

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**JOÃO MARIA SILVA MENDONÇA**

**ANÁLISE LINEAR DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO COM  
REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS: ESTUDO DE CASO**

**ALEGRETE  
2022**

**JOÃO MARIA SILVA MENDONÇA**

**ANÁLISE LINEAR DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO COM  
REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alisson Simonetti Milani

**ALEGRETE  
2022**

**JOAO MARIA SILVA MENDONCA**

**ANÁLISE LINEAR DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO COM REDISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 24 de março de 2022.

**BANCA EXAMINADORA:**

**PROF. DR. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA - ORIENTADOR**

**PROF. ME. ALDO LEONEL TEMP - UNIPAMPA**

**PROF. DR. TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD - UNIPAMPA**



Assinado eletronicamente por **TELMO EGMAR CAMILO DEIFELD, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/03/2022, às 00:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALDO LEONEL TEMP, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/03/2022, às 00:28, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/03/2022, às 08:32, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0765014** e o código CRC **FE3BEA60**.

Dedico este trabalho aos meus pais,  
suporte de toda a minha trajetória.

## **AGRADECIMENTOS**

É uma oportunidade singular na vida, neste fechamento de ato, ser inundado pelo sentimento de gratidão, comprovando a validade do percurso e fazendo crer que as memórias deste tempo serão fonte de alegria num futuro onde a história passa a ser contada.

Aos meus pais, Valnir e Dóris, aos demais familiares e aos amigos, por serem esteio em diversos e importantes momentos, pelo estímulo despendido, pelo entusiasmo e pela confiança depositada, pelas palavras de conforto e jamais julgamento, mesmo nos momentos mais nebulosos, e pelo amor incondicional.

Ao professor e orientador, Alisson Milani, de quem tive a honra de ser aluno e orientando, pela dedicação, pelo direcionamento, pela paciência e disponibilidade, pelo empenho em transmitir o seu conhecimento e experiência na Engenharia.

Aos professores, membros da banca, Aldo Temp e Telmo Deifeld, que também tive o privilégio de ser aluno, aos demais professores do curso de Engenharia Civil da Unipampa.

Aos colegas e amigos pela convivência, companheirismo e troca de conhecimentos.

Enfim, a todos aqueles que tornaram esta jornada mais leve e minha vida maior, e que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Muito obrigado!

*“A esperança equilibrista  
Sabe que o show de todo artista  
Tem que continuar”*

*(Aldir Blanc / João Bosco)*

## RESUMO

Este trabalho se dedica a um estudo de caso, onde, a partir do projeto arquitetônico de um edifício residencial de cinco pavimentos, se desenvolve modelagem, carregamento, processamento, detalhamento e análise dos resultados, com utilização de software para dimensionamento de estruturas de concreto armado, TQS, com posterior apresentação dos resultados obtidos para o consumo de aço das vigas pertencentes ao pavimento tipo.

Primeiramente, na configuração em regime linear sem redistribuição de esforços ( $\delta = 1,0$ ) – dimensionamento de referência – e, em seguida, em regime linear com redistribuição de esforços para valores do coeficiente de redistribuição  $\delta = 0,95$  e  $\delta = 0,75$ . Observando o parâmetro de estabilidade global,  $\gamma_z$ , limitado em até 1,1, para classificação da estrutura como de nós fixos, critério necessário para se possibilitar a utilização de valores para redistribuição de esforços inferiores a  $\delta = 0,90$ . E ainda com o atendimento da relação  $x/d$  limite para cada situação.

Palavras-chave: Análise linear, redistribuição de esforços, concreto armado, TQS.

## **ABSTRACT**

This work is dedicated to a case study, where, from the architectural design of a five-story residential building, modeling, loading, processing, detailing and analysis of the results are developed, using software for dimensioning reinforced concrete structures, TQS, with subsequent presentation of the results obtained for the steel consumption of the beams belonging to the standard floor.

Firstly, in the configuration in linear regime without redistribution of efforts ( $\delta = 1.0$ ) – reference design – and then in linear regime with redistribution of efforts for values of the redistribution coefficient  $\delta = 0.95$  and  $\delta = 0.75$ . Observing the global stability parameter,  $\gamma_z$ , limited to 1.1, for the classification of structures as fixed nodes, a necessary criterion to enable the use of values for redistribution of efforts lower than  $\delta = 0.90$ . And still with the attendance of the relation  $x/d$  limit for each situation.

Keywords: Linear analysis, redistribution of efforts, reinforced concrete, TQS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aproximação em apoios extremos.....	21
Figura 2 - Esquema de um pórtico plano .....	22
Figura 3 - Esquema de um pórtico espacial .....	23
Figura 4 - Graus de liberdade em uma barra .....	24
Figura 5 - Trechos rígidos .....	25
Figura 6 - Diagrama de tensão versus deformação .....	26
Figura 7 - Redistribuição de momentos fletores em vigas contínuas. ....	29
Figura 8 - Capacidade de rotação de rótulas plásticas .....	30
Figura 9 - Modelo de detalhamento da viga .....	31
Figura 10 - Planta de fôrma - Pavimento Tipo.....	32
Figura 11 - Pórtico 3D .....	34
Figura 12 - Planta de fôrma - Pavimento Tipo.....	35
Figura 13 - Detalhamento da viga V1 .....	38
Figura 14 - Momentos de cálculo para análise linear (kNm) .....	38
Figura 15 - Soma de diagramas para igualar os momentos do apoio e dos vãos .....	39
Figura 16 - Momentos fletores de cálculo para análise linear com redistribuição (kNm) .....	39
Figura 17 - Pavimento ao qual pertence a viga V2.....	41
Figura 18 - Esquema estático da V2 .....	41
Figura 19 - Momentos de cálculo para análise linear (kNm) .....	42
Figura 20 – Verificação das exigências da NBR 6118 e seção T resultante com largura da mesa colaborante.....	42
Figura 21 - Momentos de cálculo para a análise linear com redistribuição (kN.m) .....	43
Figura 22 - Etapas para o desenvolvimento deste trabalho .....	44
Figura 23 - Criação de novo edifício.....	46
Figura 24 - Adicionando critério de redistribuição de esforços para o pórtico espacial .....	47
Figura 25 - Corte esquemático TQS.....	48
Figura 26 - Acessando modelador estrutural e inserindo referência externa ...	48
Figura 27 - Modelagem de pilar com ajuste da seção .....	49
Figura 28 - Modelagem de vigas com inserção de dados de seção.....	50

Figura 29 - Modelagem de lajes com definição de carregamentos .....	51
Figura 30 - Planta de fôrma do pavimento tipo.....	52
Figura 31 - Visualização 3D da estrutura .....	53
Figura 32 - Dados para cálculo da ação do vento pelo TQS.....	54
Figura 33 - Carregamentos atuantes no pavimento tipo, exceto nas lajes.....	58
Figura 34 - Acessando o processamento global da estrutura .....	59
Figura 35 - Janela de configuração do Processamento Global da estrutura....	60
Figura 36 - Avisos e erros do processamento da estrutura.....	61
Figura 37 - Classificação dos erros graves e solução necessária.....	61
Figura 38 - Processamento Global final - Avisos e erros .....	62
Figura 39 - Caminho de acesso à verificação da estabilidade global.....	62
Figura 40 - Caso simples de vento e combinações ELU para vigas, lajes e pilares, $\delta = 0,75$ .....	63
Figura 41 - Envoltórias de momento fletor e esforço cortante para $\delta = 1,0$ e $\delta =$ $0,95$ da viga V1 .....	67
Figura 42 - Detalhamento de armaduras para $\delta = 1,0$ e $\delta = 0,95$ da viga V1...	68
Figura 43 - Envoltórias de momento fletor e esforço cortante para $\delta = 1,0$ e $\delta =$ $0,75$ da viga V2 .....	69
Figura 44 - Detalhamento de armaduras para $\delta = 1,0$ e $\delta = 0,75$ da viga V2...	70
Figura 45 - Envoltórias de momento fletor para $\delta = 1,0$ e $\delta = 0,75$ da viga V20 .....	71
Figura 46 – Detalhamento de armaduras para $\delta = 1,0$ e $\delta = 0,75$ da viga V20	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Coeficiente para consideração da solidariedade entre as vigas e os pilares.....	21
Tabela 2 - Comparativo dos resultados obtidos nas duas análises.....	31
Tabela 3 - Comparação do consumo de aço.....	32
Tabela 4 - Redução da área de aço necessária com redistribuição de momentos .....	33
Tabela 5 - Coeficiente de redução aplicado nas vigas do pavimento tipo .....	36
Tabela 6 - Comparação das áreas (cm <sup>2</sup> ) de aço calculadas para momentos negativos.....	37
Tabela 7 - Armadura determinada para cada seção .....	38
Tabela 8 - Armadura com redistribuição determinada para cada seção .....	40
Tabela 9 - Tipos de análise estrutural e suas aplicações.....	40
Tabela 10 - Consumo de aço - Seção T versus retangular .....	43
Tabela 11 - Resumo de aço por viga .....	65
Tabela 12 - Relatório $x/d$ e $x/d_{lim}$ das seções de momentos negativos da viga V20 .....	73
Tabela 13 - Custos de Corte, Dobra e Montagem segundo SINAPI-RS (2022/01) Não Desonerado .....	74
Tabela 14 - Custos de aço por bitola e por quantidade de barras para $\delta = 0,75$ .....	74
Tabela 15 - Estabilidade global casos simples de vento (ELU).....	75
Tabela 16 - Deslocamentos máximos horizontais (ELS).....	75

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Vigas com redução e vigas com acréscimo de aço para  $\delta = 0,95$ .. 66

Gráfico 2 - Vigas com redução e vigas com acréscimo de aço para  $\delta = 0,75$ .. 68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ELU – Estado limite último

ELS – Estado limite de serviço

Ecs – Módulo de elasticidade secante

Eci – Módulo de elasticidade tangente inicial

E – Módulo de elasticidade

$\delta M$  – Momento reduzido

M – Momento fletor

$M_d$  – Momento fletor de cálculo

$r_{inf}$  – Rigidez de tramo inferior de pilar em uma ligação tramo inferior de pilar-viga-tramo superior de pilar

$r_{sup}$  - Rigidez de tramo superior de pilar em uma ligação tramo inferior de pilar-viga-tramo superior de pilar

$r_{vig}$  - Rigidez de uma viga em uma ligação tramo inferior de pilar-viga-tramo superior de pilar

d – altura útil

x – Profundidade da linha neutra

I – Momento de inércia

$\delta$  – Coeficiente de redistribuição

$\gamma_z$  – Coeficiente gama z

$A_s$  – Área de aço

$f_{ck}$  – Resistência característico do concreto

$\sigma_{adm}$  – Tensão admissível

$\gamma$  – Peso específico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.1</b>	<b>Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Específico.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Concreto Armado .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Modelos Estruturais .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Viga Contínua.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Pórticos Planos.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Pórticos Espaciais .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Trechos Rígidos.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3</b>	<b>Análise Estrutural .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Análise Linear .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Análise Linear com Redistribuição .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4</b>	<b>Revisão de Trabalhos e Estudos de Caso.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Miranda (2003 a 2006).....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Honscha e Bolina (2018) .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Silva (2017).....</b>	<b>33</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Fontes (2005).....</b>	<b>37</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Fontes e Pinheiro (2005) .....</b>	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1</b>	<b>Projeto Analisado .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2</b>	<b>Características Estruturais e de Lançamento .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3</b>	<b>Software Utilizado.....</b>	<b>45</b>
<b>3.4</b>	<b>Aplicação no software.....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Criação do edifício.....</b>	<b>46</b>

3.4.2	Modelagem .....	48
3.4.3	Carregamentos .....	53
3.4.4	Processamento Global .....	59
4	RESULTADOS E COMPARAÇÕES .....	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	76
	REFERÊNCIAS.....	78
	ANEXOS .....	80

## 1 INTRODUÇÃO

A verticalização das cidades não é mais exclusividade dos grandes centros urbanos no Brasil e no mundo há alguns anos, o aproveitamento de espaços em pontos nobres em regiões de cidades e bairros com maior infraestrutura tem acréscimo constante de demanda. Na rotina diária média há a inclusão de tarefas praticamente justapostas, ou seja, com pequenos intervalos entre o fim de uma e início da próxima tarefa, onde um tempo de deslocamento excessivo inviabilizaria ambas ou um delas.

Esse comportamento social implica na necessidade de prédios que agrupem mais atividades ou unidades de habitação, resultando em estruturas mais amplas onde pequenas variações no consumo de recursos podem acarretar em grande economia em valor absoluto.

Atrelado ao mencionado, o controle de uma estrutura e sua análise com alvo na redução de custos, sem abrir mão da segurança, é de grande valia, dentro das possibilidades para alcançar esse objetivo está a consideração da redistribuição de esforço para dimensionamento da estrutura.

Essa análise é uma parcela de considerável significância na concepção de projetos de estruturas, sua importância, aliada ao bom-senso, conhecimento e experiência do projetista, implica no desenvolvimento de projetos cada vez mais racionais onde há equilíbrio entre o desempenho da estrutura e o custo de sua execução. Ter controle sobre os parâmetros envolvidos e adequá-los aos limites normativos permite prever o comportamento dos elementos resistentes da estrutura frente às suas solicitações de projeto tanto para limites últimos como para limites de serviço.

A NBR 6118(2014) consente a utilização de análise linear com e sem redistribuição de esforços de acordo com as características de cada elemento. Essa redistribuição está ligada à posição relativa da linha neutra da seção. Nesse trabalho será mostrado de forma prática a realização desses dois tipos de análise em elementos estruturais de concreto armado, lançando-se mão do emprego de software estrutural para modelagem, análise e dimensionamento. Munido dos resultados para os dois modelos, serão confrontados os dados finais a fim de se concluir a respeito da utilização da redistribuição dos esforços na análise da estrutura e sua relevância para o edifício objeto deste estudo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

Consiste na análise e no dimensionamento de um projeto estrutural para uma edificação convencional de múltiplos pavimentos com estrutura de concreto armado pelos métodos de análise linear com e sem redistribuição de esforços, conforme a norma 6118(2014), em ambiente de software comercial de estruturas, para comparação dos resultados e verificação do impacto de tal análise.

### **1.1.2 Específico**

Realizar a modelagem, o processamento e o dimensionamento da estrutura da uma edificação, com e sem redistribuição de esforços em regime linear; com a utilização do coeficiente de redistribuição de esforços,  $\delta = 1,0$ ,  $\delta = 0,95$  e  $\delta = 0,75$ , para posterior comparação do consumo de aço e concreto necessários às vigas pertencentes ao pavimento Tipo.

## **1.2 Justificativa**

Um dos principais desafios da sociedade produtiva atual é, cada vez mais, buscar, através da racionalização e da otimização de processos, produtos finais de qualidade satisfatória e economicamente viáveis, estando a indústria da construção civil também imersa nessa tendência.

A obtenção da máxima eficiência possível na aplicação de materiais para execução de uma estrutura passa pela criação e análise de modelos que se assemelhem ao comportamento prático de tais elementos referenciados tanto local como globalmente dentro de uma estrutura, o que motiva o aperfeiçoamento de soluções para os mecanismos de análise das construções em concreto armado.

Essas soluções incluem a avaliação da segurança e atendimento aos critérios normativos. Cabe ao projetista encontrar a solução ideal onde haja o máximo aproveitamento dos recursos para a concepção do serviço, visando a economia final sem abrir mão dos níveis de segurança necessários.

É na fase de refinamento que são aplicados os conceitos e ferramentas de otimização estrutural, pois essa solução, além de reduzir custos, aproxima-se da realidade do comportamento da estrutura em uso.

As vantagens de análises com redistribuição de esforços, mais especificamente, momentos fletores, está no fato do projetista poder alcançar distribuições de momentos tais que evitem congestionamentos de armaduras nos apoios, e a possibilidade de reduzir os picos do diagrama de momentos fletores, para as diferentes situações de carregamentos. (FONTES, 2005).

Cada elemento da estrutura é responsável por absorver uma parcela do esforço total solicitante, de tal forma a manter a estrutura final em equilíbrio. Assim, é muito importante que a distribuição de esforços seja executada minuciosamente durante a análise estrutural do edifício. (KIMURA, 2007).

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Concreto Armado**

Concreto armado é um material composto, onde há uma combinação de dois materiais, o aço e o concreto, de tal forma a se obter o melhor desempenho de cada um desses materiais considerando suas características mecânicas. Os papéis são divididos, convenientemente, de modo que onde, em dado elemento estrutural, houver tensão de tração o aço será posicionado para equilibrar tal tensão e onde houver tensão de compressão o concreto a absorverá até um determinado nível, podendo também o aço auxiliar o concreto nesta região de compressão. (ARAÚJO, 2014).

É um material amplamente utilizado por apresentar propriedades que se adequam a diferentes aplicações e necessidades, como por exemplo, custo relativo baixo versus desempenho e durabilidade com dosagem correta, obtenção de formas arquitetônicas complexas pela sua possibilidade de moldagem no estado fresco. (ARAÚJO, 2014).

Em um edifício, a parte responsável por resistir aos carregamentos impostos e transmiti-los até o solo são os elementos estruturais. A primeira fase de um projeto estrutural é a definição dos elementos que farão parte da estrutura, no caso de concreto armado os mais comuns são lajes, vigas, pilares, sapatas.

Atualmente, existe disponíveis diversos softwares comerciais que auxiliam na análise de estruturas de concreto armado, para que se possa obter dados confiáveis de como se comporta o sistema estrutural frente aos carregamentos e condições impostas pelos projetistas (Fontes, 2005).

A interação concreto-aço pode ser analisada, levando em conta a redistribuição das tensões que ocorrem dentro de uma ligação entre uma viga e um pilar, submetida a um carregamento que provoque flexão no elemento estrutural.

### **2.2 Modelos Estruturais**

Com o intuito de determinar os esforços, os modelos estruturais avaliam composições de um ou mais tipos de elementos. Os, também ditos, esquemas estruturais, devem contemplar as diferentes solicitações e seus respectivos esforços incidentes na estrutura, traz consigo um relação direta com limitações de aplicação tais como: disponibilidade de tempo, conhecimento e ferramentas

computacionais por parte do projetista, de custo do projeto ou ainda uma combinação destes fatores.

### **2.2.1 Viga Contínua**

Sendo um modelos estrutural baseado em partições da estrutura, o modelo de viga contínua permite a análise de solicitações, predominantemente, oriundas de ações verticais. É um modelo simples que consiste em vigas isoladas que recebem carregamentos provenientes de lajes, alvenarias, outras vigas, escadas, marquises, entre outros. Os esforços predominantes são os momentos fletores e os esforços cortantes. Já os esforços normais são geralmente desprezados neste modelo por terem pouca influência. O modelo clássico de viga contínua considera a viga simplesmente apoiada nos pilares, ou seja, como se não houvesse transmissão de momentos entre esses elementos. (Fontes, 2005)

Segundo a NBR 6118(2014), esse modelo estrutural pode ser utilizado para o estudo das cargas verticais, desde que obedeça às seguintes correções:

- a) Não devem ser considerados momentos positivos menores que os que se obteriam se houvesse engastamento perfeito da viga nos apoios internos;
- b) Quando a viga for solidária como pilar intermediário e a largura do apoio, medida na direção do eixo da viga, for maior que a quarta parte da altura do pilar, não pode ser considerado momento negativo de valor absoluto menor do que o de engastamento perfeito nesse apoio;

Quando não for realizado o cálculo exato da influência da solidariedade dos pilares com a viga, deve ser considerado, nos apoios extremos, momento fletor igual ao momento de engastamento perfeito multiplicado pelos coeficientes estabelecidos na Tabela 1. Ressaltando que a figura 1 exemplifica a aproximação em apoios extremos.

Tabela 1- Coeficiente para consideração da solidariedade entre as vigas e os pilares

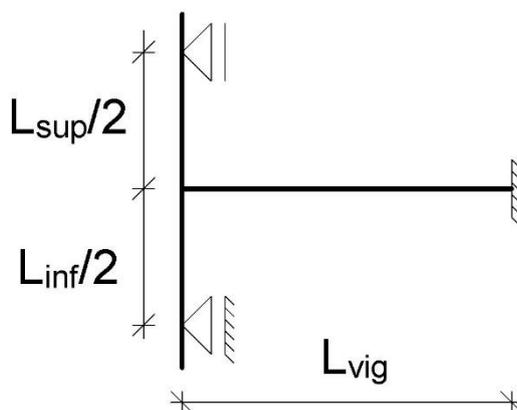
Local	Viga	Tramo superior do pilar	Tramo inferior do pilar
Coeficiente	$\frac{r_{inf} + r_{sup}}{r_{vig} + r_{inf} + r_{sup}}$	$\frac{r_{sup}}{r_{vig} + r_{inf} + r_{sup}}$	$\frac{r_{inf}}{r_{vig} + r_{inf} + r_{sup}}$

Fonte: Fontes (2005, p. 12)

Sendo que  $r_i$  é a rigidez do elemento e  $i$  o nó considerado, dada pela equação (1).

$$r_i = I_i / l_i \quad (1)$$

Figura 1 - Aproximação em apoios extremos



Fonte: adaptado da NBR 6118(2014).

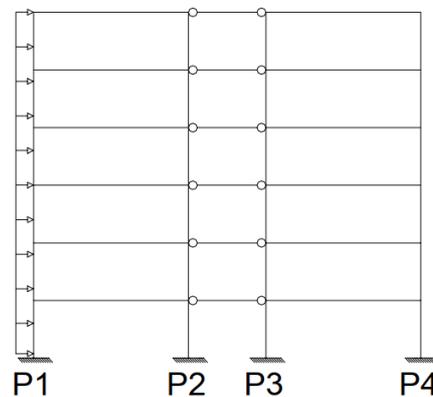
Agrupadas e avaliadas as considerações da norma NBR 6118(2014), realiza-se a unificação dos diagramas a fim de extrair do diagrama resultante os momentos de dimensionamento como exemplifica a figura

### 2.2.2 Pórticos Planos

É um modelo com nível de refinamento maior que o de viga contínua, porém limitado se comparado com os modelo de pórticos espaciais. Considera de maneira mais precisa o comportamento da estrutura sob ações verticais. Os esforços internos analisados por esse modelo são os momentos fletores, os esforços cortantes e os esforços normais. (Fontes, 2005)

Neste nível de modelo é possível a inserção de ações horizontais como vento e desaprumo, permite ainda a análise da estabilidade global com o cálculo do parâmetro  $\gamma_z$ .

Figura 2 - Esquema de um pórtico plano



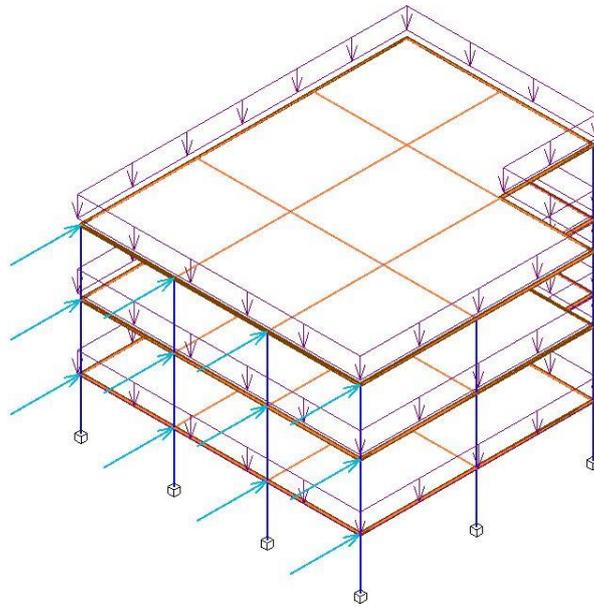
Fonte: Fontes (2005, p. 13)

### 2.2.3 Pórticos Espaciais

Os pórticos (Figura 3) espaciais são formados por elementos lineares entre ligações tridimensionais rígidas, semirrígidas ou flexíveis. Um aprimoramento referente à modelagem pode ser alcançado com a inclusão de trechos rígidos projetados a partir dos nós em que as barras concorrem.

De maneira aproximada, nas grelhas e nos pórticos espaciais, pode-se reduzir a rigidez à torção das vigas por fissuração, utilizando-se 15 % da rigidez elástica. (NBR 6118:2014, p. 94)

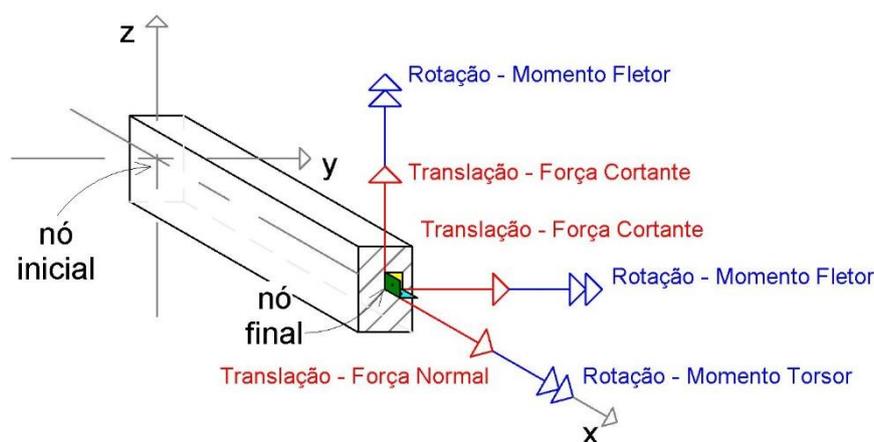
Figura 3 - Esquema de um pórtico espacial



Fonte: adaptado de Fontes (2005, p. 15).

É intrínseca, neste modelo estrutural, a possibilidade de análise dos carregamentos em qualquer direção (vertical e horizontal), advinda da presença de seis graus de liberdade em cada barra: três translações e três rotações. Como apresentado na Figura 4, com os graus de liberdade podemos encontrar os esforços solicitantes (força normal, força cortante, momento fletor e momento torsor) de todos os elementos (KIMURA, 2007).

Figura 4 - Graus de liberdade em uma barra



Fonte: adaptado de KIMURA (2007, p. 123).

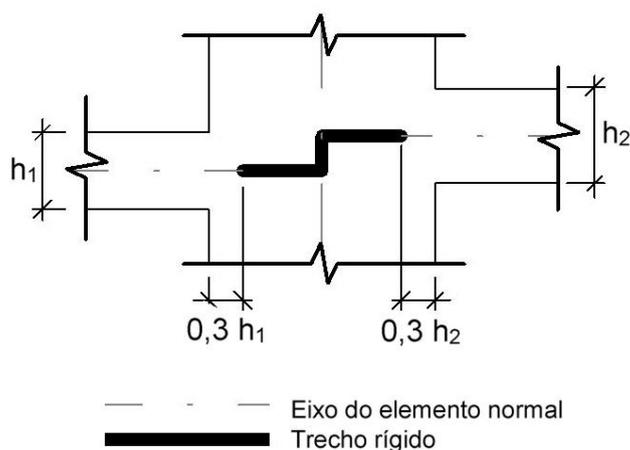
#### 2.2.4 Trechos Rígidos

Nas estruturas reticuladas é comum a ocorrência de interseções de eixos de dois ou mais elementos. Há casos em que as dimensões das ligações entre tais elementos não são desprezíveis, quando comparadas com vãos e pés-direitos. É comum modelar esses nós de dimensões finitas como elementos infinitamente rígidos, consideração que vai ao encontro do comportamento real da edificação (FONTES, 2005).

No caso de apoios de vigas em pilares, é mais comum considerar trechos rígidos nas vigas que nos pilares. Essa adoção está de acordo com a hipótese de manutenção da seção plana do pilar, e adiciona a consideração de excentricidades na aplicação de forças no pilar. (CORRÊA, 1991).

No entanto, não serão quaisquer trechos de interseção adotados como rígidos, a NBR 6118(2014) destaca que, os trechos de elementos lineares pertencentes a região comum ao cruzamento de dois ou mais elementos, podem ser considerados como rígidos (nós de dimensões finitas), conforme a Figura 5.

Figura 5 - Trechos rígidos



Fonte: adaptado da NBR 6118(2014).

## 2.3 Análise Estrutural

A NBR 6118(2014) no item 14.2.2 versa sobre as premissas necessárias à análise estrutural, a qual deve ser feita a partir de um modelo adequado ao objetivo da análise, podendo ser utilizados mais de um concomitantemente se necessário. Basicamente, busca-se a formação de sistemas estruturais suficientemente resistentes que permitam, inequivocamente, estabelecer o caminho percorrido pela ações até as bases da estrutura. O modelo deve ser alimentado com dados pertinentes e sob responsabilidade do projetista como geometria, carregamentos, vinculações, características dos materiais.

A seguir, estão expostos os conceitos sobre análise linear com e sem redistribuição de esforços que, dentro do escopo deste trabalho, permitirão a aplicação e comparação dos resultados de cada método no projeto em estudo.

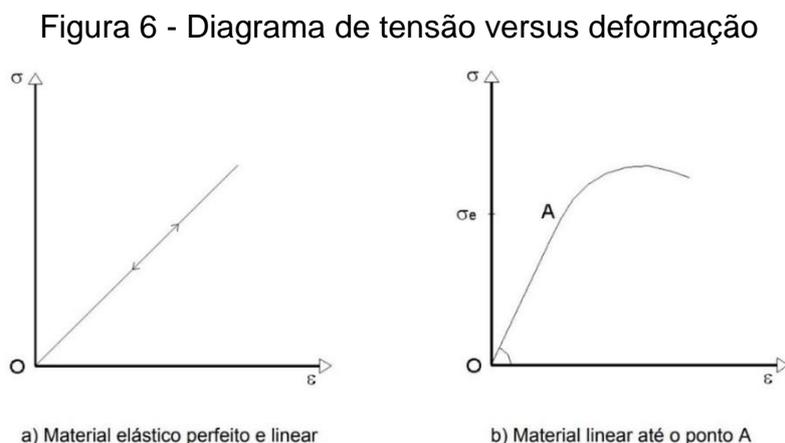
### 2.3.1 Análise Linear

Este tipo de análise admite que os materiais se encontram na região elástica e ainda obedecem a Lei de Hook, onde suas tendências são de retorno a posição de menor energia quando extinta a ação que provoca suas deformações.

Se o corpo consegue recuperar totalmente sua forma original é dito perfeitamente elástico. Se apenas parte da deformação é revertida, chama-se parcialmente elástico. Outro dado que pode ser extraído do gráfico é o módulo

de elasticidade ( $E$ ), valor este que é característico de cada material, obtido pela relação linear entre as tensões e a deformação.

A Figura 6 expressa o comportamento gráfico de dois materiais, um material perfeitamente elástico e linear (Figura 6-a), e outro com comportamento linear até o ponto A (Figura 6-b) (Fontes, 2005).



Fonte: Fontes (2005, p. 21)

Leonhardt (1979) afirma que, o concreto só tem um comportamento puramente elástico para tensões baixas e de curta duração, ou até aproximadamente 1/3 da resistência à compressão. Então utilizando elementos lineares para o cálculo da rigidez desses elementos, pode se utilizar o momento de inércia da seção bruta de concreto.

Para a determinação de esforços solicitantes e verificação de estado limites de serviço, deve-se utilizar o módulo de elasticidade secante  $E_{cs}$ , equação (2), cujo valor é dado em função do módulo de elasticidade tangente inicial  $E_{ci}$ , correspondente à inclinação do início da curva tensão versus deformação, o módulo de elasticidade é usado em função da resistência do concreto, dada pela equação (3) e (4) da NRB 6118(2014).

$$E_{cs} = \alpha_i * E_{ci} \quad (2)$$

$$E_{ci} = \alpha_e * 5600 \sqrt{f_{ck}} \text{ , para } f_{ck} \leq 50 \text{MPa} \quad (3)$$

$$E_{ci} = 21500 * \alpha_e * \sqrt[3]{\frac{f_{ck}}{10} + 1,25} \text{ , para } 55 \text{MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{MPa} \quad (4)$$

Sendo:

$$\alpha_e = 1,2 \text{ para basalto e diabásio}$$

$$\alpha_e = 1,0 \text{ para granito e gnaisse}$$

$\alpha_e = 0,9$  para calcário

$\alpha_e = 0,7$  para arenito

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 * \left( \frac{f_{ck}}{80} \right) \leq 1,0$$

Geralmente, para verificação do ELS, emprega-se a análise linear, podendo ser utilizado para ELU somente em situações que se possa garantir a ductilidade dos elementos estruturais. Considera-se, como garantia de ductilidade, o dimensionamento nos domínios 1, 2 e 3 e a limitação da posição da linha neutra ( $x/d$ ), juntos aos apoios e em regiões de ligação entre elementos (FONTES, 2005).

### 2.3.2 Análise Linear com Redistribuição

A NBR 6118(2014) no item 14.5.3 trata que a análise linear com redistribuição, os efeitos das ações, determinados em uma análise linear, são redistribuídos na estrutura, para as combinações de carregamento do ELU. Sempre sendo necessário o atendimento das condições de ductilidade e equilíbrio, com recálculo dos esforços internos no arranjo resultante da redistribuição, elemento a elemento e a estrutura como um todo. Sendo assim, devem ser considerados em todos os aspectos do projeto estrutural no que se refere ao dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais.

Interpretando o que diz Fontes (2005) sobre a redistribuição dos esforços, pode se dizer, que os esforços internos migram e se concentram em regiões de maior rigidez, após a fissuração, enquanto outras regiões do mesmo elemento ainda se encontram no estágio I, sendo um exemplo os apoios em vigas contínuas. Este fenômeno, se não considerado, implica um sub-aproveitamento da armadura de flexão sobre os apoios, pois, mesmo havendo plastificação da seção a capacidade resistente não se esgota quando há a contribuição da resistência armazenada nas regiões adjacentes à crítica.

A NBR 6118(2014) no item 14.6.4.3 apresenta os limites para redistribuição de momentos e condições de ductilidade em função da profundidade da linha neutra sobre a altura útil ( $x/d$ ), nos apoios e nas regiões de ligações entre elementos estruturais lineares, mesmo que não sejam realizadas redistribuição de esforços solicitantes, aos seguintes valores:

a)  $x / d \leq 0,45$ , para concretos com  $f_{ck} \leq 50MPa$

$$b) \quad x / d \leq 0,35, \text{ para concreto com } 50MPa < f_{ck} \leq 90MPa$$

E quando efetuada redistribuição de esforços, reduzindo um momento fletor  $M$  para  $\delta M$  (Figura 7), a profundidade da linha neutra nessa seção ( $x/d$ ), para o momento reduzido  $\delta M$ , deve ser limitada por:

$$a) \quad x / d \leq \frac{(\delta-0,44)}{1,25}, \text{ para concretos com } f_{ck} \leq 50MPa$$

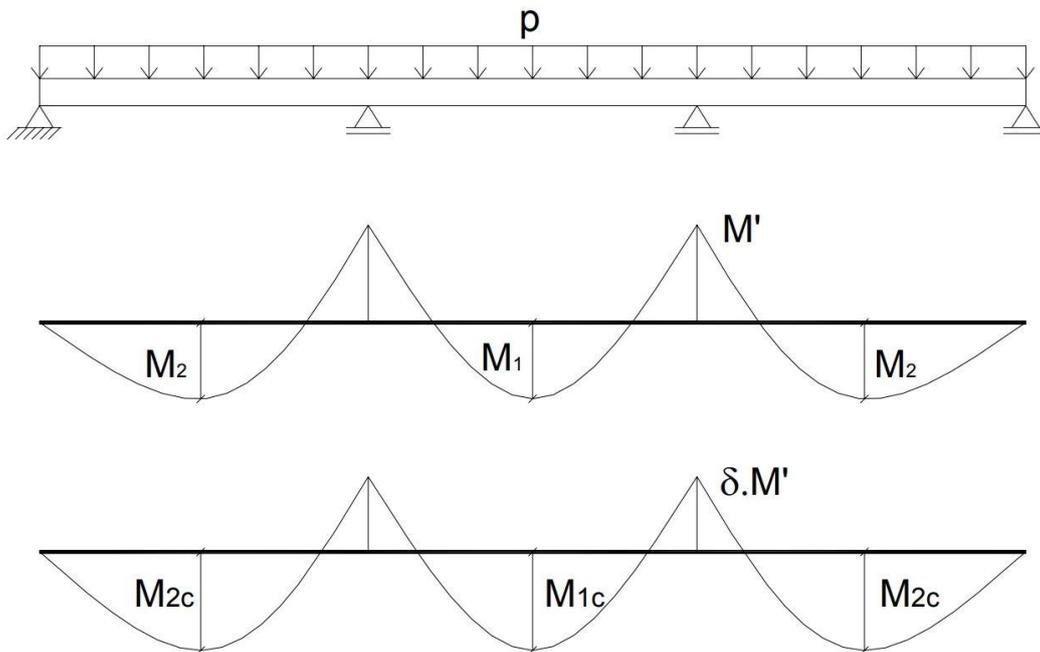
$$b) \quad x / d \leq \frac{(\delta-0,56)}{1,25}, \text{ para concreto com } 50MPa < f_{ck} \leq 90MPa$$

Encontrando o coeficiente de redistribuição  $\delta$ , deve-se ainda obedecer aos seguintes limites:

- a)  $\delta \leq 0,9$  , para estruturas de nós móveis, por exemplo, pórticos deslocáveis e para aços de ductilidade alta e muito alta;
- b)  $\delta \leq 0,75$  , para qualquer outro caso, por exemplo, lajes, vigas contínuas, pórticos indeslocáveis e para aços de ductilidade alta e muito alta.

Buchaim (2001) destaca que, obedecidas as condições do coeficiente  $\delta$ , é arbitrária a escolha de quais momentos das seções críticas serão reduzidos, assim como é arbitrário o valor dessa redução. Feita a redução dos momentos, refaz-se a análise para garantir o equilíbrio.

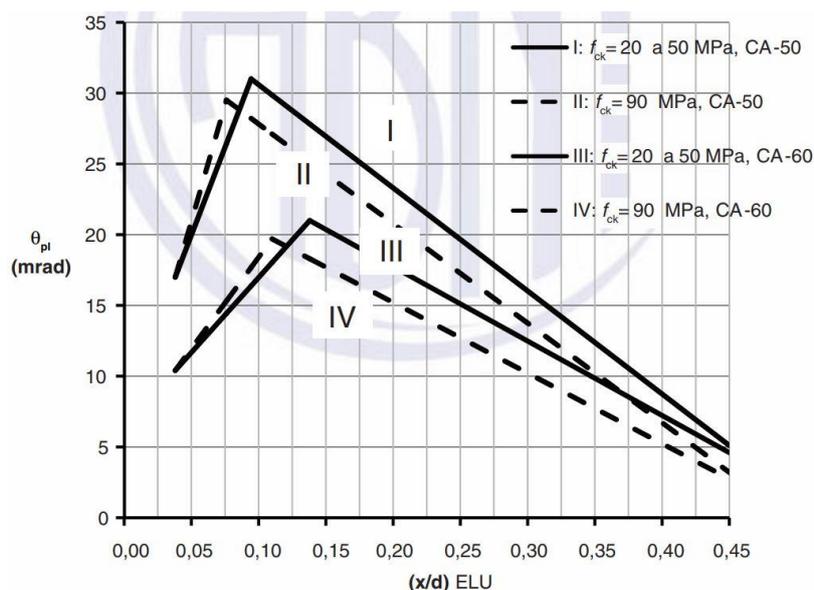
Figura 7 - Redistribuição de momentos fletores em vigas contínuas.



Fonte: Fontes (2005, p. 25)

Caso a redistribuição aplicada exceda aos limites definidos anteriormente, deve-se verificar a capacidade de rotação plástica na região onde foi efetuada a redistribuição, o limite de rótula plástica solicitante ( $x/d$ ), é dado em função da profundidade da linha neutra no ELU, ver Figura 8.

Figura 8 - Capacidade de rotação de rótulas plásticas



Fonte: NBR 6118 (2014, p. 92)

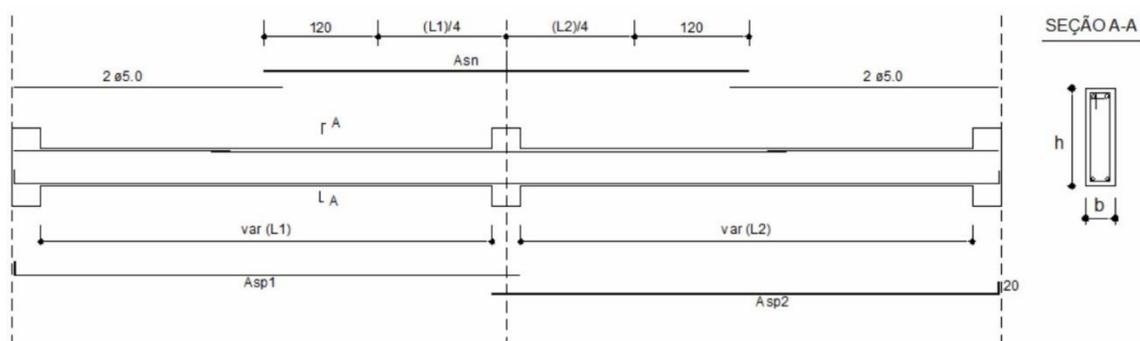
Na Figura 8, é indicado que caso os valores de  $x/d$  atendam certos limites, como  $x/d \leq 0,25$  para  $f_{ck} \leq 50$  MPa e  $x/d \leq 0,15$  para  $f_{ck} > 50$  MPa, pode ser dispensado a verificação da capacidade de rotação plástica.

## 2.4 Revisão de Trabalhos e Estudos de Caso

### 2.4.1 Miranda (2003 a 2006)

Miranda (2003 a 2006), dimensionou e detalhou uma viga contínua, apresentada na Figura 9, primeiramente, desconsiderando a redistribuição de esforços ( $\delta = 1$ ) com análise linear, em seguida aplicou o processo de otimização adotando a análise linear com redistribuição. A Tabela 2, indica um comparativo dos resultados obtidos nas duas análises realizadas na viga da Figura 9.

Figura 9 - Modelo de detalhamento da viga



Fonte: Miranda (2003 a 2006)

Tabela 2 - Comparativo dos resultados obtidos nas duas análises

	$\delta$	$A_s$ apoio central (cm <sup>2</sup> )	$A_s$ vão 1 (cm <sup>2</sup> )	$A_s$ vão 2 (cm <sup>2</sup> )	Custo total (R\$)
Análise linear	1,0	3,29	2,10	2,10	855,12
Análise linear com redistribuição	0,92	4,80	2,90	2,90	791,95
Variação	8%	18,33%	27,59%	27,59%	-7,4%

Fonte: adaptado de Miranda (2003 a 2006).

Observando a Tabela 2, verifica-se na coluna “Custo total (R\$)” uma variação de -7,4%, ou seja, foi relevante a consideração da análise com redistribuição, uma vez que se obtém uma redução significativa com a aplicação da análise em relação a análise linear.

A aplicação deste exemplo comprova a eficiência do processo de otimização no dimensionamento de vigas em concreto armado através de análise linear com redistribuição.

No caso da análise linear com redistribuição, a adoção de seção T nas vigas leva a resultados ainda mais satisfatórios como mostra a utilizada por Miranda (2003 a 2006) publicada pelo IBRACON (2007).

Tabela 3 - Comparação do consumo de aço

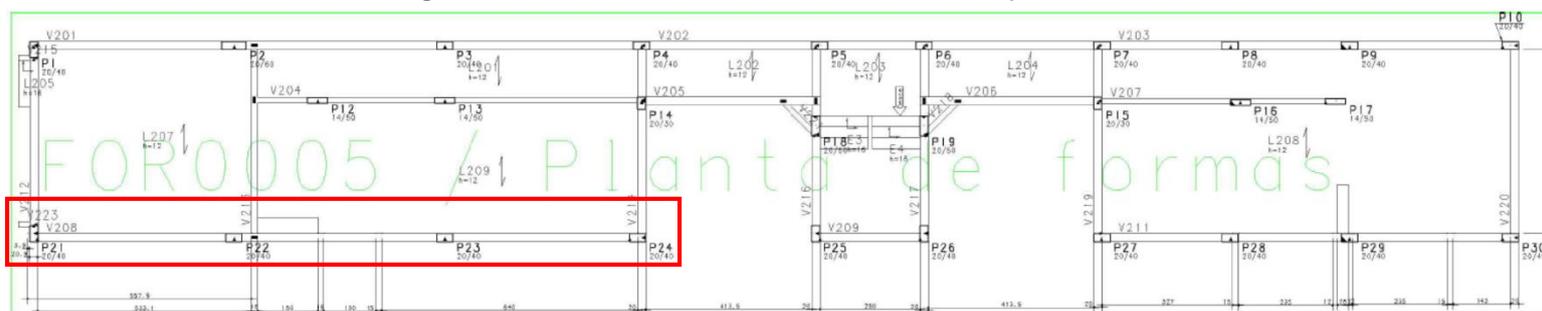
Tipo de análise	Seção Transversal	Consumo de aço (kg)	Diferença para análise linear seção retangular (%)
Análise linear	Retangular	278.2	0
Análise linear	T	259.7	-6.7
Análise linear com redistribuição ( $\delta=0.75$ )	T	241.5	-13.2
Análise plástica ( $\delta=0.75$ )	T	237.0	-14.8

Fonte: IBRACON (2007)

#### 2.4.2 Honscha e Bolina (2018)

HONSCHA e BOLINA (2018) avaliaram o impacto da redistribuição de momentos negativos nas zonas de apoio, através de estudo de caso de um projeto de edificação residencial elaborado na cidade de Pelotas/RS, com o auxílio do software comercial CAD/TQS. Foram comparados 2 métodos de análise estrutural: linear e linear com redistribuição, sendo o último variando entre 10 e 25%.

Figura 10 - Planta de fôrma - Pavimento Tipo



Fonte: Honscha; Bolina (2018, p. 4)

Explicita-se os resultados da viga V208 com seção de 20cmx40cm apoiada nos pilares P21, P22, P23 e P24 constantes da Tabela 4.

Tabela 4 - Redução da área de aço necessária com redistribuição de momentos

Viga	Apoio	$\delta = 1$		$\delta = 0,90$			$\delta = 0,75$		
		M (tfm)	As (cm <sup>2</sup> )	M (tfm)	As (cm <sup>2</sup> )	-Var. (10%)	M (tfm)	As (cm <sup>2</sup> )	-Var. (25%)
V208	P21	2,30	2,18	2,10	1,95	10,55	1,70	1,62	25,69
	P22	5,00	5,09	4,50	4,55	10,61	3,80	3,70	27,31
	P23	4,30	4,31	3,90	3,81	11,60	3,20	3,13	27,38
	P24	2,40	2,24	2,10	2,01	10,27	1,80	1,66	25,89

Fonte: adaptado de Honscha; Bolina (2018, p. 6)

Como pode-se notar, a redução da armadura necessária nos apoios das vigas acompanha, em média, o valor da redução do momento nas seções analisadas.

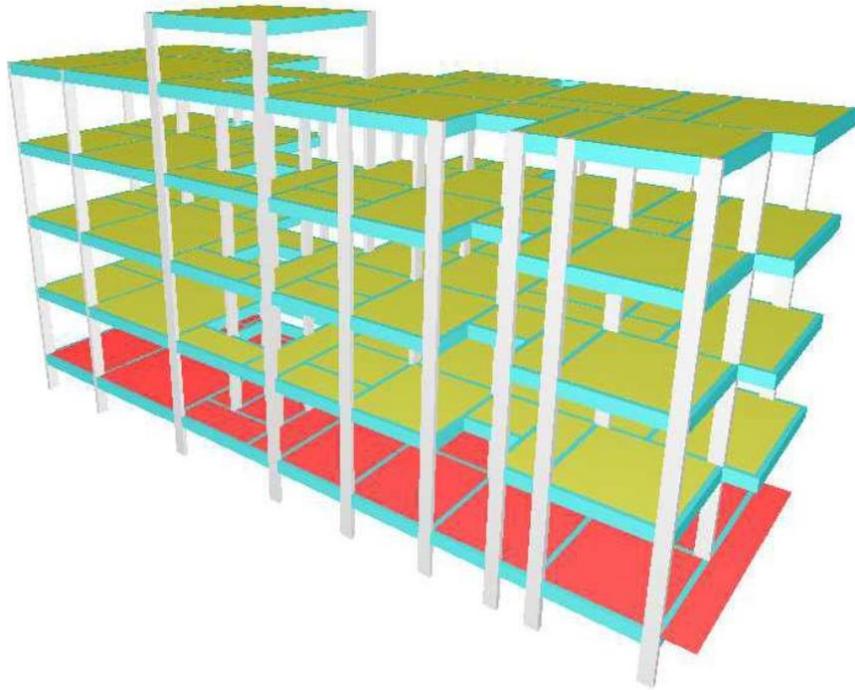
Segundo os autores, a diferença da área de aço necessária para resistir ao momento sem redução e a área com momento reduzido, para a edificação em análise, não foi suficientemente significativa para alterar o arranjo de barras, isto é, ao subtrair 1 barra da seção, o elemento passaria a não resistir ao esforço solicitante, conforme limites estabelecidos pela NBR 6118.

HONSCHA e BOLINA (2018) esclarecem que, do ponto de vista econômico, a vantagem é mais considerável se resultar em uma forma mais fácil de serem executados os elementos, e, ainda, sobre a obtenção de barras com bitolas mais uniformes ao longo da estrutura.

#### 2.4.3 Silva (2017)

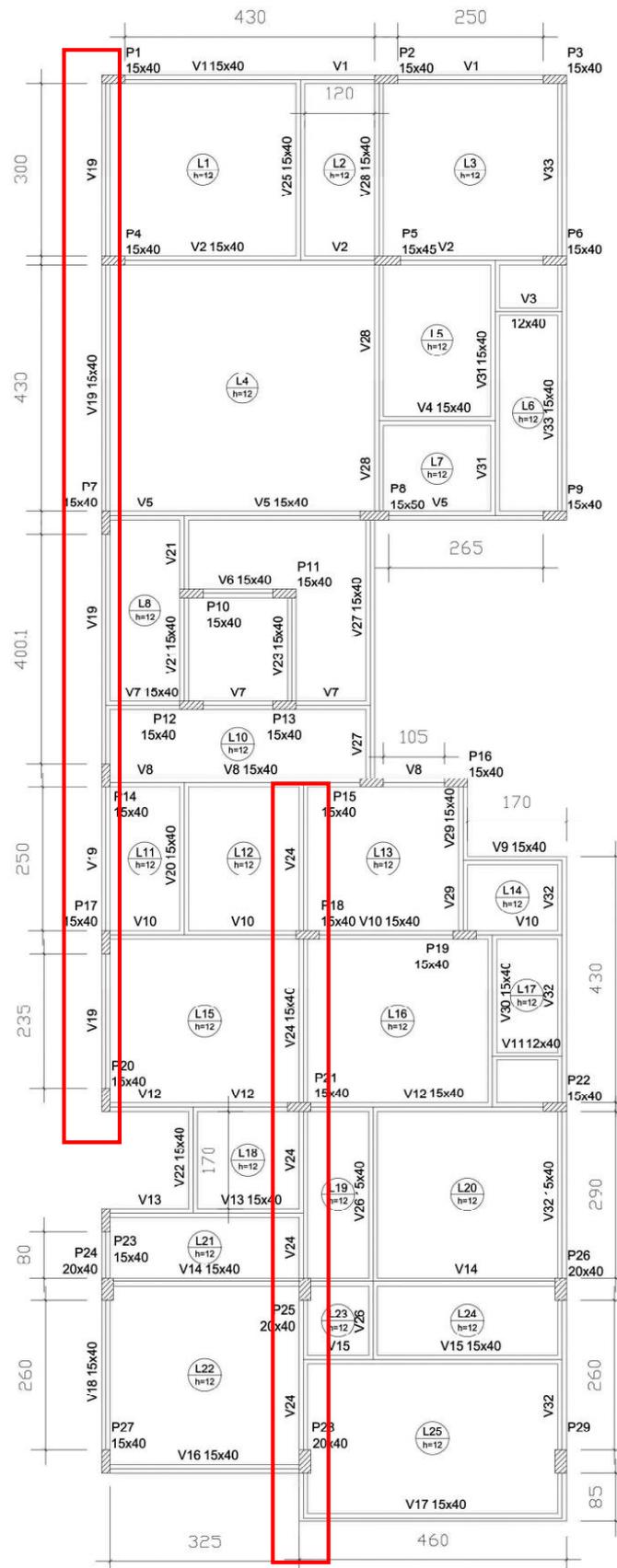
Silva (2017), ao analisar uma edificação para fins residenciais de quatro pavimentos com pé-direito medindo 2,80 m, pórtico 3D (Figura 11) e planta de fôrma (Figura 12).

Figura 11 - Pórtico 3D



Fonte: Silva (2017, p. 53)

Figura 12 - Planta de fôrma - Pavimento Tipo



Fonte: Silva (2017, p. 51)

Para garantir que a porcentagem de variação de momento fletor negativo alcançasse o alvo de 25%, aplicou-se a redução da rigidez através de diferentes valores para os coeficientes nas ligações viga-pilar reprocessando a estrutura. SILVA (2017, p. 64).

Destaca-se os dados das vigas indicadas na Figura 12, V19 e V24, extraídos da Tabela 14 (p. 65) para Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficiente de redução aplicado nas vigas do pavimento tipo

<b>Viga</b>	<b>Pilar (Apoio)</b>	<b>Coeficiente de redução da rigidez aplicado (%)</b>
V19	P20	22
	P17	18
	P14	25
	P7	24
	P4	18
	P1	25
V24	P28	19
	P25	16
	P21	19
	P18	20

Fonte: adaptado Silva (2017, p. 65 )

Todas as áreas de aço das seções armadas para momento positivo tiveram acréscimo e as seções de negativo decréscimo como observa-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparação das áreas (cm<sup>2</sup>) de aço calculadas para momentos negativos

Viga	Pilar (Apoio)	Esforço sem redistribuição	Esforço com redistribuição	%
V19	P20	1,36	1,02	-25
	P17	1,33	1,00	-25
	P14	1,45	1,07	-26
	P7	2,18	1,57	-28
	P4	1,51	1,16	-23
	P1	0,90	0,90	0
V24	P28	2,79	2,06	-26
	P25	2,53	2,05	-19
	P21	1,28	1,15	-10
	P18	1,14	0,90	-21

Fonte: adaptado Silva (2017, p. 76)

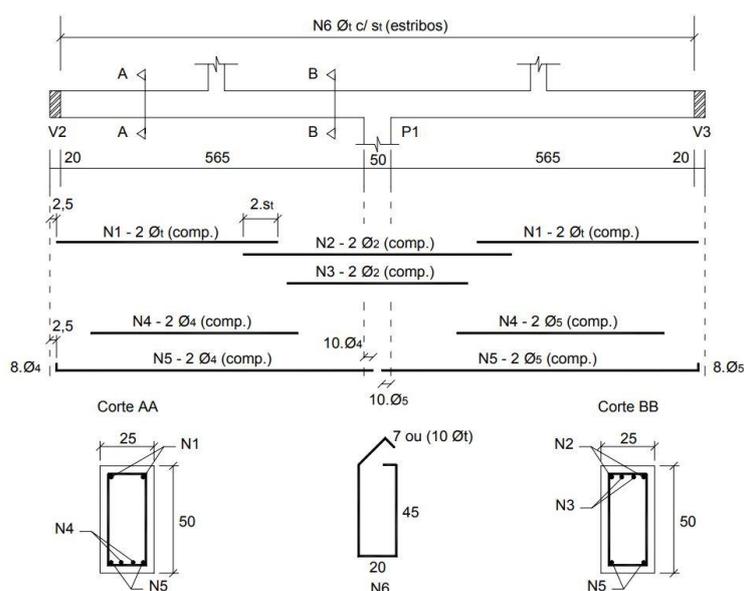
Silva (2017) conclui que depois de aplicado o coeficiente de redistribuição o aumento das seções de aço para os momentos positivos obtiveram acréscimo, porém não relevantes em relação ao dimensionamento sem tal consideração. Já as armaduras calculadas para os momentos fletores negativos receberam considerável diminuição ainda atendendo o prescrito em norma.

A variação no consumo de aço foi de 742,1 kg para 682,2 kg e de concreto apenas -0,2 m<sup>3</sup>, onde se verificou uma economia de 8,07% nas vigas. Nota-se ainda que o coeficiente de estabilidade global  $\gamma_z$ , após a redistribuição, permaneceu abaixo de 1,10, assim a estrutura continuou classificada como de nós fixos.

#### 2.4.4 Fontes (2005)

Fontes (2005) realizou a análise estrutural e dimensionamento de uma viga de seção retangular, indicada na Figura 13, por meio da análise linear sem e com redistribuição de esforço.

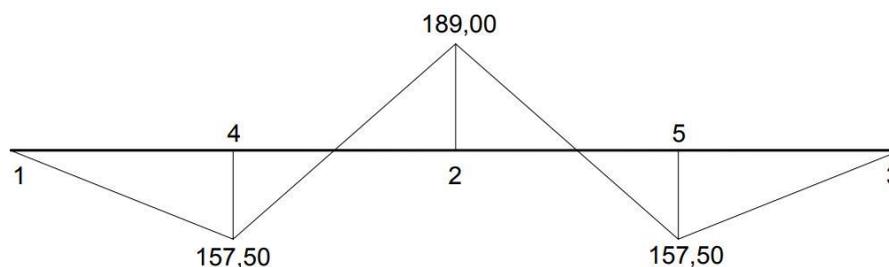
Figura 13 - Detalhamento da viga V1



Fonte: Fontes (2005, p. 51)

Determinados os esforços à flexão da viga analisada, obtidos na análise linear, Fontes (2005), encontrou o diagrama de momento fletor, disposto na Figura 14, e em seguida determinou a armadura necessária para cada seção, visível na Tabela 7.

Figura 14 - Momentos de cálculo para análise linear (kNm)



Fonte: Fontes (2005, p. 52)

Tabela 7 - Armadura determinada para cada seção

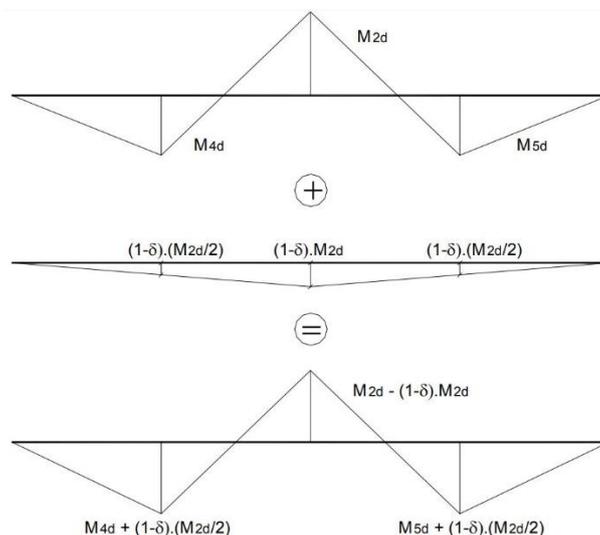
	$M_d$ (kNm)	$x/d$	$A_s$	$\phi$ mm
Seção 4 e Seção 5	157,5	0,276	8,85	16
Seção 2	189	0,341	10,94	20

Fonte: Adaptado de Fontes (2005, p. 52)

Feito a análise linear, Fontes (2005) realizou a análise linear com redistribuição de momento, onde o primeiro passo é calcular o coeficiente de redistribuição  $\delta$  que iguala os momentos das seções 2, 4 e 5, a partir da soma

dos diagramas calculados na análise linear com o diagrama de momentos multiplicados pelo coeficiente de redistribuição, indicados na Figura 15.

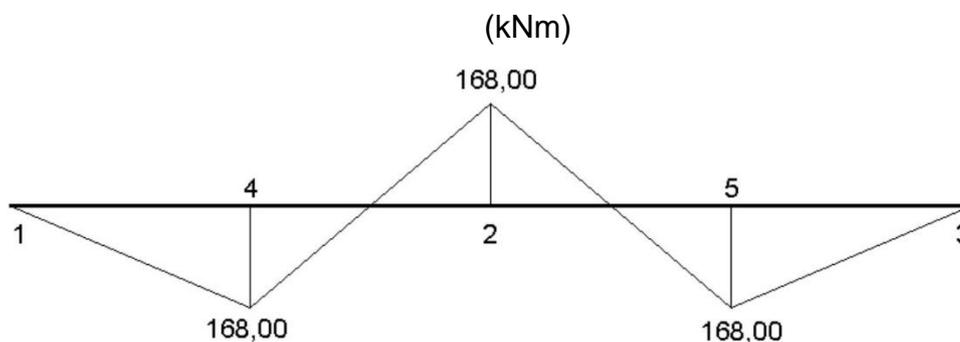
Figura 15 - Soma de diagramas para igualar os momentos do apoio e dos vãos



Fonte: Fontes (2005, p. 57)

Feito a redistribuição são encontrados novos valores de momentos fletores máximos, Figura 16.

Figura 16 - Momentos fletores de cálculo para análise linear com redistribuição



Fonte: Fontes (2005, p. 58)

Considerando então os novos momentos à flexão da viga, Fontes (2005) determinou as armaduras das seções 2, 4 e 5, tabela 3. Para que posteriormente indicar se houve redução na armadura da seção transversal da viga dimensionada.

Tabela 8 - Armadura com redistribuição determinada para cada seção

	$M_d(kNm)$	$x/d$	$A_s$	$\phi mm$
Seção 4, Seção 5 e Seção 2	168	0,297	9,53	20

Fonte: adaptado de Fontes (2005, p. 59)

Verificou-se também o valor de  $\delta$  para  $f_{ck} \leq 35MPa$ :

$$\delta \geq 0,44 + 1,25 * x/d = 0,44 + (1,25 * 0,297) = 0,81$$

Observando, que  $\delta$  está acima do limite estabelecido pela relação  $x/d = 0,297$  e acima do limite de 0,75, estabelecido pela NBR6118. Portanto, pode ser utilizar o coeficiente de redistribuição.

Sendo assim, Fontes (2005) conclui que com a análise linear o consumo de aço foi de 127,09kg. Já com a análise com redistribuição o consumo de aço foi de 126,50kg, isto é, não houve uma redução significativa em relação a análise linear. Entretanto, para este exemplo, que a economia em termos de consumo de armadura é irrisória com a apenas 0,46% de redução, a vantagem está em conseguir um detalhamento mais equilibrado, e teria grande utilidade em projetos de grande escala, uma vez que, evitaria o congestionamento de armaduras nos apoios.

#### 2.4.5 Fontes e Pinheiro (2005)

FONTES e PINHEIRO (2005) exemplificaram dentro de um artigo sobre análise linear com redistribuição e análise plástica de vigas de edifícios a gama de possibilidades para análise estrutural conforme a Tabela 9.

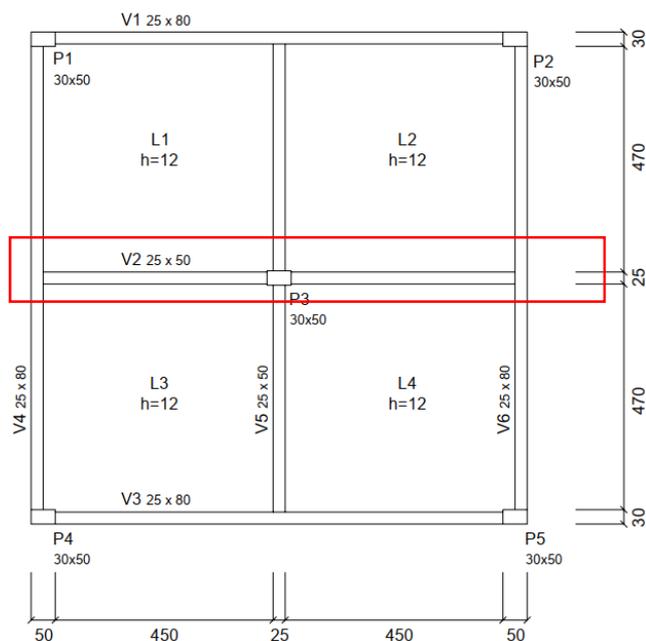
Tabela 9 - Tipos de análise estrutural e suas aplicações

Análise	Verificação
Linear	ELU* e ELS
Linear com redistribuição	ELU
Plástica	ELU
Não-linear	ELU e ELS
Através de modelos físicos	ELU e ELS
*se garantida a ductilidade dos elementos estruturais	

Fonte: Fontes; Pinheiro (2005; p. 5)

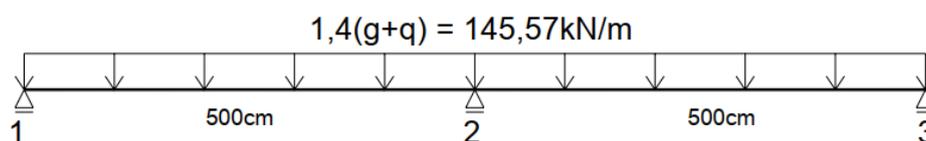
Discorreram com especial interesse sobre a combinação de seções T com a redistribuição de momentos em vigas, aplicando o mencionado em uma viga de pavimento V2 (Figura 17) e seu respectivo carregamento (Figura 18).

Figura 17 - Pavimento ao qual pertence a viga V2



Fonte: Fontes; Pinheiro (2005, p. 6)

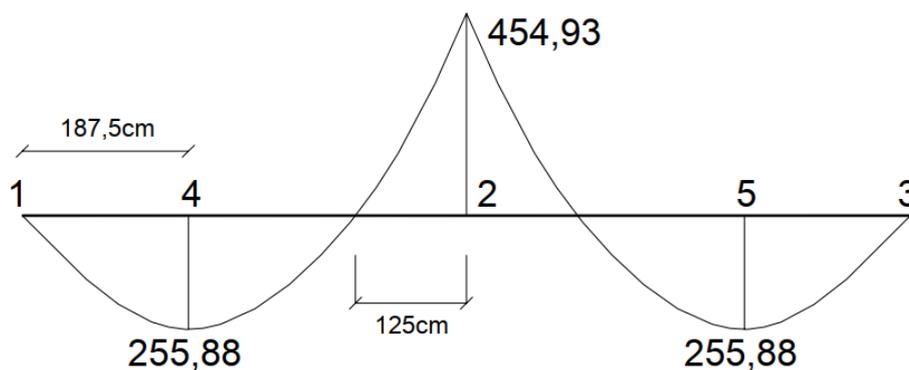
Figura 18 - Esquema estático da V2



Fonte: Fontes; Pinheiro (2005, p. 6)

Procedendo com a análise linear para uma seção retangular obteve-se o seguinte diagrama de momento fletor (Figura 19), onde se observa o momento do apoio na seção 2 (Pilar P3), em módulo, é bem maior que os momentos máximos nos vãos.

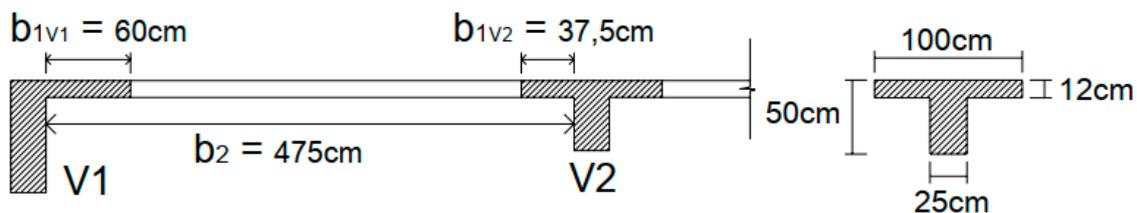
Figura 19 - Momentos de cálculo para análise linear (kNm)



Fonte: Fontes; Pinheiro (2005, p. 8)

Havendo interesse em se aproveitar ao máximo a seção T, com dimensões atendendo ao limites normativos (Figura 20), definiu-se a seção transversal de projeto.

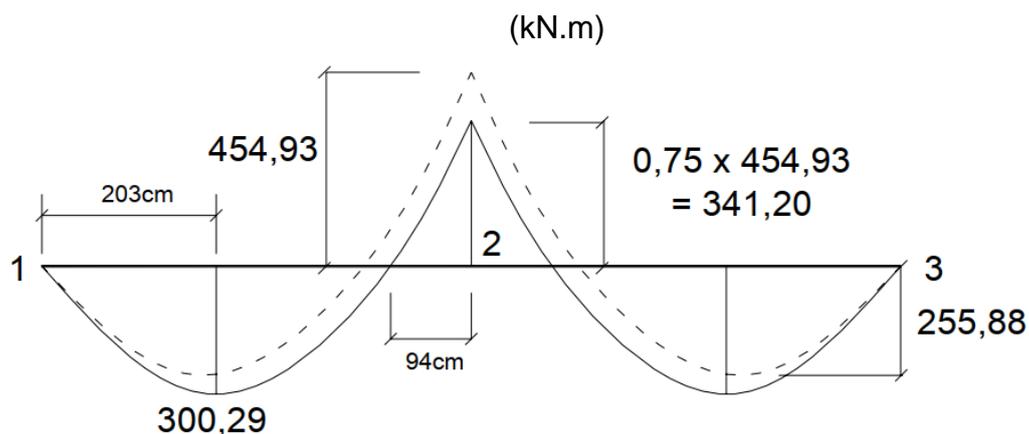
Figura 20 – Verificação das exigências da NBR 6118 e seção T resultante com largura da mesa colaborante.



Fonte: Fontes; Pinheiro (2005, p. 9)

Tomou-se para redistribuição de esforço, sob análise linear, o valor limite para estrutura de nós fixos, ou seja,  $\delta = 0,75$ , o que resultou no diagrama de momento fletor da Figura 21.

Figura 21 - Momentos de cálculo para a análise linear com redistribuição



Fonte: Fontes; Pinheiro (2005, p. 10)

Processado o dimensionamento, tem-se os dados da Tabela 10 que imprime o consumo de aço para cada análise feita, onde, dentro do escopo deste, observa-se nas linhas 2, 3 e 4 os dados relevantes.

Tabela 10 - Consumo de aço - Seção T versus retangular

Tipo de Análise	Tipo Seção transversal	Consumo (kg)	Diferença em relação à análise linear com seção retangular (%)
Linear	Retangular	278,2	0
Linear	T	259,7	-6,7
Linear com redistribuição ( $\delta = 0,75$ )	T	241,5	-13,2
Plástica ( $\delta = 0,69$ )	T	242,9	-12,7
Plástica ( $\delta = 0,75$ )	T	237,0	-14,8

Fonte: Fontes; Pinheiro (2005, p. 13)

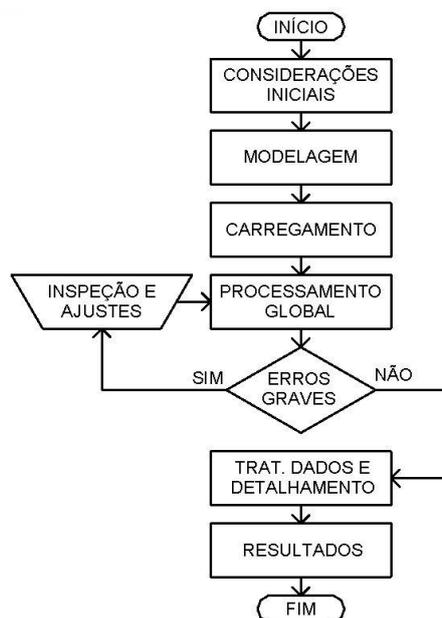
De acordo com FONTES (2005), vigas de seção retangular, podem apresentar irrisória economia de armadura, a inclusão da análise com redistribuição de esforços, restando como vantagem apenas a forma da disposição das armaduras dentro dos elementos estruturais. Já a consideração de vigas com seção T, pode implicar considerável economia potencializada pela redistribuição dos esforços.

### 3 METODOLOGIA

Estão apresentados, a seguir, o projeto do estudo com as características relevantes consideradas na aplicação da proposta, algumas exposições sobre o software utilizado, os carregamentos e suas combinações e também o procedimento para inclusão da redistribuição de esforços.

A Figura 22 elucida a sequência de etapas idealizadas no desenvolvimento do presente trabalho.

Figura 22 - Etapas para o desenvolvimento deste trabalho



Fonte: próprio autor (2022).

#### 3.1 Projeto Analisado

O projeto que foi analisado localiza-se no Centro da cidade de Alegrete/RS, na Av. Dr. Eurípedes Brasil Milano, consiste em uma edificação para habitação coletiva, composta por 5 pavimentos onde o pavimento térreo, em pilotis, é destinado à guarda de veículos e os pavimentos nível 2 ao nível 5, classificados como tipo, têm dois apartamentos por andar. As plantas baixas são apresentadas no Anexo 1 e Anexo 2. O edifício em questão possui pé-direito estrutural de 2,80m, indicado nos cortes verticais constantes no Anexo 3 e Anexo 4.

### 3.2 Características Estruturais e de Lançamento

Obedecendo o prescrito na norma NBR 6118(2014), a estrutura foi lançada de forma a se obter vãos com dimensões próximas à medida do possível, em consonância com o projeto arquitetônico de forma a respeitar as vagas de garagem, ponto de maior limitação do posicionamento dos pilares, neste caso. Ao mesmo tempo, evitar interferência com outros sistemas.

O concreto dosado em central e sua resistência característica à compressão aos 28 dias,  $f_{ck} = 25MPa$ , as demais características mecânicas e as dimensões dos elementos estruturais respeitaram os valores indicados na NBR 6118(2014).

Para fins de dimensionamento a fundação foi do tipo sapata isolada sobre solo pedregulhoso com tensão admissível,  $\sigma_{adm} = 0,3MPa$ , sendo adotada a ligação com a supraestrutura como engastada.

### 3.3 Software Utilizado

Para agilizar o dimensionamento, buscando assemelhar-se ao fluxo de trabalho praticado nos escritórios de estruturas atuais, utilizou-se para o trabalho o softwares TQS, o qual é voltado para a elaboração de projetos estruturais em concreto armado moldado in loco e concreto pré-moldado, englobando as etapas de lançamento, análise estrutural, dimensionamento e detalhamento dos elementos. Possui um sistema gráfico de entrada de dados, associado à análise da estrutura em um modelo de pórtico espacial, e diversos recursos de dimensionamento e detalhamento dos elementos, de acordo com a NBR 6118(2014), bem como interoperabilidades com demais softwares BIM.

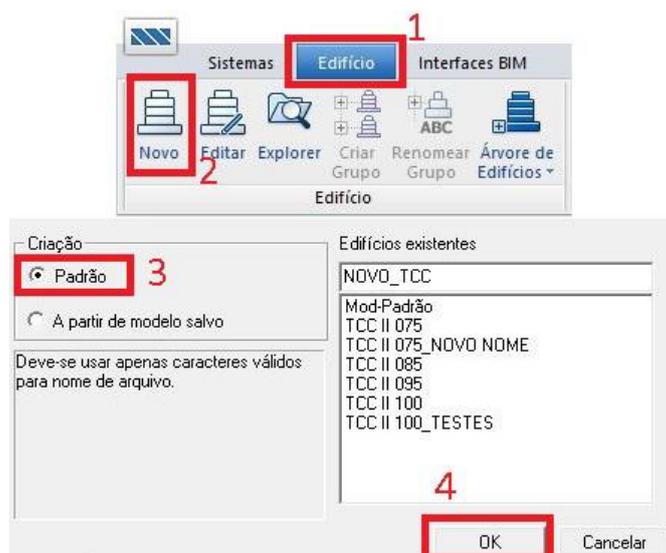
### 3.4 Aplicação no software

Previamente aos passos da modelagem, dimensionamento e detalhamento dentro do software, vale-se ressaltar que a estratégia adotada para resolução do edifício foi do caso sem redistribuição de esforços para o caso de máxima redistribuição possível de esforços, ou seja, primeiramente resolveu-se com  $\delta = 1,0$  a estrutura, e posteriormente, com  $\delta = 0,95$  e com  $\delta = 0,75$ , observando o mencionado no item 2.3.

### 3.4.1 Criação do edifício

Na aba “Edifício” da tela de abertura do TQS, selecionou-se “Novo”. Em seguida, pode-se escolher entre criar a partir de um “padrão” ou “de algum modelo salvo”, para o caso, optou-se por “Padrão” como ilustra a Figura 23.

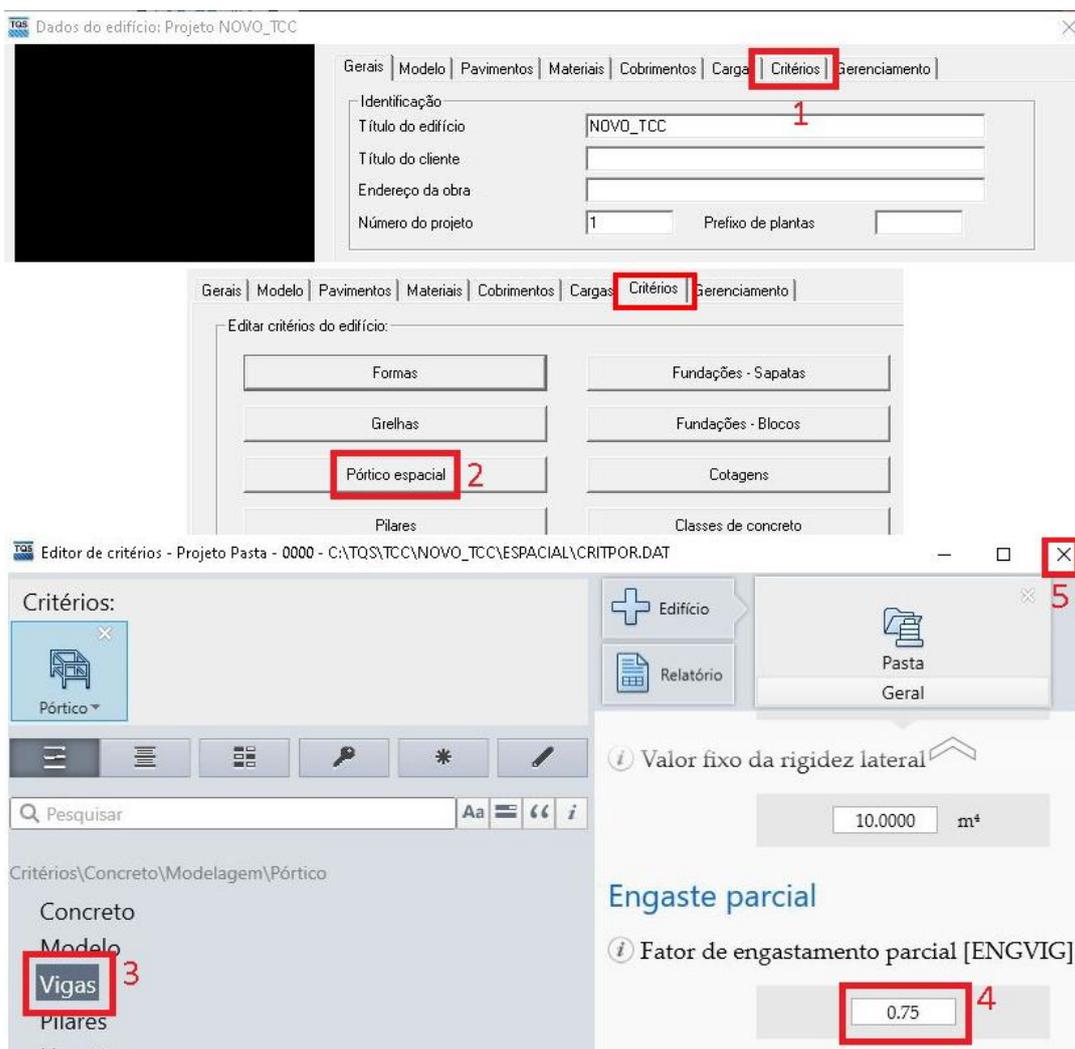
Figura 23 - Criação de novo edifício



Fonte: próprio autor (2022).

O item principal observado nesse momento localiza-se na aba “Critérios” da janela “Dados do edifício”, acessando-se o botão “Pórtico espacial” onde foi incluída a redistribuição de esforços no campo disponível para alteração do tópico “Engastamento parcial”, sob o item “Vigas”. (Figura 24)

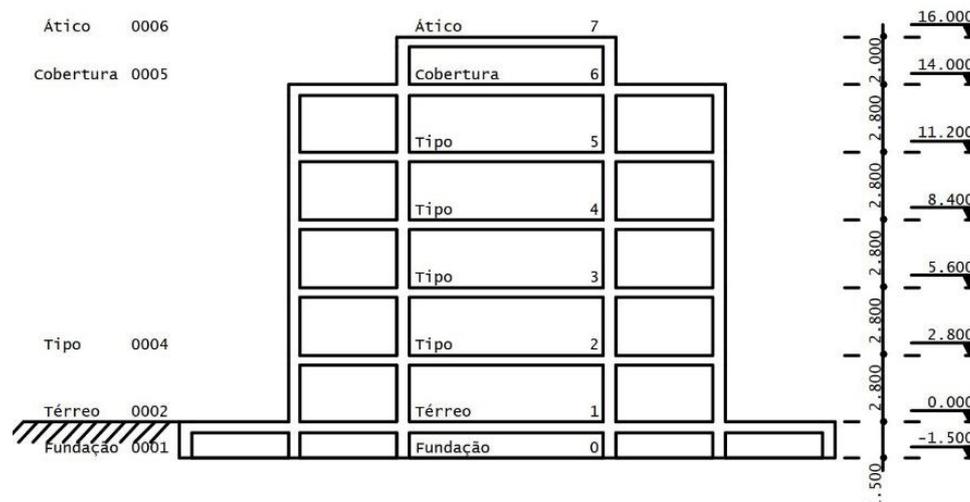
Figura 24 - Adicionando critério de redistribuição de esforços para o pórtico espacial



Fonte: próprio autor (2022).

Pode-se ter um prévia das característica verticais adicionadas do edifício logo após a criação dos pavimentos. A Figura 25 mostra o corte esquemático resultante da criação dos pavimentos para modelagem dos elementos da estrutura.

Figura 25 - Corte esquemático TQS



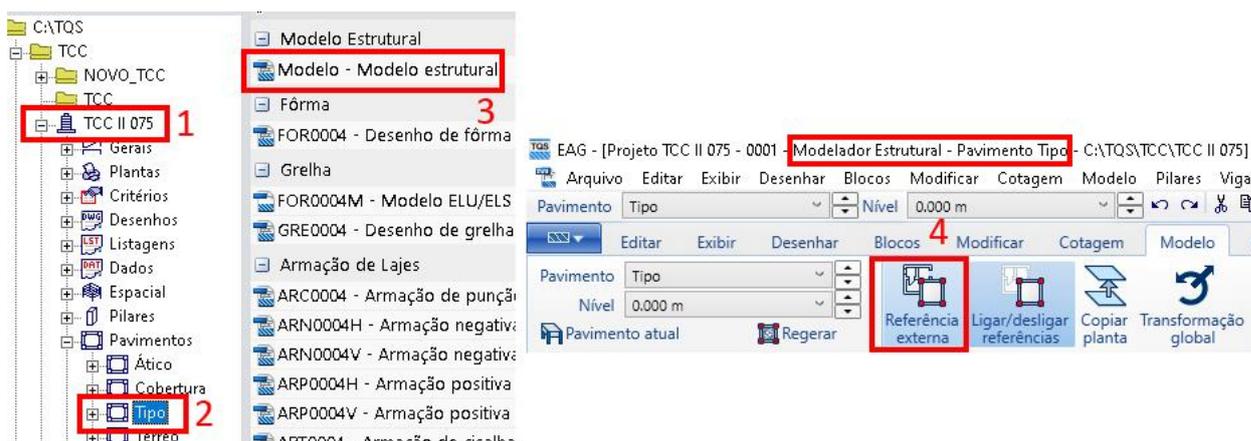
Fonte: próprio autor (2022).

### 3.4.2 Modelagem

A primeira observação, antes da modelagem propriamente dita, foi a revisão e organização das plantas da arquitetura, como, por exemplo, a limpeza de informações irrelevantes para tal procedimento.

Dito isso, para inserção da arquitetura como referência externa no ambiente de modelagem, procedeu-se com os passos mostrados na Figura 26.

Figura 26 - Acessando modelador estrutural e inserindo referência externa

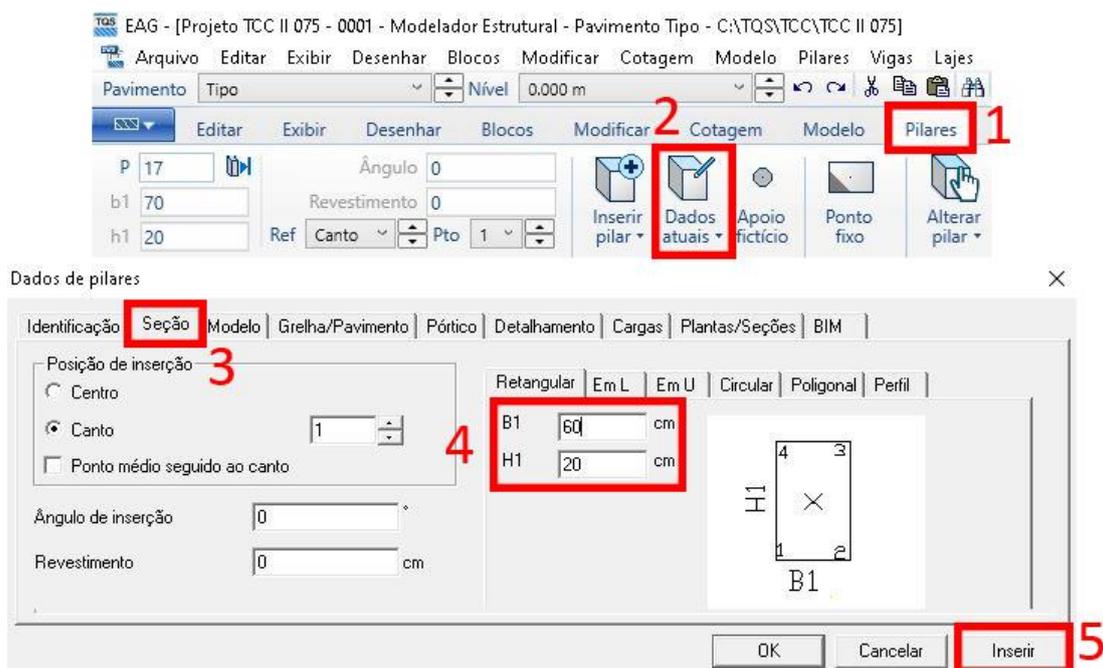


Fonte: próprio autor (2022).

#### 3.4.2.1 Pilares

As configurações dos pilares foram acessadas conforme Figura 27.

Figura 27 - Modelagem de pilar com ajuste da seção



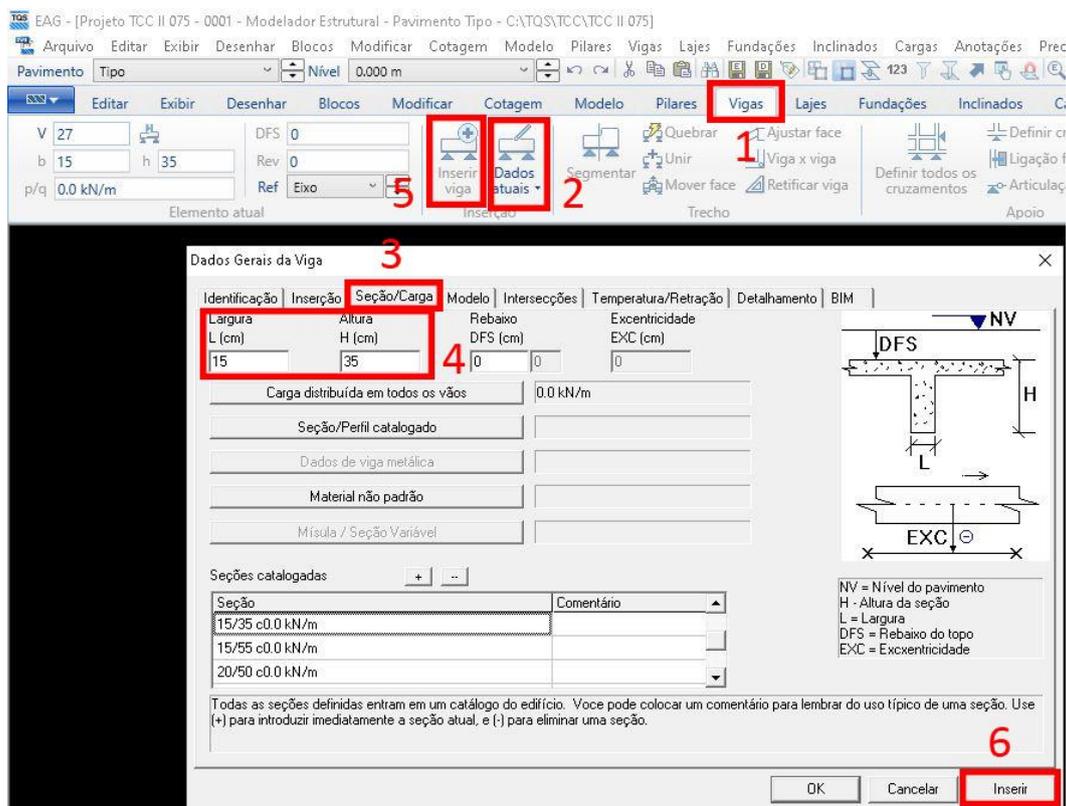
Fonte: próprio autor (2022).

### 3.4.2.2 Vigas

As vigas foram modeladas da seguinte forma: sempre a partir do eixo, quando horizontais, com ponto inicial à esquerda e ponto final à direita e, quando verticais, com ponto inicial abaixo e ponto final acima, a fim de padronizar e organizar os diagramas e a prancha de fôrmas.

A Figura 28 demonstra uma criação típica de viga, onde se acessou, primeiramente, sob a aba "Vigas", o botão "Dados atuais" e se configurou as seções transversais dos elementos.

Figura 28 - Modelagem de vigas com inserção de dados de seção



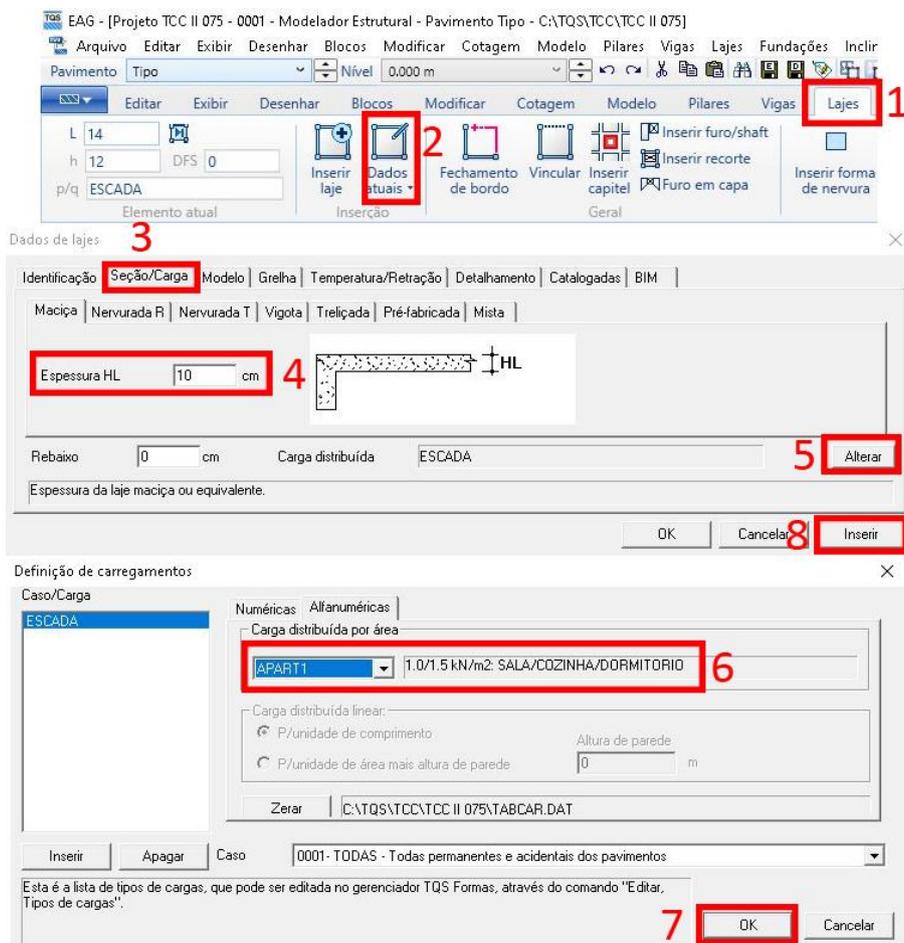
Fonte: próprio autor (2022).

### 3.4.2.3 Lajes

A inserção das lajes foi subsequente à das vigas e teve os parâmetros principais dados como mostra a Figura 29, semelhante à inserção das vigas, porém já com a inclusão das cargas acidentais.

Na Figura 29, vê-se a alteração da carga acidental de escada (5) para carga acidental de ambientes internos ambientes como sala, cozinha e dormitório (6).

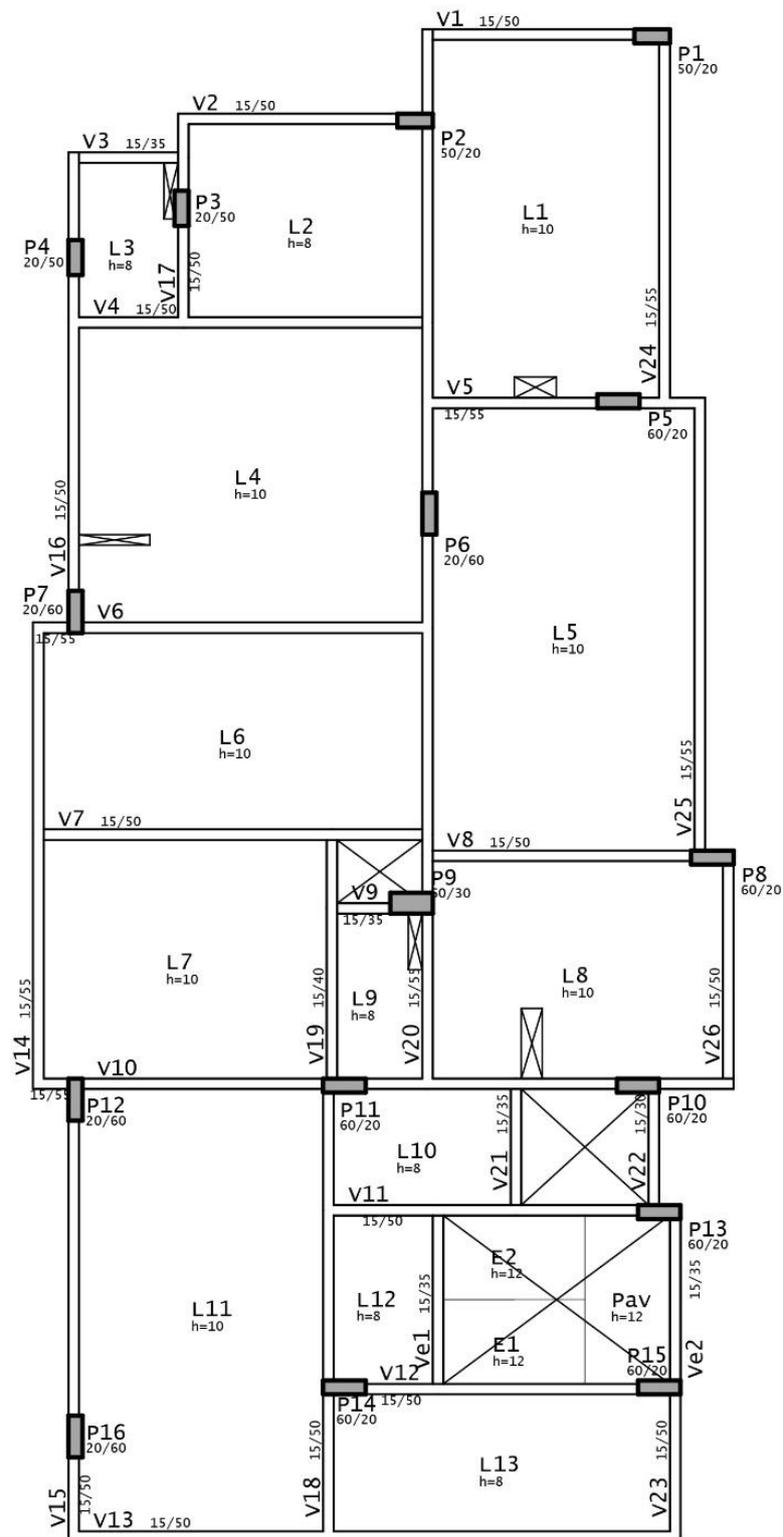
Figura 29 - Modelagem de lajes com definição de carregamentos



Fonte: próprio autor (2022).

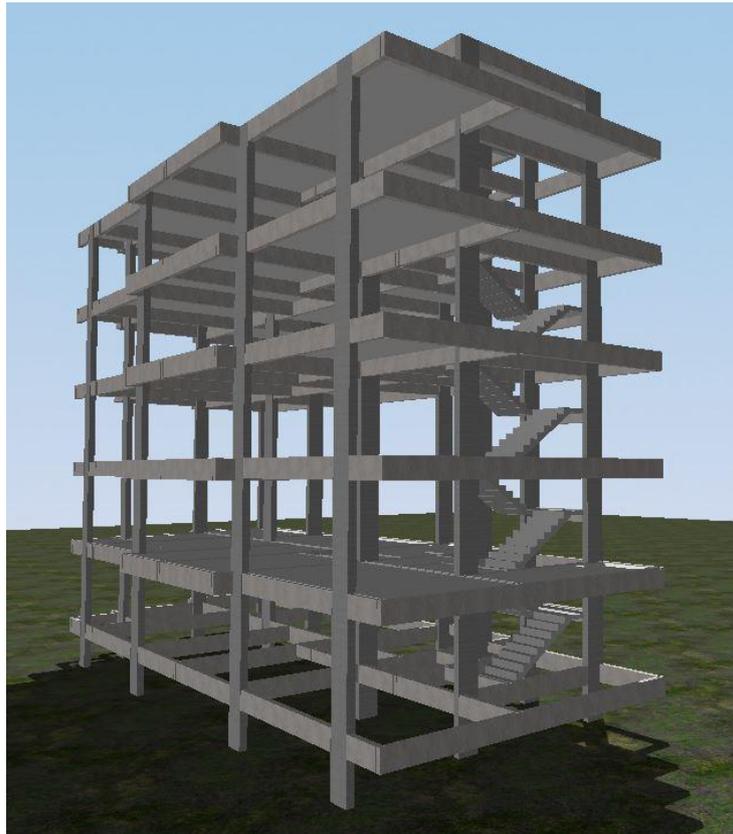
Após a modelagem de todos os elementos estruturais, chegou-se a seguinte planta de fôrma para o pavimento tipo (Figura 30), o que se pôde também visualizar em 3D automaticamente pelo TQS (Figura 31).

Figura 30 - Planta de fôrma do pavimento tipo



Fonte: próprio autor (2022).

Figura 31 - Visualização 3D da estrutura



Fonte: próprio autor (2022).

### 3.4.3 Carregamentos

#### 3.4.3.1 Carregamentos Horizontais

As cargas horizontais consideradas para o dimensionamento foram o vento e o desaprumo com suas devidas ponderações, a localização da edificação constante no item 3.1. A norma de referência NBR 6123(1988). Os dados foram calculados automaticamente para os seguintes dados de entrada:

- Velocidade básica:  $V_0 = 45m/s$
- Vento aplicado nas direções  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ ;
- Fator topográfico: terreno plano ou fracamente acidentado:  $S1=1,0$ ;
- Rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno:

Fator  $S2$ :

- Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas;
- Classe A: estabelecido diretamente pelo software com base na geometria.
- Fator estatístico  $S_3=1,00$ : Grupo 2- Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.

Pode-se verificar os valores equivalentes ao esperado na Figura 32 para a situação de vento. Acessando a aba “Cargas” dentro do menu “Editar edifício”, subitem “Vento”. O cálculo dos coeficientes de arrasto para os ângulos de incidência 0, 90, 180 e 270 graus.

Figura 32 - Dados para cálculo da ação do vento pelo TQS

Ângulo	C.A.	Def Cot	Cot ini	
1	90	0.87	Não	0
2	270	0.87	Não	0
3	0	1.22	Não	0
4	180	1.22	Não	0

Fonte: próprio autor (2022).

Verificou-se também os efeitos de desaprumo causados pelas forças atuantes horizontais da edificação. Segundo a NBR 6118(2014) a consideração das ações de vento e desaprumo deve ser realizada nos seguintes circunstâncias:

- a) Quando 30% da ação do vento for maior que a ação do desaprumo, considera-se somente a ação do vento;
- b) Quando a ação do vento for inferior a 30 % da ação do desaprumo, considera-se somente o desaprumo respeitando a consideração de  $\theta_{1\text{mín}}$ ;

- c) nos demais casos, combina-se a ação do vento e desaprumo, sem necessidade da consideração do  $\theta_{1\text{mín}}$ . Nessa combinação, admite-se considerar ambas as ações atuando na mesma direção e sentido como equivalentes a uma ação do vento, portanto como carga variável, artificialmente amplificada para cobrir a superposição.

Ainda segundo a mesma norma a comparação pode ser feita com os momentos totais na base da construção e em cada direção e sentido da aplicação da ação do vento, com desaprumo calculado com  $\theta_a$ , sem a consideração do  $\theta_{1\text{mín}}$ . O desaprumo não precisa ser considerado para os ELS.

### 3.4.3.2 Carregamentos Verticais

Os valores correspondentes às cargas que serão utilizadas no projeto do presente trabalho serão as recomendadas na NBR 6120(2019), sendo elencadas a seguir:

#### 3.4.3.2.1 Lajes do Pavimento Tipo

As cargas sobre as lajes do pavimento tipo foram divididas em ações permanentes e variáveis em função da utilização.

- Ações permanentes:
  - Revestimentos de pisos espessura 5cm:  $1,0\text{kN}/\text{m}^2$
- Ações variáveis:
  - Corredores de uso comum e escadas:  $q_k = 3\text{kN}/\text{m}^2$
  - Dormitórios, sala, copa, cozinha, sanitários e corredor:  $q_k = 1,5\text{kN}/\text{m}^2$
  - Área de serviço:  $q_k = 2\text{kN}/\text{m}^2$

#### 3.4.3.2.2 Lajes da Cobertura

- Ações permanentes:
  - Telhado e pisos:  $g_{k,piso} = 0,7\text{ kN}/\text{m}^2$
- Ações variáveis:
  - Forros – sem acesso a pessoas:  $q_k = 0,5\text{ kN}/\text{m}^2$

### 3.4.3.2.3 Laje com Paredes Apoiadas

- Alvenaria padrão sobre laje: núcleo com blocos de concreto celular autoclavado espessura 12,5cm com revestimento argamassado de 2cm por face, altura 2,7m:

$$\circ g_{par,laje} = 1,6kN/m^2 * 2,7m = 4,3kN/m * L_{par}/A_{laje}$$

- Alvenaria mista sobre laje com revestimento cerâmico e argamassado em faces opostas: igual alvenaria padrão sobre laje acrescida a carga do revestimento tipo porcelanato em uma das face até a altura de 2,6m:

$$\circ g_{par,laje,cer} = 4,3kN/m + 23kN/m^3 * 2,6m * 0,006m = 4,7kN/m * L_{par}/A_{laje}$$

### 3.4.3.2.4 Elementos Estruturais

O peso próprio dos elementos estruturais foi calculado diretamente pelo software em função dos volumes e dos pesos específicos dos materiais utilizados.

Onde:

- Concreto simples:  $\gamma_{concreto} = 24kN/m^3$
- Concreto armado:  $\gamma_{conc\_arm} = 25kN/m^3$

### 3.4.3.2.5 Vigas sob Paredes Comuns

- Alvenaria padrão: núcleo com blocos de concreto celular autoclavado espessura 12,5cm com revestimento argamassado de 2cm por face, altura 2,4m:

$$\circ g_{par,padrão} = 1,6kN/m^2 * 2,3m = 3,7kN/m$$

- Alvenaria mista com revestimento tipo porcelanato e argamassado em faces opostas: igual alvenaria padrão acrescida a carga do revestimento tipo porcelanato em uma das face até a altura de 2,6m:

$$\circ g_{par,cer} = 3,7kN/m + 23kN/m^3 * 2,6m * 0,006m = 4,1kN/m$$

### 3.4.3.2.6 Vigas sob Paredes Especiais

Conforme o projeto arquitetônico, as paredes estão localizadas nas fachadas norte (Anexo 5) e oeste (Anexo 6), nas salas dos apartamentos.

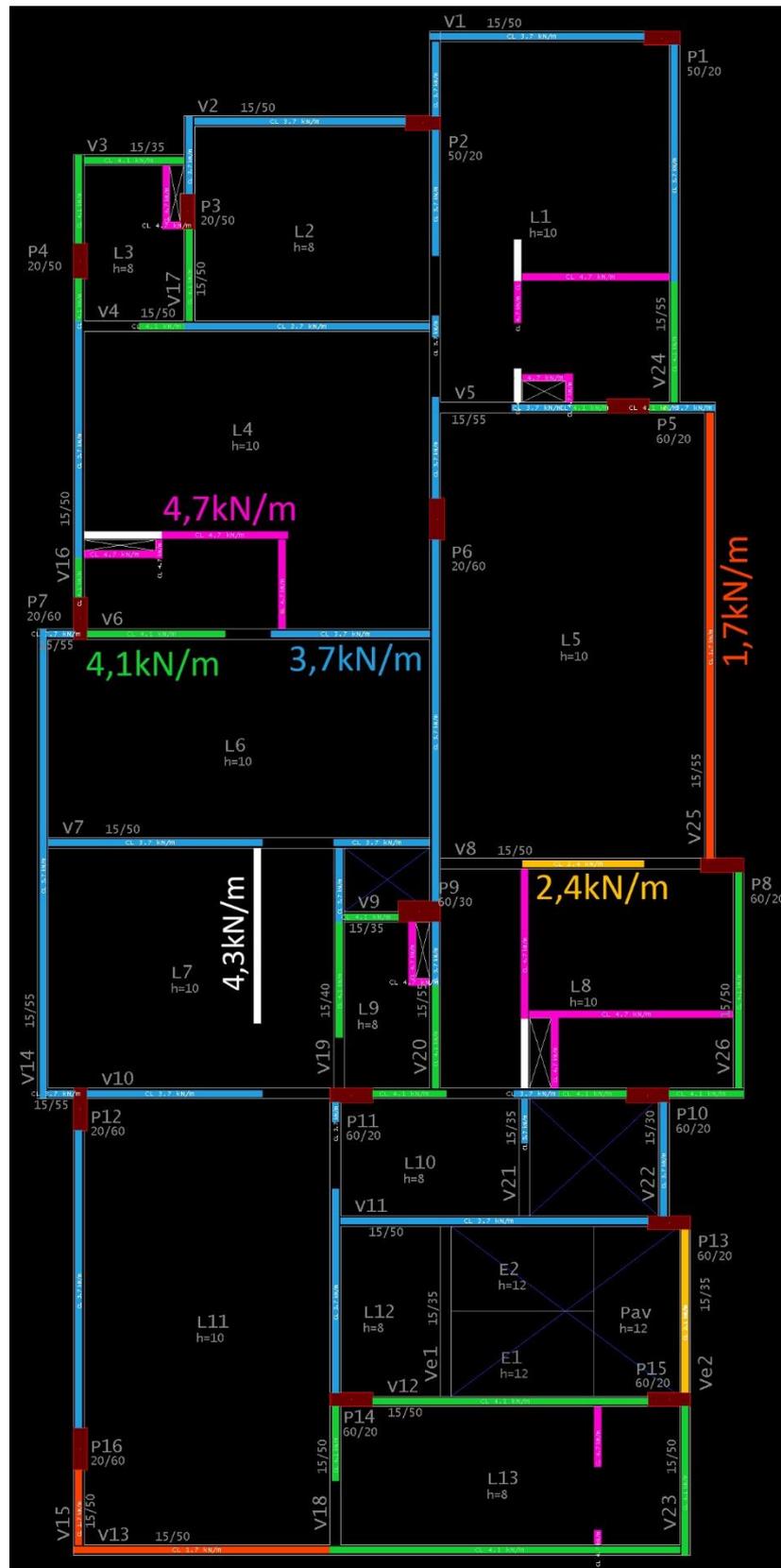
- Características geométricas:
  - Alvenaria padrão:
    - $h = 0,55 \text{ m}$
    - $e_{bloco} = 12,5 \text{ cm}$
    - $e_{revst} = 2 \text{ cm}$
    - $g_{k,esp1} = 2 \text{ kN/m}^2 * 0,55 \text{ m} = 1,1 \text{ kN/m}$
  - Fechamento de vidro temperado e alumínio:
    - $e = 10 \text{ mm}$
    - $h = 1,70 \text{ m}$
    - Caixilhos alumínio:  $0,2 \text{ kN/m}^2$
    - Vidro plano:  $26 \text{ kN/m}^3$
    - $g_{k,esp2} = 26 \text{ kN/m}^3 * 0,01 \text{ m} * 1,7 \text{ m} + 0,2 \text{ kN/m}^2 = 0,6 \text{ kN/m}$
  - Total:  $g_{k,esp} = g_{k,esp1} + g_{k,esp2} = 1,7 \text{ kN/m}$

#### 3.4.3.2.7 Pavimentos em Pilotis

Sendo para guarda de veículos seus elementos estruturais foram carregados conforme seção 6.6 da NBR 6120(2019) – Tabela 13 – Categoria I.

Após a aplicação de todos os carregamentos na estrutura chegou-se a planta com as cargas como exemplifica a Figura 33 com os carregamentos do pavimento tipo.

Figura 33 - Carregamentos atuantes no pavimento tipo, exceto nas lajes

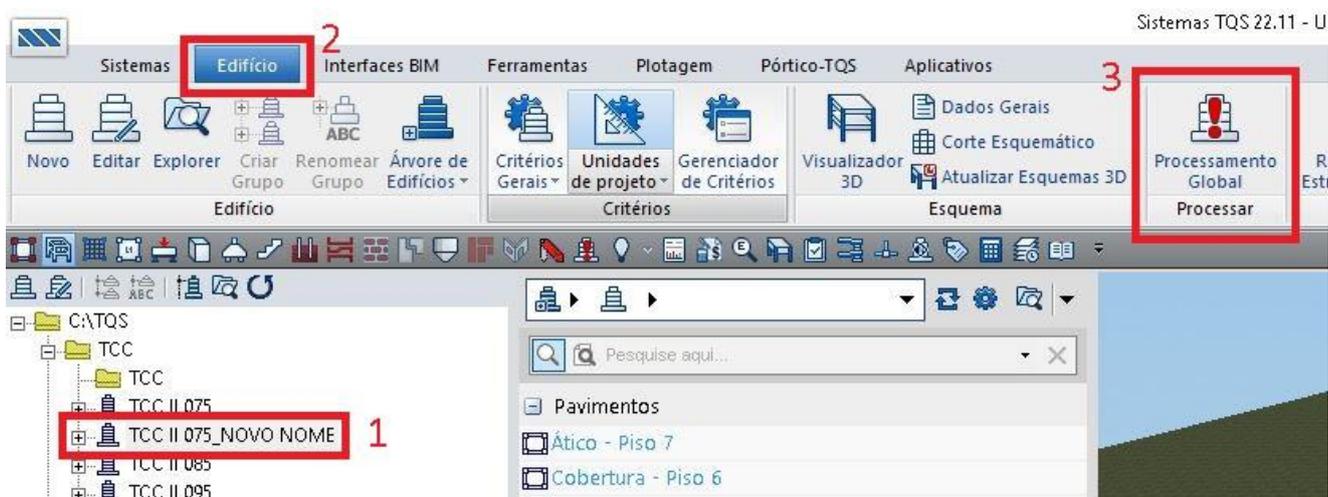


Fonte: próprio autor (2022).

### 3.4.4 Processamento Global

Imediatamente após a modelagem dos elementos e lançamento das cargas de todos os pavimentos, prosseguiu-se com o processamento global da estrutura (Figura 34). Tendo o edifício objeto selecionado (1), na aba “Edifício” dentro do tópico “Processar”, com um clique simples em “Processamento Global”.

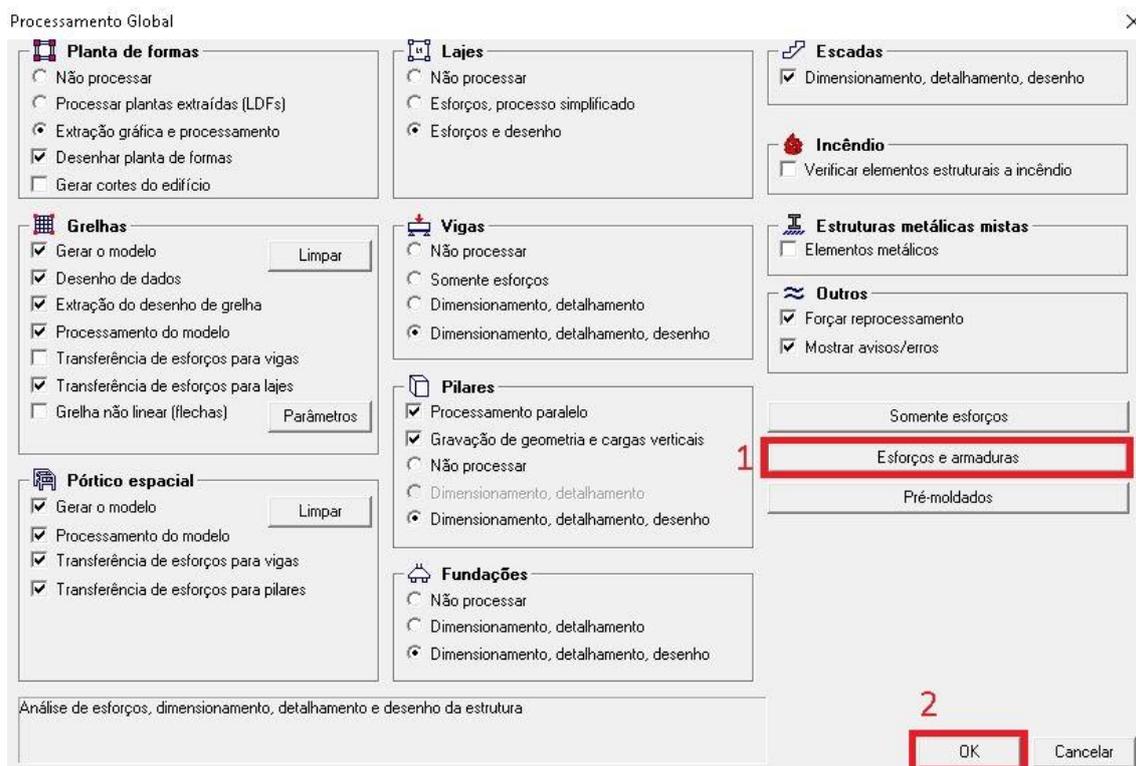
Figura 34 - Acessando o processamento global da estrutura



Fonte: próprio autor (2022).

Abriu-se a janela “Processamento Global” onde se optou pela ação de processar os esforços e armaduras (1) e em seguida clicou-se em (2).

Figura 35 - Janela de configuração do Processamento Global da estrutura



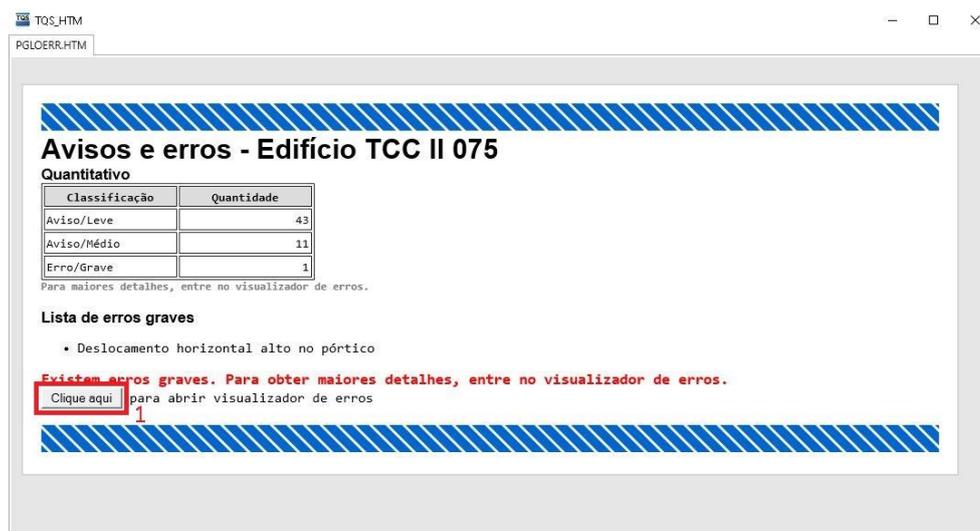
Fonte: próprio autor (2022).

Encerrado o processamento, iniciou-se automaticamente a janela da Figura 36, onde se verificou a necessidade de ajustes na estrutura. Os avisos classificavam-se como leves, médios ou graves.

Tentou-se dimensionar a estrutura com as seções previstas no projeto arquitetônico, situação que não houve solução possível devido a deslocamentos excessivos frente a ação do vento.

A Figura 36 é uma captura de tela do último aviso grave que foi solucionado no desenvolvimento deste trabalho. Havia um deslocamento elevado no pórtico, que foi contornado com a rotação de pilares para a direção crítica e ainda com aumento da inércia dos pilares nesta mesma direção, modificando-se algumas seções.

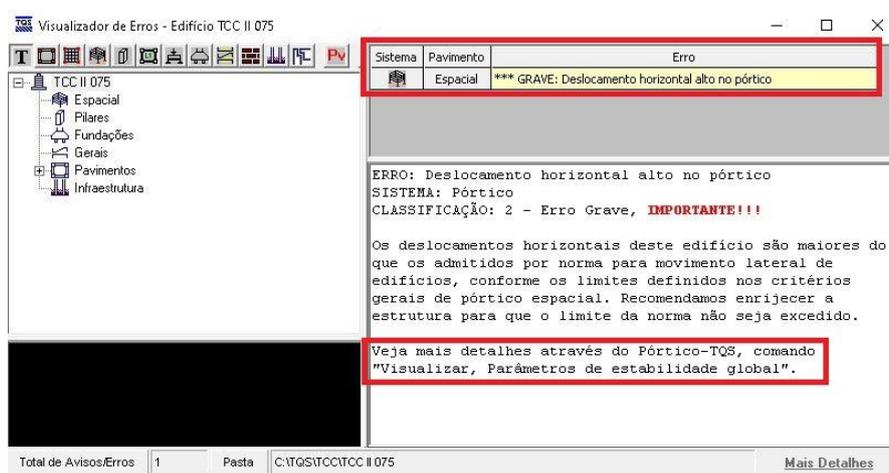
Figura 36 - Avisos e erros do processamento da estrutura



Fonte: próprio autor (2022).

Através das caixas de diálogo emitidas pelo software verificou-se com tranquilidade as questões pendentes na estrutura para suas soluções. A Figura 37 mostra um exemplo da qualidade das informações oferecidas, o que permite a tomada de decisão embasada e técnica por conta do projetista.

Figura 37 - Classificação dos erros graves e solução necessária



Fonte: próprio autor (2022).

Dado o que deveria ser contornado, modificou-se a estrutura, como já foi mencionado, e, mais uma vez, aplicou-se o processamento global, obtendo como resposta final o ilustrado na Figura 38.

Figura 38 - Processamento Global final - Avisos e erros

**Avisos e erros - Edifício TCC II 075**

**Quantitativo**

Classificação	Quantidade
Aviso/Leve	33
Aviso/Médio	8
Erro/Grave	0

Para maiores detalhes, entre no visualizador de erros.

**Lista de erros graves**  
Não existem erros graves.

[Clique aqui](#) para abrir visualizador de erros

Fonte: próprio autor (2022).

Diante do aviso de zero erros graves, passou-se à aba “Pórtico-TQS” e “Estabilidade global” para se verificar os valores obtidos para ELU e ELS, conforme Figura 39.

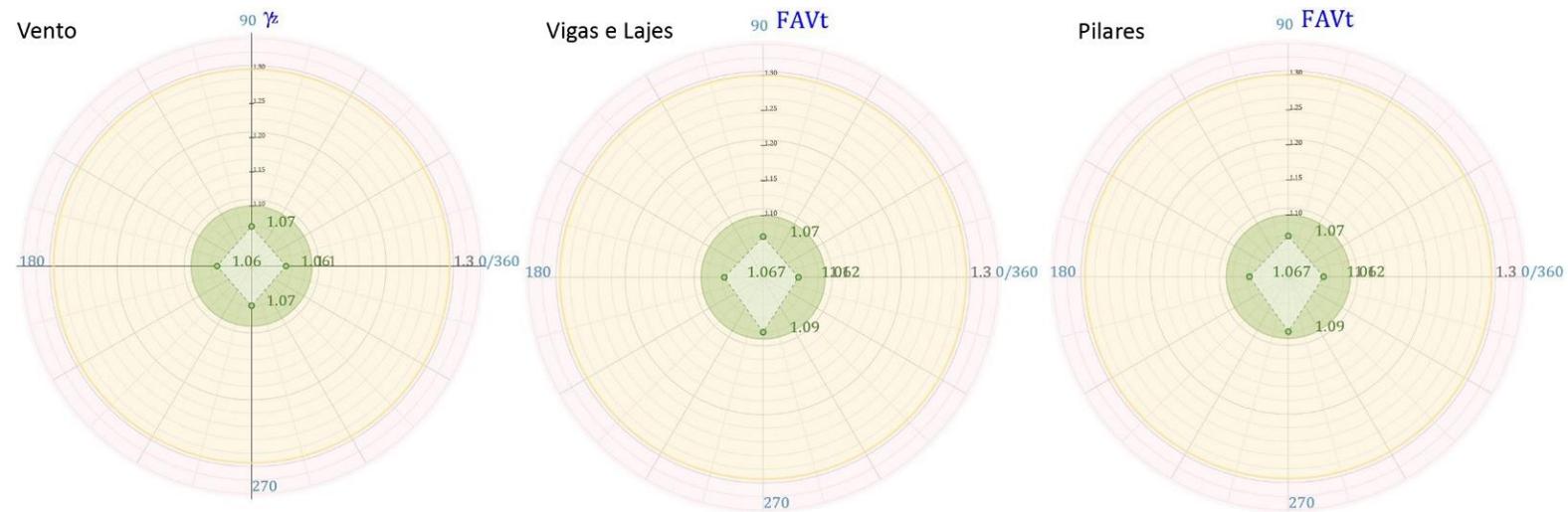
Figura 39 - Caminho de acesso à verificação da estabilidade global



Fonte: próprio autor (2022).

O parâmetro  $\gamma_z$ , atingiu valor máximo de 1,07 na direção 90-270 graus para ELU, com  $\delta = 0,75$  (Figura 40), o que confirmou a estrutura como de nós fixos.

Figura 40 - Caso simples de vento e combinações ELU para vigas, lajes e pilares,  $\delta = 0,75$



Fonte: próprio autor (2022).

O ELS também foi verificado para todos os valores de redistribuição de esforços propostos neste trabalho e os deslocamentos máximos no topo atendidos como estão apresentado nos resultados na (Tabela 16).

#### 4 RESULTADOS E COMPARAÇÕES

Após o dimensionamento, passou-se ao tratamento dos dados criados com organização de tabelas e gráficos via planilha eletrônica.

O resumo do estudo encontra-se na Tabela 11, disposta em colunas para 0%, 5% e 25% de redistribuição dos esforços, respectivamente, relacionadas com o consumo de aço, em kgf, para cada viga do pavimento tipo, o qual se replica quatro vezes na edificação.

A variação do consumo foi calculada com base nas colunas de cabeçalho “kgf+10%” de cada situação, sempre em relação  $\delta = 1,0$ , ou seja, sem redistribuição de esforços.

Observa-se que, no total de aço apresentado para cada viga, não foram descontadas armaduras referentes ao cisalhamento, à ancoragem, à suspensão, à torção, etc. Em outras palavras, corresponde ao total de aço necessário para a execução de cada viga.

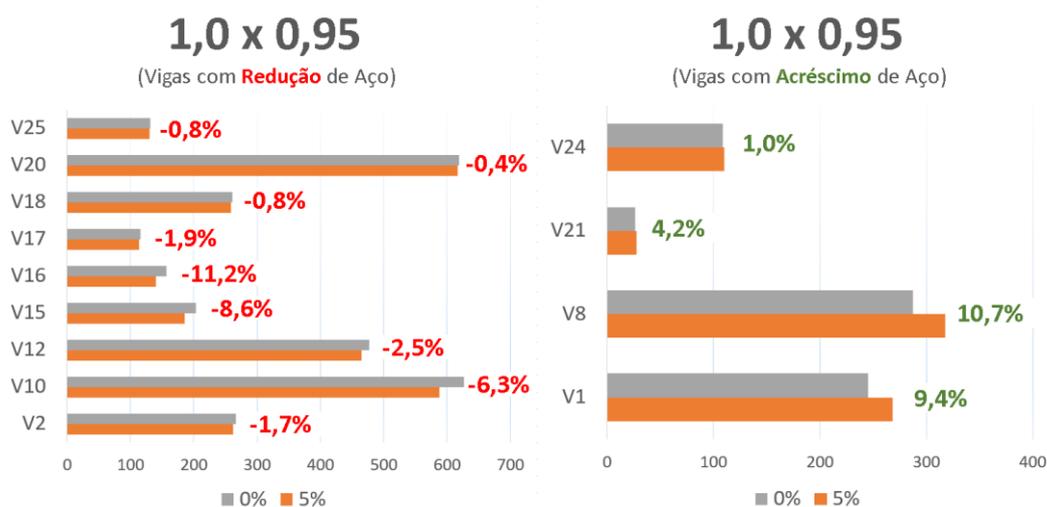
Tabela 11 - Resumo de aço por viga

Viga	$\delta = 1,0$		$\delta = 0,95$			$\delta = 0,75$		
	kgf	kgf+10%	kgf	kgf+10%	Variação	kgf	kgf+10%	Variação
V1	223	245	244	268	9,4%	195	215	-12,6%
V2	242	266	238	262	-1,7%	168	185	-30,6%
V3	21	23	21	23	0,0%	22	24	4,8%
V4	86	95	86	95	0,0%	108	119	25,6%
V5	233	256	233	256	0,0%	264	290	13,3%
V6	196	216	196	216	0,0%	196	216	0,0%
V7	126	139	126	139	0,0%	126	139	0,0%
V8	261	287	289	318	10,7%	267	294	2,3%
V9	113	124	113	124	0,0%	125	138	10,6%
V10	570	627	534	587	-6,3%	539	593	-5,4%
V11	170	187	170	187	0,0%	146	161	-14,1%
V12	434	477	423	465	-2,5%	327	360	-24,7%
V13	106	117	106	117	0,0%	106	117	0,0%
V14	200	220	200	220	0,0%	200	220	0,0%
V15	185	204	169	186	-8,6%	188	207	1,6%
V16	143	157	127	140	-11,2%	121	133	-15,4%
V17	105	116	103	113	-1,9%	103	113	-1,9%
V18	237	261	235	259	-0,8%	219	241	-7,6%
V19	140	154	140	154	0,0%	110	121	-21,4%
V20	563	619	561	617	-0,4%	558	614	-0,9%
V21	24	26	25	28	4,2%	25	28	4,2%
V22	35	39	35	39	0,0%	35	39	0,0%
V23	136	150	136	150	0,0%	136	150	0,0%
V24	99	109	100	110	1,0%	93	102	-6,1%
V25	119	131	118	130	-0,8%	115	127	-3,4%
V26	53	58	53	58	0,0%	53	58	0,0%
<b>TOTAL</b>	<b>4820</b>	<b>5302</b>	<b>4781</b>	<b>5259</b>	<b>0,8%</b>	<b>4545</b>	<b>5000</b>	<b>-5,7%</b>

Fonte: próprio autor.

No caso da redistribuição dos esforços ( $\delta = 0,95$ ), ocorreu um acréscimo de 0,8%, e, para o caso de redistribuição de 25%, ocorreu uma economia de 5,7%, no consumo de aço.

O Gráfico 1 destaca, em paralelo, as vigas que obtiveram redução ou acréscimo nas armaduras para um coeficiente de redistribuição,  $\delta = 0,95$ . Cita-se a viga V16 com redução de 11,2% e a viga V1 com acréscimo de 9,4%.

Gráfico 1 - Vigas com redução e vigas com acréscimo de aço para  $\delta = 0,95$ 

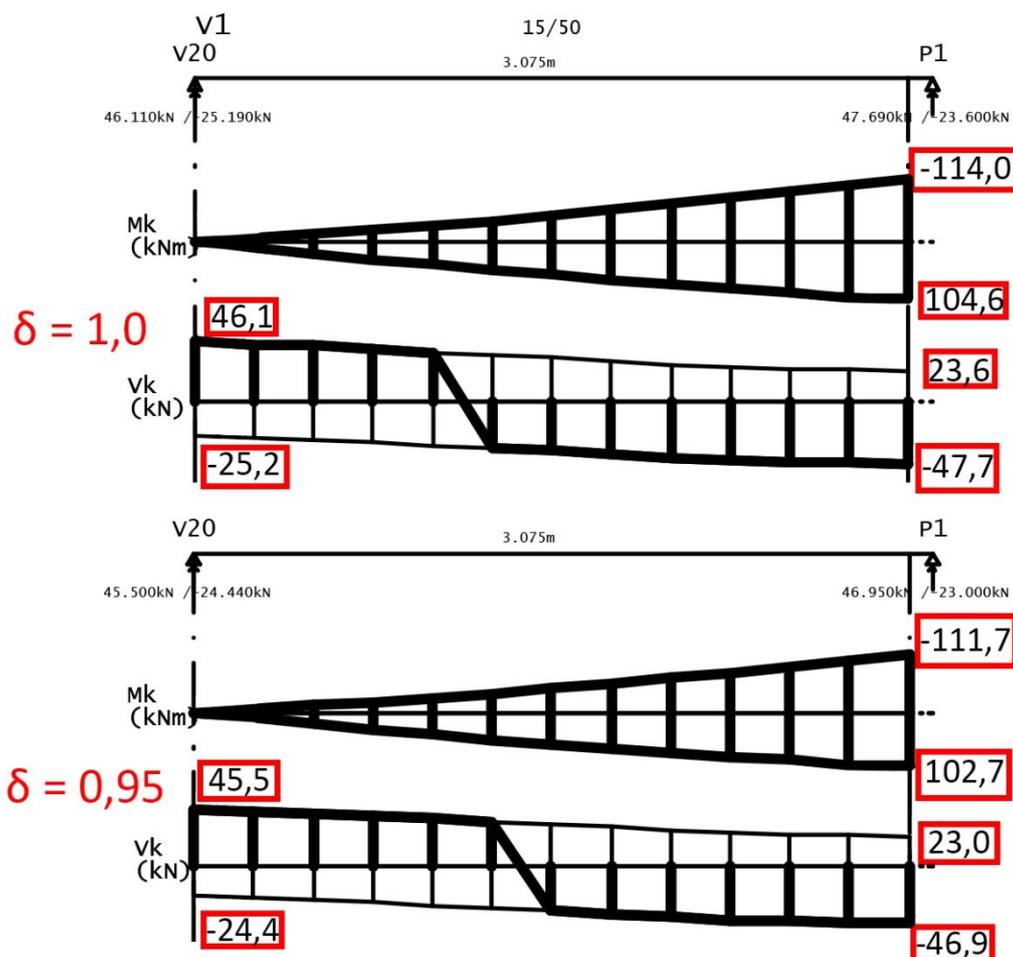
Fonte: próprio autor.

Ainda com  $\delta = 0,95$ , as vigas V3 a V7, V9, V11, V13, V14, V19, V22, V23 e V26, permaneceram com mesmo consumo de aço, contudo, em alguns desses casos, houve rearranjo nas armaduras, será exemplificado posteriormente com exemplo da viga V20 ( $\delta=0,75$ ).

A seguir, investigou-se o motivo do aumento de 9,4% nas armaduras da viga V1 com base em análise direta dos diagramas de momento fletor, esforço cortante (Figura 41).

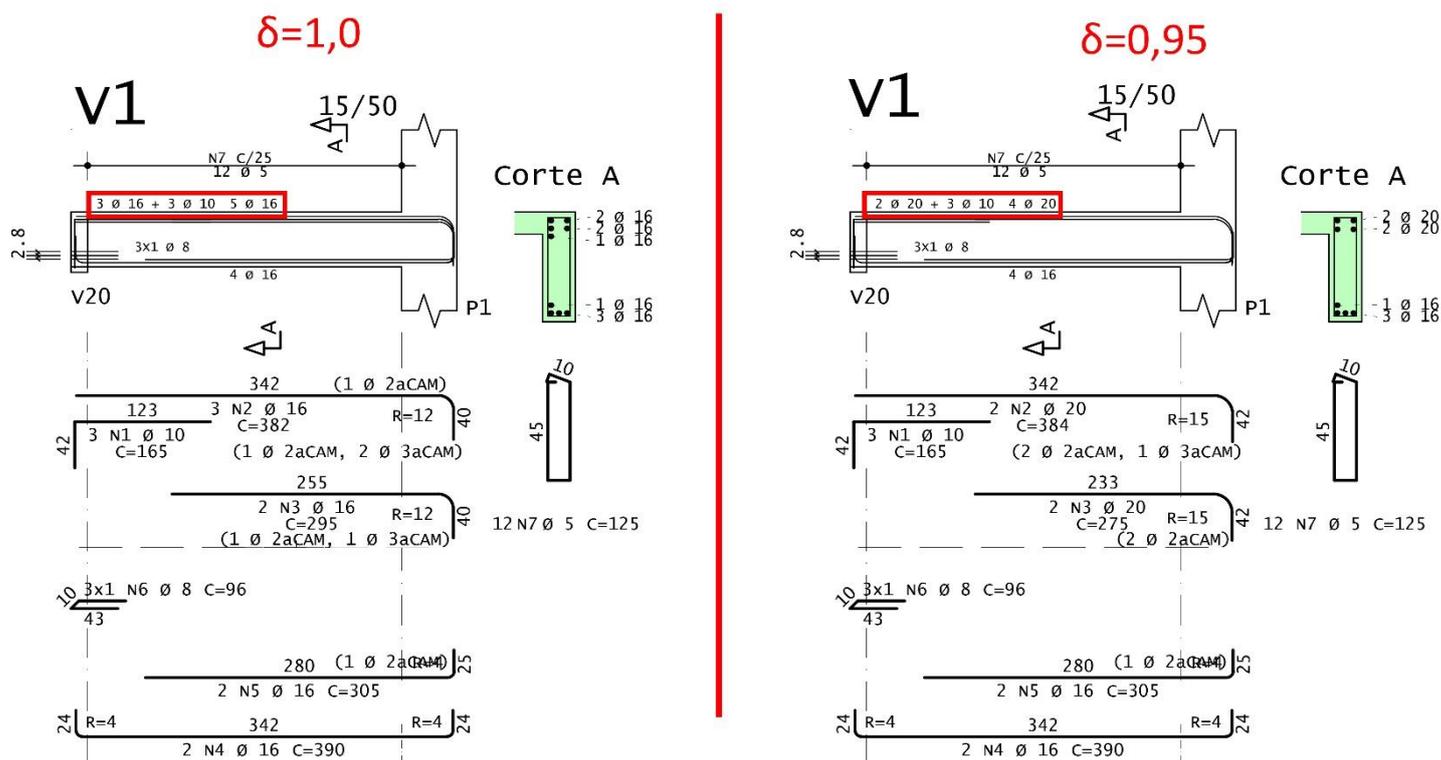
Ao se vislumbrar os esforços obtidos nos diagramas não se justificou tal aumento, pois os esforços sobre o elemento diminuíram, fato que denota não haver necessidade de aumentar a armaduras em relação ao dado na análise sem redistribuição.

Figura 41 - Envolvórias de momento fletor e esforço cortante para  $\delta = 1,0$  e  $\delta = 0,95$  da viga V1



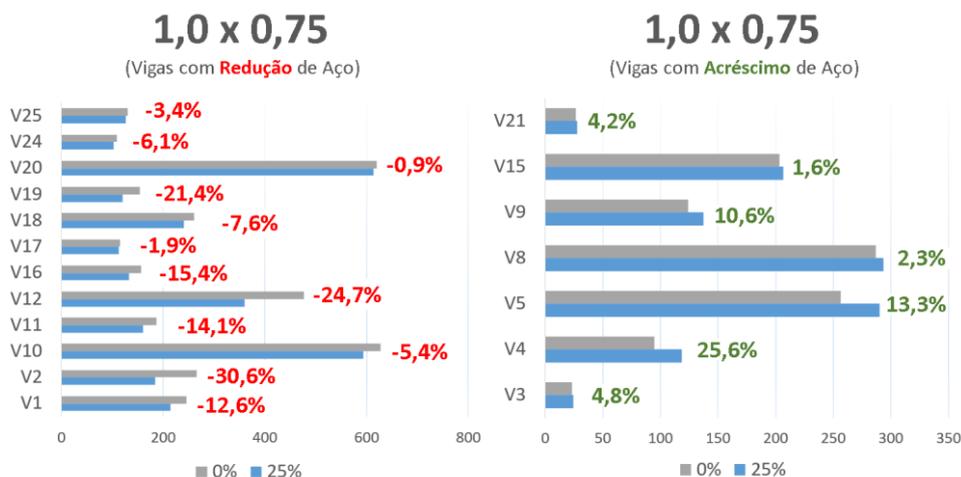
Fonte: próprio autor (2022).

Ainda na busca pelo motivo para o ocorrido na viga V1, restou a possibilidade da influência dos critérios de detalhamento do software, que, como se vê na Figura 42, as armaduras positivas foram alteradas, onde se encontravam  $8 \times \text{Ø}16\text{mm}$  ( $16,08\text{cm}^2$ ) passou-se à  $6 \times \text{Ø}20\text{mm}$  ( $18,85\text{cm}^2$ ), sendo o fator determinante para o aumento na armadura. Cita-se aqui que as configurações de detalhamento dentro do TQS obrigaria um capítulo à parte, de ajustes e testes, que enriqueceria ainda mais a premissa deste trabalho, contudo, por questão de foco na abordagem do tema, optou-se pela manutenção dos parâmetros originais dispostos no software para todos os casos analisados.

Figura 42 - Detalhamento de armaduras para  $\delta = 1,0$  e  $\delta = 0,95$  da viga V1

Fonte: próprio autor (2022).

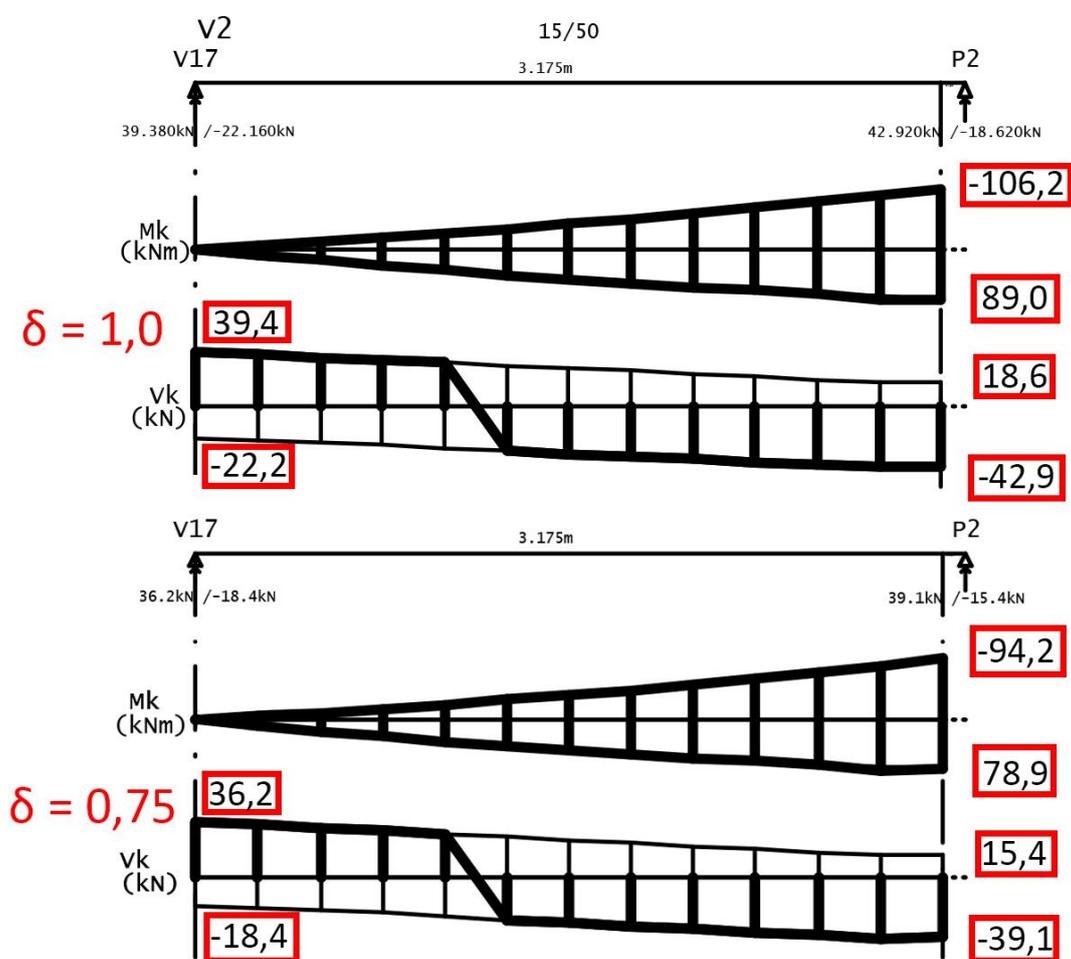
O Gráfico 2 aponta, lado a lado, os elementos que alcançaram redução ou acréscimo nas áreas de aço para um coeficiente de redistribuição,  $\delta = 0,75$ . Menciona-se a viga V2 com -30,6% e a viga V4 com +25,6%.

Gráfico 2 - Vigas com redução e vigas com acréscimo de aço para  $\delta = 0,75$ 

Fonte: próprio autor.

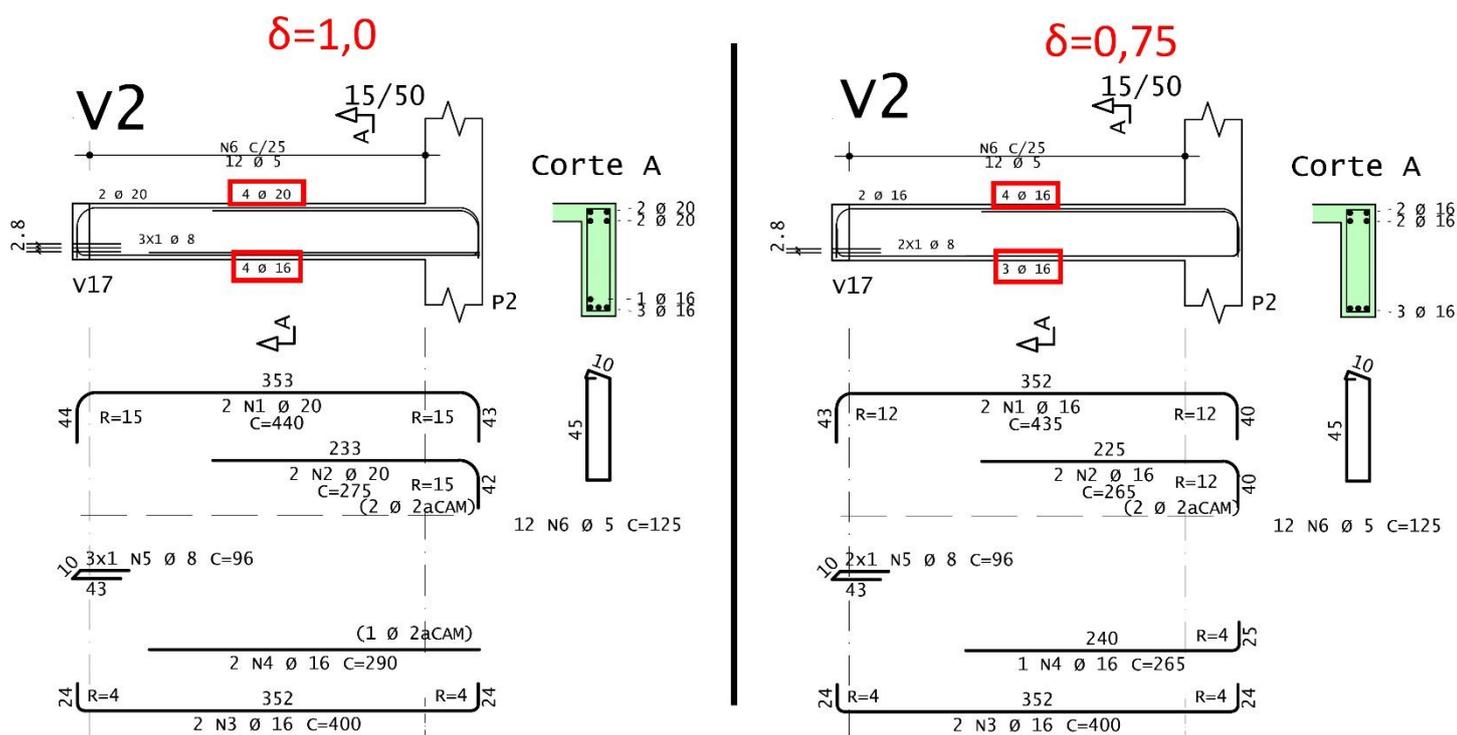
Logo após, confirmou-se a razão da redução de 30,6% nas armaduras da viga V2, com apoio dos diagramas de momento fletor e esforço cortante (Figura 43) da viga em questão, percebe-se a redução das solicitações, na seção P2 que teve o momento fletor negativo reduzido de -106,16 kNm para -94,2 kNm e a redução do momento fletor positivo, na mesma seção P2, de 89,48 kNm para 79,4kNm.

Figura 43 - Envoltórias de momento fletor e esforço cortante para  $\delta = 1,0$  e  $\delta = 0,75$  da viga V2



Fonte: próprio autor (2022).

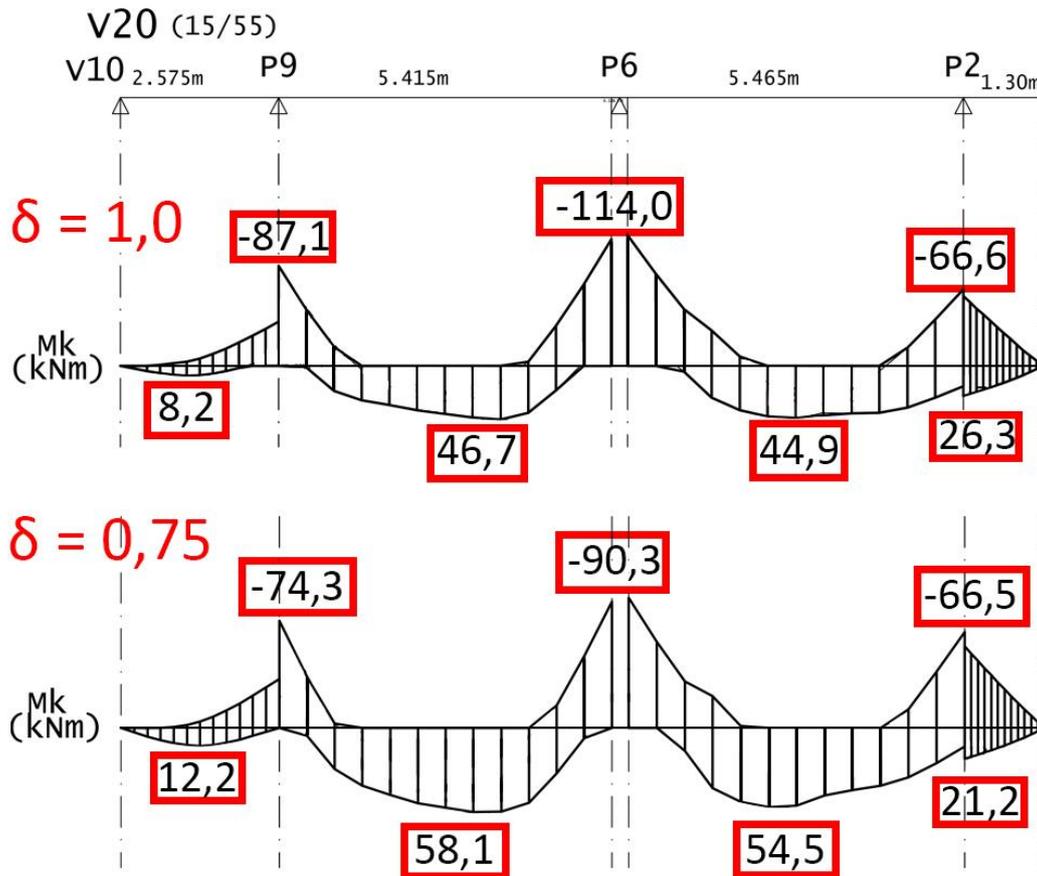
Neste caso, o detalhamento (Figura 44) acompanhou o sentido do ocorrido nos esforços solicitantes, implicando a redução de aço deste elemento.

Figura 44 - Detalhamento de armaduras para  $\delta = 1,0$  e  $\delta = 0,75$  da viga V2

Fonte: próprio autor (2022).

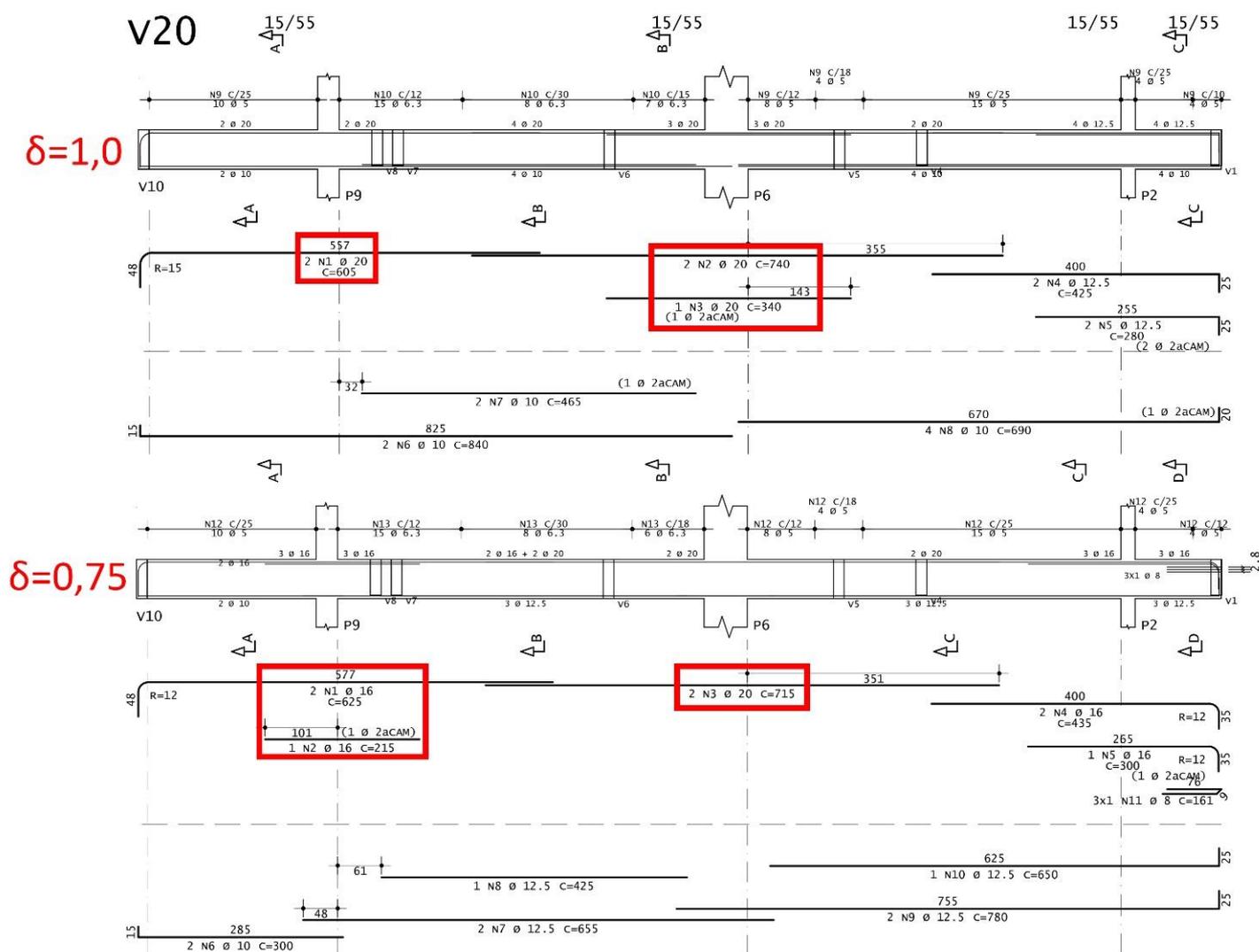
Utilizando-se  $\delta = 0,75$ , as vigas V6, V7, V13, V14, V22, V23 e V26, permaneceram com mesmo consumo de aço, porém, com rearranjo das armaduras, houve diminuição no número de barras e/ou bitolas nas regiões de interferência viga-viga e viga-pilar, fato desejável para execução e concretagem. Esse comportamento pode ser visualizado na viga V20 (Figura 45), que apresentou -0,9% de variação no aço.

Figura 45 - Envolvórias de momento fletor para  $\delta = 1,0$  e  $\delta = 0,75$  da viga V20



Fonte: próprio autor (2022).

A Figura 46 evidencia o efeito de descongestionamento das armaduras pela redistribuição de esforços, com destaque para as seções sobre os pilares P6 e P9.

Figura 46 – Detalhamento de armaduras para  $\delta = 1,0$  e  $\delta = 0,75$  da viga V20

Fonte: próprio autor (2022).

A relação  $x/d_{lim}$  das seções críticas foi verificada pelo software, sendo todas atendidas. Observa-se na Tabela 12 um exemplo dos dados do relatório emitido pelo TQS para cada elemento da estrutura. Tomando-se como exemplo o ocorrido sobre a viga V20.

Tabela 12 - Relatório  $x/d$  e  $x/d_{lim}$  das seções de momentos negativos da viga V20

Viga	Vão	Seção	$\delta = 1$		$\delta = 0,95$		$\delta = 0,75$	
			$x/d_{lim}$	$x/d$	$x/d_{lim}$	$x/d$	$x/d_{lim}$	$x/d$
V20	1	Esquerda	0,450	0,001	0,408	0,001	0,250	0,001
		Direita	0,450	0,120	0,408	0,118	0,250	0,106
	2	Esquerda	0,450	0,293	0,408	0,293	0,250	0,250
		Direita	0,450	0,407	0,408	0,386	0,250	0,250
	3	Esquerda	0,450	0,424	0,408	0,402	0,250	0,250
		Direita	0,450	0,229	0,408	0,408	0,250	0,223
	Balanço	P2	0,450	0,208	0,450	0,194	0,450	0,181

Esquema da viga:

Fonte: próprio autor (2022).

Como premissa para se utilizar a redistribuição de esforços em até 0,75, o parâmetro de estabilidade global não deve exceder 1,1, essa premissa foi atendida como mostrado em 3.4.4

A Tabela 13 apresenta os resultados financeiros do consumo de aço em função do coeficiente de redistribuição de esforços,  $\delta = \{1,0; 0,95; 0,75\}$ , para cada bitola de vergalhão, indicando também o total financeiro para o grupo pavimento tipo com base nos custos disponibilizados via SINAPI-RS (2022/01).

Pode-se observar que, utilizando 5% de redistribuição de esforços, houve um acréscimo de R\$ 206,91 no custo das armaduras das vigas. Já com 25% de redistribuição houve economia de R\$ 6.335,08 no custo do aço para a execução das mesmas vigas.

Tabela 13 - Custos de Corte, Dobra e Montagem segundo SINAPI-RS  
(2022/01) Não Desonerado

Ø mm	kgf (δ)			Corte e Dobra	Armação - Montagem	R\$/bitola (δ)		
	1,00	0,95	0,75			1,00	0,95	0,75
5	421	442	437	R\$ 11,38	R\$ 15,33	11.244,91	11.805,82	11.672,27
6,3	97	73	74	R\$ 11,58	R\$ 14,74	2.553,04	1.921,36	1.947,68
8	108	114	106	R\$ 11,54	R\$ 14,05	2.763,72	2.917,26	2.712,54
10	848	826	800	R\$ 10,66	R\$ 12,69	19.800,80	19.287,10	18.680,00
12,5	297	343	550	R\$ 9,12	R\$ 10,76	5.904,36	6.818,84	10.934,00
16	1678	1284	1502	R\$ 9,04	R\$ 10,35	32.536,42	24.896,76	29.123,78
20	1370	1699	1075	R\$ 10,66	R\$ 11,72	30.660,60	38.023,62	24.058,50
<b>TOTAL FINANCEIRO</b>						<b>R\$ 105.463,85</b>	<b>R\$ 105.670,76</b>	<b>R\$ 99.128,77</b>
<b>Δ\$</b>						<b>R\$ -</b>	<b>-R\$ 206,91</b>	<b>R\$ 6.335,08</b>

Fonte: próprio autor.

A Tabela 14 apresenta a quantidade de barras (12m) por bitola, em particular para redistribuição de 25%, e os custos para suas aquisições em três diferentes fornecedores, apartando os custos com mão-de-obra.

Fica evidente a importância do planejamento no fluxo da aplicação dos materiais e a escolha de fornecedores, tendo em vista que, a simples troca de um fornecedor por outro, em caso de indisponibilidade de certa bitola, por exemplo, sobreporia a economia advinda da redução nas armaduras.

Tabela 14 - Custos de aço por bitola e por quantidade de barras para δ = 0,75

δ = 0,75							
Ø mm	QTD Barras	Fornecedor A - Leroy Merlin (R\$)		Fornecedor B - Quero- Quero (R\$)		Fornecedor C - Arcelor Mittal (R\$)	
5	261	22,90	5.970,03	25,99	6.775,59	19,33	5.039,33
6,3	29	29,90	855,14	35,00	1.001,00	24,06	688,12
8	25	47,90	1.211,87	54,90	1.388,97	38,79	981,39
10	120	72,90	8.740,71	82,90	9.939,71	57,84	6.935,02
12,5	53	109,90	5.802,72	124,99	6.599,47	85,98	4.539,74
16	88	184,90	16.271,20	219,90	19.351,20	140,88	12.397,44
20	42	274,90	11.490,82	310,64	12.984,63	220,17	9.203,11
		<b>50.342,49</b>		<b>58.040,57</b>		<b>39.784,14</b>	

Fonte: próprio autor.

O consumo de concreto C25 (SINAPI 2022/01 COD94971 = R\$ 411,61) para as vigas foi de 40,14 m<sup>3</sup> em todos os casos de redistribuição de esforços. Considerando lançamento com bombas, adensamento e acabamento em estruturas (SINAPI 2022/01 COD 92874 = R\$ 31,57) resultou um custo de R\$17.789,24.

O parâmetro  $\gamma_z$ , que serve para classificação da estrutura como de nós fixos ou de nós móveis, também foi verificado e, para todos os valores utilizados de  $\delta$ , obtiveram valores abaixo de 1,1.

Com a flexibilização das ligações, redução de  $\delta$ , ocorreu aumento nos valores do  $\gamma_z$  (Tabela 15) e também nos valores deslH (Tabela 16).

Tabela 15 - Estabilidade global casos simples de vento (ELU)

ângulo (°)	$\gamma_z$		
	$\delta = 1,0$	$\delta = 0,95$	$\delta = 0,75$
<b>0</b>	1,05	1,05	1,06
<b>90</b>	1,06	1,06	1,07
<b>180</b>	1,05	1,05	1,06
<b>270</b>	1,06	1,06	1,07

Fonte: próprio autor (2022).

Também foram verificados os limites para os deslocamentos laterais no topo (ELS) para cada valor de  $\delta$ , a Tabela 16 apresenta os valores obtidos em cada situação e ângulo, onde todos foram atendidos com  $\text{deslH}_{\text{máx}} = 0,01$  m.

Tabela 16 - Deslocamentos máximos horizontais (ELS)

ângulo (°)	deslH topo (m)		
	$\delta = 1,0$	$\delta = 0,95$	$\delta = 0,75$
<b>0</b>	0,009	0,009	0,01
<b>90</b>	0,004	0,004	0,004
<b>180</b>	0,009	0,009	0,01
<b>270</b>	0,004	0,004	0,004

Fonte: próprio autor (2022).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação dos resultados entre a análise linear sem redistribuição de esforço,  $\delta = 1,0$ , e as análises com redistribuição de esforços com coeficientes  $\delta = 0,95$  e  $\delta = 0,75$ , permitiram a visualização do efeito que tal consideração acarretou na estrutura, como se desejava vislumbrar.

Em questão de economia, foi irrelevante a comparação da redistribuição com coeficientes  $\delta = 0,95$  e  $\delta = 1,0$ . Restando apenas as considerações referentes ao rearranjo de armaduras.

Já para comparação entre  $\delta = 1,0$  e  $\delta = 0,75$  houve uma economia de 5,7%, correspondente a um total de R\$ 6.335,08, no consumo de aço para as vigas pertencentes ao conjunto pavimento tipo, o qual se repete quatro vezes, sendo uma economia de R\$ 1.583,77 por pavimento, para o coeficiente de redistribuição de esforços  $\delta = 0,75$ , com a estrutura atendendo a todos os estados limites prescritos na NBR 6118 (2014), pode-se dizer que foi satisfatório o resultado obtido no trabalho, mesmo com o consumo de concreto não variando para nenhum dos três valores usados para o coeficiente  $\delta$ .

Viu-se que a redistribuição de esforços é uma abordagem conveniente, tanto para um melhor detalhamento das armaduras das vigas, no sentido de haver um descongestionamento nos pontos de interferência viga-pilar, principalmente, como foi exemplificado para viga V20, como também no sentido de redução da quantidade de aço necessária ( $\delta = 0,75$ ).

Ao se pesar que, com mais experiência e com repetição dos procedimentos adotados na criação deste estudo, a replicação destas rotinas em situações práticas de escritório se torna cada vez mais assertiva e com menor emprego de tempo. Foi, certamente, de grande valia esta iniciação sob supervisão.

Outro ponto positivo a se destacar foi a possibilidade de se utilizar uma ferramenta computacional para cálculo estrutural totalmente em português, em conformidade com as normas vigentes no Brasil, fato que potencializou a interpretação dos avisos emitidos durante o processamento e ajuste da estrutura.

Em suma, o trabalho serviu como consolidação dos conteúdos que se estudou no decorrer da graduação nas áreas de estruturas de concreto armado.

Como sugestão para desenvolvimento de tema similar, buscar-se a maximização das potencialidades do TQS, para uma aceleração no tratamento dos dados, para comparação mais rápida, sem necessidade de utilização de planilha eletrônica externa, modificando-se a estrutura e comparando-a com estes resultados, uma situação onde não haja necessidade das vagas para veículos no térreo, ou seja, com possibilidade de lançamento dos pilares em qualquer ponto, criando uma estrutura com mais pórticos na direção 0-180 graus frente ao vento, acrescentando mais pavimentos, utilizando outras resistências para o concreto.

## REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

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

BUCHAIM, R. **A influência da não-linearidade física do concreto armado na rigidez à flexão e na capacidade de rotação plástica**. 2001. Tese (Doutorado). São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2001. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-02102001-155513/publico/A05TESEcap1.pdf>. Acesso: 24 set. 2021.

CORRÊA, M. R. S. **Aperfeiçoamento de modelos usualmente empregados no projeto de sistemas estruturais de edifícios**. Tese. Doutorado. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1991. Disponível em: [http://web.set.eesc.usp.br/static/media/producao/1991DO\\_MarcioRobertoSilvaCorrea.pdf](http://web.set.eesc.usp.br/static/media/producao/1991DO_MarcioRobertoSilvaCorrea.pdf). Acesso: 24 set. 2021.

FONTES, F. F. **Análise estrutural de elementos lineares segundo a NBR 6118:2003**. Dissertação. Mestrado em engenharia de estrutura. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: [http://web.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2005ME\\_FernandoFernandesFontes.pdf](http://web.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2005ME_FernandoFernandesFontes.pdf). Acesso: 24 set. 2021.

FONTES, F. F.; PINHEIRO, L. M. **Análise linear com redistribuição e análise plástica de vigas de edifícios**. Anais 47º Congresso Brasileiro de Concreto. Recife-PE, 2 a 7/9/2005. Disponível em: [http://coral.ufsm.br/decc/ECC841/Downloads/Artigo\\_01\\_Analise\\_linear\\_com\\_redistribuicao\\_e\\_Analise\\_plastica.pdf](http://coral.ufsm.br/decc/ECC841/Downloads/Artigo_01_Analise_linear_com_redistribuicao_e_Analise_plastica.pdf). Acesso em: 24 set. 2021.

HONSCHA, M.; BOLINA, F. **Discussão sobre a redistribuição de momentos negativos em zonas de apoio nas estruturas de concreto armado**: Estudo de caso. X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro-RJ. 9 a 11/05/2018. Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos2018/032.pdf>. Acesso em: 24 set. 2021.

KIMURA, A. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado**: cálculo de edifícios com o uso de sistemas computacionais. São Paulo: Pini, 2007. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=WGtuDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=WGtuDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false). Acesso: 24 set. 2021.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto**: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Vol. 1. Rio de Janeiro, Interciência, 1979.

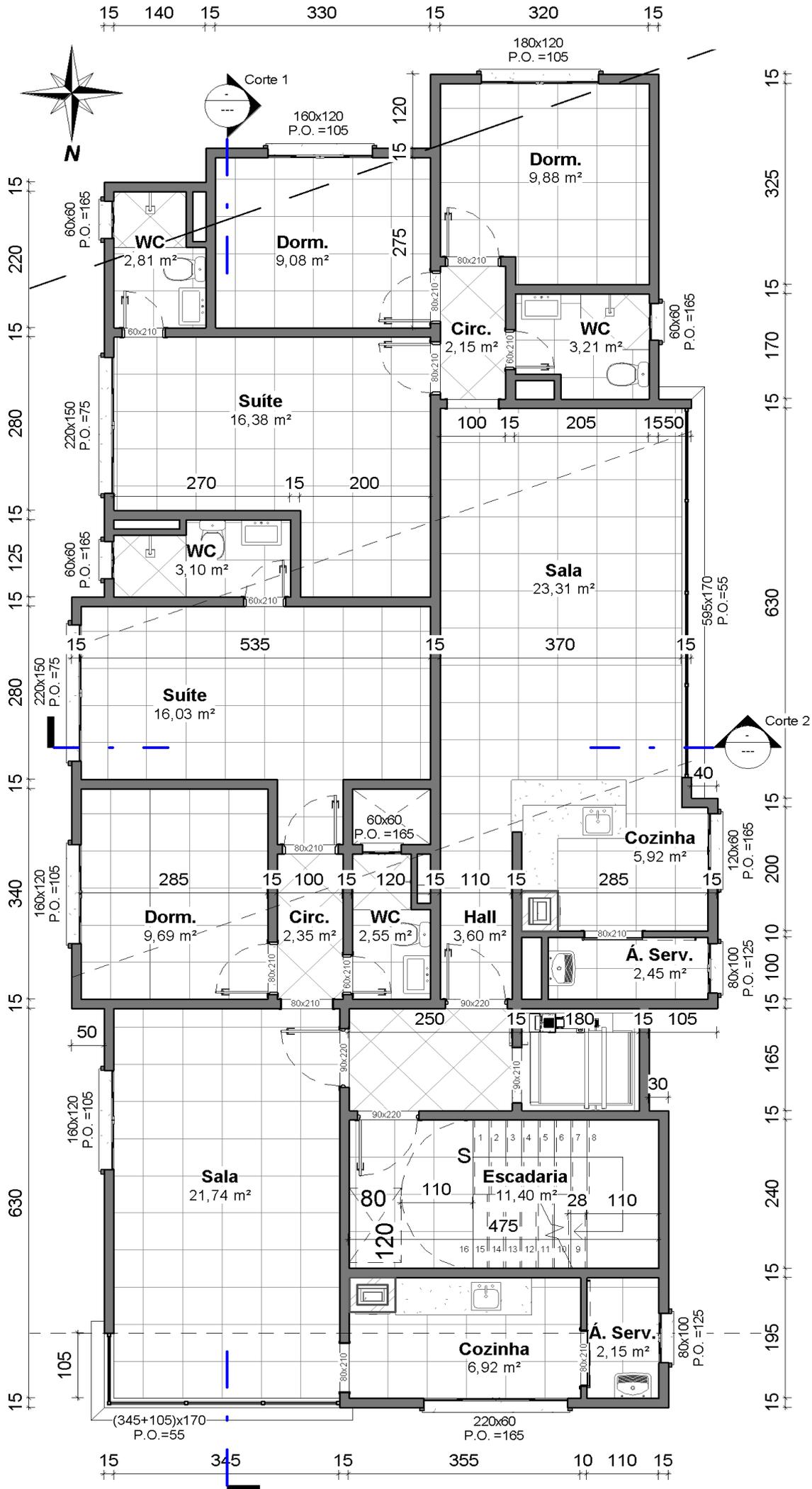
MIRANDA, P. S. T. **Otimização do dimensionamento de vigas em concreto armado através de análise linear com redistribuição**. Centro de tecnologia – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza (2003 a 2006). Disponível em: <http://paulofilhoengenharia.com.br/download/OTIMIZACAO-DO-DIMENSIONAMENTO-DE-VIGAS-EM-CONCRETO-ARMADO-ATRAVES-DE-ANALISE-LINEAR-COM-RES-DISTRIBUICAO.pdf>. Acesso em: 24 set. 2021.

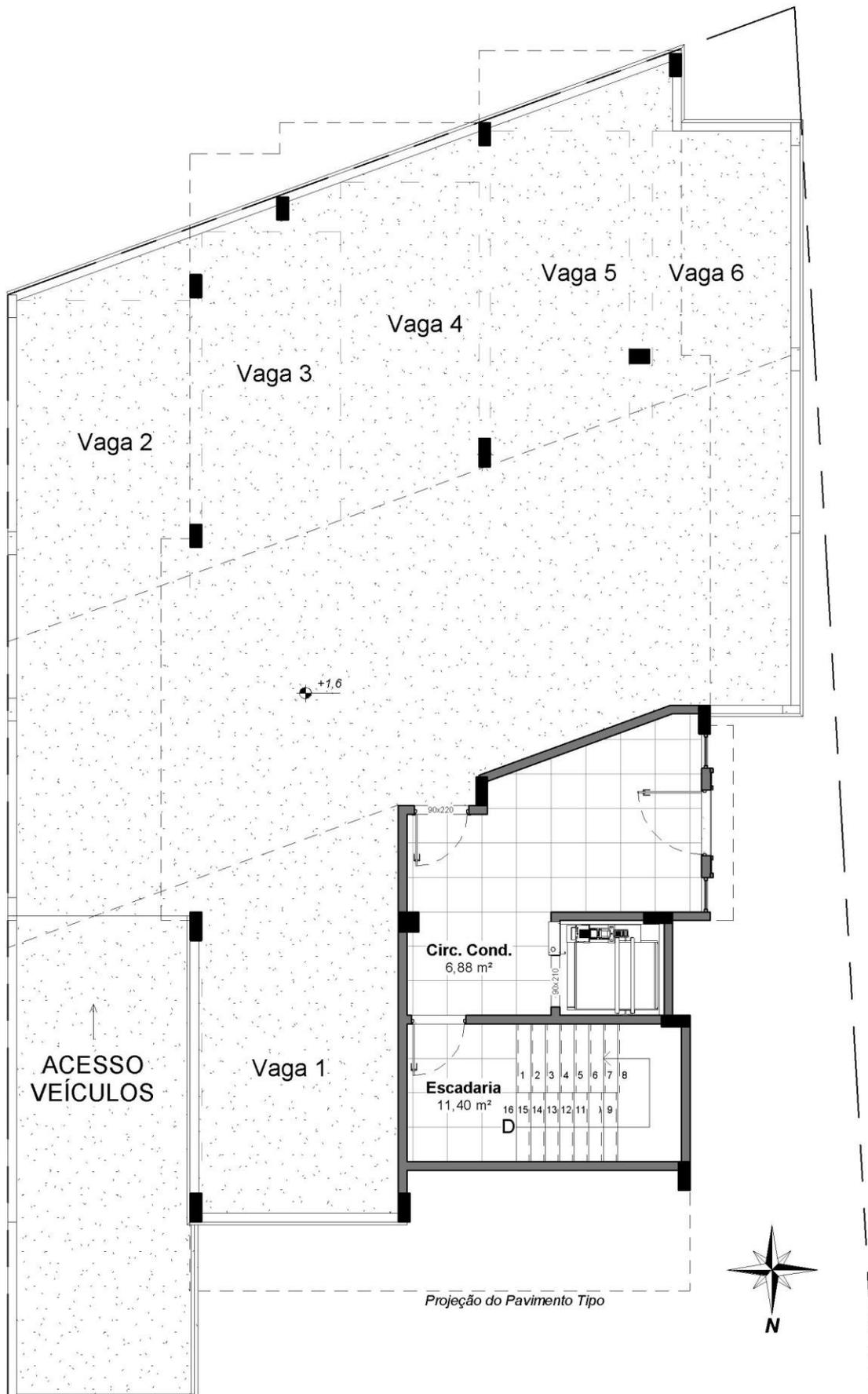
SILVA, T. O. **Análise linear de estruturas de concreto armado com redistribuição de esforços**. Orientador: Alisson Simonetti Milani. 2017. 83 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete 2017. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/rii/1983>. Acesso: 24 set. 2021.

## **ANEXOS**

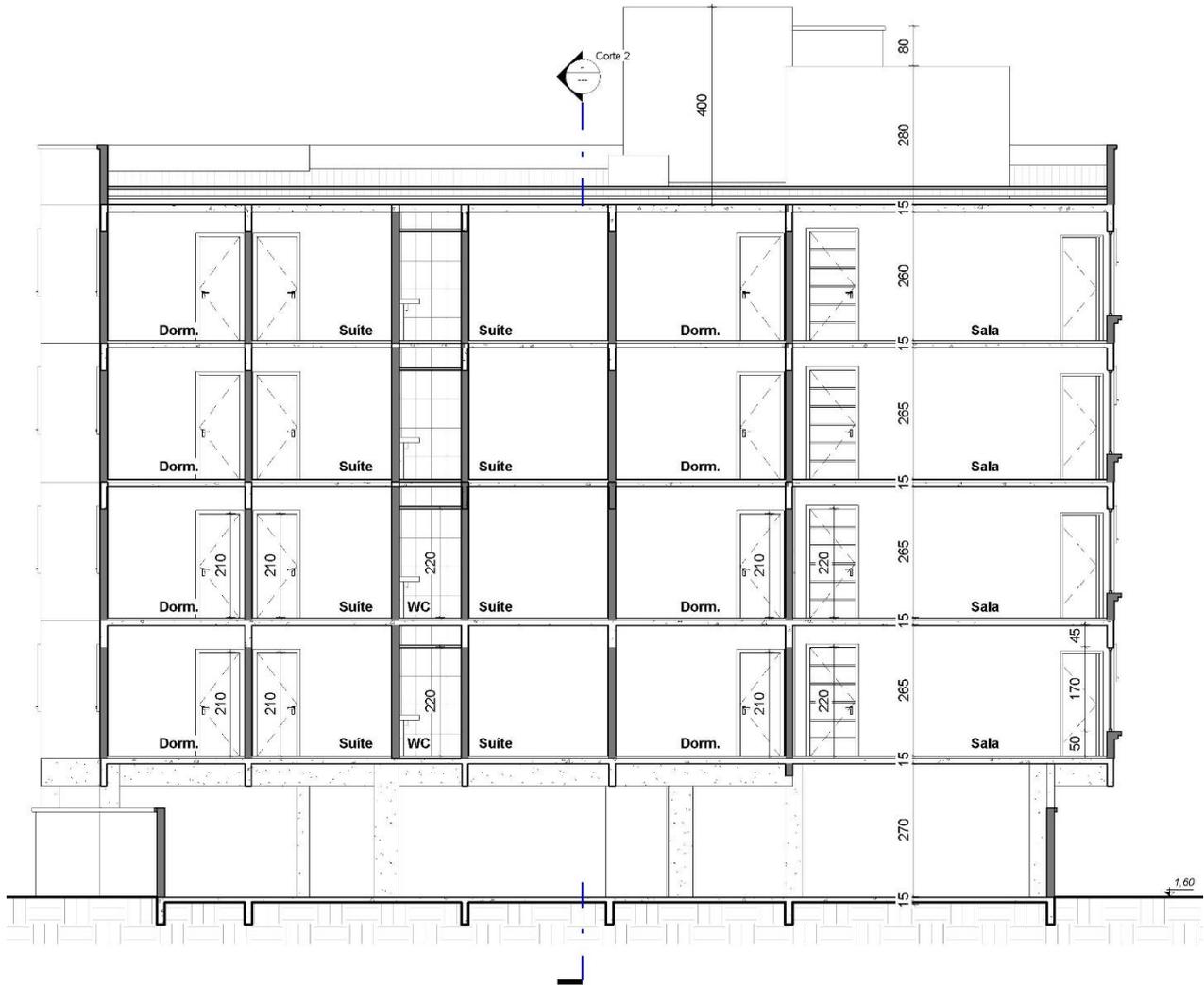
A seguir, estão demonstradas as plantas baixas e os cortes pertinentes ao desenvolvimento deste trabalho. As imagens estão cotadas, porém sem escala.

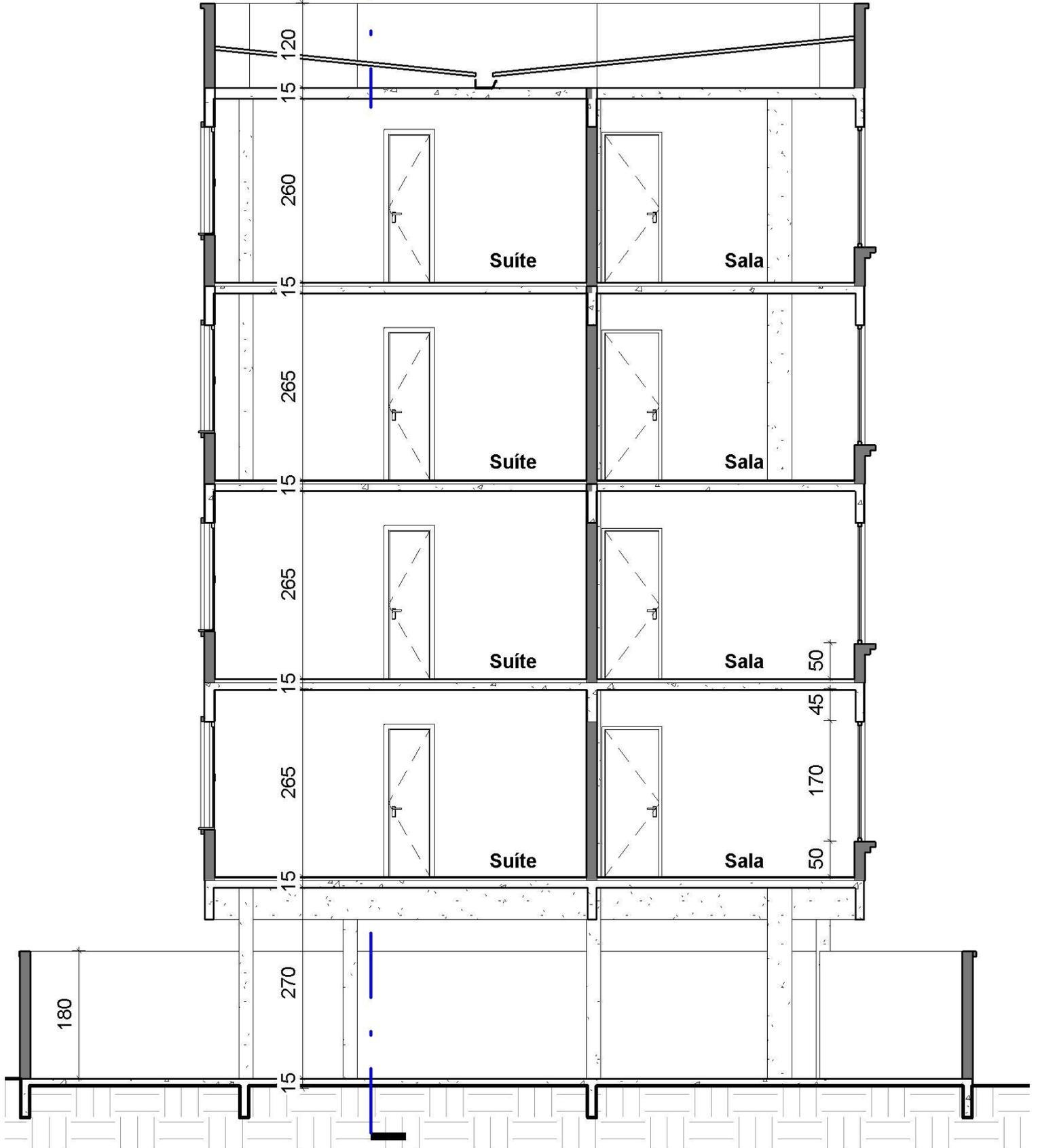
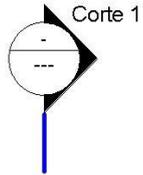
# Anexo 1 - Planta Baixa: Pavimento Tipo



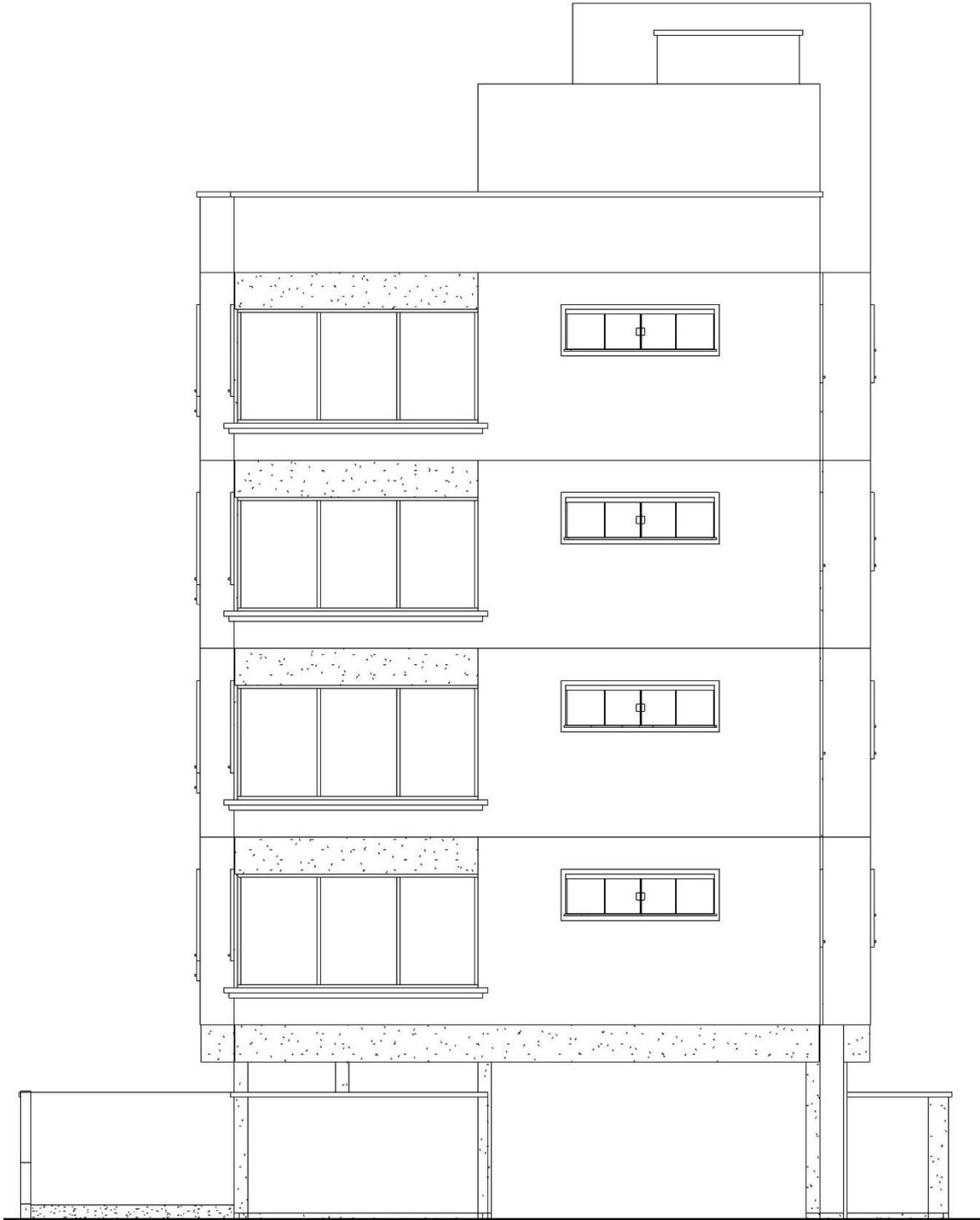


## Anexo 3 - Corte 1

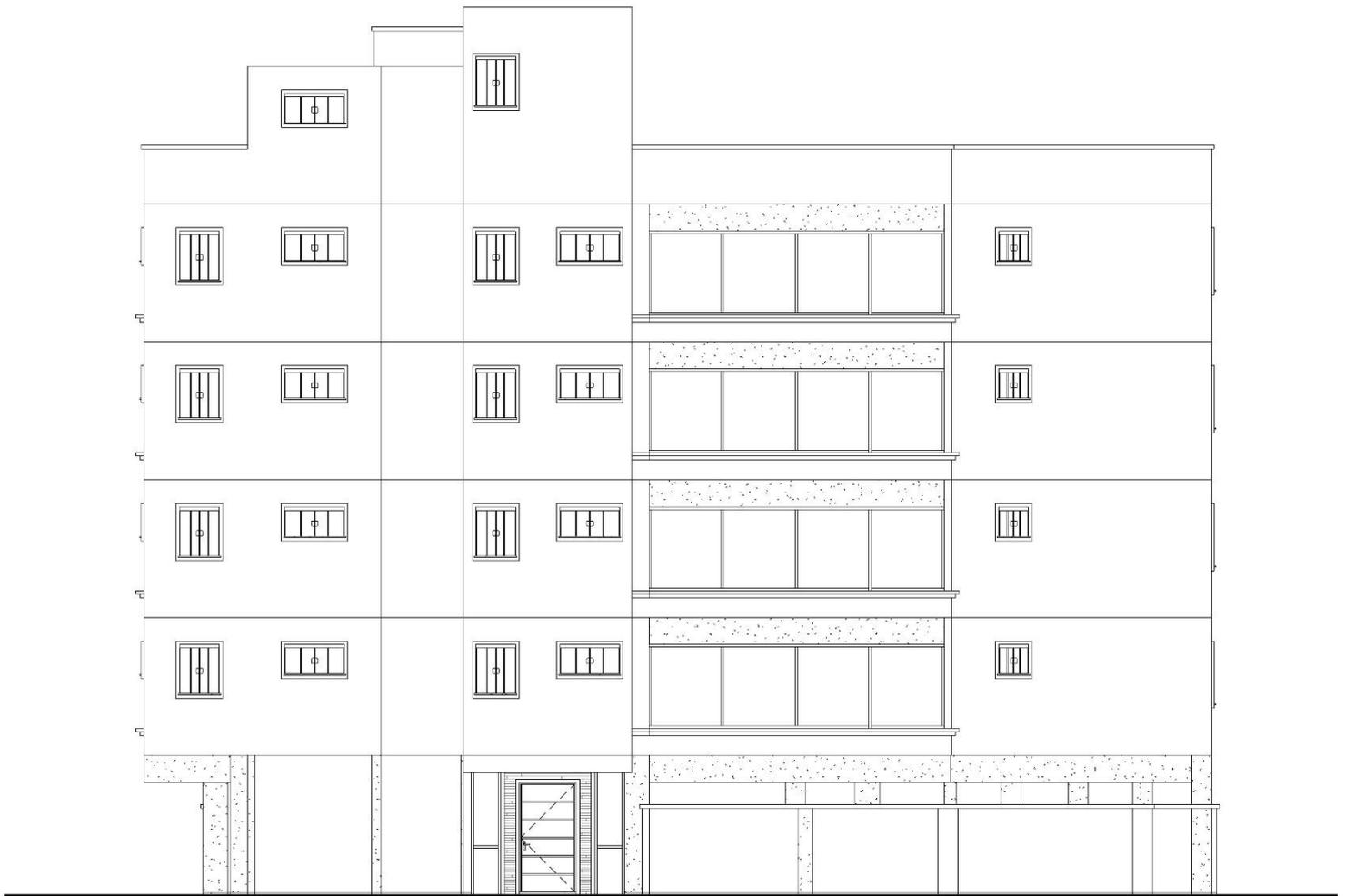




## Anexo 5 - Fachada norte



## Anexo 6 - Fachada oeste



## Anexo 7 - Exemplo de composição analítica para corte e dobra SINAPI utilizada

CLASSE: FUES
TIPO: 0042 - ARMADURAS

Código / Seq.	Descrição da Composição	Unidade
01.FUES.ARMD.039/01	CORTE E DOBRA DE AÇO CA-60, DIÂMETRO DE 5,0 MM, UTILIZADO EM ESTRUTURAS DIVERSAS, EXCETO LAJES. AF_12/2015	KG
Código SIPC		
92791		
Vigência: 12/2015		Última atualização: 09/2017

COMPOSIÇÃO				
Item	Código	Descrição	Unidade	Coefficiente aferido
C	88245	ARMADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,0769
C	88238	AJUDANTE DE ARMADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,0108
I	39	ACO CA-60, 5,0 MM, VERGALHAO	KG	1,0700

## Anexo 8 - Exemplo de composição analítica para montagem SINAPI utilizada

CLASSE: FUES
TIPO: 0042 - ARMADURAS

Código / Seq.	Descrição da Composição	Unidade
01.FUES.ARMD.040/01	CORTE E DOBRA DE AÇO CA-50, DIÂMETRO DE 6,3 MM, UTILIZADO EM ESTRUTURAS DIVERSAS, EXCETO LAJES. AF_12/2015	KG
Código SIPC		
92792		
Vigência: 12/2015		Última atualização: 09/2017

COMPOSIÇÃO				
Item	Código	Descrição	Unidade	Coefficiente Aferido
C	88245	ARMADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,042
C	88238	AJUDANTE DE ARMADOR COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	H	0,0059
I	32	ACO CA-50, 6,3 MM, VERGALHAO	KG	1,0700