

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ISABELLA FARIA PIZA

**ROTEIRO DE MODELAGEM ESTRUTURAL UTILIZANDO A
TECNOLOGIA BIM, DESDE A MODELAGEM NO *REVIT* ATÉ A
ANÁLISE ESTRUTURAL NO *ROBOT***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2017

ISABELLA FARIA PIZA

**ROTEIRO DE MODELAGEM ESTRUTURAL UTILIZANDO A
TECNOLOGIA BIM, DESDE A MODELAGEM NO *REVIT* ATÉ A
ANÁLISE ESTRUTURAL NO *ROBOT***

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

2017



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

**ROTEIRO DE MODELAGEM ESTRUTURAL UTILIZANDO A TECNOLOGIA BIM, DESDE
A MODELAGEM NO REVIT ATÉ A ANÁLISE ESTRUTURAL NO ROBOT**

por

Isabella Faria Piza

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 14h00min do dia 21 de junho de 2017 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. Ronaldo Rigobello

(UTFPR)

Prof. Dr. Jorge Luis Nunes de Goes

(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. Ronaldo Rigobello

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me possibilitou chegar até aqui através da sua graça.

Aos meus pais João Carlos e Clair por serem a base da minha vida, dando-me a oportunidade do estudo. Mais do que formação acadêmica, a humana foi o que de mais importante vocês fizeram por mim. Eu só posso retribuir tentando ser a melhor filha que pais como vocês merecem ter. Infinitamente, obrigada.

Aos meus amigos de turma por fazerem dos meus dias durante a graduação mais fáceis.

Ao meu namorado Danilo por me suportar e dar apoio nos momentos mais difíceis do curso.

A toda minha família por me incentivar a dar o meu melhor para minha formação.

Ao professor Giovanni por todo conhecimento transmitido durante a orientação do trabalho de conclusão de curso.

Aos demais professores da UTFPR, por serem o portal para a realização deste sonho.

RESUMO

PIZA, Isabella F. **Roteiro de modelagem estrutural utilizando a tecnologia BIM, desde a modelagem no *Revit* até a análise estrutural no *Robot***. 2017. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2017.

A busca pelo investimento em ferramentas que acelerem o processo de trabalho e aumentem o potencial qualitativo dos serviços é cada vez mais comum. A tecnologia BIM é o novo conceito quando se trata de projetos para construções, uma vez que utiliza informações parametrizadas para modelar um projeto. Os *softwares* que seguem a linha BIM permitem uma visualização 3D da estrutura, possuem uma base de dados e informações integrada e coordenada, permitem o aumento da produtividade, detectam conflitos dos elementos construtivos, modelam os objetos com definição das propriedades físicas e muito mais. No entanto, apesar das inúmeras vantagens que a tecnologia proporciona, muitos profissionais da área ainda apresentam-se inertes a mudança, motivados por diversas justificativas. Com o objetivo de incentivar o uso da nova tecnologia, esse trabalho apresenta um roteiro de modelagem estrutural através do *Autodesk Revit*, bem como a exportação para o *Autodesk Robot*, ambos *softwares* BIM, indicando o roteiro básico das etapas de modelagem e análise, e solucionando algumas das principais incompatibilidades que surgem.

Palavras-chave: Modelagem da Informação da Construção; *Autodesk Revit*; Modelagem estrutural; *Autodesk Robot*; Análise estrutural.

ABSTRACT

PIZA, Isabella F. **Structural modeling script using BIM technology, from Revit modeling to Robot structural analysis**. 2017. 83 p. Course Completion Work - Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná, Campo Mourão, 2017.

The search for investment in tools that accelerate the work process and increase the qualitative potential of services is increasingly common. BIM technology is the new concept when it comes to construction projects, since it uses parameterized information to model a project. Software that follows the BIM line allows a 3D visualization of the structure, has an integrated and coordinated database and information, allows productivity increase, detects constructive elements conflicts, models objects with definition of physical properties and more. However, in spite of the innumerable advantages that technology provides, many professionals in the field are still inert to change, motivated by various justifications. In order to encourage the use of the new technology, this work presents a structural modeling script through Autodesk Revit, as well as the export to Autodesk Robot, both BIM software, indicating the basic script of the modeling and analysis steps, and solving some of the main incompatibilities that arise.

Keywords: Building Information Modeling; Autodesk revit; Structural modeling; Autodesk Robot; Structural analysis.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Coeficiente de arrasto para ventos com baixa turbulência..... | 33 |
| Figura 2 - Coeficiente de arrasto para ventos com alta turbulência. | 33 |
| Figura 3 - Velocidade básica do vento. | 35 |
| Figura 4 - Variações do relevo. | 36 |
| Figura 5 – Imperfeições geométricas globais..... | 39 |
| Figura 6 - 3D do edifício. | 43 |
| Figura 7- Planta baixa pavimento térreo. | 44 |
| Figura 8 - Planta baixa pavimento tipo. | 45 |
| Figura 9 - Planta baixa cobertura. | 46 |
| Figura 10 - Planta baixa casa de máquinas. | 47 |
| Figura 11 - Planta baixa caixa d'água. | 47 |
| Figura 12 - Menu de projetos na interface inicial..... | 48 |
| Figura 13 - Vínculo do <i>Revit</i> no menu de barras. | 48 |
| Figura 14 - Visibilidade/Sobreposição de gráfico no menu de propriedades..... | 49 |
| Figura 15 - Visibilidade no quadro visibilidade/Sobreposição de gráfico..... | 49 |
| Figura 16 - Lançamento dos elementos estruturais no térreo. | 51 |
| Figura 17 - Lançamento dos elementos estruturais nos pavimentos tipo..... | 52 |
| Figura 18 - Lançamento dos elementos estruturais na cobertura. | 53 |
| Figura 19 - Lançamento dos elementos estruturais na casa de Máquinas. | 54 |
| Figura 20 - Lançamento dos elementos estruturais na caixa d'água. | 54 |
| Figura 21 - Lançamento dos elementos estruturais no ático..... | 55 |
| Figura 22 - Plantas estruturais no menu navegador de projeto..... | 56 |
| Figura 23 - Modelo de vista no menu de propriedades. | 57 |
| Figura 24 - Modelo analítico do pavimento tipo com a laje ocultada da vista..... | 58 |
| Figura 25 - Vínculo analítico no menu de propriedades. | 60 |
| Figura 26 - Comparativo entre modelos analíticos e a o modelo físico. | 60 |
| Figura 27 – Inconsistência da laje analítica..... | 61 |
| Figura 28 - Ajuste analítico no menu de barras..... | 62 |
| Figura 29 - Ajuste analítico das lajes..... | 62 |
| Figura 30 - Cargas no menu de barras. | 63 |
| Figura 31 - Tipos de cargas..... | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 32 - Casos de cargas. | 64 |
| Figura 33 - Exemplo de combinação de carga. | 65 |
| Figura 34 - Propriedades de Cargas de ponto. | 66 |
| Figura 35 - Exportação do modelo. | 67 |
| Figura 36 - Cursor de exportação do modelo. | 68 |
| Figura 37 – Definição de carga. | 69 |
| Figura 38 – Definição do caso de carga. | 69 |
| Figura 39 – Material dos elementos no quadro de atributos. | 70 |
| Figura 40 - Nó correspondente à base do pilar. | 70 |
| Figura 41 – Vínculo no quadro de atributos. | 71 |
| Figura 42 – Cálculo dos resultados. | 71 |
| Figura 43 – Diagrama para barras. | 72 |
| Figura 44 – Ferramenta para ligar os sistemas locais. | 72 |
| Figura 45 - Seleção de texto para a descrição de diagramas. | 73 |
| Figura 46 - Convencionalmente dos eixos. | 74 |
| Figura 47 – Deslocamento (cm) da estrutura para o vento V_x positivo. | 75 |
| Figura 48 - Deslocamento (cm) da estrutura para o vento V_y positivo. | 76 |
| Figura 49 - Diagrama de momento (kN.m) e cortante (kN) para a combinação 1. | 78 |
| Figura 50 - Diagramas de momento fletor M_z (kN.m) e M_y (kN.m) e força normal F_x (kN), para a combinação 2, para o pilar P17. | 78 |
| Figura 51 – Diagrama de momento M_{xx} (kN.m), para a combinação 3, para a laje L13 através das isolinhas. | 79 |
| Figura 52 - Diagrama de momento M_{xx} (kN.m), para a combinação 3, para a laje L13 através dos valores em cada nó. | 80 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Ações permanentes diretas consideradas separadamente..... | 24 |
| Tabela 2 - Ações permanentes diretas agrupadas..... | 25 |
| Tabela 3 - Efeitos de recalques de apoio e de retração dos materiais..... | 25 |
| Tabela 4 - Ações variáveis consideradas separadamente | 26 |
| Tabela 5 - Ações variáveis consideradas conjuntamente ¹⁾ | 26 |
| Tabela 6 - Valores dos fatores de combinação (ψ_0) e de redução (ψ_1 e ψ_2) para as ações variáveis..... | 27 |
| Tabela 7 - Peso específico dos materiais de construção | 28 |
| Tabela 8 - Valores mínimos das cargas acidentais verticais..... | 29 |
| Tabela 9 - Parâmetros meteorológicos | 37 |
| Tabela 10 - Valores mínimos para o fator S3..... | 38 |
| Tabela 11 - Combinações | 77 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 OBJETIVOS | 12 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 12 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 12 |
| 3 JUSTIFICATIVA | 13 |
| 4 REFERENCIAL TEÓRICO | 14 |
| 4.1 EVOLUÇÃO DAS FERRAMENTAS DE DESENHO E REPRESENTAÇÃO | 14 |
| 4.2 BIM (BUILDING INFORMATION MODELING)..... | 15 |
| 4.3 <i>AUTODESK REVIT</i> | 17 |
| 4.4 <i>AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL</i> | 18 |
| 4.5 COMBINAÇÕES DE AÇÕES | 19 |
| 4.5.1 Combinações últimas das ações | 20 |
| 4.5.2 Combinações de utilização das ações | 21 |
| 4.5.3 Coeficientes de ponderação para combinações últimas | 23 |
| 4.6 CARGAS VERTICAIS | 28 |
| 4.6 AÇÕES HORIZONTAIS | 31 |
| 4.6.1 Vento segundo a ABNT NBR 6123:1988 | 31 |
| 4.6.2 Desaprumo segundo a ABNT NBR 6118:2014 | 39 |
| 5 METODOLOGIA | 41 |
| 5.1 MATERIAIS | 41 |
| 5.2 MÉTODO..... | 41 |
| 6 ROTEIRO DE MODELAGEM ESTRUTURAL UTILIZANDO A TECNOLOGIA BIM | 43 |
| 6.1 MODELAGEM ESTRUTURAL NO <i>REVIT</i> | 43 |
| 6.1.1 Plantas arquitetônicas | 43 |
| 6.1.2 Tarefas preliminares à modelagem | 47 |
| 6.1.3 Lançamentos dos elementos estruturais | 49 |
| 6.1.5 Cargas no <i>Revit</i> | 63 |
| 6.1.6 Exportação do modelo estrutural para o <i>Robot Structural Analysis</i> | 67 |
| 6.2 ANÁLISE ESTRUTURAL NO <i>ROBOT</i> | 68 |
| 6.2.1 Tarefas complementares ao <i>Revit</i> | 68 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 6.2.1 Cálculos da estrutura..... | 71 |
| 6.2.2 Análise estrutural..... | 74 |
| 7 CONCLUSÃO | 81 |
| REFERÊNCIAS..... | 82 |

1 INTRODUÇÃO

O uso de *softwares* deixou de ser apenas um complemento de trabalho para os profissionais da área de engenharia e passou a ser uma ferramenta chave do ofício. Isso se deve a eficácia, praticidade e redução de erros e tempo que o uso de programas computacionais propicia.

As ferramentas CAD com plataformas de desenhos 2D, foram as pioneiras na transição dos projetos feitos à mão para o computador, e ainda são utilizadas como carro chefe em grande parte dos escritórios de engenharia. Porém, se comparado às novas tecnologias, este instrumento de trabalho está se tornando arcaico, em certos aspectos.

O BIM (*Building Information Modeling*) é um recurso para o compartilhamento de informações organizadas e confiáveis de uma edificação materializada em diversos *softwares* através de modelagem paramétrica. Segundo Catelani (2016) os programas que contemplam esse recurso geram documentos mais confiáveis, diminuindo os erros de projetos, extraem a quantidade de materiais de forma automática, permitem o ensaio da execução da obra, identificam interferências entre os projetos (arquitetônico, estrutural, hidráulico e elétrico), permitem uma visualização 3D da edificação, entre outras vantagens.

Dada a inércia às mudanças, as barreiras culturais do ambiente brasileiro e a insegurança em relação ao retorno do investimento BIM, a adoção dos *softwares* criados a partir da nova tecnologia ainda é lenta (TAVARES, 2007). A utilização de CADs 2D, por enquanto, ainda é a principal maneira de documentar projetos.

Conforme a comunidade de usuários de determinados *softwares* vai crescendo, mais fácil fica difundir a ideia para os principiantes, já que estes podem encontrar respostas acessíveis para as dificuldades e incompatibilidades que vão surgindo por meio de guias escritos ou em vídeo que os próprios usuários criam. Portanto este trabalho foi realizado com a intenção de ser parte da resposta para os profissionais que pretendem utilizar o *Autodesk Revit* para realização da modelagem estrutural e o *Autodesk Robot* para análise dos esforços. Para isso foi feito um roteiro contemplando as principais etapas da tarefa de modelagem e compatibilização entre os *softwares*.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Elaborar um roteiro de modelagem de uma estrutura de um edifício multipavimentos em concreto armado empregando a tecnologia BIM, modelando a estrutura através do *Autodesk Revit*, e exportando para o *Autodesk Robot* para análise estrutural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar um roteiro do lançamento da estrutura e dos carregamentos nos elementos estruturais de acordo com as normas ABNT NBR 6120:1980, ABNT NBR 6123:1988, ABNT NBR 6118:2014 e ABNT NBR 8681:2003 no *software Revit*;
- Ilustrar algumas das incompatibilidades que surgem, tal como a solução para estas;
- Demonstrar a exportação do modelo estrutural do *Revit* para o *Robot*;
- Instruir as adaptações necessárias para o modelo estrutural no *Robot*;
- Demonstrar alguns dos resultados da análise estrutural.

3 JUSTIFICATIVA

Considerando que o tempo é um recurso cada vez mais valioso, a inovação das ferramentas de trabalho é imprescindível. Quando se pensa nos escritórios de projeto, sabe-se que o trabalho dos profissionais deve ser minucioso e de fácil entendimento para execução. Como um trabalho bem feito demanda bastante tempo, uma maneira inteligente de se sobressair em relação aos concorrentes é o investimento em implantação de novos *softwares* que permitam otimizar o trabalho.

O BIM tem trazido importantes mudanças tecnológicas para a área da construção, facilitando o trabalho dos profissionais que aderem a essa filosofia de trabalho. Os *softwares* contemplados com essa tecnologia apresentam inúmeras vantagens: maior velocidade na entrega (economia de tempo), menos erros nos desenhos, redução de custos, maior produtividade usando um único modelo digital, maior foco no projeto e redução do retrabalho (JUSTI, 2008). Ainda assim, existe uma certa estagnação dos usuários devido à insegurança e barreiras culturais.

Diante disso, o desenvolvimento deste trabalho visou o auxílio e encorajamento de profissionais do mercado, à utilização do Programa *Revit*, que é um *software* BIM, para modelagem estrutural, através de um roteiro que mostre as principais etapas da tarefa de modelagem, e do *Robot*, para análise estrutural.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 EVOLUÇÃO DAS FERRAMENTAS DE DESENHO E REPRESENTAÇÃO

As evidências históricas disponíveis sobre a engenharia da Antiguidade indicam que os métodos construtivos utilizados eram totalmente diferentes dos atuais. Nessa época, a representação física da edificação era feita através de maquetes em escala, sem documentação nenhuma sobre a construção. Os arquitetos ou engenheiros, equivalentes da época, não tinham um espaço físico próprio, o posto de trabalho tinha o mesmo endereço da obra. Vale ressaltar que o avanço da matemática, da geometria e do desenvolvimento das técnicas de perspectivas só se deu após a Idade Média (CATELANI, 2016).

Segundo Catelani (2016) a ideia da concepção de um projeto é instruir o leitor num momento posterior, a interpretar os dados e informações que precisam ter um adequado nível de detalhamento, globalização e organização, para que o objetivo do projeto seja atingido com satisfação. O projeto é o álibi, ou não, para o engenheiro em casos de acidentes.

A prancheta foi a evolução da construção não documentada para o desenho a mão. No início, fazia-se uso do papel opaco até a sua substituição por um translúcido (para facilitar a compatibilidade entre infraestrutura, estrutura e superestrutura). O trabalho dos projetistas era maçante e demorado, possuía poucos detalhes e muitos erros (CATELANI, 2016).

A era do computador fez uma revolução no método de trabalho dos profissionais da área. Nos anos 80 a invenção dos *softwares* CAD 2D substituiu o lápis e o papel, gerando uma melhor metodologia de trabalho e eficiência no tratamento dos projetos. No sistema CAD 2D as linhas, textos e pontos são inseridos em um espaço virtual, inicialmente 2D, evoluindo ao conter elementos no espaço (3D). Entretanto nesse tipo de *software* o projeto não passa de um documento.

Na virada do ano 2000 surgiu o BIM, que é a tecnologia mais avançada atualmente, não só para concepção de projetos como para planejamento e gestão do ciclo de vida de uma edificação. Estes sistemas, que utilizam a chamado

modelagem paramétrica, são considerados evoluções do sistema CAD 2D, pois integram informações de forma inteligente numa base de dados (REZENDE, 2008).

4.2 BIM (BUILDING INFORMATION MODELING)

BIM é uma plataforma de informações adotada à construção civil, através de *softwares*, que gera uma metodologia para a gestão de projetos de edifícios, de ensaio de desempenho e de informações. Possibilita a modelagem, o armazenamento, a troca e o acesso aos vários grupos de informações sobre uma edificação (CATELANI, 2016).

O BIM é um instrumento excelente para a gestão do planejamento e fiscalização do projeto, atuando para reduzir os riscos e erros, uma vez que pode fazer a simulação da obra e identificar eventuais erros de planejamento (SANTOS, 2009).

O conceito BIM para a área da Engenharia permite simular o desenvolvimento do projeto levando em consideração seu entorno (bairro ou cidade) e a reação de uma edificação frente a questões energética e de consumo de materiais. Portanto, permite simular o ciclo de vida do empreendimento, seus impactos e interferências (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, conforme a Ilustração 2. Com efeito, o BIM é uma base de dados lógica e consistente, com toda a informação da edificação, constituindo um repositório de dados e conhecimentos compartilhado durante todo o ciclo de vida do empreendimento (COLOMBO, 2014).

Além de um simples modelo de visualização de projeto, *building information modeling* é um modelo digital que possibilita agrupar informações de custo, fabricante e manutenção para vários fins. De acordo com Tse (2005) um modelo pode ser 2D, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D até nD:

- 2D Gráfico – é a representação gráfica no plano;

- 3D Modelo – é a representação espacial ao plano 2D. Facilita a perspectiva de um modelo. No caso do BIM, cada componente em 3D possui atributos e parametrização que os caracterizam como parte de uma construção virtual de fato.
- 4D Planejamento – auxilia no gerenciamento dos materiais (estoque, armazenamento, transporte, instalação), do canteiro de obra e das equipes;
- 5D Orçamento – adiciona a dimensão custo ao modelo através da quantificação e custo de cada insumo;
- 6D Sustentabilidade – quantifica e qualifica a energia utilizada em todo ciclo de vida da obra para se tornar mais eficiente;
- 7D Gestão de instalações – gera informações para o usuário final, que facilitam a manutenção da edificação através de manuais, especificações, garantias etc.

Segundo Ayres (2008) para garantir a consistência, precisão e agilidade na retirada de informações quantitativas os modelos BIM realizam uma extração automática de gráficos (cortes, elevações, perspectivas) e de documentos (quantitativos e especificações) que maximizam o processo de produção de projetos quando utilizados adequadamente. Essas informações podem ser coletadas e agrupadas de acordo com a necessidade do usuário.

Os *softwares* BIM detectam de forma automática algumas das interferências entre os objetos que compõem um modelo. Toda vez que há incompatibilidades deste tipo, o *software* avisa o usuário sobre o ocorrido, além de apontar o lugar exato da interferência. Isso é bastante útil nos casos de modelos muito extensos ou complexos.

As soluções BIM, trabalham de forma que as alterações realizadas em qualquer vista serão automaticamente mudadas em todas as demais formas de visualização do projeto, sejam tabelas, relatórios ou desenhos (documentos), gerados a partir do modelo. Já no CAD 2D, os desenhos não são conexos, gerando um certo trabalho e confusão em mudanças globais. Adicionalmente, os *softwares* BIM são capazes de fazer a compatibilização de projetos.

4.3 AUTODESK REVIT

O *Autodesk Revit* é um *software* de modelagem de informações da construção (BIM) elaborado para permitir que engenheiros, arquitetos e *designers* façam seus projetos, criando um modelo tridimensional paramétrico associado, nos quais os componentes construtivos (portas, janelas, mobiliário, etc.) não fossem individuais. A facilidade de fazer alterações inspirou o nome *Revit*, uma contração de *Revise-It* (BERGIN,2012).

“Um modelador de construção paramétrico permite ao usuário criar restrições como a altura de um nível horizontal, que pode ser vinculada à altura do conjunto especificado de paredes e ajustada parametricamente, criando um modelo de banco de dados dinâmico que está vinculado à geometria. Este desenvolvimento respondeu a uma necessidade na indústria de arquitetura para ser capaz de alterar desenhos em escalas múltiplas e em folhas de desenho fragmentado.” (BERGIN,2012)

Na época que foi criado, vários outros *softwares* já funcionavam de maneira similar. Algumas diferenças fizeram com que o *Revit* se destacasse no mercado. Os componentes foram criados a partir de um “editor de família” gráfico ao invés de uma linguagem de programação. Isso permite ao usuário criar ou editar, de maneira simples, elementos construtivos dentro do projeto de acordo com o gosto ou necessidade. Além disso, a relação entre os componentes foi entrelaçada de tal forma que, qualquer mudança feita no modelo se propagasse de forma automática para manter a consistência: a chamada associatividade bidirecional. Por exemplo, se um telhado de duas águas é criado na cobertura, o *software* lança uma mensagem perguntando se o usuário pretende realçar as paredes até o telhado, criando o “oitão”, para que ele não fique “solto” na visualização em 3D (AUTODESK, 2017).

O *software* permite que o usuário concentre-se mais no *design* criando modelos 3D, uma vez que é possível visualizar a idealização do projeto. Como os componentes construtivos funcionam de maneira inteligente, quando o usuário cria elementos como portas, janelas ou paredes, por exemplo, o *Revit* gera automaticamente planos de piso e elevações para o modelo ficar consistente (AUTODESK, 2017).

A visualização do futuro empreendimento, por parte do cliente, é parte fundamental no processo de venda de um projeto. O *Revit* cria renderizações

fotorealísticas para comunicar a intenção do projetista de forma rápida e simples. Basta criar vistas panorâmicas 3D a partir de qualquer ângulo de visualização para obter uma realidade virtual (AUTODESK, 2017).

Grande parte dos *softwares* de modelagem é específica em uma única disciplina de trabalho (arquitetura, estrutural, elétrica, hidráulica, etc) e deixa a desejar nas demais. É muito comum cada disciplina envolvida no projeto ser modelada em *softwares* diferentes e não conversarem entre si. Apesar disso, em algum momento essas disciplinas precisam se comunicar para que seja possível um processo executivo com o menor número de interferências físicas possível. O *Revit* é uma plataforma multidisciplinar BIM, portanto reduz tediosas tarefas de compatibilização de diferentes disciplinas, compartilhando as diversas modelagens em um arquivo central (AUTODESK, 2017).

“Permita que as equipes escolham a melhor maneira de colaborar e interagir com base nos requisitos do projeto e do fluxo de trabalho. O compartilhamento de trabalho distribui o poder do ambiente de modelagem paramétrica de construções por toda a equipe de projeto. Os usuários do *Revit* de diferentes disciplinas podem compartilhar o mesmo modelo inteligente de informação da construção e salvar seu trabalho em um arquivo centralizado.” (AUTODESK, 2017).

Quando um modelo físico estrutural é criado no *Revit*, uma representação simplificada da descrição da engenharia, o modelo analítico, é criada automaticamente. O modelo analítico é o conjunto de informações simplificado dos componentes estruturais (vigas, pilares, lajes e fundações), sua geometria, propriedade físicas do material e cargas que juntos formam uma representação do modelo estrutural. O *Revit* permite a exportação do modelo analítico para *softwares* especializados em análises estruturais. Esse é um recurso muito interessante para engenheiros, uma vez que é necessária uma análise paralela ao *software* que fará o a análise e dimensionamento estrutural.

4.4 AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL

O *Autodesk Robot Structural Analysis Professional* é um *software* usado para modelagem, concepção e análise estrutural. O programa auxilia engenheiros,

realizando cálculos estruturais para estruturas de concreto armado, metálicas, de madeira e alvenaria estrutural.

O *software* permite tanto a modelagem estrutural plana quanto a tridimensional. A modelagem plana é conveniente para estruturas de contraventamento simétricas, considerando-se apenas os painéis paralelos à direção da ação horizontal estudada, já que não existe rotação da laje.

O vínculo bidirecional com o software de análise estrutural *Autodesk Revit* proporciona atualizações precisas do modelo. Isso só é possível devido à paramétrica gestão de mudanças, que mantém todos os documentos atualizados.

4.5 COMBINAÇÕES DE AÇÕES

Uma estrutura é solicitada por ações permanentes, variáveis e excepcionais. A probabilidade de ocorrência simultânea dessas ações é baixa, por isso é coerente realizar combinações destas ações. 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, segundo a ABNT NBR 8681:2003.

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 baixa, esta ação é considerada excepcional. Explosões, enchentes, choques de veículos, incêndio são exemplos desse tipo de ação, ABNT NBR 8681:2003.

4.5.1 Combinações últimas das ações

Segundo a ABNT NBR 8681:2003, para verificação do limite de ruptura de uma estrutura é preciso utilizar as combinações últimas, que são divididas em três: Combinações últimas normais, especiais e excepcionais.

4.5.1.1 Combinações últimas normais

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

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

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.

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

4.5.1.2 Combinações últimas especiais ou de construção

A determinação do valor das combinações últimas especiais se dá pela equação 2:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{g_i} F_{G_i,k} + \gamma_Q \left[F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j,ef} F_{Qj,k} \right] \quad (2)$$

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.

O fator $\Psi_{0j,ef}$ equivale ao fator Ψ_{2j} quando a ação variável principal tiver tempo de duração muito curto, caso contrário equipara-se a Ψ_0 .

4.5.1.3 Combinações últimas excepcionais

Por sua vez, as combinações últimas excepcionais são determinadas pela equação 3:

$$F_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{g_i} F_{G_i,k} + F_{Q,exc} + \gamma_Q \sum_{j=1}^n \Psi_{0j,ef} F_{Qj,k} \quad (3)$$

Onde:

$F_{Q,exc}$ é o valor da ação transitória excepcional.

4.5.2 Combinações de utilização das ações

Segundo a ABNT NBR 8681:2003 o estado limite de serviço é atingido quando as condições de uso normal da edificação não são atendidas. São elas: deformações e vibrações excessivas, e danos que afetam a estética a ponto de causar desconforto ao usuário da edificação. Para determinar o ELS é preciso

realizar uma combinação de utilização das ações, e existem 3 tipos: quase permanente, frequente e rara.

4.5.2.1 Combinações quase permanentes de serviço

Aquelas combinações que ocorrem em grande parte da vida útil da estrutura são consideradas como sendo quase permanente de serviço. A ordem de ocorrência gira em torno da metade do tempo que a edificação é utilizada. Podem ser calculadas pela equação 4:

$$F_{d,util} = \sum_{i=1}^m F_{G_{i,k}} + \sum_{j=1}^n \Psi_{2j} F_{Q_{j,k}} \quad (4)$$

Onde:

$\Psi_{2j} F_{Q_{j,k}}$ é o valor reduzido de combinação das ações variáveis tomadas com seus valores quase permanentes.

4.5.2.2 Combinações frequentes de serviço

As combinações que se sucedem em torno de 5% do tempo de vida de uma edificação são consideradas como frequente de serviço. É calculada pela equação 5:

$$F_{d,util} = \sum_{i=1}^m F_{G_{i,k}} + \Psi_1 F_{Q_{1,k}} + \sum_{j=2}^n \Psi_{2j} F_{Q_{j,k}} \quad (5)$$

Onde:

$\Psi_1 F_{Q_{1,k}}$ é valor reduzido de combinação da variável principal tomada com seu valor frequente;

$\Psi_{2j}F_{Qj,k}$ é valor reduzido de combinação das variáveis secundárias tomadas com seus valores quase permanentes.

4.5.2.3 Combinações raras de serviço

Por fim, a combinação de ações que duram apenas algumas horas ao longo de toda vida útil da edificação é considerada como sendo rara de serviço. É calculada pela equação 6:

$$F_{d,util} = \sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{1j} F_{Qj,k} \quad (6)$$

Onde:

$\Psi_{1j}F_{Qj,k}$ é valor reduzido de combinação das variáveis secundárias tomadas com seu valor frequente.

4.5.3 Coeficientes de ponderação para combinações últimas

4.5.3.1 Coeficientes de ponderação para as ações permanentes

Os coeficientes de ponderação γ_g têm função de reduzir ou aumentar os valores característicos das ações permanentes. Nos casos em que a ação permanente for desfavorável às ações variáveis, ou seja, ambas estiverem agindo no mesmo sentido, o coeficiente deve majorar a ação, caso contrário minorar, conforme a ABNT NBR 8681:2003. Os coeficientes de ponderação para as ações permanentes são indicados na tabela 1, quando consideradas separadamente, na

tabela 2, quando agrupadas, e na tabela 3 em casos de efeitos de recalque de apoio e retração dos 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 in loco | 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 in loco | 1,30 | 1,0 |
| | Elementos construtivos em geral e equipamentos ²⁾ | 1,40 | 1,0 |
| Excepciona | 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 in loco | 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.

Fonte: Adaptado ABNT NBR 8681:2003

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 permanentes.

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: Adaptado ABNT NBR 8681:2003

Tabela 3 - Efeitos de recalques de apoio e de retração dos materiais

| Combinação | Efeitos | |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Desfavoráveis | Favoráveis |
| Norma | $\gamma_{\epsilon} = 1,2$ | $\gamma_{\epsilon} = 0,0$ |
| Especial ou de construção | $\gamma_{\epsilon} = 1,2$ | $\gamma_{\epsilon} = 0,0$ |
| Excepcional | $\gamma_{\epsilon} = 0,0$ | $\gamma_{\epsilon} = 0,0$ |

Fonte: Adaptado ABNT NBR 8681:2003

4.5.3.2 Coeficiente de ponderação para as ações variáveis

Se uma ação variável é desfavorável para determinada combinação, os coeficientes de ponderação γ_Q majora o valor representativo desta ação. Já 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 4, quando consideradas separadamente, 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: Adaptado ABNT NBR 8681:2003

Tabela 5 - Ações variáveis consideradas conjuntamente¹⁾

| 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: Adaptado ABNT NBR 8681:2003

4.5.3.3 Valores dos fatores de combinação e de redução

Os fatores de combinação e de redução apresentados no quadro 6 assumem papel de minorar o valor característico das ações variáveis, considerando a periodicidade 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 |
|---|----------|----------|----------|
| 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⁾ | 0,6 | 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 | 0,0 |
| 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.

4.6 CARGAS 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, como indica a tabela 7, e valores mínimo para carga acidental, que é aquela que atua sobre a estrutura de edificações em função do seu uso (pessoas, móveis, materiais diversos, veículos etc.), como indica a tabela 8.

Tabela 7 - Peso específico dos materiais de construção

(continua)

| Materiais | | Peso específico aparente (kN/m ³) |
|-----------------------------|-----------------------------------|---|
| 1 Rocha | Arenito | 26,0 |
| | Basalto | 30,0 |
| | Gneiss | 30,0 |
| | Granito | 28,0 |
| | Mármore e calcário | 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 |

Tabela 7 - Peso específico dos materiais de construção

(conclusão)

| Materiais | | Peso específico aparente (kN/m ³) |
|-------------|--------------------|---|
| 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 | Alcatrão | 12,0 |
| | Asfalto | 13,0 |
| | diversos 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)

| Local | | 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 o valor mínimo de | 7,5 |

Tabela 8 - Valores mínimos das cargas acidentais verticais**(continua)**

| Local | | Carga |
|-------------------------------|--|--------------|
| 6 Cinemas | Platéia com assentos fixos | 3 |
| | Estúdio e platéia com assentos móveis | 4 |
| | Banheiro | 2 |
| 7 Clubes | Sala de refeições e de assembléia com assentos fixos | 3 |
| | Sala de assembléia com assentos móveis | 4 |
| | Salão de danças e salão de esportes | 5 |
| | Sala de bilhar e banheiro | 2 |
| 8 Corredores | Com acesso ao público | 3 |
| | Sem acesso 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 | Salas 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 |
| 21 Laboratórios | Incluindo equipamento, a ser determinado em cada caso, porém com o mínimo | 3 |

Tabela 8 - Valores mínimos das cargas acidentais verticais**(conclusão)**

| Local | | Carga |
|-----------------|---|-------|
| 22 Lavanderias | Incluindo equipamento | 3 |
| 23 Lojas | - | 4 |
| 24 Restaurantes | - | 3 |
| 25 Teatros | Palco | 5 |
| | Demais dependências: cargas iguais às especificadas 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

4.6 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 ação do vento e a ABNT NBR 6118:2014 para o desaprumo.

4.6.1 Vento segundo a ABNT NBR 6123:1988

A força de arrasto devido ao vento é determinada pela seguinte equação 7:

$$F_v = q C_A A_F \quad (7)$$

Onde:

q é a pressão de obstrução;

C_A é o coeficiente de arrasto;

A_F é a área de incidência em m^2 .

O coeficiente de arrasto é calculado através dos gráficos mostrados nas figuras 1, para ventos com baixa turbulência, e figura 2, para ventos com regime turbulento. 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.

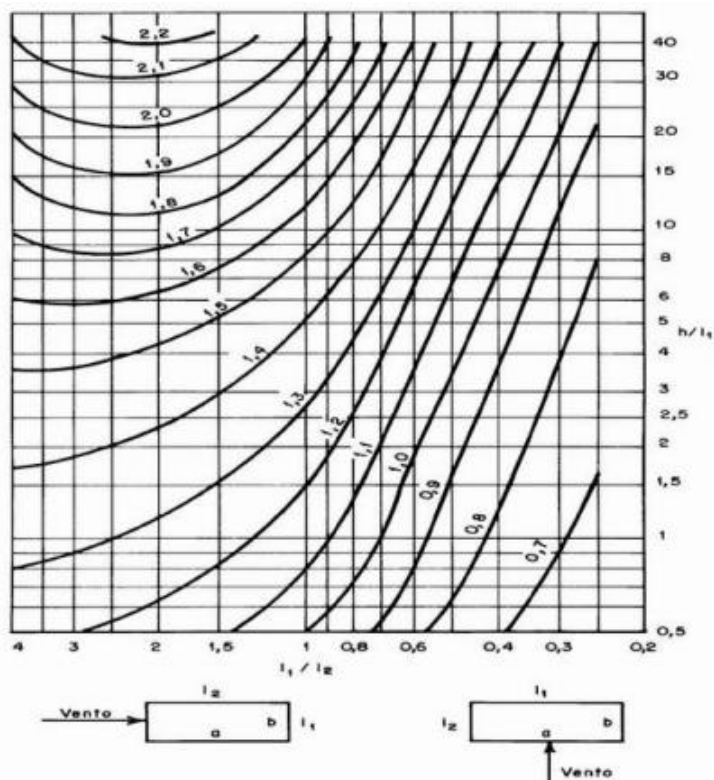


Figura 1 - Coeficiente de arrasto para ventos com baixa turbulência.

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988.

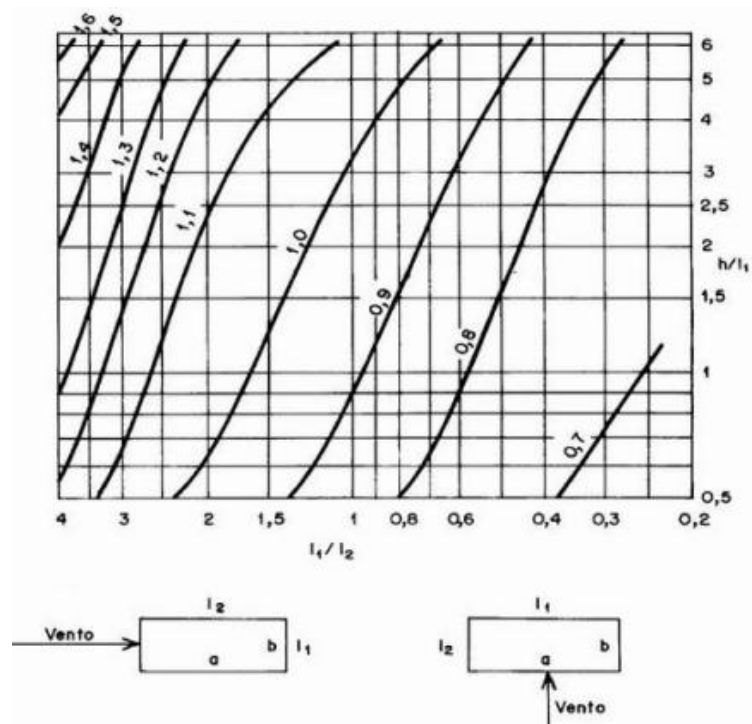


Figura 2 - Coeficiente de arrasto para ventos com alta turbulência.

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988.

A pressão de obstrução devido ao vento é determinada pela seguinte equação 8:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (8)$$

Onde:

V_k é velocidade característica do vento.

A velocidade característica, por sua vez, é calculada pela equação 9:

$$V_k = S_1 S_2 S_3 V_0 \quad (9)$$

Onde:

V_0 é a velocidade básica do vento calculada de acordo com o gráfico da figura 3;

S_1 é o fator topográfico;

S_2 é o fator de rugosidade e regime de escoamento;

S_3 é o fator estatístico.

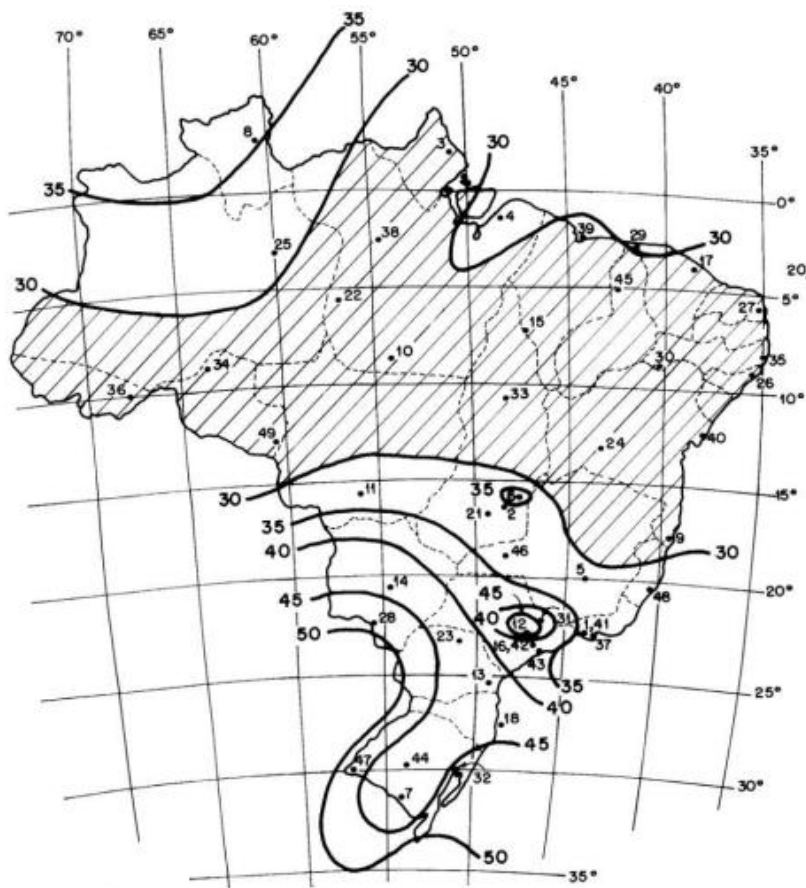


Figura 3 - Velocidade básica do vento.

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6123:1988.

O fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do terreno e é determinada do seguinte modo (ver figura 4), de acordo com a ABNT NBR 6123:1988:

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

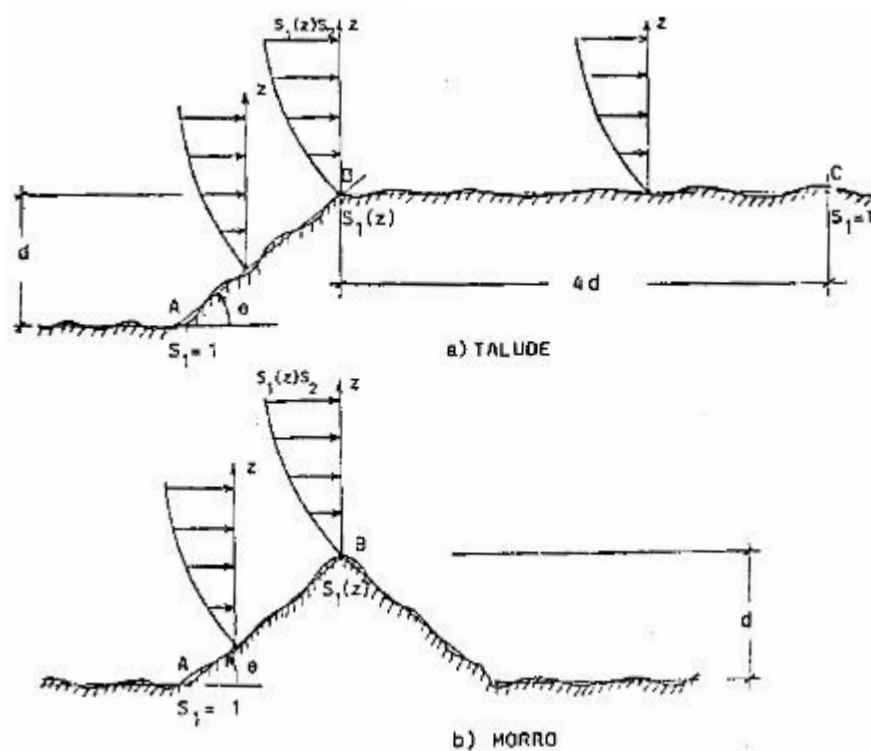


Figura 4 - Variações do relevo.

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 o 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 10 :

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

Onde:

z é a altura a ser calculado o vento;

b é obtido na tabela 9;

F_r é obtido na tabela 9;

p é obtido na tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros meteorológicos

(continua)

| 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 |
| | | F_r | 1,000 | 0,980 | 0,950 |
| | | p | 0,085 | 0,090 | 0,100 |

Tabela 9 - Parâmetros meteorológicos

(conclusão)

| Categoria | z (m) | Parâmetro | Classes | | |
|-----------|-------|-----------|---------|-------|-------|
| | | | A | B | C |
| III | 350 | b | 0,940 | 0,940 | 0,930 |
| | | p | 0,100 | 0,105 | 0,115 |
| IV | 420 | b | 0,860 | 0,850 | 0,840 |
| | | p | 0,120 | 0,125 | 0,135 |
| V | 500 | b | 0,740 | 0,730 | 0,710 |
| | | p | 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 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, 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

4.6.2 Desaprumo segundo a ABNT NBR 6118:2014

Na análise global das estruturas deve ser considerado um desaprumo dos elementos verticais, com ângulos, em radianos, como mostra a figura 5.

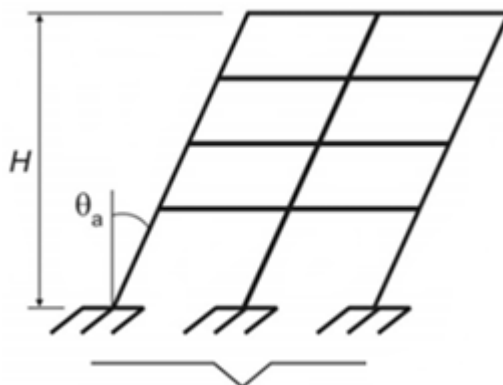


Figura 5 – Imperfeições geométricas globais.

Fonte: Adaptado ABNT NBR 6118:2014.

Onde:

$$\theta_1 = \frac{1}{100\sqrt{H}};$$

$\theta_{1\min} = \frac{1}{400}$ para estruturas de nós fixos, aquelas que o efeito de segunda ordem pode ser desconsiderado;

$\theta_{1\min} = \frac{1}{300}$ para estruturas de nós móveis, aquelas que o efeito de segunda ordem deve ser considerado;

$$\theta_{1\max} = \frac{1}{200};$$

$$\theta_a = \theta_1 \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{n}}{2}};$$

$\theta_a = \theta_1$ para edifícios com lajes lisas/cogumelo.

H é a altura da edificação em metros;

n é número de prumadas.

A força horizontal equivalente ao desaprumo por pavimento é expressa pela equação 11:

$$F_D = \theta_a \Delta P \quad (11)$$

Onde:

ΔP é o peso total do pavimento.

Quando 30% da ação do vento for maior que a ação do desaprumo, considera-se somente a ação do vento, e vice-versa. Nos demais casos, soma-se a ação do vento e do desaprumo, sem necessidade de verificação de θ_{1min} .

5 METODOLOGIA

5.1 MATERIAIS

Os *softwares* utilizados neste trabalho são:

- *Autodesk Revit 2017 – Versão estudante;*
- *Autodesk Robot Structural Analysis Profesional 2017 – Versão estudante;*

5.2 MÉTODO

A metodologia para o roteiro de modelagem através da tecnologia BIM consiste na inserção do modelo construtivo dentro de um *software* que contemple a tecnologia. Este caso trata-se do *Autodesk Revit* e *Autodesk Robot*.

A modelagem estrutural foi feita no *Revit Structure*. Partiu-se do lançamento da estrutura no *template* estrutural a partir da importação de um projeto arquitetônico do *Revit Architecture*.

Inicialmente foram posicionados os pilares, de tal forma que a estrutura de contraventamento ficasse simétrica. Então, foram lançadas as vigas baldrames e dos pavimentos, tendo como base as paredes da arquitetura. Assim que definidas as vigas iniciou-se a modelagem das lajes.

Após lançada a estrutura, foram definidas as variáveis: carga acidental, de vento, e desaprumo de acordo com as normas ABNT NBR 6120:1980, ABNT NBR 6123:1988 e ABNT NBR 6118:2014, respectivamente. No *Revit* a carga permanente relativa ao peso próprio dos elementos estruturais é automaticamente calculada, levando em consideração o peso específico e dimensões dos elementos estruturais. As cargas permanentes relativas às paredes e revestimentos devem ser calculadas e inseridas pelo usuário. Portanto, é preciso atenção especial nesta fase. As ações foram combinadas conforme prevê a ABNT NBR 8681:2003.

Diversas incompatibilidades vão surgindo ao longo das tarefas. O modelo analítico é feito automaticamente pelo *Revit*, porém o *software* faz o lançamento das vigas analíticas tendo como apoio o eixo dos pilares. Na maioria dos casos, deste projeto, as vigas não se apoiam sobre o eixo dos pilares. Para conformar isso, mudou-se o tipo de vinculação. Após o modelo analítico estar ajustado, foi feita a exportação do arquivo para o *Robot*.

No *Robot* foram feitos alguns ajustes. Foi editado o peso específico das vigas e pilares, pois no *Revit* foi utilizado um valor aleatório ao do projeto, foi definida a vinculação dos pilares com a fundação e lançada a carga hidrostática nas paredes da caixa d'água. Com o modelo totalmente ajustado calculou-se os esforços e foram coletados os resultados. Por fim foi apresentado alguns dos resultados da análise estrutural.

6 ROTEIRO DE MODELAGEM ESTRUTURAL UTILIZANDO A TECNOLOGIA BIM

6.1 MODELAGEM ESTRUTURAL NO REVIT

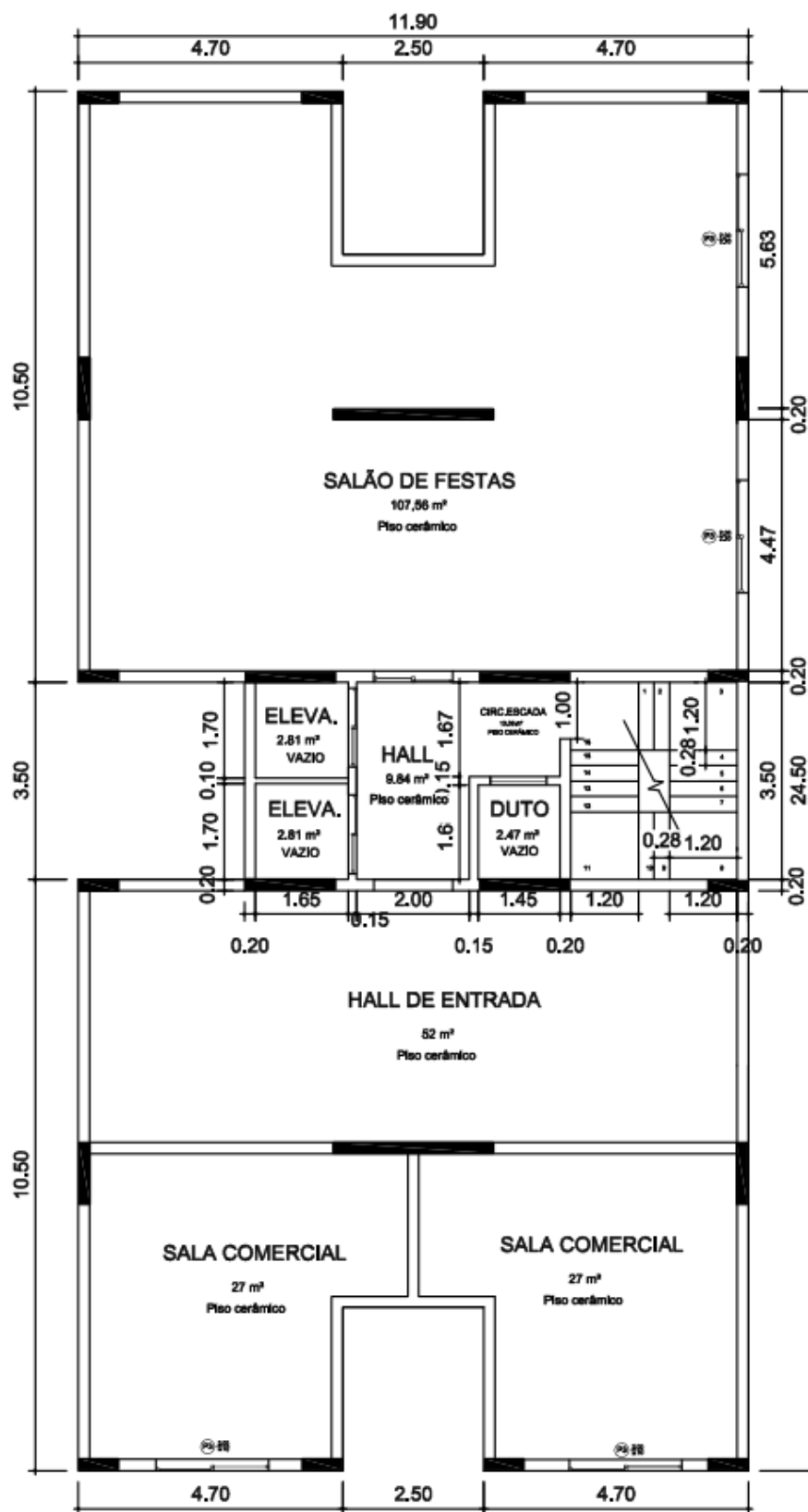
6.1.1 Plantas arquitetônicas

O roteiro de modelagem estrutural tem ponto de partida um projeto arquitetônico de um edifício residencial multipavimentos em concreto armado com resistência característica de 25 MPa. O projeto do edifício é constituído de 17 pavimentos (térreo, 14 tipo, cobertura, casa de máquinas e caixa d'água) já modelado no *template* de arquitetura do *Revit*. Essa situação simula a rotina de trabalho de um engenheiro projetista de estruturas, que faz o projeto estrutural baseado em um projeto arquitetônico, geralmente feito por um arquiteto. O projeto arquitetônico foi cedido pelo professor Me. Giovanni Corelhano. As figuras abaixo ilustram o 3D da edificação e detalhes de planta.



Figura 6 - 3D do edifício.

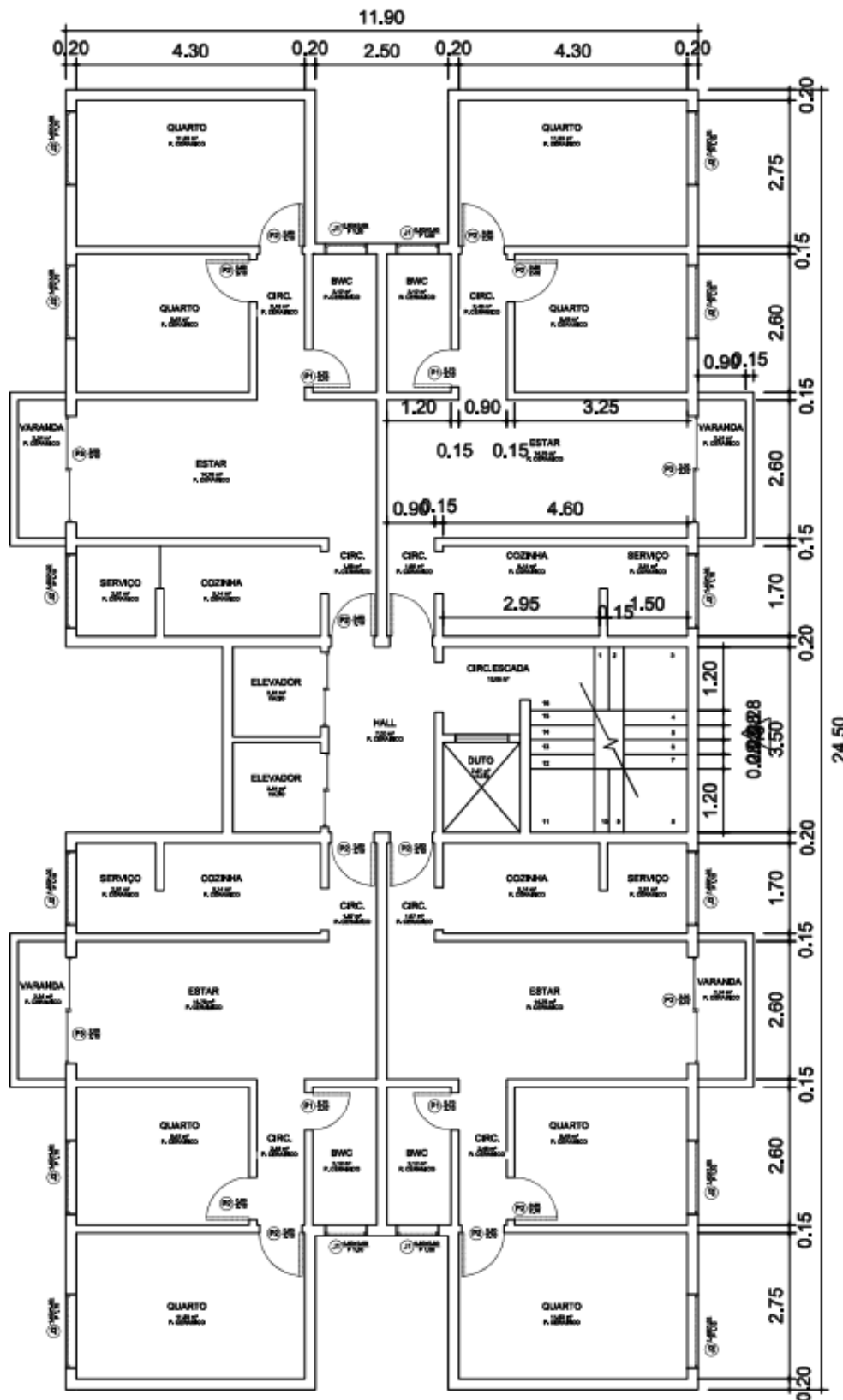
Fonte: Autoria Própria.



① **PLANTA BAIXA TERREO**
ESCALA: 1 : 100 NÍVEL: +0.00

Figura 7- Planta baixa pavimento térreo.

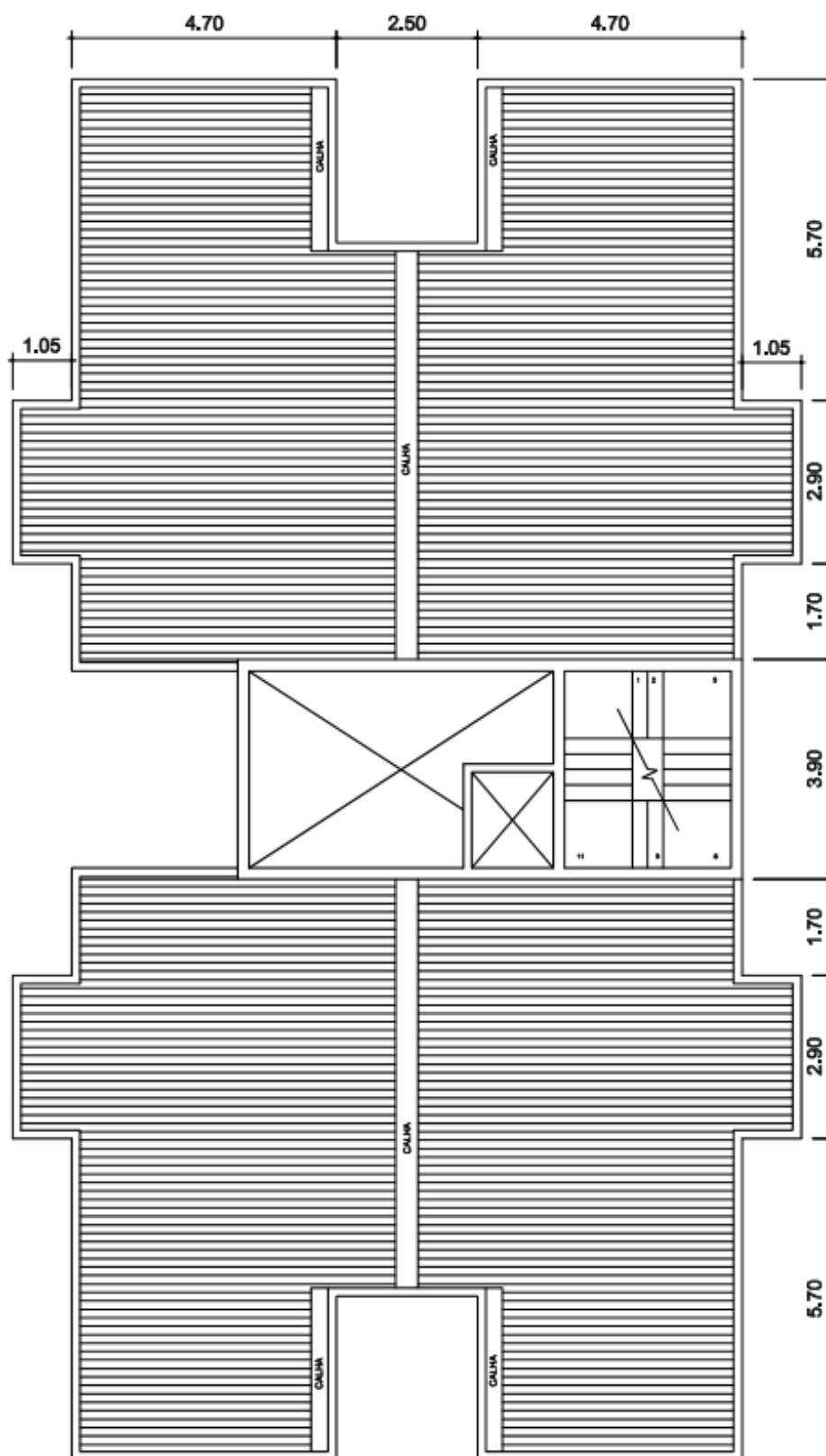
Fonte: Autoria Própria.



1 PLANTA BAIXA TIPO
 ESCALA: 1 : 100 NÍVEL: +3.00

Figura 8 - Planta baixa pavimento tipo.

Fonte: Autoria Própria.



① PLANTA BAIXA COBERTURA
 ESCALA: 1 : 100 NÍVEL: +41,25

Figura 9 - Planta baixa cobertura.

Fonte: Autoria Própria.

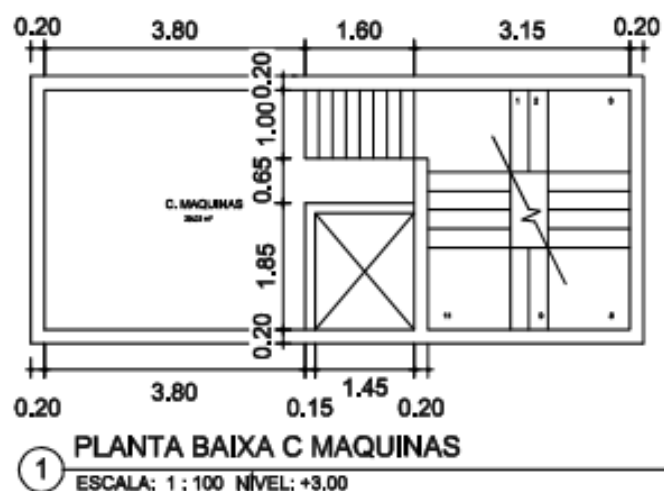


Figura 10 - Planta baixa casa de máquinas.

Fonte: Autoria Própria.

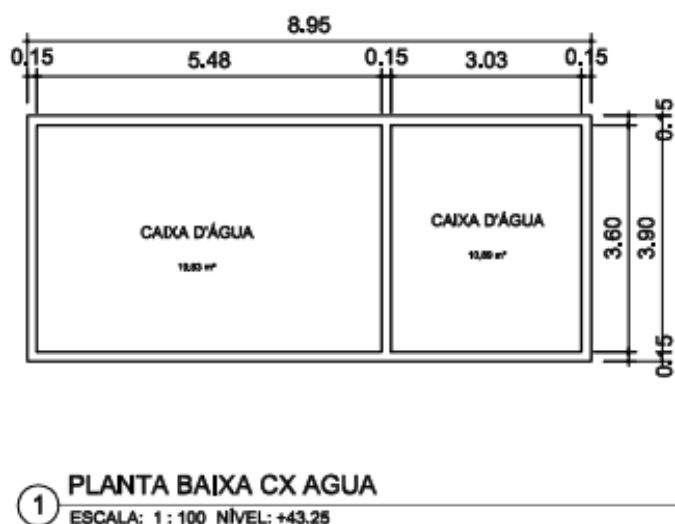


Figura 11 - Planta baixa caixa d'água.

Fonte: Autoria Própria.

6.1.2 Tarefas preliminares à modelagem

A modelagem estrutural foi feita no *template* estrutural do *Revit* 2017 versão estudante em português, que possui ferramentas adequadas para tal tarefa. Na interface inicial do *Revit* há o menu de projetos e de famílias. No menu de projetos,

ilustrado na figura 12, existem as opções “Abrir”, “Novo”, “Modelo de construção”, “Modelo de arquitetura”, “Modelo estrutural” e “Modelo mecânico”. Para dar início ao processo basta clicar na penúltima opção.



Figura 12 - Menu de projetos na interface inicial.

Fonte: Autoria Própria.

Com o modelo estrutural aberto é preciso importar o arquivo do projeto arquitetônico, para que este sirva como base para a modelagem estrutural. No menu de barras clique em “Inserir”, em “Vínculo do Revit”, indicado na figura 13, e selecione o projeto arquitetônico. Os vínculos do *Revit* garantem que se uma mudança for feita no local de origem (*Revit Architecture*, CAD, etc), tal mudança seja atualizada no modelo estrutural. Isso é importante, uma vez que uma alteração no projeto arquitetônico pode interferir na locação dos pilares e vigas, por exemplo.

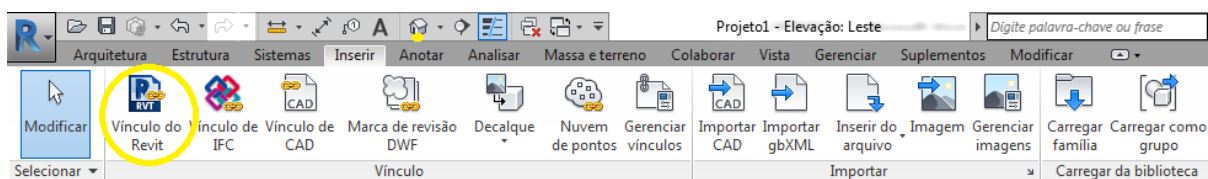


Figura 13 - Vínculo do *Revit* no menu de barras.

Fonte: Autoria Própria.

Alguns ajustes que não são essenciais para a modelagem em si (mas que facilitam muito o trabalho) podem ser feitos. São eles:

- “igualar” o nome das plantas estruturais do modelo estrutural às plantas de piso do modelo de arquitetura do *Revit*, para que não haja confusão ou falta de informações na modelagem. A criação/edição de plantas estruturais deve ser feita dentro da vista “elevações”, com o mesmo nome e cota vertical das plantas estruturais.

- Sempre que o projeto arquitetônico obstruir a visualização (no sentido de haver muita informação na vista) é possível desligar o vínculo do *Revit*. Assim que necessário, basta religá-lo. No menu de propriedades clique em editar “visibilidade/Sobreposição de gráficos”. Uma caixa de diálogo se abrirá. Vá em “vínculo do *Revit*” e desmarque a opção “visibilidade” do vínculo que pretende ocultar. As figuras 14 e 15 ilustram estas etapas, na ordem citada.

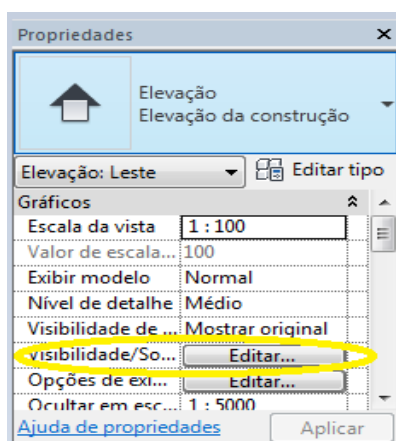


Figura 14 - Visibilidade/Sobreposição de gráfico no menu de propriedades.

Fonte: A autoria Própria.

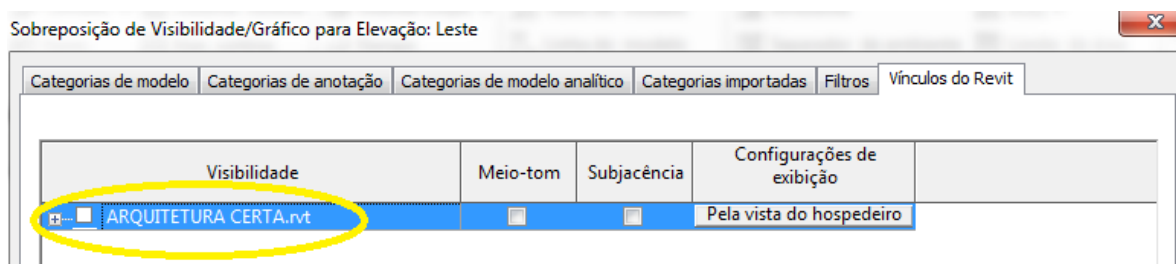


Figura 15 - Visibilidade no quadro visibilidade/Sobreposição de gráfico.

Fonte: A autoria Própria.

6.1.3 Lançamentos dos elementos estruturais

As vigas foram lançadas em função da arquitetura. A dimensão 15 x 60 cm é constante para todo o edifício, exceto as vigas baldrame que possuem dimensão 20 x 30 cm. Os pilares foram posicionados de modo que a estrutura de

contraventamento ficasse simétrica. As dimensões dos pilares são: 70x19, 110x19, 200x19 e 285x19. Os pilares com dimensão 200x19 e parte dos com dimensão 70x19 têm início no pavimento térreo e fim no pavimento ático, os demais terminam na cobertura. As lajes foram lançadas com espessura de 10 cm nos pavimentos tipo e cobertura e 15 cm nos demais.

A classe do concreto deve ser ajustada no *Robot* para os pilares e vigas, já que não há a opção de editar o material de elementos estruturais dentro do *Revit* de maneira simplificada (demonstração mais adiante), como se muda o material de paredes por exemplo. As figuras abaixo ilustram o posicionamento dos elementos estruturais nas plantas nas plantas de forma.

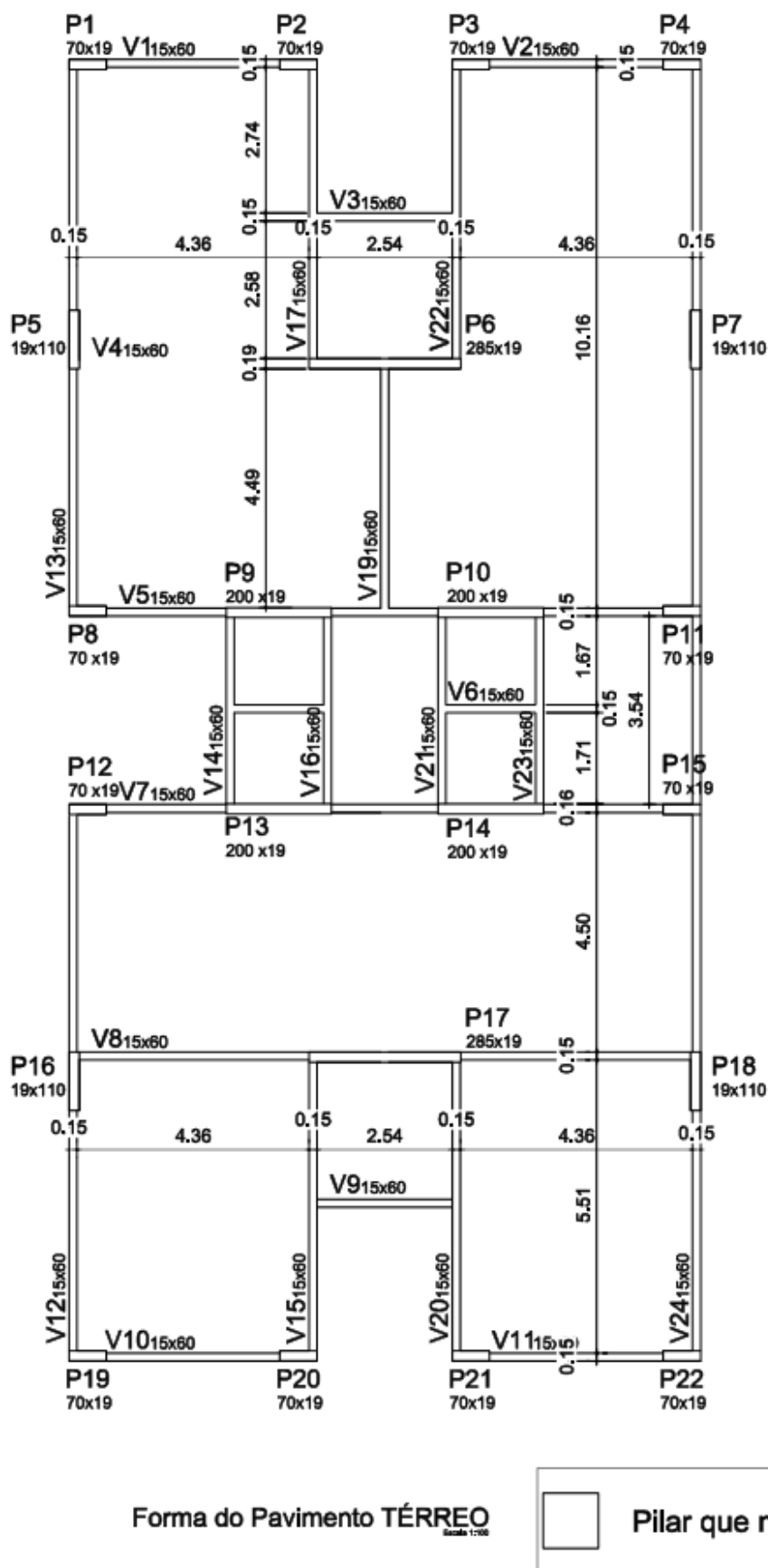


Figura 16 - Lançamento dos elementos estruturais no térreo.

Fonte: Autoria Própria.

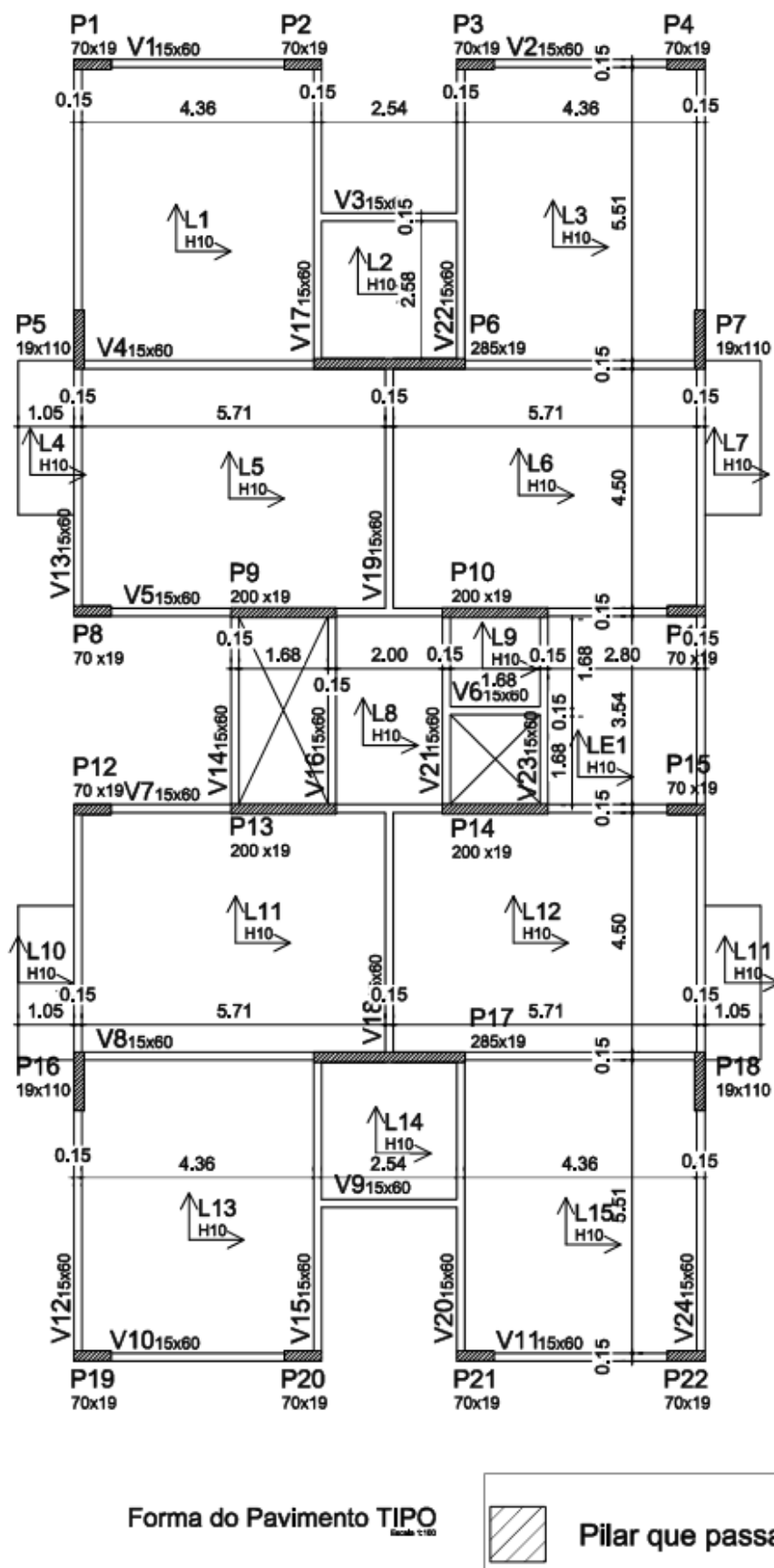


Figura 17 - Lançamento dos elementos estruturais nos pavimentos tipo.
Fonte: Autoria Própria.

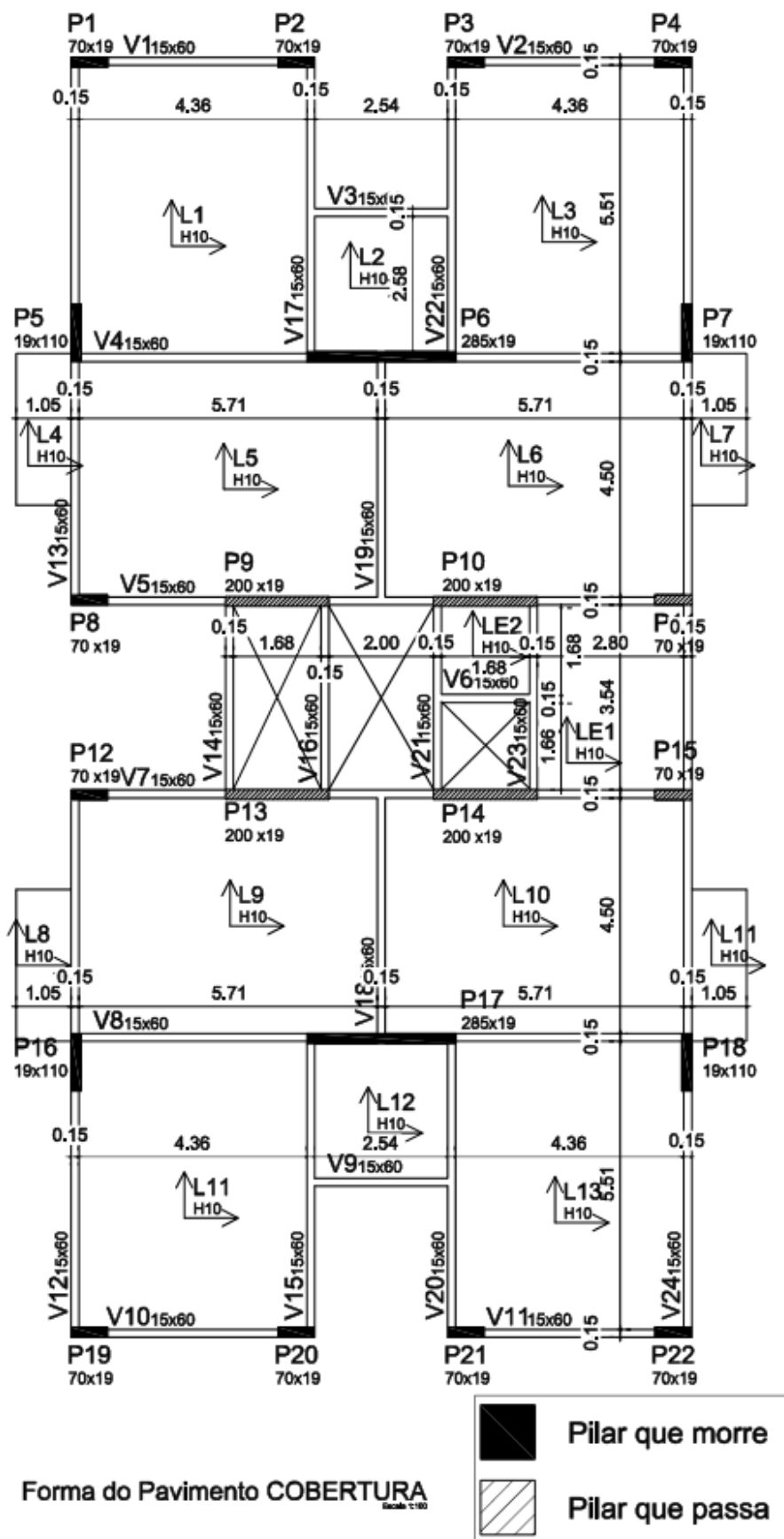
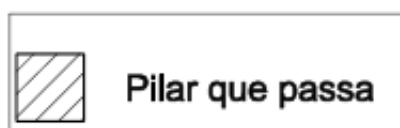
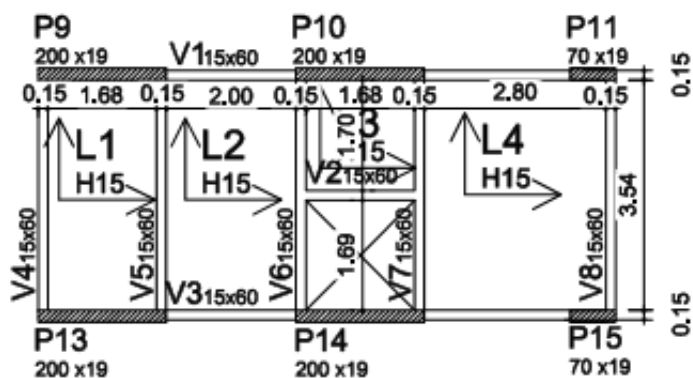


Figura 18 - Lançamento dos elementos estruturais na cobertura.

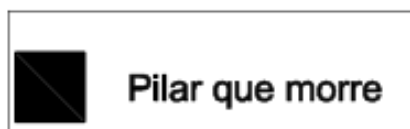
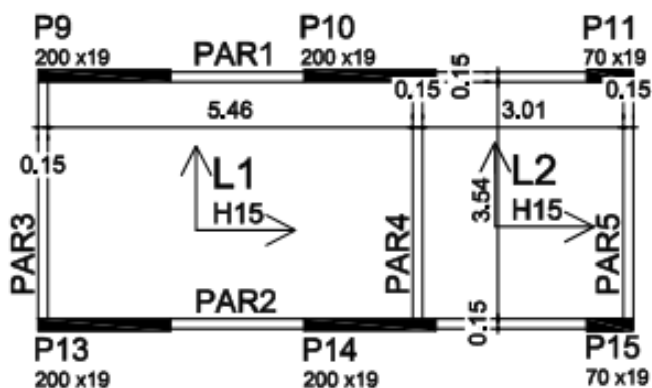
Fonte: Autoria Própria.



Forma do Pavimento CASA DE MÁQUINAS

Figura 19 - Lançamento dos elementos estruturais na casa de Máquinas.

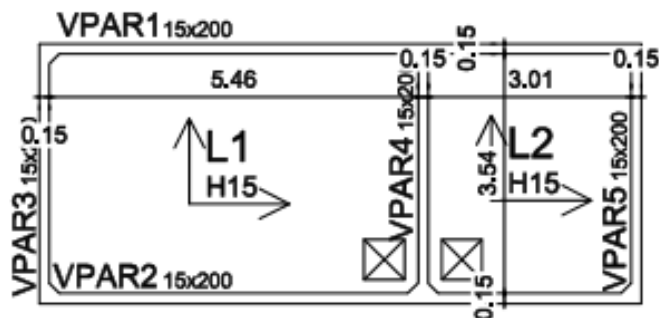
Fonte: Autoria Própria.



Forma do Pavimento CAIXA D'ÁGUA

Figura 20 - Lançamento dos elementos estruturais na caixa d'água.

Fonte: Autoria Própria.



Forma do Pavimento ÁTICO
PLANTA 1:100

Figura 21 - Lançamento dos elementos estruturais no ático.

Fonte: Autoria Própria.

6.1.4 Análise e consistência do modelo analítico

O modelo analítico é uma representação da estrutura, no qual os elementos estruturais são representados por barras (vigas e pilares) e figura geométrica em plano (lajes). O modelo analítico representa a geometria da estrutura, vinculações e ações que são exportadas para o *Robot* para a análise estrutural.

Quando um modelo estrutural é aberto, o *Revit* cria automaticamente 5 plantas estruturais (figura 22): as plantas “Nível 1”, “Nível 2” e “Terreno”, que são o espaço onde será feita a modelagem estrutural, e as plantas “Pavimento 1 – Analítico” e “Pavimento 2 – Analítico”, que são uma representação analítica das duas primeiras plantas, respectivamente. As plantas que contém o modelo analítico não precisam ser modeladas, já que estas são feitas automaticamente pelo *software*, seguindo suas plantas físicas correspondentes. Por exemplo, ao desenhar uma viga no “Nível 1”, essa viga é criada conjuntamente na planta “Pavimento 1 – Analítico” em forma de barra, uma viga analítica.

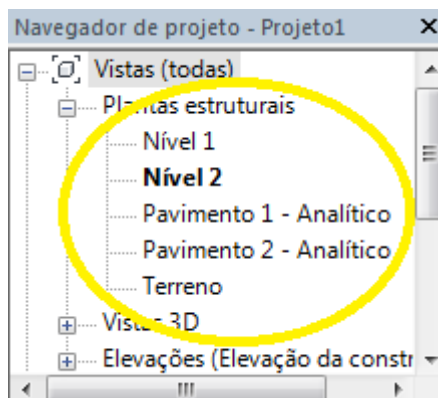


Figura 22 - Plantas estruturais no menu navegador de projeto.

Fonte: Autoria Própria.

Nos casos em que a edificação possui mais de dois níveis é preciso criar novos níveis para a modelagem estrutural. Neste projeto, por exemplo, foram criados mais 17 níveis (ou plantas estruturais). Porém, a representação analítica desses novos 17 níveis não aparece como item de "Plantas Estruturais". Para ter acesso ao modelo analítico numa planta criada manualmente, é preciso selecionar a opção "Analítico isolado", ao invés de "Nenhum" em "Modelo de vista", estando com a planta que deseja ver o modelo analítico aberta. Essa opção encontra-se no menu de propriedades dentro de "dados de identidade", como mostra a figura 23. Quando for preciso voltar ao modelo físico, basta selecionar "Planta estrutural" no lugar de "Analítico isolado".

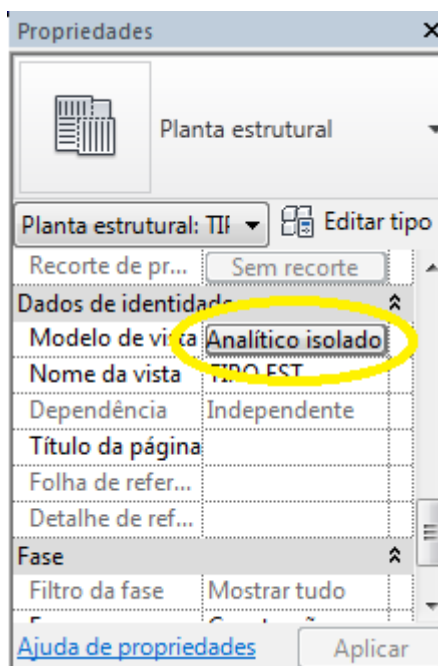


Figura 23 - Modelo de vista no menu de propriedades.

Fonte: Autoria Própria.

Em grande parte dos casos, o modelo analítico, gerado automaticamente, não representa a estrutura de maneira adequada. A incompatibilidade da ligação da viga com o pilar é a mais comum das inconsistências. São elas: viga apoiada no centroide do pilar no modelo físico e no modelo analítico não (quando isso acontece, dá impressão de que a viga está “voando” ao invés de estar apoiada no pilar, na representação analítica); ou o contrário, viga não apoiada no centroide do pilar no modelo físico e no modelo analítico sim (quando isso acontece, a viga fica fora do seu eixo longitudinal, ou seja, rotacionada ou deslocada). A figura a seguir ilustra o modelo analítico do pavimento tipo. A laje analítica foi ocultada da vista para facilitar a visualização.

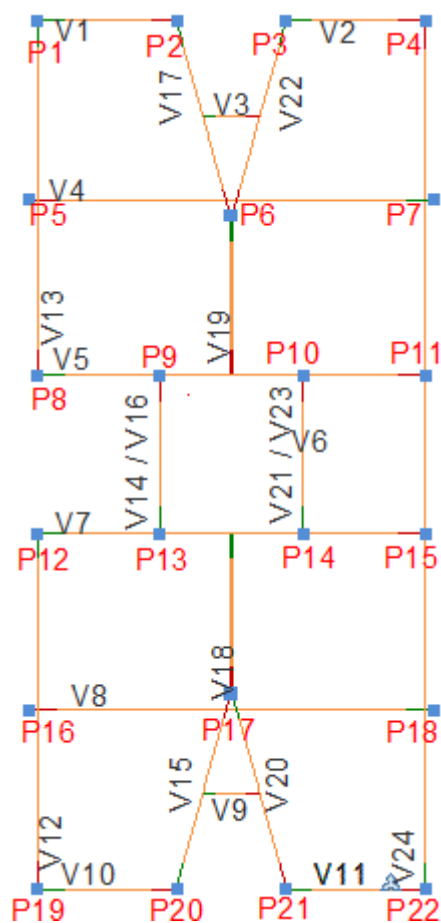


Figura 24 - Modelo analítico do pavimento tipo com a laje oculta da vista.

Fonte: Autoria Própria.

Existe um número considerável de incompatibilidades nesse modelo analítico. No quadro 1 é possível perceber que em quase todos os casos, no modelo analítico, a viga se apoia sobre o centroide do pilar, independente de estar ou não no modelo físico. As exceções se dão devido à impossibilidade da viga “se dividir ao meio” (V4, V8, V12, V13 E V24), ou seja, o eixo do pilar intermediário não está no segmento de reta que une os eixos dos pilares extremos.

| Viga | Modelo físico | | Modelo analítico | |
|------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| | Apoio fora do CG | Apoio no CG | Apoio fora do CG | Apoio fora do CG |
| V1 | | P1 e P2 | | P1 e P2 |
| V2 | | P3 e P4 | | P3 e P4 |
| V4 | P5 e P7 | P6 | P6 | P5 e P7 |
| V5 | | P8, P9, P10 e P11 | | P8, P9, P10 e P11 |
| V7 | | P12, P13, P14 e P15 | | P12, P13, P14 e P15 |
| V8 | P16 e P18 | P17 | P17 | P16 e P18 |
| V10 | | P19 e P20 | | P19 e P20 |
| V11 | | P21 e P22 | | P21 e P22 |
| V12 | P19 e P12 | P16 | P16 | P19 e P12 |
| V13 | P8 e P1 | P5 | P5 | P8 e P1 |
| V14 | P13 e P9 | | | P13 e P9 |
| V15 | P20 e P17 | | | P20 e P17 |
| V16 | P13 e P9 | | | P13 e P9 |
| V17 | P2 e P6 | | | P2 e P6 |
| V18 | | P17 | | P17 |
| V19 | | P6 | | P6 |
| V20 | P21 e P17 | | | P21 e P17 |
| V21 | P14 e P10 | | | P14 e P10 |
| V22 | P6 e P3 | | | P6 e P3 |
| V23 | P14 e P10 | | | P14 e P10 |
| V24 | P22,P15,P11 e P4 | P18 e P7 | P18 e P7 | P22,P15,P11 e P4 |

Quadro 1 – Comparativo entre situação de apoio viga/pilar no modelo físico e analítico

Fonte: Autoria Própria

Nas vigas V1, V2, V5, V7, V10, V11, V18 e V19 a situação de apoio entre viga/pilar nos dois modelos é a mesma. Nas vigas V4, V8, V12, V13, V14, V15, V16, V17, V20, V21, V22, V23 e V24 a situação é diferente. As vigas V3, V6 e V9 não aparecem no quadro, pois se apoiam sobre outras vigas.

Para tornar o modelo consistente, em relação a esse quesito, é preciso mudar os vínculos analíticos das vigas. Um vínculo analítico é um elemento que conecta dois nós analíticos separados. A criação de vínculos analíticos simplifica e acelera a modelagem estrutural do modelo. Ao selecionar uma viga analítica qualquer, o menu de propriedades informa uma série de parâmetros e características da viga. Em “vínculo analítico” existem três opções: “Da coluna”, “Sim” e “Não”. Escolha a segunda opção para as vigas que possuem situação de apoio diferente para os dois

modelos, como na figura 25. Já a figura 26 ilustra um comparativo do modelo analítico ajustado e não ajustado com o modelo físico.

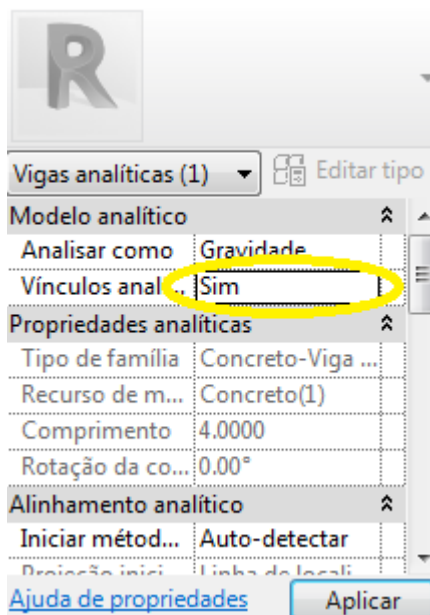


Figura 25 - Vínculo analítico no menu de propriedades.

Fonte: Autoria Própria.

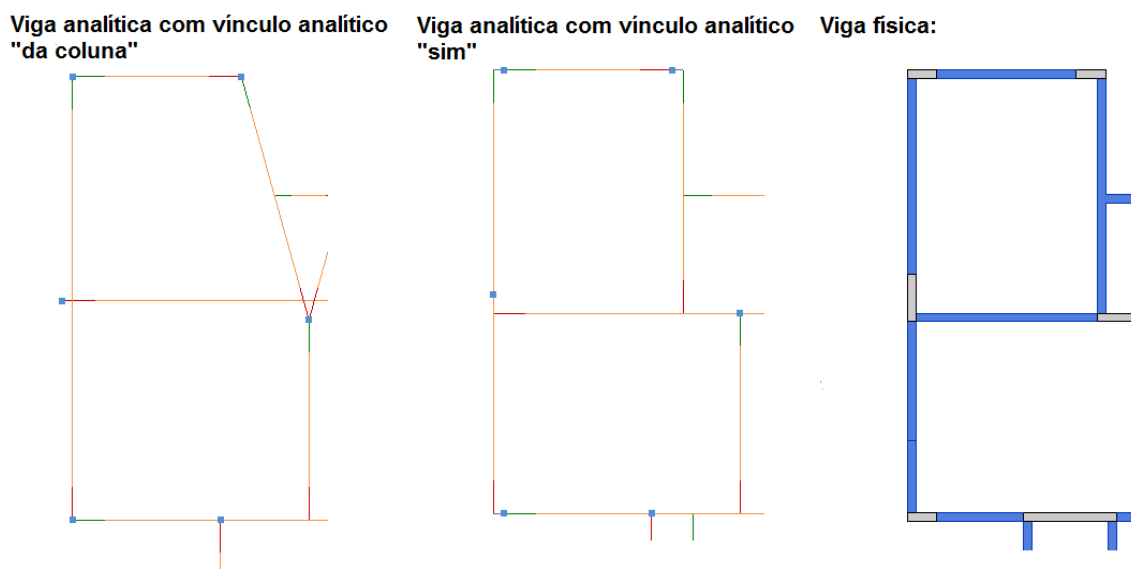


Figura 26 - Comparativo entre modelos analíticos e a o modelo físico.

Fonte: Autoria Própria.

É possível perceber que a viga analítica com vínculo analítico “Sim” representa o modelo físico de maneira mais adequada. É de extrema importância

ajustar o tipo de vínculo da viga, já que há um acréscimo de momento gerado pela excentricidade da viga em relação ao eixo do pilar.

Outra inconsistência em relação ao modelo analítico diz respeito ao método de alinhamento das lajes nas vigas. Esse problema tem origem no vínculo inadequado da viga no pilar, citado acima. Quando a laje é apoiada em uma viga que tem situação de apoio diferente no modelo físico e analítico, existe a probabilidade desta laje seguir o alinhamento incorreto da viga. Pode ser que essa inconsistência ocorra, pode ser que não. No pavimento tipo, as lajes L1, L3, L10 e L12 alinharam-se inadequadamente, como mostra a figura 27.

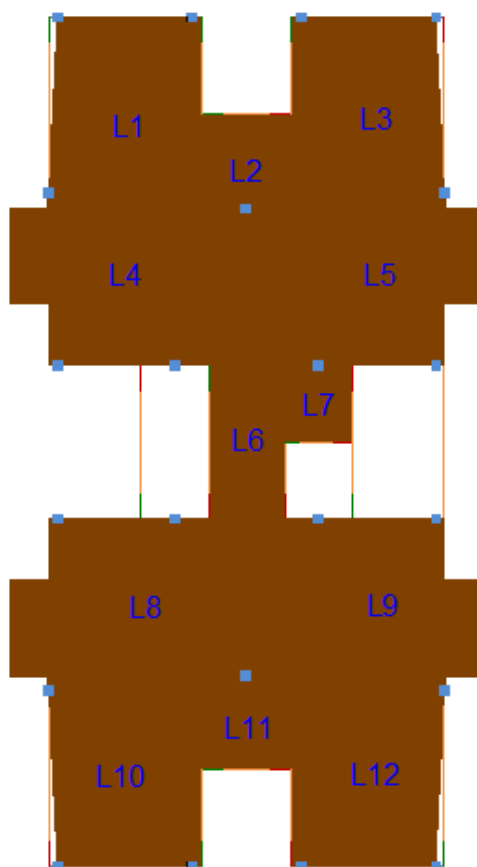


Figura 27 – Inconsistência da laje analítica.

Fonte: Autoria Própria.

Através de testes, percebeu-se que a ordem de modelagem não altera a inconformidade citada acima. Primeiramente foram lançados os pilares, vigas e lajes para aí então ajustar o modelo analítico em relação a todas as inconsistências (vigas apoiadas erroneamente sobre pilares e lajes sobre vigas). Em um segundo momento foram lançados os pilares e vigas, logo em seguida já ajustada a situação de apoio

viga/pilar, para aí então se lançar as lajes. Para o projeto em questão, em ambas as ordens seguidas, a inconsistência se deu nas mesmas lajes (L1, L3, L10 e L12). Contudo, por experiência de outros projetos, quando a estrutura é modelada seguindo a segunda ordem, a probabilidade de inconformidade do alinhamento da laje na viga é menor.

Para deixar o modelo analítico mais adequado, é necessário fazer um “Ajuste analítico”. Com a laje que precisa ser ajustada selecionada, o menu de barras, em “Modificar | Pisos analíticos”, exibe a opção de ajuste (ver figura 28). Quando selecionado o “Ajuste analítico” há a possibilidade de mover os elementos estruturais. Arraste os cantos da laje analítica até apoiá-las nas vigas (já ajustadas) e clique em “concluir”, como ilustra a figura 29.

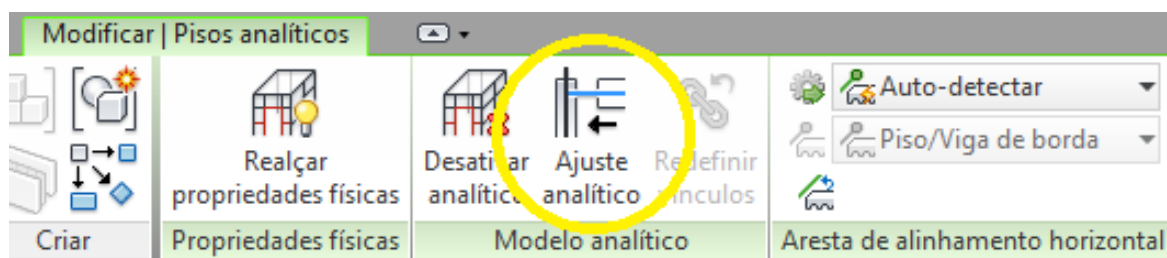


Figura 28 - Ajuste analítico no menu de barras.

Fonte: Autoria Própria.

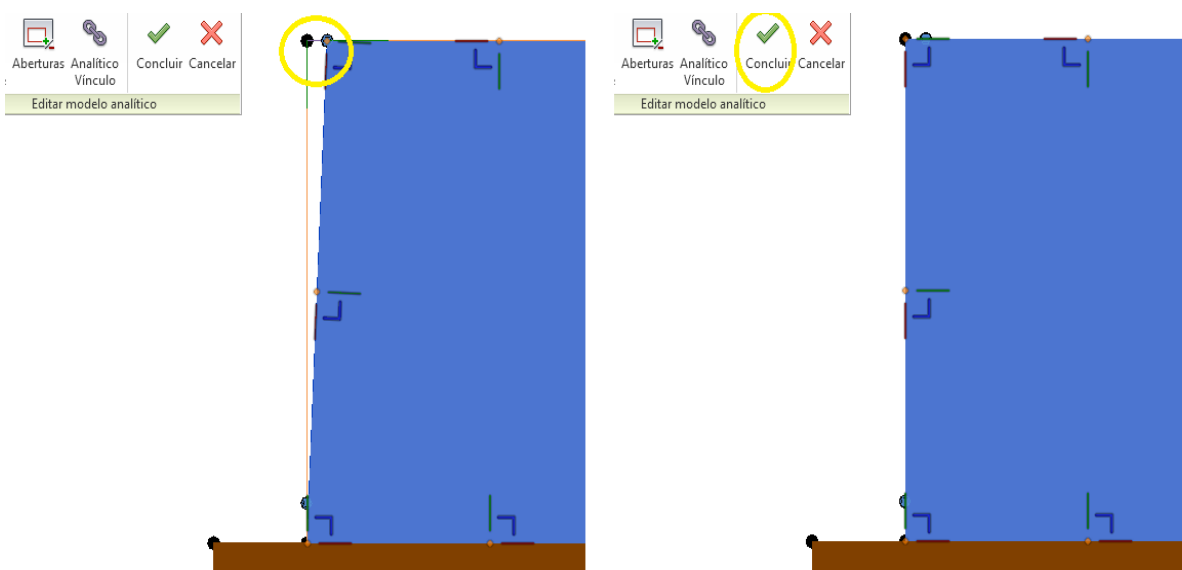


Figura 29 - Ajuste analítico das lajes.

Fonte: Autoria Própria.

6.1.5 Cargas no Revit

Para inserir o carregamento de uma estrutura no *Revit* é importante conhecer a interface de cargas. Em “Analisar” existe a opção “Cargas”, como ilustra a figura 30. Ao clicar nessa opção, o menu de barra direciona o usuário aos tipos de cargas, em “Modificar”. Existem 6 tipos (figura 31): “Carga de ponto” e “Carga de ponto hospedado”, para as cargas concentradas, “Carga de linha” e “Carga de linha hospedada”, para as cargas linearmente distribuídas, e “Carga de área” e “Carga de área hospedada”, para cargas distribuídas numa área.

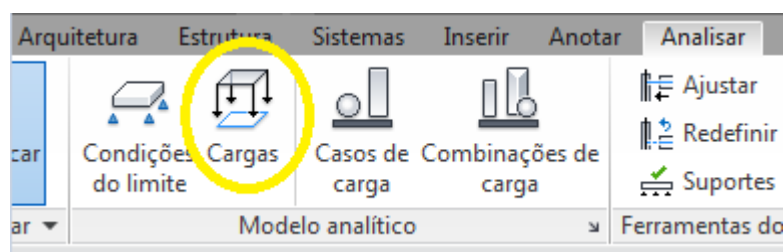


Figura 30 - Cargas no menu de barras.

Fonte: Autoria Própria.

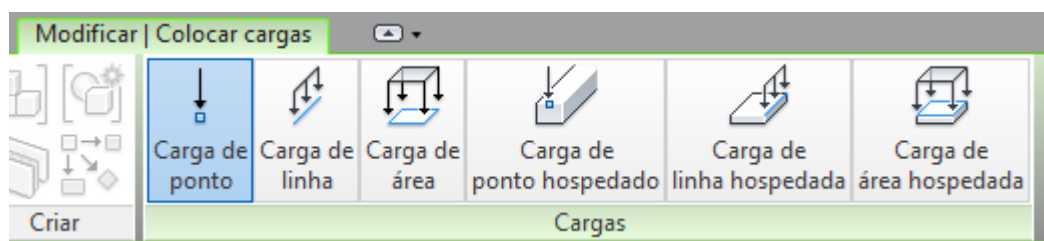


Figura 31 - Tipos de cargas.

Fonte: Autoria Própria.

A diferença entre uma carga hospedada e uma carga não hospedada, é que na primeira basta selecionar o nó ou elemento estrutural para carregá-lo, e na última é preciso desenhar o ponto, linha ou área de aplicação da carga. Por exemplo, se a “Carga de área hospedada” for escolhida para carregar uma laje, basta clicar na laje a ser carregada. Porém se a “Carga de área” for selecionada, é preciso desenhar os limites da carga em cima dessa laje. Se o carregamento de uma laje for uniforme é mais prático escolher a primeira opção, caso contrário (ambientes com

carregamentos diferentes numa mesma laje, por exemplo) é preciso utilizar a segunda opção.

Ao lado de “Carga” no menu de barras existe a opção “Casos de carga”, que especifica a natureza do carregamento, ou seja, se a carga é permanente, variável, acidental, de vento etc. Ao clicar na opção é possível visualizar no cursor os casos que já existem no banco de dados do *Revit*, como ilustra a figura 32. É possível ainda, criar um novo caso de carga em “adicionar”, ou editar os casos já existentes.

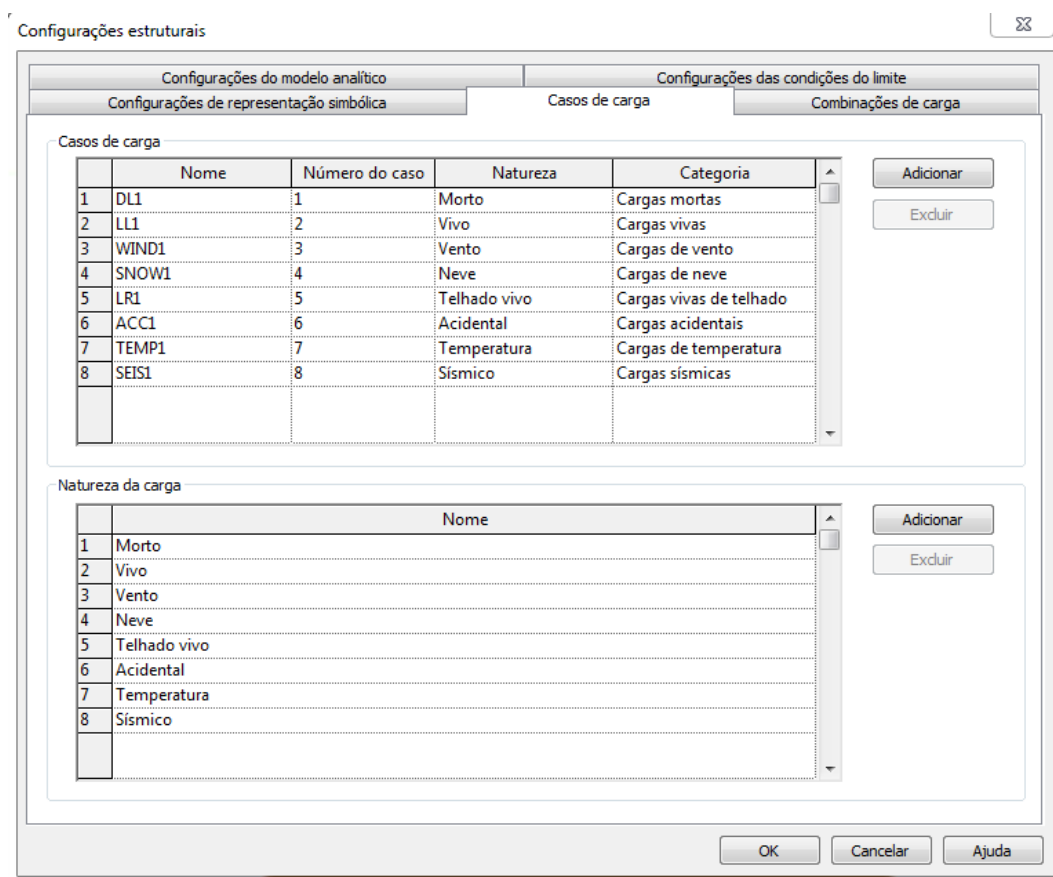


Figura 32 - Casos de cargas.

Fonte: Autoria Própria.

A ABNT NBR 8681:2003 especifica que é preciso fazer combinação de ações para analisar os casos mais críticos, para conhecer os estados limites últimos e de serviço de uma edificação a opção, o item “Combinações de carga” é extremamente importante. Está situada ao lado de “Casos de carga” no menu de barras. Em “editar fórmula selecionada” adicione os casos de cargas com os coeficientes de ponderação correspondente e em “estado” escolha entre ELU e ELS.

O preenchimento dos outros campos é irrelevante para o caso. A figura 33 ilustra um exemplo de combinação.

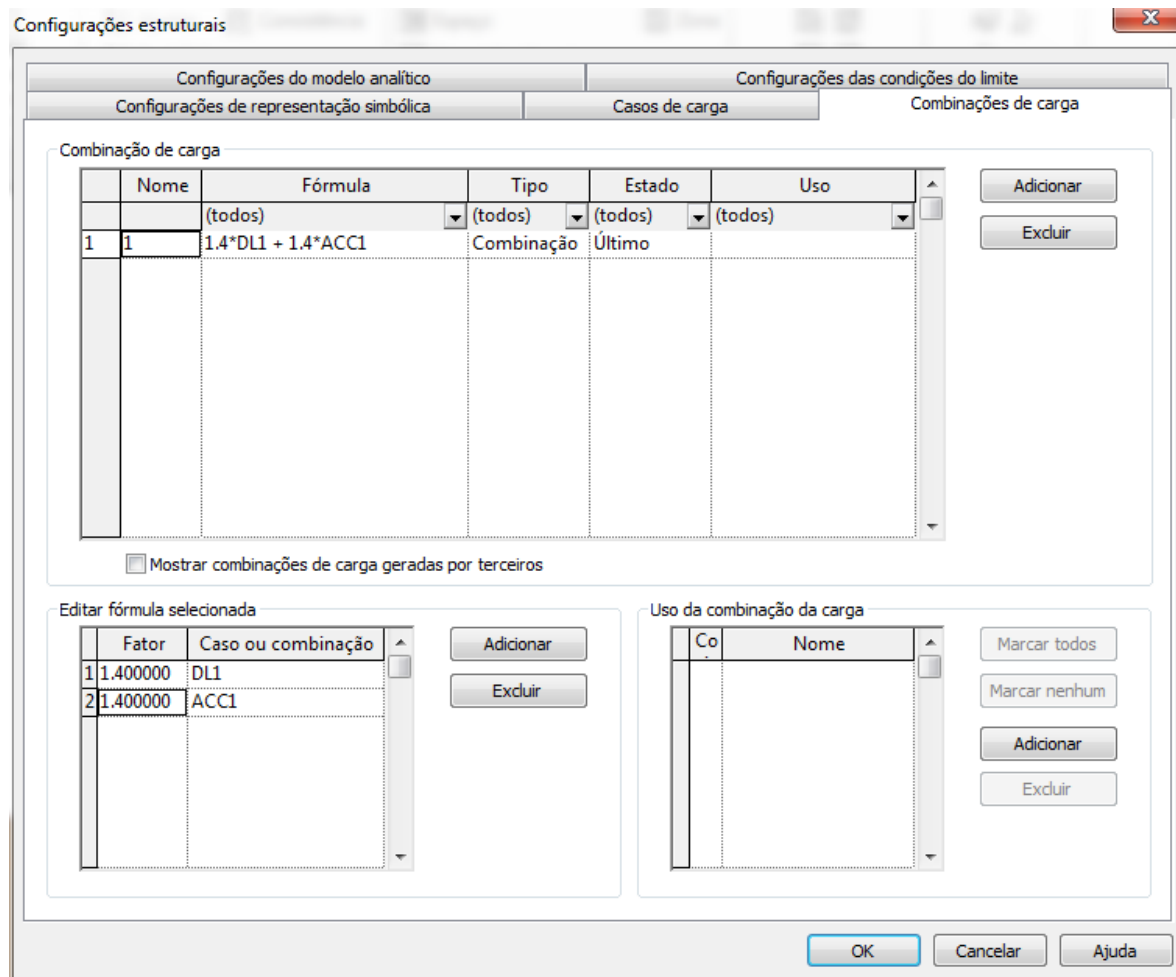


Figura 33 - Exemplo de combinação de carga.

Fonte: Autoria Própria.

Inserir as cargas verticais e ações horizontais que agem na edificação é uma tarefa muito simples. Com a planta analítica que contém o elemento a ser carregado aberta escolha uma das 6 cargas citadas acima, conforme o caso. No menu de propriedades aparecerá uma série de informações sobre a carga a ser inserida: o caso de carga, a intensidade das forças e momentos e o eixo (o eixo z corresponde a carga vertical e os demais as ações horizontais). Neste exemplo a escolhida foi “Carga de ponto”, como é possível visualizar na figura 34. As propriedades das cargas podem ser alteradas tanto antes de ser inseridas como depois.

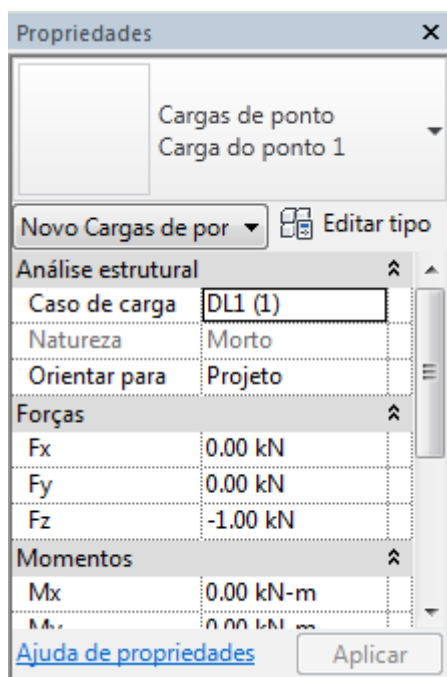


Figura 34 - Propriedades de Cargas de ponto.

Fonte: Autoria Própria.

O peso próprio dos elementos estruturais (vigas, pilares, lajes e paredes estruturais) é considerado pelo *Revit*. Porém, para que a laje e a parede estrutural sejam contabilizadas no peso próprio é necessário inserir o tipo de concreto (C25 para este exemplo) no material desses elementos, já que inicialmente não possuem material nenhum. As vigas e pilares já possuem material definido como “concreto moldado in loco – cinza”. Entretanto, ao tentar editar o material desses dois últimos elementos estruturais é possível perceber que não existe essa opção no *Revit*. Por isso, o concreto deve ser editado no *Robot*.

As demais cargas permanentes provenientes do peso dos elementos construtivos como paredes, escadas e revestimento não são reconhecidas pelo *Revit*, pois são somente elementos de desenho para a arquitetura do *software*, e devem ser carregadas com a ferramenta “Cargas”. As cargas de paredes foram lançadas com valor de 8 kN/m, de escada 4 kN/m² para permanente e 2 kN/m² para acidental e revestimento 1,5 kN/m².

As cargas acidentais foram lançadas com valores de acordo com a ABNT NBR 6120:1980: 2 kN/m² para lavanderia e corredor e 1,5 kN/m² para os demais ambientes. Somente a carga na parede estrutural da caixa d’água, de 20 kN/m na

base, não foi lançada no *Revit*, uma vez que o *software* não possui carga triangular, e por isso será lançada no *Robot*.

O vento foi calculado de acordo com a ABNT NBR 6123:1988 e foi aplicado, pavimento a pavimento, linearmente distribuído nas lajes, nas direções x e y. Já o desaprumo foi desconsiderado, pois seu valor, para este caso, é inferior a 30% do valor do vento, como especifica a ABNT NBR 6118:2014.

6.1.6 Exportação do modelo estrutural para o *Robot Structural Analysis*

Exportar o modelo analítico estrutural para o Robot é uma tarefa muito simples. No menu de barras clique em “Analisar”, em “*Robot Structural Analysis*”, e por fim em “Vínculo para o *Robot Structural Analysis*”, como indica a figura 35.

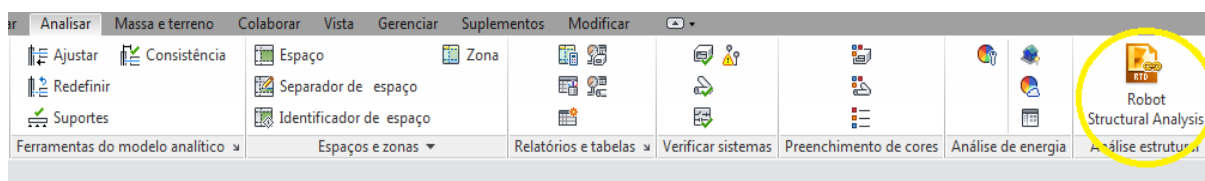


Figura 35 - Exportação do modelo.

Fonte: Autoria Própria.

O cursor ilustrado na figura 36 aparecerá na tela. Em “opção de envio” é possível ignorar ou não o peso próprio dos elementos estruturais, e ainda especificar o caso de carga que pretende definir como peso próprio. Clique em “OK” e o modelo será exportado. O *Robot* abrirá automaticamente

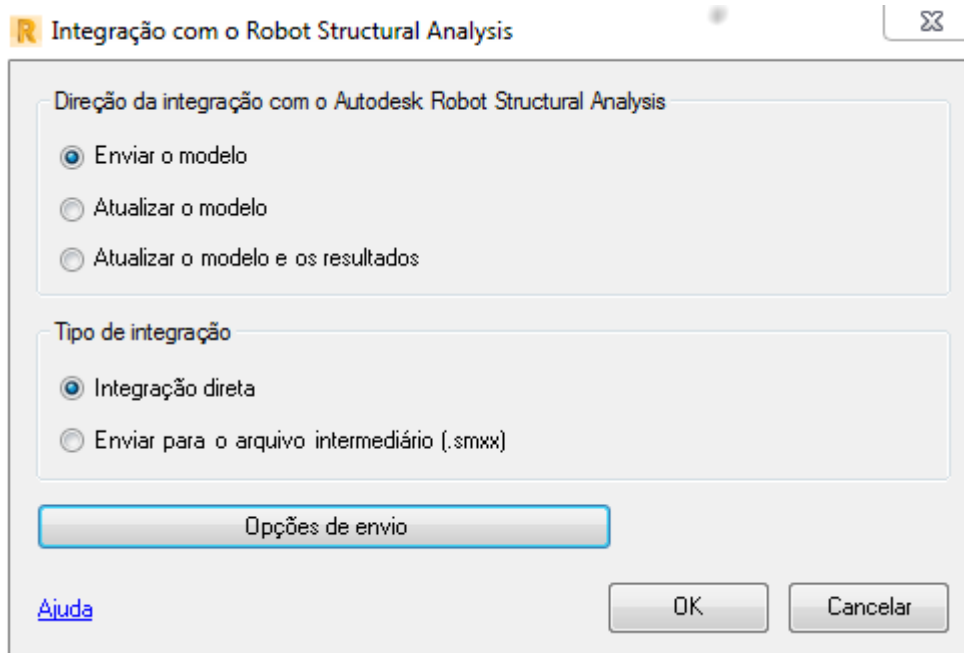


Figura 36 - Cursor de exportação do modelo.

Fonte: Autoria Própria.

6.2 ANÁLISE ESTRUTURAL NO *ROBOT*

6.2.1 Tarefas complementares ao *Revit*

Como foi dito no capítulo anterior, algumas etapas da modelagem não são possíveis ou difíceis de realizar no *Revit*. A carga da parede estrutural da caixa d'água foi lançada no *Robot*, a mudança do concreto das vigas e pilares e a inserção do vínculo dos pilares na base com a fundação devem ser feitas no *Robot* (para este trabalho não interessa a modelagem da fundação, somente o tipo de vínculo).

No menu de barras existe a opção “Cargas”. Clique nesta opção e em seguida em “Definição de cargas”. O quadro ilustrado na figura 37 se abrirá. Nele contém as cargas de “Nó”, “Barra” e “Superfície”, que equivalem às cargas de “Ponto”, de “Linha” e de “Área” do *Revit*, respectivamente. Repare que não é possível clicar em nenhuma opção de carga, isso por que é preciso escolher o caso

de carga a ser empregado. Para isso, no menu de barras escolha o caso que for conveniente (ver figura 38).

Para inserir a carga referente à pressão hidrostática na parede estrutural, clique em “Superfície”, que agora encontra-se disponível, ilustrado na figura 37, e depois escolha a opção “Pressão hidrostática”. Um novo quadro se abrirá para o preenchimento dos valores do gama do material (neste caso a água) e altura de coluna d’água. Por fim, clique na superfície que deseja carregar.



Figura 37 – Definição de carga.

Fonte: Autoria Própria.

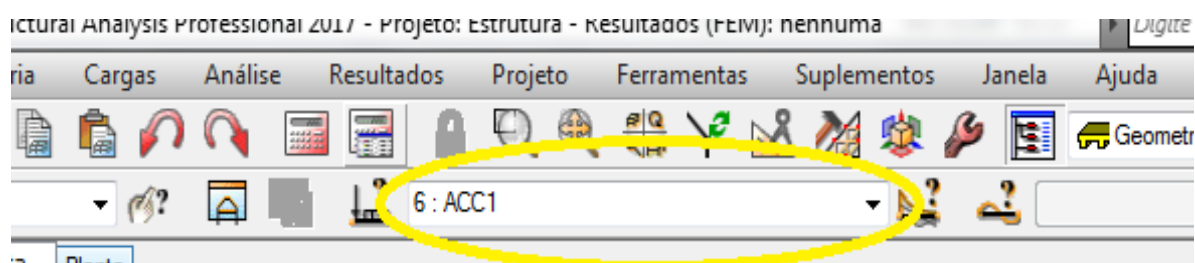


Figura 38 – Definição do caso de carga.

Fonte: Autoria Própria.

Ao clicar em um elemento estrutural é exibido um quadro no lado esquerdo da tela com todas as características do elemento selecionado, como ilustra a figura 39. Em “Propriedades” existe a opção “Material”. Selecione o concreto apropriado para o caso e repita essa tarefa para todos os elementos. Para facilitar o trabalho de mudar o material elemento por elemento, selecione todas as vigas e pilares de uma vez, e altere o material. Para este caso, o concreto utilizado foi o C25.

| | Nome | Valor | Unida |
|---|-----------------|------------------|-------|
| | Lista de barras | 4 | |
| + | Geral | | |
| + | Modelo | | |
| + | Geometria | | |
| - | Propriedades | | |
| + | Gama | 0,0 | (Deg) |
| + | Seção... | | ? |
| + | Material | Concreto - Molda | |
| | Articulaçõ... | N/A | ? |
| | Deslocam... | N/A | ? |
| | Solo elásti... | N/A | |
| | Reforço - i... | | ? |
| | Reforço - ... | | ? |

Figura 39 – Material dos elementos no quadro de atributos.

Fonte: Autoria Própria.

Para inserir o vínculo do pilar com a fundação selecione o nó correspondente à base do pilar, como mostra a figura 40, e no quadro de atributos insira a vinculação em “apoio” como sendo “engastada” (figura 41) se for a caso.

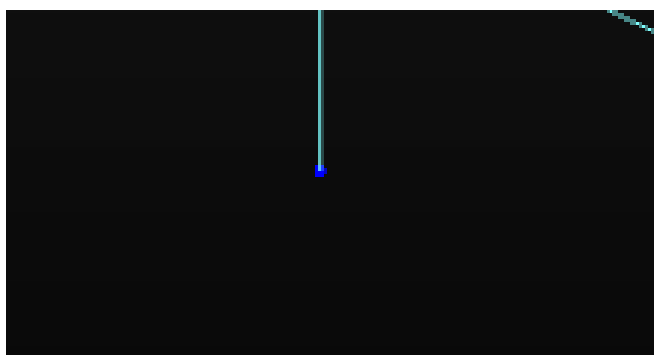


Figura 40 - Nó correspondente à base do pilar.

Fonte: Autoria Própria

| Nome | Valor | Unida |
|--------------------------------|-------------------|-------|
| Lista de nós | 495 | |
| [-] Geral | | |
| Membros ... | 13 | |
| Elementos... | | |
| [-] Geometria | | |
| Coordena... | 11,70 19,98 -1... | |
| Tipo de si... | cartesiano | |
| [-] Características adicionais | | |
| Apoio... | Engastado | |
| Vínculo rig... | | |
| Compative... | | |

Figura 41 – Vínculo no quadro de atributos.

Fonte: Autoria Própria.

6.2.1 Cálculos da estrutura

Com a estrutura completamente modelada realiza-se a análise estrutural. No menu de barras clique no em “cálculos”, ferramenta circulado na figura 42 e em “OK”.

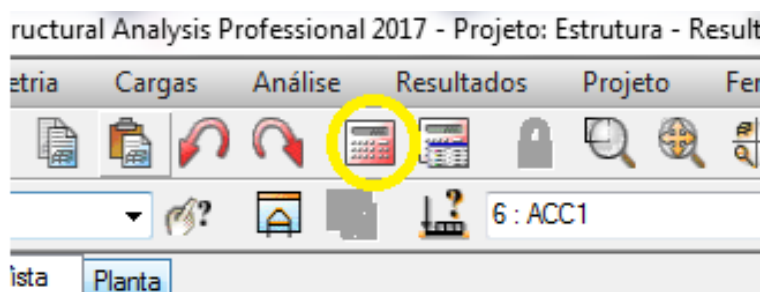


Figura 42 – Cálculo dos resultados.

Fonte: Autoria Própria.

Em “Resultados” no menu de barras existem alguns itens que dão opções para a análise estrutural. Alguns desses itens são irrelevantes para este caso. Portanto somente serão tratados os que forem de interesse deste trabalho.

Ao escolher o item “Diagrama para barras...” é possível visualizar os diagramas de força F_x , F_y e F_z e de momento M_x , M_y e M_z em “NTM” (ver figura 43). Para saber o eixo correspondente da barra, ou seja, qual das forças F_x , F_y ou F_z equivale à força normal, por exemplo, ligue a ferramenta “sistemas locais” que se

localiza no menu de barras inferior, como demonstra a figura 44. Deste modo é possível visualizar os eixos locais de cada elemento estrutural. Em “Diagrama para barras...” além dos diagramas de força e momento, existem as opções “Flambagem”, “Tensões”, “Reações”, “Armadura” e “Parâmetros”. Na última, é interessante selecionar “Texto” em “Descrição de diagrama” para que além do desenho do diagrama das barras, apareçam os valores (figura 45). Todos esses resultados são lidos na vista 3D, portanto é interessante para somente uma breve análise. É importante salientar que, como no caso da inserção da carga hidrostática, para fazer todas essas análises é preciso estar com o caso de carga ou combinação em análise selecionado no menu de barras superior.

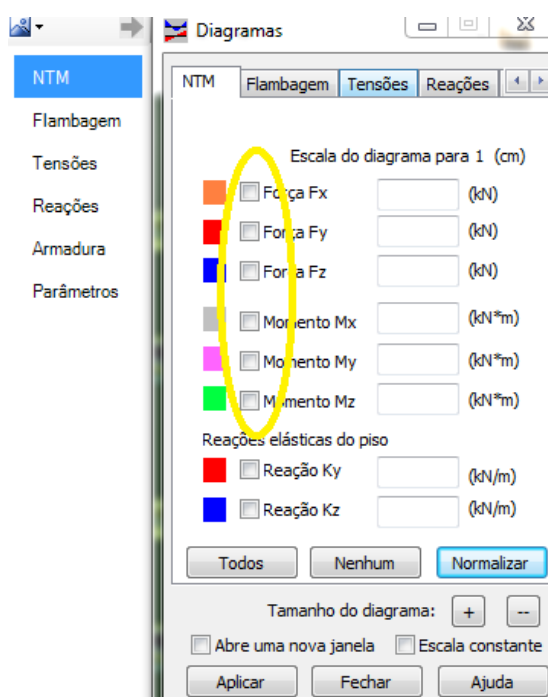


Figura 43 – Diagrama para barras.

Fonte: Autoria Própria.

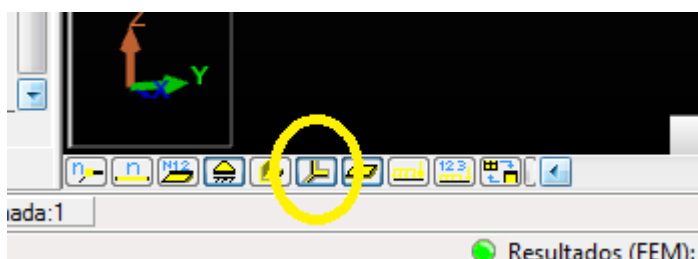


Figura 44 – Ferramenta para ligar os sistemas locais.

Fonte: Autoria Própria.

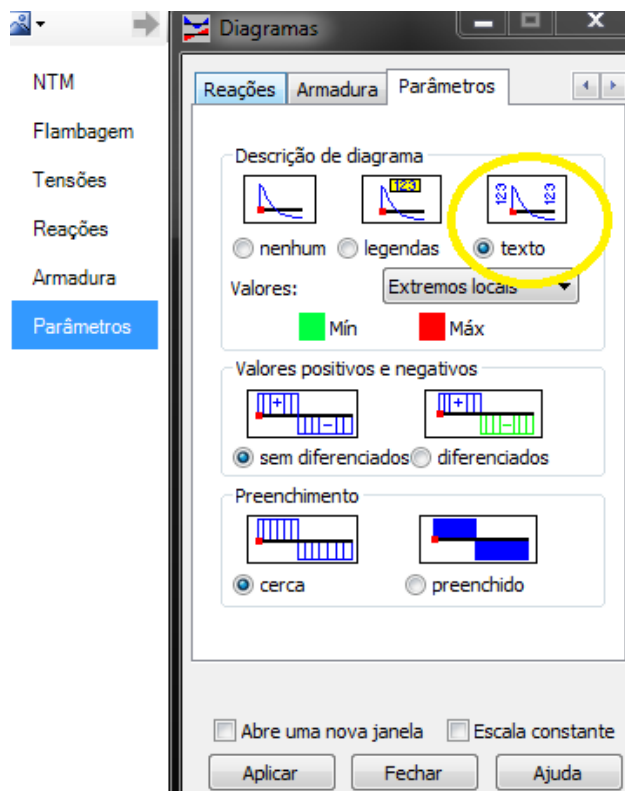


Figura 45 - Seleção de texto para a descrição de diagramas.

Fonte: Autoria Própria.

Os itens “Reações”, “Deslocamentos”, “Deflexões”, “Forças” e “Tensões” tem a mesma função dos citados acima, porém as respostas aparecem em forma de tabela. Por exemplo, se o item escolhido for “Forças”, o *software* gera uma tabela contendo os valores de F_x , F_y , F_z , M_x , M_y e M_z para cada barra (viga e pilar), e para cada o caso de carga e combinação. Ainda em “Resultados” existe o item “Resultados de placa e casca” que dá os valores dos momentos fletores M_x , M_y e M_z em forma de tabela.

O último e mais importante item de “Resultados” é a “Análise detalhada...”. Nesta opção é possível visualizar as forças e tensões atuantes barra a barra, com mais detalhes. Com a barra que deseja analisar selecionada, combinada com o caso de carga ou combinação, escolha a opção “Análise detalhada...”. Uma nova tela abrirá contendo somente o elemento estrutural escolhido. Selecione as forças ou tensões, e o *software* gera os diagramas.

6.2.2 Análise estrutural

Para verificar a necessidade de uma análise de segunda ordem foi utilizado o parâmetro de instabilidade α . Uma força linear de 20 kN foi aplicada na laje, no topo do modelo de cálculo, nas direções x e y e o deslocamento colhido devido a essa força foi de 2,63 cm e 2,02 cm, respectivamente. Em ambos os casos, a estrutura foi considerada de nós fixos, pois o valor calculado para o parâmetro foi inferior ao limite 0,6. Portanto não existe a necessidade de considerar os efeitos de segunda ordem. A figura a seguir ilustra o convencionalmente dos eixos de acordo com o posicionamento do modelo estrutural.

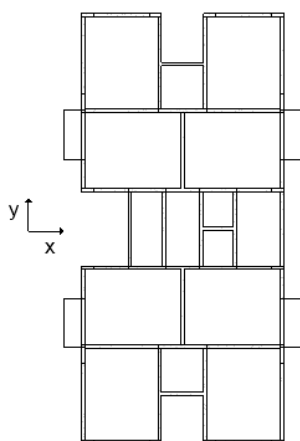


Figura 46 - Convencionalmente dos eixos.

Fonte: Autoria Própria.

6.2.2.1 Deslocamento horizontal

A figura 47 ilustra o deslocamento da estrutura para o vento V_x positivo e a figura 48 para o ventos V_y positivo.

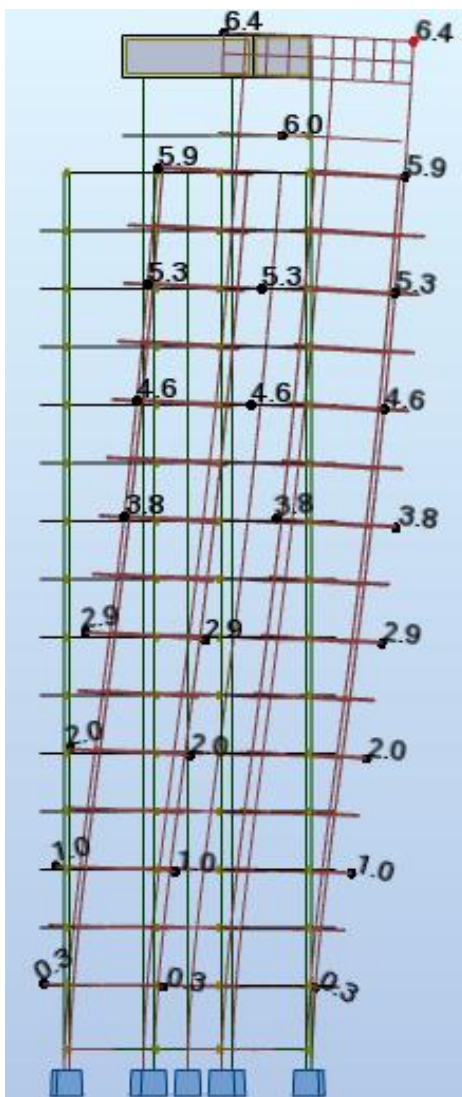


Figura 47 – Deslocamento (cm) da estrutura para o vento V_x positivo.

Fonte: Autoria Própria.

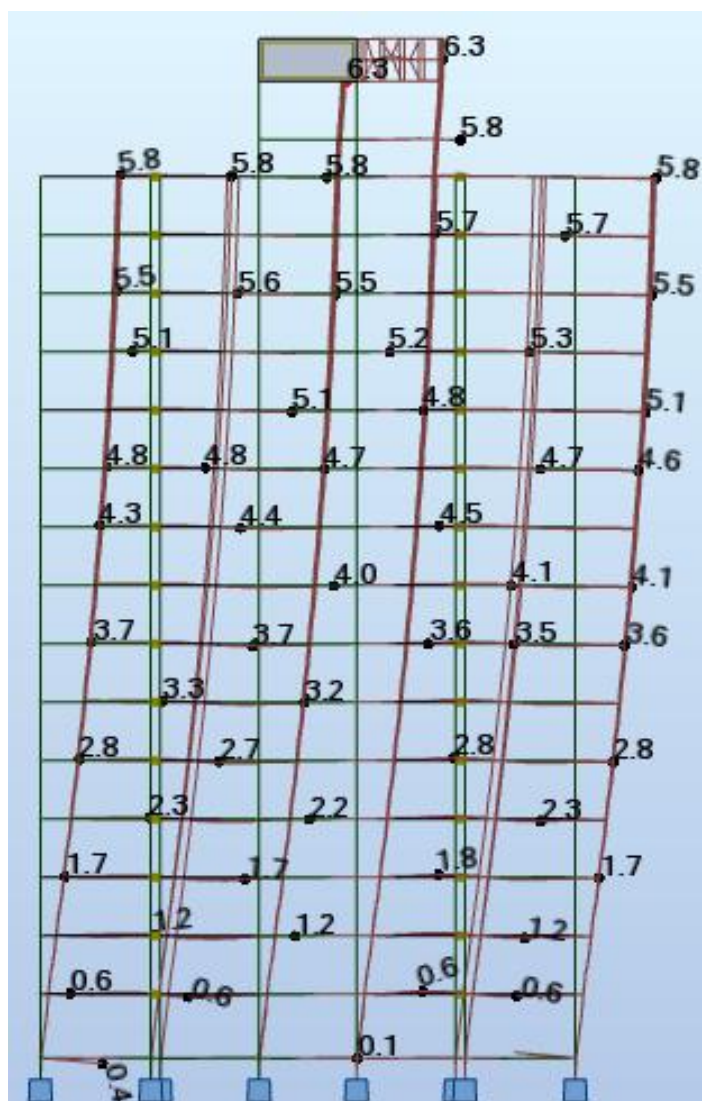


Figura 48 - Deslocamento (cm) da estrutura para o vento V_y positivo.

Fonte: Autoria Própria.

6.2.2.1 Diagramas para viga V12, pilar P17 e laje L13

A tabela 11 indica algumas das combinações feitas no *Revit* anteriormente.

Tabela 11 - Combinações

| Número da combinação | Fórmula | Estado |
|----------------------|--|----------------------|
| 1 | 1.4 P | ELU Normal |
| 2 | 1.4 P + 1.4 AC + 0.84 V _x (+) | ELU Normal |
| 3 | 1.4 P + 1.4 AC + 0.84 V _x (-) | ELU Normal |
| 4 | 1.4 P + 1.4 AC + 0.84 V _y (+) | ELU Normal |
| 5 | 1.4 P + 1.4 AC + 0.84 V _y (-) | ELU Normal |
| 6 | 1.4 P + 1.4 V _x (+) + 0.7 AC | ELU Normal |
| 7 | 1.4 P + 1.4 V _x (-) + 0.7 AC | ELU Normal |
| 8 | 1.4 P + 1.4 V _y (+) + 0.7 AC | ELU Normal |
| 9 | 1.4 P + 1.4 V _y (-) + 0.7 AC | ELU Normal |
| 10 | 1.0 P + 0.3 AC | ELS Quase permanente |
| 11 | 1.0 P + 0.4 AC | ELS Frequente |
| 12 | 1.0 P + 0.3 V _x (+) + 0.3 AC | ELS Frequente |
| 13 | 1.0 P + 0.3 V _x (-) + 0.3 AC | ELS Frequente |
| 14 | 1.0 P + 0.3 V _y (+) + 0.3 AC | ELS Frequente |
| 15 | 1.0 P + 0.3 V _y (-) + 0.3 AC | ELS Frequente |
| 16 | 1.0 P + 1.0 AC + 0.3 V _x (+) | ELS Rara |
| 17 | 1.0 P + 1.0 AC + 0.3 V _x (-) | ELS Rara |
| 18 | 1.0 P + 1.0 AC + 0.3 V _y (+) | ELS Rara |
| 19 | 1.0 P + 1.0 AC + 0.3 V _y (-) | ELS Rara |
| 20 | 1.0 P + 1.0 V _x (+) + 0.4 AC | ELS Rara |
| 21 | 1.0 P + 1.0 V _x (-) + 0.4 AC | ELS Rara |
| 22 | 1.0 P + 1.0 V _y (+) + 0.4 AC | ELS Rara |
| 23 | 1.0 P + 1.0 V _y (-) + 0.4 AC | ELS Rara |

Fonte: Autoria Própria

A figura 49 ilustra os diagramas de momento fletor e de cortante da viga V12, nesta ordem, para a combinação 1 (as combinações utilizadas para ilustrar o gráfico dos resultados foram escolhida aleatoriamente, apenas para didática do roteiro, não levando em consideração a situação mais crítica)

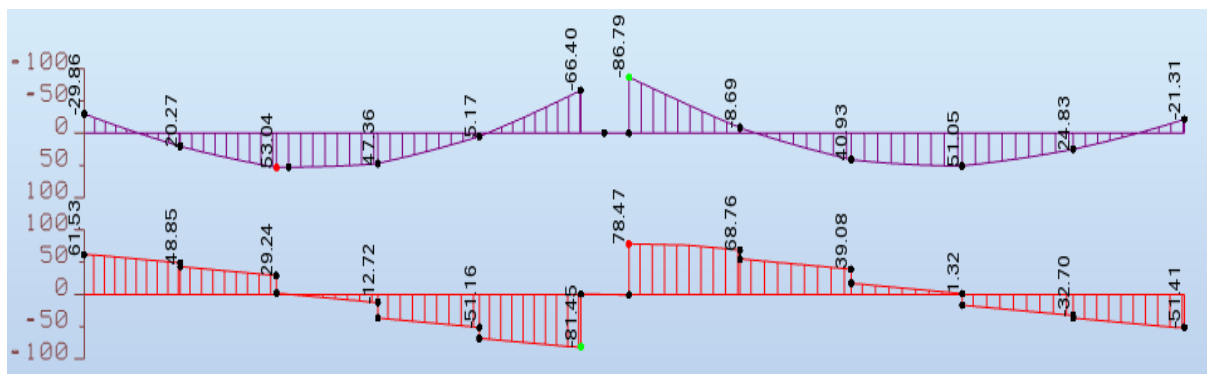


Figura 49 - Diagrama de momento (kN.m) e cortante (kN) para a combinação 1.

Fonte: Autoria Própria.

Os diagramas de momento fletor M_z e M_y e de força normal F_x do pilar P17, nesta ordem, para a combinação 2, estão ilustrados na figura 50. Para melhor visualização dos valores, a figura só exibe os esforços até o pavimento tipo 8 (os esforços nos pilares decrescem com a altura, portanto os valores mais críticos estão na base do edifício).

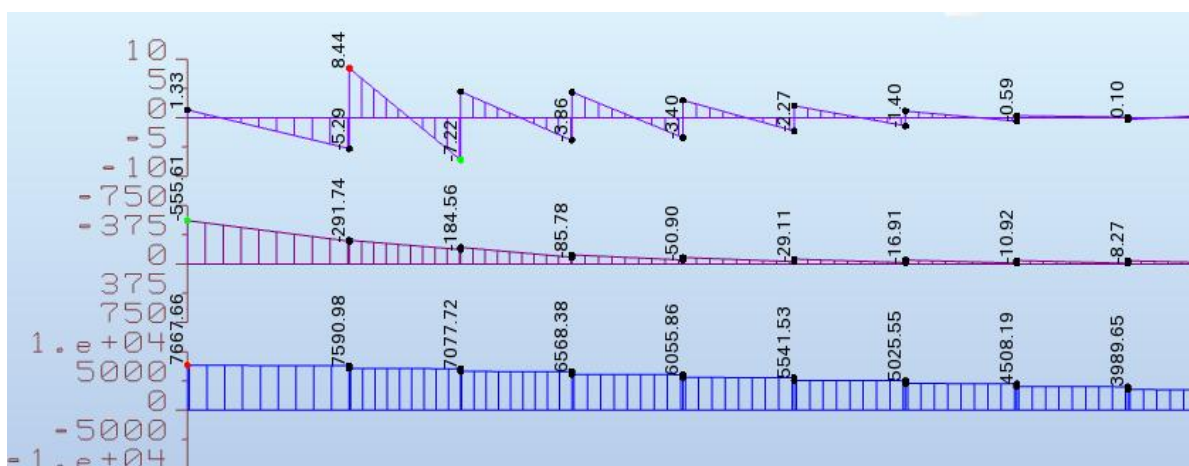


Figura 50 - Diagramas de momento fletor M_z (kN.m) e M_y (kN.m) e força normal F_x (kN), para a combinação 2, para o pilar P17.

Fonte: Autoria Própria.

Através da figura 51, que ilustra o diagrama de momento por isolinhas, é possível visualizar a distribuição dos momentos. Porém, esse gráfico muitas vezes não demonstra o maior resultado dos esforços. Por isso, é interessante obter os resultados, em paralelo com o citado acima, através dos valores em cada nó, como

ilustra a figura 52. A laje em análise é a L13, a combinação utilizada foi a 3 e o momento analisado foi o M_{xx} (na direção x), para ambos os casos.

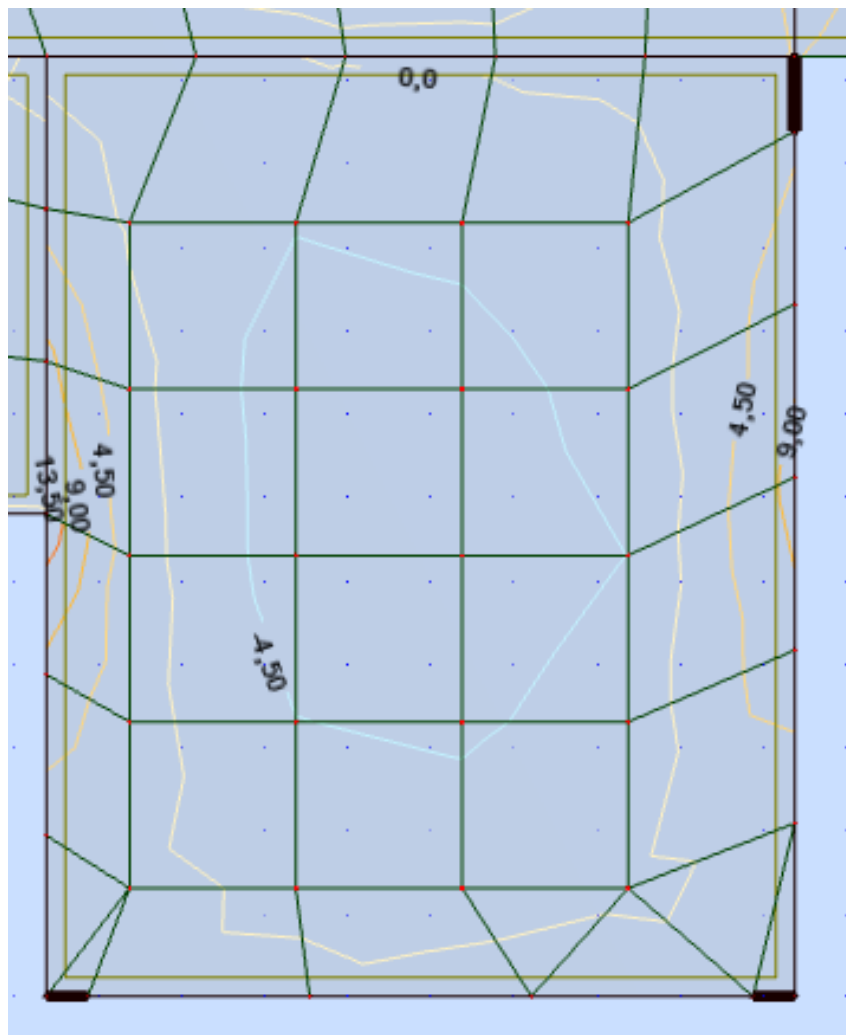


Figura 51 – Diagrama de momento M_{xx} (kN.m), para a combinação 3, para a laje L13 através das isolinhas.

Fonte: Autoria Própria.

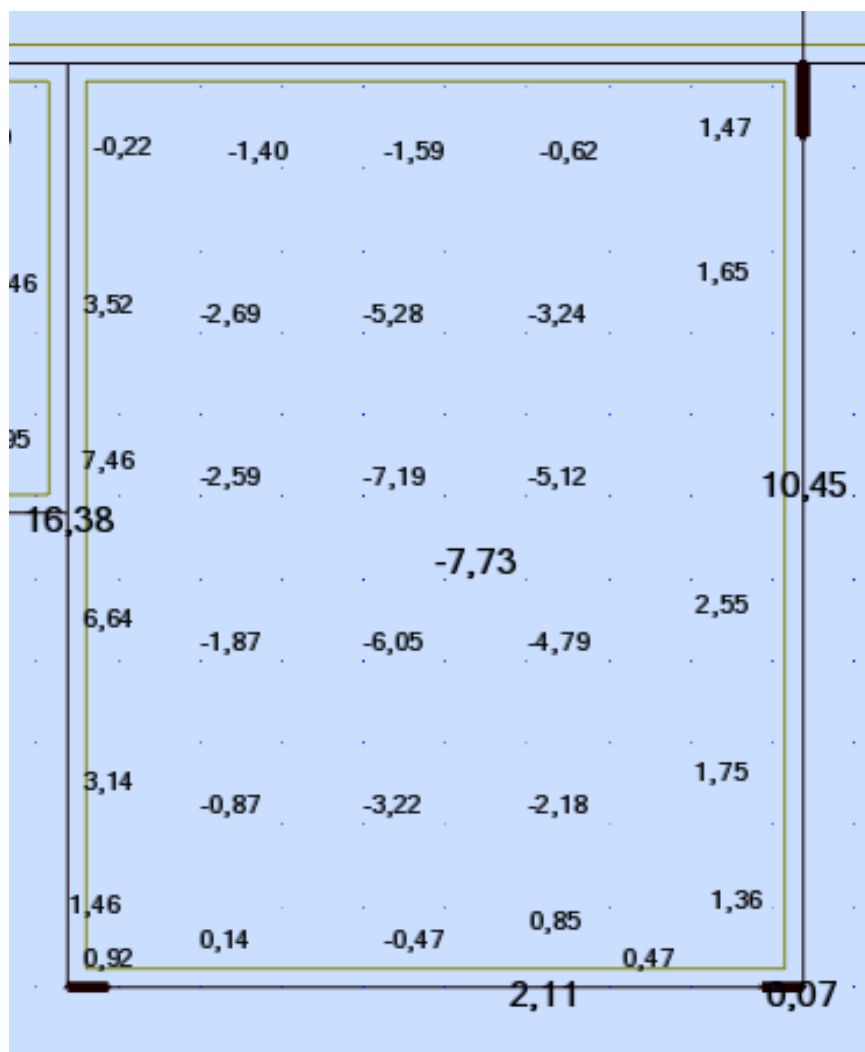


Figura 52 - Diagrama de momento M_{xx} (kN.m), para a combinação 3, para a laje L13 através dos valores em cada nó.

Fonte: Autoria Própria.

7 CONCLUSÃO

É imprescindível que um engenheiro projetista faça uma análise estrutural para o dimensionamento da estrutura. A eficiência ao empregar a tecnologia BIM como ferramenta de trabalho é incontestável.

Pode-se dizer que a utilização do *Revit* e do *Robot* gera ganhos de produtividade e, a longo prazo, compensam o investimento na compra de computadores, dos softwares e no treinamento das equipes.

Tanto o *Revit* como o *Robot* realizam a modelagem da estrutura, sendo o primeiro dedicado somente à modelagem e o segundo dedicado à modelagem e análise, embora a modelagem não seja tão eficiente e produtiva quanto no *Revit*.

Os passos para modelagem e análise estrutural são poucos e compreensíveis. Um usuário com um pouco de prática pode modelar uma estrutura pequena em menos de uma hora, por exemplo. As incompatibilidades que surgem, são simples de resolver. Lembrando sempre que embora as etapas de modelagem sejam relativamente simples, a tarefa de escolha e idealização do modelo estrutural assim como as ações não é tarefa muito simples. O uso de *softwares* tem o intuito de otimizar essas tarefas.

REFERÊNCIAS

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

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 6118 Projeto de estruturas de concreto - procedimento** . Rio de Janeiro, 2014.

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

CATELANI, Wilton S. **Fundamentos BIM**. 2016. 124 f. Coletânea Implementação do BIM Para Construtoras e Incorporadoras, Vol 1.Gadioli Cipolla Branding e Comunicação. Brasília, 2016.

CATELANI, Wilton S. **Fundamentos BIM**. 2016. 124 f. Coletânea Implementação do BIM Para Construtoras e Incorporadoras, Vol 2.Gadioli Cipolla Branding e Comunicação. Brasília, 2016.

COLOMBO, João R. **Apresentação de Projetos de Edificações em BIM**. 2014. 98 f. Caderno de apresentação de projetos BIM. Santa Catarina, 2014.

JUSTI, Alexander R. **Implantação da plataforma Revit nos escritórios brasileiros: relato de uma experiência**. 2007. 13 f. Revista Gestão e Tecnologia de Projetos–Escola de Engenharia de São Carlos, Vol. 3, nº01. São Carlos: 2008. Disponível em: <http://www.plataformabim.com.br/2012/06/implantacao-da-plataforma-revit-nos.html>. Acesso em: 20.out. 2016.

MOTA, Raphale Alves. **A implantação do sistema BIM em escritórios de Engenharia Civil: Estudo de caso**. Relatório (Graduação Engenharia Civil) – Universidade do Planalto Catarinense. Lajes, 2014. Disponível em:< <https://revista.uniplac.net/ojs/index.php/engcivil/article/view/1476>. Acesso em: 15 mar. 2017.

BERGIN, Michael S. **A Brief History of BIM**. ArchDaily. 2012. Disponível em: <http://www.archdaily.com/302490/a-brief-history-of-bim>. Acesso em: 16 mar. 2017

SANTOS, Adriana de Paula Lacerda et al. **Utilização do BIM em projetos de construção civil**. IJEI – Revista ibero-americana de Engenharia Industrial. Florianópolis, SC, vol. 1, nº 2, p. 24-42. Dez, 2009.

TAVARES, Wandemberg Jr et al. 09 f. **Um modelo de compatibilização de projetos de edificações baseado na engenharia simultânea e FMEA**. Pesquisa e Inovação em Gestão do Processo de Projeto de Edifícios. São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.eesc.usp.br/sap/projetar/files/A026.pdf>. Acesso dia: 08 nov. 2016.

TSE, Tao-Chiu, K. et al. **The utilisation of building information models in nD modeling: a study of data interfacing and adoption barriers**. 2005. 26 f. Journal of Information Technology in Construction. Finlândia, 2005. Disponível em: http://www.itcon.org/data/works/att/2005_8.content.05676.pdf. Acesso em: 08 nov. 2016.

AYRES, Cervantes Filho. **Utilização do CAD-BIM para projeto de alvenaria de blocos de concreto**. 2008. 07 f. VIII Workshop Brasileiro Gestão do Processo de Projetos na Construção de Edifícios. São Paulo, 2008. Disponível em: http://www.arquitetura.eesc.usp.br/workshop08/secundarias/ANAIS/Artigo_08.pdf . Acesso dia: 09 nov. 2016.

REZENDE, Paulo Emílio de. **Integração projeto-produção no processo de desenvolvimento de projeto: uma alternativa para melhoria da qualidade no setor da construção de OAE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

AUTODESK. **Revit LT**. 2017. Disponível em: <http://www.autodesk.com/products/revit-lt/overview>. Acesso em: 14/03/2017

SILVA, Ilka Maria. **Análise de edifícios de alvenaria estrutural sujeitos às ações do vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.