

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Carlos Lenz Cappellari

**AVALIAÇÃO DA CONSIDERAÇÃO DE IMPACTO ACIDENTAL DE
VEÍCULOS EM PILARES DE CONCRETO ARMADO CONFORME
ABNT NBR 6120:2019**

Santa Maria, RS
2023

Carlos Lenz Cappellari

**AVALIAÇÃO DA CONSIDERAÇÃO DE IMPACTO ACIDENTAL DE VEÍCULOS EM
PILARES DE CONCRETO ARMADO CONFORME ABNT NBR 6120:2019**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Almir Barros da Silva Santos Neto

Santa Maria, RS
2023

Carlos Lenz Cappellari

**AVALIAÇÃO DA CONSIDERAÇÃO DE IMPACTO ACIDENTAL DE VEÍCULOS EM
PILARES DE CONCRETO ARMADO CONFORME ABNT NBR 6120:2019**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Engenheiro Civil**.

Aprovado em 13 de junho de 2023:

Almir Barros da Silva Santos Neto, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Alisson Simonetti Milani, Dr. (UNIPAMPA)

Andre Lübeck, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Amadeu e Loecí, por todo amor e carinho dispendidos, pelo suporte incondicional, pela educação recebida e por me apoiar ao longo da realização deste sonho, tornando tudo mais leve.

Agradeço também aos meus avós, Arlindo e Luíza, que mesmo de longe, sempre buscavam estar perto, com seus gestos de carinho e lembranças.

Ao grupo PET - Engenharia Civil UFSM, o qual proporcionou diversas oportunidades de desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional, além de possibilitar a contribuição para a melhoria do nosso curso.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram e auxiliaram quando precisei, em especial a Fernanda e a Yasmin, as quais já estão comigo desde antes de iniciar a graduação.

Aos meus colegas de graduação, por toda a amizade, alegrias e desafios compartilhados ao longo destes anos.

Agradeço a TQS Informática, os quais foram muito atenciosos e prontamente disponibilizaram a licença Plena utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

A Ozelame Engenharia e seus profissionais, minha gratidão, por terem aberto as portas da empresa para que eu tivesse a primeira experiência de estágio durante a graduação.

O meu muito obrigado à RKS Engenharia de Estruturas e seus profissionais, pelas experiências e aprendizados vividos, permitindo que me desenvolvesse na área de projeto e cálculo estrutural.

Agradeço ao meu orientador Dr. Professor Almir, por todos os ensinamentos passados durante a graduação e por se mostrar sempre à disposição para sanar eventuais dúvidas. Estendo este agradecimento a todos os demais professores com quem tive contato no período que frequentei a UFSM.

Por fim, agradeço a UFSM, por fornecer um ensino de qualidade, capaz de fornecer os conhecimentos necessários para a atuação de um Engenheiro Civil.

RESUMO

AVALIAÇÃO DA CONSIDERAÇÃO DE IMPACTO ACIDENTAL DE VEÍCULOS EM PILARES DE CONCRETO ARMADO CONFORME ABNT NBR 6120/2019

AUTOR: Carlos Lenz Cappellari
ORIENTADOR: Almir Barros da Silva Santos Neto

A nova norma ABNT NBR 6120:2019 trouxe diversas atualizações quanto aos carregamentos a serem adotados nos projetos de estruturas de edificações. Um dos pontos de alteração significativa foi a inclusão da necessidade de consideração do impacto accidental de veículos em estacionamentos, pavimentos de garagem ou estruturas próximas a vias com tráfego de veículos, além da divisão das cargas a serem consideradas conforme as classes de veículos que circulam no local. Devido a recente atualização da norma, o *software* TQS implantou a funcionalidade de carregamento devido ao impacto de veículos em sua versão mais recente, a V23. O presente trabalho tem como objetivo analisar a diferença nos esforços e dimensionamento de um pilar sujeito ao impacto accidental de veículos frente a um pilar convencional utilizando o TQS, além de verificar a forma que o programa considera esse carregamento. O objeto de estudo consiste em uma simples edificação composta por nove pilares, vãos entre eixos de 5 metros, vigas travando todos os pilares nos dois sentidos no topo e na base e a altura entre pisos é de 3,5 metros. Foram idealizados dois modelos idênticos, sendo aplicado no pilar central de um deles a força horizontal correspondente ao impacto de um veículo de Categoria I. A partir dos resultados obtidos foram realizadas comparações entre os esforços e taxas de armadura, além de, a partir dos diagramas de esforços buscar encontrar a forma do acréscimo do carregamento na estrutura considerado pelo programa. Conforme esperado, as taxas de armadura aumentaram de forma considerável. Quanto a consideração do esforço pelo TQS, para o modelo testado foi comprovado que é utilizado um modelo de barras bi-apoiadas.

Palavras-chave: Concreto armado. Pilares. Impacto de veículos.

ABSTRACT

EVALUATION OF CONSIDERATION OF VEHICLES ACCIDENTAL IMPACT ON REINFORCED CONCRETE COLUMNS ACCORDING TO ABNT NBR 6120/2019

AUTHOR: Carlos Lenz Cappellari
ADVISOR: Almir Barros da Silva Santos Neto

The new ABNT NBR 6120:2019 brought many updates regarding the loads to be adopted in building structure projects. One of the points of significant alteration was the inclusion of the need to consider the accidental impact of vehicles on parking lots, garage floors or structures near to roads with vehicle traffic, beyond the division of loads to be considered according to the classes of vehicles circulating in the local. Due to the recent update of the standard, the TQS software has implemented the functionality of load due to the impact of vehicles in its latest version, V23. The present work aims to analyze the difference in efforts and dimensioning of a column subject to the accidental impact of vehicles compared to a conventional column using the TQS, in addition to verifying the way that the program considers this load. The object of study consists of a simple building composed of nine columns, spans between axes of 5 meters, beams locking all the pillars in both directions, at the top and at the base and the height between floors is 3.5 meters. Two identical models were designed, with the horizontal force corresponding to the impact of a Category I vehicle being applied to the central pillar of one of them. From the results obtained, comparisons were made between the efforts and reinforcement rates, in addition to, from the effort diagrams, seeking to find the form of the increase of the load in the structure considered by the program. As expected, reinforcement rates have increased considerably. As for the consideration of the effort by the TQS, for the tested model, it was proved that a model of double-supported bars is used.

Keywords: Reinforced concrete. Columns. Vehicle impact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comprimento de flambagem	19
Figura 2 – Exemplo de carga concentrada na laje para a categoria I	23
Figura 3 – Forças horizontais devido ao impacto accidental de veículos.....	23
Figura 4 – Exemplo de veículo da Categoria I.....	24
Figura 5 – Exemplo de veículo da Categoria II.....	24
Figura 6 – Exemplos de sinalização da velocidade máxima permitida.....	25
Figura 7 – Exemplos de sinalização da altura máxima permitida.....	25
Figura 8 – Objeto de estudo.....	27
Figura 9 – Planta de formas do objeto de estudo.....	28
Figura 10 – Corte esquemático do objeto de estudo.....	29
Figura 11 – Área de influência de cada pilar	31
Figura 12 – Configurações do modelo	33
Figura 13 – Ativação do carregamento lateral de veículos.....	34
Figura 14 – Tabela de impacto de veículos.....	37
Figura 15 – Aba Modelo dos Dados de pilares.....	38
Figura 16 – Aba Modelo dos Dados Gerais da Viga	39
Figura 17 – Lajes apoiadas conforme critérios.....	40
Figura 18 – Aplicação do impacto accidental de veículo.....	41
Figura 19 – Relatório de pilares do modelo M1	42
Figura 20 – Detalhamento dos pilares P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8 e P9 do modelo M1 - Sem escala	44
Figura 21 – Detalhamento do pilar P5 do modelo M1 - Sem escala	45
Figura 22 – Curva de Iteração do pilar P5 no modelo M1 para o caso mais crítico ..	46
Figura 23 – Diagrama de momentos de 1 ^a +2 ^a ordem (global e local) do pilar P5 do modelo M1.....	47
Figura 24 – Diagrama de esforços normais do pilar P5 do modelo M1.....	48
Figura 25 – Relatório de pilares do modelo M2.....	49
Figura 26 – Detalhamento inicial do pilar P5 do modelo M2 - Sem escala	50
Figura 27 – Conferência utilizando a calculadora de flexão composta oblíqua do TQS	52

Figura 28 – Diagrama de momentos fletores de 1 ^a +2 ^a ordem (global e local) do pilar P5 do modelo M2 pelo método do pilar padrão com rigidez κ aproximada	52
Figura 29 – Detalhamento do pilar P5 do modelo M2 utilizando o método do pilar padrão com rigidez κ aproximada - Sem escala.....	53
Figura 30 – Curva de Iteração do pilar P5 do modelo M2 para o caso mais crítico utilizando o método do pilar padrão com rigidez κ aproximada.....	54
Figura 31 – Curva de Iteração do pilar P5 do modelo M2 para o caso mais crítico utilizando o método geral	56
Figura 32 – Diagrama de momentos fletores de 1 ^a +2 ^a ordem (global e local) do pilar P5 do modelo M2 pelo método geral.....	56
Figura 33 – Diagrama de forças horizontais em x do pilar P5 do modelo M2 pelo método geral	57
Figura 34 – Diagrama de momentos fletores em torno de x de 1 ^a +2 ^a ordem global do pilar P5 do modelo M2 pelo método do pilar padrão com rigidez κ aproximada	58
Figura 35 – Diagrama de momentos fletores do modelo do Ftool para o método do pilar padrão com rigidez κ aproximada.....	59
Figura 36 – Diagrama de momentos fletores em torno de x de 1 ^a +2 ^a ordem global do pilar P5 do modelo M2 pelo método geral	59
Figura 37 – Diagrama de momentos fletores do modelo do Ftool para o método geral	60
Figura 38 – Esforço cortante atuante no pilar P5 do modelo M2.....	61
Figura 39 – Verificação do esforço cortante no pilar P5 do modelo M2	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Combinações de ações do modelo M1	35
Tabela 2 – Combinações de ações do modelo M2	36
Tabela 3 – Esforços solicitantes de 1 ^a +2 ^a ordem global do modelo M1	43
Tabela 4 – Esforços solicitantes do pilar P5 conforme casos de carregamento	47
Tabela 5 – Esforços solicitantes do pilar P5 pelo método do pilar padrão com rigidez κ aproximada no modelo M2	51
Tabela 6 – Esforços solicitantes do pilar P5 pelo método geral no modelo M2	55

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
cm	Centímetros
cm²	Centímetros quadrados
CAA	Classe de agressividade ambiental
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço
f_{ck}	Resistência a compressão característica do concreto
kN	Quilo Newton
m	Metros
m²	Metros quadrados
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma brasileira registrada
NR	Nível de referência
PBT	Peso Bruto Total
tf	Tonelada força
tfm	Tonelada força metro
Ø	Diâmetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral.....	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	13
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	CONCRETO ARMADO	15
2.1.1	Classes de Agressividade	15
2.1.2	Concreto de cobrimento	16
2.1.3	Lajes	17
2.1.4	Vigas.....	18
2.1.5	Pilares.....	18
2.2	CARREGAMENTOS.....	19
2.3	IMPACTO DE VEÍCULOS NO <i>SOFTWARE</i> TQS	25
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	OBJETO DE ESTUDO	27
3.2	PRÉ-DIMENSIONAMENTO	29
3.2.1	Lajes	29
3.2.2	Vigas.....	30
3.2.3	Pilares.....	30
3.3	MODELO	32
3.3.1	Dados do edifício.....	32

3.3.1.1	Modelo	32
3.3.1.2	Pavimentos	33
3.3.1.3	Materiais	33
3.3.1.4	Cargas	34
3.3.2	Critérios.....	36
3.3.3	Modelagem.....	37
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	42
4.1	MODELO M1 - SEM CONSIDERAR O IMPACTO HORIZONTAL	42
4.2	MODELO M2 - CONSIDERANDO O IMPACTO HORIZONTAL.....	48
4.2.1	Dimensionamento pelo método do pilar padrão com rigidez κ aproximada	51
4.2.2	Dimensionamento pelo método geral.....	55
4.3	CONSIDERAÇÕES FEITAS PELO TQS.....	57
5	CONCLUSÃO.....	63
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, o cimento é o material produzido pelo homem mais consumido no mundo, sendo utilizados mais de 14 bilhões de metros cúbicos a cada ano de acordo a Global Cement and Concrete Association (GCCA,2020). De forma análoga, o concreto, ou seja, a mistura de cimento, água e agregados (areia e pedra), é o segundo material mais utilizado pela humanidade, dentre todos os artificiais e naturais disponíveis, ficando apenas atrás da água em volume anual.

O grande índice de utilização de concreto é visto também no Brasil, uma vez que grande parte das edificações construídas no país utilizam este material. Seu vasto uso pode ser comprovado pela sua versatilidade, sendo moldado facilmente e tendo capacidade de proporcionar uma boa durabilidade aliada a uma resistência, quando executado da forma adequada.

No decorrer do desenvolvimento de um projeto estrutural, uma das partes essenciais e de grande importância é a correta determinação das ações atuantes, sendo elas permanentes ou variáveis. É possível confirmar a notoriedade do levantamento das cargas verificando a seção dos elementos e suas armaduras, uma vez que caso tenha sido previsto o carregamento mais leve que o necessário, isso leva a um subdimensionamento da estrutura e como consequência, pode levar a ruína da mesma.

Tendo em vista a importância da correta determinação das ações atuantes, é necessário que os engenheiros calculistas tenham conhecimento pleno da versão mais recente da normativa que determina os carregamentos a serem considerados, ou seja, a ABNT NBR 6120:2019.

A ABNT NBR 6120:2019, norma responsável por identificar as cargas para os diversos tipos de edificações teve uma alteração significativa em sua última versão, emitida no ano de 2019. A versão anterior possuía apenas 5 páginas, enquanto a atual passou para 64 páginas, portanto, é possível notar que esta atualização trouxe um maior detalhamento dos casos de carregamento e de edificações, inclusive abordando situações mais específicas, como o impacto horizontal em pilares, o qual é o foco deste estudo.

Atualmente, em um mundo tão digital, por diversas vezes é possível ver vídeos nos quais veículos em movimento acabam colidindo diretamente nos pilares.

Diversas vezes, essas ocorrências sequer são noticiadas em jornais, mas em uma pesquisa rápida em plataformas como o YouTube, é fácil de encontrar. Como a estrutura deve ser segura e durável, é necessário que sejam previstas todas as possíveis ações que podem ocorrer durante a sua vida útil, e então, surge a necessidade da consideração do esforço horizontal devido ao impacto acidental de veículos.

Portanto, este trabalho tem como função executar o projeto estrutural de um edifício garagem em concreto armado, sendo analisado a consideração de impacto horizontal devido a veículos, tendo como foco principal os pilares. Para concepção, análise e detalhamento será utilizado o software TQS e seus subsistemas. O dimensionamento da estrutura será de acordo a ABNT NBR 6118:2014.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a diferença nos esforços e dimensionamento de um pilar sujeito ao impacto acidental de veículos utilizando o software TQS e verificar de que forma o programa considera o impacto horizontal nos pilares.

1.1.2 Objetivos específicos

- Dimensionar e detalhar o pilar com e sem o carregamento horizontal devido ao impacto dos veículos;
- Analisar os esforços das situações considerando e não considerando o impacto dos veículos;
- Verificar a influência do carregamento horizontal no consumo de aço e nos esforços atuantes no pórtico.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho estará dividido em 5 partes, sendo elas:

Inicialmente, uma breve introdução, a qual tem função de aprestar e contextualizar de forma breve o tema, ilustrando a justificativa do trabalho e apresentando o que se busca obter ao final deste estudo.

A seguir, no capítulo 2, será apresentada a revisão bibliográfica, ilustrando todos os conceitos necessários para o prosseguimento do trabalho, além de embasar as escolhas a serem tomadas na metodologia e nas conclusões obtidas a partir dos resultados obtidos.

No capítulo 3, será descrito o elemento de estudo, ou seja, o edifício garagem, e serão determinados os parâmetros utilizados na concepção e os procedimentos utilizados na modelagem da estrutura.

No capítulo 4, serão apresentados os resultados obtidos, ou seja, os valores solicitantes nos elementos e seus respectivos detalhamentos para os diferentes tipos de ações atuantes e as devidas comparações.

Por fim, no capítulo 5, serão sintetizadas as informações obtidas e dispostas a conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO ARMADO

Conforme determinado pela ABNT NBR 12655:2022, o concreto armado consiste em uma mistura homogênea entre o aglomerante, agregado graúdo, agregado miúdo e água, podendo ou não ter a incorporação de aditivos químicos e outras adições.

O dimensionamento de peças de concreto armado no Brasil é normalizado pela ABNT NBR 6118:2014, a qual apresenta o procedimento para o projeto de estruturas de concreto. A norma consiste em um texto extenso, com mais de 200 páginas, exemplificando cada tipo de elemento, seu funcionamento e seu dimensionamento.

De acordo a ABNT NBR 8681:2003, todos os elementos devem ser dimensionados para atender ao estado limite último (ELU), ou seja, o estado em que impede o uso da construção devido ao risco de ruína, e ao estado limite de serviço (ELS), ou seja, o estado que por sua ocorrência, repetição ou duração causam efeitos incondizentes com as condições do uso da estrutura, podendo ser exemplificado com a deformação excessiva de um elemento.

Devido a não serem parte do escopo deste trabalho, as vigas e lajes serão apenas pré-dimensionadas e verificadas ao ELU. É importante salientar que caso alteradas as seções dos elementos, devido a estar sendo abordada uma análise de um pórtico hiperestático, provavelmente ocorreria uma diferença na distribuição dos esforços, proveniente da maior rigidez de uma parte da estrutura, uma vez que regiões mais rígidas tendem a absorver maiores esforços. Portanto, as seções de vigas e lajes devem ser as mesmas nos 2 modelos analisados.

2.1.1 Classes de Agressividade

Conforme determinado pela ABNT NBR 6118:2014, a agressividade proveniente do meio ambiente relaciona-se diretamente às ações físicas e químicas atuantes nas estruturas de concreto. As classes de agressividade ambiental (CAA) a serem consideradas estão dispostas no Quadro 1.

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral para o tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
VI	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: adaptado de ABNT NBR 6118:2014

2.1.2 Concreto de cobrimento

Para a garantia da durabilidade das estruturas de concreto, a ABNT NBR 6118:2014 determina alguns parâmetros mínimos quanto a qualidade do concreto em função da classe de agressividade do ambiente, conforme disposto no Quadro 2.

Quadro 2 – Qualidade do concreto em função classe de agressividade

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	Concreto armado	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	Concreto Protendido	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto	Concreto armado	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	Concreto Protendido	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

Fonte: adaptado de ABNT NBR 6118:2014

Além dos parâmetros mínimos do concreto, todos os elementos devem possuir um cobrimento nominal igual ou superior ao apresentado no Quadro 3. O cobrimento nominal (C_{nom}) é composto pelo cobrimento mínimo (C_{min}) e por uma tolerância de execução (Δ_c), qual é de 10 mm, porém quando houver controle de qualidade adequado e rígidos limites de tolerância de variabilidade das medidas, este valor pode ser reduzido para 5 mm, portanto, reduzindo também o cobrimento nominal.

Quadro 3 – Cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm em função da classe de agressividade ambiental

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

Fonte: adaptado de ABNT NBR 6118:2014

2.1.3 Lajes

De acordo Bastos (2021), as lajes são elementos de superfície, planos e bidimensionais, ou seja, o comprimento e largura são de grandeza muito superior a espessura. Alternativamente, as lajes podem também ser chamadas de placas.

A ABNT NBR 6118:2014 divide as lajes entre maciças, nervuradas e pré-moldadas, tendo ênfase neste trabalho o primeiro tipo citado. Conforme apresentado na norma, as lajes maciças possuem uma espessura mínima em função de seu modelo, sendo estes casos identificados no Quadro 4.

Quadro 4 – Espessura mínima da laje em função do seu tipo

Tipo de laje	Espessura mínima (cm)
Lajes de cobertura não em balanço	7
Lajes de piso não em balanço	8
Lajes em balanço	10
Lajes que suportam veículos de PBT $\leq 3,0$ tf	10
Lajes que suportam veículos de PBT $> 3,0$ tf	12
Lajes protendidas	15
Lajes Lisas	16
Lajes Cogumelo, fora do capitel	14

Fonte: Elaborada pelo autor com base na ABNT NBR 6118:2014 (2023)

2.1.4 Vigas

A ABNT NBR 6118:2014 define como vigas os elementos lineares, devido ao fato de possuir um comprimento longitudinal pelo menos três vezes maior que a maior dimensão da seção transversal e trabalha majoritariamente a flexão.

Conforme orientado por Araújo (2014), as dimensões dos elementos foram determinadas de modo a ter uma uniformidade entre os elementos, para maior facilidade na execução e reaproveitamento dos materiais, porém, de forma que não acabe se tornando antieconômico devido ao aumento do consumo de concreto.

Para o dimensionamento dos pilares, devido a estes serem o escopo do trabalho, será feita uma abordagem mais detalhada no tópico a seguir.

2.1.5 Pilares

Os pilares, conforme determinado pela ABNT NBR 6118:2014, são elementos lineares, assim como as vigas, porém estes são usualmente dispostos na vertical e trabalham na maioria dos casos sujeitos a forças normais de compressão.

Para o dimensionamento dos pilares, é necessário obedecer às dimensões impostas no item 13.2.3 da ABNT NBR 6118:2014, sendo que a área da seção transversal deve ser superior a 360 cm² e a menor dimensão deve ser igual ou superior a 19 cm, sendo permitido o uso de pilares com 14 cm, desde que seja utilizado um coeficiente adicional γ_n .

Um conceito importante para o dimensionamento de pilares é o do índice de esbeltez, sendo definido conforme a Equação 1. Como é possível observar, a esbeltez é determinada diretamente a partir seção transversal da peça e comprimento de flambagem, o qual tem sua determinação ilustrada na Figura 1.

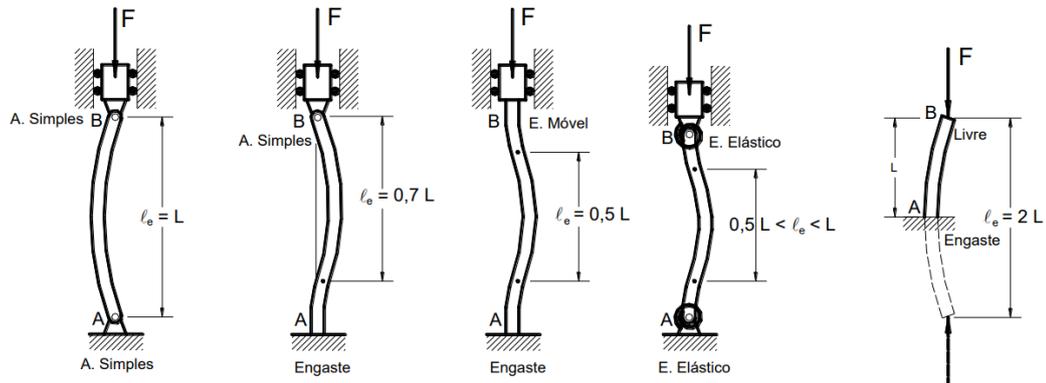
$$\lambda = \frac{le}{i} \quad (1)$$

Sendo:

le : comprimento equivalente de flambagem definido em função das vinculações adotadas;

i : raio de giração da seção geométrica da peça.

Figura 1 – Comprimento de flambagem



Fonte: Bastos (2020)

A esbeltez tem como função determinar qual é o tipo de pilar analisado, sendo feito a divisão conforme o Quadro 5 a partir do que é apresentado por Bastos (2020). Devido a esbeltez do pilar é verificado qual dever ser o método de avaliação dos efeitos locais de segunda ordem, tendo os seguintes disponíveis, método geral, Pilar-padrão com rigidez aproximada, Pilar-padrão com curvatura, Pilar-padrão acoplado ao diagrama N, M, 1/r, conforme item 15.8.3 da ABNT NBR 6118:2014. Complementando, nenhum pilar pode possuir um índice de esbeltez superior a 200 segundo a norma vigente.

Quadro 5 – Classificação dos pilares em função do índice de esbeltez

Classificação	Índice de esbeltez
Pilar curto	$\lambda \leq 35$
Pilar mediantemente esbelto	$35 < \lambda \leq 90$
Pilar esbelto	$90 < \lambda \leq 140$
Pilar muito esbelto	$140 < \lambda \leq 200$

Fonte: Elaborada pelo autor conforme Bastos (2020)

2.2 CARREGAMENTOS

A ABNT NBR 6120:1980 consistia em uma norma concisa, tendo apenas 5 páginas, apresentando poucos casos mais específicos. De forma geral, para o caso do dimensionamento do edifício garagem do estudo, seria necessário determinar a composição da parede para cálculo do seu peso próprio e determinação da carga

permanente atuante. Para as cargas variáveis, seria apenas considerada uma carga vertical de $0,3 \text{ tf/m}^2$ considerando veículos com carga máxima de $2,5 \text{ tf}$, sendo este valor majorado por um coeficiente φ da seguinte forma:

- a) $\varphi = 1,00$ quando $l \geq l_0$
 b) $\varphi = \frac{l_0}{l} \leq 1,43$ quando $l \leq l_0$

Sendo:

l = o vão de uma viga ou o vão menor de uma laje

l_0 = 3 m para o caso das lajes e 5 m para o caso das vigas

Quando comparado a antiga norma brasileira com as estrangeiras, conforme comentado por Júnior (2016), é possível verificar que todas elas possuem limitações quanto a determinação de ações para o cálculo de estruturas com tráfego de veículos.

Nos Estados Unidos, a norma ASCE/SEI 7-10:2010 determina as cargas apenas para veículos de passageiros, mesmo que sem limitação de peso bruto total, sendo que para veículos maiores, a orientação é que seja projetado de acordo a norma da AASHTO LFRD Bridge Design Specifications:2014, sendo desprezadas verificações de efeitos dinâmicos e fadiga. Para o caso de veículos de passageiros, além das cargas definidas, é necessário a verificação de cargas concentradas isoladas e forças horizontais para projetos de barreiras.

Quanto à legislação europeia, a NP EM 1991-1-1:2002 divide os veículos em categorias, sendo elas, até 3 tf e até 16 tf . Nos dois casos, são determinadas cargas verticais uniformemente distribuídas e concentradas, seguindo uma forma de eixo-tipo, devendo ser analisado conforme a posição mais desfavorável. Quanto as cargas horizontais, devem ser analisadas de acordo a NP EM 1991-1-7:2006, sendo nele identificado o projeto de barreiras sujeitas a impacto de veículos.

A atualização do ano de 2019 da norma brasileira de carregamentos para o dimensionamento de estruturas trouxe alterações significativas, tornando-a muito mais detalhada e ilustrando diversos casos particulares que anteriormente não eram abordados.

Conforme citado por Júnior (2016), secretário da comissão de revisão da norma ABNT NBR 6120, a determinação das classes de veículos, com suas dimensões e pesos ocorreu partiu da regulamentação do CONTRAM (Conselho Nacional de Trânsito), seguindo os artigos 99 e 100 da Lei nº 9503 - Código de Trânsito Brasileiro. Posteriormente, foram realizadas pesquisas junto a fabricantes para verificações de classes de veículos, seu peso bruto total e arranjo de eixos. Desta forma, foram abrangidos diversos tipos de veículos, sendo incluindo até mesmo os especiais, como blindados.

Inicialmente, nos carregamentos permanentes verticais da edificação, é possível citar a Tabela 2 da ABNT NBR 6120:2019, a qual ilustra os diferentes tipos de alvenarias, identificando a espessura nominal do elemento e o peso separando as espessuras de revestimento em cada face.

Quanto aos carregamentos variáveis verticais, conforme a Tabela 10 da ABNT NBR 6120:2019, não é mais indicado nesta seção qual deverá ser a carga distribuída a ser considerada, sendo o caso de garagens e estacionamentos direcionado a uma seção específica. Na tabela está presente uma nota em que nestes tipos de edificações não é possível a redução das cargas variáveis.

Prosseguindo para a parte exclusiva de ações de veículos, chega-se à subseção 6.6.1, tendo como título “Ações em garagens e demais áreas de circulação de veículos”. Devido ao estudo dos carregamentos levar em consideração as legislações do CONTRAN, as orientações deste trecho da norma são válidas para qualquer edificação sujeita ao tráfego de veículos conforme a Resolução 210 de 2006. Ademais, nesta norma todos os carregamentos consideram veículos trafegando a uma velocidade máxima de 10km/h, sendo que em velocidades superiores a essa, devem ser levadas em consideração as especificações da ABNT NBR 7188:2013.

Conforme presente no texto da seção 6.6.1 da ABNT NBR 6120:2019, os elementos estruturais do pavimento devem ser verificados para a ação isolada das cargas concentradas, portanto, a carga devido ao impacto acidental de veículo não afeta o pórtico como um todo. Ilustrando melhor o texto, a análise deve ser feita como se um pilar por vez estivesse sujeito ao carregamento.

Para a determinação das classes dos veículos que irão circular na edificação, o controle deve ser feito em função da sua altura livre do acesso, conforme a coluna 4 do Quadro 6. Em casos que houver alguma forma verificação do peso bruto total, pode ser utilizada a classificação conforme a coluna 2, também do Quadro 6, podendo dispensar o critério da altura útil, criando assim uma nova categoria.

Para a análises globais da estrutura e dimensionamento dos elementos devem ser consideradas cargas verticais uniformemente distribuídas conforme a coluna 3 do Quadro 6, além da verificação da atuação isolada das cargas concentradas, conforme a coluna 5 do Quadro 6, sendo que na categoria I, a área de aplicação é de 10cmx10cm, simulando um macaco hidráulico ou mecânico, conforme apresentado na Figura 2. Os pilares sujeitos ao impacto acidental de veículos devem ser verificados para forças horizontais, conforme as colunas 6, 7 e 8 do Quadro 6.

Quadro 6 – Ações em garagens e demais áreas de circulação de veículos

1	2	3	4	5	6	7	8
Cate- goria	PBT (tf)	Carga uniforme- mente distribuída (tf/m²)	Altura máx. (m)	Carga concentrada Qk (tf)	Força horizontal Fx (tf)	Força horizontal Fy (tf)	Altura de aplicação de Fx e Fy (m)
I	≤3,0	0,3	2,3	1,2	10,0	5,0	0,5
II	≤9,0	0,5	2,6	6,0	18,0	9,0	0,5
III	≤16,0	0,7	3,0	10,0	24,0	12,0	1,0
IV	>16,0	1,0	> 3,0	17,0 25,5	32,0	16,0	1,0
V	≤23,0	1,0	≥ 4,5	17,0	32,0	16,0	1,0

Fonte: adaptado de ABNT NBR 6120:2019

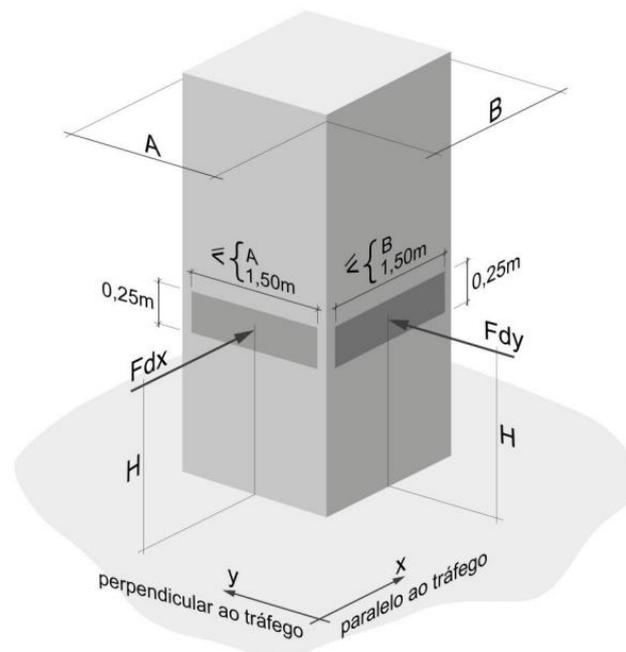
Figura 2 – Exemplo de carga concentrada na laje para a categoria I



Fonte: Blog Loja Stander (2019).

A aplicação das forças horizontais presentes nas colunas 6 e 7 do Quadro 6, ocasionadas devido ao impacto acidental de veículos, devem ser feitas conforme a Figura 3, sendo consideradas como excepcionais, conforme a ABNT NBR 8681:2003 e podendo ser consideradas de forma não concomitante. Alternativamente, podem ser previstas barreiras protetoras que resistam a estes esforços, sendo o pilar dimensionado apenas aos carregamentos triviais.

Figura 3 – Forças horizontais devido ao impacto acidental de veículos



Fonte: ABNT NBR 6120:2019.

Para uma melhor exemplificação do que se trata cada uma das classes de veículos, nas Figuras 4 e 5 é possível verificar modelos que correspondem respectivamente as classes I e II, sendo estas as mais simples e comuns de serem utilizadas.

Figura 4 – Exemplo de veículo da Categoria I



Fonte: Garagem 360 (2021).

Figura 5 – Exemplo de veículo da Categoria II



Fonte: KoldKing (2023).

Todos os carregamentos apresentados consideram a garagem com veículos, de forma que estes estejam espaçados entre 30cm, para veículos de passeio, até 100cm para ônibus e caminhões. Ademais, não foi considerado a utilização de elevadores duplicadores de vagas, sendo que em caso de utilização, deve ser analisado conforme o caso específico.

Para garantia de que as ações presentes no Quadro 6 sejam condizentes com as situações reais, as regiões de tráfego de veículos devem possuir

sinalizações conforme as Figuras 6 e 7, indicando a velocidade máxima permitida, geralmente de 10km/h, e a altura e peso bruto total máximo. Além disso, deve existir forma de controle das dimensões dos veículos que adentram o edifício.

Figura 6 – Exemplos de sinalização da velocidade máxima permitida



Fonte: Adaptada da ABNT NBR 6120:2019.

Figura 7 – Exemplos de sinalização da altura máxima permitida



Fonte: Adaptada da ABNT NBR 6120:2019.

2.3 IMPACTO DE VEÍCULOS NO SOFTWARE TQS

O *software* TQS trouxe a partir de sua versão V23 a possibilidade de considerar o impacto acidental de veículos em pilares. Conforme presente no TQSDocs, portal da TQS onde estão esclarecidas diversas funções do programa, o programa considera que a força de maior magnitude, ou seja, a coluna 6 do Quadro 6, atua sempre na direção de menor rigidez, enquanto a força de menor magnitude, ou seja, a coluna 7 do Quadro 6, atua na direção de maior rigidez. Em casos onde o

pilar possui dimensões iguais nas 2 direções, a maior força é considerada na direção em que o momento atuante é maior.

Conforme determinado pela ABNT NBR 6120:2019, o programa verifica os efeitos da colisão de veículos para as combinações últimas excepcionais, levando em consideração a resistência dos materiais definidas nos critérios do edifício. Quanto a análise da força, ela é feita no modelo local do pilar, podendo ser realizada a determinação dos efeitos de segunda ordem tanto pelo método do pilar-padrão, quanto pelo método geral.

Para consideração da força devido ao impacto, a consideração difere um pouco entre os métodos dos pilares, sendo que no caso do método geral, o carregamento é aplicado no modelo de primeira ordem e a segunda ordem seguindo o caminho usual, porém com a deformada inicial devido ao impacto do veículo. Quanto aos demais métodos, os efeitos do impacto do veículo são incorporados aos esforços locais na seção do meio, sendo adicionado o efeito da força horizontal ao momento de primeira ordem gerado pelas ações excepcionais. O coeficiente α_b é mantido constante e igual a 1, independentemente da forma do diagrama de momentos fletores. Em seguida, o efeito de segunda ordem é calculado levando em conta o aumento gerado no momento de primeira ordem devido ao impacto do veículo.

Para o dimensionamento e detalhamento da armadura horizontal, são levados em consideração os esforços de primeira e segunda ordem gerados pelo veículo, sendo que nestes casos é feito um detalhamento diferenciado da armadura transversal, podendo este ser alterado através dos critérios do edifício.

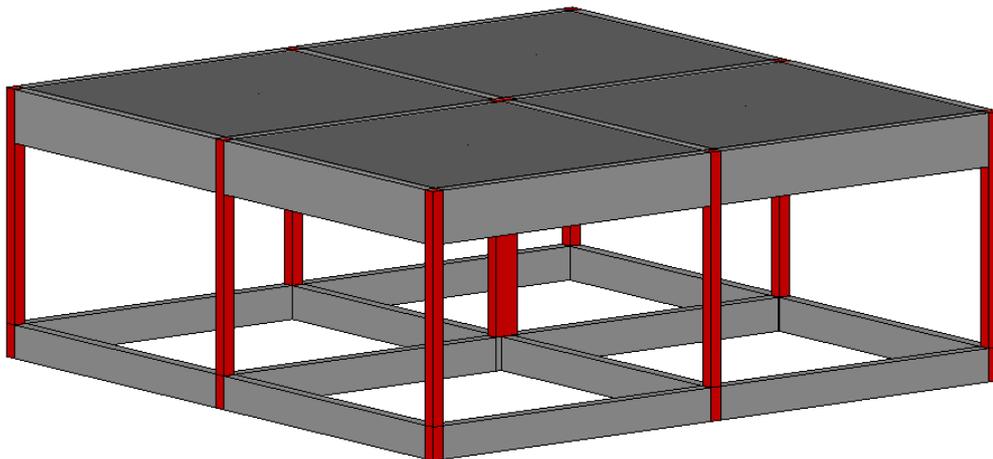
3 METODOLOGIA

Neste capítulo, inicialmente será ilustrado o objeto de estudo, apresentando suas características. A seguir, serão determinadas as metodologias para o pré-dimensionamento de cada um dos elementos estruturais e posteriormente serão explicitadas as premissas de cálculo e detalhamento do modelo estrutural. Todo o processo de modelagem e análise foi realizado o *software* TQS em sua versão V23, com uma licença do tipo Plena.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo deste trabalho é uma edificação fictícia de pequeno porte, a qual consiste em um arranjo simples de pilares, vigas e lajes em concreto armado, conforme a Figura 8. A localização adotada foi na cidade de Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul, em uma área urbana.

Figura 8 – Objeto de estudo

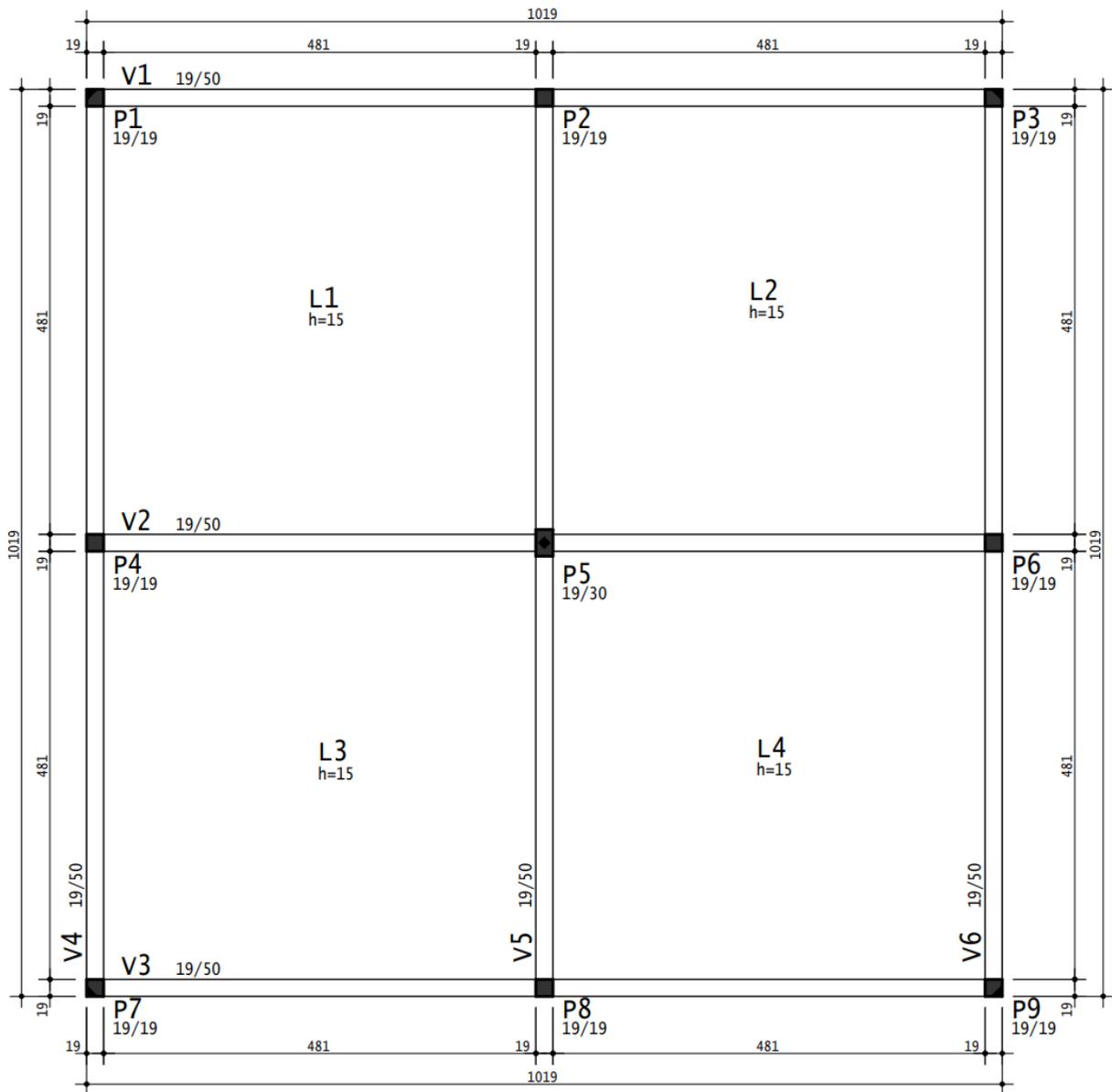


Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

A edificação tem dimensões totais de 10,19 m x 10,19 m, sendo os elementos dispostos conforme a planta de formas da Figura 9. A divisão do modelo se dá em 3 níveis, sendo a fundação, o térreo e a cobertura. A altura da fundação considerada foi de 0,5 m, enquanto o pé-esquerdo adotado entre o térreo e cobertura foi de 3,5

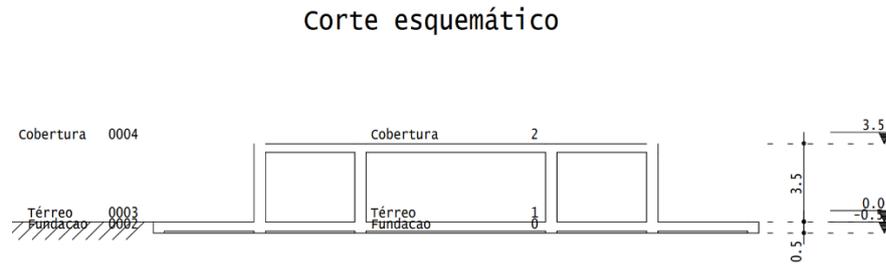
m, devido a este ser uma altura relativamente comum em edifícios garagem. A Figura 10 apresenta um corte esquemático da edificação, identificando cada pavimento e o seu respectivo NR.

Figura 9 – Planta de formas do objeto de estudo



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Figura 10 – Corte esquemático do objeto de estudo



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

A avaliação será realizada com a aplicação de uma carga horizontal devido ao impacto acidental de veículo no pilar central P5 utilizando o *software* TQS e seus subsistemas.

3.2 PRÉ-DIMENSIONAMENTO

3.2.1 Lajes

Para o pré-dimensionamento das lajes, foram consideradas lajes maciças moldadas *in loco* e foi seguida a metodologia proposta por Cunha (2014), determinando a espessura do elemento (h) em função do vão a ser vencido (L). Portanto, para lajes armadas em uma ou duas direções, o dimensionamento foi feito conforme as Equações 2 e 3, respectivamente.

$$\frac{L1}{38} \leq h \leq \frac{L1}{30} \quad (2)$$

$$\frac{L2}{40} \leq h \leq \frac{L2}{32} \quad (3)$$

Sendo:

L1: dimensão do menor vão da laje;

L2: valor da média entre os dois vãos da laje.

Devido as lajes possuírem o mesmo vão nas duas direções, foram consideradas como armadas em 2 direções, portanto, é possível determinar que a sua espessura ideal esteja entre 12,5 cm e 15,63 cm. Ademais, considerando o

tráfego de veículos da Categoria I sobre ela, ou seja, com PBT de até 3 tf, seria necessária uma espessura mínima de 12cm, conforme o Quadro 4. A partir destas informações, a altura adotada foi de 15 cm.

Como não faz parte do escopo deste trabalho, não foram analisadas as cargas verticais concentradas devido a utilização de macacos e eixos de veículos.

3.2.2 Vigas

Para as vigas, devido ao fato da pequena quantidade de cargas atuantes, foi utilizado o pré-dimensionamento básico e conhecido do vão dividido por 10, sendo assim, para um vão de 5,0 m, a viga, de acordo o pré-dimensionamento terá 50,0 cm. A largura foi determinada em função dos pilares.

Devido as vigas não fazerem parte do escopo deste trabalho, assim como as lajes, não serão analisadas as cargas verticais concentradas devido a utilização de macacos e eixos de veículos.

3.2.3 Pilares

Devido à baixa carga vertical presente no objeto de estudo, foi considerado apenas que os pilares deveriam ser superiores as dimensões mínimas apresentadas no item 13.2.3 da ABNT NBR 6118:2014, ou seja, ter as suas dimensões maiores que 14 cm e seção transversal com área superior a 360 cm². Como pilares entre 14 cm e 19 cm necessitam um coeficiente adicional, a dimensão mínima adotada foi de 19 cm.

Conforme Bastos (2021), os pilares intermediários ou extremidade e canto podem ser pré-dimensionados de acordo as Equações 4 e 5, respectivamente.

$$A_c = \frac{N_d}{0,5 f_{ck} + 0,4} \quad (4)$$

$$A_c = \frac{1,5 N_d}{0,5 f_{ck} + 0,4} \quad (5)$$

Sendo:

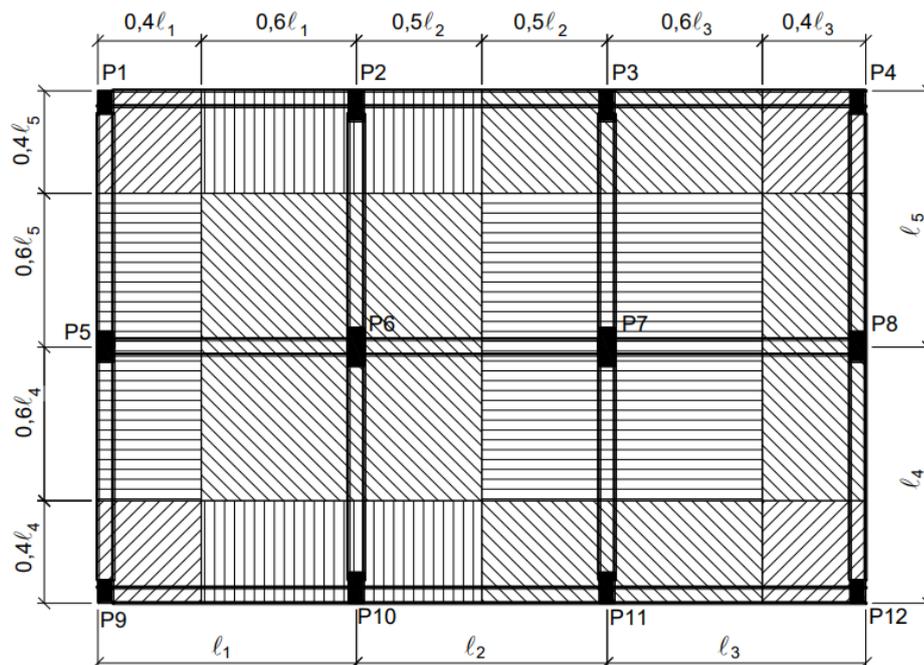
A_c : área da seção transversal do pilar (cm²);

N_d : força normal de cálculo (kN);

f_{ck} : resistência característica do concreto (kN/cm²).

A normal de cálculo é determinada área de influência do pilar e pela estimativa de carga distribuída por m². A área de influência de cada pilar é determinada conforme a Figura 11.

Figura 11 – Área de influência de cada pilar



Fonte: Bastos (2021).

A partir destes métodos, os pilares da periferia, ou seja, P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8 e P9 foram determinados com as dimensões mínimas, ou seja, 19 cm x 19 cm, enquanto no pilar central P5, que posteriormente estará sujeito ao carregamento devido ao impacto acidental de veículos, foi adotado a dimensão de 19 cm x 30 cm, para que seja dimensionável mesmo que no modelo com a atuação da carga do veículo.

O processo de dimensionamento do pilar central foi iterativo, uma vez que era necessário que ele fosse dimensionável com e sem a consideração do esforço horizontal, pois, caso fosse necessário alterar a seção, o estudo acabaria sendo afetado devido aos pilares de dimensões diferentes. Para atender ao descrito anteriormente, inicialmente foi utilizado um pilar de 19 cm x 19 cm, o qual atendeu

para o caso sem carregamento do veículo, mas acabou não atendendo quando solicitado pelo impacto. Após testar também a geometria de 19 cm x 25 cm e esta não atender ao dimensionamento, foi concluído que a seção de 19 cm x 30 cm seria a que melhor atenderia aos modelos de estudo.

3.3 MODELO

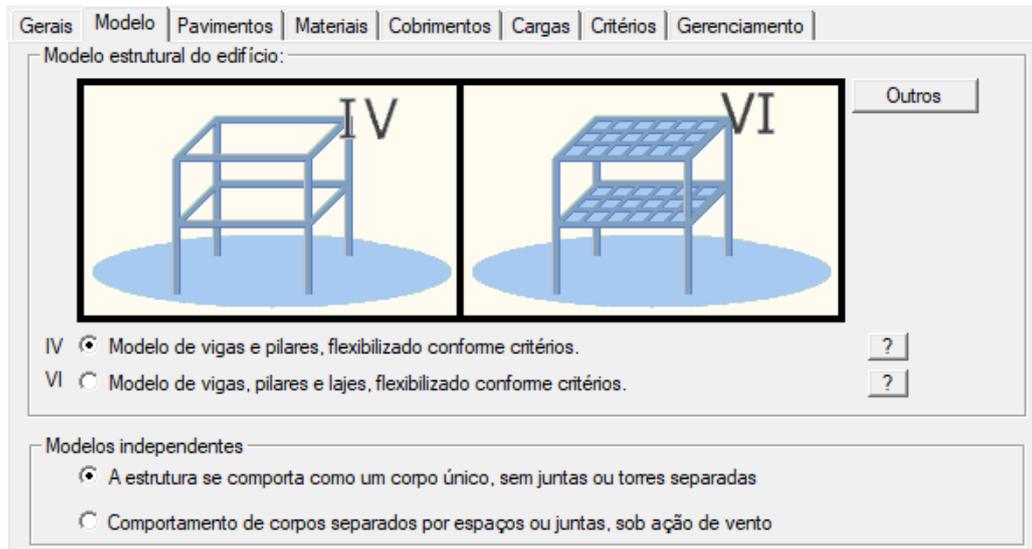
Para o estudo, foram feitos dois modelos com configurações de dados do edifício e critérios idênticos, sendo eles nomeados como M1 e M2. No M1 foram apenas consideradas as cargas permanentes e acidentais verticais, enquanto no M2, além de tudo presente no M1, foi adicionado o carregamento horizontal devido ao impacto acidental de veículo no pilar P5, o qual será o foco principal.

3.3.1 Dados do edifício

3.3.1.1 Modelo

Devido a se tratar de uma construção simples e pequena, para a análise foi considerado o modelo IV do TQS, no qual, o edifício é modelado por um pórtico espacial composto por barras que simulam vigas e pilares, além de que é considerando o efeito do diafragma rígido das lajes presentes na estrutura. Neste modelo, o dimensionamento e análise das lajes ocorre apenas em função das ações verticais. Ademais, pelo fato de ser uma edificação de pequeno porte, não foram consideradas juntas, então a estrutura se comporta como um corpo único. A Figura 12 apresenta as configurações expostas nesse parágrafo.

Figura 12 – Configurações do modelo



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

3.3.1.2 Pavimentos

A configuração dos pavimentos foi realizada conforme apresentado no item 3.1 deste trabalho.

3.3.1.3 Materiais

Considerando que o objeto de estudo está localizado em uma área urbana da cidade de Santa Maria, a partir do Quadro 1 é possível afirmar que a edificação se enquadra na Classe de Agressividade Ambiental II, sendo esta, uma agressividade moderada e possuindo um risco de deterioração da estrutura pequeno.

Partindo da informação de que a estrutura está em uma CAA II e foi trabalhado apenas com concreto armado, através do Quadro 2 é verificado que a relação água/cimento em massa deve ser inferior a 0,60 e a classe do concreto deve ser superior a C25, ou seja, um concreto com f_{ck} igual ou superior a 25 MPa.

Para o cobrimento a ser utilizado em cada elemento, considerando a CAA II e uma edificação em concreto armado, sem considerar rígidos controles de qualidade e tolerância de medidas, através do Quadro 3 é foram determinados os seguintes valores:

- Lajes: 2,5 cm
- Vigas: 3,0 cm
- Pilares: 3,0 cm

Elementos de fundação ou pilares e vigas em contato com o solo não foram citados devido a não serem abordados no trabalho.

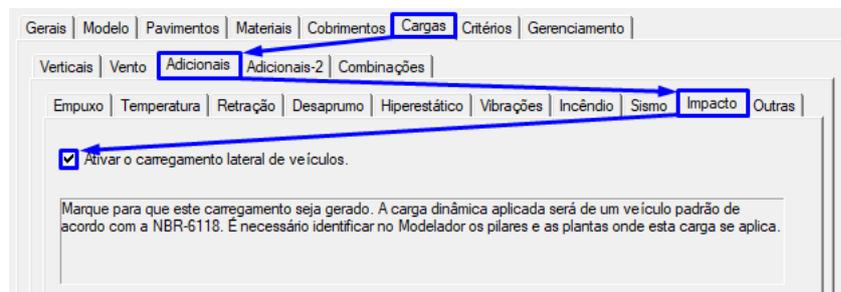
3.3.1.4 Cargas

Quanto as cargas, nos Dados do edifício são apresentadas 5 subdivisões, sendo elas: “verticais”, “vento”, “adicionais”, “adicionais-2” e “combinações”. As abas “verticais”, “adicionais-2” e “combinações” permaneceram inalteradas, enquanto “vento” e “adicionais” foram alteradas.

Na aba vento, como o nome sugere, são inseridas as informações para o cálculo do carregamento devido a ação do vento sobre a estrutura. Pelo elemento de estudo ser baixo e pelo enfoque ser no esforço gerado pelo impacto acidental de veículos, o vento foi desprezado.

Quanto ao impacto de veículo, é necessário que ele seja indicado para a correta montagem das combinações últimas normais, sendo a sua ativação indicada na Figura 13.

Figura 13 – Ativação do carregamento lateral de veículos



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Conforme apresentado no TQS Docs, as combinações excepcionais são geradas automaticamente em edifícios que possuem a ação do vento, mesmo esta não sendo uma ação excepcional, portanto, para simplificar o processo e não tornar

necessária a criação das combinações de forma manual, foi inserida uma condição de vento apenas no modelo M2, na qual a velocidade básica foi zerada, portanto, o carregamento devido ao vento também será nulo. Como o carregamento gerado pelo vento será zero, podem ser adotados quaisquer parâmetros de Fator do Terreno, Categoria da rugosidade, Categoria da edificação, Fator estatístico e Coeficiente de Arrasto.

Devido ao fato de que em um dos modelos é considerada a ação do impacto accidental de veículos e no outro não, os casos de carregamentos diferem entre o M1 e o M2. As Tabelas 1 e 2 apresentam os casos de carregamento dos modelos M1 e M2, respectivamente, sendo as combinações precedidas de ELU utilizadas para verificações do estado limite último, as precedidas de FOGO para situações de incêndio, as ELS para verificações de estado limite de serviço e a de COMBFLU para o cálculo da fluência. Quanto as siglas, PP se refere ao peso próprio, PERM as cargas permanentes, ACID as cargas accidentais, VENT para o vento e IMPC para o impacto accidental de veículos.

Tabela 1 – Combinações de ações do modelo M1

Caso	Combinação de ações
9	ELU1/PERM/PP+PERM
10	ELU1/PERMACID/PP+PERM+ACID
11	FOGO/PERMVAR/PP+PERM+0.6ACID
12	ELS/CFREQ/PP+PERM+0.7ACID
13	ELS/CQPERM/PP+PERM+0.6ACID
14	COMBFLU/COMBFLU/PP+PERM+0.6ACID

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Tabela 2 – Combinações de ações do modelo M2

Caso	Combinação de ações
11	ELU1/PERM/PP+PERM
12	ELU1/PERMACID/PP+PERM+ACID
13	ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT
14	ELU1/ACIDCOMB/PP+PERM+0.8ACID+VENT
15	ELU1/EXCEPC/0.86PP+0.86PERM+0.43VENT+0.57ACID+0.71IMPC
16	FOGO/PERMVAR/PP+PERM+0.6ACID
17	ELS/CFREQ/PP+PERM+0.7ACID
18	ELS/CFREQ/PP+PERM+0.6ACID+0.3VENT
19	ELS/CQPERM/PP+PERM+0.6ACID
20	COMBFLU/COMBFLU/PP+PERM+0.6ACID

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Como apresentado anteriormente, o impacto acidental de veículos é considerado como uma ação excepcional e na combinação de ações tem o coeficiente majorador igual a 1, porém, quando visualizado a Tabela 2, o multiplicador de 0,71 pode causar confusão. Como o TQS multiplica todas as solicitações por 1,4 no momento do dimensionamento e análise, na montagem dos carregamentos o *software* divide todas as combinações por 1,4, portanto, o 0,71 tem como origem a divisão 1,0/1,4.

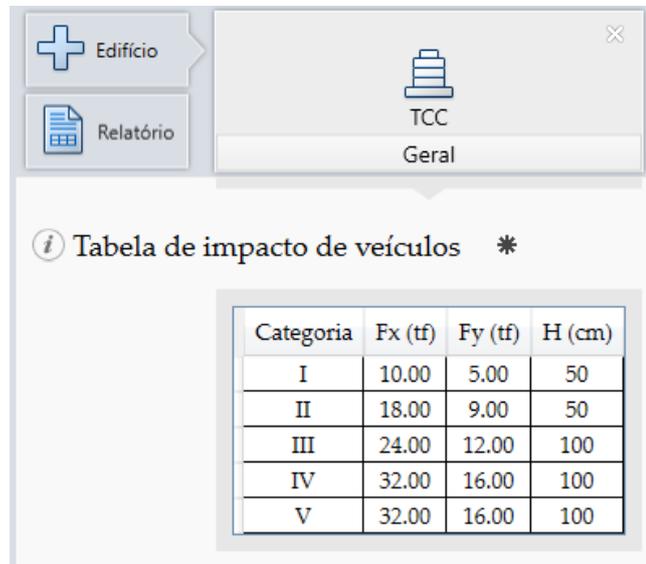
3.3.2 Critérios

Devido ao *software* utilizado ser extremamente configurável, é possível que diversos parâmetros sejam editados de acordo a preferência do operador. Desta forma, é necessário que alguns critérios sejam conferidos antes de iniciar a modelagem.

Para verificar os critérios de pilares, é necessário ir no TQS Pilar, seguir para critérios e então optar entre projeto ou desenho. Dentro do editor de critérios é possível verificar a tabela de altura de aplicação e de forças horizontais devido ao impacto de veículos, conforme Figura 14, entrando em “Esforços” → “Impacto de Veículos”. Como é possível observar, todas as classes podem ter a carga em X e Y ou altura alteradas, atendendo a necessidade, porém, no caso deste estudo, todos

os campos foram mantidos conforme o padrão do *software*, uma vez que condiz com a ABNT NBR 6120:2019.

Figura 14 – Tabela de impacto de veículos



Categoria	Fx (tf)	Fy (tf)	H (cm)
I	10.00	5.00	50
II	18.00	9.00	50
III	24.00	12.00	100
IV	32.00	16.00	100
V	32.00	16.00	100

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Em decorrência da força horizontal aplicada no pilar, pode acontecer um aumento de esforço cortante no decorrer da altura, de modo que se torne necessário estribos com menor espaçamento. Para atender a esta solicitação, é possível editar qual será o espaçamento máximo adotado seguindo o caminho dentro do editor de critérios do pilar: "Arm. Transversal" → "Bitolas/Seleção" → "Espaçamento máximo para pilares sujeitos a impacto de veículo", sendo que neste trabalho foi adotado o padrão do programa, de 10 cm.

3.3.3 Modelagem

A modelagem se iniciou pelo lançamento dos pilares no pavimento fundação, sendo adotada a seção de 19 cm x 19 cm para os pilares P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8 e P9 e 19 cm x 30 cm para o pilar P5, o qual será sujeito ao impacto acidental de veículo. Nos "Dados de pilares" do modelador estrutural, na aba modelo, todos os pilares foram considerados como vinculados em fundação/solo, trabalhando em compressão e com os demais critérios conforme padrão, como apresentado na

Figura 15. Na aba Grelha/Pavimento, em todos os pilares foi optado por adotar “Modelo de apoio conforme critérios”. Na parte Pórtico, para todos os coeficientes de mola foi adotado o padrão, e para articular o pilar também como padrão. Nas abas detalhamento, cargas e BIM, foi mantido as configurações do *software*. Em Plantas/Seções, todos os pilares foram configurados nascendo no pavimento Fundação e morrendo no pavimento Cobertura.

Figura 15 – Aba Modelo dos Dados de pilares

A janela 'Dados de pilares' apresenta a seguinte configuração na aba 'Modelo':

- O pilar nasce:**
 - Vinculado na fundação / solo
 - Em viga
 - Em pilar/bloco/sapata/tubulão
 - Sobre laje
- Trabalha em:**
 - Compressão
 - Tração / compressão
 - Compatibilização
 - Só tração (tirante)
 - Só compressão (escora)
- Recebe vento:**
 - Não (Tabela de vento)
 - Sim (Parcelas de vento)
- Direção:**
 - Vertical
 - Inclinado
- Pilar parede - inércia à torção laminar:**
 - Não calcular
 - Aproximada ou discretização
- Não linearidade física:**
 - Pilar
 - Parede não fissurada
 - Parede fissurada
- Verificar interferências:**
 - Não
 - Sim

Botões de controle: OK e Cancelar.

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Quanto as vigas, tanto no pavimento térreo, quanto no pavimento cobertura, a seção adotada foi 19 cm x 50 cm. Todos os dados da viga seguem o padrão do *software* de quando feito o lançamento, exceto na aba Modelo, apresentada na Figura 16, onde foi desativado a mesa colaborante.

Figura 16 – Aba Modelo dos Dados Gerais da Viga

The image shows a software dialog box titled "Dados Gerais da Viga" with a close button (X) in the top right corner. The dialog has several tabs: "Identificação", "Inserção", "Seção/Carga", "Modelo" (selected), "Intersecções", "Temperatura/Retração", "Detalhamento", and "BIM".

Under the "Modelo" tab, the "Modelo de viga contínua" section contains the following options:

- Mesa colaborante: Não Sim
- Mesa colaborante máxima: cm
- Mesa colaborante fixa: cm
- Engastar no início: Não Sim
- Engastar no fim: Não Sim
- Desabilitar peso próprio: Não Sim
- Avançar inicial: Não Sim
- Avançar final: Não Sim

The "Trabalha como" section has three radio buttons: Viga, Tirante, and Escora.

On the right side, the "Inércia à torção (afeta o valor do Mx de torção)" section has:

- Divisor definido em: Critérios pórtico/grelha Abaixo
- Divisor de inércia à torção:

The "Inércia à flexão no pórtico/grelha" section has:

- Divisor de inércia à flexão:

The "Modelo de lajes" section has:

- Calcular como viga-faixa: Não Sim

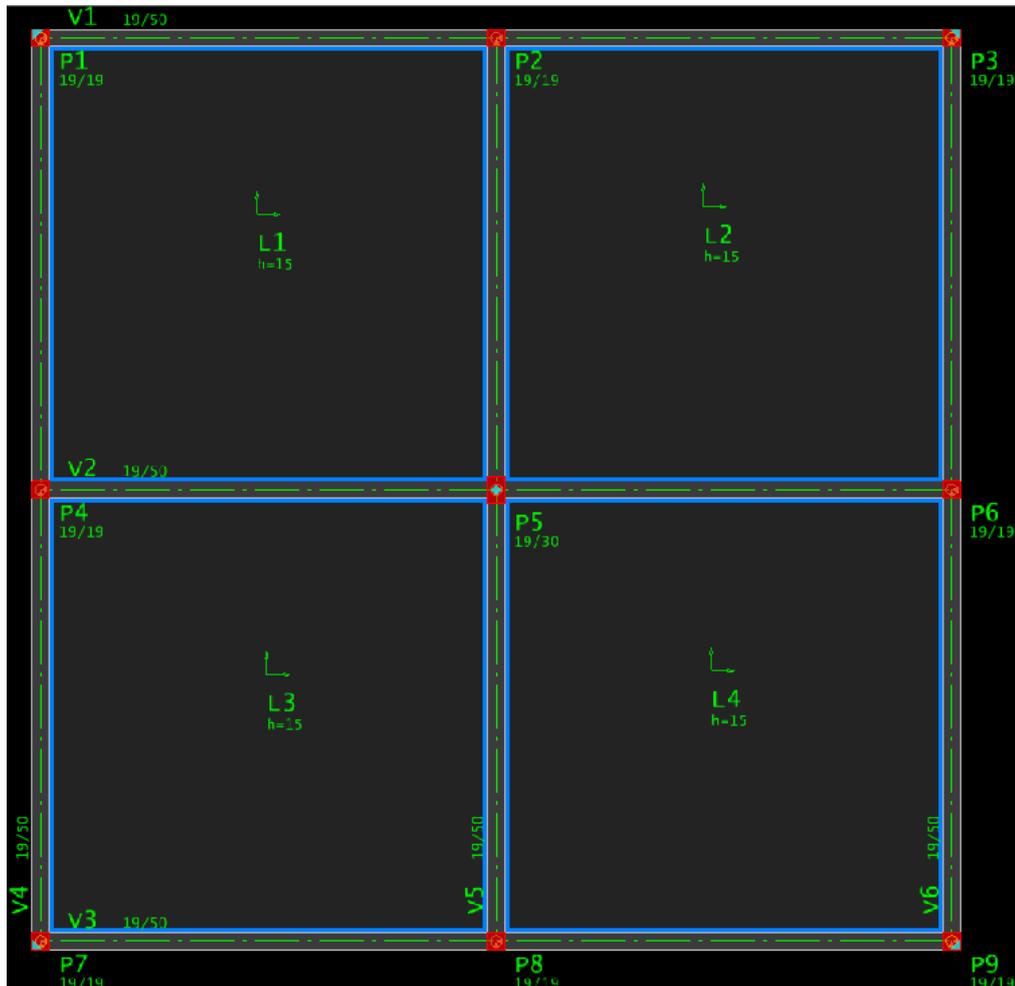
The "Considerar como viga de transição" section has three radio buttons: Pela geometria, Sempre, and Nunca.

At the bottom of the dialog are "OK" and "Cancelar" buttons.

Fonte: Elaborada pelo autor com base no software TQS (2023).

Quanto as lajes, elas apresentam também todas as configurações padrão do *software*, inclusive, sendo seus apoios adotados conforme critérios, como apresentado na Figura 17. As lajes adotadas possuem espessura de 15 cm, de acordo apresentado em 3.2.1 e o carregamento considerado no modelo foi de 0,1 tf/m² para cargas permanentes (revestimento) e de 0,3 tf/m² para carga acidental, considerando a carga uniformemente distribuída de uma garagem Categoria I.

Figura 17 – Lajes apoiadas conforme critérios



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Após finalizar o M1, com seu processamento e detalhamento, o modelo é duplicado com o nome de M2, e então é inserido o carregamento devido ao impacto accidental de veículos. Para a aplicação da força no pilar foi considerado a Categoria I, ou seja, apenas veículos de passeio com PBT inferior a 3,0 tf.

Para a aplicação da força no pilar é necessário editar o pilar P5 no pavimento da cobertura, que é onde irá atuar o carregamento. Feito isso, conforme apresentado na Figura 18, na aba detalhamento é necessário selecionar se o pilar está sujeito ao impacto de veículos e a qual classe será adotada na consideração. Em casos de mais de um pilar com impacto de veículos, é possível selecionar todos os semelhantes e aplicar a todos de uma vez.

Figura 18 – Aplicação do impacto accidental de veículo

The image shows a software window titled "Dados de pilares" with a close button (X) in the top right corner. The window has several tabs: "Identificação", "Seção", "Modelo", "Grelha/Pavimento", "Pórtico", "Detalhamento" (which is highlighted with a blue box), "Cargas", "Plantas/Seções", and "BIM".

The "Detalhamento" tab contains the following settings:

- Fundação:**
 - Altura da fundação: 0 cm
 - Rebaixo da base do pilar (cm): 0 cm
- Topo:**
 - Rebaixo do topo do pilar: 0 cm
- Simular cortina:**
 - O pilar simula cortina: Não Sim
- Flambagem do lance:**
 - Coefficiente X: 0
 - Coefficiente Y: 0
 - Pé-direito duplo X: Padrão Não Sim
 - Pé-direito duplo Y: Padrão Não Sim
- Detalhamento - TQS Pilar:**
 - Detalhar: Não Sim
 - Cobrimto diferenciado: 0 cm
 - Ambiente: Normal Solo Ambiente
 - Fck diferenciado: [dropdown menu]
 - Sujeito a impacto de veículo: **Sujeito a impacto de veículo** (highlighted with a blue box)
 - Não
 - Categoria I (highlighted with a blue background)
 - Categoria II
 - Categoria III
 - Categoria IV
 - Categoria V

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Após a finalização dos modelos M1 e M2 foi feito o processamento global da estrutura com esforços e detalhes gerados pelo *software*.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos modelos M1 e M2, ilustrando por exemplo, esforços solicitantes e detalhamentos. Posteriormente será feita uma análise para a verificação da forma que o TQS considerou o impacto accidental de veículos a partir do modelo e critérios utilizados.

No decorrer da apresentação dos resultados, não serão abordados os esforços e dimensionamentos dos trechos dos pilares entre a fundação e o térreo, uma vez que esta parte é resolvida conforme a adoção da fundação.

4.1 MODELO M1 - SEM CONSIDERAR O IMPACTO HORIZONTAL

Inicialmente, abrindo o Relatório gerado pelo TQS-Pilar, apresentado na Figura 19, é possível observar que todos os pilares a taxa geométrica de armadura (ρ), ou seja, a relação entre a área de armadura e a seção transversal de concreto, é baixa, o que ocorre devido as pequenas dimensões e baixos carregamentos atuantes nos elementos estruturais do objeto de estudo. Outrossim, é notável que a força normal adimensional (v), ou seja, a relação entre a força atuante e a força resistente, está bem abaixo de 1, portanto, existe folga no dimensionamento.

Figura 19 – Relatório de pilares do modelo M1

Pilar	Lances	Seção (cm)	σ (kgf/cm ²)	v	λ	ρ	Taxa de aço (kgf/m ³)
P1	1 a 2	19X19	11.2 a 15.3	0.062 a 0.085	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P2	1 a 2	19X19	29 a 36.5	0.163 a 0.204	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P3	1 a 2	19X19	11.1 a 15.2	0.062 a 0.085	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P4	1 a 2	19X19	29.2 a 36.7	0.164 a 0.205	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P5	1 a 2	19X30	49 a 55.7	0.274 a 0.312	3 a 64	0.55 a 0.55	89.7
P6	1 a 2	19X19	29 a 36.5	0.163 a 0.204	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P7	1 a 2	19X19	11.2 a 15.3	0.063 a 0.086	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P8	1 a 2	19X19	29.2 a 36.7	0.164 a 0.205	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P9	1 a 2	19X19	11.2 a 15.3	0.062 a 0.085	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Pelo fato de a estrutura ser simétrica no sentido horizontal e vertical, os pilares P1, P3, P7 e P9 estão sujeitos a esforços solicitantes semelhantes, portanto, é possível igualar os seus detalhamentos. A mesma situação ocorre nos pilares P2 e P8 e P4 e P6. Conforme é possível observar na Tabela 3, composta por dados extraídos do relatório geral dos pilares, os momentos em x e y, além da força normal em cada um dos elementos possui pouca diferença. Outro fator que ocorre devido simetria da estrutura, é que no pilar P5 não existe momento atuante.

Tabela 3 – Esforços solicitantes de 1ª+2ª ordem global do modelo M1

Pilar	N_d (tf)	M_{Sxd} (tfm)	M_{Syd} (tfm)	$M_{dx,min}$ (tfm)	$M_{dy,min}$ (tfm)
P1	5,5	0,29	0,29	0,23	0,23
P2	14,2	0,57	0,00	0,63	0,63
P3	5,4	0,29	0,29	0,23	0,23
P4	14,3	0,57	0,00	0,63	0,63
P5	42,6	0,00	0,00	1,78	1,41
P6	14,2	0,57	0,00	0,23	0,23
P7	5,5	0,29	0,29	0,63	0,63
P8	14,2	0,57	0,00	0,23	0,23
P9	5,5	0,29	0,29	0,63	0,63

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

O momento mínimo, determinado em função da força de compressão atuante (N_d) e da dimensão do pilar (h), conforme a Equação 6, acabou sendo maior que o próprio momento atuante em diversos pilares, como visto na Tabela 3. Quando esta situação ocorre, o momento considerado para o dimensionamento do pilar é o momento mínimo.

$$M_{1d,min} = N_d(0,015 + 0,03h) \quad (6)$$

Sendo:

$M_{1d,min}$ = momento mínimo de 1ª ordem

N_d = força normal solicitante de cálculo

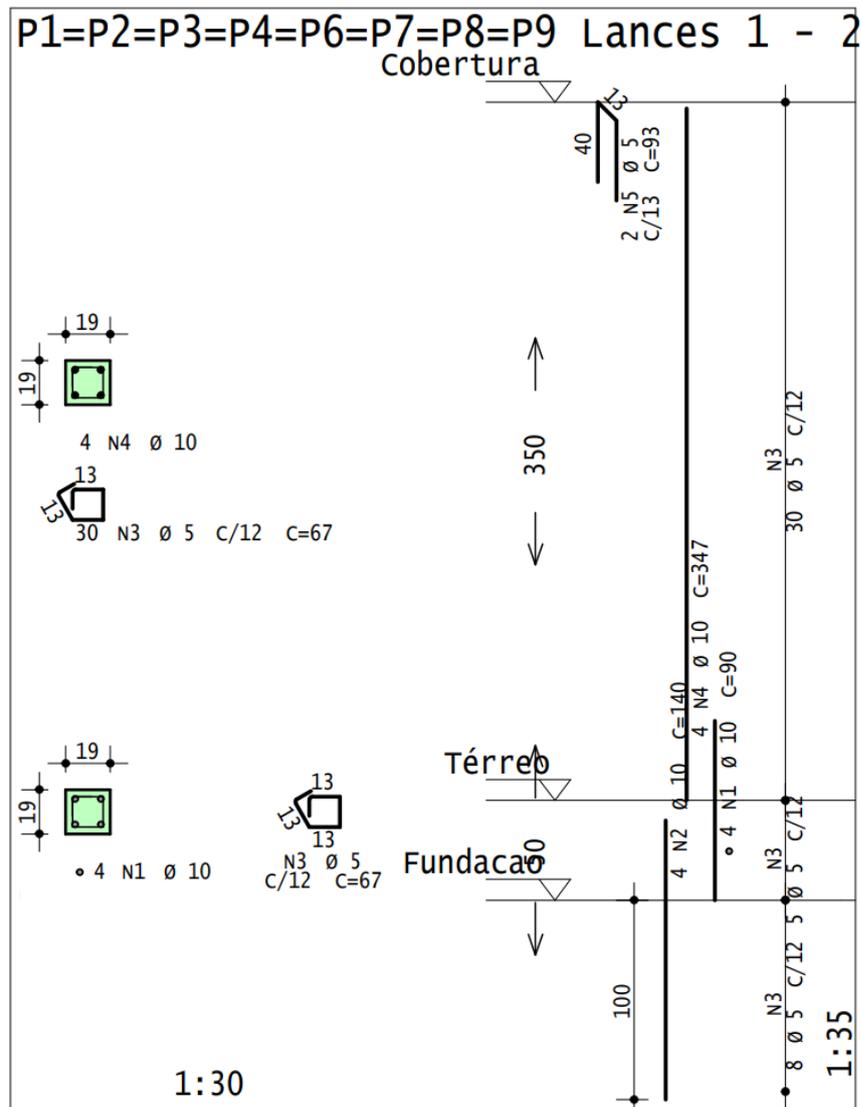
h = dimensão da seção transversal na direção considerada

Quanto ao detalhamento, os pilares P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8 e P9 tiveram o mesmo detalhamento, enquanto, o P5, devido a seção diferente, necessitou um desenho particular. É possível verificar, conforme as Figuras 20 e 21, que em todos

os pilares a armadura longitudinal adotada foi de 4 barras de $\varnothing 10,0$ mm, sendo essa configuração necessária para obedecer a área de aço mínima e respeitar o diâmetro mínima das armaduras longitudinais de pilares apresentada na ABNT NBR 6118:2014. Quanto as armaduras transversais, ao longo de toda a extensão do lance foi utilizado o mesmo diâmetro de estribo, com espaçamento constante.

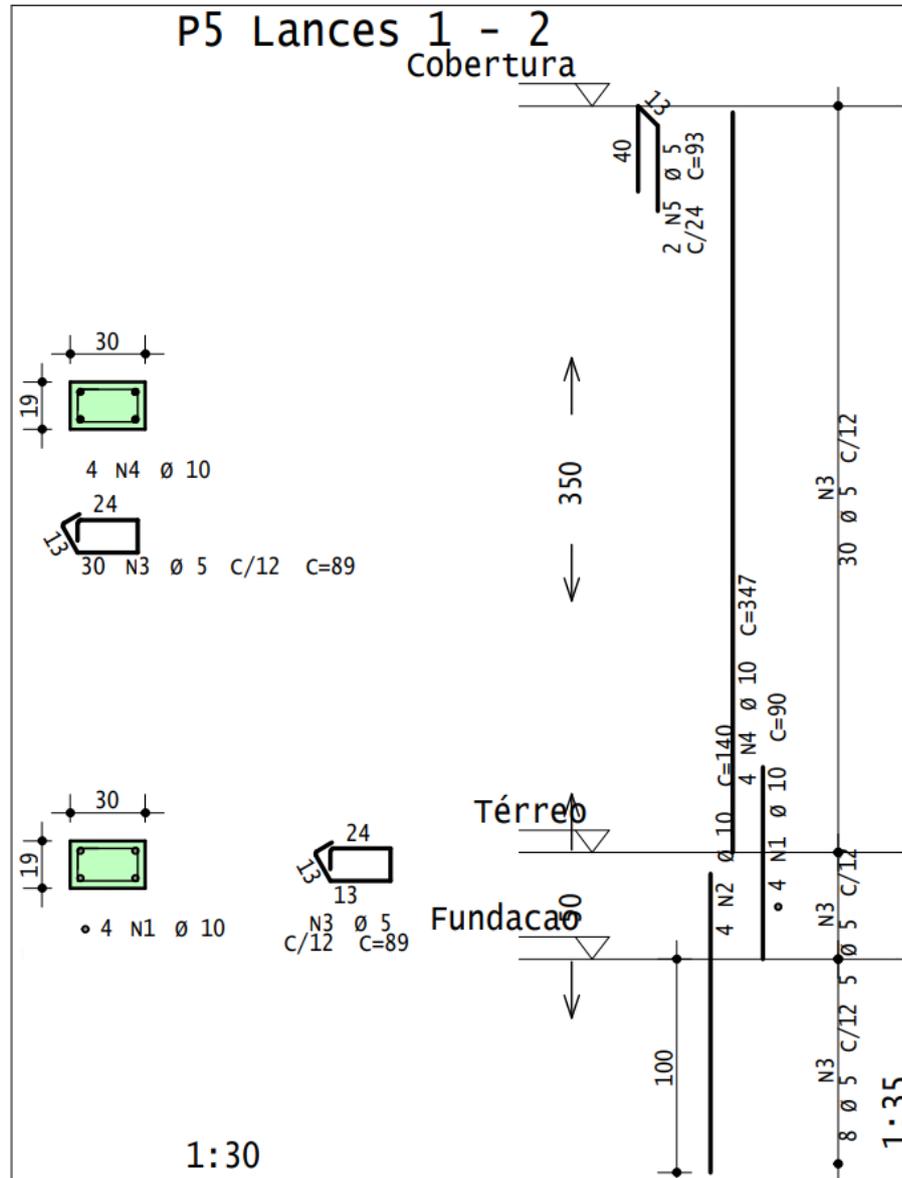
A taxa de aço dos pilares P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8 e P9 ficou em 0,87%, enquanto a do pilar P5 ficou em 0,55%. Em ambos os casos é respeitada a taxa máxima de 8%, sendo mais usual adotar como limite 4% devido as regiões de transpasse.

Figura 20 – Detalhamento dos pilares P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8 e P9 do modelo M1 - Sem escala



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Figura 21 – Detalhamento do pilar P5 do modelo M1 - Sem escala



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

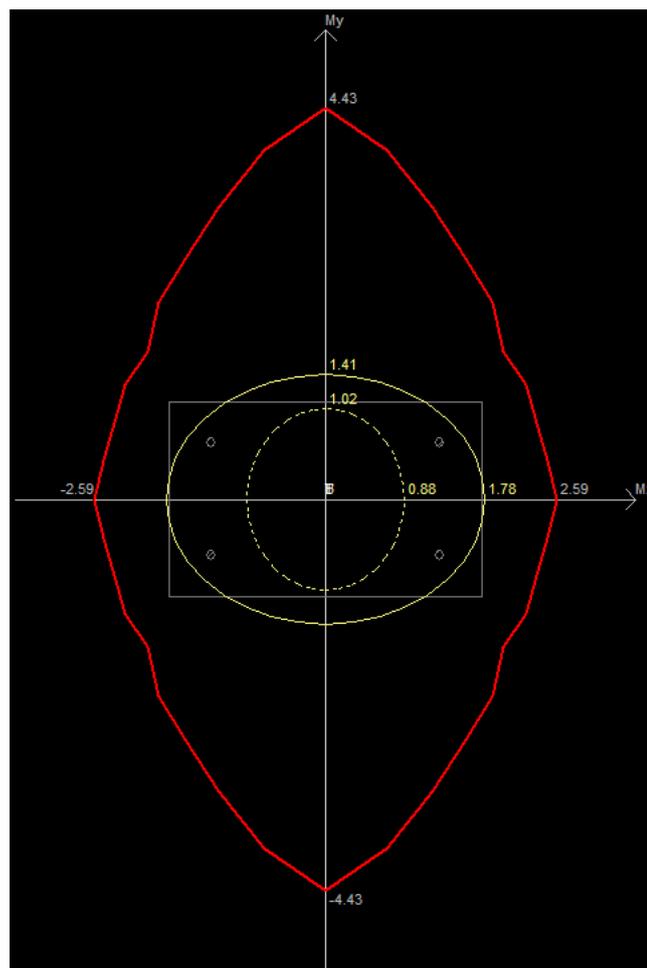
A partir deste momento, será dada maior atenção ao lance 2 do pilar P5, ou seja, entre o térreo e a cobertura. Este é o trecho em que será adicionado o impacto accidental de veículos no modelo M2.

Devido as esbeltezes do pilar P5, para o seu dimensionamento e análise poderia ser utilizado qualquer um dos 4 métodos, ou seja, pilar-padrão com curvatura aproximada, com rigidez κ aproximada, acoplado a diagramas M, N, $1/r$ ou pelo método geral. A escolha foi do pilar padrão com rigidez κ aproximada, devido a

ser um dos métodos aproximados, porém com menor taxa de aço que o pilar-padrão com curvatura aproximada.

Através da curva de iteração é possível verificar o momento resistente de uma seção com uma determinada disposição das armaduras longitudinais, em função da força vertical atuante. A curva de iteração do pilar P5 é apresentada na Figura 22, sendo possível visualizar os momentos mínimos de primeira e de segunda ordem, além dos valores de M_{rdx} e M_{rdy} , que são respectivamente 2,59 tfm e 4,43 tfm, considerando uma força de compressão de 42,58 tf (caso 10 da Tabela 4) e a disposição de 4 barras de $\varnothing 10,0$ mm. É importante ressaltar que os momentos resistentes da seção variam conforme a sollicitação normal, sendo que em alguns casos, o aumento da compressão leva também ao aumento do momento resistente.

Figura 22 – Curva de Iteração do pilar P5 no modelo M1 para o caso mais crítico



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Conforme a Tabela 4, é possível verificar que dentre todos os casos de carregamento, os mais críticos para o pilar P5 são o 10 e o 14. Estes 2 casos apresentam o maior S_d/R_d , ou seja, a relação entre esforço solicitante e a resistência da seção com a armadura adotada, porém, ainda inferior a 1, o que indica que o pilar atende ao ELU.

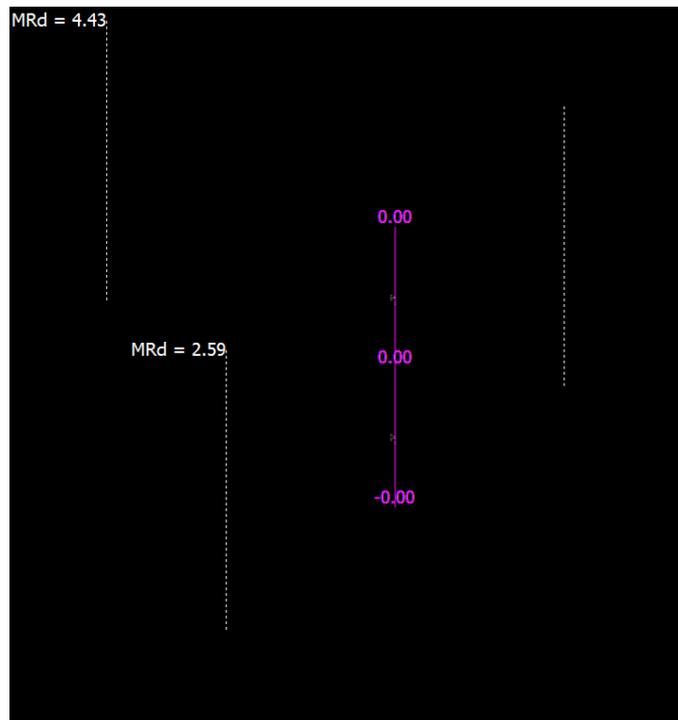
Tabela 4 – Esforços solicitantes do pilar P5 conforme casos de carregamento

Caso	Status	N_d (tf)	M_{Sdz} (tfm)	M_{Sdy} (tfm)	S_d/R_d
9	Passou	27,92	0,00	0,00	0,28
10	Passou	42,58	0,00	0,00	0,43
13	Passou	27,91	0,00	0,00	0,28
14	Passou	42,55	0,00	0,00	0,43

Fonte: Elaborada pelo autor com base no software TQS (2023).

Conforme apresentado previamente, não existe momento atuante no pilar P5, portanto, seus diagramas de 1^a+2^a ordem global e local resultam em zero, conforme a Figura 23.

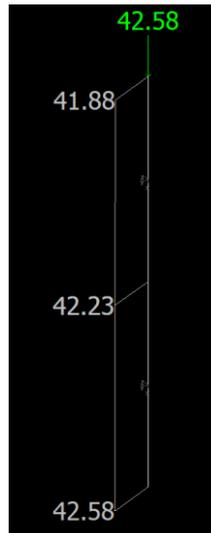
Figura 23 – Diagrama de momentos de 1^a+2^a ordem (global e local) do pilar P5 do modelo M1



Fonte: Elaborada pelo autor com base no software TQS (2023).

Na Figura 24 é possível visualizar o diagrama de força normal do pilar P5 considerando o caso mais crítico, sendo crescente o esforço da parte superior em direção a base devido a contabilização do peso próprio, uma vez que não existem outras forças verticais atuando ao longo de sua altura.

Figura 24 – Diagrama de esforços normais do pilar P5 do modelo M1



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Quanto ao diagrama de forças horizontais do pilar de estudo, ele não será ilustrado devido a ser totalmente zerado, uma vez que no modelo M1 não atuam forças horizontais.

4.2 MODELO M2 - CONSIDERANDO O IMPACTO HORIZONTAL

Analisando inicialmente o Relatório do TQS-Pilar, assim como foi feito no modelo sem a consideração do impacto horizontal, quando comparada a Figura 19 com a Figura 25, é possível notar que na segunda existe uma coluna adicional, na qual é indicado se o pilar está ou não sujeito ao impacto de veículo.

Quando verificado os dados em si, é possível perceber que os pilares P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8 e P9 mantiveram a mesma taxa geométrica de armadura (ρ) do modelo M1, uma vez que as solicitações se mantiveram as mesmas da Tabela 3 e por consequência, o mesmo arranjo de disposição dos vergalhões e diâmetros.

Diferente dos demais, o pilar P5 sofreu um aumento significativo na taxa geométrica de armadura (ρ), chegando a 3,44% na região mais crítica. Apesar do acréscimo a área de aço na seção, ela ainda se manteve dentro do limite proposto pela norma, ao menos nesta análise inicial.

Figura 25 – Relatório de pilares do modelo M2

Pilar	Lances	Seção (cm)	Impac. Veículo	σ (kgf/cm ²)	ν	λ	ρ	Taxa de aço (kgf/m ³)
P1	1 a 2	19X19	-	11.2 a 15.3	0.062 a 0.085	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P2	1 a 2	19X19	-	29 a 36.5	0.163 a 0.204	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P3	1 a 2	19X19	-	11.1 a 15.2	0.062 a 0.085	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P4	1 a 2	19X19	-	29.2 a 36.7	0.164 a 0.205	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P5	1 a 2	19X30	Sim	49 a 55.7	0.274 a 0.312	3 a 64	0.55 a 3.44	466.2
P6	1 a 2	19X19	-	29 a 36.5	0.163 a 0.204	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P7	1 a 2	19X19	-	11.2 a 15.3	0.063 a 0.086	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P8	1 a 2	19X19	-	29.2 a 36.7	0.164 a 0.205	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5
P9	1 a 2	19X19	-	11.2 a 15.3	0.062 a 0.085	5 a 64	0.87 a 0.87	131.5

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

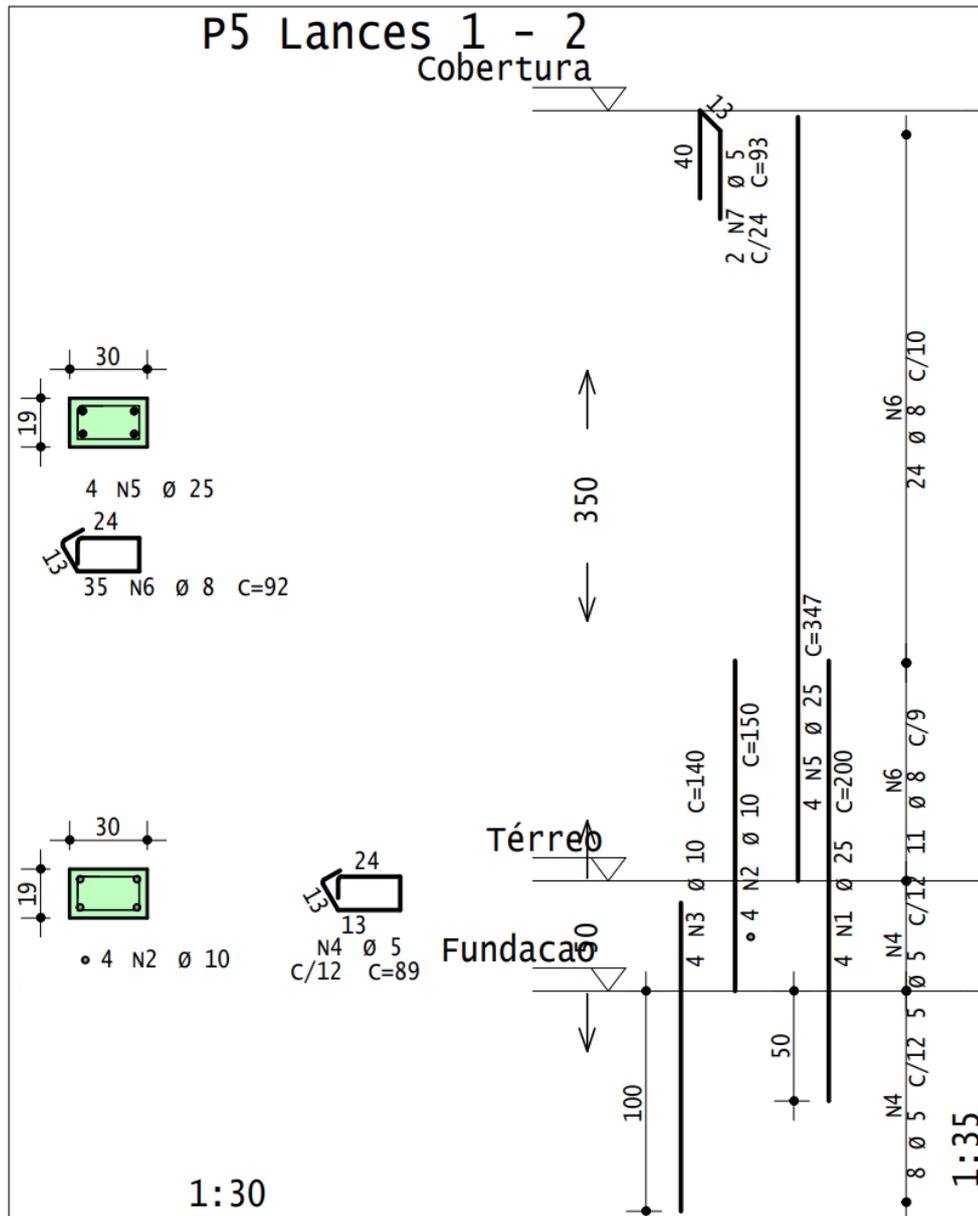
Quanto ao detalhamento, os pilares P1, P2, P3, P4, P6, P7, P8 e P9 se mantiveram idênticos a Figura 20. No caso do pilar P5 do modelo M2, o detalhamento proposto pelo software é apresentado na Figura 26, porém, devido ao impacto acidental de veículo, deverão ser realizadas algumas verificações de efeitos de segunda ordem global e local, as quais podem afetar diretamente o detalhamento.

Se realizada uma comparação do detalhamento do pilar P5 antes e depois da consideração do impacto acidental de veículos, é possível visualizar a alteração da armadura longitudinal, que passou de 4 barras de Ø10,0 mm para 4 barras de Ø25,0 mm, além disso, ocorreu o aumento da armadura transversal, a qual inicialmente era composta por estribos de Ø5,0 mm espaçados a cada 12 cm, agora é de estribos de Ø8,0 mm espaçados a cada 9 cm no local mais denso. A verificação da diminuição do espaçamento da armadura será abordada na seção 4.3.

Por fim, no arranjo das armaduras é possível observar uma alteração no espaçamento dos estribos ao longo do lance, sendo mais densos próximo da parte inferior, onde é considerado o impacto do veículo. Neste caso, devido a diferença de

espaçamento ser pequena, poderia ser adotada a armadura de $\varnothing 8,0$ mm cada 9 cm até o topo do pilar.

Figura 26 – Detalhamento inicial do pilar P5 do modelo M2 - Sem escala



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Assim como no modelo M1, devido as esbeltezes o pilar P5 pode ser dimensionado e verificado por qualquer um dos quatro métodos propostos pela

ABNT NBR 6118:2014, porém, para realizar um comparativo, foi utilizado o método do pilar padrão com rigidez κ aproximada e o método geral.

4.2.1 Dimensionamento pelo método do pilar padrão com rigidez κ aproximada

Conforme é possível visualizar na Tabela 5, diferente do modelo M1, neste caso existe momento atuante no pilar P5, sendo ele considerado na seção do meio e originado pela consideração do impacto do veículo. Além disso, é possível constatar que a situação mais crítica é justamente quando ocorre o impacto, ou seja, o caso 15, sendo o S_d/R_d superior a 1, portanto, o pilar não atende ao ELU e é necessário aumentar a área de aço ou alterar o arranjo das armaduras.

Tabela 5 – Esforços solicitantes do pilar P5 pelo método do pilar padrão com rigidez κ aproximada no modelo M2

Caso	Status	N_d (tf)	M_{Sdz} (tfm)	M_{Sdy} (tfm)	S_d/R_d
11	Passou	27,92	0,00	0,00	0,16
12	Passou	42,58	0,00	0,00	0,24
13	Passou	42,58	0,00	0,00	0,24
14	Passou	39,65	0,00	0,00	0,22
15	NÃO passou	32,37	5,35	2,62	1,18

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Por mais que a ABNT NBR 6120 permite a consideração das forças horizontais em x e y atuando de forma não concomitante, no caso 15 elas atuam simultaneamente no pilar, o que pode ser confirmado se feita uma conferência manual ou utilizando a calculadora de flexão composta oblíqua do TQS, conforme a Figura 27. Desta forma, o *software* acaba sendo mais conservador, podendo ser reduzida a armadura se feitas as verificações necessárias por outros meios. Ademais, é possível confirmar que o carregamento crítico é devido a consideração do esforço normal em conjunto dos momentos fletores atuantes no pilar.

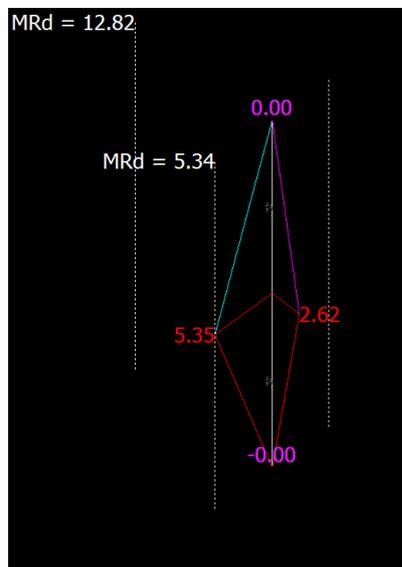
Conforme é possível observar na Figura 28, não existem momentos atuantes de 1ª ou 2ª ordem nas extremidades, apenas no meio, onde é possível verificar o valor de 5,35 tfm no eixo z e 2,62 no eixo y.

Figura 27 – Conferência utilizando a calculadora de flexão composta oblíqua do TQS

Norma em uso <input checked="" type="radio"/> NBR 6118 <input type="radio"/> CIRSOC-201 / ACI 318		<input checked="" type="radio"/> ELU - Curva Resistente <input type="radio"/> ELU - Diagrama N, M, 1/r <input type="radio"/> Tensões nas armaduras	
Materiais (concreto e aço) f _{ck} (MPa) V _c φ f _{yk} (MPa) γ _s E _s (MPa) 25 1,4 0 500 1,15 210000		Força normal N _{sd} (tf) v 32,37 0,32	
Seção transversal e armaduras Tipo de seção b _w (cm) h (cm) Retangular 19 30 Cobr. (cm) Ø l (mm) Ø t (mm) N _B N _H 3 25 8 2 2		Verificação (S _d X R _d) M _{sd,x} (tfm) M _{sd,y} (tfm) 2,62 5,35 N _{sd} = 32,37 tf M _{sd,x} = 2,72 tfm M _{sd,y} = 5,35 tfm S _d /R _d = 1,18 NÃO passou!	

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Figura 28 – Diagrama de momentos fletores de 1ª+2ª ordem (global e local) do pilar P5 do modelo M2 pelo método do pilar padrão com rigidez κ aproximada



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

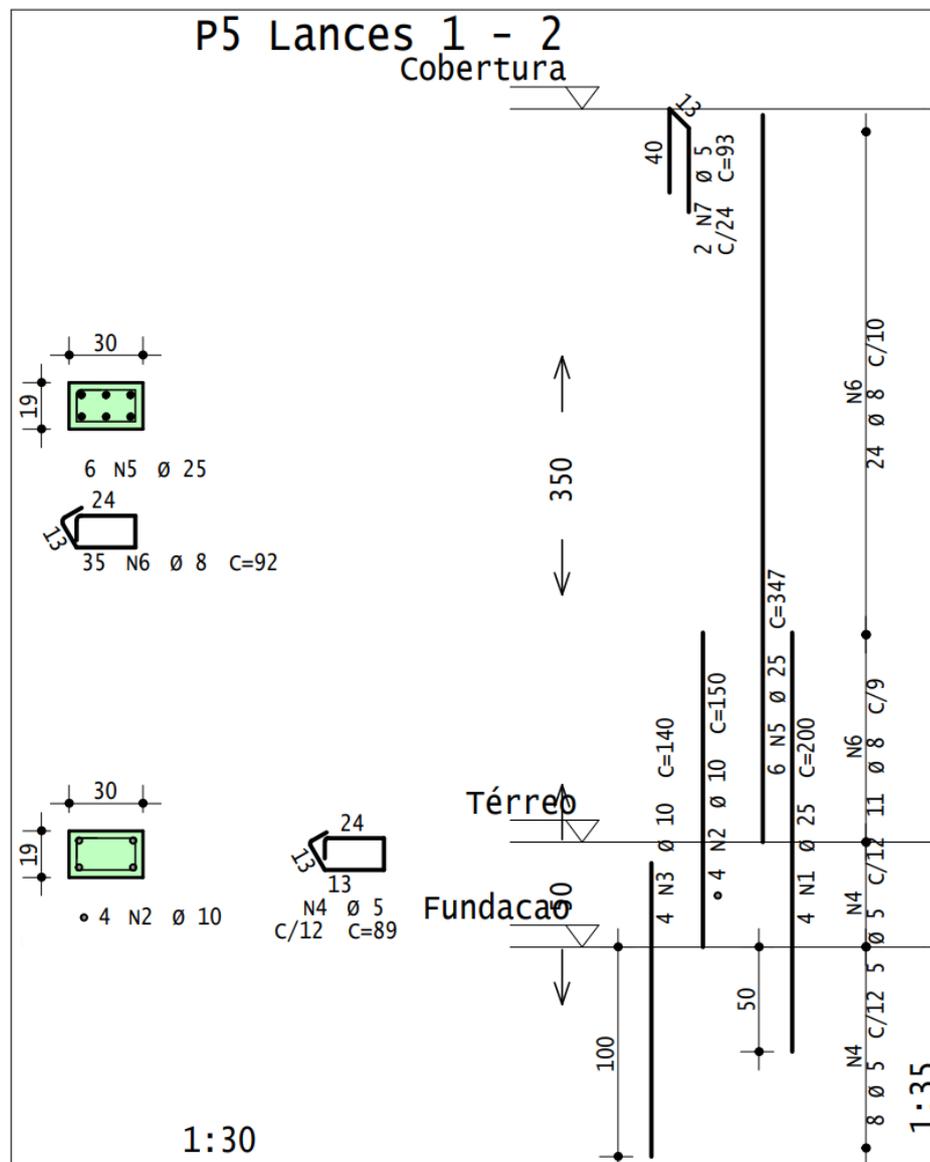
Conforme comentando previamente, devido aos esforços solicitantes superarem os resistentes, é necessário alterar o arranjo das barras ou então aumentar a área de aço. A opção escolhida foi a de 6 barras de Ø25,0 mm, de forma que o detalhamento é ilustrado na Figura 29.

Com o aumento da quantidade de barras na seção, ocorre o aumento da área de aço e por consequência, da taxa geométrica de aço. Considerando as 6 barras de Ø25,0 mm, a área de aço passa a ser de 29,45cm², o que representa um ρ de 5,17%. Assim como exposto previamente, a taxa de aço limite de uma seção é de 8%, sendo este valor adotado em região de traspasse, de forma que ao longo do

pilar é comum utilizar o limite de 4%. No caso do pilar P5, a taxa de armadura é superior ao máximo valor usual, porém, quando verificada a região de traspasse com a fundação, é possível observar que atende ao valor máximo apresentado em norma. Caso este edifício se tratasse de uma edificação real, seria mais vantajoso estudar a possibilidade de aumentar a seção do pilar, diminuindo a área de aço necessária, tornando o projeto mais econômico e até mesmo de mais fácil montagem na obra.

Figura 29 – Detalhamento do pilar P5 do modelo M2 utilizando o método do pilar padrão com rigidez k

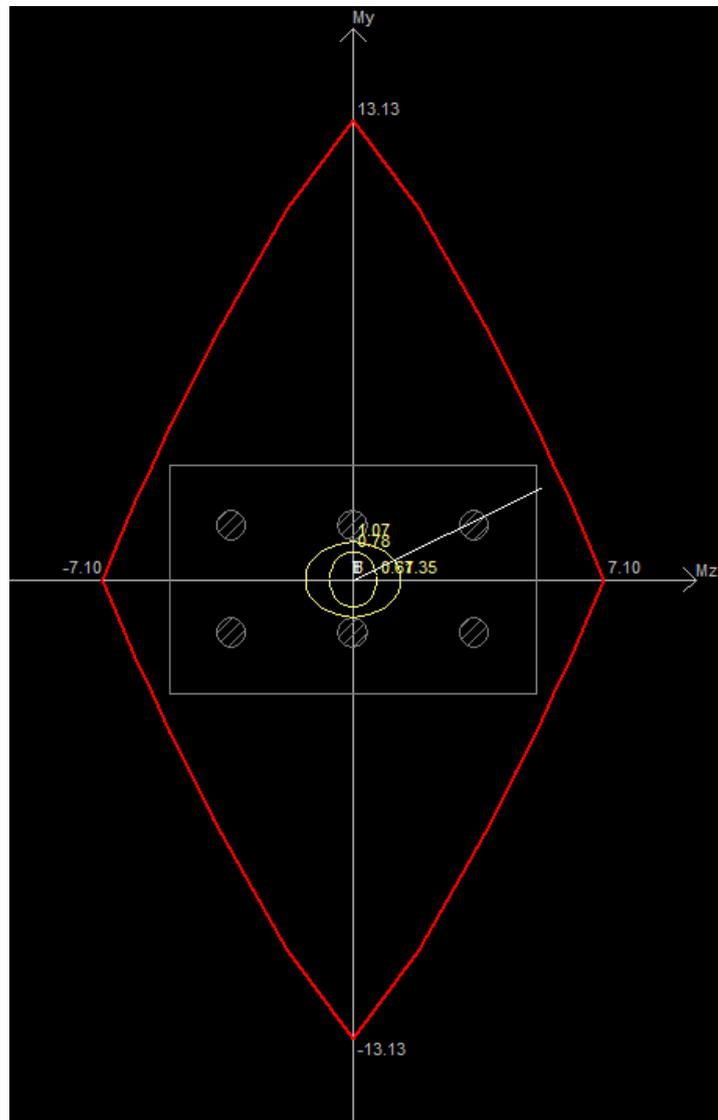
aproximada - Sem escala



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Os esforços solicitantes permanecem os mesmos que os apresentados na Tabela 5, porém, agora o M_{rd} é maior, conforme é possível observar na curva de iteração apresentada na Figura 30. Devido ao aumento do momento resistente, o S_d/R_d do caso 15 agora é de 0,97, o que indica que o pilar atende ao ELU, porém está próximo de seu limite.

Figura 30 – Curva de Iteração do pilar P5 do modelo M2 para o caso mais crítico utilizando o método do pilar padrão com rigidez k aproximada



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

No modelo M2 utilizando o método do pilar padrão com rigidez κ aproximada, mesmo existindo força horizontal atuante no modelo, quando verificado os esforços horizontais de primeira e segunda ordem, os diagramas se apresentaram nulos.

4.2.2 Dimensionamento pelo método geral

O método geral, por ser mais refinado em relação ao método do pilar padrão com rigidez κ aproximada, apresenta tensões de cálculo inferiores as apresentadas anteriormente no caso 15, enquanto nos casos 11, 12, 13 e 14 existem momentos devido a segunda ordem local, como é possível verificar na Tabela 6. Ademais, é notável que em todos os casos de carregamento, considerando a armadura longitudinal de 4 barras de $\varnothing 25,0$ mm, o S_d/R_d ficou abaixo de 1 mesmo considerando as forças em x e y agindo concomitantemente, de forma que o pilar atende ao ELU.

Tabela 6 – Esforços solicitantes do pilar P5 pelo método geral no modelo M2

Caso	Status	N_d (tf)	M_{Sdz} (tfm)	M_{Sdy} (tfm)	S_d/R_d
11	Passou	27,92	0,19	0,05	0,19
12	Passou	42,58	0,48	0,12	0,31
13	Passou	42,58	0,48	0,12	0,31
14	Passou	39,65	0,41	0,10	0,28
15	Passou	32,37	-3,32	-1,58	0,76

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

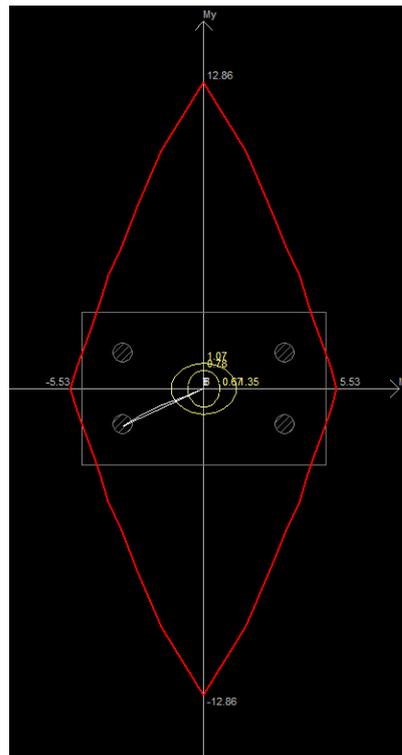
O detalhamento considerando a utilização do método geral pode ser feito conforme a Figura 26, apresentada anteriormente, ou seja, o detalhamento automático gerado pelo *software*.

Na Figura 31 é possível verificar a curva de iteração do pilar P5, considerando uma armadura longitudinal de 4 barras de $\varnothing 25,0$ mm. Essa curva de iteração foi gerada considerando o caso de carregamento 15, o mais crítico para o pilar, portanto, a força normal utilizada para determinar o M_{Rd} foi de 32,37 tf.

Observando a Figura 32, é possível notar que os diagramas de momento fletor ao longo do comprimento do pilar obtidos a partir do método geral são

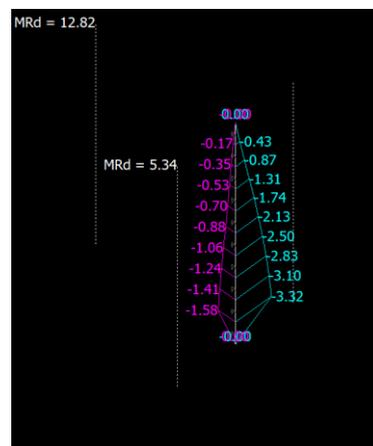
divididos em vários segmentos, sendo, portanto, muito mais detalhado que os métodos aproximados.

Figura 31 – Curva de Iteração do pilar P5 do modelo M2 para o caso mais crítico utilizando o método geral



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

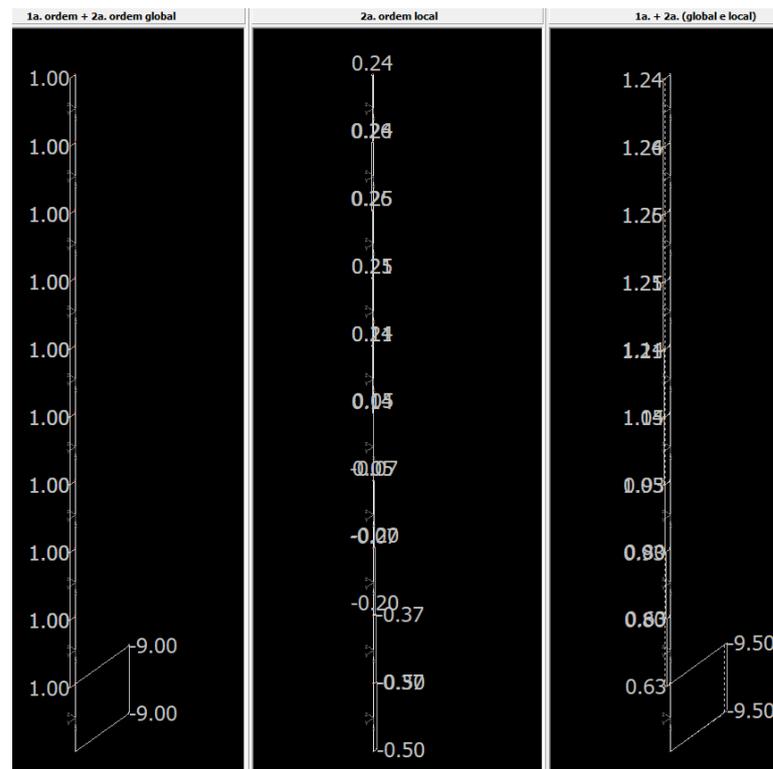
Figura 32 – Diagrama de momentos fletores de 1ª+2ª ordem (global e local) do pilar P5 do modelo M2 pelo método geral



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Em decorrência do fato de que no método geral o esforço horizontal é aplicado já no modelo de primeira ordem, é possível verificar no diagrama de esforço cortante a variação no decorrer do lance do pilar, conforme a Figura 33, enquanto no método do pilar padrão com rigidez κ aproximada o diagrama era completamente nulo.

Figura 33 – Diagrama de forças horizontais em x do pilar P5 do modelo M2 pelo método geral

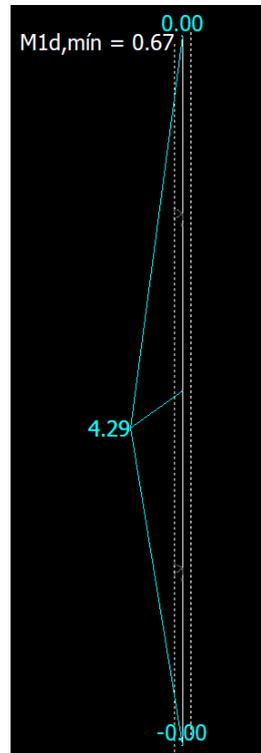


Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

4.3 CONSIDERAÇÕES FEITAS PELO TQS

Devido a ferramenta de impacto horizontal ser relativamente nova no *software*, havia a intenção de interpretar como é feita a consideração do impacto horizontal no pilar para o modelo utilizado. Inicialmente, a suposição era a consideração do pilar como uma barra bi-engastada, com a aplicação da força a 50 cm de altura, porém, quando visualizado o diagrama, conforme a Figura 34, foi possível estimar que o momento de primeira e segunda ordem global seriam advindos de uma barra bi-rotulada.

Figura 34 – Diagrama de momentos fletores em torno de x de 1ª+2ª ordem global do pilar P5 do modelo M2 pelo método do pilar padrão com rigidez k aproximada

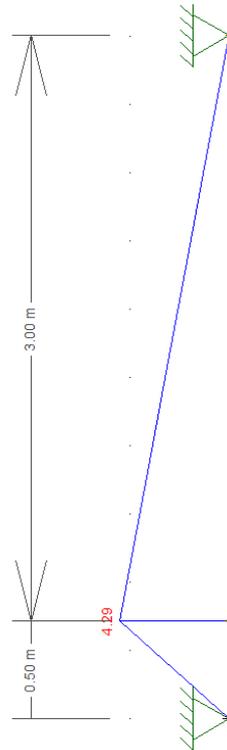


Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Para confirmar o raciocínio, foi feito um modelo no *software* Ftool, considerando uma barra bi-apoiada e uma carga de 10 tf aplicada 50 cm distante de um dos apoios, tal qual uma carga de veículo da Categoria I. O resultado foi o diagrama de momento fletor apresentado na Figura 35, sendo possível notar que o momento no ponto de aplicação da carga é de 4,29 tfm. Portanto, foi possível comprovar que neste caso o TQS considerou o pilar como uma barra bi-apoiada e levou o momento máximo do ponto do carregamento para a seção do meio.

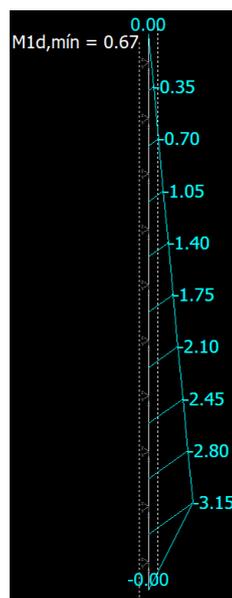
Referente a consideração no método geral, conforme a Figura 36, o pilar foi dividido em 10 segmentos, e considerando o comprimento total de 3,5 m, cada segmento possui 35 cm. Quando comparado o momento fletor máximo das Figuras 35 e 36, é possível observar que eles são diferentes, portanto, a aplicação da carga ocorreu de outra forma.

Figura 35 – Diagrama de momentos fletores do modelo do Ftool para o método do pilar padrão com rigidez k aproximada



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* FTool (2023).

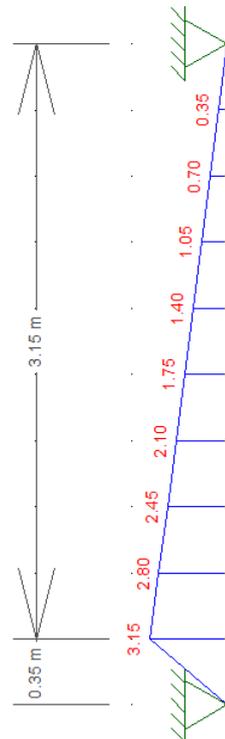
Figura 36 – Diagrama de momentos fletores em torno de x de 1ª+2ª ordem global do pilar P5 do modelo M2 pelo método geral



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Para verificar qual foi a forma utilizada na inserção do carregamento para o modelo do estudo, novamente foi partido do pressuposto de uma barra bi-apoiada e uma carga de 10 tf, porém agora aplicada a 35 cm do apoio, ou seja, em um dos nós entre 2 segmentos. O resultado está exposto na Figura 37 e comprova a suposição adotada.

Figura 37 – Diagrama de momentos fletores do modelo do Ftool para o método geral



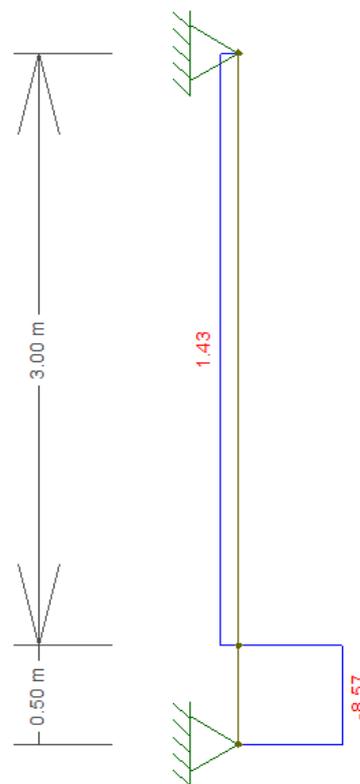
Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* FTool (2023).

Devido a carga ter sido considerada mais próxima do apoio do que o indicado pela norma, pode ocorrer que o momento solicitante inferior ao que deveria, o que provavelmente aconteceu neste caso. Portanto, para uma maior garantia da avaliação correta do pilar por este método, deveria ser feita uma divisão dos segmentos de modo que fosse possível existir um nó a 50 cm do apoio, como por exemplo, em 14 trechos de 25 cm.

Após verificar a forma da consideração do esforço horizontal nos pilares, a ideia era confirmar de que forma foi determinado o espaçamento dos estribos ao longo do pilar, uma vez que nos critérios do software é possível ajustar o valor do

espaçamento máximo para pilares em que ocorre o impacto conforme a preferência do usuário. Devido a não ser comum a existência de esforços cortantes e normais relevantes atuando de forma concomitante em uma peça, supôs-se que o *software* fazia uma verificação considerando uma viga sujeita a um carregamento pontual. Para a conferência, foram utilizados os valores do modelo do Ftool apresentados na Figura 38 e a calculadora de armaduras em elementos sujeitos à força cortante do próprio TQS.

Figura 38 – Esforço cortante atuante no pilar P5 do modelo M2



Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* FTool (2023).

Quanto a entrada dos dados na calculadora do TQS, devido a força de maior magnitude atuar na direção de menor inércia do pilar, foi adotado uma altura h de 19 cm e uma largura b_w de 30 cm. Para a determinação da altura útil d , foi considerado a altura h e descontado o cobrimento mais 0,5 cm devido a metade do diâmetro da armadura. Conforme apresentado na Figura 39, a área de aço necessária para resistir a um esforço cortante é de $13,26 \text{ cm}^2/\text{m}$, que considerando estribos de 2

ramos passa a ser uma área de aço de 6,63 cm²/m por ramo, ou seja, estribos de 8mm espaçados a cada 7,5 cm ou de 10mm a cada 11 cm. Conforme é possível observar, a alteração no espaçamento dos estribos não foi advinda da consideração do esforço cortante atuante no pilar, sendo que esta conferência deve ser feita de forma independente pelo projetista.

Figura 39 – Verificação do esforço cortante no pilar P5 do modelo M2

Calculadora de armaduras em elementos sujeitos à força cortante e à torção

Norma: ABNT NBR 6118:2014

Titulo da seção:

Observação:

Cortante Torção Ambos

Materiais

f_{ck} : 25 MPa

Geometria

s : 100 cm

α : 90 °

b_w : 30 cm

$b_{w,min}$: 0 cm

h : 19 cm

d : 16 cm

Modelo

Modelo I Modelo II

θ : 45 °

Força cortante(tf)

$V_{sd} = 12.00 = V_{sk} \times \gamma_f$
 $12.00 = 8.57 \times 1.4$

Impressão Completa

Calcular

Cortante

Resultados

Cortante

$A_{sw,nec} = 13.26 \text{ cm}^2 /s - 2R$

$A_{sw,min} = 3.08 \text{ cm}^2 /s - 2R$

$A_{sw,real} = 13.26 \text{ cm}^2 /s - 2R$

$V_{Rd2} = 20.83 \text{ tf}$

$V_{Rd3} = 12.00 \text{ tf}$

$V_c = 3.69 \text{ tf}$

$V_{sw} = 8.30 \text{ tf}$

Fonte: Elaborada pelo autor com base no *software* TQS (2023).

Após a hipótese inicial não se concretizar, pode ser que o aumento da densidade dos estribos seja em função de uma verificação ao esforço cortante não cogitada pelo autor do trabalho ou então se trate da armadura de costura das barras de emenda do pilar, uma vez que da fundação para o pavimento em que ocorre o impacto, a área de aço longitudinal aumenta significativamente.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a modelagem e análise de uma edificação utilizando realizado 2 modelos idênticos, sendo em um deles considerado o impacto acidental de veículos conforme proposto pela ABNT NBR 6120:2019 e o outro sem essa consideração, seguindo apenas o proposto pela ABNT NBR 6120:1980.

A partir da análise dos resultados obtidos dos modelos M1 e M2, é possível observar que o impacto acidental de veículos da Categoria I causa uma diferença significativa no dimensionamento destes pilares, sendo que os que não estão sujeitos a este carregamento se mantêm iguais.

No modelo M1, no detalhamento do pilar P5, para armadura longitudinal foram utilizadas 4 barras de $\varnothing 10,0$ mm, que representa uma área de aço de $3,14$ cm², levando a uma taxa geométrica de aço de 0,55%. Para armadura transversal foram adotados estribos de $\varnothing 5,0$ mm espaçados a cada 12 cm ao longo de todo o lance.

No modelo M2, considerando a análise pelo método do pilar padrão com rigidez κ aproximada, no detalhamento do pilar P5, a armadura longitudinal adotada foi de 6 barras de $\varnothing 25,0$ mm, que representa uma área de aço de $29,45$ cm² e uma taxa geométrica de aço de 5,17%. Para armadura transversal foram adotados estribos de $\varnothing 8,0$ mm espaçados a cada 9 cm até a altura de 1 m e $\varnothing 8,0$ mm espaçados a cada 10 cm acima de 1 m.

Já no modelo M2, considerando a análise pelo método geral, o detalhamento do pilar P5 apresentou uma armadura longitudinal de 4 barras de $\varnothing 25,0$ mm, ou seja, uma área de aço de $19,63$ cm², o que representa uma taxa geométrica de aço de 3,44%. Para armadura transversal foi adotado o mesmo do que o pilar analisado pelo método do pilar padrão com rigidez κ aproximada.

Comparando as diferentes situações, é visível que no modelo M2 considerando a análise pelo método geral, a área de aço longitudinal é cerca de 6,25 vezes maior que do modelo M1. Quando comparado o modelo M2 considerando a análise pelo método do pilar padrão com rigidez κ aproximada, a área de aço longitudinal é cerca de 9,38 vezes superior à do modelo M1, isso sem contabilizar a diferença da área da armadura transversal. Portanto, como esperado, a consideração do impacto acidental de veículos impacta significativamente nos

esforços atuantes no pilar. É necessário lembrar que estão sendo considerados apenas veículos da Categoria I, a menor disponível, portanto, em locais de acesso de veículos maiores, o esforço gerado pode causar um impacto ainda maior nas solicitações.

Ademais, na verificação das considerações utilizadas pelo *software* levando em conta o modelo do estudo e suas condições, foi possível observar que o impacto do veículo teve sua carga aplicada como se fosse em uma viga bi-apoiada, funcionando corretamente nos métodos de análise simplificados de pilares. Quanto a análise pelo método geral, apesar de mais refinada e permitir que seja utilizada uma menor taxa de armaduras, ela acaba por fazer uma consideração equivocada, inserindo a carga do veículo a uma altura diferente da estipulada na norma.

Quanto ao espaçamento variável dos estribos, não foi possível determinar com certeza a sua causa, porém, durante a análise foi possível comprovar que o pilar não é verificado ao cortante seguindo a metodologia de uma viga, sendo que caso o projetista ache necessário, este processo deve ser feito de forma independente.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após finalizar este trabalho, foi possível notar que ainda podem ser feitos mais estudos quanto a consideração do esforço horizontal devido ao impacto acidental de veículos em pilares, tendo possibilidades nos seguintes temas:

- Estudo em um único pilar considerando mais pavimentos e com o vento atuando, de forma que no modelo inicial já existam momentos. Verificar se o *software* trabalha da mesma maneira que quando feito apenas um pavimento;
- Realizar um estudo comparativo de consumo de materiais, considerando um edifício garagem.

REFERÊNCIAS

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 7. ed. Estados Unidos: AASHTO, 2014.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Ações para cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ADELEKE, Paul. **Concrete – the world’s most widely used material – targets carbon neutral future**. Londres, 2020. Disponível em: <<https://gccassociation.org/news/concrete-the-worlds-most-widely-used-material-targets-carbon-neutral-future/> <https://www.lojastander.com.br/>>. Acesso em: 14 mai. 2023.
- ARAÚJO, J. M. de. Projeto estrutural de edifícios de concreto armado. 3. ed. Rio Grande, Dunas, 2014.
- ASCE – American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-10 – Minimum design loads for buildings and other structures. Estados Unidos: ASCE, 2010.
- BASTOS, P.S.S. **Lajes de concreto armado: estruturas de concreto armado I**. Bauru, SP: UNESP 2021. Disponível em: <<https://www.feb.unesp.br/pbastos/concreto1/Lajes.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- BASTOS, P.S.S. **Pilares de concreto armado: estruturas de concreto armado II**. Bauru, SP: UNESP 2020. Disponível em: <<http://www.feb.unesp.br/pbastos/concreto2/Pilares.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2023.
- CUNHA, J. **Estruturas de concreto armado**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, 198 p. Apostila, 2014.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Eurocode 1: actions on structures – part 1-1: general actions – general actions - densities, self-weight, imposed loads for buildings. ENV 1991-1-1. Brussels: CEN, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). Eurocode 1: actions on structures – part 1-7: general actions – accidental actions. ENV 1991-1-7. Brussels: CEN, 2006

JÚNIOR, O. K. **Forças para o projeto de estruturas de garagens e zonas de circulação de veículos em edifícios**. Revista Estrutura, São Paulo, 2^o Edição, p. 55-59, 10, 2016. Disponível em: http://abece.com.br/Revista_estrutura/Edicao2/files/assets/basic-html/index.html. Acesso em: 9 mai. 2023.

Kold King. **Refrigeração caminhão bau**. Guarulhos, 2021. Disponível em: <<https://www.refrigeracaonacional.com.br/refrigeracao-caminhao-bau>>. Acesso em: 17 mai. 2023.

Loja Stander. **Macaco Hidráulico x Macaco Mecânico**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://blog.lojastander.com.br/macacos-hidraulicos-x-macacos-mecanicos-como-funciona-cada-um/>>. Acesso em: 17 mai. 2023.

MELO, P. R. **Pré-dimensionamento de estruturas de madeira, de aço e de concreto para auxílio à concepção de projetos arquitetônicos**. 2013. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SANTANA, Nicole. **Confira o ranking das marcas de carro mais valiosas de 2021!**. Garagem 360, Recife, 2021. Disponível em: <<https://gccassociation.org/news/concrete-the-worlds-most-widely-used-material-targets-carbon-neutral-future/> <https://www.lojastander.com.br/>>. Acesso em: 17 mai. 2023.

TQS Informática. **Impacto de Veículos**. TQSDocs, São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=1682712677&language=EN-US>>. Acesso em: 18 mai. 2023.