

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO CARLOS DE OLIVEIRA VICENTE

**FUNCIONALIDADES DA TECNOLOGIA BIM APLICADAS NA  
MODELAGEM E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO EM  
ALVENARIA ESTRUTURAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2019

JOÃO CARLOS DE OLIVEIRA VICENTE

**FUNCIONALIDADES DA TECNOLOGIA BIM APLICADAS NA  
MODELAGEM E ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO EM  
ALVENARIA ESTRUTURAL**

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. MSc. Ângelo 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**  
**FUNCIONALIDADES DA TECNOLOGIA BIM APLICADAS NA MODELAGEM E**  
**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM EDIFÍCIO EM ALVENARIA ESTRUTURAL**

**Por**  
**João Carlos de Oliveira Vicente**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15h50min do dia 26 de junho de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Douglas Fukunaga Surco**  
( UTFPR )

**Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira**  
( UTFPR )

**Prof. Me. Ângelo 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.*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, por sempre acreditar e investir no meu potencial, em especial a minha mãe Marli Oliveira dos Santos, que sempre será referência de cuidado e dedicação.

Ao meu orientador Angelo Giovanni Bonfim Corelhano pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivo.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil da UTFPR Campus Campo Mourão, por terem acrescentado na minha vida todos os conhecimentos necessários para que seja um bom profissional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

VICENTE, João Carlos de O. **Funcionalidades da tecnologia BIM aplicadas na modelagem e análise estrutural de um edifício em alvenaria estrutural.** 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

Este trabalho apresenta algumas das características da Tecnologia BIM que devem ser aplicadas no âmbito de modelagem arquitetônica e análise estrutural, sendo aplicado à alvenaria estrutural como objeto de estudo. Foi modelado um edifício residencial de oito pavimentos, com o software *Autodesk Revit*. E, em seguida importado para Software *Autodesk Robot Structural Analysis Professional* para que fossem inseridos os esforços na estrutura e posteriormente uma análise estrutural. Que por fim, permitiu visualizar os deslocamentos globais mediante força do vento, as tensões normais de compressão e tração, os momentos fletores causados na estrutura, além de uma breve análise sobre o quantitativo de materiais.

**Palavras-chave:** *Building Information Modeling; Autodesk Revit; Modelagem estrutural; Autodesk Robot; Análise estrutural; Alvenaria estrutural.*

## ABSTRACT

VICENTE, João Carlos de O. **Functionalities of BIM technology applied in the structural modeling and analysis of a building in structural masonry.** 62 p. Course Completion Work - Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná, Campo Mourão, 2019

This project presents some of the characteristics of BIM Technology that should be applied in the field of architectural modeling and structural analysis, being applied to structural masonry as object of study. An eight-story residential building was modeled with Autodesk Revit software. And then imported into Autodesk Robot Structural Analysis Professional Software so that the efforts were entered into the structure and then a structural analysis. Finally, it allowed to visualize the global displacements by force of the wind, the normal stresses of compression and traction, the bending moments caused in the structure, besides a brief analysis on the quantitative of materials.

**Keywords:** *Building Information Modeling; Autodesk Revit; Structural Modeling; Autodesk Robot; Structural analysis; Structural masonry.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Dimensões de uma unidade
- Figura 2 – Modelo físico de uma edificação.
- Figura 3 – Modelo analítico de uma edificação
- Figura 4 - Modelos físico e analítico de um pórtico
- Figura 5 - Modelos físico e analítico de um pórtico (Alterado)
- Figura 6 - Velocidade básica do vento
- Figura 7 – Fator topográfico
- Figura 8 – Arranjo arquitetônico do pavimento tipo7
- Figura 9 – BE Blocos estruturais
- Figura 10 – C Canaletas
- Figura 11 – Detalhe planta de primeira fiada
- Figura 12 – Detalhe planta de segunda fiada
- Figura 13 – Amarração feita de forma inadequada.
- Figura 14 – Amarração feita de forma correta.
- Figura 15 – Representação dos blocos em corte
- Figura 16 – Blocos a serem alterados.
- Figura 17 – Alteração dos blocos de 44 cm
- Figura 18 – Parede após a substituição dos blocos
- Figura 19 – Pavimento tipo finalizado
- Figura 20 – Modelo físico do pavimento tipo
- Figura 21 – Modelo analítico do pavimento tipo
- Figura 22 – Modelo analítico do pavimento tipo com aberturas
- Figura 23 – Vinculação com o Robot
- Figura 24 – Propriedade dos materiais (Alvenaria estrutural)
- Figura 25 – Propriedade dos materiais (Concreto Armado)
- Figura 26 – Espessura da laje
- Figura 27 – Vinculação em laje e paredes
- Figura 28 – Inserção de carregamento em superfície
- Figura 29 – Carregamento permanente aplicado em topo o edifício
- Figura 30 – Carregamento accidental aplicado em topo o edifício
- Figura 31 – Ação do vento na direção X
- Figura 32 – Ação do vento na direção Y

Figura 33 – Menu de combinações manuais

Figura 34 – Deslocamento devido ao Vento Y

Figura 35 – Representação do deslocamento em Y

Figura 36 – Deslocamento devido ao Vento X

Figura 37 – Representação do deslocamento em X

Figura 38 – Tensão normal que age na parede 17

Figura 39 – Momento gerado na parede 17 (ELU - Comb. 8)

Figura 40 – Momentos na laje do pavimento 1 (Laje 34)

Figura 41 – Quantitativos de blocos estruturais



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ações variáveis consideradas separadamente

Tabela 2 - Ações variáveis consideradas conjuntamente

Tabela 3 - Valores dos fatores de combinação ( $\psi_0$ ) e de redução ( $\psi_1$  e  $\psi_2$ ) para as ações variáveis

Tabela 4 - Parâmetros meteorológicos

Tabela 5 - Valores mínimos para o fator  $S_3$

Tabela 6 – Valores de  $S_2$  por pavimento

Tabela 7 – Força do vento em X e Y

Tabela 8 – Força do vento por metro em X e Y

Tabela 9 – Combinações de ELU

Tabela 10 – Combinações de ELS

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (Modelagem de Informações da Construção)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (desenho assistido por computador)
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>15</b>
<b>3 JUSTIFICATIVAS</b> .....	<b>16</b>
<b>4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
<b>4.1 Alvenaria estrutural</b> .....	<b>17</b>
4.1.1 Modulação.....	17
4.1.2 Componentes .....	18
<b>4.2 Tecnologia BIM</b> .....	<b>20</b>
4.2.1 BIM.....	20
4.2.2 <i>Autodesk Revit</i> .....	21
4.2.3 <i>Autodesk Robot</i> .....	22
4.2.4 Modelo físico .....	22
4.2.5 Modelo analítico .....	23
<b>4.3 Combinação de ações</b> .....	<b>24</b>
4.3.1 Combinações últimas das ações.....	25
<b>4.4 Ações verticais</b> .....	<b>29</b>
<b>4.5 Ações horizontais</b> .....	<b>29</b>
<b>4.6 Análise estrutural</b> .....	<b>34</b>
<b>5 METODOLOGIA DE PESQUISA</b> .....	<b>35</b>
<b>5.1 Softwares utilizados</b> .....	<b>35</b>
<b>5.2 Método</b> .....	<b>35</b>
5.2.1 Definição do projeto arquitetônico .....	35
5.2.2 Modelagem no <i>Revit</i> .....	35
5.2.3 Análise estrutural no <i>Robot</i> .....	35
<b>5.3 Projeto arquitetônico</b> .....	<b>36</b>
<b>5.4 Blocos utilizados para a modelagem</b> .....	<b>37</b>
<b>5.5 Paginação da alvenaria</b> .....	<b>37</b>
5.5.1 – Planta de primeira e segunda fiada.....	37
5.5.2 - Amarração dos blocos.....	38
<b>5.6 Criação do modelo analítico</b> .....	<b>42</b>

<b>5.7 Importação para o <i>Robot</i></b> .....	<b>44</b>
<b>5.8 Cargas verticais</b> .....	<b>46</b>
<b>5.9 Ações horizontais</b> .....	<b>48</b>
5.9.1 Vento .....	48
<b>5.10 Combinação de ações</b> .....	<b>51</b>
<b>6 RESULTADOS</b> .....	<b>54</b>
<b>6.1 Deslocamentos</b> .....	<b>54</b>
<b>6.2 Tensões normais</b> .....	<b>56</b>
<b>6.3 Momentos nas paredes</b> .....	<b>56</b>
<b>6.4 Momentos nas Lajes</b> .....	<b>57</b>
<b>6.5 Quantitativo de materiais por pavimento</b> .....	<b>57</b>
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de aquisição de uma moradia no Brasil passou por diversas modificações no início do século XXI, facilitando o acesso a casa própria através de simplificações no financiamento voltado para a obtenção de imóveis.

De acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de 2001 a 2009 houve um aumento de aproximadamente 25% na quantidade de domicílios no Brasil, totalizando quase 12 milhões de moradias. O aumento desta demanda exigiu a necessidade de prazos cada vez menores tornando a construção civil uma grande indústria.

A alvenaria é um sistema construtivo empregado desde o início das atividades humanas, e é utilizada em construções para os mais diversos fins. Ao longo dos anos passou por modificações, acompanhando a evolução sempre em paralelo com o desenvolvimento científico e industrial.

A alvenaria estrutural é considerada um sistema importante dentro da engenharia. Seus projetos são baseados em rigorosos princípios científicos. A tecnologia construtiva desse material já possibilita a construção de edifícios cada vez mais altos e mais seguros se comparado com o mesmo material anos atrás.

Grande parte do processo de implementação de uma edificação é realizado por fragmentos. Devido a isso, erros acabam se tornando comuns, gerando aumento no custo da obra e atrasos na execução.

Na elaboração de um projeto mais complexo é necessário que haja um nível de detalhamento de informações maior para conduzir um bom planejamento e execução, com o objetivo de evitar grandes problemas durante a execução. Os itens que demandam maior tempo de planejamento são: estimativas de custo, controle do gasto de energia e detalhamento das estruturas.

O forte dinamismo do mercado juntamente com o aumento da complexidade dos produtos gerados, torna importante o uso de ferramentas computacionais compatíveis. A tecnologia BIM (*Building Information Modeling*) visa suprir essas necessidades, fazendo uma integração de todas as etapas do processo construtivo. Eliminando grande quantidade de informações fragmentadas, já que é uma plataforma que permite o gerenciamento conjunto entre as equipes de projeto e construção.

O BIM possibilita o aumento de produtividade tornando o desenvolvimento de projetos mais rápidos e eficientes em relação ao CAD (*Computer Aided Design*), que

funciona como uma prancheta eletrônica. É possível tornar o conjunto da obra mais rápido desde a concepção até a execução do empreendimento, agregando essa plataforma ao sistema de alvenaria estrutural que possui um tempo menor de execução quando comparado ao concreto armado.

Para garantir o bom uso da metodologia BIM, é necessária uma integração entre todas as fases do empreendimento. Diante disto, este trabalho tem como objetivo fazer a compatibilidade entre as fases da obra, desde a concepção arquitetônica até a análise estrutural, utilizando os softwares: *Autodesk Revit* para a modelagem arquitetônica; e *Autodesk Robot* para inserir as cargas e posteriormente realizar a análise estrutural.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Demonstrar a aplicação da tecnologia BIM para a modelagem física e estrutural de um edifício de múltiplos pavimentos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Modelar estrutura física de um projeto arquitetônico no Revit;
- Determinar o modelo físico considerando estrutura física;
- Ajustar o modelo analítico;
- Apresentar análise estrutural do edifício com base nas normativas brasileiras;
- Verificar o deslocamento horizontal para Estado Limite de Serviço (ELS);
- Determinar as tensões normais;
- Determinar os momentos fletores nos elementos estruturais;
- Discutir resultados obtidos.

### 3 JUSTIFICATIVAS

A alvenaria estrutural permite diversos ganhos, sejam eles econômicos, na qual não há necessidade de pilares e vigas de concreto armado que são responsáveis por uma boa parte do custo total de uma construção ou então pela questão da racionalização. Para a implementação desse sistema construtivo é necessário pensar no empreendimento de forma global. A compatibilização dos projetos arquitetônicos, estruturais, sanitários, elétricos e afins, gera racionalização diminuindo os custos da obra.

O BIM funciona como um facilitador desta compatibilização. Ele tem a capacidade de compartilhar todas as etapas do ciclo de vida do edifício, além de, possuir um banco de dados com todos os itens necessários para a construção, garantindo uma quantificação aproximada. Reduzindo de forma significativa a variabilidade das estimativas de custos.

A necessidade de rapidez na concepção de projetos faz com que a utilização da plataforma BIM seja indispensável, visto que, os softwares são intuitivos e permitem uma modelagem interativa, destacando possíveis incompatibilidades existentes entre projetos.

Com isso, associado a esta tecnologia e com a utilização do método construtivo em alvenaria estrutural, este trabalho tem por objetivo demonstrar o processo de elaboração de um projeto partindo da concepção arquitetônica até a análise estrutural. Afim de, introduzir o conceito BIM ao leitor. Visto que, mesmo não sendo uma tecnologia recente ainda é pouco disseminada no meio acadêmico e profissional.



## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão abordados os itens que são de suma importância para entendimento deste trabalho. Como: O que é alvenaria estrutural e seus componentes básicos, uma breve introdução no conceito BIM e por fim como foram definidos os esforços na estrutura.

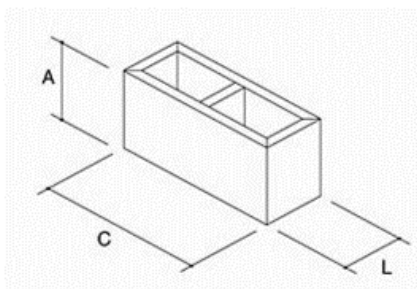
### 4.1 Alvenaria estrutural

O conceito que melhor define a utilização da alvenaria estrutural é a transmissão das ações através de tensões de compressão. Este conceito deve ser levado em consideração para a elaboração de um projeto estrutural para este método construtivo. Ainda é possível admitir a existência de tensões de tração em pontos específicos da estrutura, de forma que, não apresentem valores elevados. Caso contrário, inviabilizaria o uso da alvenaria estrutural (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

#### 4.1.1 Modulação

O componente básico da alvenaria é denominado unidade. Esta unidade pode ser definida pelas suas três principais dimensões: comprimento, largura e altura, vide Figura 1.

**Figura 1 - Dimensões de uma unidade**



**Fonte: Ramalho e Corrêa (2003)**

A largura e o comprimento determinam o módulo de planta, ou módulo horizontal. Já a altura determina o módulo de corte, ou módulo vertical. Deve-se haver uma preocupação afim de assegurar que as unidades que irão compor a edificação

pertencam a mesma modulação. Existem modulações de 15 (Blocos de 14, 29 e 44 cm), 20 (Blocos de 29, 34 e 39 cm), entre outras. Se misturados, não há compatibilização das peças, visto que é necessário optar por apenas uma modulação, garantindo que haja um único módulo em planta.

Conforme afirmam Carvalho e Tavares (2002), a modulação tem como objetivo garantir as dimensões das partes de um edifício, para assegurar a flexibilidade de combinação das medidas disponíveis. Em outras palavras, a modulação nada mais é do que o processo de garantir o perfeito encaixe entre as unidades, afim de não permitir que haja grandes espaçamentos entre elas, assegurando assim um ganho econômico considerável.

#### 4.1.1.1 Importância

O procedimento de modulação tem papel crucial no que se diz respeito a economia e racionalização. E, estabelece um limitante às medidas que podem ser aplicadas ao projeto de maneira global. Garante ainda dois itens que são muito discutidos no meio da construção civil: o ganho de produtividade e a redução do tempo de entrega.

Uma obra em alvenaria estrutural racionalizada necessita que todas as dimensões sejam moduladas. Em algumas situações particulares podem necessitar de alguns ajustes, porém, limitada a pequenos pontos. No entanto, quando uma modulação não é feita existe a necessidade de utilizar enchimentos de concreto, conhecido como graute, causando um aumento considerável no valor final da edificação. Portanto, a utilização do graute nessas condições devem ser evitadas sempre que possível (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

#### 4.1.2 Componentes

Entende-se como componente de alvenaria os elementos básicos que compõem a estrutura. O principal componente da alvenaria estrutural é a unidade, e os componentes auxiliares são: a argamassa, o graute e a armadura.

#### 4.1.2.1 Unidade

A unidade é o principal componente que define as características de resistência da estrutura. Pode ser definida como tijolo, quando se trata de unidade maciça, ou bloco, quando se trata de uma unidade vazada. Dos materiais que podem compor as unidades, os mais utilizados no Brasil são: unidades de concreto, unidades cerâmicas e unidades sílico-calcáreas (KALIL, 2006).

#### 4.1.2.2 Argamassa

De acordo com a ABNT NBR 13529:1995, a argamassa é “uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”. Esta mistura tem o papel de funcionar como um elemento de ligação entre as unidades.

Diferente do concreto, a argamassa não tem como foco a resistência a compressão, mas sim, garantir uma uniformidade na distribuição das cargas, absorver pequenas deformações/dilatações que a estrutura está sujeita e compensar algumas irregularidades dimensionais das unidades (KALIL, 2006).

#### 4.1.2.3 Graute

O graute é uma mistura composta pelos mesmos materiais utilizados na produção de concreto convencional, porém com agregados menores e com um fator água/cimento diferenciado (SARAIVA, 2015).

Para que um concreto seja considerado um graute é necessário atender os seguintes requisitos:

- Apresentar consistência fluida
- Atingir alta resistência inicial e final
- Apresentar expansão controlada.

A sua função é aumentar a área da seção transversal das unidades e também de promover a solidarização dos blocos com as armaduras que podem estar posicionadas em seus vazios (RAMALHO; CORRÊA, 2003). E também deve ser

utilizado nos encontros de paredes para melhorar o comportamento da ligação entre estas.

#### 4.1.2.4 Armaduras

As barras que são utilizadas nas construções em alvenaria estrutural são exatamente as mesmas utilizadas nas armaduras de concreto armado, porém, envoltas sempre por graute. De forma a propiciar um aumento da capacidade portante da alvenaria à compressão (RAMALHO; CORRÊA, 2003).

## 4.2 Tecnologia BIM

### 4.2.1 BIM

BIM refere-se a uma tecnologia que tem passado por um processo de evolução na indústria de arquitetura, engenharia e construção (AEC). Diferentemente do que é visto em plataformas CAD, os modelos BIM são construídos usando "inteligência de objeto" e apresentam informações sobre elementos físicos, como portas e colunas (SUCCAR, 2009). Este tipo de facilidade permite que informações do projeto possam ser modificadas em tempo real em todas as vistas, além de tornar a comunicação entre todos os envolvidos num determinado projeto mais simplificada (CARDOSO et al., 2013).

Na criação de um projeto arquitetônico, denominado modelo físico que é a representação da estrutura física, também é criado o modelo analítico, que representa o projeto em 3D de forma simplificada. A partir de um modelo analítico que é possível fazer a análise de projeto.

O BIM hoje 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.

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 e parte de 4D, mais especificamente, sobre o quantitativo de materiais.

#### 4.2.2 Autodesk Revit

O *Revit* é uma plataforma da *Autodesk* que faz uso da tecnologia BIM, possui um sistema completo de documentação do projeto que suporta todas as etapas do processo. Esta facilidade permite que possa ser feita uma análise de viabilidade de uma construção já que é possível visualizar todo o quantitativo de materiais necessários para concepção de uma edificação (JUSTI, 2008).

O *Software* possui recursos para as mais diversas áreas, sendo elas: Projetos arquitetônicos e estruturais, engenharia de sistemas mecânicos, hidráulicos e elétricos. Além de possuir um suporte que possibilita projetar de maneira multidisciplinar, ou seja, de forma colaborativa. O que reduz e forma significativa as interferências e as correções do trabalho (AUTODESK, 2018).

“A visualização do futuro empreendimento, por parte do cliente, é parte fundamental no processo de venda de um projeto. O *Revit* cria renderizações foto realísticas para comunicar a intensão do projetista de forma rápida e simples. Basta criar vistas panorâmicas 3D a partir de qualquer ângulo de visualização para obter uma realidade virtual” (PIZA, 2017).

#### 4.2.3 Autodesk Robot

O *Robot* é uma ferramenta de análise estrutural avançada que permite realizar análises lineares e não lineares de modelos construtivos, como pontes e outros tipos de estruturas industriais.

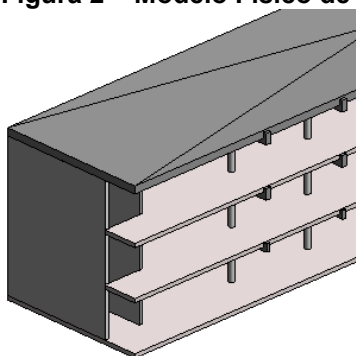
“O software Autodesk® *Robot*™ *Structural Analysis Professional* fornece aos engenheiros estruturais recursos avançados de simulação e análise de edifícios para estruturas grandes e complexas. O software oferece um fluxo de trabalho suave, permitindo que os engenheiros realizem simulações e análises de uma variedade de estruturas mais rapidamente” (AUTODESK, 2018).

Uma grande vantagem da utilização do *Robot* é a facilidade de integração, pois é um software que faz uso da tecnologia BIM, permite a troca de informações com outras plataformas que também a utilizam. No caso do *Revit*, é possível desenvolver um projeto arquitetônico e posteriormente fazer a importação para o *Robot*, para que seja feita a análise estrutural e um dimensionamento.

#### 4.2.4 Modelo físico

O modelo físico, nada mais é do que a referência em três dimensões da geometria da estrutura. Na qual é possível determinar altura, espessura e largura de uma viga, por exemplo (AUTODESK, 2018). Na Figura 2, fica claro esta definição, na qual é possível observar pilares, paredes e lajes do projeto.

**Figura 2 – Modelo Físico de uma edificação.**



**Fonte: Autodesk (2018)**

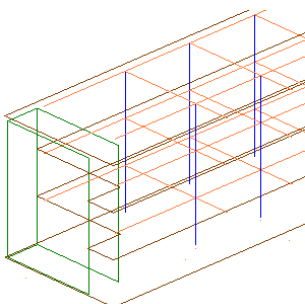
#### 4.2.5 Modelo analítico

No modelo analítico, a representação genérica da estrutura é feita através de elementos de barras, que representam vigas e pilares e elementos de placa e chapas, que fazem a representação de lajes e paredes, respectivamente.

Nestes elementos estão contidas informações cruciais para uma análise estrutural como, a geometria, as propriedades dos materiais e todas as cargas que compõem o modelo. (AUTODESK, 2018).

Na Figura 3, é semelhante à Figura 2, porém nesse caso se trata do modelo analítico. É possível notar o papel dos elementos de barras e placas na representação da estrutura.

**Figura 3 – Modelo analítico de uma edificação**

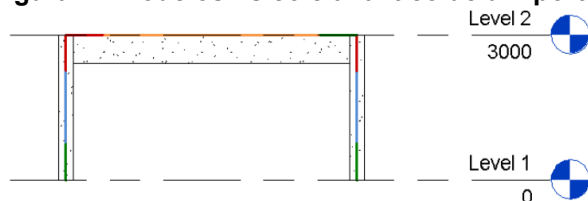


**Fonte: Autodesk (2018)**

A criação do modelo analítico é feita de forma automática à medida que o modelo físico é construído. Devido a esta automatização algumas inconsistências podem ocorrer durante o processo. Conforme a representação de um pórtico na

Figura 4, mostra-se simultaneamente o modelo físico e analítico criado que é criado pelo *Revit*.

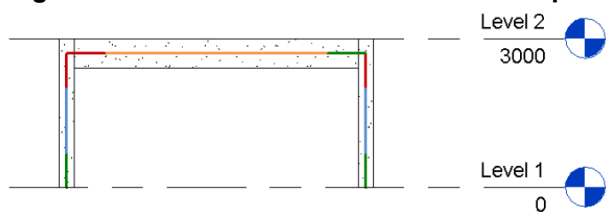
**Figura 4 - Modelos físico e analítico de um pórtico**



Fonte: Autodesk (2018)

Observa-se que o modelo analítico está posicionado no topo da viga, o que não é ideal, pois em uma análise estrutural os resultados obtidos não se aproximariam do comportamento real da estrutura. Nesse tipo de situação é necessário realizar algumas correções, como o reposicionamento da viga analítica conforme a Figura 5.

**Figura 5 - Modelos físico e analítico de um pórtico (Alterado)**



Fonte: Autodesk (2018)

A viga analítica quando posicionada no centro da viga física garante que os resultados obtidos em uma análise estrutural sejam mais próximos da realidade, gerando maior credibilidade e confiabilidade para o projeto.

### 4.3 Combinação de ações

Uma estrutura é solicitada por ações permanentes, variáveis e excepcionais. A probabilidade de ocorrência simultânea dessas ações com seus valores característicos é baixa, por isso é coerente realizar combinações destas ações. Segundo a ABNT NBR 8681:2003, em cada situação as ações devem ser combinadas de modo diferente quantas vezes forem necessárias para garantir a segurança da estrutura para o caso mais desfavorável.



As ações permanentes são aquelas que ocorrem durante toda, ou praticamente toda, vida útil da construção com valores constantes. É dividida 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) e indiretas (protensão, recalque de apoios e retração de materiais).

As ações variáveis ocorrem com valores variáveis ao longo da vida útil da edificação. São consideradas ações variáveis: cargas acidentais (decorrente do uso da edificação), os efeitos do vento, da mudança de temperatura, pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas e demais forças.

Quando o tempo de ocorrência de uma ação é muito curto e a probabilidade de que ela ocorra é baixa, esta ação é considerada excepcional. Explosões, enchentes, choques de veículos, incêndio são exemplos desse tipo de ação, ABNT NBR 8681:2003.

#### 4.3.1 Combinações últimas das ações

De acordo com a ABNT NBR 8681:2003, para verificação do limite de ruptura de uma estrutura é necessário a utilização das combinações últimas, que são divididas em três: Combinações últimas normais, especiais e excepcionais. Sendo, neste trabalho só serão consideradas as combinações últimas normais.

##### 4.3.1.1 Combinações últimas normais

O cálculo das combinações últimas normais é feito através da equação 1:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} \cdot F_{Gi,k} + \gamma_q \cdot \left[ F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \psi_{0j} \cdot F_{Qj,k} \right] \quad \text{Equação (1)}$$

Na qual:

$F_d$  - Força resultante de cálculo em N

$\gamma_{gi}$  - É o coeficiente de ponderação das ações permanentes;

- $F_{Gi,k}$  - É o valor característico das ações permanentes em N;
- $\gamma_q$  - É o coeficiente de ponderação de ações variáveis;
- $F_{Q1,k}$  - É o valor característico da ação variável principal em N;
- $\Psi_{0j} \cdot F_{Qj,k}$  - É o valor reduzido de combinação das ações variáveis secundárias.

É preciso analisar se as ações permanentes são favoráveis ou desfavoráveis às ações variáveis, e assim eleger o coeficiente de ponderação adequado.

#### 4.3.3.2 Coeficiente de ponderação para as ações variáveis

Se uma ação variável é desfavorável para determinada combinação, os coeficientes de ponderação  $\gamma_q$  majora os valores representativos desta ação. Nos casos de combinação em que a ação variável tende a aliviar a estrutura, esta deve ser desprezada, segundo a ABNT NBR 8681:2003. Os coeficientes de ponderação para as ações variáveis são indicados na Tabela 1, quando consideradas separadamente.

**Tabela 1 - Ações variáveis consideradas separadamente**

Combinação	Tipo de ação	Coefficiente de ponderação
Normal	- Ações truncadas <sup>1)</sup>	1,2
	- Efeito de temperatura	1,2
	- Ação do vento	1,4
	- Ações variáveis em geral	1,5
Especial ou de construção	- Ações truncadas <sup>1)</sup>	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

<sup>1)</sup> 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 1 se aplica a esse valor limite.

**Fonte: Adaptado ABNT NBR 8681:2003**

Quando os carregamentos são considerados em conjunto, os coeficientes de ponderação para as ações variáveis são os valores contidos na Tabela 2 a seguir.

**Tabela 2 - 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

<sup>1)</sup> Quando as ações variáveis forem consideradas conjuntamente, o coeficiente de ponderação mostrado na Tabela 2 se aplica a todas as ações, devendo-se considerar também conjuntamente as ações permanentes diretas.

**Fonte: Adaptado ABNT NBR 8681:2003**

#### 4.3.3.3 Valores dos fatores de combinação e de redução

Os fatores de combinação e de redução apresentados na Tabela 3 assumem papel de minorar o valor característico das ações variáveis, considerando a periodicidade de ocorrência.

**Tabela 3 - Valores dos fatores de combinação ( $\psi_0$ ) e de redução ( $\psi_1$  e  $\psi_2$ ) para ações variáveis**

Ações	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
<b>Cargas acidentais de edifícios</b>			
- 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 <sup>1)</sup>	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 <sup>2)</sup>	0,7	0,6	0,4
- Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
<b>Vento</b>			
- Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0,0
<b>Temperatura</b>			
- Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
<b>Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos</b>			
- 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

<sup>1)</sup> Edificações residenciais, de acesso restrito.

<sup>2)</sup> Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público.

<sup>3)</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para  $\psi_2$  o valor zero.

<sup>4)</sup> Para combinações excepcionais onde a ação principal for o fogo, o fator de redução  $\psi_2$  pode ser reduzido, multiplicando-o por 0,7.

**Fonte: Adaptado ABNT NBR 8681:2003**

#### 4.4 Ações verticais

A ABNT NBR 6120:1980 especifica os valores mínimos para carga permanente, constituído pelo peso próprio da estrutura e de todos os elementos construtivos fixos e instalações permanentes, informação que pode ser consultada na Tabela 1 (Peso específico dos materiais de construção) da ABNT NBR 6120:1980, e valores mínimos para carga accidental, que é aquela que atua sobre a estrutura de edificações em função do seu uso (pessoas, móveis, materiais diversos, veículos etc.), como indicado na Tabela 2 (Valores mínimos das cargas verticais) na ABNT NBR 6120:1980

#### 4.5 Ações horizontais

As forças horizontais que agem em edifícios são provenientes da ação do vento e do desaprumo. A ABNT NBR 6123:1988 especifica os cálculos para a força do vento. Neste trabalho o desaprumo será desconsiderado.

A força de arrasto devido ao vento é determinada pela seguinte equação 2:

$$F_v = q \cdot C_A \cdot A_F \quad \text{Equação (2)}$$

Na qual:

- $F_v$  - Força de arrasto em N,
- $q$  - É a pressão de obstrução em N/m<sup>2</sup>,
- $C_A$  - É o coeficiente de arrasto,
- $A_F$  - É a área de incidência em m<sup>2</sup>.

O coeficiente de arrasto é determinado através de ábacos, levando em consideração ventos de baixa e alta turbulência. Sendo respectivamente a Figura 4 e Figura 5 contidas na ABNT NBR 6123:1988.

O regime do vento para uma edificação pode ser considerado de alta turbulência quando sua altura não excede a duas vezes a altura média das edificações

da vizinhança estendendo-se estas na direção do vento incidente uma distância mínima de acordo com a ABNT NBR 6123:1988.

- 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.

A pressão de obstrução devido ao vento é determinada pela seguinte equação 3:

$$q = 0,613 \cdot V_K^2 \quad \text{Equação (3)}$$

Na qual:

$q$  - É a pressão de obstrução do vento em  $\text{N/m}^2$ ,

$V_K$  - É a velocidade característica do vento em  $\text{m/s}$ .

A velocidade característica, por sua vez, é calculada pela equação 4:

$$V_K = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0 \quad \text{Equação (4)}$$

Na qual:

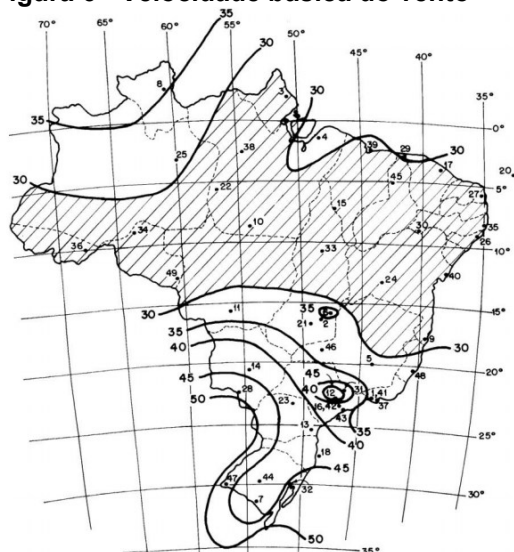
$V_0$  - É velocidade básica do vento em  $\text{m/s}$  de acordo com a Figura 6;

$S_1$  - É o fator topográfico;;

$S_2$  - É o fator de rugosidade e regime de escoamento;

$S_3$  - É o fator estatístico.

**Figura 6 - Velocidade básica do vento**



Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988

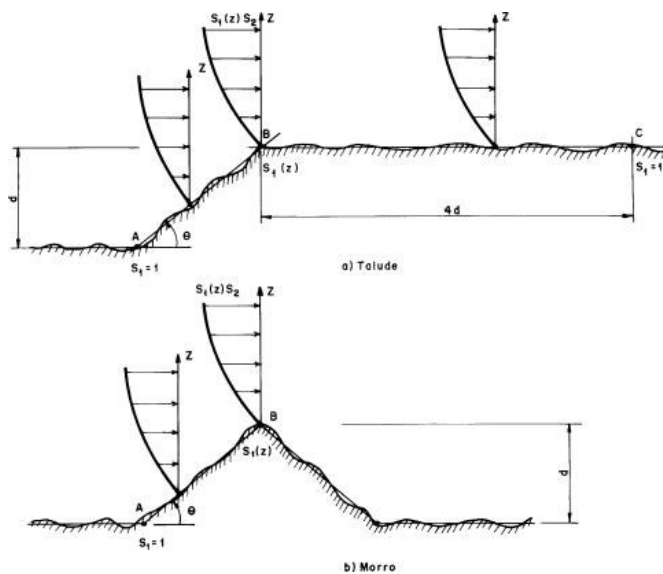
O fator topográfico  $S_1$  leva em consideração as variações do terreno e é determinado do seguinte modo (ver figura 7), de acordo com a ABNT NBR 6123:1988:

$$\text{Se } \theta \leq 3^\circ, S_1 = 1$$

$$\text{Se } 6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ, S_1(z) = 1 + (2,5 - z/d) \cdot \text{tg}(\theta - 3^\circ)$$

$$\text{Se } \theta \geq 45^\circ, S_1(z) = 1 + (2,5 - z/d) \cdot 0,31$$

**Figura 7 – Fator topográfico**



Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988

O fator  $S_2$  leva em consideração o efeito da rugosidade do terreno e da velocidade do vento e as dimensões da edificação. A rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias segundo a ABNT NBR 6123:1988:

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 segundo 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 expresso pela equação 5:

$$S_2 = b \cdot F_r \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad \text{Equação (5)}$$

Na qual:

$z$  - É a altura a ser calculado o vento em m;

$b$  - É obtido na tabela 4;

$F_r$  - É o fator de rajada, sempre em relação à categoria II, é obtido na tabela 4;

$p$  - É obtido na tabela 4.



Tabela 4 - Parâmetros meteorológicos

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

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988

O fator estatístico  $S_3$  considera o grau de segurança necessário para uma edificação e sua vida útil. Os valores mínimos que podem ser adotados estão definidos na tabela 5.

Tabela 5 - 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, centrais de comunicação, etc.)	1,1
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1
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

Uma análise estrutural é caracterizada pela determinação e avaliação dos efeitos causados por carregamentos que foram pré-estabelecidos em projeto, gerando como resultado as tensões, deslocamentos e esforços sofridos da estrutura em análise. De forma que, para haver uma análise estrutural é necessário um modelo estrutural que simule uma estrutura real (FRANÇA JUNIOR, 2015).

A formulação do método dos deslocamentos e das forças é muito, devendo a escolha do método de análise incidir em um ou em outro conforme necessidade. O método dos deslocamentos pode ser aplicado quer as estruturas isostáticas quer a hiperestáticas sendo especialmente útil na análise das segundas, quando o grau de indeterminação estático é elevado. Este método é melhor adaptável à programação automática que o método das forças, porque neste, todos deslocamentos são restringidos ao contrário do que acontece no método das forças em que apenas algumas liberações são introduzidas para se obter a estrutura isostática.

## 5 METODOLOGIA DE PESQUISA

### 5.1 Softwares utilizados

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram necessários os seguintes softwares:

- *Autodesk Revit 2019*;
- *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2019*.

A escolha destes *softwares* foi baseada na facilidade de acesso, levando em consideração que a *Autodesk* disponibiliza licenças de uso para estudantes.

### 5.2 Método

#### 5.2.1 Definição do projeto arquitetônico

Para a modelagem deste projeto, foi utilizada a planta de um edifício residencial de multipavimentos, com dois apartamentos por andar. Que contém uma escada de emergência e um elevador. A planta baixa foi retirada do livro Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural de Marcio A. Ramalho e Márcio R. S. Corrêa.

#### 5.2.2 Modelagem no *Revit*

Como segunda etapa, este projeto foi realizada a modelagem espacial no *Software Autodesk Revit*, processo conhecido como modelagem física. Nesse caso, não ocorreu a modelagem simultânea da estrutura física, foram utilizadas famílias de blocos que não possuíam versões analíticas. Desta forma, foi necessário substituir as paredes de blocos estruturais por uma parede estrutural, para tornar possível a criação da parede analítica e possibilitar a análise estrutural.

#### 5.2.3 Análise estrutural no *Robot*

Na terceira etapa foi feita a análise estrutural da edificação no *Autodesk Robot* com base no modelo analítico desenvolvido.

Para tal, foi necessário seguir procedimentos descritos nas normas:

- ABNT NBR 6120:1980 - cargas para o cálculo de estruturas de edificações,

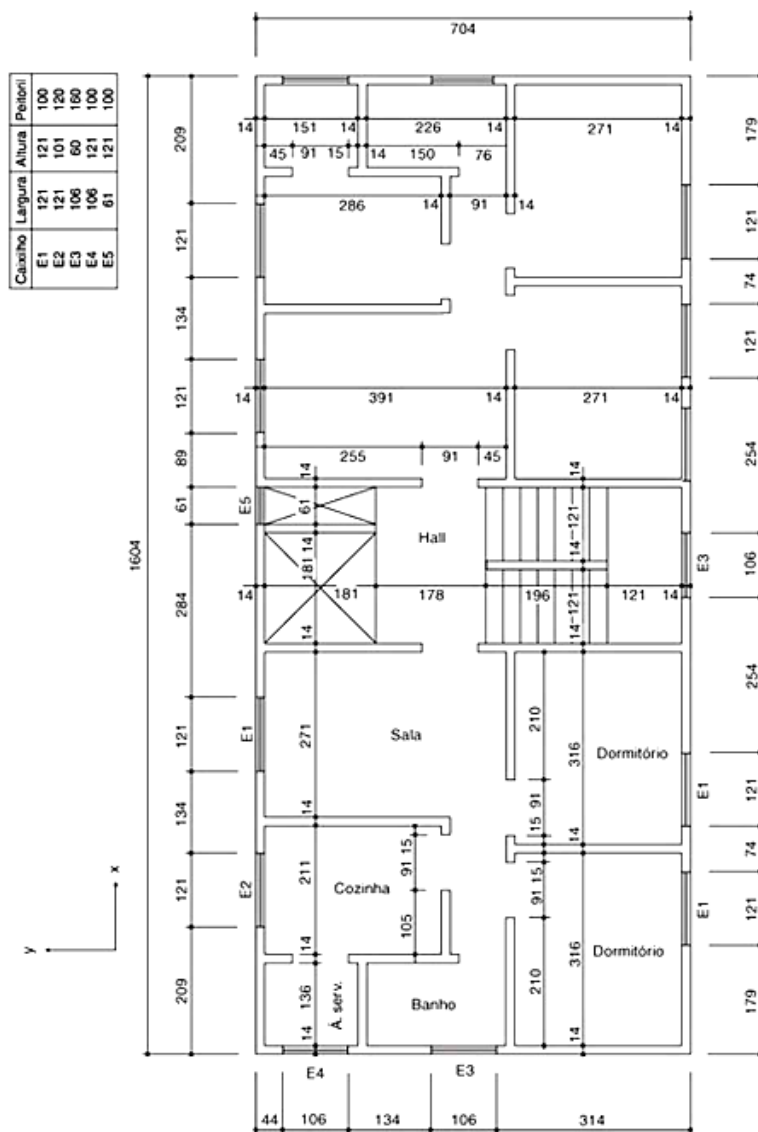
- ABNT NBR 6123:1988 - forças devidas ao vento em edificações.
- ABNT NBR 15961-1/2011 - Alvenaria Estrutural Blocos de Concreto Parte 1.

Após todas as etapas acima, foi possível fazer uma análise estrutural e discutir os resultados obtidos.

### 5.3 Projeto arquitetônico

A planta baixa vide Figura 8. Já possui a modulação, portanto neste projeto não ocorreram problemas de incompatibilidade na amarração dos blocos.

Figura 8 – Arranjo arquitetônico do pavimento tipo

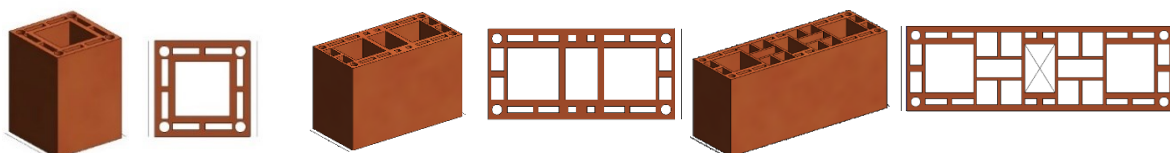


Fonte: Ramalho e Corrêa (2003)

## 5.4 Blocos utilizados para a modelagem

Foram utilizados blocos de família 29 e largura de 14 cm, conforme é possível visualizar na Figura 9, são blocos de 14, 29 e 44 cm, respectivamente

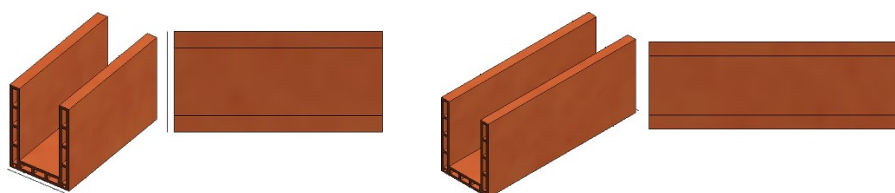
Figura 9 – BE Blocos estruturais



Fonte: Autoria própria (2019)

Blocos do tipo canaleta foram utilizados para a criação de fôrmas para as vergas, contravergas e vigas de respaldo. No caso deste tipo de componente foi utilizado modulação apenas de 29 e 44 cm. Conforme Figura 10 abaixo.

Figura 10 – C Canaletas



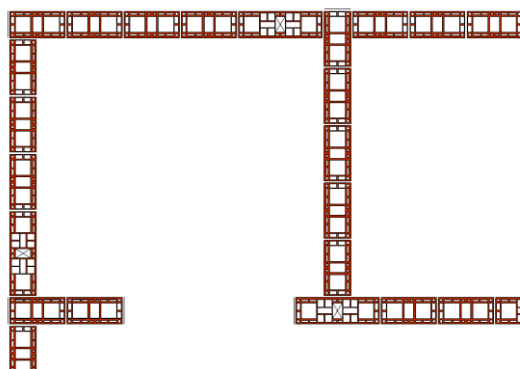
Fonte: Autoria própria (2019)

## 5.5 Paginação da alvenaria

### 5.5.1 – Planta de primeira e segunda fiada.

Para a elaboração do projeto em Alvenaria estrutural, foram necessárias as plantas de forma de primeira e segunda fiada, que se repetiram até a altura do pé direito. Na Figura 11 é mostrado em detalhe a planta de primeira fiada.

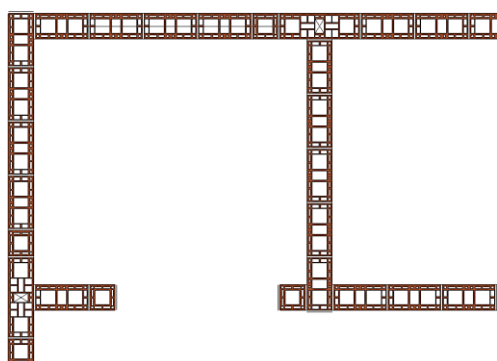
**Figura 11 – Detalhe planta de primeira fiada**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

Um detalhe importante, é que o posicionamento dos blocos é diferente entre a primeira e segunda fiada. De modo a garantir que haja amarração entre as paredes.

**Figura 12 – Detalhe planta de segunda fiada**

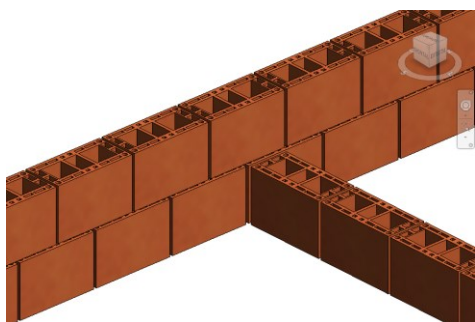


**Fonte: Autoria própria (2019)**

### 5.5.2 - Amarração dos blocos

Para garantir uma distribuição igualitária de tensões, foi realizada uma amarração entre os blocos estruturais. A Figura 13 mostra uma amarração feita de forma incorreta, não há ligação entre as duas paredes e esse tipo de ligação, o que só é viável quando o projeto possui também paredes não estruturais, sendo necessário uma ligação com grampos ou telas metálicas para garantir a estabilidade da parede de vedação.

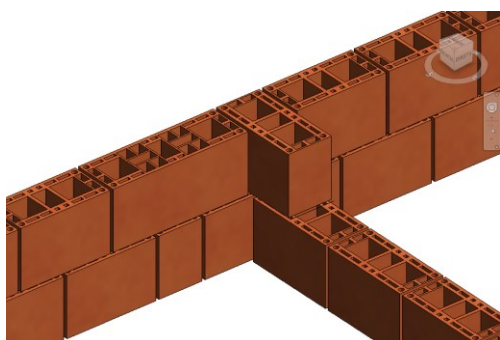
**Figura 13 – Amarração feita de forma inadequada.**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

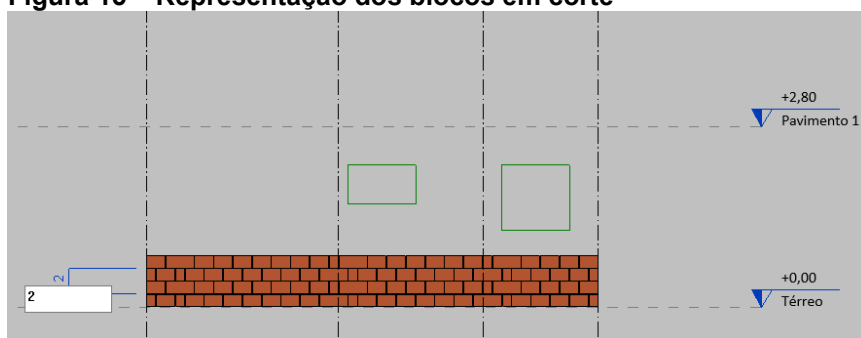
É demonstrado o procedimento correto a ser seguido no posicionamento dos blocos evidenciado na Figura 14. O entrelaçamento criado mantém as paredes conectadas. A distribuição dos blocos, deve ter as juntas afastadas em pelo menos um terço ( $1/3$ ) do comprimento do bloco de 44cm.

**Figura 14 – Amarração feita de forma correta.**



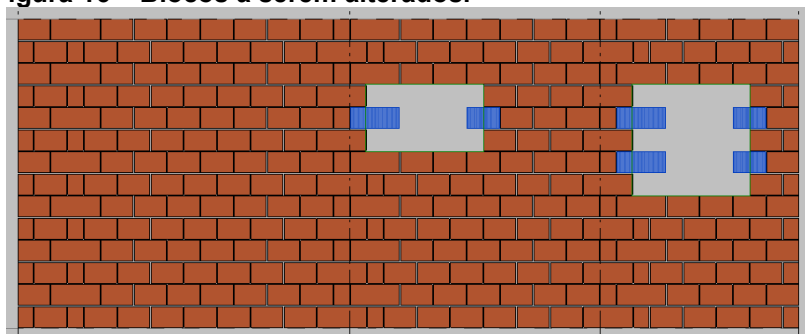
**Fonte: Autoria própria (2019)**

Após a finalização das duas primeiras fiadas o processo se torna mais simplificado, pois agora basta duplica-las até atingir o pé direito. No caso em estudo, até atingir 2,80m de altura. Conforme a Figura 15 abaixo.

**Figura 15 – Representação dos blocos em corte**

Fonte: Autoria própria (2019)

Alguns blocos precisaram ser removidos, por estarem contidos na região de abertura das janelas. Como está ilustrado na Figura 16, os blocos destacados em azul precisam ser substituídos por blocos de 14 cm, de forma a se adequarem ao espaço disponível.

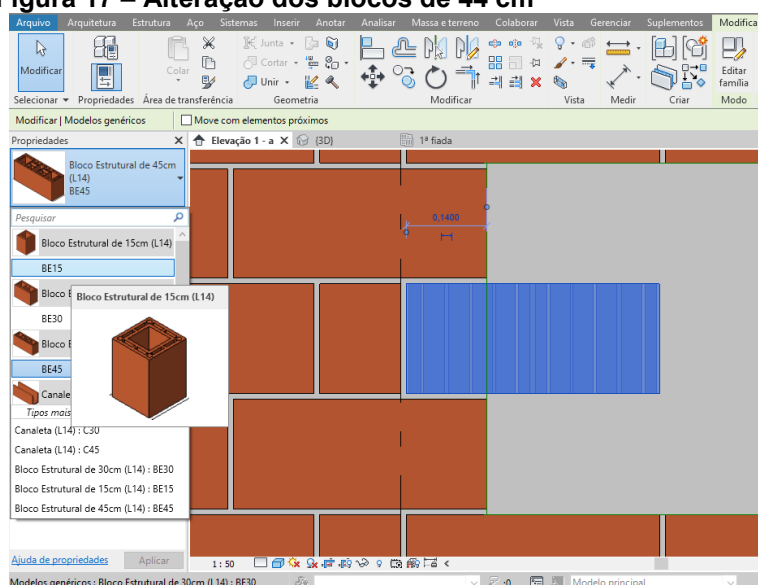
**Figura 16 – Blocos a serem alterados.**

Fonte: Autoria própria (2019)

Para fazer a substituição, basta selecionar o bloco e alterar o componente para o que se adequa à necessidade. Neste caso, o Bloco estrutural de 44 cm, foi substituído por um bloco de 14 cm, conforme a Figura 17.



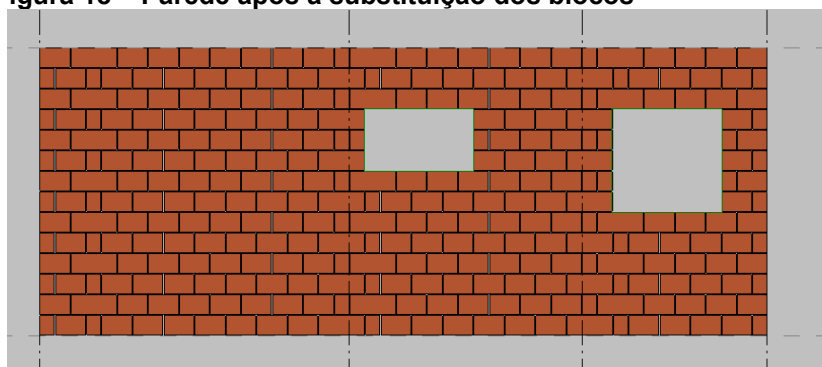
**Figura 17 – Alteração dos blocos de 44 cm**



Fonte: Autoria própria (2019)

Este processo precisou ser repetido para os demais blocos. A Figura 18 mostra o resultado final após estas adequações.

**Figura 18 – Parede após a substituição dos blocos**

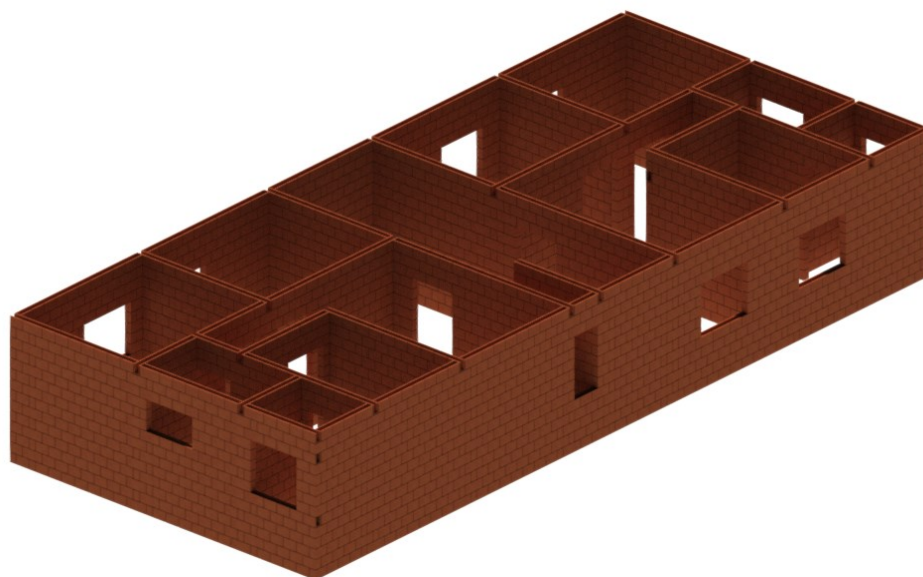


Fonte: Autoria própria (2019)

Alguns blocos também precisaram ser substituídos por canaletas, que em regiões de aberturas trabalham como verga das portas e verga e contraverga de janelas. Também foi utilizada como cinta de amarração. Na qual a última fiada os blocos foram substituídos pelas canaletas.

Ao repetir o procedimento nas demais paredes, sempre respeitando as aberturas de portas e janelas, resultou na representação do pavimento tipo. Na Figura 19 é possível notar todas as modificações dos blocos da última fiada por blocos tipo canaleta.

**Figura 19 – Pavimento tipo finalizado**



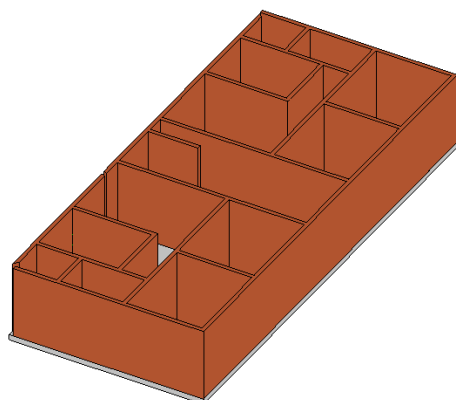
Fonte: Autoria própria (2019)

### **5.6 Criação do modelo analítico**

Os blocos utilizados para a confecção do pavimento tipo não possuem nenhuma função estrutural. Eles servem para tornar possível as modulações e a determinação das quantidades de blocos necessários por pavimento.

Para que uma análise estrutural fosse possível para esse método construtivo, foi necessário a criação de paredes estruturais com base nos elementos na modulação conforme a Figura 20, que na prática simularam os carregamentos que a alvenaria sofreria.

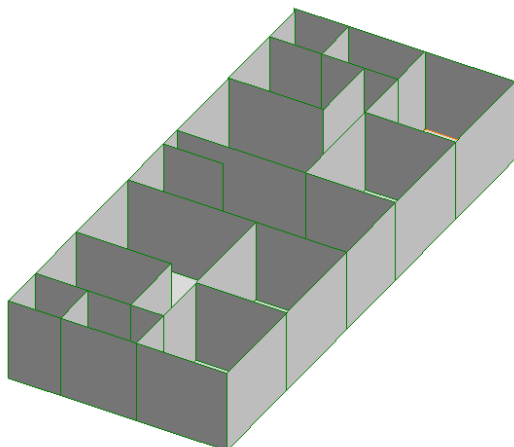
**Figura 20 – Modelo físico do pavimento tipo**



Fonte: Autoria própria (2019)

No Revit, elementos estruturais, como vigas, pilares, lajes e paredes, possuem modelos analíticos. Toda a análise estrutural é baseada na estrutura analítica da construção, Figura 21.

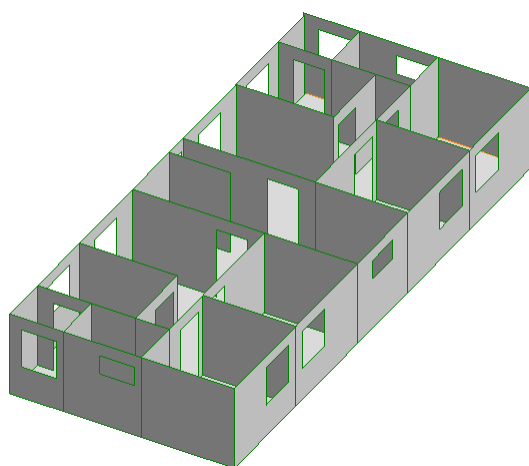
**Figura 21 – Modelo analítico do pavimento tipo**



**Fonte: Autoria própria (2019)**

A análise estrutural deste projeto foi feita através de elementos de placas/chapas. Deste modo, é extremamente necessário que sejam consideradas as aberturas de portas e janelas, para um resultado mais preciso, conforme Figura 22.

**Figura 22 – Modelo analítico do pavimento tipo com aberturas**

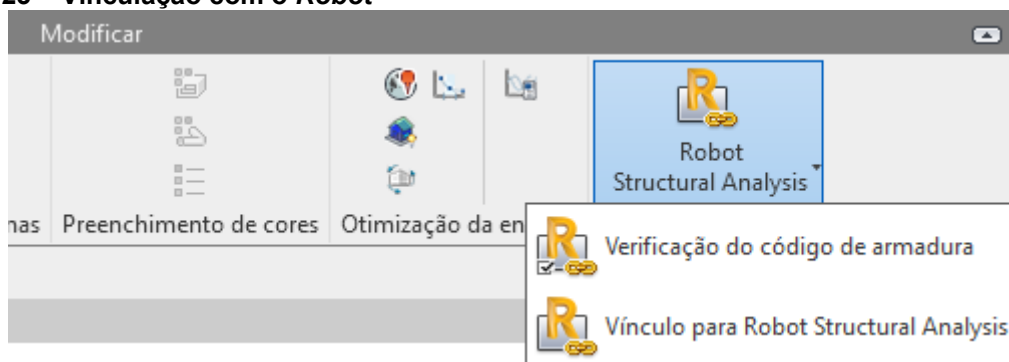


**Fonte: Autoria própria (2019)**

## 5.7 Importação para o *Robot*

Na próxima etapa, o modelo analítico do pavimento tipo foi enviado para o *Robot*, através da função Vínculo para *Robot Structural Analysis*, conforme ilustra a Figura 23.

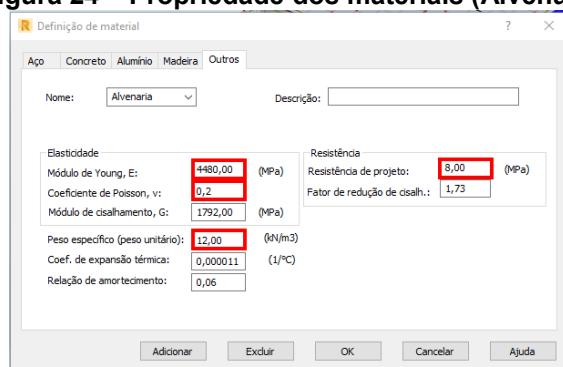
Figura 23 – Vinculação com o *Robot*



Fonte: Autoria própria (2019)

Após a importação do projeto para o *Robot*, foi necessário determinar o material das lajes e das paredes, de concreto armado e alvenaria estrutural. Por padrão, o *Robot* não possui o material “Alvenaria estrutural”. Desta forma foi necessário a criação deste. Conforme fica evidenciado na figura 24, os itens em destaque foram necessários para possibilitar a análise estrutural.

Figura 24 – Propriedade dos materiais (Alvenaria estrutural)



Fonte: Autoria própria (2019)

A resistência de projeto e o coeficiente de Poisson (Tabela 1) foram inseridos com base na ABNT NBR 1596-1:2011

O mesmo procedimento foi feito para a adição com material CA25 (Concreto armado de 25 MPa). Figura 25.

**Figura 25 – Propriedade dos materiais (Concreto Armado)**

Fonte: Autoria própria (2019)

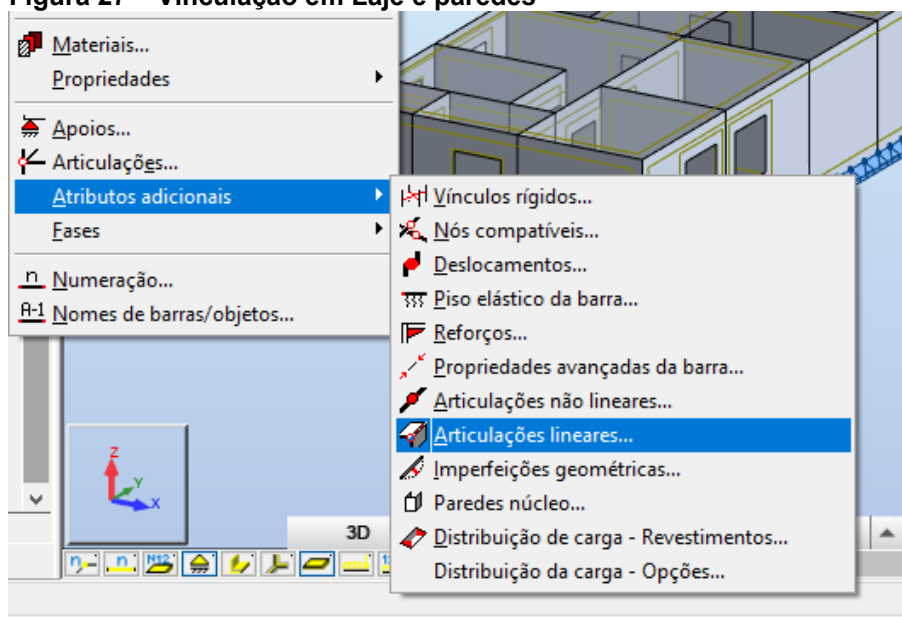
Após as modificações, os materiais criados foram atribuídos aos seus respectivos objetos, sendo eles: “CA25” para a laje, e “Alvenaria” para as paredes. Neste exemplo foi considerado uma laje maciça de 15 cm que estará simplesmente apoiada nas paredes estruturais, evidenciada na Figura 26.

**Figura 26 – Espessura da laje**

Fonte: Autoria própria (2019)

Os momentos gerados pelas cargas contidas na laje não serão transmitidos para as paredes estruturais. Para que isso fosse possível, foi necessário rotular a ligação entre a parede e a laje através do menu Geometria >> Atributos adicionais >> Articulações Lineares, conforme ilustra a Figura 27 abaixo:

Figura 27 – Vinculação em Laje e paredes



Fonte: Autoria própria (2019)

## 5.8 Cargas verticais

Nas cargas verticais são definidos os carregamentos permanentes e acidentais contidos na laje. No carregamento permanente, foram considerados o peso próprio da estrutura, revestimento cerâmico e o reboco do teto de 3 cm. E para a carga acidental foi considerado 2 kN/m<sup>2</sup> referente ao carregamento para edifícios residenciais.

De acordo com a NBR 6118:2014 o peso específico da argamassa é de 19 kN/m<sup>3</sup>. Para este estudo foi considerada a espessura de 3 cm para o reboco do teto da edificação. De modo que a carga por m<sup>2</sup> de argamassa é de 0,57 kN.

Resumo:

### Carga Permanente

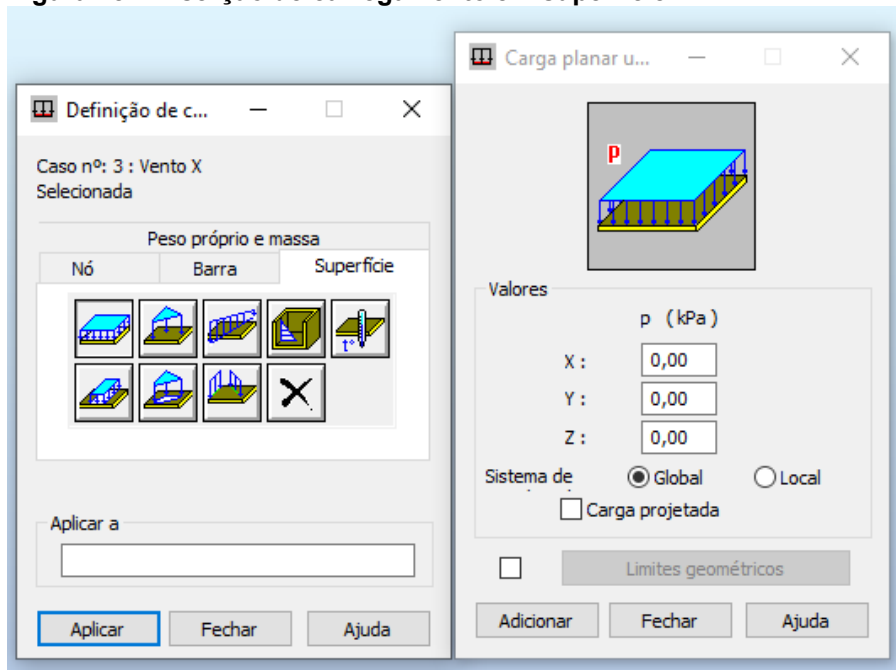
Revestimento Piso – 1,2 kN/m<sup>2</sup>  
 Reboco teto 3cm – 0,57 kN/m<sup>2</sup>

### Carga acidental

Residencial – 2 kN/m<sup>2</sup>

Os carregamentos verticais foram inseridos nas lajes através da função de cargas de superfícies, conforme indica a Figura 28 abaixo:

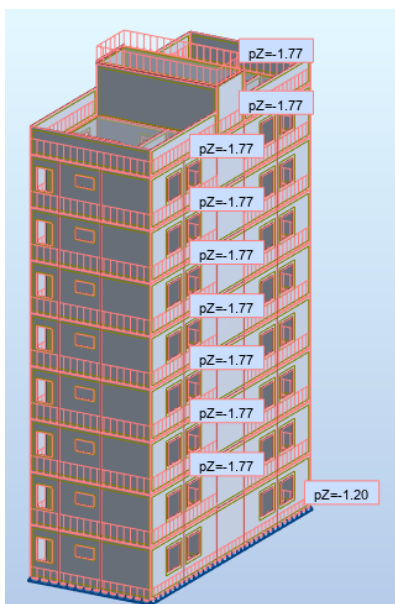
**Figura 28 – Inserção de carregamento em superfície**



Fonte: Autoria própria (2019)

A partir desta ferramenta, os carregamentos permanente e acidental foram inseridos. Na Figura 29, são mostrados os carregamentos permanentes.

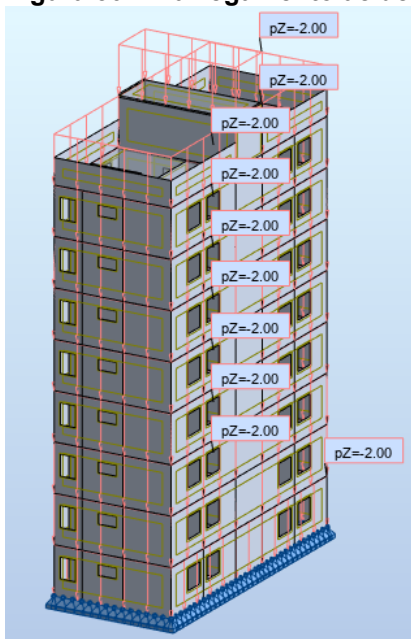
**Figura 29 – Carregamento permanente aplicado em topo o edifício**



Fonte: Autoria própria (2019)

Na Figura 30 são mostrados os carregamentos acidentais. O carregamento acidental também foi aplicado na última laje para prever alguma possível manutenção no edifício.

**Figura 30 – Carregamento acidental aplicado em topo o edifício**



Fonte: Autoria própria (2019)

## 5.9 Ações horizontais

### 5.9.1 Vento

Para o cálculo de  $S_1$ , é levado em consideração a variação do terreno, neste trabalho foi considerado  $\theta \leq 3^\circ$ , de modo que o valor de  $S_1$  é igual a 1 (um). Para o  $S_3$ , a determinação do valor se dá pela verificação da Tabela 5, na qual o edifício em estudo se enquadra no grupo 2 (Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação), sendo assim  $S_1$  é igual a 1 (um)

Para o cálculo de  $S_2$  o projeto foi classificado com sendo Categoria IV, e classe B. De modo que,  $S_2$  se dá por:

$$S_2 = 0,85 \cdot 0,98 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,125}$$



Sendo Z variável de acordo com a altura do pavimento. Na Tabela 6 é possível visualizar o valor de S2 para todos os pavimentos.

**Tabela 6 – Valores de S2 por pavimento**

Nível	Z (m)	b	p	S2
1	2,8	0,85	0,125	0,71
2	5,6	0,85	0,125	0,78
3	8,4	0,85	0,125	0,82
4	11,2	0,85	0,125	0,85
5	14	0,85	0,125	0,87
6	16,8	0,85	0,125	0,89
7	19,6	0,85	0,125	0,91
8	22,4	0,85	0,125	0,92

Autoria própria (2019)

Para o cálculo de velocidade característica foi considerada a velocidade básica de  $(V_0) = 45$  m/s. Na Tabela 7 a seguir é possível visualizar o valor de força do vento atuante em X e em Y. Para o cálculo de área de influência em X, foi considerado meio pé direito abaixo e meio pé direito acima do pavimento e o vão de 7,04 m (frente do edifício). Para Y, a altura foi calculada da mesma maneira da área de influência em X, porém o vão tomado para análise, foi de 16,04 m.

Os coeficientes de arrasto utilizados no projeto foram tomados de base do livro “Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural” de Marcio A. Ramalho e Márcio R. S. Corrêa, sendo em X igual a 0,95 e Y igual a 1,36, que chegou a estes valores com base nos ábacos contidos na ABNT NBR 6123:1988.

**Tabela 7 – Força do vento em X e Y**

Nível	Z (m)	S2	Vk (m/s)	q	Af x (m <sup>2</sup> )	Afy (m <sup>2</sup> )	Fvx (kN)	Fvy (kN)
1	2,80	0,71	32,0	0,63	19,71	44,912	11,73	38,27
2	5,60	0,78	35,1	0,76	19,71	44,912	14,14	46,13
3	8,40	0,82	36,7	0,82	19,71	44,912	15,44	50,37
4	11,20	0,85	38,3	0,90	19,71	44,912	16,79	54,78
5	14,00	0,87	39,1	0,94	19,71	44,912	17,55	57,23
6	16,80	0,89	40,0	0,98	19,71	44,912	18,36	59,90
7	19,60	0,91	40,8	1,02	19,71	44,912	19,09	62,25
8	22,40	0,92	41,5	1,05	19,71	44,912	19,73	64,36
<b>Cober.</b>	25,20	0,94	42,1	1,09	9,86	3,794	10,16	5,60

Autoria própria (2019)

Os Valores de  $F_{vx}$  e  $F_{vy}$  são forças de vento concentradas. Deste modo, foi necessário dividir pela largura do edifício em análise para torna-las forças distribuídas.

Sendo assim, os valores das cargas por metro estão explicitados na Tabela 8 abaixo.

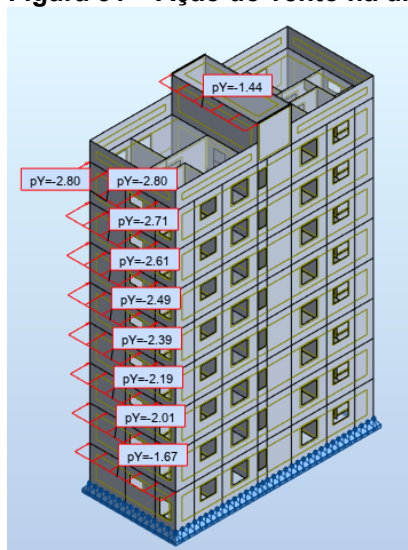
**Tabela 8 – Força do vento por metro em X e Y**

Nível	Z (m)	$F_{vx}$ (kN/m)	$F_{vy}$ (kN/m)
1	2,80	1,67	2,39
2	5,60	2,01	2,88
3	8,40	2,19	3,14
4	11,20	2,39	3,42
5	14,00	2,49	3,57
6	16,80	2,61	3,73
7	19,60	2,71	3,88
8	22,40	2,80	4,01
<b>Cobertura</b>	25,20	1,44	0,35

Autoria própria (2019)

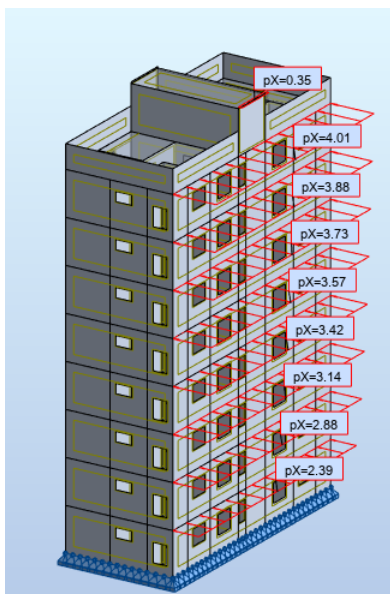
Na Figura 31, é mostrado os carregamentos referente ao vento na direção X.

**Figura 31 – Ação do vento na direção X**



Fonte: Autoria própria (2019)

Na Figura 32, é mostrado os carregamentos referente ao vento na direção Y.

**Figura 32 – Ação do vento na direção Y**

Fonte: Autoria própria (2019)

### 5.10 Combinação de ações

As combinações foram geradas no *Robot* a partir das considerações da ABNT NBR 6118:2014. Na tabela 9 abaixo estão as combinações de ELU. Vale ressaltar que, nunca se deve combinar dois ventos na mesma equação. Pois na prática, é algo impossível de acontecer.

Para combinações de ações, na qual as cargas permanentes causam efeitos favoráveis à estrutura, deve-se considerar o coeficiente de ponderação  $\gamma_g = 0,9$  conforme indica a Tabela 7 contida na ABNT NBR 15961-1/2011.

Tabela 9 – Combinações de ELU

Combinação	Equações
1	$0,9 \cdot F_{Gi,k}$
2	$0,9 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot F_{Qi,k}$
3	$0,9 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot (F_{Qi,k} + 0.6 \cdot V_x)$
4	$0,9 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot V_x$
5	$0,9 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot (V_x + 0.5 \cdot F_{Qi,k})$
6	$1,4 \cdot F_{Gi,k}$
7	$1,4 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot F_{Qi,k}$
8	$1,4 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot (F_{Qi,k} + 0.6 \cdot V_x)$
9	$1,4 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot V_x$
10	$1,4 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot (V_x + 0.5 \cdot F_{Qi,k})$
11	$1,4 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot (V_y + 0.5 \cdot F_{Qi,k})$
12	$1,4 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot V_y$
13	$1,4 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot (F_{Qi,k} + 0.6 \cdot V_y)$
14	$0,9 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot (F_{Qi,k} + 0.6 \cdot V_y)$
15	$0,9 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot V_y$
16	$0,9 \cdot F_{Gi,k} + 1,4 \cdot (V_y + 0.5 \cdot F_{Qi,k})$

Autoria Própria (2019)

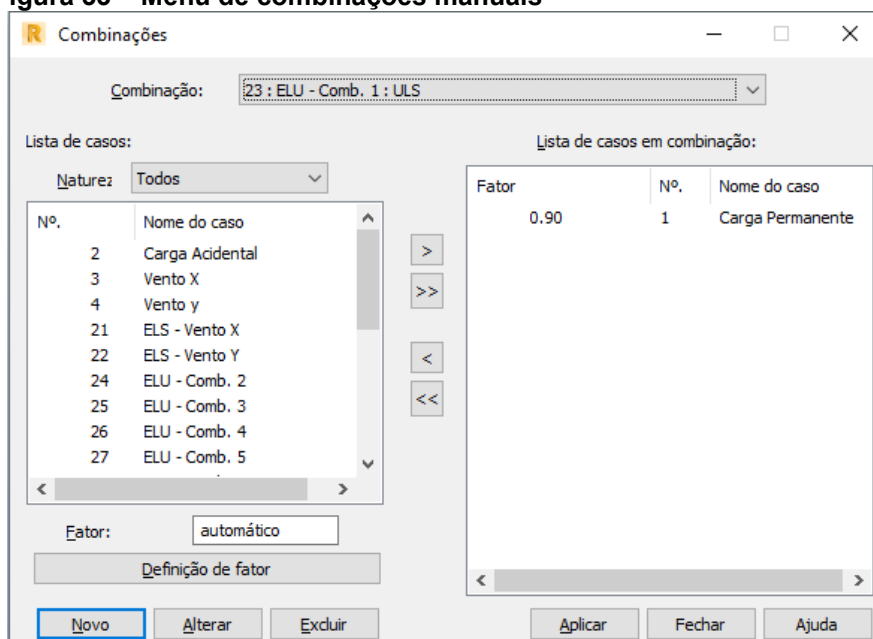
Na Tabela 10, contém as combinações de ELS frequente. Que foram utilizadas para analisar o deslocamento global da estrutura.

Tabela 10 – Combinações de ELS

Combinação	Equações
17	$0,3 \cdot V_x$
18	$0,3 \cdot V_y$

Autoria Própria (2019)

Por padrão, o Robot não possui as normas brasileiras. Portanto, estas combinações precisaram ser criadas através do menu Cargas >> Combinações manuais. Figura 33.

**Figura 33 – Menu de combinações manuais****Autoria Própria (2019)**

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Deslocamentos

Para os deslocamentos devido ao vento Y, foi selecionado o nó mais alto para verificar qual foi o seu deslocamento vertical e horizontal. Na Figura 34, é possível visualizar que o deslocamento horizontal em Y foi de 0,123 cm.

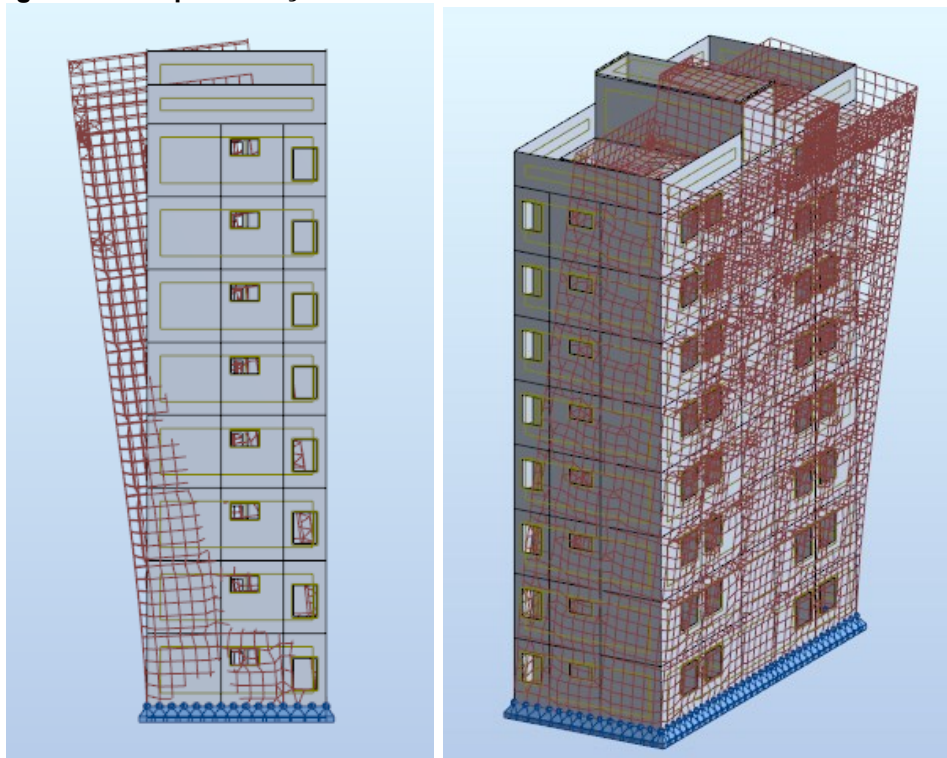
Figura 34 – Deslocamento devido ao Vento Y

Nó/Caso	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)
4458/ 22 (C)	-0,000	0,123	0,016	-0,000	0,000	0,000
4459/ 22 (C)	-0,000	0,123	-0,017	0,000	0,000	-0,000
4472/ 22 (C)	-0,000	0,112	0,016	-0,000	0,000	0,000
4473/ 22 (C)	-0,000	0,114	0,016	-0,000	0,000	0,000

Fonte: Autoria própria (2019)

Nota-se na Figura 35 a estrutura na sua situação deslocada devido à combinação de ELS frequente

Figura 35 – Representação do deslocamento em Y



Fonte: Autoria própria (2019)

No deslocamento do Vento X, foi selecionado o mesmo nó. E os valores dos deslocamentos estão contidos na Figura 36 abaixo.

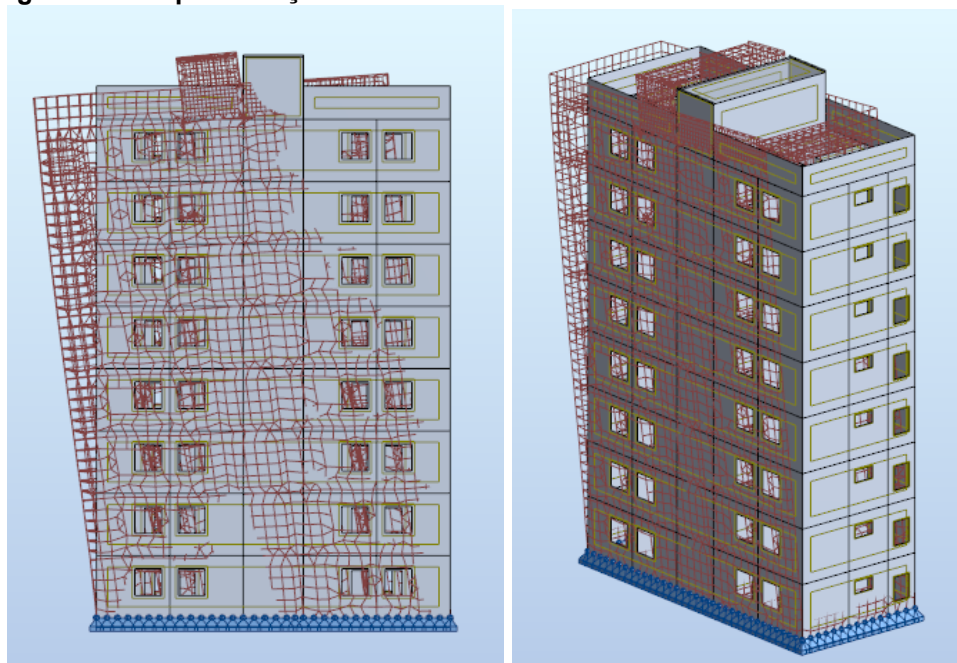
**Figura 36 – Deslocamento devido ao Vento X**

Nó/Caso	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)
4459/ 21 (C)	-0,024	0,000	0,001	0,000	-0,000	0,000
4472/ 21 (C)	-0,022	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
4473/ 21 (C)	-0,022	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
4474/ 21 (C)	0,023	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autoria própria (2019)

Na Figura 37, este deslocamento devido a combinação de ELS frequente.

**Figura 37 – Representação do deslocamento em X**



Fonte: Autoria própria (2019)

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 O deslocamento horizontal limite (ELS) do topo do edifício é dado pela equação a seguir:

$$\delta_{ht} \leq H/1700 \quad \text{Equação (6)}$$

Sendo H a altura do edifício em cm.

Ao inserir a informação da altura do edifício, tem-se:

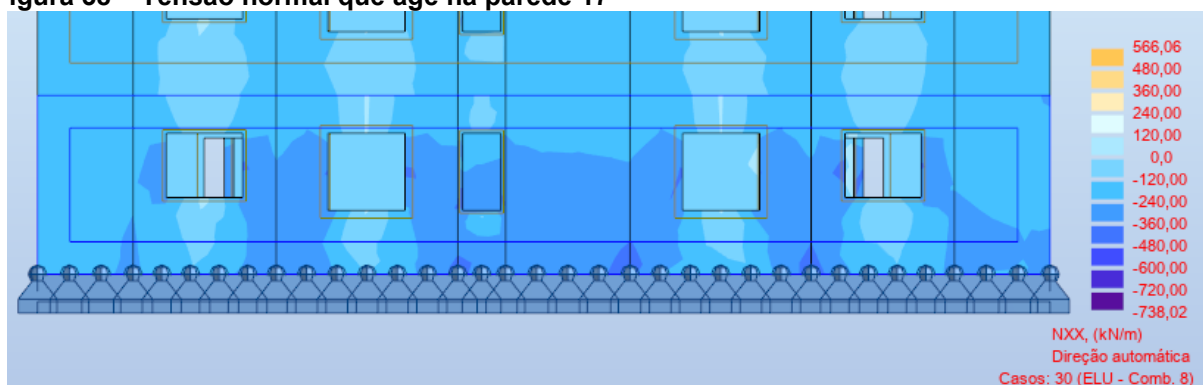
$$\delta ht \leq \frac{2520}{1700} \rightarrow \delta ht \leq 1,48 \text{ cm}$$

Como os deslocamentos nas direções X e Y são menores que 1,48 cm. O edifício está de acordo com a normativa.

## 6.2 Tensões normais

Foi escolhida a parede 17 para verificar os valores de tensões normais. Na Figura 38, é observado na Tabela 9 as tensões sofridas devido à combinação 8 que é a mais crítica. Verifica-se que nesta parede não houve incidência de força normal de tração.

Figura 38 – Tensão normal que age na parede 17

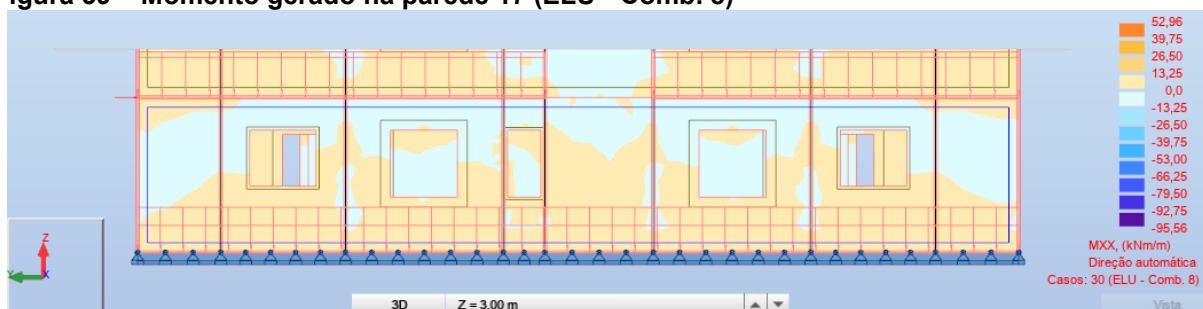


Fonte: Autoria própria (2019)

## 6.3 Momentos nas paredes

Ainda utilizando a combinação mais crítica, foi gerado o mapa de momentos na parede 17, conforme mostra a Figura 39.

Figura 39 – Momento gerado na parede 17 (ELU - Comb. 8)



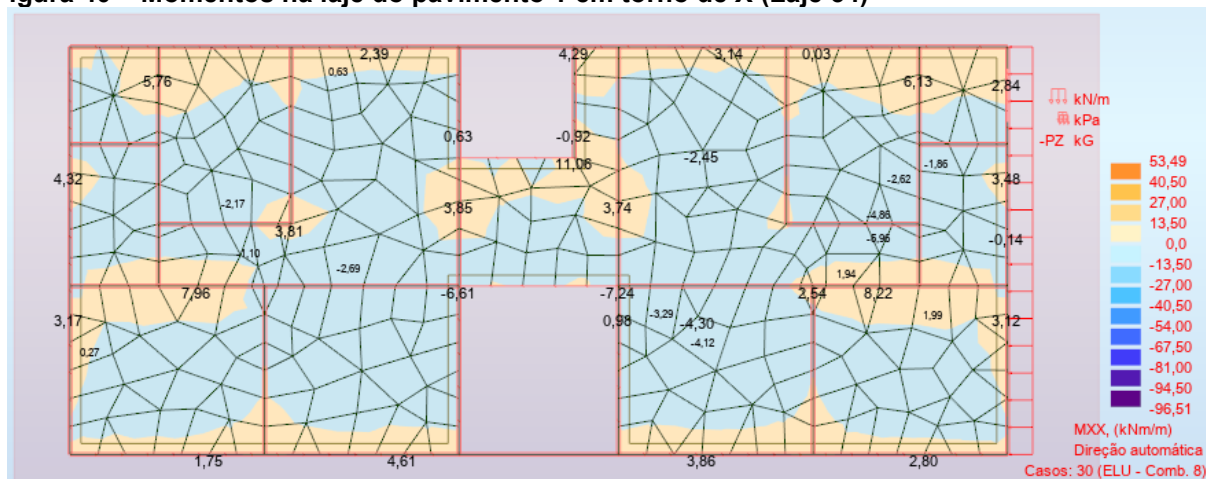
Fonte: Autoria própria (2019)



## 6.4 Momentos nas Lajes

Foi analisada a laje do pavimento 1 (Laje 34). Conforme mencionando anteriormente. A ligação entre a laje e as paredes é rotulada (Figura 41).

**Figura 40 – Momentos na laje do pavimento 1 em torno de X (Laje 34)**



Fonte: Autoria própria (2019)

## 6.5 Quantitativo de materiais por pavimento

Com o Revit é possível gerar o quantitativo de praticamente todos os itens contidos na modelagem através de tabelas. Estas tabelas podem ser configuradas utilizando diversas características como filtro, como por exemplo: o tipo da família, tipo do elemento, as dimensões do objeto, entre outras. Para este projeto em específico, é interessante determinar o quantitativo dos blocos utilizados para compor o pavimento tipo, na Figura 42. O total de blocos necessários para este pavimento são 4231 blocos, divididos entre Blocos de 14, 29 e 44 e caneladas de 29 e 44 cm.

Figura 41 – Quantitativos de blocos estruturais.

<Blocos Estruturais Cerâmicos>	
A	B
Família e tipo	Contador
Bloco Estrutural de 15cm (L14): BE15	340
Bloco Estrutural de 30cm (L14): BE30	3103
Bloco Estrutural de 45cm (L14): BE45	302
Canaleta (L14): C30	399
Canaleta (L14): C45	87
Total geral: 4231	4231

Fonte: Autoria própria (2019)

Ainda com o Revit, é possível determinar o quantitativo de diversos materiais, como:

- Revestimentos em m<sup>2</sup>
- Argamassa em m<sup>3</sup> ou m<sup>2</sup>
- Tintas em m<sup>2</sup>
- Concreto em m<sup>3</sup>
- Portas e janelas em un.

Mas para que isso seja possível, o projeto deve ser bem detalhado, no que se diz respeito ao nome, tipo de elemento e característica da família utilizado. Quanto maior o nível de detalhe, mais informações poderão ser extraídas do projeto.

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho contemplou o desenvolvimento de um projeto edifício residencial de 8 pavimentos utilizando a alvenaria estrutural com o emprego do software *Autodesk Revit*. Em paralelo ao processo de modelagem, o software gerou o quantitativo de blocos (elementos) utilizados no pavimento tipo separando os itens de acordo com o tipo de bloco. Posteriormente, o projeto foi encaminhado ao *Autodesk Revit*, para que o processo de análise estrutural da edificação, sendo necessário para isto, a definição dos tipos de materiais e aplicação de esforços solicitantes.

Foram mostradas as etapas importantes que devem ser levadas em consideração para a criação de projetos onde tem-se como base a alvenaria estrutural. Dentre eles, o mais importante é a modulação, imprescindível para que possibilite a amarração dos blocos. Quando esta etapa não é feita, é muito provável que o em algum momento acontecerá alguma incompatibilidade.

Foi necessário a criação de paredes estruturais afim de representar as paredes de blocos estruturais para gerar a parede analítica que posteriormente foi objeto base na análise estrutural. No Robot, o pavimento tipo foi replicado para atingir os oito pavimentos e a cobertura.

O graute deve ser usado em situações onde a tensão normal que incide sobre a parede é maior do que a tensão resistente da parede e também deve ser utilizado nos encontros de paredes para melhorar o comportamento da ligação entre estas.

Para algumas tarefas esses softwares necessitam de muito processamento, fato que dificultou ou até mesmo impossibilitou que algumas etapas fossem feitas. Não foi possível criar o modelo completo do edifício utilizando os blocos no *Revit* por conta da grande quantidade de elementos, fez com que o computador travasse por diversas vezes. Durante a verificação de deslocamento horizontal, o Robot também apresentou travamentos, devido à grande quantidade de nós que a estrutura se dividiu. Uma solução para este problema seria diminuir o intervalo discretizado, de modo a reduzir o número de nós. Porém, é importante que esta alteração de discretização não coloque em dúvida os resultados obtidos.

Neste trabalho foi realizado apenas uma análise estrutural, portanto é possível dar continuidade ao tema executando o dimensionamento da estrutura levando em conta as regiões com ocorrência de tração ou com excesso de compressão. Além do dimensionamento das vergas e contravergas, incluindo a disposição das armaduras.

O *Robot* é um software que tem a capacidade de dimensionar uma estrutura, porém não possui no seu sistema as normas brasileiras. Limitando o seu uso apenas para análise estrutural. Sugere-se como alternativa a utilização de algum outro software que atenda as normas brasileiras.

## REFERÊNCIAS

AUTODESK. **Sobre o modelo analítico estrutural**. 2018. Disponível em: <<http://help.autodesk.com>>. Acesso em: 10 out. 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15961-1: **Blocos de concreto - Projeto**. Rio de Janeiro, 2011.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13529: **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas**. 1 ed. Rio de Janeiro, 1995.

BRASIL. IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios, 2001-2009**. Rio de Janeiro.

CARDOSO, Andreia et al. **BIM: O que é?**. 2013. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt>>. Acesso em: 10 out. 2018.

CARVALHO, Antonio Pedro Alves de; TAVARES, Ígor de Góes. **Modulação no Projeto Arquitetônico de Estabelecimentos Assistenciais de Saúde: o caso dos Hospitais SARAH**. 2002.

FRANÇA JUNIOR, Davidson de Oliveira. **Análise estrutural de um edifício em concreto armado com quatro pavimentos**: estudo de caso para diferentes modelos estruturais. 2015, 121 pág. Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2015

JUSTI, Alexander Rodrigues. **Implantação da plataforma Revit nos escritórios brasileiros**: Relato de uma experiência. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, São Paulo, v. 3, n. 1, p.140-152, 01 maio 2008. Mensal.

KALIL, Sílvia Maria Baptista. **ALVENARIA ESTRUTURAL**. Porto Alegre: Pucrs, 2006. 86 p.

RAMALHO, Mareio A.; CORRÊA, Márcio R. S. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural**. São Paulo: Editora Pini Ltda., 2003. 169 p.

SARAIVA, Victor Alexandre Henrique Silva. **Sistema de Recuperação e Reforço Estrutural de Concreto Armado**. 2015. 55 f. Monografia (Especialização) - Curso de Eng. Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Rio de Janeiro, 2015.

Succar, B. (2009). **Building information modeling** framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18: 357-375 <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003> .

PIZA, Isabella F. (2017). **Roteiro de modelagem estrutural utilizando a tecnologia BIM, desde a modelagem no Revit até a análise estrutural no Robot**. Campo Mourão, 2017. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná