



**HENRIQUE PÁDUA DE SOUZA
JOICE STHEFANIE LOURENÇO TEIXEIRA**

**INFLUÊNCIA DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DAS
CARGAS VERTICAIS EM PÓRTICOS DE EDIFICAÇÕES
RESIDENCIAIS**

**LAVRAS-MG
2022**

**HENRIQUE PÁDUA DE SOUZA
JOICE STHEFANIE LOURENÇO TEIXEIRA**

**INFLUÊNCIA DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DAS CARGAS VERTICAIS EM
PÓRTICOS DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Sc. Wisner Coimbra de Paula
Orientador

**LAVRAS-MG
2022**

**HENRIQUE PÁDUA DE SOUZA
JOICE STHEFANIE LOURENÇO TEIXEIRA**

**INFLUÊNCIA DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DAS CARGAS VERTICAIS EM
PÓRTICOS DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS**

**INFLUENCE OF THE ANALYSIS METHODOLOGY OF VERTICAL LOADS IN
RESIDENTIAL BUILDINGS PORTIONS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 08 de setembro de 2022.
Dr. André Luiz Zangiacomo UFLA
Dr. Maykmiller Carvalho Rodrigues UFLA

Prof. Dr. Sc. Wisner Coimbra de Paula
Orientador

**LAVRAS-MG
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradecemos imensamente a Deus, por ter nos concedido saúde, sabedoria e força para a realização deste sonho. Sem ele, nada disso seria possível.

À Universidade Federal de Lavras, que proporcionou um ambiente rico em conhecimento, nos motivando e partilhando tantas oportunidades.

Somos gratos aos nossos familiares e amigos que sempre se mantiveram presentes em nossas vidas. Obrigado por nunca negarem palavras de força, incentivo e otimismo durante a nossa jornada.

Agradecemos a todos os professores que contribuíram em nossa formação acadêmica, especialmente ao professor doutor Wisner Coimbra de Paula, que foi responsável pela orientação do nosso trabalho. Obrigado pela disponibilidade em ajudar, esclarecendo inúmeras dúvidas com atenção e paciência.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o nosso processo de aprendizado, muito obrigado!

“A confiança em si mesmo é o primeiro segredo do sucesso.”

(Ralph Waldo Emerson)

RESUMO

O dimensionamento de uma estrutura residencial por completo requer análises profundas a fim de descobrir a melhor metodologia a ser empregada no cálculo estrutural. Com a diversificação das informações e conseqüentemente o aumento da inovação, uma estrutura pode ser concebida de inúmeras formas e, com isso, a automatização na determinação de tais grandezas se tornam mais recorrentes. O uso de *softwares* na Engenharia Civil vem se mostrando cada vez mais presente no cotidiano dos profissionais da área, possibilitando uma execução dos cálculos de forma rápida e fácil. A presente monografia visa comparar os esforços axiais nos pilares utilizando os *softwares Eberick®* e *Linear Elements Structure Model (LESM)®*, além do cálculo manual simplificado com o auxílio de tabelas e do *software Ftool®*. A partir das informações coletadas, foi possível comparar a variação dos esforços axiais solicitantes nos pilares, dispostos pelos *softwares*, por meio de diferentes métodos de cálculo estático e, assim, analisar se há necessidade de utilizar verificações manuais juntamente com os cálculos computacionais.

Palavras-chave: Projeto estrutural. Dimensionamento. Métodos numéricos. Métodos computacionais. Engenharia civil.

ABSTRACT

The design of a residential structure completely requires in-depth analyses in order to discover the best methodology to be used in structural calculation. With the diversification of information and consequently the increase of innovation, a structure can be conceived in countless ways and, with this, automation in determining such quantities become more recurrent. The use of software in Civil Engineering has been increasingly present in the daily life of professionals in the area, enabling a quick and easy execution of calculations. This monograph aims to compare axial efforts in the pillars using the Software Eberick® and Linear Elements Structure Model (LESM)®, in addition to the simplified manual calculation with the aid of tables and Ftool® software. From the information collected, it was possible to compare the variation of the requesting axial efforts in the pillars, arranged by the software, through different methods of static calculation and, thus, analyze whether there is a need to use manual checks together with computational calculations.

Keywords: Structural design. Sizing. Numerical methods. Computational methods. Civil Engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstração dos elementos estruturais.....	16
Figura 2 - Tabela de combinações últimas.....	18
Figura 3 - Valores dos coeficientes $\gamma_f = \gamma_{f1}, \gamma_{f3}$	18
Figura 4 - Valores dos coeficientes γ_{f2}	19
Figura 5 - Exemplificação simplificada do caminho das cargas.....	20
Figura 6 - Componentes de uma escada.....	27
Figura 7 - Exemplo de modelo do pórtico espacial.....	30
Figura 8 - Planta de forma dos pavimentos do modelo de calibração.....	35
Figura 9 - Modelagem linear tridimensional do pavimento baldrame pelo <i>LESM</i> ®.....	50
Figura 10 - Modelagem linear tridimensional do pavimento superior pelo <i>LESM</i> ®.....	51
Figura 11 - Modelagem linear tridimensional do pavimento cobertura pelo <i>LESM</i> ®.....	51
Figura 12 - Reações de apoio nos pilares do pavimento baldrame (<i>LESM</i> ®).....	52
Figura 13 - Reações de apoio nos pilares do pavimento superior (<i>LESM</i> ®).....	53
Figura 14 - Reações de apoio nos pilares do pavimento cobertura (<i>LESM</i> ®).....	54
Figura 15 - Modelagem 3D pelo <i>Eberick</i> ®.....	55
Figura 16 - Modelagem linear tridimensional do modelo de calibração pelo <i>LESM</i> ®.....	56
Figura 17 - Modelagem 3D do modelo de calibração pelo <i>Eberick</i> ®.....	57
Figura 18 - Análise estática da viga 203 gerada pelo <i>Ftool</i> ®.....	61
Figura 19 - Análise estática da viga 203 gerada pelo <i>Eberick</i> ® por PE.....	62
Figura 20 - Análise estática da viga 401 pelo software <i>Eberick</i> ® em análise por PE.....	64
Figura 21 - Análise estática da viga 402 pelo software <i>Eberick</i> ® em análise por PE.....	64
Figura 22 - Planta de forma da estrutura do pavimento caixa d'água.....	65
Figura 23 - Resultados da ANOVA e do Teste de Tukey obtidos pelo <i>Sisvar</i> ®.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pré-dimensionamento das lajes maciças.	40
Quadro 2 - Ações atuantes nas lajes maciças.	40
Quadro 3 - Distribuição da carga das lajes maciças nas vigas.	41
Quadro 4 - Ações nas lajes pré-moldadas.	42
Quadro 5 - Descarregamento das lajes pré-moldadas nas vigas.....	43
Quadro 6 - Carregamento nas vigas do pavimento térreo.	44
Quadro 7 - Carregamento nas vigas do pavimento superior.	45
Quadro 8 - Carregamento nas vigas do pavimento cobertura.	46
Quadro 9 - Carregamento nas vigas da caixa d'água.	46
Quadro 10 - Esforço axial solicitante nos pilares (Continua).....	48
Quadro 11 - Cargas solicitantes do modelo de calibração.....	56
Quadro 12 - Comparativo dos esforços normais (kN) entre métodos de cálculo.....	57
Quadro 13 - Comparativo dos esforços axiais solicitantes de projeto (kN) entre os três métodos de cálculo (Continua).	58
Quadro 14 - Comparativo do somatório dos esforços axiais entre o P13 e P14.....	66
Quadro 15 - Comparativo percentual dos esforços axiais solicitantes em relação ao método simplificado (Continua).....	67
Quadro 16 - Quadro comparativo das médias das diferenças percentuais entre os dois métodos de cálculo com o manual.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Concreto Armado
F_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora aprovada pela ABNT
PE	Pórtico espacial
PI	Pavimento isolado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Considerações gerais	12
1.2	Objetivos.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Projeto estrutural e o concreto armado.....	14
2.2	Concepção estrutural.....	15
2.3	Ações e combinações.....	16
2.3.1	Ação permanente	16
2.3.2	Ação variável.....	17
2.3.3	Ação excepcional.....	17
2.3.4	Combinação das ações.....	17
2.3.5	Caminho das ações.....	19
2.4	Definição dos componentes estruturais e análise dos esforços	20
2.4.1	Laje.....	20
2.4.1.1	Classificação	21
2.4.1.2	Vínculos em lajes maciças	22
2.4.1.3	Determinação dos carregamentos solicitantes	23
2.4.1.5	Teoria das charneiras plásticas e transferência de esforços	24
2.4.2	Viga	25
2.4.2.1	Reações de apoio	25
2.4.3	Pilar	26
2.4.3.1	Esforços normais.....	26
2.4.4	Escada	26
2.4.4.1	Determinação dos carregamentos solicitantes	27
2.4.4.2	Reações de apoio	28
2.5	Métodos computacionais	28
2.5.1	<i>Ftool</i> ®	29
2.5.2	<i>Linear Elements Structure Model</i> ®.....	29
2.5.3	<i>Eberick</i> ®	31
2.6	Processo estatístico de comparação.....	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1	Considerações iniciais.....	33

3.2	Procedimentos e análises.....	34
3.2.1	Projeto 1 – Modelo de calibração	34
3.2.2	Projeto 2 – Residência unifamiliar	35
3.2.3	Procedimentos modelo simplificado (manual)	35
3.2.3.1	Lajes	36
3.2.3.2	Vigas.....	36
3.2.3.3	Pilares.....	37
3.2.4	Procedimentos dos modelos computacionais.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	Modelo simplificado.....	39
4.1.1	Pré-dimensionamento das lajes maciças.....	39
4.1.1.1	Ações atuantes nas lajes maciças	40
4.1.1.2	Distribuição da carga das lajes maciças nas vigas	41
4.1.1.3	Ações atuantes nas lajes pré-moldadas.....	42
4.1.1.4	Distribuição da carga das lajes pré-moldadas nas vigas.....	42
4.1.2	Determinação dos esforços axiais nos pilares.....	43
4.1.2.1	Reação de apoio das vigas nos pilares.....	43
4.1.2.2	Somatório das reações de apoio nos pilares	47
4.2	Modelo computacional	50
4.2.1	<i>LESM</i> ®	50
4.2.2	<i>Eberick</i> ®	54
4.3	Comparativo dos esforços axiais solicitantes de projeto	55
4.3.1	Modelo de calibração.....	55
4.3.2	Projeto residencial	58
5	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICE A – Memorial de cálculo para reação de apoio	76
	APÊNDICE B – Diagrama de esforço cortante e reações de apoio das vigas	81
	APÊNDICE C – Planta arquitetônica e planta de forma	91

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

A engenharia de estruturas se mostra presente desde o início dos tempos e possui um papel fundamental para a realização de edificações que visam segurança, qualidade e conforto. Com o avanço tecnológico e as inovações presentes no setor da construção civil, percebe-se uma constante evolução nos projetos estruturais, tornando estes mais rápidos e flexíveis, uma vez que alterações podem ser feitas sem grandes empecilhos.

Para Santos e Oliveira (2012), os projetos estruturais foram realizados de modo simplificado por longo tempo, utilizando-se de métodos manuais na elaboração dos cálculos dos seus elementos, exigindo um maior tempo e dedicação para a execução.

Segundo Dortas (2016), antes da década de 1970, os projetos estruturais eram realizados utilizando métodos manuais, com apenas o uso de calculadoras, o que demandava muito tempo e recursos. Com o desenvolvimento dos *softwares*, houve uma grande mudança no cenário construtivo. Além do ganho de tempo e da economia, o projeto passa a ter maior precisão, simulando a estrutura com um modelo mais próximo do que ocorre na realidade, se compararmos aos métodos mais simplificados (GRANJA *et al.*, 2018; SILVA, 2015).

De acordo com Santos Júnior (2016), o cálculo manual possui eficiência no quesito segurança, porém quando se trata de agilidade, não se encontram pontos benéficos e, nos últimos anos, com os avanços tecnológicos, desencadeou-se cada vez mais a necessidade de agilizar os projetos de maneira segura e eficiente.

No cálculo manual, o dimensionamento de uma estrutura é feito de modo isolado, visto que cada elemento é determinado separadamente. Com a implementação dos métodos computacionais a situação muda, compatibilizando a estrutura e ampliando as possibilidades de análise da estrutura, gerando maior precisão e segurança nos resultados alcançados.

Diante do exposto, a monografia em questão buscou fazer um comparativo dos esforços axiais de uma estrutura residencial, através do cálculo manual simplificado e de dois métodos computacionais, visando analisar a confiabilidade e a qualidade dos resultados para esse tipo de projeto.

1.2 Objetivos

O presente trabalho dispõe-se a comparar os esforços axiais provenientes de uma estrutura residencial a partir do modelo de cálculo simplificado manual e dois *softwares* voltados para a área estrutural, sendo estes o *Eberick*® e *Linear Elements Structure Model (LESM)*®.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Projeto estrutural e o concreto armado

A concepção de uma estrutura é realizada visando as necessidades para as quais esta será exigida, analisando questões de segurança, utilização, condições econômicas, estética, questões ambientais, pontos construtivos e restrições legais. Com isso, vê-se a importância de um engenheiro para a realização dos projetos, como o projeto estrutural.

O projeto estrutural dispõe de informações a respeito do dimensionamento de toda estrutura que fará parte de uma edificação, ou seja, é uma análise de todos os componentes que serão responsáveis por suportar as cargas às quais a edificação estará submetida, incluindo vigas, pilares, lajes, elementos de fundação, entre outros.

Além disso, há uma vasta gama de materiais que são aplicados em estruturas na construção civil, destacando a alvenaria estrutural, a madeira, o aço e principalmente o concreto armado, que ganhou grande destaque no Brasil durante o último século.

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), o concreto armado é obtido por meio da associação entre concreto simples e armadura convenientemente colocada (armadura passiva), de tal modo que ambos resistam solidariamente aos esforços solicitantes. Sendo considerado um material relativamente barato, o concreto armado também possui uma maior facilidade de execução, levando em conta sua mão-de-obra menos exigente.

O concreto não pode ser empregado sozinho, uma vez que este apresenta baixa resistência aos esforços de tração. Assim, o aço é empregado em conjunto com o concreto e convenientemente posicionado na peça de modo a resistir à tração (VIRGOLINO; PELLEGRINO NETO, 2015).

Desta forma, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem seu imprescindível papel de padronizar a execução, a confecção e o controle das obras e dos materiais (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). No que se refere às normas de estruturas em concreto armado, destacam-se:

- ABNT NBR 6118 (2014): Projeto de estruturas de concreto – Procedimento;
- ABNT NBR 6120 (2019): Ações para o cálculo de estruturas de edificações;
- ABNT NBR 8681 (2003) (versão corrigida de 2004): Ações e segurança nas estruturas – Procedimento;
- ABNT NBR 14931 (2004): Execução de estruturas de concreto – Procedimento;

- ABNT NBR 6122 (2019): Projeto e execução de fundações.

Após anos de desenvolvimento desde a descoberta da aplicabilidade e funcionalidade do concreto houve um grande desenvolvimento em novas tecnologias, abrindo possibilidades para estruturas mais esbeltas, altas, mais elaboradas, mais leves e vencendo grandes vãos. Em compensação, o cálculo estrutural vem se tornando também mais complexo, forçando os engenheiros cada vez mais a se aprimorarem para as exigências do mercado construtivo.

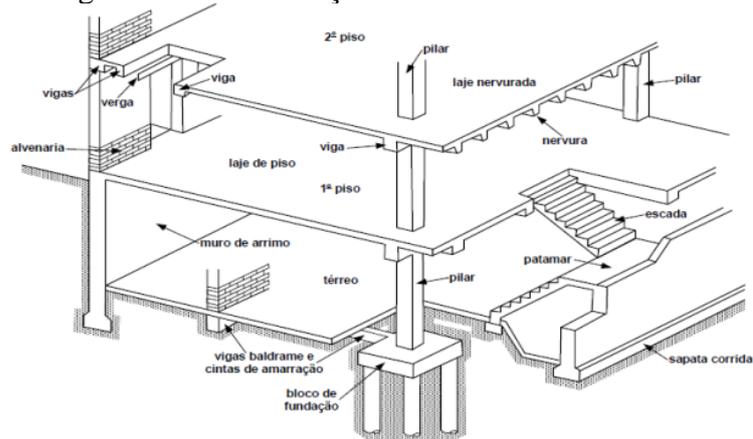
Juntamente com a pluralização da tecnologia e do mundo digital, na atual realidade brasileira, o profissional conta com artifícios computacionais que auxiliam todas e quaisquer etapas de uma concepção estrutural além de poder fazer análises complexas, que demandam horas de trabalho, em apenas segundos. Embora os *softwares* tenham um grande impacto no mercado de trabalho e facilitem os processos dos mais variados projetos, o profissional deve seguir com atenção, conhecimento e cautela já que os *softwares* apenas processam o que os usuários informam ao programa. Assim, o engenheiro calculista deve ter consciência e compreensão de suas ações em todos os procedimentos adotados em seu projeto, pois independente do *software*, nada substitui de fato o conhecimento e a experiência profissional.

2.2 Concepção estrutural

A concepção da estrutura, ou simplesmente estruturação, consiste em escolher um arranjo dos elementos estruturais de forma que assegure as finalidades para as quais o mesmo foi projetado (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2003). Essa etapa é uma das mais complexas pois implica em empregar os vários elementos a serem utilizados e fazer a locação dos mesmos, de modo a formar um sistema eficiente, capaz de absorver os esforços originários das ações atuantes na estrutura (NERVO, 2012).

O início do estudo de uma estrutura se dá por meio da concepção estrutural, uma vez que implica na determinação dos elementos e suas locações. O objetivo da concepção visa elaborar o arranjo que possui um melhor desempenho na estrutura, atendendo às normas e resistindo às cargas que serão estabelecidas, de forma ainda que leve em conta as condições propostas pela arquitetura, seus aspectos econômicos e durabilidade. Além disso, segundo Alva (2007) o projeto estrutural deve estar em harmonia com os demais projetos (hidrossanitário, elétrico, luminotécnico, telefonia, ar condicionado, entre outros) para que a sua coexistência não interfira na qualidade dos outros sistemas presentes. Na Figura 1 é apresentado um exemplo de arranjo estrutural e os elementos que o compõem.

Figura 1 - Demonstração dos elementos estruturais.



Fonte: Alva (2007, p. 1).

Com o posicionamento dos elementos, é possível iniciar as definições de cargas que irão influenciar no dimensionamento estrutural.

2.3 Ações e combinações

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), as ações são qualquer influência, ou conjunto delas, capazes de produzir estados de tensão e deformação em uma estrutura.

Para o correto dimensionamento de uma estrutura, deve-se averiguar a influência de todos os possíveis carregamentos que esta venha a sofrer durante sua vida útil. A ABNT NBR 8681 (2003) classifica as ações segundo sua variabilidade em ações permanentes, variáveis e excepcionais.

2.3.1 Ação permanente

As ações permanentes ocorrem durante toda a vida útil de uma estrutura, ou também, aquelas que aumentam com o tempo tendendo a um valor limite constante. Estas podem ser classificadas como diretas ou indiretas, sendo as diretas aquelas constituídas pelo peso próprio da estrutura, pelos pesos dos elementos construtivos fixos, das instalações permanentes e dos empuxos permanentes. Já as ações permanentes indiretas são constituídas pelas deformações impostas por retração e fluência do concreto, deslocamentos de apoio, imperfeições geométricas e protensão (ABNT NBR 6118, 2014, Item 11.3.1).

2.3.2 Ação variável

As ações variáveis são aquelas que sofrem alterações com o passar do tempo e também são classificadas em diretas e indiretas. As diretas são aquelas constituídas pelas cargas acidentais previstas para o uso da construção, pela ação do vento e da água e as ações variáveis durante a construção. Já as indiretas, são caracterizadas pela variação não uniforme da temperatura e as ações dinâmicas (ABNT NBR 6118, 2014, itens 11.4.1 e 11.4.2).

2.3.3 Ação excepcional

No projeto de estruturas sujeitas a situações excepcionais de carregamento, cujos efeitos não possam ser controlados por outros meios, devem ser consideradas ações excepcionais com os valores definidos, em cada caso particular, por Normas Brasileiras específicas. Alguns exemplos de ações excepcionais são enchentes, abalos sísmicos e explosões (ABNT NBR 6118, 2014, Item 11.5).

2.3.4 Combinação das ações

Para Carvalho e Figueiredo Filho (2014, p. 60), “A combinação das ações deve ser feita de forma que possam ser determinados os efeitos mais desfavoráveis para a estrutura”, de forma a gerar maior segurança para a estrutura uma vez que estaríamos majorando as cargas de projeto. As ações englobadas na combinação devem ser majoradas conforme sua natureza e seu coeficiente de ponderação respectivo.

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2014, p. 66), “um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura durante um período preestabelecido”.

As Figuras 2, 3 e 4 representam os tipos de combinações últimas apresentadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e os respectivos coeficientes que devem ser utilizados.

Figura 2 - Tabela de combinações últimas.

Combinações últimas (ELU)	Descrição	Cálculo das solicitações
Normais	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto armado ^a	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{eq} \psi_{0e} F_{eqk}$
	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto protendido	Deve ser considerada, quando necessário, a força de protensão como carregamento externo com os valores $P_{k\max}$ e $P_{k\min}$ para a força desfavorável e favorável, respectivamente, conforme definido na Seção 9
	Perda do equilíbrio como corpo rígido	$S(F_{sd}) \geq S(F_{nd})$ $F_{sd} = \gamma_{gs} G_{sk} + R_d$ $F_{nd} = \gamma_{gn} G_{nk} + \gamma_q Q_{nk} - \gamma_{qs} Q_{s,\min}$, onde: $Q_{nk} = Q_{1k} + \sum \psi_{0j} Q_{jk}$
Especiais ou de construção ^b	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{eq} \psi_{0e} F_{eqk}$	
Excepcionais ^b	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + F_{q1exc} + \gamma_q \sum \psi_{0j} F_{qjk} + \gamma_{eq} \psi_{0e} F_{eqk}$	
<p>onde</p> <p>F_d é o valor de cálculo das ações para combinação última;</p> <p>F_{gk} representa as ações permanentes diretas;</p> <p>F_{ek} representa as ações indiretas permanentes como a retração F_{egk} e variáveis como a temperatura F_{eqk};</p> <p>F_{qk} representa as ações variáveis diretas das quais F_{q1k} é escolhida principal;</p>		

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 67).

Figura 3 - Valores dos coeficientes $\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f3}$.

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4 ^a	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0
<p>onde</p> <p>D é desfavorável, F é favorável, G representa as cargas variáveis em geral e T é a temperatura.</p> <p>^a Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.</p>								

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 6).

Figura 4 - Valores dos coeficientes γ_{f2} .

Ações		γ_{f2}		
		ψ_0	ψ_1^a	ψ_2
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

^a Para os valores de ψ_1 relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23.
^b Edifícios residenciais.
^c Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

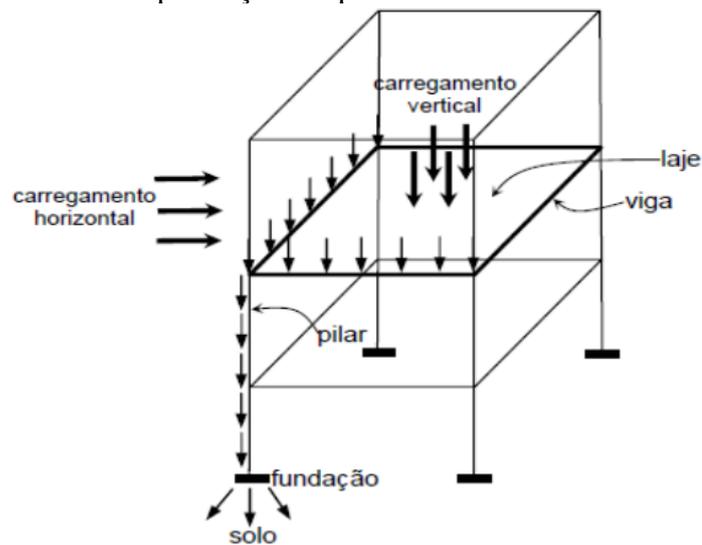
Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014, p. 65).

2.3.5 Caminho das ações

As ações verticais são constituídas nos projetos residenciais, em sua grande maioria, pelo peso próprio dos componentes estruturais, peso dos revestimentos, peso dos elementos de vedação e de ações decorrentes da sua utilização conforme a finalidade e emprego do edifício.

Como já abordado anteriormente, há várias formas de desenvolver um mesmo projeto estrutural uma vez que existem vários tipos de elementos estruturais com diferentes propriedades mecânicas. Segundo Araújo (2014), as lajes são estruturas que têm a função básica de receber as cargas de utilização das edificações e transmiti-las às vigas, das vigas para os pilares e, posteriormente, dos pilares para as fundações. A Figura 5 apresenta resumidamente o conceito apresentado.

Figura 5 - Exemplificação simplificada do caminho das cargas.



Fonte: Alva (2007, p. 4).

2.4 Definição dos componentes estruturais e análise dos esforços

Antes de compreender como os esforços são gerados e como eles são conduzidos, é imprescindível o conhecimento dos elementos estruturais presentes em edificações em concreto armado. Nesta seção é introduzido o conceito de cada elemento estrutural, bem como sua natureza, seu comportamento e funcionamento.

2.4.1 Laje

Segundo Bastos (2015), as lajes são classificadas como elementos planos bidimensionais, que são aquelas onde duas dimensões, o comprimento e a largura, são da mesma ordem de grandeza e muito maiores que a terceira dimensão, a espessura.

De acordo com Araújo (2014), elas são elementos estruturais que têm a função básica de receber as cargas de utilização das edificações, aplicadas nos pisos, e transmiti-las às vigas. Ela se torna, então, responsável por receber e transmitir, além de seu peso próprio, toda a carga gerada pela sua utilização para gerar condições habitáveis para o projeto residencial, além de gerar conforto térmico-acústico e segurança.

2.4.1.1 Classificação

A classificação das lajes pode ser feita considerando inúmeros tipos de concepção, sendo as mais comuns a laje maciça e a pré-fabricada. A utilização de cada modelo deve ser analisada visando o melhor aproveitamento para a obra em questão.

As lajes maciças são compostas por concreto em toda sua espessura, possuindo armaduras longitudinais e transversais. Além disso, as lajes maciças são moldadas *in loco* e podem se diferenciar através do vínculo com as respectivas vigas de apoio. Segundo Bastos (2015), esse tipo de laje é utilizado em construções com as mais diversas finalidades, isto é, desde edifícios de múltiplos pavimentos a imóveis residenciais e comerciais.

Para pré-dimensionar a altura de uma laje maciça em concreto armado, deve-se calcular o *lâmbda* (γ) por meio das Equações 1 e 2.

$$L_{ef} = L_{vão} + \frac{t_{viga,1}}{2} + \frac{t_{viga,2}}{2} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{L_{ef,y}}{L_{ef,x}} \quad (2)$$

Na qual:

$L_{vão}$ é o vão da laje;

t_{viga} a largura da seção transversal da viga de apoio;

λ é a relação do maior e o menor vão efetivo;

$L_{ef,y}$ é o maior vão efetivo da laje;

$L_{ef,x}$ é o menor vão efetivo da laje.

Uma vez já determinado o valor de λ , define-se a laje armada em 2 direções se o mesmo encontrar abaixo ou igual a 2 e, logo, armada em 1 direção se o mesmo encontrar a cima de 2. Por fim, desejando pré-dimensionar a altura das lajes armadas em 2 direções utiliza-se a Equação 3 e para as lajes armadas em 1 direção, a Equação 4, como dispostos na sequência.

$$h_2 = \frac{L_{ef,x}}{40} \quad (3)$$

$$h_1 = \frac{L_{ef,x}}{30} \quad (4)$$

Na qual:

h_2 é a altura final da laje armada em 2 direções;

h_1 é a altura final da laje armada em 1 direção;

$L_{ef,x}$ é o menor vão efetivo.

Contudo, mesmo com os procedimentos apresentados, deve-se respeitar os parâmetros propostos pela NBR 6118 (ABNT, 2014), nas quais lajes maciças devem apresentar os seguintes limites mínimos para a espessura:

- a) 7 cm para cobertura não em balanço;
- b) 8 cm para lajes de piso não em balanço;
- c) 10 cm para lajes em balanço;
- d) 10 cm para lajes que suportem veículos de peso total menor ou igual a 30 kN;
- e) 12 cm para lajes que suportem veículos de peso total maior que 30 kN;
- f) 15 cm para lajes com protensão apoiadas em vigas, com o mínimo de $\frac{l}{42}$ para lajes de piso biapoiadas e $\frac{l}{50}$ para lajes de piso contínuas;
- g) 16 cm para lajes lisas e 14 cm para lajes-cogumelo, fora do capitel.

As lajes pré-fabricadas são vigotas em treliças metálicas, que são cobertas por uma camada de concreto juntamente com espaçadores, aos quais podem ser em blocos ou EPS. Vale ressaltar que as vigotas são produzidas em local destinado para este fim, possuindo um controle maior de qualidade e maior rapidez de construção. Desta forma, a economia gerada na obra e sua praticidade são os principais motivos desse tipo de laje ser tão utilizado em obras residenciais e outras obras de pequeno porte.

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), as lajes pré-fabricadas treliçadas unidirecionais tem como individualidade essencial o arranjo dos trilhos em uma única direção, frequentemente na do menor vão, exclusivamente apoiada nas extremidades. Conseqüentemente, as vigas em que está submetida ao apoio é que recebe a maior parcela da carga.

2.4.1.2 Vínculos em lajes maciças

Para determinar as condições de bordo de lajes maciças são utilizadas aproximações empíricas por meio da relação entre as dimensões de ambas lajes em estudo.

Existem três tipos de vinculação entre as lajes, sendo estes: considerado como apoiada quando a laje é continuamente apoiada sobre vigas ou paredes; considerada como bordo livre quando a borda da laje não possui vinculação ou apoio ao longo de um dos lados; considerada como engastada, quando a borda da laje tem continuidade além do apoio correspondente daquele lado (laje adjacente) (CAMPOS FILHO, 2014).

Como lembra Pereira (2021), os critérios para avaliação do engaste dos bordos são definidos pelos seguintes parâmetros

1°- Um bordo de uma laje só pode ser considerado engastado se a laje na qual esse bordo se engasta possuir uma área não menor que duas vezes a área da laje que tenta se engastar; 2°- Um bordo de uma laje só pode ser considerado engastado se a laje na qual esse bordo se engasta possuir uma dimensão paralela não menor que duas vezes a dimensão paralela da laje que tenta se engastar. (PEREIRA, 2021, p. 14).

Caso haja alguma descontinuidade de condição de bordo em uma mesma aresta deve ser feito um conceito de generalização. Deste modo estabelece uma relação entre o comprimento de bordo engastado e o comprimento total do vão efetivo. Caso o comprimento de engaste represente mais de $\frac{2}{3}$ do comprimento total, deve ser considerado o bordo inteiro como engastado. Somado a isto, para maior precisão numérica e fidelidade aos cálculos, deve adotar a área efetiva de cálculo das lajes por meio da Equação 5, descrita abaixo:

$$A_{laje} = L_{ef,x} \cdot L_{ef,y} \quad (5)$$

Onde,

A_{laje} é a área efetiva;

$L_{ef,x}$ é o comprimento efetivo do menor vão;

$L_{ef,y}$ é o comprimento efetivo do maior vão.

2.4.1.3 Determinação dos carregamentos solicitantes

As lajes são elementos de grande importância já que elas são os primeiros componentes estruturais a receberem as cargas que irão atuar sobre a estrutura. Desta forma, o embasamento na NBR 6120 (ABNT, 2019) se torna imprescindível já que ela delimita os valores mínimos das ações a serem consideradas.

Para um projeto mais seguro e econômico, deve-se seguir fielmente o projeto arquitetônico e modelar as cargas de forma como ele realmente vai operar, como por exemplo pisos, revestimentos, forros, telhados, cargas de manutenção e cargas residenciais. O método básico de definição de cargas segue a relação observada na Equação 6.

$$P = \gamma \cdot b \cdot h \cdot l \quad (6)$$

Na qual:

P é a carga calculada;

γ é o peso específico determinado pela norma técnica;

b é a largura do elemento;

h é a altura do elemento;

l é o comprimento do elemento.

Seguindo esta lógica, como o λ é dado em kN/m^3 e b , h e l são dados em metro, pode-se definir então o formato do carregamento como pontual (kN), linear (kN/m) ou por pressão (kN/m^2).

2.4.1.5 Teoria das charneiras plásticas e transferência de esforços

A Teoria das Charneiras Plásticas teve sua base fundamentada em um trabalho dinamarquês publicado em 1921, por Ingerslev. Posteriormente, Johansen, em 1941, publicou um novo trabalho desenvolvido, desta vez com um tratamento correto ao qual aos meados do século XX ganhou grande atenção, ficando assim inicialmente conhecido como método de Johansen. Este modelo é baseado no princípio que as lajes, quando submetidas a esforços de flexão, assim como outros componentes estruturais, também podem atingir seu estado de ruína à compressão sem que haja escoamento na armadura (GONZALEZ, 1997).

A teoria das charneiras plásticas consiste na aplicação do teorema do limite superior de cálculo plástico e fornece, portanto, um valor de carga igual ou superior à carga de ruína, o que poderia sugerir que a teoria é contra a segurança; contudo, resultados experimentais demonstram que a carga de ruína é, em geral, maior que a obtida pela TCP (Teoria das Charneiras Plásticas) (GONZALEZ, 1997, p. 13).

Desta forma, de acordo com o Item 14.7.6.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014), para as lajes maciças retangulares que apresentam cargas uniformes, pode ser utilizado o método de cálculo das charneiras para se calcular as reações de apoio. Neste método, as reações de apoio são calculadas diretamente proporcionais às áreas das charneiras (trapézios e triângulos) que são delimitadas por retas inclinadas a partir dos vértices da laje em análise de acordo com os seus tipos de bordos:

— 45° entre dois apoios do mesmo tipo;

— 60° a partir do apoio considerado engastado, se o outro for considerado simplesmente apoiado;

— 90° a partir do apoio, quando a borda vizinha for livre.

Para definir a resultante da laje na viga de apoio, após delimitar as áreas de influência pelo método das charneiras plásticas, deve-se utilizar a Equação 7:

$$g_{r,laje} = (g_{laje}) \cdot \left(\frac{A_{charneira}}{l_{v,ef}} \right) \quad (7)$$

Na qual:

$g_{r,laje}$ é a resultante do descarregamento da laje na viga de apoio;

g_{laje} são as ações atuantes na laje;

$A_{charneira}$ é a área efetiva delimitada pelo método das charneiras plásticas;

$l_{v,ef}$ é o vão efetivo da viga de apoio.

2.4.2 Viga

Vigas são elementos estruturais lineares que atuam como elementos unidimensionais (barras) e, normalmente, são apoiadas em pilares, aos quais transferem todas as cargas recebidas. Além disso, elas podem ser dispostas com um ou mais apoios (fixos ou móveis) de tal maneira que seu estado seja no mínimo isostático (SOUZA; RODRIGUES, 2008).

2.4.2.1 Reações de apoio

As reações de apoio são as cargas axiais resultantes nos apoios devido às ações atuantes no projeto, o arranjo estrutural construído e também os tipos de vínculos definidos. Se tratando de uma condição bidimensional existem 3 tipos de apoios, sendo eles:

- Vínculo simples: Apoio com condição móvel que impede apenas um movimento (X ou Y);
- Vínculo duplo: Apoio com condição fixa que impossibilita dois movimentos nos eixos X e Y, permitindo apenas rotação;
- Vínculo triplo: Condição de engaste, impedindo os movimentos de translação nos eixos X e Y e também o movimento de rotação.

Vale ressaltar que no processo manual de cálculo através do modelo simplificado segmentam-se todos os elementos que são analisados como estruturas lineares individuais. Desta forma, as condições mais próximas da realidade destes elementos bidimensionais aos

elementos reais presentes em uma edificação em concreto armado são o vínculo triplo (engaste) e vínculo duplo (rótula), no qual a sua aplicação pode alterar todo o arranjo estático e também toda a transferência de carga para os apoios.

2.4.3 Pilar

Assim como as vigas, os pilares atuam como elementos lineares e quase sempre são dispostos verticalmente. Estes, atuam como barras predominantemente comprimidas que apoiam as vigas e trabalham principalmente sobre esforços de flexo-compressão e compressão. Deve-se destacar sua importância em resistir às forças horizontais já que, juntamente com as vigas, são formados pórticos com grande rigidez.

2.4.3.1 Esforços normais

O esforço normal, ou simplesmente esforço axial, é definido como a resultante das forças que atuam no centro de gravidade do elemento em direção perpendicular ao plano da seção transversal de uma barra. Ele é um esforço que atua de forma integral na seção transversal da barra e que pode ser tanto positivo, quando tracionado, quanto também negativo, quando comprimido.

Em projetos de engenharia civil, o cálculo desta ação é imprescindível, visto que é por meio desta grandeza que se abrem as possibilidades de se fazer um dimensionamento correto dos elementos da infraestrutura sem que haja um superdimensionamento. Somado a isto, deve-se considerar também que a infraestrutura é a parcela responsável por distribuir os esforços adequadamente para o solo e assim manter a construção estável e segura.

2.4.4 Escada

As escadas, que são elementos estruturais responsáveis por unir um ou mais níveis de uma construção, podem ter inúmeros formatos e uma vasta gama de materiais para a sua fabricação.

O dimensionamento de uma escada é feito pensando em cada um de seus elementos. Os principais componentes são os degraus, que são compostos pelos pisos (plano horizontal) e pelos espelhos (plano vertical). Os lances, que são constituídos por degraus capazes de vencer

um vão e, por fim, o patamar, que se torna necessário para aumentar o conforto e proporcionar um descanso durante o uso da mesma. A Figura 6 apresenta os componentes citados, aos quais foram embasados para os cálculos das cargas de peso próprio da estrutura.

Figura 6 - Componentes de uma escada.



Fonte: Dicas de Arquitetura (2018).

O planejamento de uma escada deve ser feito levando em consideração o conforto de utilização, ou seja, a altura do espelho, a inclinação do lance e a quantidade de degraus são ponderações que devem ser feitas para que esta seja dimensionada a fim de satisfazer as necessidades da obra em questão.

2.4.4.1 Determinação dos carregamentos solicitantes

As cargas solicitantes, ou seja, aquelas que irão atuar sobre a estrutura da escada, podem ser classificadas pelo peso próprio do revestimento/regularização, a carga do guarda corpo, a sobrecarga de utilização e o peso próprio da escada como um todo, incluindo o patamar.

A NBR 6120 (ABNT, 2019) estipula os valores mínimos das ações a serem consideradas em projeto de estruturas de edificações. Com isso, algumas determinações podem ser encontradas através das tabelas propostas pela norma técnica citada.

Segundo França *et al.* (2001) a determinação do peso próprio das lajes da escada pode ser calculada por metro quadrado, sendo necessária, a determinação da espessura média desta. A partir da espessura calculada, é possível encontrar o valor do peso próprio utilizando o peso

específico do material da escada, ou seja, do concreto. Com isso, chega-se às Equação 8 e 9 apresentadas a seguir.

$$E = h + \frac{e}{2} \quad (8)$$

$$P_{escada} = E \cdot \gamma \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (9)$$

Onde,

E = espessura média da laje;

h = altura da laje;

e = espelho;

γ = peso específico do concreto;

P_{escada} = peso da escada.

A carga de utilização que será empregada nos lances resultará da soma de todas as ações atuantes na escada. Logo, o carregamento pode ser determinado através da Equação 10.

$$q_{lance} = P_{escada} + P_{revestimento} + P_{utilização} \quad (10)$$

Onde,

q_{lance} = carregamento do lance da escada;

$P_{revestimento}$ = peso do revestimento;

$P_{utilização}$ = carga de utilização.

As cargas que resultaram no patamar dependem do formato estrutural dos lances pois, somente assim, pode-se determinar o caminho que as ações irão percorrer. Em alguns casos é possível determinar diretamente através de *softwares* computacionais. Já em outros casos, é necessário a determinação através de outros métodos, como o de paredes sobre lajes (método das charneiras).

2.4.4.2 Reações de apoio

As reações de apoio da escada, isto é, o vínculo desta com as vigas estabelecidas nos pavimentos que compreendem a implantação da escada, devem ser previstas considerando as cargas de utilização aplicadas na estrutura. Previamente, devem ser determinados a natureza destes vínculos, podendo estes possuírem três graus de liberdade. Cada modelo de escada irá apresentar um esquema estrutural diferente, variando então, os seus apoios.

2.5 Métodos computacionais

Neste tópico, serão abordados os *softwares* utilizados para a realização do comparativo proposto na monografia, sendo estes o *Ftool*®, *Eberick*® e, por fim, o *Linear Elements Structure Model (LESM)*®. Apesar de cada programa apresentar características específicas, todos possibilitam a obtenção dos esforços axiais se baseando nas NBR's, aos quais, também foram utilizadas no método simplificado de cálculo.

2.5.1 *Ftool*®

Ftool® é um programa de análise estrutural linear de pórticos planos bidimensionais com objetivo em prototipagem simples e eficientes, desenvolvido pela TECGRAF© da PUC-RIO. O *software* faz um processamento estático do modelo estrutural, ao qual cada elemento possui três graus de liberdade (duas translações e uma rotação) e traz como resultado várias análises como os diagramas de esforço interno e seus deslocamentos.

Para uma abreviação no modelo de cálculo simplificado, foi utilizado o *software* para a análise dos elementos e suas respectivas reações de apoio de forma individual. Desta forma, devido a este modelo de cálculo utilizado, o modelo não prevê efeitos horizontais na estrutura e, somado a este fato, também é feita uma análise simplificada da estrutura de forma que se desconsidera a influência dos outros elementos presentes.

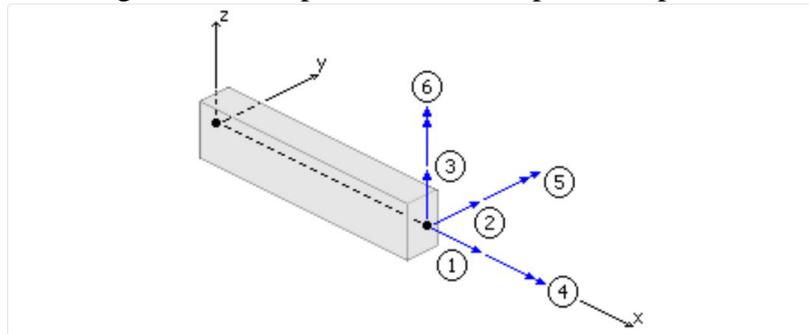
2.5.2 *Linear Elements Structure Model* ®

Linear Elements Structure Model (LESM)® é um *software* escrito pela TECGRAF© da PUC-RIO através da linguagem de programação do *software MATLAB*® para análise estática de estruturas lineares em um sistema tridimensional de coordenadas cartesianas, denominado como pórtico espacial.

Para Kimura (2007), o modelo estrutural de pórtico espacial é um modelo tridimensional composto por barras que representam os pilares e vigas presentes num edifício, o que possibilita uma avaliação bastante completa e eficiente do comportamento global da estrutura. Desta forma, o modelo permite a solicitação simultânea de ações no sentido vertical e no horizontal, fazendo com que cada nó possua seis graus de liberdade (três translações e três rotações) e se tornando mais próximo do modelo estrutural real. Na Figura 7 é representado o modelo de um elemento estrutural qualquer, no qual:

1. translação no eixo x;
2. translação no eixo y;
3. translação no eixo z;
4. rotação em torno do eixo x;
5. rotação em torno do eixo y;
6. rotação em torno do eixo z.

Figura 7 - Exemplo de modelo do pórtico espacial.



Fonte: TQSDocs (2022).

Além disso, o programa é baseado no Método da Rigidez Direta (Método dos Deslocamentos) e para cada análise estrutural ele monta um sistema de equações, soluciona o sistema e apresenta na interface os resultados obtidos.

O Método da Rigidez Direta basicamente utiliza como incógnitas primárias deslocamentos adequadamente escolhidos, que são os graus de liberdade da estrutura, diferenciando-se assim do Método das Forças em que as incógnitas são esforços produzidos pela “quebra” de restrições da estrutura hiperestática, de modo a torná-la isostática. O Método da Rigidez Direta é formulado em torno do equilíbrio de cada nó de um modelo em função de seus deslocamentos. Assim, os deslocamentos são as incógnitas do método. (SOUZA, 2017, p. 12).

Neste método, tem-se uma matriz K para todos os graus de liberdade dos nós da estrutura estática, como é apresentado na forma compacta da Equação 11:

$$\{F\} + \{R\} = [k] \cdot \{\delta\} \quad (11)$$

Na qual:

$\{F\}$ – Vetor das forças aplicadas nos nós;

$\{R\}$ – Vetor de reações dos nós;

$[k]$ – Matriz de rigidez;

$\{\delta\}$ – Vetor de deslocamento dos nós.

Como lembra Pereira (2021), a Equação 11 se assemelha com a Lei de Hooke uma vez que o método de rigidez também se baseia no princípio do comportamento elástico linear dos sólidos. O que diferencia ambas abordagens, é que se tem o esforço de reação associado com as forças externas aplicadas e a quantidade de graus de liberdade abordados pelas equações, o que fica explícito na Equação 12.

$$\begin{Bmatrix} F_1 & R_1 \\ F_2 & R_2 \\ \vdots & \vdots \\ F_n & R_n \end{Bmatrix}_g = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{1n} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}_g \cdot \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{Bmatrix}_g \quad (12)$$

Na qual:

$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix}$ – Vetor de todas as forças externas aplicadas nos nós;

$\begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{Bmatrix}$ – Vetor de todas as reações hiperestáticas dos nós;

$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{1n} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}$ – Matriz de rigidez do elemento;

$\begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{Bmatrix}$ – Vetor de todos os deslocamentos nodais.

2.5.3 Eberick®

O *software Eberick®* é um programa de engenharia desenvolvido pela empresa brasileira AltoQI© para elaboração de projetos estruturais em concreto armado, pré-moldado, alvenaria estrutural e estruturas mistas. O programa opera a análise da estrutura de acordo com as Normas Brasileiras, como a NBR 6118 (ABNT, 2014), verificando, por exemplo, os ELU (Estados de Limite Último) e ELS (Estado de Limite de Serviço). Além disso, ele consegue

modelar tridimensionalmente e gerar pranchas com todos os detalhes necessários para o desenvolvimento de uma obra (RIBEIRO, 2020).

O programa pode operar como pórtico espacial, assim como o *LESM*®, ou por pavimento isolado, assim como o método simplificado, se diferenciando exclusivamente no método de cálculo das lajes. Diferente do Método das Charneiras, que é calculado manualmente, o *Eberick*® faz sua leitura através do modelo das grelhas ao qual é feita uma leitura mais precisa da distribuição das cargas nos elementos. Para Kimura (2007), o modelo é composto por elementos lineares dispostos no plano horizontal do piso que simulam as vigas e lajes, formando uma malha de barras submetidas a cargas verticais. Desta forma, uma vez aplicada as cargas, automaticamente os esforços solicitantes migrarão para as regiões da laje que apresentam maior rigidez.

2.6 Processo estatístico de comparação

No que se refere ao segmento estatístico responsável por comparar dados numéricos, encontra-se diversos procedimentos matemáticos que possibilitam compreender o comportamento de uma ou mais amostras, ao qual, cada um destes métodos possui uma aplicabilidade.

A Análise de Variância (ANOVA), é uma técnica estatística utilizada para comparar e avaliar as variâncias entre médias ou medianas de grupos diferentes, visando compreender se há alguma diferença significativa entre eles (TIBCO, 2022). O procedimento da ANOVA apresenta 2 hipóteses, no qual, H_0 afirma que as médias amostrais são estatisticamente iguais ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$), enquanto H_1 afirma que pelo menos uma das médias se apresenta diferente das outras. Complementarmente, o Teste de Tukey pode ser usado em conjunto à ANOVA, no qual, segundo OLIVEIRA (2022), permite comparar todos os possíveis pares de médias se baseando na diferença mínima significativa (DMS) entre as amostras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico são enumerados todos os procedimentos e as condições tomadas para a realização das análises feitas no presente trabalho.

3.1 Considerações iniciais

Visando o estudo proposto para esta monografia, utilizaram-se de três métodos para que os objetivos fossem alcançados, sendo estes os *softwares Eberick®* e *LESM®* para as análises computacionais e, para o procedimento manual de cálculo, o *software Ftool®* com o auxílio de tabelas através de planilhas do *software Microsoft Excel®*. Vale ressaltar que o *Eberick®* emprega o método das grelhas em suas análises, enquanto os *softwares LESM®* e *Ftool®* apenas fazem a análise estática da estrutura e das cargas inseridas manualmente.

Para a realização dos cálculos e das definições em cada modelo computacional, recorreu-se às disposições da NBR ABNT 6120 (2019) para a determinação das solicitações estruturais e suas cargas. Abaixo estão descritos os dados e seus respectivos valores.

- Concreto armado com peso específico de 25 kN/m³;
- Paredes com pé direito de 3,15 m de altura e compostas por:
 - Chapisco com peso específico de 21 kN/m³ e espessura de 1,5 cm de cada lado;
 - Tijolo furado, com peso específico de 13 kN/m³ e dimensões de 9x19x24 cm;
 - Juntas verticais, horizontais e reboco com argamassa de peso específico de 19 kN/m³, composta por cimento, areia e cal;
- Aceleração da gravidade adotada 9,80 m/s²;
- Laje maciça:
 - Revestimento superior em porcelanato com peso específico de 23 kN/m³ e espessura de 0,8 cm;
 - Camada de regularização com espessura média de 4,0 cm e peso específico de 21 kN/m³;
 - Revestimento inferior composto por forro de gesso acartonado com peso próprio de 0,25 kN/m²;
- Laje pré-moldada treliçada:

- Segundo as tabelas informativas concedidas pela fabricante ITAIPU, a laje pré-moldada tem seu peso específico (desconsiderando a capa de concreto) em média de $0,3\text{ kN/m}^2$. A capa de concreto foi adotada como 4cm de altura e peso específico 25 kN/m^2 . Desta forma, totaliza-se $1,30\text{ kN/m}^2$ de peso laje pré-moldada.
- Revestimento inferior composto por forro de gesso acartonado com peso próprio de $0,25\text{ kN/m}^2$;
- Telhado de fibrocimento com peso de $0,40\text{ kN/m}^2$;
- Cargas acidentais:
 - Para dormitórios, sala, copa, cozinha e sanitários, carga de $1,5\text{ kN/m}^2$;
 - Carga de manutenção de $0,50\text{ kN/m}^2$ para as lajes da cobertura.

Todas as especificações descritas anteriormente foram aplicadas igualmente em todos os modelos de cálculo para que, assim, o resultado final seja comparável entre as diferentes formas de análise.

3.2 Procedimentos e análises

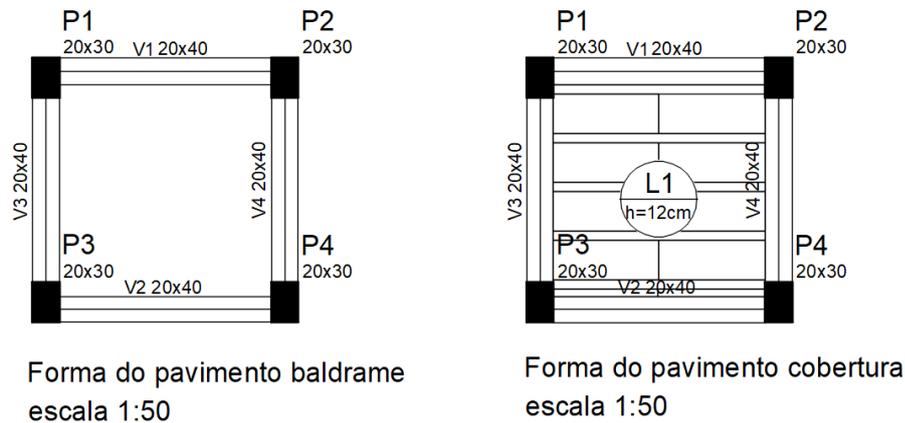
Nos segmentos a seguir estão detalhados todos os procedimentos adotados para a execução do trabalho, além da apresentação das etapas de cálculo realizadas nos três métodos de cálculo utilizados: Método simplificado, *LESM*® e *Eberick*® (por pórtico espacial e por pavimento isolado).

3.2.1 Projeto 1 – Modelo de calibração

Em um sistema onde são apresentadas muitas variáveis e incógnitas, torna-se interessante a construção de um modelo reduzido para melhor compreensão de como o *software* faz suas análises e seus cálculos, uma vez que tal modelo possui menos interferências de forças externas quando comparado às estruturas mais complexas. Desta forma, para obter resultados mais coerentes e validar a precisão dos *softwares* foi proposto um modelo de calibração para, futuramente, compreender e analisar o projeto residencial como um todo pelos 3 modelos de cálculo.

Seguindo este pensamento foi produzida, então, uma estrutura simplificada em concreto armado de um projeto sem fins construtivos para, somente, a análise estática, com detalhes mostrados na Figuras 8.

Figura 8 - Planta de forma dos pavimentos do modelo de calibração.



Fonte: Dos autores (2022).

3.2.2 Projeto 2 – Residência unifamiliar

O projeto de estudo deste trabalho se trata de uma obra residencial de aproximadamente 160 m² de área construída em concreto armado. A obra é composta, em seu pavimento térreo, por uma sala de estar, uma cozinha, um banheiro e uma escada. Já no pavimento superior, ela possui um banheiro, uma sala de tv e uma suíte master com banheiro e varanda.

Para a realização da concepção estrutural, a estrutura foi dividida nos níveis baldrame, pavimento superior e cobertura por meio de elementos estruturais concebidos em concreto armado. A Folha 1 presente no Apêndice C apresenta o projeto arquitetônico desenvolvido que contempla as plantas baixas de cada pavimento, fachadas da edificação, diagrama de cobertura, corte transversal, corte longitudinal e planta de situação.

Além disto, a Folha 2, presente no Apêndice C, representa o projeto estrutural pré-dimensionado adotado para cada pavimento no qual os cálculos terão como parâmetro inicial.

3.2.3 Procedimentos modelo simplificado (manual)

Com as plantas de fôrma definidas através da concepção estrutural e, com isso, a localização exata de cada componente, foi possível iniciar os procedimentos de cálculo. A sequência para determinação dos esforços axiais segue o caminho das ações, ou seja, iniciando pela laje, em seguida a viga e por fim o pilar.

3.2.3.1 Lajes

As lajes são apoiadas nas vigas que, além do seu peso próprio, recebem as cargas das mesmas. Para o presente trabalho, que é constituído de dois pavimentos (térreo e superior), as lajes apresentam características diferentes, sendo maciça no pavimento superior e pré-moldada na cobertura. Como há essa distinção, os cálculos também seguem por caminhos diferentes, conforme descrito no Item 2.4.1.

Os cálculos foram iniciados pelas lajes maciças. Para a determinação da influência das cargas nas vigas, utilizou-se o método das charneiras plásticas. Para a distribuição através deste meio, obteve-se, inicialmente, os vãos efetivos e a vinculação entre as lajes, uma vez que é necessário analisar a angulação entre cada tipo de apoio, como exposto no Item 2.4.1.3.

O carregamento de cada laje foi determinado considerando o peso próprio, os revestimentos, o forro e a carga residencial. Com o valor final definido, utilizou-se a relação da área das charneiras e o vão efetivo de cada viga que receberá a transferência de carga da laje para a viga.

Já para as lajes pré-moldadas, que possuem um peso pré-definido de fábrica, o procedimento se torna mais simples. Após o cálculo do seu peso próprio, basta definir as charneiras, que dividiram as lajes ao meio por uma linha perpendicular à menor dimensão da laje e, assim, calcular a interferência destas em cada viga. No apêndice A há uma exemplificação de todos os cálculos e os Quadros 2, 3, 4 e 5 apresentam alguns resultados discriminados.

3.2.3.2 Vigas

As vigas recebem, além do seu peso próprio, o descarregamento das lajes, vigas, paredes e pilares que nelas estarão apoiadas. Após determinar as cargas que atuam nas lajes e distribuir nas vigas de todos os pavimentos, inicia-se o cálculo do peso próprio das vigas e de todos os elementos que nelas atuam. No geral, as vigas recebem cargas distribuídas de alvenaria e concentradas, que são resultantes de vigas que se apoiam em vigas.

O peso da alvenaria foi calculado analisando a composição da mesma, ou seja, o reboco, revestimentos, juntas horizontais e verticais e os blocos. Do mesmo modo, a carga linear, oriunda do peso próprio da viga, é determinada através da sua seção transversal multiplicada pelo peso específico do concreto, como é apresentado na Equação 6.

A partir de todos os dados calculados, basta distribuir em todo comprimento da viga em análise e, então, encontrar as reações de apoio, dado que elas representam a carga vertical transferida das vigas para os pilares. Os Quadros 6, 7, 8 e 9 apresentam os resultados obtidos como, também, há uma demonstração de cálculo no Apêndice A.

3.2.3.3 Pilares

Com todos os carregamentos já definidos nas vigas, é possível determinar os esforços axiais nos pilares. Para obter o valor com maior precisão, é necessário calcular o peso próprio dos pilares, que segue o mesmo raciocínio das vigas.

Além da influência do peso próprio do pilar, é necessário somar as reações de apoio provenientes das vigas, que já carregam as cargas das lajes. Para determinar esses valores, utilizou-se do *software Ftool*®, que calcula o valor das reações de apoio após o lançamento dos carregamentos distribuídos e concentrados. Os Quadros 10 e 11 apresentam todos os valores após os somatórios das cargas axiais solicitadas.

3.2.4 Procedimentos dos modelos computacionais

Com o projeto arquitetônico pré-estabelecido no *software AutoCAD*®, inicia-se o processo de lançamento da residência nos *softwares* estruturais.

Começando pelo *Eberick*®, a disposição dos elementos estruturais é feita por partes, partindo dos pilares e dando sequência nas vigas e, por fim, as lajes. Primeiramente, é necessário “limpar” o projeto em arquivo de extensão de desenho *.dwg* para que, antes de importar, vá somente o necessário para desenvolver a estrutura. Após a determinação de cada pavimento, iniciou-se a disposição dos elementos estruturais conforme as dimensões requisitadas e pré-determinadas no projeto. A fim de alcançar a maior fidelidade no lançamento da estrutura em relação aos demais métodos, todos os elementos estruturais foram definidos no *software* com os mesmos carregamentos, características, vínculos e condições de bordo do que os que foram adotados. Após gerar no *Eberick*® toda a estrutura e o respectivo carregamento, foi possível obter os resultados que foram objeto de comparação entre os métodos de cálculo considerados neste, por meio da combinação última normal que gera o esforço axial máximo (Nd. Máx.). Visando alcançar um comparativo mais completo, são feitos dois tipos de análise da estrutura, sendo estes pórticos espacial e pavimento isolado. O pórtico espacial analisa a

estrutura como um todo, visando uma proximidade maior ao modelo real da estrutura que será construída futuramente. Já o pavimento isolado, como é apresentado no suporte da AltoQI®, por Kirsten (2016), que propõe um estudo simplificado através da divisão da estrutura em vários pórticos, ao qual não prevê efeitos horizontais na estrutura e não analisa a influência dos outros elementos do projeto. Todos os métodos apresentam como resultado os valores de esforços axiais nos pilares do projeto.

Para o lançamento da estrutura no *software LESM*®, diferentemente do processo realizado no *Eberick*®, é utilizado um complexo de nós através do sistema de coordenadas tridimensionais cartesianas. Desta forma, por meio da planta baixa apresentada no Apêndice C, pôde-se determinar a origem adotada (0,0,0) e, assim, predeterminar a locação dos pontos conforme o projeto residencial. Posteriormente, foi feita a ligação entre os nós para representar as vigas do projeto estrutural com seus respectivos vínculos. Por fim, é aplicado o carregamento manualmente em cada elemento linear e/ou nó, conforme os cálculos realizados pelo método simplificado com o auxílio das tabelas do *Microsoft Excel*®. Visto que todo o lançamento e carregamento foi realizado, bastou-se processar a estrutura para se obterem os resultados almejados como esforços cortantes, momentos fletores e reações de apoio.

Após a obtenção de todos os dados, iniciam-se as análises comparativas entre todas as metodologias em análise do presente estudo. O Quadro 14, contido no tópico na sequência, apresenta os resultados obtidos e o comparativo realizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção estão apresentados os resultados referentes às cargas e reações da estrutura através dos procedimentos listados na metodologia. Com todos os resultados obtidos, ao final foi feito um comparativo entre os métodos considerados, utilizando os valores encontrados no modelo simplificado e nos modelos computacionais, verificando, então, os esforços axiais resultantes da estrutura em análise.

4.1 Modelo simplificado

Para a determinação dos esforços axiais através do modelo simplificado, as etapas de cálculo seguiram a sequência proposta na metodologia. Nos tópicos a seguir, estão discriminados os resultados referentes às lajes, vigas e pilares.

4.1.1 Pré-dimensionamento das lajes maciças

A primeira etapa realizada foi a análise e a disposição das lajes. Através das plantas de fôrma disponibilizadas no Apêndice C, pôde-se determinar as condições de bordo das lajes e, posteriormente, definir a influências destas nas vigas em que estão apoiadas.

Considerando que as lajes do primeiro pavimento são maciças e que as lajes do pavimento cobertura são pré-moldadas, cada uma seguiu uma metodologia de cálculo de acordo com a sua concepção estrutural.

Os comprimentos em X e Y das lajes foram cotados tendo-se como referência eixo a eixo, conforme apresentado no Apêndice C. Os valores de área, λ , altura, e a armação das lajes estão dispostos no Quadro 1.

Quadro 1 - Pré-dimensionamento das lajes maciças.

Laje	Área (m ²)	x (m)	y (m)	λ	Armação	h (cm)	h adotado (cm)
L1	1,83	1,13	1,63	1,44	Armada em 2 direções	2,81	12,00
L2	5,64	1,60	3,53	2,20	Armada em 1 direção	5,33	12,00
L3	15,62	3,55	4,40	1,24	Armada em 2 direções	8,88	12,00
L4	4,95	1,13	4,40	3,91	Armada em 1 direção	3,75	12,00
L5	4,76	1,60	2,98	1,86	Armada em 2 direções	4,00	12,00
L6	1,80	1,13	1,60	1,42	Armada em 2 direções	2,81	12,00
L7	15,98	3,55	4,50	1,27	Armada em 2 direções	8,88	12,00
L8	2,59	1,13	2,30	2,04	Armada em 1 direção	3,75	12,00
L9	5,89	1,15	5,13	4,46	Armada em 1 direção	3,83	12,00
L10	3,97	1,18	3,38	2,87	Armada em 1 direção	3,92	12,00

Fonte: Dos autores (2022).

4.1.1.1 Ações atuantes nas lajes maciças

Neste tópico estão apresentadas as ações que atuam diretamente sobre as lajes maciças e, a partir destas informações, é determinada a combinação última normal (Qd) em todas as lajes. No somatório das ações foram levados em consideração o peso próprio da mesma, o revestimento em piso de porcelanato, a camada de regularização, o forro e as ações variáveis características da residência. A discriminação dos valores e das ações podem ser encontradas no Tópico 3.1: Considerações iniciais.

A seguir, no Quadro 2, estão apresentados os valores encontrados para cada ação e, por fim, o somatório delas.

Quadro 2 - Ações atuantes nas lajes maciças.

Laje	Peso Próprio (kN/m)	Piso porcelanato (kN/m ²)	Regularização (kN/m ²)	Forro (kN/m ²)	Carga Variável Residencial (kN/m ²)	Somatório (kN/m ²)
Laje 1	3,00	0,18	0,84	0,25	1,50	5,77
Laje 2	3,00	0,18	0,84	0,25	1,50	5,77
Laje 3	3,00	0,18	0,84	0,25	1,50	5,77
Laje 4	3,00	0,18	0,84	0,25	1,50	5,77
Laje 5	3,00	0,18	0,84	0,25	1,50	5,77
Laje 6	3,00	0,18	0,84	0,25	1,50	5,77
Laje 7	3,00	0,18	0,84	0,25	1,50	5,77
Laje 8	3,00	0,18	0,84	0,25	1,50	5,77
Laje 9	3,00	0,18	0,84	0,25	1,50	5,77
Laje 10	3,00	0,18	0,84	0,25	1,50	5,77

Fonte: Dos autores (2022).

4.1.1.2 Distribuição da carga das lajes maciças nas vigas

As lajes do pavimento superior são maciças e, após a determinação das cargas que nestas atuam, os cálculos devem ser prosseguidos para determinar como tais elementos irão influenciar nas vigas, ou seja, como será esse descarregamento.

Apresentam-se as distribuições de cargas, ressaltando que para as lajes maciças utiliza-se o método das charneiras plásticas para a distribuição das cargas de uma laje. Para a determinação da ação de cada laje nas vigas, leva-se em consideração a área de influência e a carga proveniente da mesma além do comprimento da viga que está recebendo o carregamento. O Quadro 3 apresenta os valores de influência de cada laje em viga seguindo a Equação 7.

Quadro 3 - Distribuição da carga das lajes maciças nas vigas.

Viga	Laje	Área (m ²)	Comprimento da viga (m)	Carga da laje (kN/m ²)	Carregamento (kN/m)
201	Laje 1	0,32	1,13	5,77	1,64
	Laje 2	2,86	3,53	5,77	4,69
202	Laje 1	0,32	1,13	5,77	1,64
	Laje 2	2,86	3,53	5,77	4,69
	Laje 3	3,11	3,55	5,77	5,05
203	Laje 3	5,41	3,55	5,77	8,79
	Laje 5	0,64	1,60	5,77	2,31
	Laje 7	5,43	3,55	5,77	8,83
205	Laje 5	1,11	1,60	5,77	4,00
	Laje 6	1	1,60	5,77	3,60
206	Laje 6	0,58	1,60	5,77	2,09
	Laje 7	3,13	3,53	5,77	5,12
	Laje 9	3,03	5,13	5,77	3,41
207	Laje 5	1,51	2,98	5,77	2,93
	Laje 6	0,43	1,53	5,77	1,62
	Laje 9	3,03	1,95	5,77	3,41
209	Laje 3	3,55	4,40	5,77	4,65
	Laje 5	1,51	5,28	5,77	1,65
	Laje 6	0,43	1,53	5,77	1,62
	Laje 7	3,71	4,50	5,77	4,76
210	Laje 1	0,6	1,63	5,77	2,13
	Laje 3	3,55	4,40	5,77	4,65
	Laje 4	2,5	4,40	5,77	3,28
	Laje 7	3,71	4,50	5,77	4,76
	Laje 8	1,9	3,38	5,77	3,23
	Laje 10	1,9	3,38	5,77	3,25
211	Laje 1	0,6	1,64	5,77	2,13
	Laje 4	2,5	4,40	5,77	3,28
	Laje 8	1,29	2,30	5,77	3,24
	Laje 10	1,9	3,38	5,77	3,38

Fonte: Dos autores (2022).

4.1.1.3 Ações atuantes nas lajes pré-moldadas

Diferente das lajes maciças, as lajes pré-moldadas possuem um peso próprio já definido pelos fabricantes. Para a determinação final das ações nas lajes pré-moldadas consideram-se, além do peso próprio, o telhado de fibrocimento, a camada de regularização, o forro, caixa d'água e a carga de manutenção.

Os resultados dispostos no Quadro 4 apresentam as ações solicitantes em cada laje e seu somatório.

Quadro 4 - Ações nas lajes pré-moldadas.

Laje	Peso Próprio (kN/m ²)	Caixa D'água (kN/m ²)	Regularização (kN/m ²)	Forro (kN/m ²)	Carga Variável Residencial (kN/m ²)	Telhado (kN/m ²)	Somatório (kN/m ²)
Laje 1	1,30		0,84	0,25	0,50	0,40	3,29
Laje 2	1,30	3,42	0,84	0,25	0,50	0,40	6,71
Laje 3	1,30		0,84	0,25	0,50	0,40	3,29
Laje 4	1,30		0,84	0,25	0,50	0,40	3,29
Laje 5	1,30		0,84	0,25	0,50	0,40	3,29
Laje 6	1,30		0,84	0,25	0,50	0,40	3,29
Laje 7	1,30		0,84	0,25	0,50	0,40	3,29

Fonte: Dos autores (2022).

4.1.1.4 Distribuição da carga das lajes pré-moldadas nas vigas

Como as lajes do pavimento cobertura são pré-moldadas e, após a determinação das cargas que nestas atuam, os cálculos devem ser prosseguidos para determinar como tais elementos irão influenciar nas vigas, ou seja, como será esse descarregamento.

Neste momento, foi estabelecido as distribuições de cargas por meio do método das charneiras plásticas para a distribuição das cargas de uma laje. Para a determinação da ação de cada laje nas vigas, leva-se em consideração a área de influência e a carga proveniente da mesma além do comprimento da viga que está recebendo o carregamento. O Quadro 5 apresenta os valores de influência de cada laje em viga seguindo a Equação 7.

Nesta seção foram estabelecidas as distribuições das cargas nas vigas pelas lajes pré-moldadas através do mesmo processo adotado nas lajes maciças. Vale ressaltar que diferentemente das maciças, as pré-moldadas apresentam armaduras em apenas uma direção e, logo, transferem suas cargas somente para as vigas as quais a apoiam, geralmente as vigas perpendiculares ao seu sentido de armadura. O Quadro 5 apresenta os resultados obtidos do descarregamento das lajes pré-moldadas em suas vigas de apoio.

Quadro 5 - Descarregamento das lajes pré-moldadas nas vigas.

Viga	Laje	Área (m ²)	Comprimento da viga (m)	Carga da laje (kN/m ²)	Carregamento (kN/m)
301	Laje 2	2,87	3,53	6,30	5,13
302	Laje 2	2,87	3,53	6,30	5,13
303	Laje 5	11,59	5,15	3,29	7,40
305	Laje 5	11,59	5,15	3,29	7,40
	Laje 6	3,03	5,15	3,29	1,93
306	Laje 6	3,03	5,15	3,29	1,93
308	Laje 3	7,81	4,40	3,29	5,84
309	Laje 7	1,77	3,38	3,29	1,73
	Laje 4	15,54	6,70	3,29	7,63
	Laje 3	7,81	4,40	3,29	5,84
	Laje 1	0,92	1,63	3,29	1,85
310	Laje 1	0,92	1,63	3,29	1,85
311	Laje 4	15,54	6,70	3,29	7,63
312	Laje 7	1,77	3,38	3,29	1,73

Fonte: Dos autores (2022).

4.1.2 Determinação dos esforços axiais nos pilares

Nesta seção são apresentados os principais esforços solicitantes nos pilares, que são as resultantes das vigas e o seu peso próprio, além de como estes foram obtidos pelo processo de cálculo manual.

4.1.2.1 Reação de apoio das vigas nos pilares

Com as resultantes das lajes calculadas é possível partir para a determinação da influência das vigas com as suas respectivas cargas nos pilares.

Inicialmente, avaliou-se quais os tipos de intervenções a qual cada viga estava sujeita, ou seja, as ações que estas recebiam. Cargas de alvenaria, lajes e peso próprio da viga foram dimensionados a fim de obter o resultado final. Nos Quadros 6, 7, 8 e 9 estão discriminados cada elemento que causa uma sobrecarga nas vigas e o valor da sua ação em todos os pavimentos sendo estes, térreo, superior e cobertura por meio da combinação normal última.

Quadro 6 - Carregamento nas vigas do pavimento térreo.

Viga	Trecho	Peso Próprio (kN/m)	Parede (kN/m)	Carregamento (kN/m)	Combinação normal última (kN/m)
101	1	3,75	10,00		19,24
102	1	2,00	10,00		16,79
	2	3,75	10,00		19,24
103	1	3,75	10,00		19,24
	2	3,75			5,25
104	1	3,75	10,00		19,24
105	1	3,75	10,00		19,24
106	1	3,75	0,00		5,25
107	1	2,00	10,00		16,79
108	1	2,00	10,00		16,79
109	1	2,00	10,00		16,79
110	1	2,00	10,00		16,79
111	1	1,50	10,00		16,09
	2	1,50		Escada 13,14	20,50
	3	1,50			2,10
112	1	2,00	10,00		16,79

Fonte: Dos autores (2022).

Quadro 7 - Carregamento nas vigas do pavimento superior.

Viga	Trecho	Peso Próprio (kN/m)	Parede (kN/m)	Carregamento (kN/m)		Combinação normal última(kN/m)
201	1	1,50	10,00	Laje 1	1,64	18,39
	2	1,50	10,00	Laje 2	4,69	22,66
202	1	2,00	10,00	Laje 3	5,05	23,86
	2	2,00		Laje 1	1,64	5,10
	3	2,00	10,00	Laje 2	4,69	23,36
203	1	2,00	10,00	Laje 5	2,31	20,03
	2	2,00	10,00	Laje 3	8,79	41,46
				Laje 7	8,83	
	3	2,00				2,80
204	1	2,00	10,00			16,79
205	1	1,50	10,00	Laje 5	4,00	26,73
				Laje 6	3,60	
206	1	2,00	10,00	Laje 6	2,09	24,49
				Laje 9	3,41	
	2	2,00	10,00	Laje 7	5,12	28,74
207	1	1,50		Laje 9	3,41	6,87
	2	1,50				2,10
208	1	2,00	10,00			16,79
	2	2,00	10,00	Laje 6	1,62	19,06
	3	2,00	10,00	Laje 5	2,93	20,90
209	1	2,00		Laje 6	1,62	11,73
				Laje 7	4,76	
	2	2,00	10,00	Laje 5	1,65	25,77
				Laje 7	4,76	
	3	2,00	10,00	Laje 3	4,65	23,30
210	1	2,00		Laje 10	3,25	7,35
	2	2,00	10,00	Laje 7	4,76	28,01
				Laje 10	3,25	
	3	2,00	10,00	Laje 7	4,76	27,98
				Laje 8	3,23	
	4	2,00		Laje 3	4,65	13,90
Laje 4				3,28		
5	2,00	10,00	Laje 1	2,13	19,78	
211	1	1,50		Laje 10	3,38	6,83
	2	1,50		Laje 8	3,24	6,64
	3	1,50		Laje 4	3,28	6,69
	4	1,50		Laje 4	3,28	25,09
				Escada	13,14	
	5	1,50		Laje 4	3,28	6,69
6	1,50	10,00	Laje 1	2,13	19,08	
212	1	2,00	10,00			16,79
	2	2,00	10,00			16,79
	3	2,00	10,00			16,79

Fonte: Dos autores (2022).

Quadro 8 - Carregamento nas vigas do pavimento cobertura.

Viga	Trecho	Peso Próprio (kN/m)	Platibanda (kN/m)	Carregamento (kN/m)		Combinação normal última(kN/m)
301	1	1,50	2,91			6,17
	2	1,50	7,63	Laje 2	5,12	19,96
302	1	2,00	2,91			6,87
	2	2,00				2,80
	3	2,00	7,63	Laje 2	5,12	20,66
303	1	2,00	2,91	Laje 5	7,40	17,23
	2	2,00		Laje 5	7,40	13,16
304	1	2,00	2,91			6,87
305	2	2,00	2,91	Laje 5	7,40	19,93
				Laje 6	1,93	
306	1	1,50		Laje 6	1,93	4,80
	2	1,50				2,10
307	1	2,00	2,91			6,87
308	1	2,00	2,91	Laje 3	5,84	15,05
309	1	2,00		Laje 7	1,73	5,22
	2	2,00	2,91	Laje 7	1,73	9,29
	3	2,00		Laje 4	7,63	13,48
	4	2,00		Laje 3	5,84	21,67
				Laje 4	7,64	
5	2,00	2,91	Laje 1	1,85	9,46	
310	1	1,50	7,63	Laje 1	1,85	15,38
311	1	2,00				2,80
	2	2,00	2,91	Laje 4	7,63	17,55
	3	2,00	7,63			13,49
312	1	1,50		Laje 7	1,73	4,52
312-325	1	1,50				2,10

Fonte: Dos autores (2022).

Quadro 9 - Carregamento nas vigas da caixa d'água.

Viga	Trecho	Peso Próprio (kN/m)	Carregamento (kN/m)		Combinação normal última(kN/m)
401	1	1,5	Laje 8	2,75	5,95
402	1	1,5	Laje 8	2,75	5,95
403	1	1,5			2,1
404	1	1,5			2,1

Fonte: Dos autores (2022).

Com todos os carregamentos definidos, parte-se para a determinação das reações de apoio em cada pilar. Como o projeto apresenta vigas que se apoiam em vigas, inicialmente obteve-se o valor desses descarregamentos que irão atuar como cargas concentradas na viga de apoio.

Para obter as reações, utilizou-se o *software Ftool®*, como descrito no Tópico 2.5.1. O *software* possibilita a distribuição de cargas que foram determinadas anteriormente e retorna

como resultado os esforços cortantes e os momentos fletores, além de proporcionar o valor das resultantes nos apoios.

4.1.2.2 Somatório das reações de apoio nos pilares

A partir da distribuição de todas as cargas nas vigas e, com isso, a obtenção das reações que irão influenciar em cada pilar, é possível determinar o valor da reação normal em cada elemento.

A determinação será feita a partir do somatório das reações com o peso próprio de cada pilar por meio da Equação 6. Vale ressaltar que o peso próprio deverá passar pela combinação última normal antes de ser somado com o restante dos dados. O Quadro 10 apresenta todos os pilares do respectivo trabalho e o detalhamento de cada influência que este receberá. Para complementar os dados apresentados, o Apêndice B apresenta todas as reações de apoio obtidas pelo *software Ftool*®.

Quadro 10 - Esforço axial solicitante nos pilares (Continua).

Pilar	Pavimento	Viga (kN)	Reação de apoio (kN)	Peso próprio pilar (kN)	Total (kN)	
P1	Baldrame	101	52,80	4,41	73,61	181,78
		110	16,40			
	Superior	201	16,07	4,41	78,37	
		210	57,89			
	Cobertura	301	44,90	0,00	29,80	
		309	-15,10			
P2	Baldrame	101	46,20	4,41	64,01	210,15
		112	13,40			
	Superior	201	54,13	4,41	71,94	
		212	13,40			
	Cobertura	301	47,90	3,50	74,20	
		311	10,80			
		401	10,30			
	404	1,70				
P3	Baldrame	102	40,70	4,41	91,31	275,71
		108	46,20			
	Superior	202	60,63	4,41	116,30	
		209	51,26			
	Cobertura	302	26,70	0,00	68,10	
308		41,40				
P4	Baldrame	102	81,50	4,41	139,01	428,56
		111	35,40			
		113	17,70			
	Superior	202	30,50	4,41	146,55	
		211	111,64			
	Cobertura	302	112,10	3,50	143,00	
		310	15,40			
402		10,30				
	403	1,70				
P5	Baldrame	102	33,90	4,41	144,71	307,69
		112	33,60			
		113	33,40			
		114	39,40			
	Superior	202	41,17	4,41	79,18	
		212	33,60			
	Cobertura	302	36,40	3,50	83,80	
311		31,90				
402		10,30				
	404	1,70				
P6	Baldrame	103	40,90	4,41	51,11	91,76
		111	5,80			
	Superior	211	40,65	0,00	40,65	

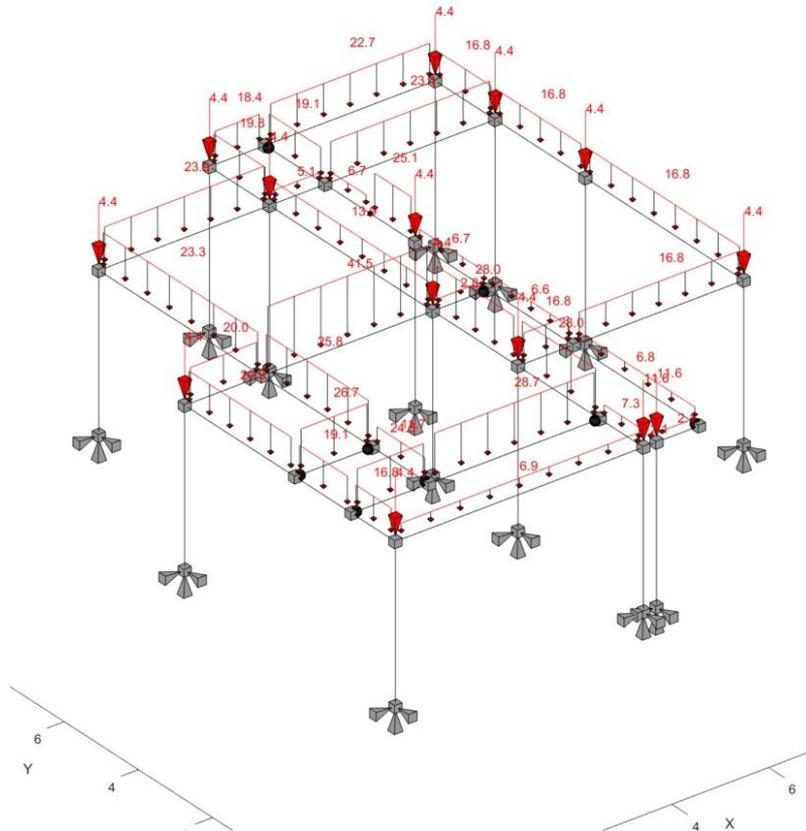
Fonte: Dos autores (2022).

Quadro 11 - Esforço axial solicitante nos pilares (Conclusão).

Pilar	Pavimento	Viga (kN)	Reação de apoio (kN)	Peso próprio pilar (kN)	Total (kN)	
P7	Baldrame	103	33,40	4,41	133,51	252,92
		112	56,30			
		114	39,40			
	Superior	212	56,20	4,41	60,61	
	Cobertura	311	58,80	0,00	58,80	
P8	Baldrame	104	70,90	4,41	122,81	471,04
		107	47,50			
	Superior	203	85,62	4,41	264,63	
		208	174,60			
	Cobertura	303	59,00	0,00	83,60	
307		24,60				
P9	Baldrame	104	55,90	4,41	79,61	388,58
		109	19,30			
	Superior	203	135,50	4,41	202,67	
		210	62,76			
	Cobertura	303	40,10	0,00	106,30	
309		66,20				
P10	Baldrame	105	44,80	4,41	97,91	348,85
		109	48,70			
	Superior	204	100,63	4,41	169,04	
		210	64,00			
	Cobertura	304	38,20	0,00	81,90	
309		43,70				
P11	Baldrame	105	44,80	4,41	85,31	287,62
		112	36,10			
	Superior	204	43,40	4,41	83,91	
		212	36,10			
	Cobertura	304	46,40	0,00	118,40	
311		72,00				
P12	Baldrame	106	13,50	4,41	65,41	310,08
		107	47,50			
	Superior	207	17,61	4,41	169,87	
		208	147,85			
	Cobertura	306	12,40	0,00	74,80	
307		62,40				
P13	Baldrame	106	13,50	11,58	54,48	229,10
		109	29,40			
	Superior	207	17,87	11,58	115,82	
		210	86,37			
	Cobertura	306	12,60	0,00	58,80	
309		46,20				
P14	Baldrame			11,58	11,58	71,55
	Superior	207	10,79	11,58	22,37	
	Cobertura	306	37,60	0,00	37,60	

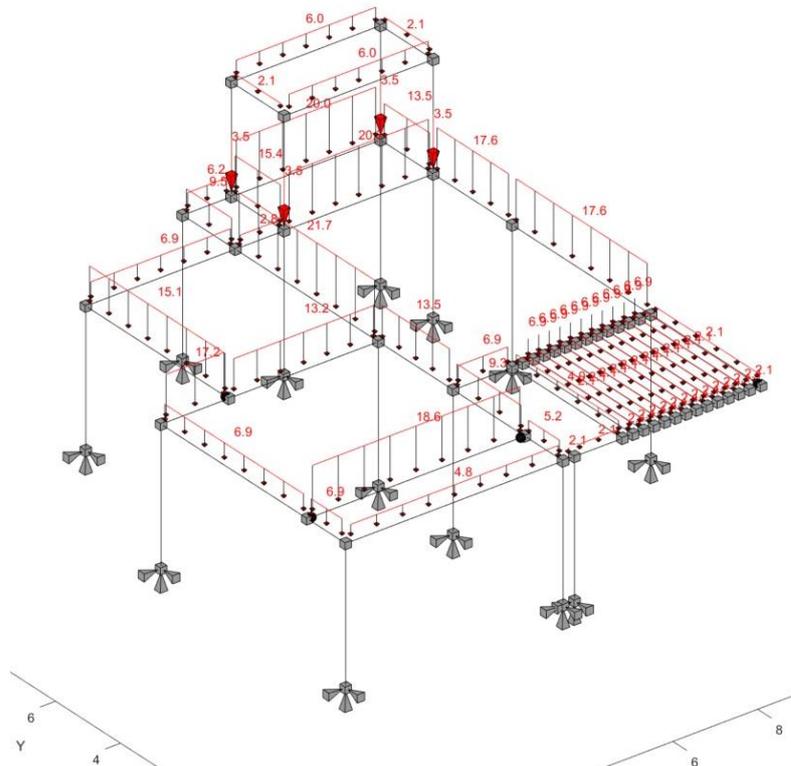
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 10 - Modelagem linear tridimensional do pavimento superior pelo *LESM*®.

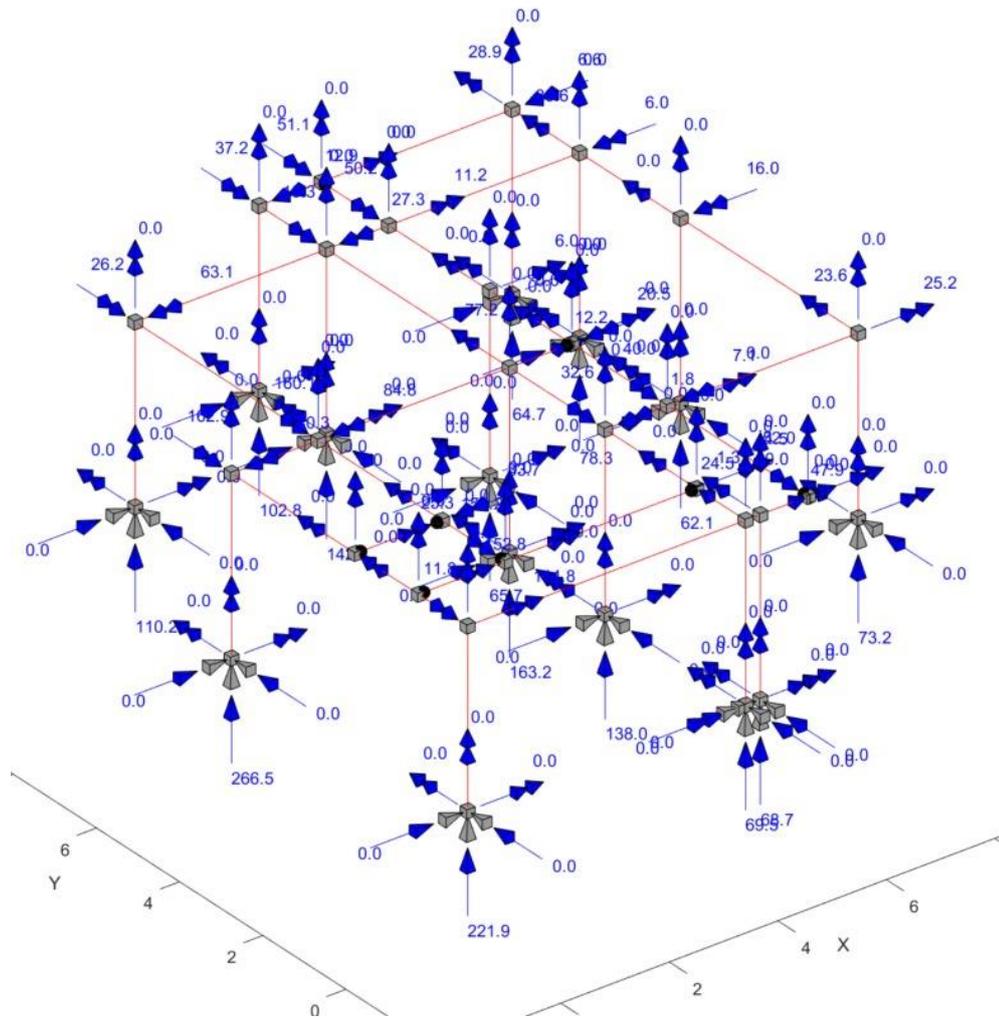


Fonte: Dos autores (2022).

Figura 11 - Modelagem linear tridimensional do pavimento cobertura pelo *LESM*®.

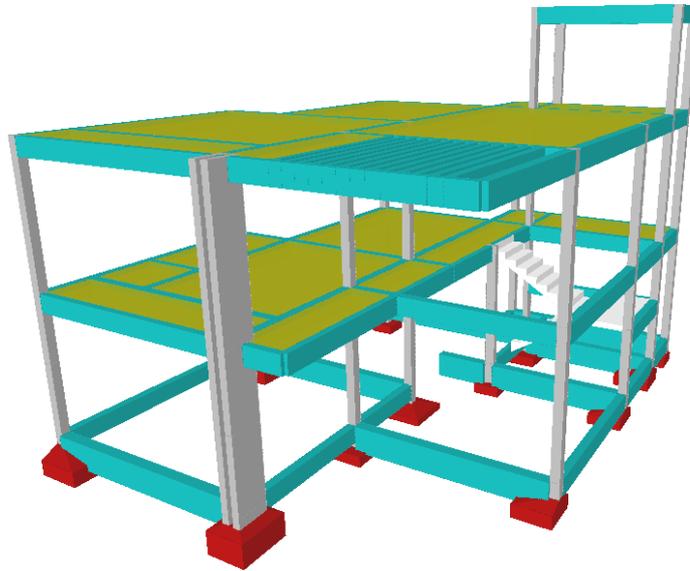


Fonte: Dos autores (2022).

Figura 13 - Reações de apoio nos pilares do pavimento superior (*LESM*®).

Fonte: Dos autores (2022).

Figura 15 - Modelagem 3D pelo *Eberick*®.



Fonte: Dos autores (2022).

4.3 Comparativo dos esforços axiais solicitantes de projeto

Nesta etapa foi apresentado os resultados das cargas axiais obtidas pelo método de cálculo simplificado e pelos métodos computacionais *LESM*® e *Eberick*®, bem como o comparativo entre seus respectivos resultados. Por fim, é feita uma discussão sobre os valores e dados obtidos.

4.3.1 Modelo de calibração

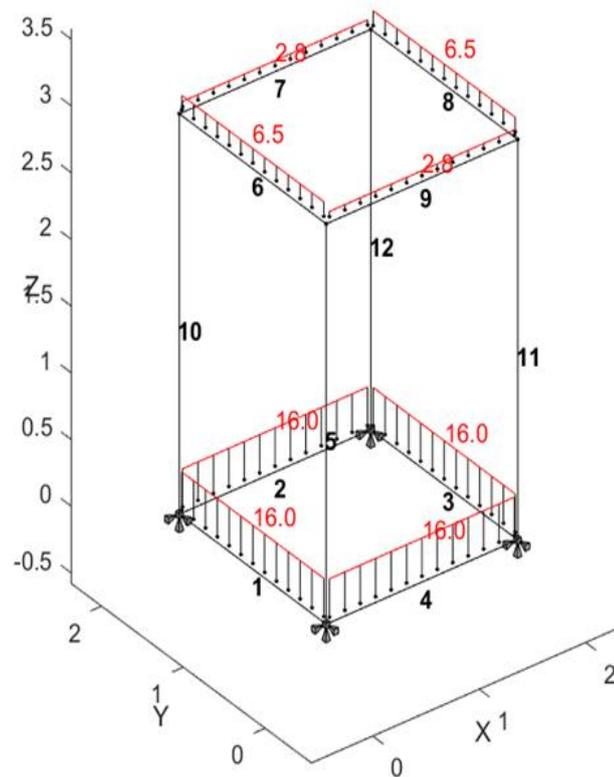
São apresentadas abaixo, no Quadro 11, os resultados dos cálculos obtidos. As Figuras 16 e 17 contém os modelos estruturais tridimensionais gerados pelos *softwares* *LESM*® e *Eberick*®, respectivamente:

Quadro 11 - Cargas solicitantes do modelo de calibração.

Viga	Peso Próprio (kN/m)	Parede (kN/m)	Carregamento (kN/m)	Combinação normal última (kN/m)
101	2	9,44		16,01
102	2	9,44		16,01
103	2	9,44		16,01
104	2	9,44		16,01
201	2		Laje 1 2,66	6,52
202	2		Laje 2 2,66	6,52
203	2			2,80
204	2			2,80

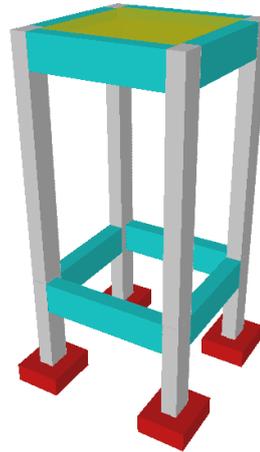
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 16 - Modelagem linear tridimensional do modelo de calibração pelo *LESM*®.



Fonte: Dos autores (2022).

Figura 17 - Modelagem 3D do modelo de calibração pelo Eberick®.



Fonte: Dos autores (2022).

O comparativo entre os esforços axiais obtidos pelo método de cálculo simplificado, pelo método computacional *LESM*® e pelo carregamento máximo (Nd. Máx.) no *Eberick*® por pórtico espacial (PE) e pavimento isolado (PI) estão dispostos resumidamente no Quadro 12:

Quadro 12 - Comparativo dos esforços normais (kN) entre métodos de cálculo.

Pilar	Esforços axiais (kN)			
	Método simplificado	LESM	Eberick (Nd. Máx. em PE)	Eberick (Nd. Máx. em PI)
P1=P2=P3=P4	43,50	43,50	44,30	43,95

Fonte: Dos autores (2022).

Analisando os valores dispostos no Quadro 12 é possível notar que os resultados obtidos pelos três métodos abordados neste trabalho são satisfatórios e similares. O método manual de cálculo simplificado apresentou exatamente o mesmo resultado que o modelo computacional *LESM*®, devido a entrada de dados em ambos *softwares* serem exatamente iguais. Calculando a relação percentual entre o *Eberick*® e o método manual, pode-se concluir uma variação de +1,84% quando em análise de pórtico espacial e +1,03% quando em análise de pavimento isolado. Deste modo, em um sistema simples e sem muitas variáveis, é possível compreender uma convergência entre os três métodos, mesmo apresentando processos de cálculo distintos entre si.

4.3.2 Projeto residencial

Nesta seção do trabalho são apresentados e comparados os resultados dos esforços solicitantes de cálculos do projeto residencial obtidos por meio dos três métodos apresentados. O Quadro 13 apresentam de forma resumida os resultados encontrados dos esforços axiais solicitantes em cada pilar, por pavimento e, também, o seu total, como pode ser visto abaixo:

Quadro 13 - Comparativo dos esforços axiais solicitantes de projeto (kN) entre os três métodos de cálculo (Continua).

Pilar	Pavimento	Método simplificado	Reações (kN)		
			LESM	Eberick (Nd. Máx. em PE)	Eberick (Nd. Máx. em PI)
P1	Baldrame	73,61	82,40	64,87	70,51
	Superior	78,37	102,80	91,82	82,20
	Cobertura	29,80	84,10	62,03	51,07
	Total	181,78	269,30	218,72	203,78
P2	Baldrame	64,01	53,50	58,38	59,63
	Superior	71,93	64,70	67,08	69,04
	Cobertura	74,20	70,20	82,25	72,79
	Total	210,14	188,40	207,71	201,46
P3	Baldrame	91,31	82,60	78,84	81,82
	Superior	116,30	110,20	114,49	109,43
	Cobertura	68,10	57,30	61,70	60,11
	Total	275,71	250,10	255,03	251,36
P4	Baldrame	139,01	147,70	148,51	142,51
	Superior	146,27	142,40	186,23	186,43
	Cobertura	143,00	118,90	131,64	147,50
	Total	428,28	409,00	466,38	476,44
P5	Baldrame	144,71	145,90	62,51	54,43
	Superior	79,18	78,30	98,27	115,87
	Cobertura	83,80	80,30	72,24	72,77
	Total	307,69	304,50	233,02	243,07
P6	Baldrame	51,11	53,90	42,29	51,61
	Superior	40,65	65,70	19,20	9,49
	Cobertura	0,00	0,00	0,00	0,00
	Total	91,76	119,60	61,49	61,10
P7	Baldrame	133,51	135,70	83,10	71,77
	Superior	60,61	62,10	108,22	95,94
	Cobertura	58,80	60,90	62,78	63,52
	Total	252,92	258,70	254,10	231,23
P8	Baldrame	122,81	137,20	127,22	119,97
	Superior	264,63	266,50	236,12	246,01
	Cobertura	83,60	86,30	94,06	92,51
	Total	471,04	490,00	457,40	458,49

Fonte: Dos autores (2022).

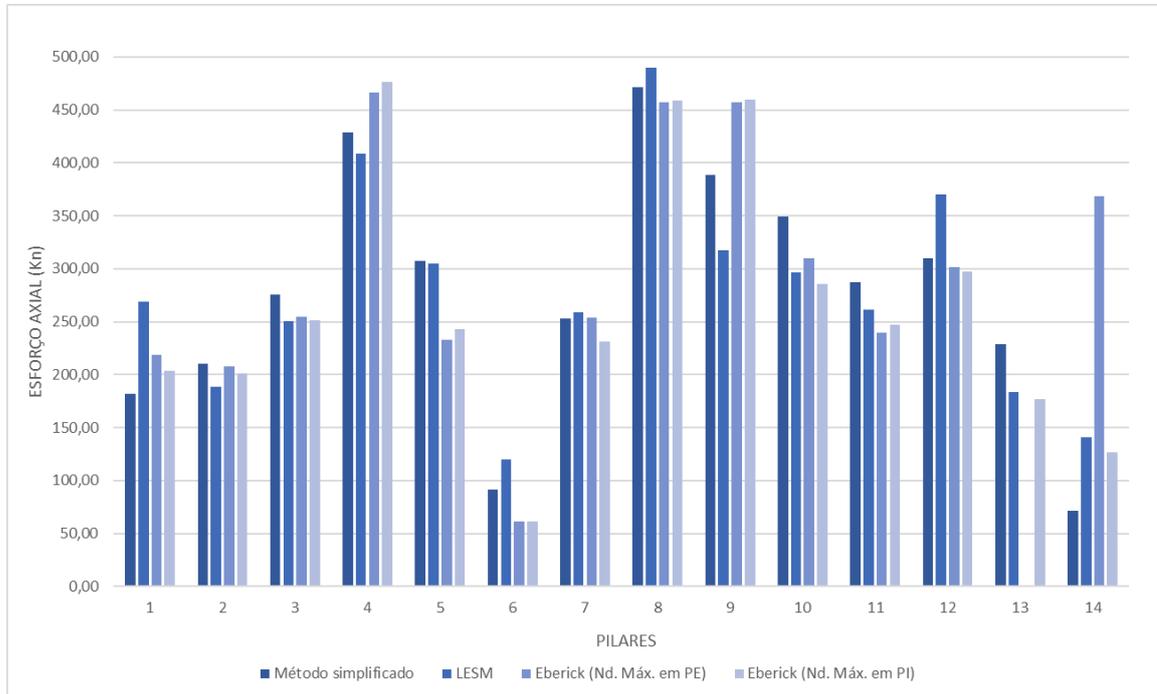
Quadro 13 - Comparativo dos esforços axiais solicitantes de projeto (kN) entre os três métodos de cálculo (Conclusão).

Pilar	Pavimento	Método simplificado	Reações (kN)		
			LESM	Eberick (Nd. Máx. em PE)	Eberick (Nd. Máx. em PI)
P9	Baldrame	79,61	64,20	76,59	77,63
	Superior	202,67	163,10	258,28	257,11
	Cobertura	106,30	89,90	122,20	125,04
	Total	388,58	317,20	457,07	459,78
P10	Baldrame	97,91	97,10	87,01	73,74
	Superior	169,04	138,00	158,71	149,81
	Cobertura	81,90	61,00	64,45	62,10
	Total	348,85	296,10	310,17	285,65
P11	Baldrame	85,31	85,20	74,21	80,00
	Superior	83,91	73,20	73,01	74,32
	Cobertura	118,40	103,30	92,35	92,59
	Total	287,62	261,70	239,57	246,91
P12	Baldrame	65,41	65,60	67,01	61,31
	Superior	169,87	221,90	162,77	165,00
	Cobertura	74,80	82,30	72,05	71,13
	Total	310,08	369,80	301,83	297,44
P13	Baldrame	54,48	53,40	0,00	22,27
	Superior	115,82	69,50	0,00	152,23
	Cobertura	58,80	61,00	0,00	2,78
	Total	229,10	183,90	0,00	177,28
P14	Baldrame	11,58	11,60	6,35	5,12
	Superior	22,37	68,70	166,88	8,84
	Cobertura	37,60	60,90	195,10	112,96
	Total	71,55	141,20	368,33	126,92
Peso por pavimento (kN)	Baldrame	1214,37	1216,00	976,89	972,32
	Superior	1621,62	1627,10	1741,08	1721,72
	Cobertura	1019,10	1016,40	1112,85	1026,87
Peso total (kN)	∑ Pavimentos	3855,10	3859,50	3830,82	3720,91

Fonte: Dos autores (2022).

O Gráfico 1 faz um comparativo dos resultados obtidos nos três métodos de cálculos dos esforços axiais em cada um dos pilares. Por meio deste, se torna possível a análise dos resultados e da divergência entre os mesmos.

Gráfico 1 - Comparativo dos esforços axiais solicitantes de projeto (kN) entre os três métodos de cálculo.

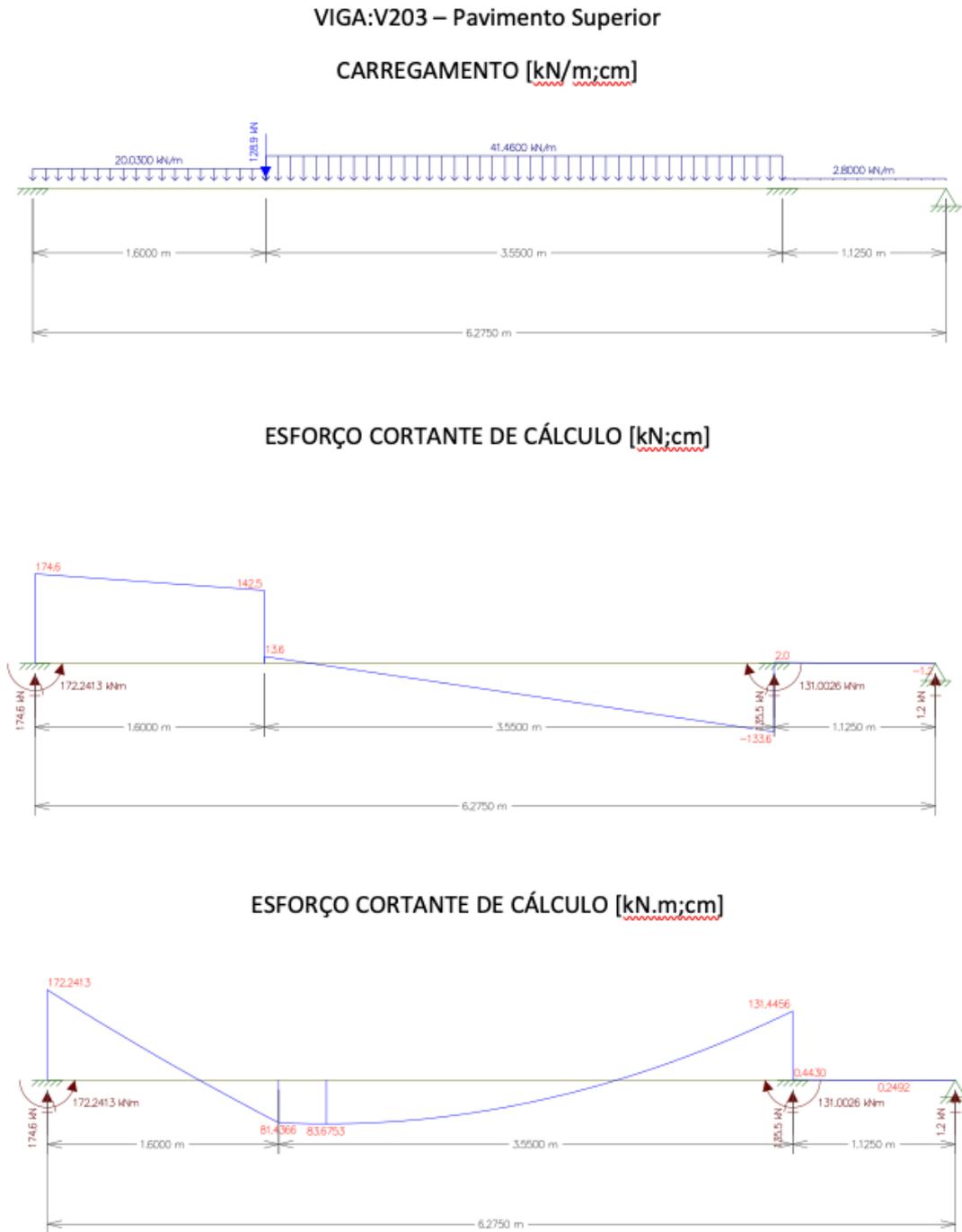


Fonte: Dos autores (2022).

Analisando os valores dispostos no Quadro 13, nota-se inicialmente uma grande proximidade entre os pesos totais da estrutura obtidos através do método simplificado de cálculo, do *software LESM*® e do *software Eberick*®. Este fato se justifica uma vez que os três métodos foram baseados nas mesmas Normas Brasileiras que fornecem os procedimentos a serem adotados e as cargas já padronizadas. Desta forma, fica evidente a importância da padronização das cargas para dimensionamento de projetos estruturais. Para o engenheiro Luigi Nervi (LEET, 1991, citado por KAESTNER, 2021), os projetos surgiram do conhecimento da distribuição das forças e a procura dos meios que expressassem economicamente o modo que elas interagiam entre si, uma vez que elas não são calculadas, mas sim projetadas.

Embora os pesos totais da estrutura obtidos pelos três métodos se mostrem similares, a distribuição das cargas e a reação de apoio das mesmas já não apresentaram tal similaridade. Para contextualização e melhor compreensão, a Figura 18 representa o carregamento, o diagrama de esforço cortante e o diagrama de momento fletor da viga 203, obtidos no *software Ftool*®:

Figura 18 - Análise estática da viga 203 gerada pelo Ftool®.



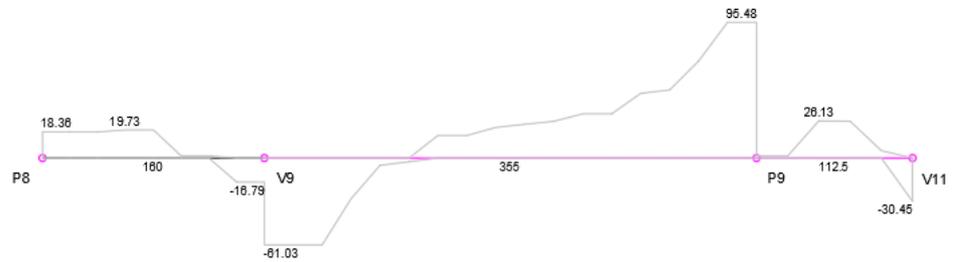
Fonte: Dos autores (2022).

Para complementar a comparação dos valores apresentados, abaixo segue a Figura 19 obtida do processamento do *Eberick*® que, também, representa o carregamento, o diagrama de esforço cortante e o diagrama de momento fletor da viga 203:

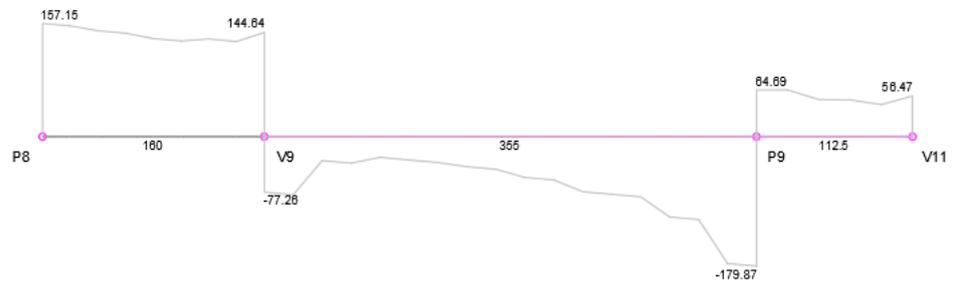
Figura 19 - Análise estática da viga 203 gerada pelo Eberick® por PE.

VIGA: V203 - Pavimento superior

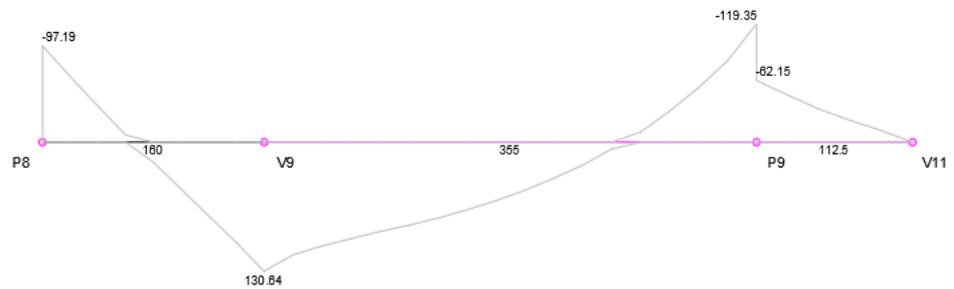
CARREGAMENTO [kN/m;cm]



ESFORÇOS CORTANTES DE CÁLCULO (V_{dx}) [kN;cm]



MOMENTOS FLETORES DE CÁLCULO (M_{dx}) [kN.m;cm]



Fonte: Dos autores (2022).

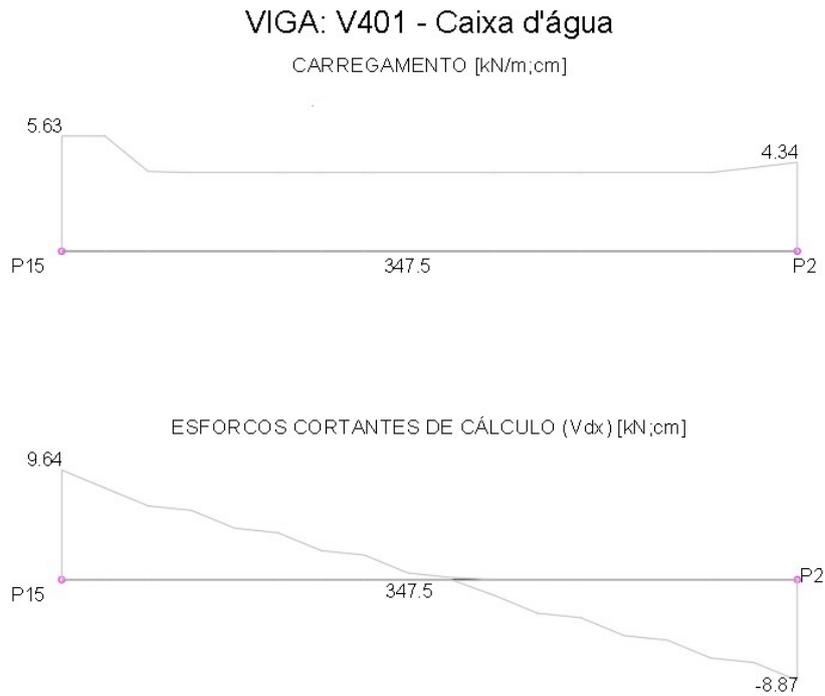
Um importante ponto a se destacar são as principais ações que estão influenciando em ambos carregamentos e que causam esta visível diferença:

- O trecho do P8 até a V9, além das cargas de peso próprio da viga e parede, apresenta o carregamento uma laje maciça armada em 2 direções;
- Do V9 até o P9, além do peso próprio da viga e do peso da parede, apresenta o carregamento de 2 lajes maciças (L3 e L5) engastadas entre si e armadas em 2 direções;
- Do P9 até a V11 apresenta somente o peso próprio da viga.

No que se refere aos 2 carregamentos apresentados acima, apesar de ambos seguirem um padrão parecido, é notável que houve uma diferença significativa quanto à magnitude e sua distribuição. O carregamento feito pelo método simplificado gera carregamentos uniformes e, contudo, mais distante de um modelo mais próximo da realidade, enquanto o carregamento gerado pelo *Eberick*® já apresenta irregularidades na curva do carregamento diferentemente do que foi observado no método simplificado. Pode-se afirmar que esta diferença se dá pelo método de processamento do *Eberick*® que, como já dito anteriormente, analisa as lajes e as vigas como uma estrutura única através de um sistema de grelha. Como resultado destes carregamentos, nas Figuras 18 e 19 é possível observar como a análise foi reproduzida no diagrama de esforço cortante do *Ftool*® e do *Eberick*® e que ambas, apresentam curvas que seguem um padrão parecido, mas com resultados ainda díspares no que se refere a magnitude e sentido do esforço cortante. Por fim, pode-se compreender como cada modelo influencia diretamente no cálculo do esforço axial solicitante, como a reação de apoio no P8 (174,6 kN obtidos via análise pelo *Ftool*® e 157,15 kN obtidos via análise pelo *Eberick*®) e no P9 (135,5 kN obtidos via análise pelo *Ftool*® e 244,56 kN obtidos via análise pelo no *Eberick*®).

Analisando o comportamento das vigas na laje L1 da caixa d'água por meio dos *softwares* é possível encontrar um ponto interessante. Nas vigas 401 e 402, pelo método simplificado, foi calculada uma distribuição linear e uniforme de 5,95 kN/m, como apresentado no Quadro 9 e ao comparar este dado com os resultados encontrados no *Eberick*® em pórtico espacial pode-se observar a diferença entre os métodos de análise estática. As Figuras 20 e 21 apresentam o carregamento e o esforço cortante gerado pelo *Eberick*® em pórtico espacial nas vigas 401 e 402 respectivamente.

Figura 20 - Análise estática da viga 401 pelo software Eberick® em análise por PE.



Fonte: Dos autores (2022).

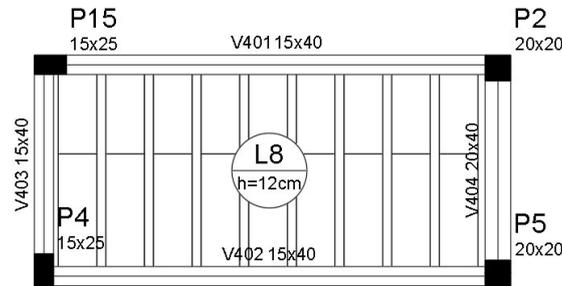
Figura 21 – Análise estática da viga 402 pelo software Eberick® em análise por PE.



Fonte: Dos autores (2022).

Através das imagens representadas acima, fica evidente como o método das grelhas atua diferentemente do método das charneiras plásticas. Na viga 401, diferentemente da viga 402, há presença de um pilar retangular com seu maior eixo paralelo ao sentido da viga, como pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 - Planta de forma da estrutura do pavimento caixa d'água.



FORMA DO PAVIMENTO DA CAIXA D'ÁGUA

Fonte: Dos autores (2022).

Desta forma, como citado anteriormente, o método das grelhas faz com que os esforços solicitantes migrem para as regiões da laje que apresentam maior rigidez, e por isso, observa-se a diferença entre as vigas 401 e 402. No método das charneiras plásticas por sua vez, apenas é levado em conta a área das lajes e as suas condições de bordo, e assim, é obtido um carregamento uniforme durante todo o bordo da laje.

Paralelamente, outro ponto importante observado são os resultados dos diferentes processos de análise estática em relação aos pilares 13 e 14. A análise feita para o método simplificado analisou as barras individualmente obtendo uma solicitação maior sobre o P13 em relação aos outros métodos; O modelo computacional *LESM*®, que faz sua análise por pórtico espacial, gerou uma melhor distribuição dos esforços axiais sobre o P14 e o P13; o *Eberick*®, em análise por pórtico espacial, concentrou todas suas cargas no P14, zerando absolutamente qualquer carga incidente no P13 e, em análise por pavimento isolado, apresentou uma concentração de cargas maior no P13 no pavimento superior e no P14 no pavimento cobertura. Quando analisados ambos os pilares simultaneamente, independente da distribuição de carga gerada, os somatórios das cargas axiais solicitantes nos pilares P13 e P14 se apresentaram mais convergentes em todos os métodos, como é apresentado no Quadro 14. Perante o exposto, nota-se que a divergência dos dados se dá devido ao modelo e ao processo de cálculo de cada método e a análise estática que o mesmo realiza.

Quadro 14 - Comparativo do somatório dos esforços axiais entre o P13 e P14.

Pilar	Pavimento	Método simplificado	Reações (kN)		
			LESM	Eberick (Nd. Máx. em PE)	Eberick (Nd. Máx. em PI)
P13	Baldrame	54,48	53,40	0,00	22,27
	Superior	115,82	69,50	0,00	152,23
	Cobertura	58,80	61,00	0,00	2,78
	Total	229,10	183,90	0,00	177,28
P14	Baldrame	11,58	11,60	6,35	5,12
	Superior	22,37	68,70	166,88	8,84
	Cobertura	37,60	60,90	195,10	112,96
	Total	71,55	141,20	368,33	126,92
P13 + P14	Baldrame	66,05	65,00	6,35	27,39
	Superior	138,19	138,20	166,88	161,07
	Cobertura	96,40	121,90	195,10	115,74
	Total	300,64	325,10	368,33	304,20

Fonte: Dos autores (2022).

De maneira a continuar com os comparativos apresentados no Quadro 13, foi construído o Quadro 15 que contém a relação percentual dos esforços solicitantes encontrados pelos modelos computacionais em relação ao método manual. A cor verde representa as variações positivas, vermelha representa as variações negativas e as intensidades das cores são proporcionais à magnitude de suas variações.

Quadro 15 - Comparativo percentual dos esforços axiais solicitantes em relação ao método simplificado (Continua).

Pilar	Pavimento	Método simplificado	Reações (kN)					
			LESM		Eberick (Nd. Máx. em PE)		Eberick (Nd. Máx. em PI)	
P1	Baldrame	73,61	82,40	▲ 11,94%	64,87	▼ -11,87%	70,51	▼ -4,21%
	Superior	78,37	102,80	▲ 31,17%	91,82	▲ 17,16%	82,20	▲ 4,89%
	Cobertura	29,80	84,10	▲ 182,21%	62,03	▲ 108,15%	51,07	▲ 71,38%
	Total	181,78	269,30	▲ 48,15%	218,72	▲ 20,32%	203,78	▲ 12,10%
P2	Baldrame	64,01	53,50	▼ -16,42%	58,38	▼ -8,80%	59,63	▼ -6,84%
	Superior	71,93	64,70	▼ -10,05%	67,08	▼ -6,74%	69,04	▼ -4,02%
	Cobertura	74,20	70,20	▼ -5,39%	82,25	▲ 10,85%	72,79	▼ -1,90%
	Total	210,14	188,40	▼ -10,35%	207,71	▼ -1,16%	201,46	▼ -4,13%
P3	Baldrame	91,31	82,60	▼ -9,54%	78,84	▼ -13,66%	81,82	▼ -10,39%
	Superior	116,30	110,20	▼ -5,25%	114,49	▼ -1,56%	109,43	▼ -5,91%
	Cobertura	68,10	57,30	▼ -15,86%	61,70	▼ -9,40%	60,11	▼ -11,73%
	Total	275,71	250,10	▼ -9,29%	255,03	▼ -7,50%	251,36	▼ -8,83%
P4	Baldrame	139,01	147,70	▲ 6,25%	148,51	▲ 6,83%	142,51	▲ 2,52%
	Superior	146,27	142,40	▼ -2,65%	186,23	▲ 27,32%	186,43	▲ 27,45%
	Cobertura	143,00	118,90	▼ -16,85%	131,64	▼ -7,94%	147,50	▲ 3,15%
	Total	428,28	409,00	▼ -4,50%	466,38	▲ 8,89%	476,44	▲ 11,24%
P5	Baldrame	144,71	145,90	▲ 0,82%	62,51	▼ -56,80%	54,43	▼ -62,39%
	Superior	79,18	78,30	▼ -1,11%	98,27	▲ 24,11%	115,87	▲ 46,34%
	Cobertura	83,80	80,30	▼ -4,18%	72,24	▼ -13,79%	72,77	▼ -13,16%
	Total	307,69	304,50	▼ -1,04%	233,02	▼ -24,27%	243,07	▼ -21,00%
P6	Baldrame	51,11	53,90	▲ 5,46%	42,29	▼ -17,26%	51,61	▲ 0,98%
	Superior	40,65	65,70	▲ 61,62%	19,20	▼ -52,77%	9,49	▼ -76,65%
	Cobertura	0,00	0,00	▲ 0,00%	0,00	▲ 0,00%	0,00	▲ 0,00%
	Total	91,76	119,60	▲ 30,34%	61,49	▼ -32,99%	61,10	▼ -33,41%
P7	Baldrame	133,51	135,70	▲ 1,64%	83,10	▼ -37,76%	71,77	▼ -46,24%
	Superior	60,61	62,10	▲ 2,46%	108,22	▲ 78,55%	95,94	▲ 58,29%
	Cobertura	58,80	60,90	▲ 3,57%	62,78	▲ 6,77%	63,52	▲ 8,03%
	Total	252,92	258,70	▲ 2,29%	254,10	▲ 0,47%	231,23	▼ -8,58%
P8	Baldrame	122,81	137,20	▲ 11,72%	127,22	▲ 3,59%	119,97	▼ -2,31%
	Superior	264,63	266,50	▲ 0,71%	236,12	▼ -10,77%	246,01	▼ -7,04%
	Cobertura	83,60	86,30	▲ 3,23%	94,06	▲ 12,51%	92,51	▲ 10,66%
	Total	471,04	490,00	▲ 4,03%	457,40	▼ -2,90%	458,49	▼ -2,66%

Fonte: Dos autores (2022).

Quadro 15- Comparativo percentual dos esforços axiais solicitantes em relação ao método simplificado (Conclusão).

Pilar	Pavimento	Método simplificado	Reações (kN)					
			LESM		Eberick (Nd. Máx. em PE)		Eberick (Nd. Máx. em PI)	
P9	Baldrame	79,61	64,20	▼ -19,36%	76,59	▼ -3,79%	77,63	▼ -2,49%
	Superior	202,67	163,10	▼ -19,52%	258,28	▲ 27,44%	257,11	▲ 26,86%
	Cobertura	106,30	89,90	▼ -15,43%	122,20	▲ 14,96%	125,04	▲ 17,63%
	Total	388,58	317,20	▼ -18,37%	457,07	▲ 17,63%	459,78	▲ 18,32%
P10	Baldrame	97,91	97,10	▼ -0,83%	87,01	▼ -11,13%	73,74	▼ -24,69%
	Superior	169,04	138,00	▼ -18,36%	158,71	▼ -6,11%	149,81	▼ -11,38%
	Cobertura	81,90	61,00	▼ -25,52%	64,45	▼ -21,31%	62,10	▼ -24,18%
	Total	348,85	296,10	▼ -15,12%	310,17	▼ -11,09%	285,65	▼ -18,12%
P11	Baldrame	85,31	85,20	▼ -0,13%	74,21	▼ -13,01%	80,00	▼ -6,22%
	Superior	83,91	73,20	▼ -12,76%	73,01	▼ -12,99%	74,32	▼ -11,43%
	Cobertura	118,40	103,30	▼ -12,75%	92,35	▼ -22,00%	92,59	▼ -21,80%
	Total	287,62	261,70	▼ -9,01%	239,57	▼ -16,71%	246,91	▼ -14,15%
P12	Baldrame	65,41	65,60	▲ 0,29%	67,01	▲ 2,45%	61,31	▼ -6,27%
	Superior	169,87	221,90	▲ 30,63%	162,77	▼ -4,18%	165,00	▼ -2,87%
	Cobertura	74,80	82,30	▲ 10,03%	72,05	▼ -3,68%	71,13	▼ -4,91%
	Total	310,08	369,80	▲ 19,26%	301,83	▼ -2,66%	297,44	▼ -4,08%
P13	Baldrame	54,48	53,40	▼ -1,98%	0,00	▼ -100,00%	22,27	▼ -59,12%
	Superior	115,82	69,50	▼ -39,99%	0,00	▼ -100,00%	152,23	▲ 31,44%
	Cobertura	58,80	61,00	▲ 3,74%	0,00	▼ -100,00%	2,78	▼ -95,27%
	Total	229,10	183,90	▼ -19,73%	0,00	▼ -100,00%	177,28	▼ -22,62%
P14	Baldrame	11,58	11,60	▲ 0,21%	6,35	▼ -45,15%	5,12	▼ -55,77%
	Superior	22,37	68,70	▲ 207,11%	166,88	▲ 646,00%	8,84	▼ -60,48%
	Cobertura	37,60	60,90	▲ 61,97%	195,10	▲ 418,88%	112,96	▲ 200,43%
	Total	71,55	141,20	▲ 97,35%	368,33	▲ 414,81%	126,92	▲ 77,40%
Peso por pavimento (kN)	Baldrame	1214,37	1216,00	▲ 0,13%	976,89	▼ -19,56%	972,32	▼ -19,93%
	Superior	1621,62	1627,10	▲ 0,34%	1741,08	▲ 7,37%	1721,72	▲ 6,17%
	Cobertura	1019,10	1016,40	▼ -0,26%	1112,85	▲ 9,20%	1026,87	▲ 0,76%
Peso total (kN)	∑ Pavimentos	3855,10	3859,50	▲ 0,11%	3830,82	▼ -0,63%	3720,91	▼ -3,48%

Fonte: dos Autores (2022).

Além disso, após a obtenção de todas as cargas axiais solicitantes nos pilares do presente estudo, foi feita uma análise estatística para comparativo geral dos resultados alcançados. Este comparativo foi realizado por meio do *software Sisvar*®, efetuando a análise de variância em conjunto com o auxílio do Teste de Tukey. A Figura 23 apresenta o relatório dos resultados da ANOVA e do Teste de Tukey obtidos pelo *Sisvar*®.

Figura 23 - Resultados da ANOVA e do Teste de Tukey obtidos pelo *Sisvar*®.

```

-----
Variável analisada: Carga axial
Opção de transformação: Variável sem transformação ( Y )
-----

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

-----
FV                GL                SQ                QM                Fc  Pr>Fc
-----
Metodos           3                904.451163        301.483721        0.021 0.9965
erro              52              754655.610236    14512.607889
-----
Total corrigido   55              755560.061398
-----
CV (%) =          44.19
Média geral:     272.6148214      Número de observações: 56
-----

Teste Tukey para a FV Metodos

-----

DMS: 120,88464244265  NMS: 0,05
-----

Média harmonica do número de repetições (r): 14
Erro padrão: 32,196503680134
-----

Tratamentos                Médias                Resultados do teste
-----
EBERICK PI                 265.786429 a1
EBERICK PE                 273.630000 a1
Manual                     275.364286 a1
LESM                       275.678571 a1
-----

```

Fonte: Dos autores (2022).

De acordo com o Teste de Tukey, foi possível observar a média entre as 14 amostras em cada um dos três métodos de cálculo. Mesmo que numericamente elas não sejam iguais entre si, através da Análise de Variância, foi calculado o *valor-p* de 0,9956, ao qual, conclui-se que há 99,56% de probabilidade da hipótese H_0 ser verdadeira, ou seja, a média dos esforços axiais solicitantes dos três modelos utilizados serem iguais. Esta afirmação se justifica, uma vez que, estatisticamente, é natural grupos de amostras diferentes apresentarem divergências entre si como foi possível observar o coeficiente de variância gerado (CV) de 44,19%. Sendo assim, estatisticamente, as quatro médias encontradas possuem 99,56% de probabilidade de serem similares.

Conjuntamente, foi realizado um comparativo percentual do método manual de cálculo em relação aos outros três métodos de cálculo utilizados no estudo. Por meio dos resultados totais de cada um dos 14 pilares, obtidos no Quadros 15, foi realizado a média de suas diferenças percentuais, como são abordados no Quadro 16.

Quadro 16 - Quadro comparativo das médias das diferenças percentuais dos dois métodos cálculo com o manual.

LESM	Eberick (Nd. Máx. em PE)	Eberick (Nd. Máx. em PI)
20,63%	47,24%	18,33%

Fonte: Dos autores (2022).

Conforme os resultados apresentados nos Quadros 15 e 16, apesar do peso total da estrutura obtido nos dois métodos divergirem somente 0,11%, a média das divergências dos esforços axiais dentre todos os 14 pilares no *LESM*® é de 20,63% em relação ao método simplificado. Deste modo, se torna visível a diferença do caminho que as cargas percorrem já que elas partilham de semelhança somente o método de cálculo das cargas lineares, e não de suas análises estáticas. Assim, fica claro a diferença entre a análise estática de elementos lineares de forma individual e a análise estática por pórtico espacial.

Os resultados gerados via *software Eberick*® apresentam maior divergência quando se comparado aos outros dois processos de cálculo. De acordo com os dados apresentados nos Quadros comparativos 13 e 15 é perceptível essa disparidade nos resultados, podendo ser observado que o *Eberick*® (quando analisado em pórtico espacial) apresenta o peso total máximo da estrutura bem próximo aos outros modelos, se divergindo ligeiramente em -0,63% em relação ao método simplificado e -0,74% em relação ao *LESM*®. Já o *Eberick*® quando analisado em pavimento isolado apresenta uma diferença maior quando comparado aos outros processos, apresentando uma divergência de -3,48% em relação ao método simplificado e -3,59% ao *LESM*®.

Mesmo que seja relativamente baixa essa diferença entre o peso total da estrutura, tal diferença pode ser compreendida pelo fato de não partilhar exatamente o mesmo processo de cálculo das cargas lineares ao qual os outros dois modelos apresentam em comum. Ainda que apresente sua base referenciada às NBR's citadas, assim como os outros modelos, o *Eberick*® não trabalha exclusivamente com elementos lineares ao longo de toda sua operação. Logo, pode

apresentar, mesmo que relativamente baixo, uma diferença nos vãos efetivos das lajes e das vigas que, por sua vez, alterariam o valor final das cargas, já que elas são diretamente ligadas. Isto pode ser compreendido na Equação 6, que relaciona o peso específico e o volume do elemento estrutural.

É imprescindível ressaltar que o *Eberick*® utiliza outras combinações, processos e metodologias de cálculo estático, ao qual considera que as vigas são deformáveis e analisa as lajes e vigas como um sistema único através do sistema de grelha. Apesar de apresentar uma disparidade pouco significativa no peso total da estrutura comparado aos outros dois métodos de cálculo estático, o *Eberick*® em pórtico espacial apresenta uma média das magnitudes das divergências entre os esforços axiais máximos de todos os pilares de 47,24% em relação ao método simplificado, enquanto o *LESM*® apresenta 20,63% como citado anteriormente. No entanto, um dado interessante a ser apresentado é que embora o *Eberick*® em pavimento isolado apresente uma disparidade maior no peso total da estrutura, ele contém ao mesmo tempo a menor média das magnitudes das divergência entre os esforços axiais máximos de todos os pilares de 18,33%. Considerando os resultados das médias das disparidades apresentados, fica evidente a influência do processo e metodologia de análise de uma estrutura. Quando se comparado ao método simplificado, que analisa os elementos lineares individualmente e realiza seus cálculos pelo método das charneiras plásticas, a utilização do método das grelhas em pavimento isolado (18,33%) ou a utilização das charneiras plásticas em pórtico espacial (20,63%) já apresentam uma diferença notável no caminho das cargas até a fundação. Entretanto, se compararmos o método simplificado em relação à uma aplicação do método das grelhas em pórtico espacial encontra-se uma diferença significativa (47,24%) nos resultados dos esforços axiais mesmo que apresente o peso total da estrutura relativamente similares.

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados, nota-se que os pesos totais da estrutura obtidos pelos três métodos mostraram variações quase desprezíveis. Essas similaridades são consequência da padronização dos pesos específicos dos materiais de construção, uma vez que os projetos surgiram da procura dos meios que expressassem economicamente o modo que as cargas interagiam entre si, uma vez que elas não são calculadas, mas sim projetadas. Contudo, apesar da equivalência encontrada no peso total da estrutura, a distribuição dessas cargas sobre os elementos estruturais se mostrou relativamente díspares, uma vez que cada um dos três métodos utilizou de processos e modelos de cálculos diferentes.

De modo geral, o cálculo em pórtico espacial e a análise em grelhas demonstraram ser capazes de produzir resultados mais próximos à condição real da obra, dado que estes, analisam os elementos estruturais de forma conjunta. Enquanto o pavimento isolado, juntamente com a análise pelo método das charneiras plásticas, se mostrou coerente, mas ao mesmo tempo limitado por analisar os elementos de forma individual. Vale salientar que, a divergência observada no caminho das cargas não se aplica somente para obras de grande porte, além de que, tais variações podem sobrecarregar a estrutura, uma vez que elas não foram previstas.

Pode-se concluir então que, o atual estudo cumpriu com o seu propósito inicial, ao qual foi realizado a comparação e a validação entre processos de cálculos distintos. Ademais, o estudo demonstrou a eficiência dos *softwares* no que se refere à análise estática, pois, estatisticamente, os modelos adotados se apresentaram similares.

REFERÊNCIAS

- ALVA, G. M. S. **Concepção estrutural de edifícios em concreto armado**. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007. 24 p. Disponível em: <https://docplayer.com.br/2211195-Concepcao-estrutural-de-edificios-em-concreto-armado.html>. Acesso em: 26 jul. 2022.
- ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- BASTOS, P. S. S. **Lajes de concreto**. 2117 - Estruturas de concreto I. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015. 113 p. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Lajes.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2022.
- CAMPOS FILHO, A. **Projeto de lajes maciça de concreto armado**. 43 p. 2014. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado – Segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.
- DICAS DE ARQUITETURA. **Dicas de construção, dicas de decoração. Os diferentes tipos de escadas**. 2018. <https://dicasdearquitetura.com.br/os-diferentes-modelos-de-escadas/>. Acesso em: 06 jul. 2022.
- DORTAS, I. S. **Análise comparativa do dimensionamento estrutural de um edifício por meio de um software computacional e cálculo manual**. Universidade Tiradentes, Aracaju, 2016.
- FRANÇA, R. L. S. *et al.* **ES-013 - Exemplo de um projeto completo de um edifício de concreto armado**. São Paulo, 2001. 301 p. Disponível em: <http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/14280/material/ES-013%20-%20Exemplo%20de%20C%C3%A1lculo%20Completo%20Edificio.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2022.

GONZALES, R. L. M. **Análise de laje pela teoria das charneiras plásticas e comparação de custos entre lajes maciças e lajes treliçadas.** 1997. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

GRANJA, J. *et al.* BIM na pormenorização de estruturas de betão armado pré-esforçado. *In: CONGRESSO PORTUGUÊS DE BUILDING INFORMATION MODELLING, 2., 2018, Lisboa. Anais eletrônicos [...].* Lisboa, 2018. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/58484/1/%5B60%5D.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2022.

ITAIPU LAJES E ESTRUTURAS PRÉ-MOLDADAS. **Tabelas - Lajes e Estruturas pré-moldadas.** 2022. <https://www.lajesitaipu.com.br/tabelas/>. Acesso em: 17 mar. 2022.

KAESTNER, C. M. **Os projetos elaborados com o AltoQi Eberick são superdimensionados?** QiSuporte, 2021. Disponível em: <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/360034164414-Os-projetos-elaborados-com-o-AltoQi-Eberick-s%C3%A3o-superdimensionados->. Acesso em: 02 ago. 2022.

KIMURA, A. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado:** cálculo de edifícios com o uso de sistemas computacionais. São Paulo: PINI, 2007.

KIRSTEN, A. **Comparativo entre os modelos “Pórtico espacial” e “Pavimentos isolados” na análise de estruturas.** Suporte On-line AltoQi, 2016. Disponível em: <https://faq.altoqi.com.br/content/243/1637/pt-br/comparativo-entre-os-modelos-%E2%80%9Cp%C3%B3rtico-espacial%E2%80%9D-e-%E2%80%9Cpavimentos-isolados%E2%80%9D-na-an%C3%A1lise-de-estruturas.html#:~:text=O%20modelo%20de%20Pavimentos%20isolados,da%20estabilidade%20global%20da%20edifica%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 03 jul. 2022.

LEET, K. **Reinforced concret design.** New York: McGraw - Hill, 1991.

NERVO, R. **Análise comparativa dos sistemas estruturais de lajes convencionais e lajes nervuradas.** 2012. 77 p. Trabalho de Conclusão (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2012.

OLIVEIRA, Bruno. **Teste de Tukey para comparações múltiplas.** Statplace, 2022. Disponível em: <https://statplace.com.br/blog/comparacoes-multiplas-teste-de-tukey/#:~:text=O%20Teste%20de%20Tukey%20consiste,o%20tamanho%20amostral%20dos%20grupos>. Acesso em: 16 ago. 2022.

PEREIRA, R. S. **Comparativo de métodos de cálculo estrutural para lajes de concreto:** elementos finitos e método simplificado. 2021. 65 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Estruturas de concreto.** São Paulo, 2003. cap 4, 7 p. Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/14514300/projeto-de-lajes-macicas-de-concreto-armado-chasqueweb-ufrgs>. Acesso em: 27 jun. 2022.

RIBEIRO, C. **Eberick**: saiba tudo sobre o uso do *software* na Engenharia. Engenharia 360, 2020. Disponível em: <https://engenharia360.com/eberick-saiba-tudo-sobre-o-uso-do-software-na-engenharia/>. Acesso em: 03 jul. 2022.

SANTOS JÚNIOR, I. R. **Análise comparativa do dimensionamento de lajes maciças por meio de um *software* computacional e alguns métodos simplificados**. Faculdade Pio Décimo, Aracaju, 2016.

SANTOS, R. T. F. dos; OLIVEIRA, M. M. O uso de *softwares* na construção civil. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7., 2012, Palmas. **Anais eletrônicos [...]**. Palmas, 2012. Disponível em: <https://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/viewFile/3349/2939>. Acesso em: 10 jul. 2022.

SILVA, S. M. B. **A integração de técnicas BIM nos elementos de projeto de aplicação de sistemas de pré-esforço**. 2015. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga, 2015.

SOUZA, F. R. V. **Implementação computacional do método da rigidez para análise de sistemas estruturais planos**. 2017. 59 p. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SOUZA, M. F. S. M. de; RODRIGUES, R. B. **Sistemas estruturais de edificações e exemplos**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. 93 p. Disponível em: http://www.fec.unicamp.br/~nilson/apostilas/sistemas_estruturais_grad.pdf. Acesso em: 31 maio 2022.

TIBCO. **O que é Análise de Variância (ANOVA)?**. TIBCO Software, 2022. Disponível em: <https://www.tibco.com/pt-br/reference-center/what-is-analysis-of-variance-anova>. Acesso em: 16 ago. 2022.

TQSDOCS. **Pórtico Espacial**. 2022. Disponível em: <https://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3150&language=pt-BR>. Acesso em: 16 jul. 2022.

VIRGOLINO, P. M.; PELLEGRINO NETO, J. **Desenvolvimento de aplicativos para o ensino de estruturas de concreto**. 2015. 10 p. Disponível em: <http://maua.br/files/032015/desenvolvimento-de-aplicativos-para-o-ensino-de-estruturas-de-concreto.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2022.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Memorial de cálculo para reação de apoio

EXEMPLO DE CÁLCULO PILAR 5 (VIGA 114)

O roteiro abaixo exemplifica os cálculos realizados para a determinação do esforço axial no pilar P5. A demonstração dos cálculos secundários foi feita para a viga V114.

1. Interferência dos lances no patamar.

a. Peso próprio da escada:

$$E = h + \frac{e}{2} = 0,15 + \frac{0,18}{2} = 0,24m$$

$$P_{esc} = E \cdot \gamma = 0,24 \cdot 25 = 6,00kN/m^2$$

b. Peso próprio do revestimento:

Como apresentado anteriormente, o peso próprio do revestimento foi estabelecido de acordo com a norma 6120, logo:

$$g_{rev} = 1,00kN/m^2$$

c. Sobrecarga de utilização:

De acordo com a norma 6120:

$$g_{reg} = 2,50kN/m^2$$

d. Lançamento da carga no *Ftool*®:

Antes de lançar as cargas na estrutura e obter as resultantes que irão influenciar no patamar, é necessário soma-las e realizar a combinação última normal:

$$g_{total} = 1,40 \cdot (6,00 + 1,00 + 2,50) = 13,30kN/m^2$$

É importante ressaltar que o *Ftool*® é um programa que opera em apenas 2 dimensões (X e Y), logo, o carregamento encontrado em kN/m^2 deve ser considerado como kN/m para lançamento no *software*. Do mesmo modo, as cargas resultantes obtidas no *software* em kN devem ser consideradas posteriormente como kN/m . As Figuras 13 e 14 encontradas no Apêndice B apresentam a estrutura linear construída no *Ftool*® bem como seu carregamento e reações de apoio.

$$g_{lance} = 18,40kN/m$$

2. Distribuição de cargas no patamar.

a. Peso próprio:

$$Pp_{pat} = h \cdot \gamma = 0,15 \cdot 25 = 3,75kN/m^2$$

b. Peso próprio do revestimento:

Como apresentado anteriormente, o peso próprio do revestimento foi estabelecido de acordo com a norma 6120, logo:

$$g_{rev} = 1,00kN/m^2$$

c. Sobrecarga de utilização:

De acordo com a norma 6120:

$$g_{reg} = 2,50kN/m^2$$

d. Combinação última normal:

Somando todos os valores e majorando através da combinação, chega-se a:

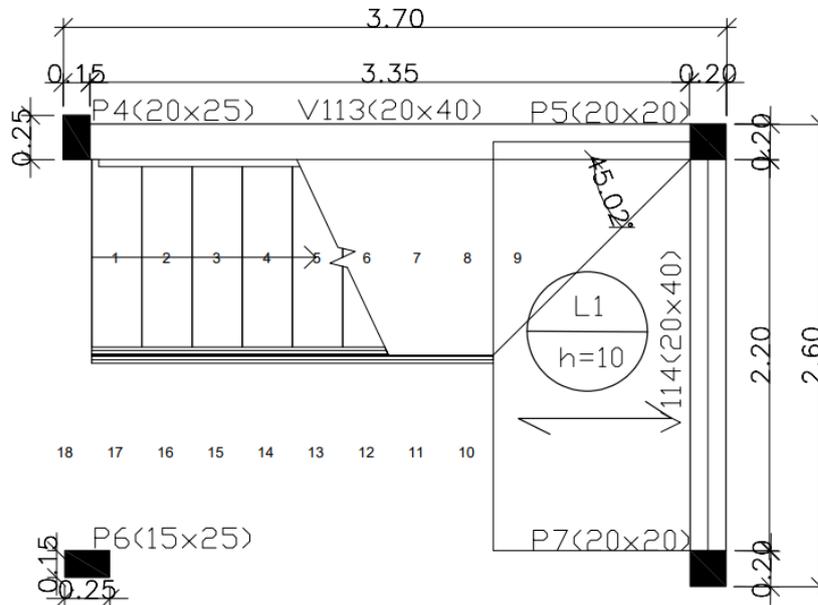
$$g_{total,pat} = 1,40 \cdot (3,75 + 1,00 + 2,50) = 10,15kN/m^2$$

3. Análise do pavimento.

a. Área da charneira e comprimento efetivo:

A laje em estudo se trata do patamar da escada da residência e, por ser maciça, passará pelos mesmos processos de cálculo das lajes do pavimento superior.

Figura 1 - Detalhamento estrutural do patamar da escada.



Fonte: Dos autores (2022).

A partir da Figura 1, é possível determinar os valores de área e comprimento total da laje do patamar.

$$l_{total} = 2,20m$$

$$A_{total} = 2,419m^2$$

Analisando a charneira que irá influenciar na viga em estudo, encontram-se o comprimento efetivo e área da mesma.

$$l_{efetivo-V114} = 2,30m$$

$$A_{charneira-V114} = 2,039m^2$$

4. Carga distribuída na viga.

a. Influência da escada:

Neste momento, será realizado o método das charneiras plásticas e, a partir do resultado, soma-se com a carga encontrada referente ao patamar.

$$g_{escada} = (g_{total}) \cdot \left(\frac{A_{charneira}}{l_{efetivo}} \right)$$

$$g_{escada} = \left(g_{total,pat} + \frac{g_{lance} \cdot l_{total}}{A_{total}} \right) \cdot \left(\frac{A_{charneira-V114}}{l_{efetivo-V114}} \right)$$

$$g_{escada} = \left(10,15 + \frac{18,40 \cdot 2,20}{2,419} \right) \cdot \left(\frac{2,039}{2,30} \right) = 23,833 \text{ kN/m}$$

b. Peso próprio da viga:

Considerando que a viga V114 tem seção 20x40 cm, é possível determinar seu peso próprio.

$$g_{viga} = (0,20 \cdot 0,40 \cdot 25) \cdot 1,4 = 2,80 \text{ kN/m}$$

c. Peso próprio das paredes:

Considerando que são necessários 20 tijolos 24x19x9 cm para construir 1 m² de parede, a equação abaixo representa a carga de parede por m².

$$g_{bloco} = [V_{bloco} \cdot \gamma_{bloco}] \cdot N^{\circ}_{blocos \text{ por } m^2}$$

$$g_{bloco} = [(0,09 \cdot 0,19 \cdot 0,24) \cdot 13] \cdot 20 = 1,067$$

Deve levar em conta também as juntas verticais e horizontais com 10 mm de espessura e também o reboco e chapisco das em cada face.

$$G_{junta \text{ horizontal}} = [V_{junta} \cdot \gamma_{argamassa}] \cdot N^{\circ}_{juntas \text{ por } m^2}$$

$$G_{junta \text{ horizontal}} = [(0,09 \cdot 1 \cdot 0,01) \cdot 19] \cdot 4 = 0,684 \text{ kN/m}^2$$

$$G_{junta \text{ vertical}} = [V_{junta} \cdot \gamma_{argamassa}] \cdot N^{\circ}_{juntas \text{ por } m^2}$$

$$G_{junta \text{ vertical}} = [(0,09 \cdot 1 \cdot 0,01) \cdot 19] \cdot 4 = ,684 \text{ kN/m}^2$$

$$G_{reboco} = [V_{revestimento} \cdot \gamma_{argamassa}] \cdot N^{\circ}_{lados}$$

$$G_{reboco} = [(1,00 \cdot 1,00 \cdot 0,15) \cdot 19] \cdot 2 = 0,57 \text{ kN/m}^2$$

$$G_{chapisco} = [V_{revestimento} \cdot \gamma_{argamassa}] \cdot N^{\circ}_{lados}$$

$$G_{chapisco} = [(1,00 \cdot 1,00 \cdot 0,15) \cdot 21] \cdot 2 = 0,63 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{parede} = g_{block} + G_{junta\ vertical} + G_{junta\ horizontal} + j_{vertical}$$

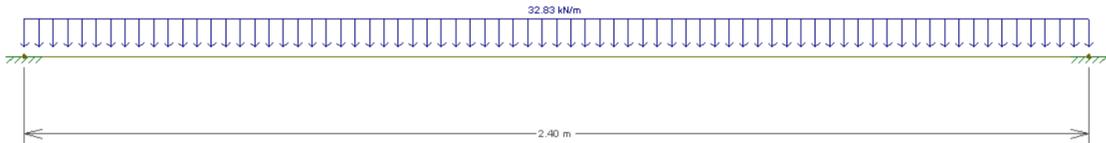
$$g_{parede} = 1,07 + 0,68 + 0,68 + 0,57 + 0,63 = 3,635\ kN/m^2$$

d. Carga total na viga:

Com todos os valores calculados e majorados, basta soma-las e lança-las no *Ftool*®, como representado na Figura 2, para obter as respectivas reações de apoio.

$$g_{viga,total} = g_{escada} + g_{viga} + g_{parede} \cdot h_{parede} = 23,833 + 2,80 + 6,20 = 32,833\ kN/m^2$$

Figura 2 - Carregamento da viga 114 no *Ftool*®.



Fonte: Dos autores (2022).

5. Esforço axial no pilar (P5).

a. Peso próprio do pilar:

Considerando que o pilar P5 tem seção 20x20 cm e um pé direito de 11,10 m, é possível determinar seu peso próprio.

$$g_{pilar} = (0,20 \cdot 0,20 \cdot 25) \cdot 1,4 \cdot 11,10 = 15,54\ kN/m$$

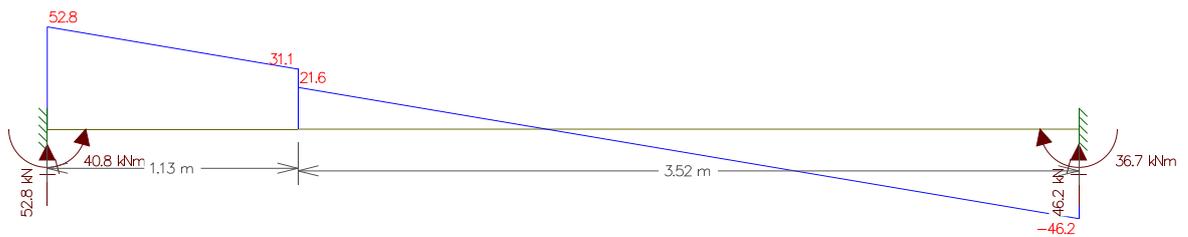
b. Somatório das vigas que influenciam no pilar:

Com todas as cargas calculadas e as reações obtidas através do *Ftool*®, basta somar o peso próprio do pilar com as cargas de todas as vigas. A seguir estão descritas todas as vigas com seus respectivos pavimentos e cargas.

APÊNDICE B – Diagrama de esforço cortante e reações de apoio das vigas

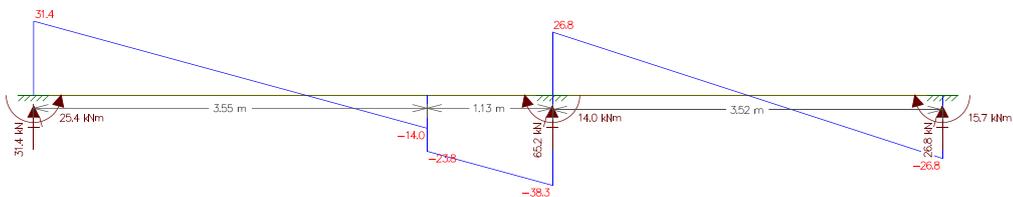
As Figuras de 1 a 43 representam os resultados obtidos pelo *software Ftool*® em função das cargas calculadas manualmente, apresentando o diagrama de esforço cortante e as respectivas reações de apoio.

Figura 1 - Diagrama de esforço cortante da viga 101 no *Ftool*®.



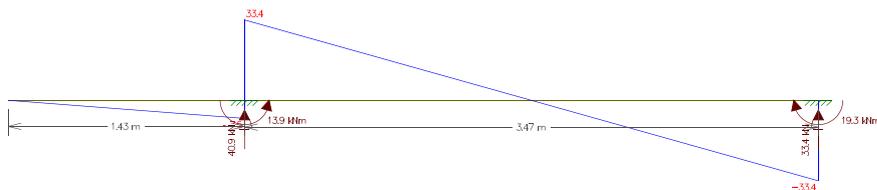
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 2 - Diagrama de esforço cortante da viga 102 no *Ftool*®.



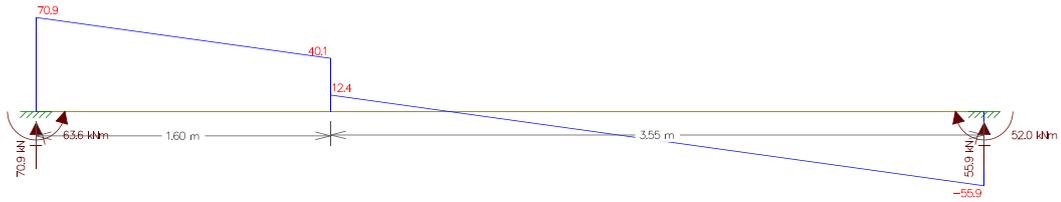
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 3 - Diagrama de esforço cortante da viga 103 no *Ftool*®.



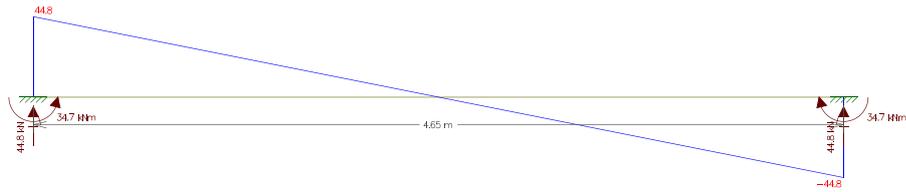
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 4 - Diagrama de esforço cortante da viga 104 no *Ftool*®.



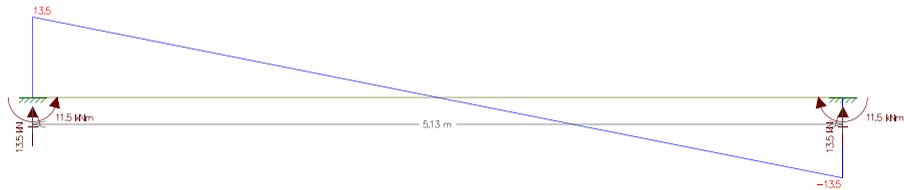
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 5 - Diagrama de esforço cortante da viga 105 no *Ftool*®.



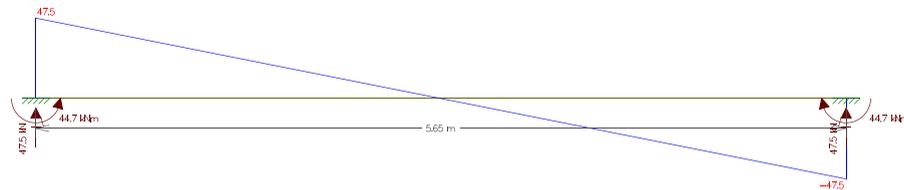
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 6 - Diagrama de esforço cortante da viga 106 no *Ftool*®.



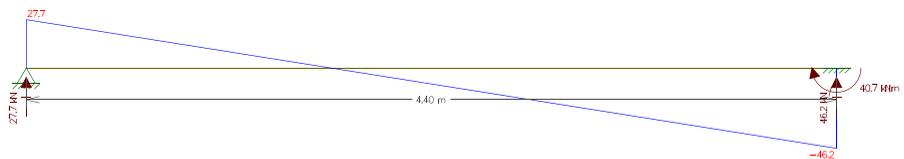
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 7 - Diagrama de esforço cortante da viga 107 no *Ftool*®.



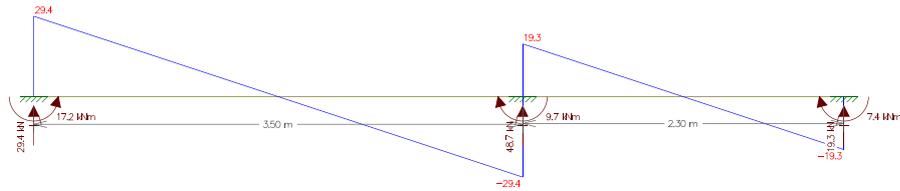
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 8 - Diagrama de esforço cortante da viga 108 no *Ftool*®.



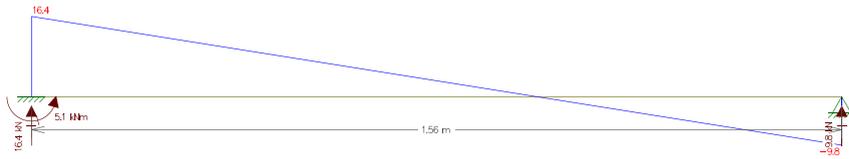
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 9 - Diagrama de esforço cortante da viga 109 no *Ftool*®.



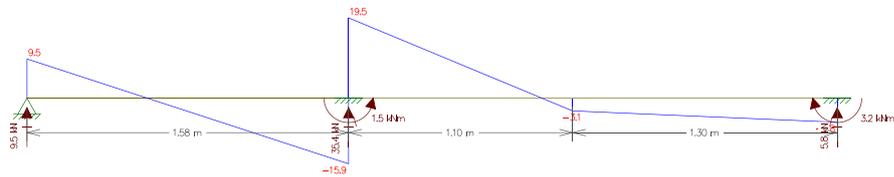
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 10 - Diagrama de esforço cortante da viga 110 no *Ftool*®.



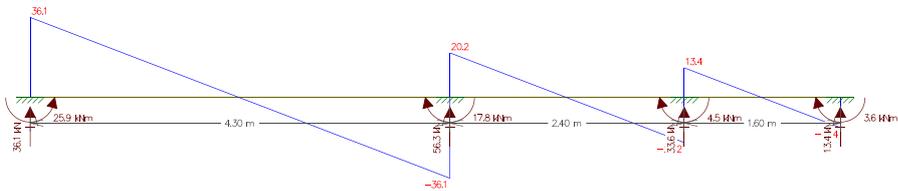
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 11 - Diagrama de esforço cortante da viga 111 no *Ftool*®.



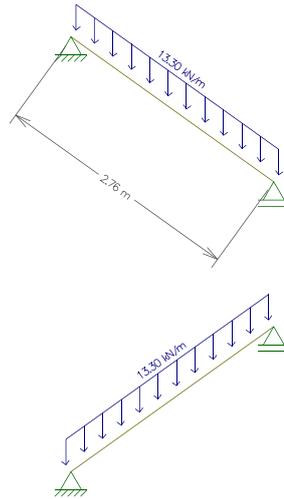
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 12 - Diagrama de esforço cortante da viga 112 no *Ftool*®.



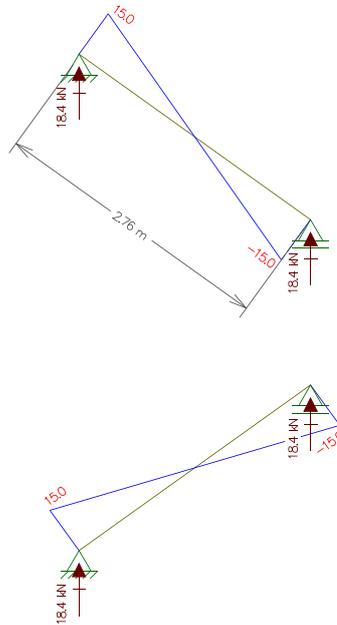
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 13 - Cargas atuantes no lance da escada no *Ftool*®.



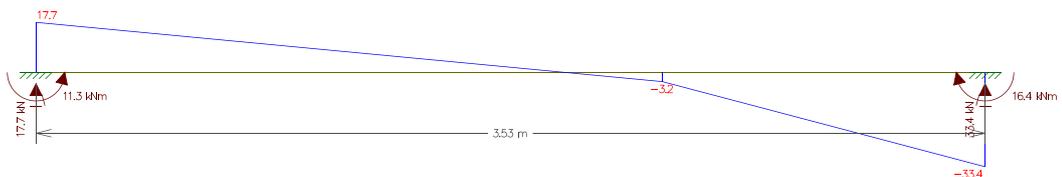
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 14 - Diagrama de esforço cortante do lance da escada no *Ftool*®.



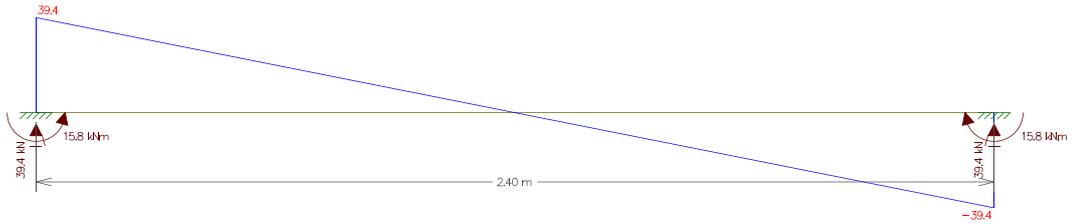
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 15 - Diagrama de esforço cortante da viga 113 no *Ftool*®.



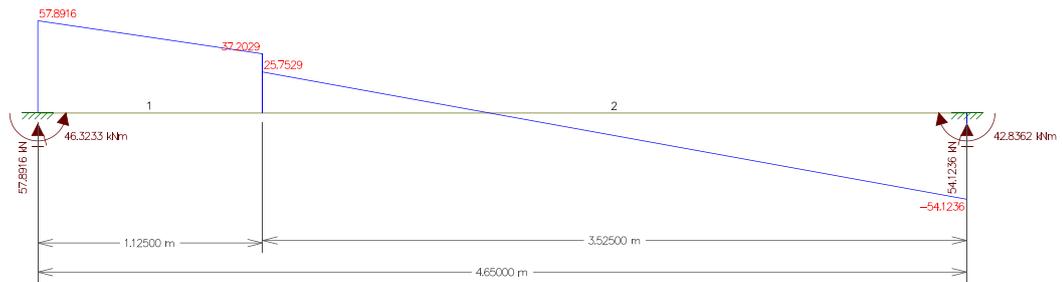
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 16 - Diagrama de esforço cortante da viga 114 no *Ftool*®.



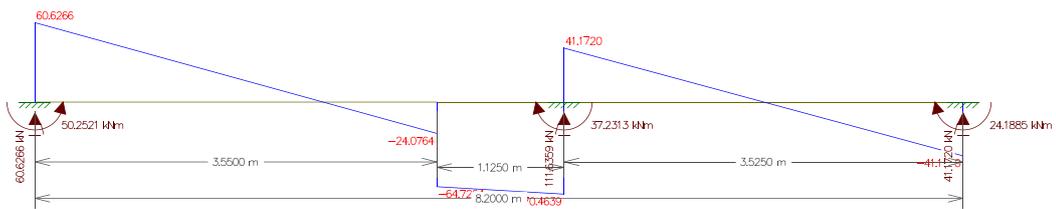
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 17 - Diagrama de esforço cortante da viga 201 no *Ftool*®.



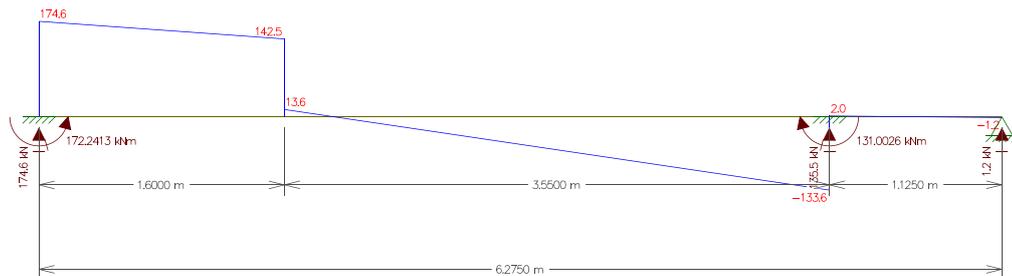
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 18 - Diagrama de esforço cortante da viga 202 no *Ftool*®.



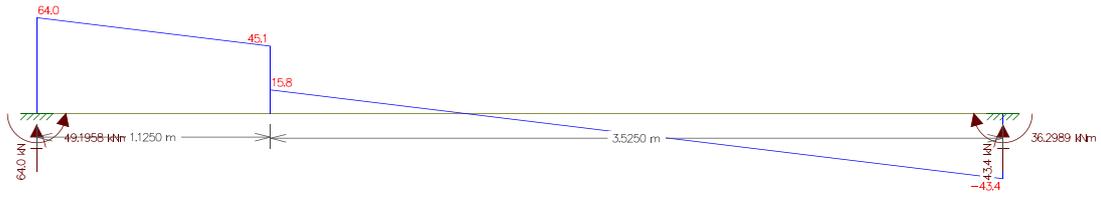
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 19 - Diagrama de esforço cortante da viga 203 no *Ftool*®.



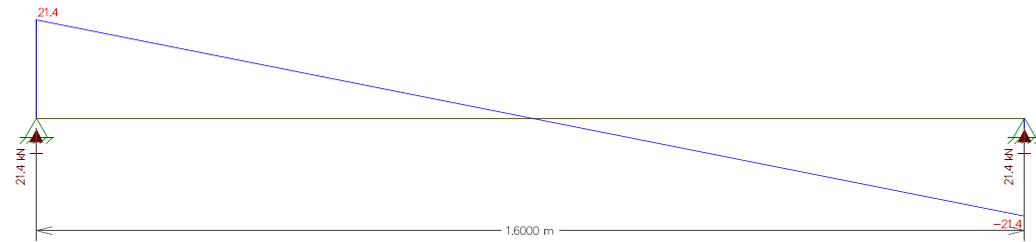
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 20 - Diagrama de esforço cortante da viga 204 no *Ftool*®.



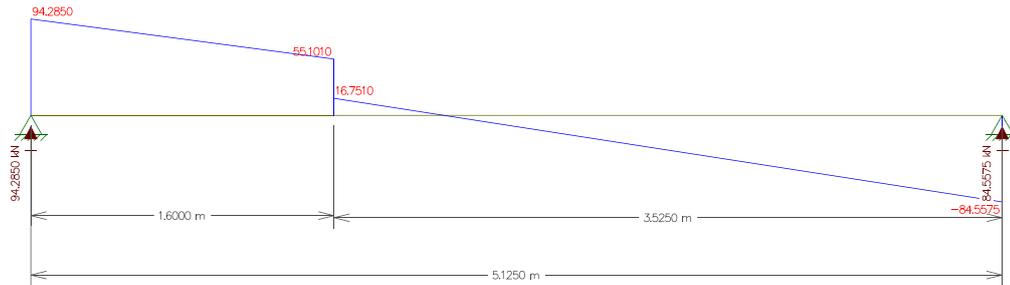
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 21 - Diagrama de esforço cortante da viga 205 no *Ftool*®.



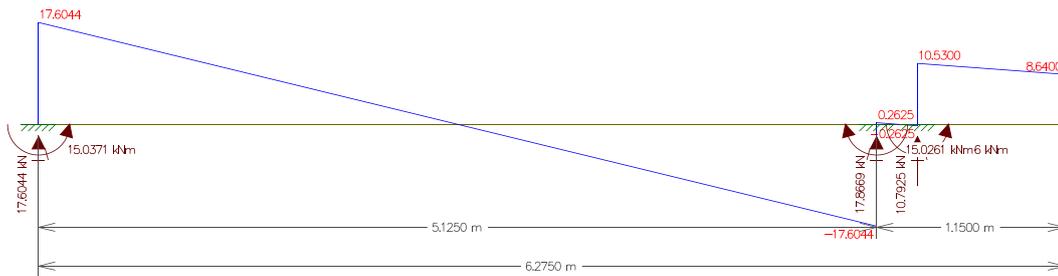
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 22 - Diagrama de esforço cortante da viga 206 no *Ftool*®.



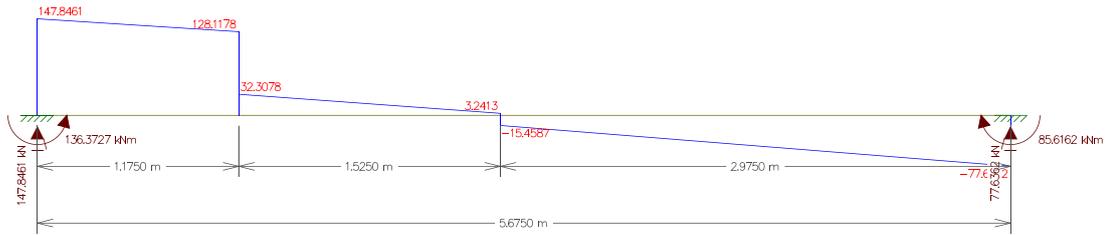
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 23 - Diagrama de esforço cortante da viga 207 no *Ftool*®.



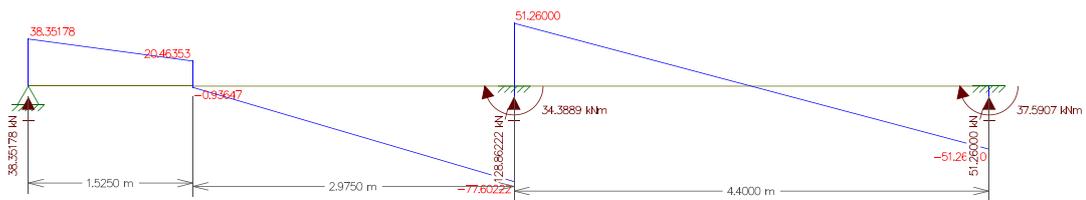
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 24 - Diagrama de esforço cortante da viga 208 no *Ftool*®.



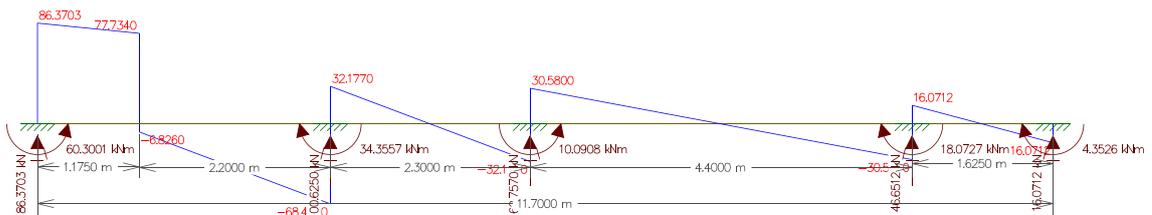
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 25 - Diagrama de esforço cortante da viga 209 no *Ftool*®.



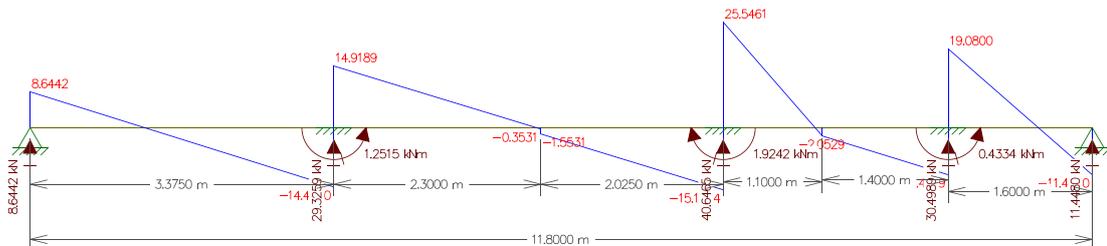
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 26 - Diagrama de esforço cortante da viga 210 no *Ftool*®.



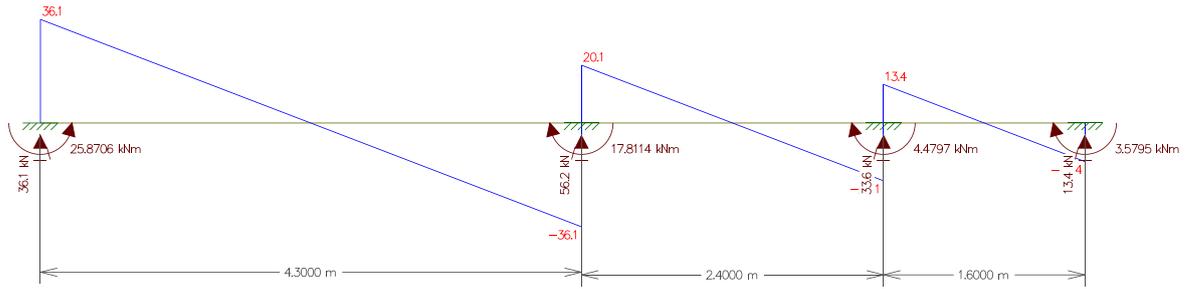
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 27 - Diagrama de esforço cortante da viga 211 no *Ftool*®.



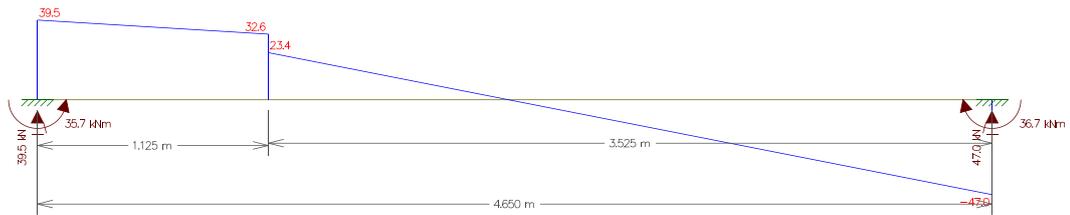
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 28 - Diagrama de esforço cortante da viga 212 no *Ftool*®.



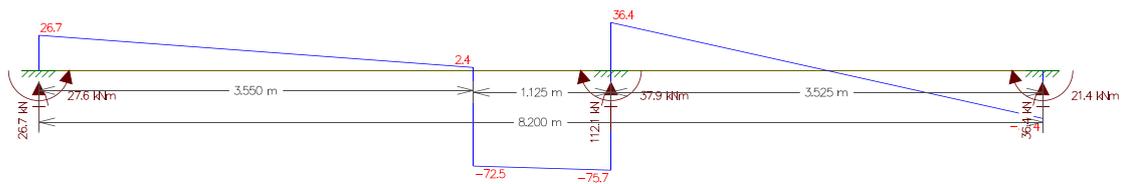
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 29 - Diagrama de esforço cortante da viga 301 no *Ftool*®.



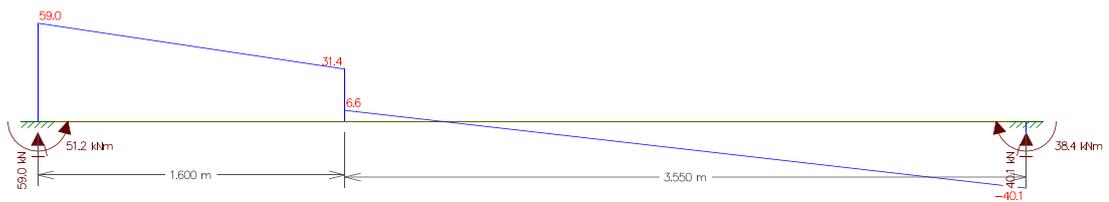
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 30 - Diagrama de esforço cortante da viga 302 no *Ftool*®.



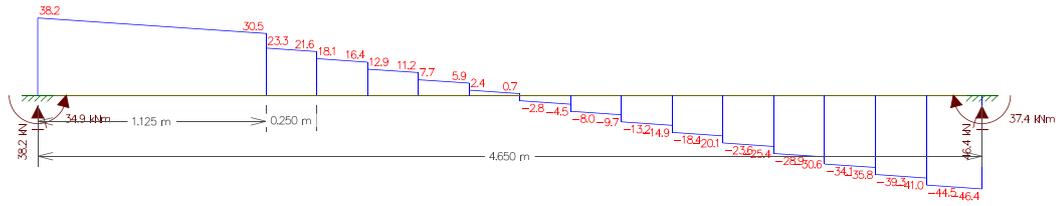
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 31 - Diagrama de esforço cortante da viga 303 no *Ftool*®.



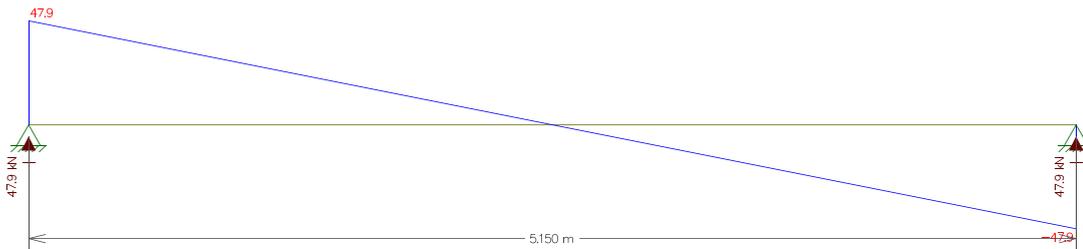
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 32 - Diagrama de esforço cortante da viga 304 no *Ftool*®.



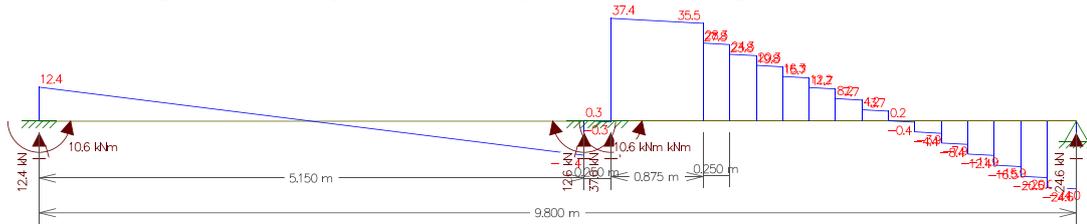
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 33 - Diagrama de esforço cortante da viga 305 no *Ftool*®.



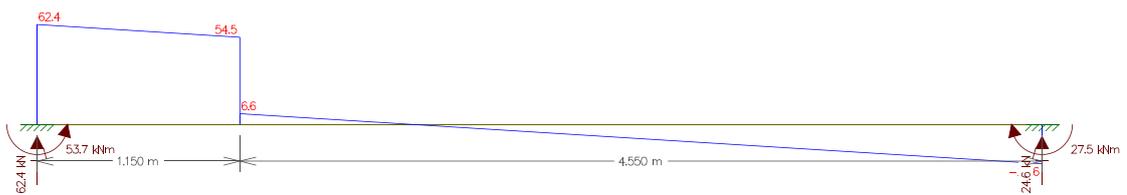
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 34 - Diagrama de esforço cortante da viga 306 no *Ftool*®.



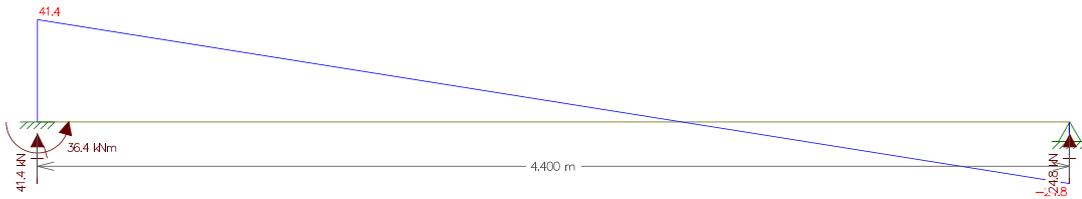
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 35 - Diagrama de esforço cortante da viga 307 no *Ftool*®.



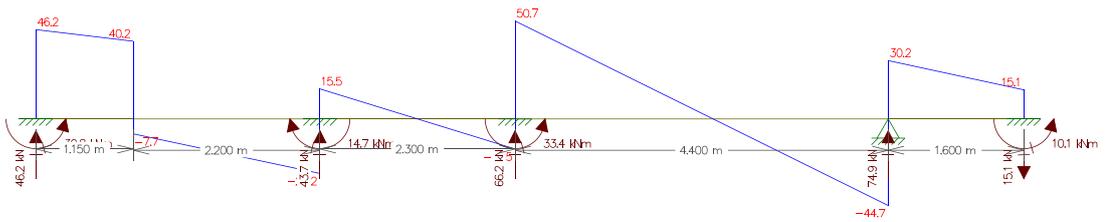
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 36 - Diagrama de esforço cortante da viga 308 no *Ftool*®.



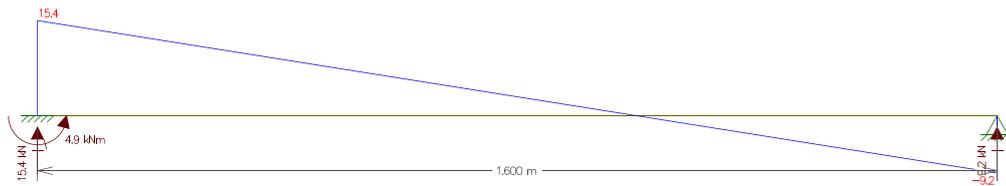
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 37 - Diagrama de esforço cortante da viga 309 no *Ftool*®.



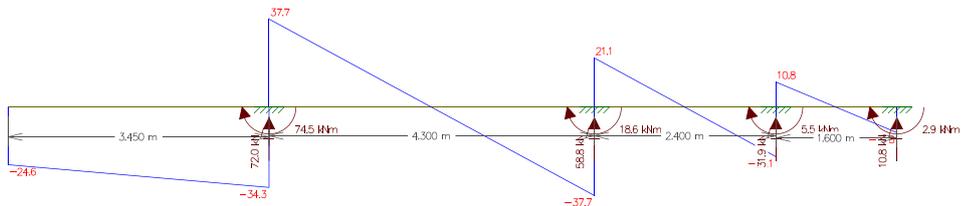
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 38 - Diagrama de esforço cortante da viga 310 no *Ftool*®.



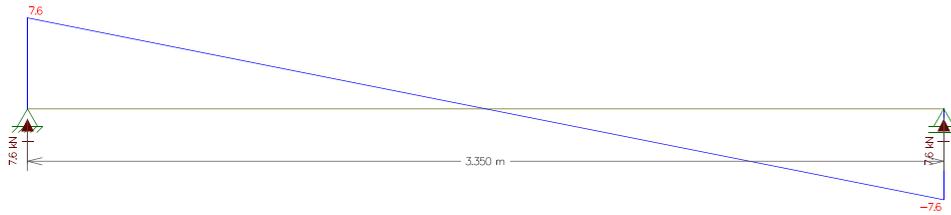
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 39 - Diagrama de esforço cortante da viga 311 no *Ftool*®.



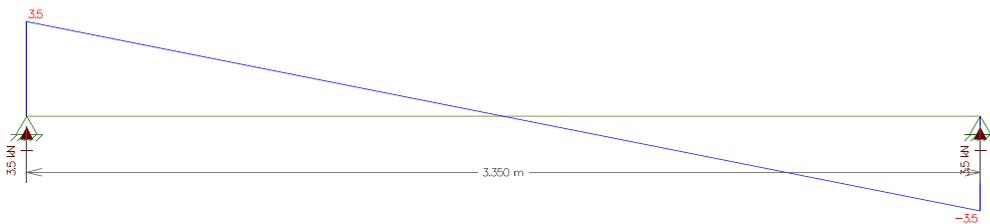
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 40 - Diagrama de esforço cortante da viga 312 no *Ftool*®.



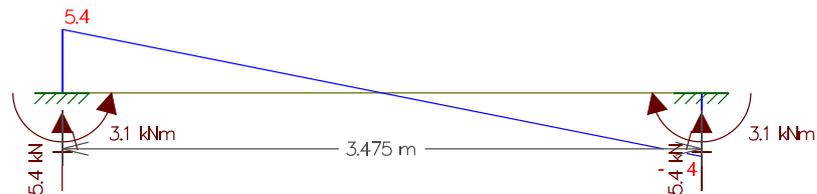
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 41 - Diagrama de esforço cortante da viga 313-325 no *Ftool*®.



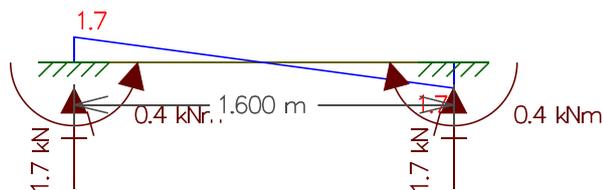
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 42 - Diagrama de esforço cortante das vigas 401 e 402 no *Ftool*®.



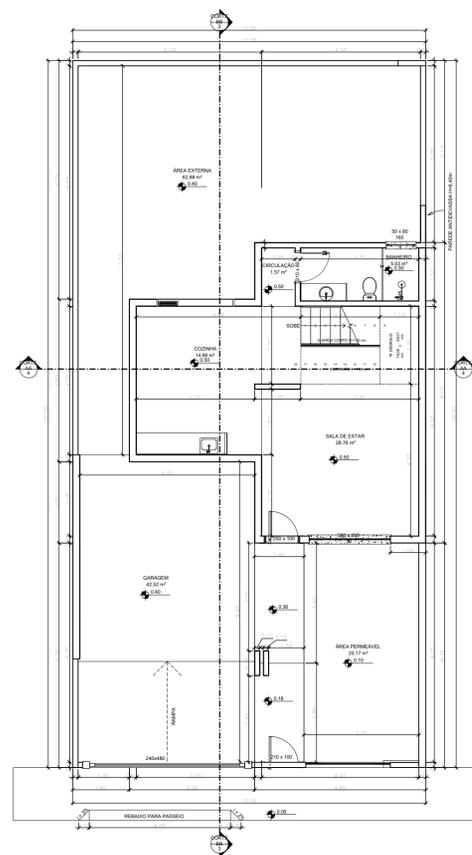
Fonte: Dos autores (2022).

Figura 43 - Diagrama de esforço cortante das vigas 403 e 404 no *Ftool*®.

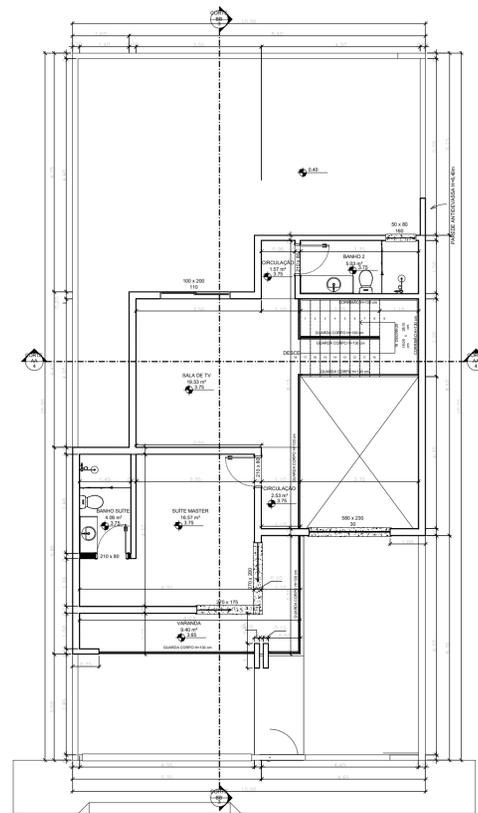


Fonte: Dos autores (2022).

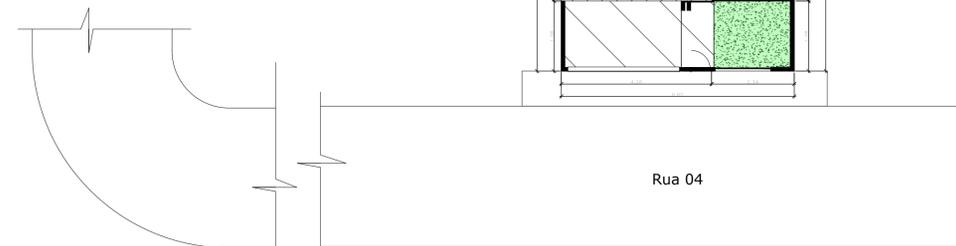
APÊNDICE C – Planta arquitetônica e planta de forma



PLANTA BAIXA PAVIMENTO TÉRREO
ESCALA 1:50



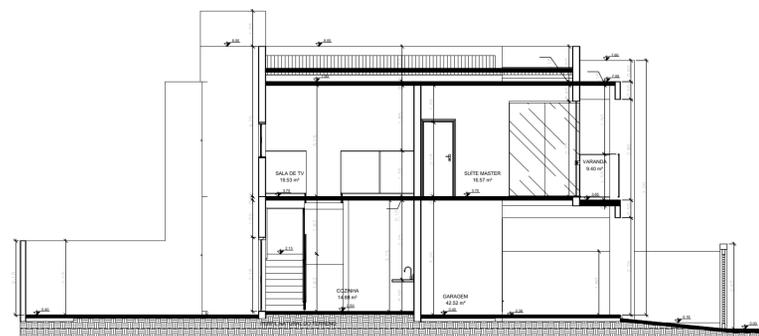
PLANTA BAIXA PAVIMENTO SUPERIOR
ESCALA 1:50



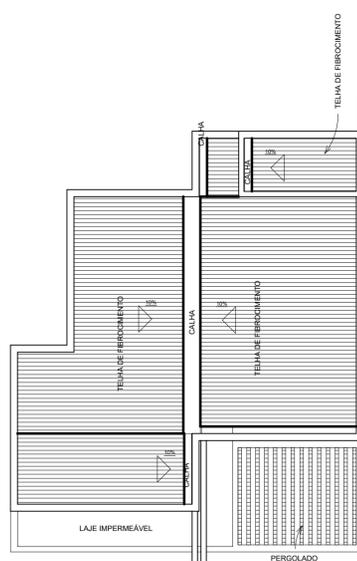
SITUAÇÃO
ESCALA 1:75



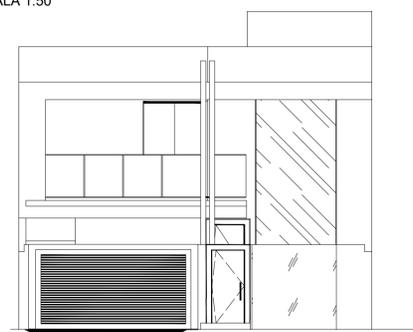
FACHADA EM PERSPECTIVA
ESCALA 1:50



CORTE BB
ESCALA 1:50



COBERTURA
ESCALA 1:50



CORTE AA
ESCALA 1:50

FACHADA
ESCALA 1:50



PROJETO	TÍTULO:		
	PROJETO ARQUITETÔNICO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR		
	CONTEÚDO:		
	PLANTA BAIXA, CORTES, COBERTURA, FACHADAS E SITUAÇÃO		
	AUTOR:		
	HENRIQUE PADUA DE SOUZA JOICE STEFANIE LOURENÇO TEIXEIRA		
RESPONSÁVEL TÉCNICO:			
XXXXXXXXXXXXXXXXX ENG. CIVIL - C.R.E.A XXXXXXX/D - MG			
DATA:	REVISÃO DATA:	PROJETO N.º	
SETEMBRO/2022	SETEMBRO/2022		
ESCALA:	ÁREA:	DESENHO N.º	
INDICADA	160 m²		
DESENHO:	DIGITALIZAÇÃO:	FOLHA:	
XXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXX	01/02	
RTR:			
REITORIA			

