Definição de carregamentos.



Fonte: Autoria própria

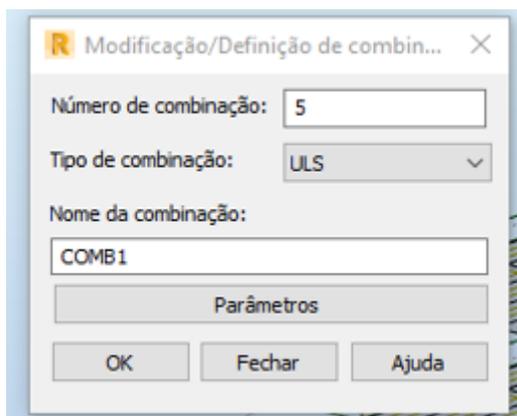
Figura 51 - Inserção dos carregamentos.



Fonte: Autoria própria

Para inserir as combinações no *Robot*, basta clicar no menu “Cargas”, em seguida em “Combinções manuais...”. De acordo com a Figura 52 selecione o tipo de carga e o nome da combinação e confirme em “OK”.

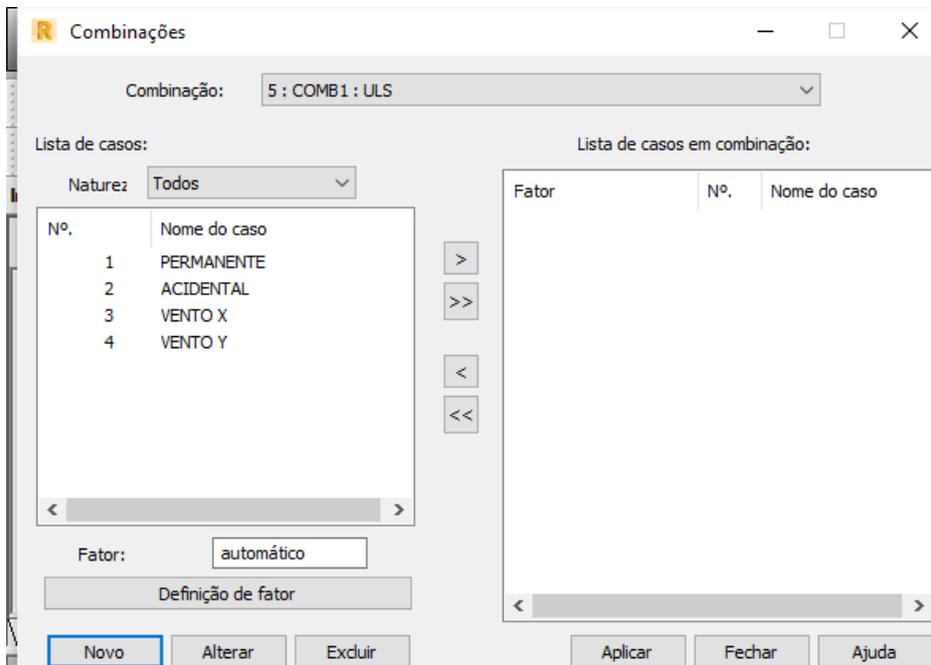
Figura 52 - Definição das combinações.



Fonte: Autoria própria

Após definir o nome da combinação, abre a janela para definir as combinações. É necessário clicar sobre o caso de carga desejado e, onde está escrito “automático”, insira o coeficiente que corresponde ao caso de carga selecionado e selecione o botão destacado conforme apresenta a Figura 53.

Figura 53 - Combinações.



Fonte: Autoria própria

Repita o processo para cada combinação que o usuário deseja inserir, atentando-se para o valor correspondente para cada caso de carga.

Para este trabalho, foram realizadas quatro combinações, descritas no Quadro 6, consideradas as mais críticas para a estrutura.

Quadro 6 – Combinações para análise dos casos críticos da estrutura.

Combinação	Fórmula	Estado
COMB1	$1,4P + 1,4AC + 0,84V_x$	ELU Normal
COMB2	$1,4P + 1,4AC + 0,84V_y$	ELU Normal
COMB3	$1,4P + 1,4V_x + 0,98AC$	ELU Normal
COMB4	$1,4P + 1,4V_y + 0,98AC$	ELU Normal
Legenda:	P - Permanente	
	AC - Acidental	
	V_x - Vento na direção X	
	V_y - Vento na direção Y	

Fonte: Autoria própria

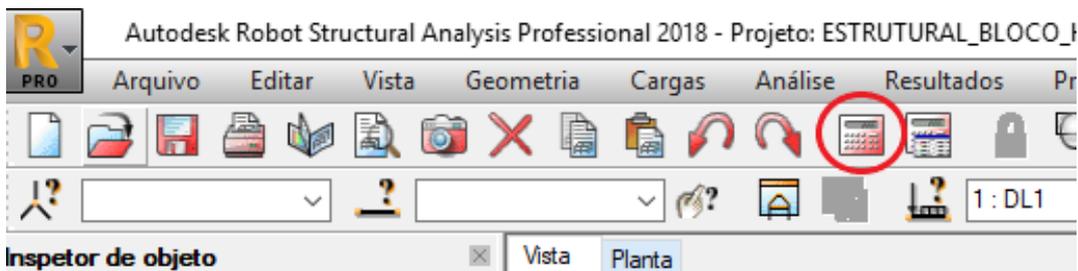
É válido salientar que, o coeficiente utilizado no peso próprio de elementos pré-moldados não foi utilizado nos cálculos visto que haveria necessidade de criar mais casos de carga: peso próprio de vigas, pilares e lajes (1,3) e peso próprio de paredes e revestimentos (1,4). Como a diferença nos esforços finais é pequena, foi desconsiderada esta hipótese.

Após todas as combinações prontas, solicite o cálculo da estrutura para finalizar.

6.2.3 Cálculos da estrutura

Com a estrutura inteiramente modelada e com todas as cargas inseridas em seus casos de cargas e combinações, inicia-se o processo da análise estrutura.

Na tela onde mostra a estrutura, conforme a Figura 54, na guia superior, clique em “Cálculos” e logo após uma nova janela é aberta informando ao usuário que os cálculos estão sendo realizados.

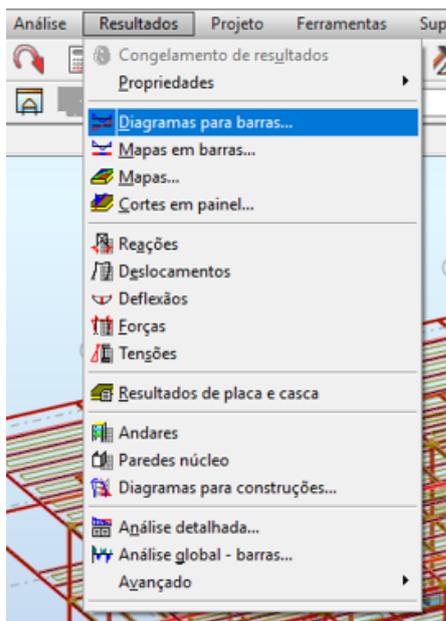
Figura 54 - Solicitação de cálculo da estrutura.

Fonte: Autoria própria

No menu “Resultados” existem alguns itens que fornecem opções para a análise estrutural. Existem itens secundários e não foram tratados neste trabalho, apenas os que são pertinentes a esta análise (ver figura 55). Ao selecionar o item “Diagrama para barras...” é possível visualizar os diagramas de esforços F_x , F_y e F_z e de momentos M_x , M_y e M_z na guia “NTM”.

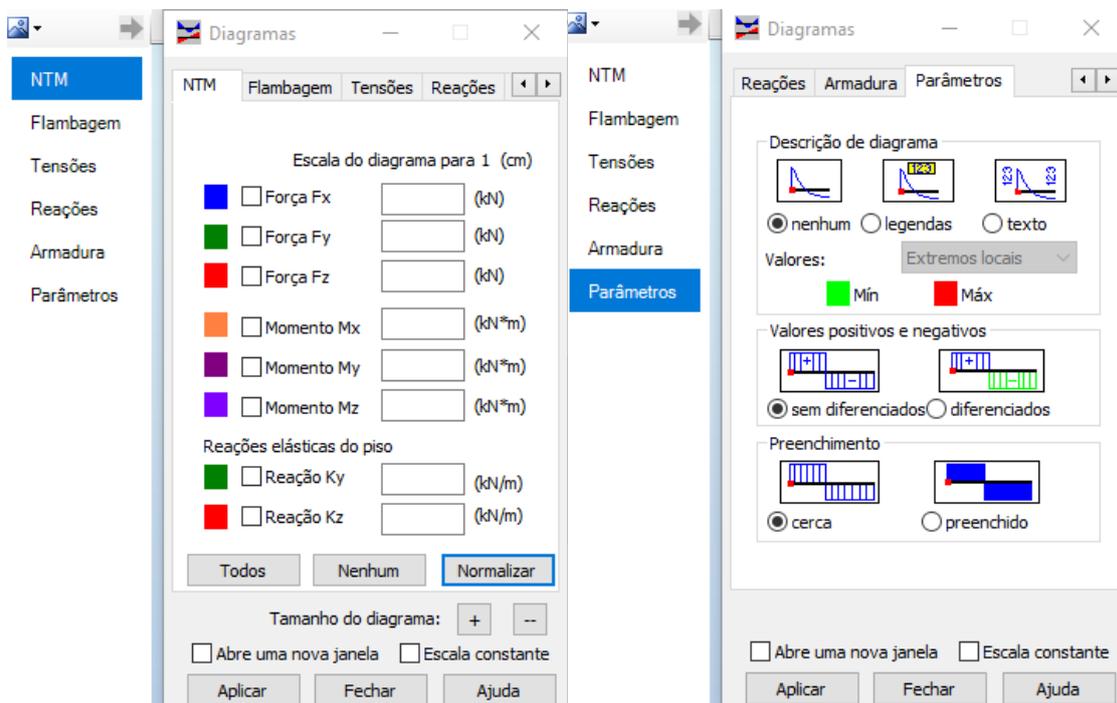
Ainda no item “Diagrama para barras...” além dos diagramas de esforços e momento, existem as opções “Flambagem” que equivale ao deslocamento da estrutura e, também as opções “Tensões”, “Reações”, “Armadura” que não foram abordados neste trabalho, e os “Parâmetros”. Nesta última opção é interessante selecionar “Texto” em “Descrição de diagrama” para que além do desenho do diagrama das barras, apareçam os valores correspondentes aos esforços, “diferenciados” e “preenchidos” para que os diagramas fiquem mais claros para leitura e interpretação (figura 56). Todos os resultados são exibidos em 3D.

Figura 55 - Comando Diagrama para barras.



Fonte: Autoria própria

Figura 56 – Definição dos parâmetros para os diagramas.



Fonte: Autoria própria

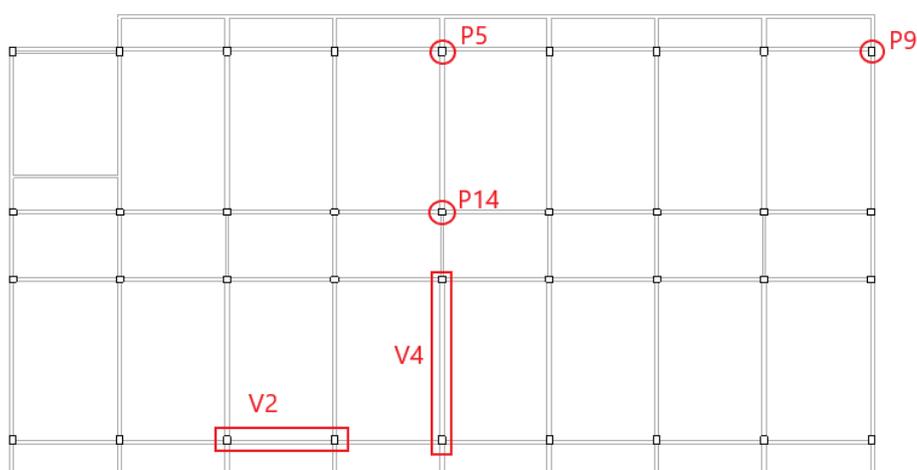
6.2.4 Análise estrutural

A análise estrutural de um elemento consiste em verificar os esforços da estrutura de acordo com seus carregamentos e identificar as situações mais críticas.

Para este trabalho não foram realizadas as combinações de transporte e montagem dos elementos pré-moldados, apenas as combinações relacionadas ao estado de limite último do elemento na configuração finalizada da edificação.

Foram selecionados seis elementos do pavimento térreo (três vigas e três pilares) para apresentar os resultados da análise e identificar as combinações mais críticas para os mesmos. A Figura 57 apresenta a planta do pavimento com a localização dos elementos analisados.

Figura 57 – Planta com a locação dos pilares analisados.



Fonte: Autoria própria

De acordo com a análise dos resultados, a combinação 2 foi a mais crítica para força normal nos pilares analisados, na qual possui a carga acidental como variável principal e o vento na direção y como variável secundária. As figuras 58, 59 e 60 ilustram os diagramas de esforço normal dos pilares P5, P9 e P14.

Figura 58 – Diagrama de esforço normal para o pilar P5.



Fonte: Autoria própria

Figura 59 – Diagrama de esforço normal para o pilar P9.



Fonte: Autoria própria

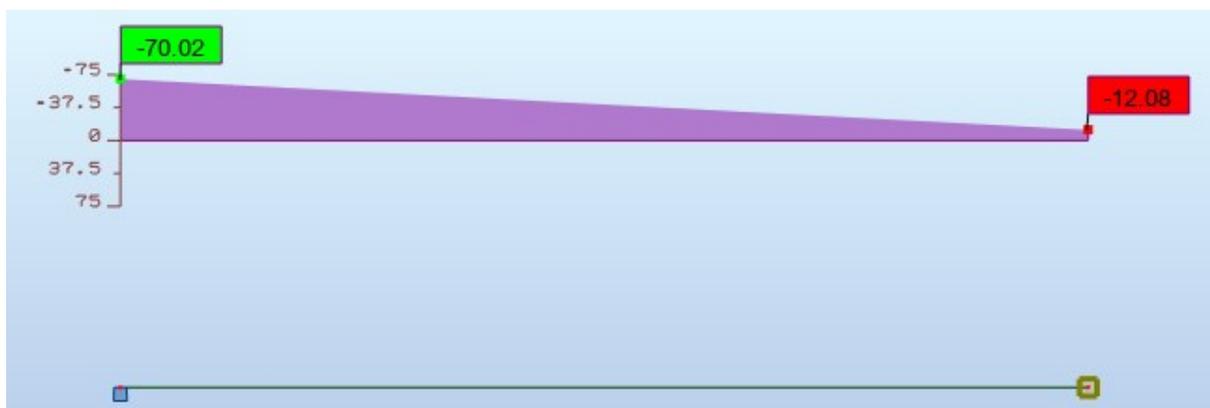
Figura 60 – Diagrama de esforço normal para o pilar P14.



Fonte: Autoria própria

A combinação 4 foi a mais crítica para o momento fletor em torno do eixo y dos pilares, que possui o vento na direção y como variável principal e a carga acidental como variável secundária. As figuras 61, 62 e 63 apresentam os diagramas de momento fletor em torno do eixo y dos pilares P5, P9 e P14.

Figura 61 – Diagrama de momento fletor em torno do eixo y para o pilar P5.



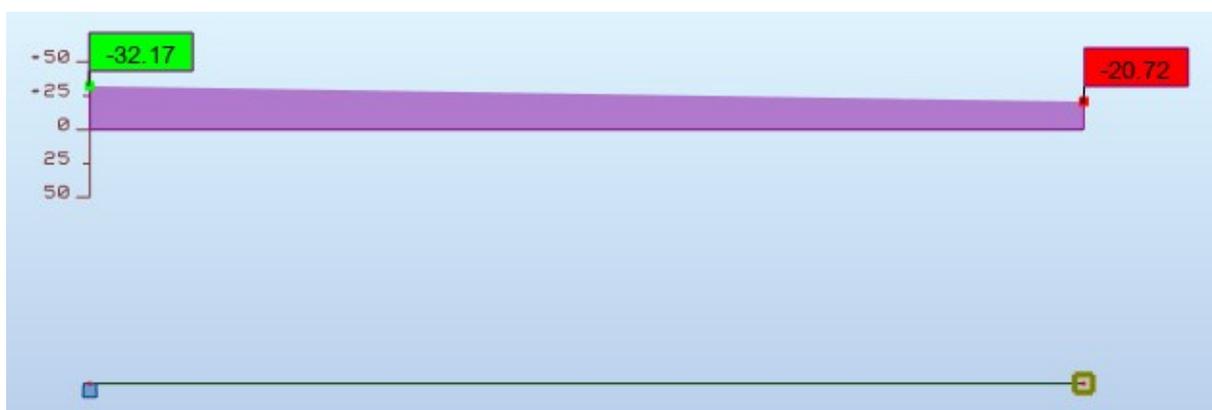
Fonte: Autoria própria

Figura 62 – Diagrama de momento fletor em torno do eixo y para o pilar P9.



Fonte: Autoria própria

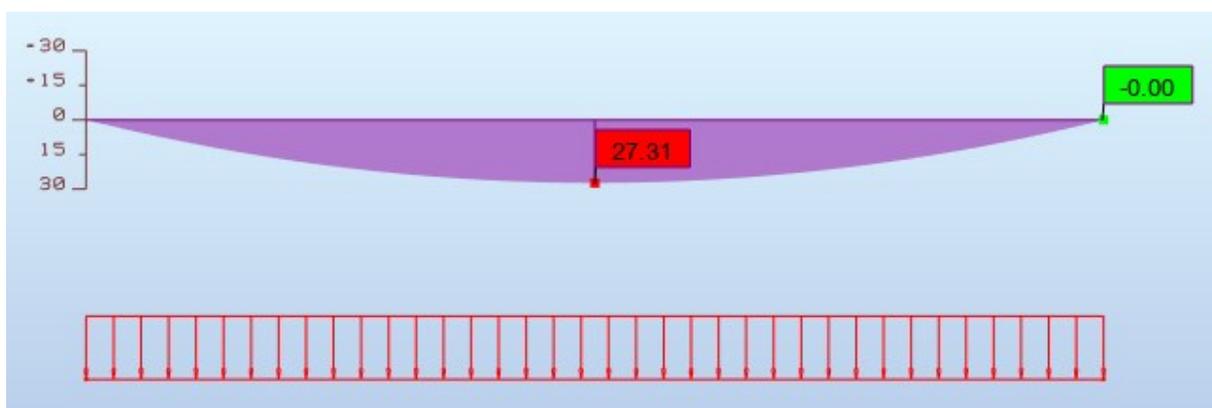
Figura 63 – Diagrama de momento fletor em torno do eixo y para o pilar P14.



Fonte: Autoria própria

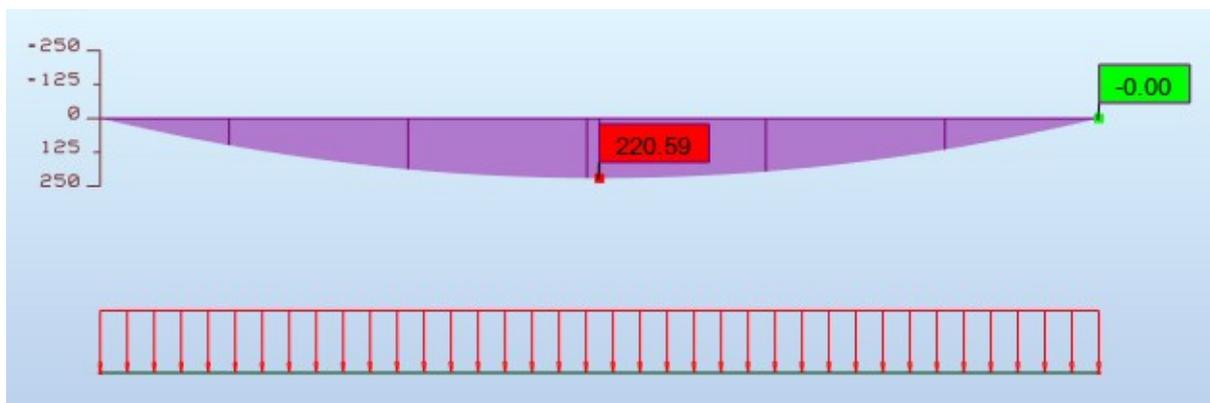
Para ambas as vigas, V2 e V4, a combinação 2 foi a mais crítica para os momentos fletores. As figuras 64 e 65, apresentam o diagrama de momento fletor em torno do eixo y destes elementos.

Figura 64 – Diagrama de momento fletor em torno do eixo y para a viga V2.



Fonte: Autoria própria

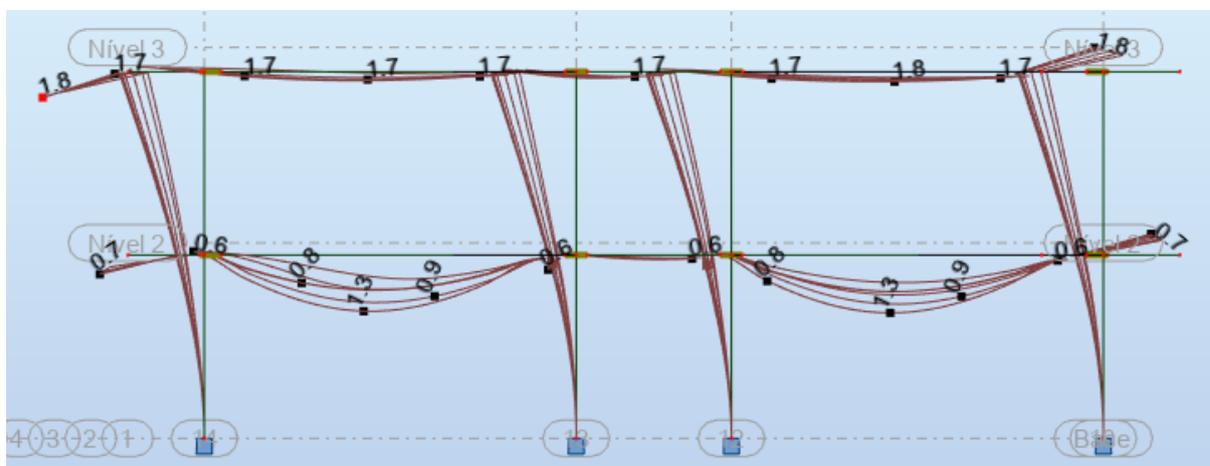
Figura 65 – Diagrama de momento fletor em torno do eixo y para a viga V4.



Fonte: Autoria própria

Os resultados dos deslocamentos da estrutura foram mais críticos com a combinação 4, com deslocamento máximo no valor de 1,8 cm apresentados na figura 66.

Figura 66 – Deslocamento horizontal da estrutura.



Fonte: Autoria própria

Os diagramas apresentados não representam os casos mais críticos para a estrutura como um todo, foram escolhidos elementos de forma aleatória, e ilustradas as situações mais críticas para os mesmos. Fica a critério do usuário gerar os diagramas dos casos que sejam interessantes para análise estrutural da edificação em estudo.

Como sugestão para trabalhos futuros, verificar quais resultados obtidos pelo *Robot* podem ser aproveitados da análise estrutural e serem exportados, em formato IFC, para dimensionamento dos elementos.

7 CONCLUSÃO

É de suma importância realizar o estudo do comportamento da estrutura, afim de verificar todos os esforços e dimensionar os elementos para resistir aos mesmos. E utilizar *software* que auxiliam tanto na modelagem da estrutura quanto em sua análise, torna o trabalho do projetista mais eficiente e ágil.

A plataforma BIM fornece praticidade e bons resultados neste processo, uma vez que permite o compartilhamento de informações através de seus *software*: com a finalização da modelagem da estrutura no *Revit* é possível exportar o arquivo para a análise estrutural do *Robot*, com um ótimo e aproveitamento das informações, salvo quando acontece alguma falta de comunicação entre os *software* e não consegue identificar alguns parâmetros. Esta falha pode acontecer devido a utilização de versões diferentes, por exemplo, o ano. Mas são incompatibilidades que não são difíceis de resolver.

Como o *Revit* trabalha com uma biblioteca de itens, caracterizados como famílias, é interessante utilizar famílias com parâmetro definidos: quanto mais parametrizada, mais facilidade o usuário terá no processo de modelagem, pois evita realizar o trabalho de editar as famílias, tarefa que demandam tempo e precisão quanto aos detalhes dos elementos.

Os processos apresentados neste trabalho podem auxiliar em futuros estudos relacionados ao dimensionamento da estrutura. Com a praticidade da modelagem e análise estrutural na plataforma BIM, é indispensável a utilização desta tecnologia como ferramenta de trabalho.

REFERÊNCIAS

ACKER, A. VAN. **Manual de Sistemas Pré-Fabricados de Concreto**. Disponível em: <[https://www.ft.unicamp.br/~cicolin/ST 725 A/mpf.pdf](https://www.ft.unicamp.br/~cicolin/ST_725_A/mpf.pdf)>. Acesso em: 13/11/2018.

ALBUQUERQUE, A. T.; EL DEBS, M. K. **Levantamento dos sistemas estruturais em concreto pré-moldado para edifícios no Brasil**. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/108.pdf>. Acesso em: 14/11/2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120 - Cargas para cálculo de estruturas de edificações**. , 1980. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123 - Forças devido ao vento em edificações**. , 1988. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681 - Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. , 2003. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - procedimento**. , 2014. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062 - Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. , 2017. Rio de Janeiro.

AUTODESK. **Revit LT**. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/products/revit/overview>>. Acesso em: 17/11/2018a.

AUTODESK. **Robot Structural Analysis Professional**. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview>>. Acesso em: 17/11/2018b.

AUTODESK. **Sobre o modelo analítico estrutural**. Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/PTB/Revit-Analyze/files/GUID-05CA5628-12C6-456C-B0B9-D922D22B67D0-htm.html>>. Acesso em: 17/11/2018.

BERGIN, M. S. **A Brief History of BIM**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/302490/a-brief-history-of-bim>>. Acesso em: 16/11/2018.

CATELANI, W. S. **Fundamentos BIM**. Disponível em: <https://cbic.org.br/arquivos/CBIC_Disseminacao_BIM_parte_1.pdf>. Acesso em: 16/11/2018.

COLOMBO, J. R. **Caderno de Apresentação de Projetos em BIM**. Disponível em: <<http://www.spg.sc.gov.br/visualizar-biblioteca/acoes/comite-de-obras-publicas/427-caderno-de-projetos-bim/file>>. Acesso em: 15/11/2018.

DIÁRIO DO NORDESTE. **Técnica de pré-moldados deve ser tendência no CE.** Disponível em: <http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/negocios/tecnica-de-pre-moldados-deve-ser-tendencia-no-ce-1.2009073>>. Acesso em: 12/10/2018.

EL DEBS, M. K. **Concreto Pré-Moldado: Fundamentos e Aplicações.** 1º ed. São Carlos: EESC USP, 2000.

EBELING, E. B. **Análise da base de pilares pré-moldados na ligação com cálice de fundação,** 2006. Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde.../2006ME_EimairBEbeling.pdf>. .

MARTHA, L. F. **Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos.** 2º ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MELLO, T.; PREVEDELLO, V. A. Z.; MASUTTI, G. C. **Estruturas Pré-Moldadas na Construção Civil: Vantagens e Desvantagens de seu uso.** Disponível em: [https://home.unicruz.edu.br/mercosul/pagina/anais/2015/2-RESUMOS/ESTRUTURAS PRE-MOLDADAS NA CONSTRUCAO CIVIL VANTAGENS E DESVANTAGENS DE SEU USO.PDF](https://home.unicruz.edu.br/mercosul/pagina/anais/2015/2-RESUMOS/ESTRUTURAS_PRE-MOLDADAS_NA_CONSTRUCAO_CIVIL_VANTAGENS_E_DESVANTAGENS_DE_SEU_USO.PDF)>. Acesso em: 16/11/2018.

MUNTE CONSTRUÇÕES INDUSTRIALIZADAS. **Manual Munte de Projetos em Pré-fabricados de Concreto.** 2º ed. São Paulo: PINI, 2007.

PORTO, S. **Pré-moldados de concreto: soluções sustentáveis e competitivas para obras habitacionais, esportivas e de infraestrutura.** Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_59.pdf>. Acesso em: 16/11/2018.