



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL

GABRIEL BARBOSA ALVES

ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE PILARES-PAREDE
PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE DETALHAMENTO

FORTALEZA

2026

GABRIEL BARBOSA ALVES

ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE PILARES-PAREDE PARA
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE DETALHAMENTO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque.

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A479a Alves, Gabriel Barbosa.

Análise comparativa do dimensionamento de pilares-parede para diferentes configurações de detalhamento / Gabriel Barbosa Alves. – 2026.
61 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque.

1. Pilar-parede. 2. Dimensionamento. 3. Detalhamento. I. Título.

CDD 620

GABRIEL BARBOSA ALVES

ANÁLISE COMPARATIVA DO DIMENSIONAMENTO DE PILARES-PAREDE PARA
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE DETALHAMENTO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 16/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Elias Saraiva Barroso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Francisco Daniel Mesquita Rodrigues Crispim
Norcalc Estrutural

A Deus.

Aos meus pais, Reginaldo e Daniele.

Aos meus irmãos, Matheus e Thais.

A minha namorada, Ana Letícia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, que sempre foi minha base e meu maior apoio. Ao meu pai, Reginaldo, e à minha mãe, Daniel, pelos valores transmitidos, pelo incentivo constante e pelo suporte em todos os momentos. Aos meus irmãos, Matheus e Thais, pelo companheirismo e apoio ao longo dessa trajetória. Além disso, à minha madrastra, Alexssandra, pelo suporte fundamental, especialmente na reta final desta trajetória

Agradeço de forma especial à minha namorada, Ana Letícia, por estar presente durante toda essa jornada, sendo meu principal apoio nos momentos difíceis, sempre com paciência, incentivo e compreensão.

Agradeço ao meu orientador, Augusto, pela orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho, pelo auxílio na escolha do tema e pelo total apoio durante todas as etapas da sua execução.

Agradeço também à Norcalc Estrutural, pelo suporte oferecido ao longo desses quatro anos de trajetória, disponibilizando estrutura, recursos e apoio técnico fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação acadêmica e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta etapa.

“A ciência consiste em substituir o saber que parecia seguro por uma teoria, ou seja, por algo problemático.” (José Ortega y Gasset).

RESUMO

O presente trabalho apresentou uma análise comparativa do dimensionamento de pilares-parede em concreto armado, considerando diferentes configurações de detalhamento das armaduras longitudinais. O estudo foi fundamentado nos critérios estabelecidos pela NBR 6118:2023 e em referências técnicas consolidadas da literatura especializada, com ênfase na avaliação dos efeitos de segunda ordem, em especial os efeitos localizados, característicos desse tipo de elemento estrutural. A metodologia adotada baseou-se na modelagem computacional de um edifício de múltiplos pavimentos por meio do software TQS, tendo sido selecionado para estudo um pilar-parede com geometria em “L”, representativo das solicitações mais críticas da estrutura. Foram analisadas duas alternativas de detalhamento: a primeira considerou a distribuição uniforme das armaduras longitudinais, seguindo um critério convencional semelhante ao de pilares usuais; e a segunda adotou a distribuição não uniforme das armaduras, definida em função das solicitações específicas de cada faixa do pilar-parede. As análises contemplaram tanto a verificação por faixas independentes quanto a análise por malha, o que permitiu avaliar a influência da interação entre as lâminas no comportamento estrutural do elemento. Os resultados demonstraram que ambas as alternativas de detalhamento atenderam aos critérios normativos de segurança estrutural, apresentando valores da razão S_d/R_d inferiores à unidade em todas as verificações realizadas. Entretanto, a alternativa com distribuição não uniforme das armaduras longitudinais apresentou uma redução significativa no consumo de aço, com diminuição expressiva da taxa de armadura no lance mais solicitado do pilar-parede e redução global do consumo de aço CA-50, sem comprometer a capacidade resistente do elemento. Dessa forma, concluiu-se que o detalhamento com distribuição diferenciada das armaduras longitudinais, aliado a uma análise mais refinada dos efeitos localizados de segunda ordem e à consideração da interação entre as faixas do pilar-parede, mostrou-se tecnicamente adequado e estruturalmente seguro. Tal abordagem possibilitou uma utilização mais racional dos materiais, com redução significativa no consumo de aço, sem prejuízo ao atendimento dos critérios normativos de resistência e estabilidade, contribuindo para o aprimoramento das práticas de dimensionamento e detalhamento de pilares-parede em concreto armado.

Palavras-chave: Pilar-parede; Dimensionamento; Detalhamento.

ABSTRACT

This study presented a comparative analysis of the structural design of reinforced concrete wall-columns, considering different configurations of longitudinal reinforcement detailing. The research was based on the criteria established by ABNT NBR 6118:2023, as well as on consolidated technical references from the specialized literature, with emphasis on the evaluation of second-order effects, particularly the localized effects characteristic of this type of structural element. The adopted methodology was based on the computational modeling of a multi-storey building using the TQS software, in which a wall-column with an “L-shaped” geometry was selected for analysis, as it was representative of the most critical structural demands. Two detailing alternatives were analyzed: the first considered a uniform distribution of longitudinal reinforcement, following a conventional criterion similar to that adopted for ordinary columns; the second adopted a non-uniform distribution of reinforcement, defined according to the specific demands of each strip of the wall-column. The analyses included both independent strip verification and mesh-based analysis, which allowed the evaluation of the influence of interaction between the wall segments on the structural behavior of the element. The results demonstrated that both detailing alternatives satisfied the normative requirements for structural safety, presenting S_d/R_d ratios lower than unity in all verifications performed. However, the alternative with non-uniform distribution of longitudinal reinforcement showed a significant reduction in steel consumption, with an expressive decrease in the reinforcement ratio in the most critical segment of the wall-column and a global reduction in CA-50 steel consumption, without compromising the load-bearing capacity of the element. Thus, it was concluded that the detailing with differentiated distribution of longitudinal reinforcement, combined with a more refined analysis of localized second-order effects and consideration of interaction between the wall-column strips, proved to be technically adequate and structurally safe. This approach enabled a more rational use of materials, with a significant reduction in steel consumption, without impairing compliance with normative requirements of strength and stability, contributing to the improvement of design and detailing practices for reinforced concrete wall-columns.

Keywords: Wall-column; Structural design; Detailing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conceito de Pilar-Parede.	15
Figura 2 - Exemplo de pilar-parede quando solicitado por ações horizontais.....	15
Figura 3 - Pilar-parede simples e composto.	18
Figura 4 - Método aproximado para consideração do efeito localizado de segunda ordem. ...	20
Figura 5 - Efeitos de 2ª ordem.	21
Figura 6 - Comprimento equivalente l_{ei}	26
Figura 7 - Faixas a_i das lâminas dos pilares-parede.	27
Figura 8 - Proteção contra flambagem das barras longitudinais.	30
Figura 9 - Detalhamento do pilar-parede desconsiderando os efeitos localizados.....	30
Figura 10 - Detalhamento do pilar-parede considerando os efeitos localizados.	31
Figura 11- Modelagem por malha de barras.....	32
Figura 12 - Modelagem por malha de barras.....	32
Figura 13 - Esforços no modelo de malha de barras.	33
Figura 14 - Armadura transversal no modelo de malha de barras.	33
Figura 15 - Deslocamentos de pilar-parede pelo modelo de malha de barras.	34
Figura 16 - Armadura transversal de pilar-parede pelo modelo de malha de barras.	34
Figura 17 - Armadura transversal de pilar-parede pelo modelo de malha de barras.	35
Figura 18 - Pilar-parede P9.....	37
Figura 19 - Geometria do pilar-parede P9.	38
Figura 20 - Classe de agressividade ambiental.....	39
Figura 21 - Relação entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento.	39
Figura 22 - Parâmetros para carga de vento.	40
Figura 23 - Verificação dos estribos.	42
Figura 24 - Comando para a análise dos efeitos localizados de segunda ordem.....	42
Figura 25 - Comando para análise com malha do pilar-parede.	43
Figura 26 - Aba de análise por malha.	44
Figura 27 - Exemplo de modelagem em malha de um pilar-parede.....	44
Figura 28 - Índice de esbeltez de cada lâmina.....	46
Figura 29 - Nomenclatura e dimensão de cada faixa do pilar-parede.	47
Figura 30 - Alternativa 1 do detalhamento do pilar-parede.....	49
Figura 31 - Alternativa 2 do detalhamento do pilar-parede.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Esforços no 1º lance do pilar-parede.	47
Tabela 2 - Detalhamento do pilar-parede P9 – Alternativa 1.....	50
Tabela 3 - Detalhamento do pilar-parede P9 – Alternativa 2.....	53
Tabela 4 - Verificação por faixas independentes da capacidade resistente.....	54
Tabela 5 - Verificação por malha da capacidade resistente de cada faixa.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI	American Concrete Institute
BIM	Modelagem da Informação da Construção
ENECE	Encontro Nacional de Engenharia e Consultoria Estrutural
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Regulamentar

LISTA DE SÍMBOLOS

a_i	Comprimento da faixa
A_c	Área da seção transversal do concreto
A_{st}	Área de aço de armadura transversal
C.A	Coeficientes de arrasto
e_1	Excentricidade total de 1ª . ordem
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
h	Altura da seção transversal
l_e	Comprimento equivalente do pilar
M	Momento fletor
N	Esforço normal
S_1	Fator de terreno
S_2	Categoria de rugosidade e classe da edificação
S_3	Fator estatístico
S_d	Esforço solicitante de cálculo
R_d	Esforço resistente de cálculo
α_b	Coeficiente
λ	Índice de esbeltez
β	Coeficiente
κ	Valor da rigidez adimensional
$1/r$	Curvatura na seção crítica
v	Força normal adimensional
ϕ	Bitola (diâmetro) das armaduras longitudinais
ϕ_t	Bitola (diâmetro) da armadura transversal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Considerações Iniciais	14
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	17
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	17
1.3	Organização do trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Definição de Pilar-Parede	18
2.2	Efeitos de 2ª Ordem	20
2.2.1	<i>Dispensa dos efeitos locais de 2ª Ordem</i>	21
2.2.2	<i>Análise dos efeitos locais de segunda ordem.....</i>	23
2.2.2.1	<i>Método do pilar-padrão com curvatura aproximada.....</i>	23
2.2.2.2	<i>Método do pilar-padrão com rigidez k aproximada.....</i>	24
2.2.2.3	<i>Método do pilar-padrão acoplado a diagramas M, N, 1/r.....</i>	24
2.2.2.4	<i>Método Geral.....</i>	25
2.2.3	<i>Dispensa dos efeitos localizados de 2ª Ordem</i>	25
2.2.4	<i>Análise dos efeitos localizados de 2ª Ordem</i>	26
2.3	Armadura transversal do Pilar-Parede	29
2.4	Modelos de dimensionamento do pilar-parede	30
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	Introdução	36
3.2	Propriedades do edifício.....	37
3.3	Configurações de detalhamento	40
3.3.1	<i>Alternativa 1.....</i>	41
3.3.2	<i>Alternativa 2.....</i>	41
3.4	Análise da armadura transversal do pilar-parede.....	41
3.5	Análise comparativa das alternativas de detalhamento do pilar-parede	42
4	RESULTADOS.....	46
4.1	Resultados das diferentes configurações de detalhamento do pilar-parede.....	46
4.1.1	<i>Alternativa 1 – Detalhamento do pilar-parede</i>	48
4.1.2	<i>Alternativa 2 – Detalhamento do pilar-parede</i>	50
4.2	Análises comparativas dos detalhamentos	53
5	CONCLUSÃO.....	57

REFERÊNCIAS	59
ANEXO A – PRANCHA COM AS 2 ALTERNATIVAS DE DETALHAMENTO DO PILAR-PAREDE.....	60

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Nos últimos anos, o setor da construção civil tem apresentado um crescimento expressivo, impulsionado pela expansão urbana e pela busca constante por soluções arquitetônicas mais sofisticadas. A verticalização das cidades se tornou uma tendência marcante, resultando em edificações cada vez mais altas, com elementos estruturais mais esbeltos e exigindo maior eficiência no uso dos materiais. De acordo com dados da empresa Triider, com base em informações do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), entre os anos de 2009 e 2019 houve um aumento de aproximadamente 68,7% na quantidade de edifícios construídos no país, evidenciando a magnitude desse avanço.

Com o crescimento das edificações de múltiplos pavimentos, evidencia-se a crescente demanda por alternativas estruturais capazes de assegurar a viabilidade técnica, econômica e construtiva desses empreendimentos. Nesse contexto, destaca-se o pilar-parede como um componente de grande relevância. A formalização do conceito e dos critérios de dimensionamento dos pilares-parede foi consolidada com a publicação da NBR 6118:2003, que estabeleceu parâmetros específicos para o seu projeto e detalhamento. Desde então, o estudo desses elementos vem se aprimorando, considerando diferentes configurações geométricas, condições de contorno e detalhamentos.

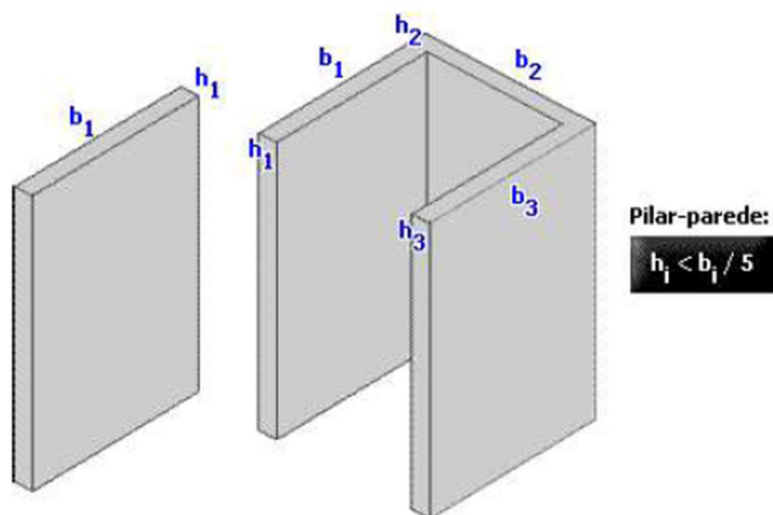
Diante desse contexto, podemos analisar o conceito de pilar-parede. De acordo com o item 14.4.2.4 da NBR 6118:2023, a definição deste elemento é:

Elementos de superfície plana ou casca cilíndrica, usualmente dispostos na vertical e submetidos preponderantemente à compressão. Podem ser compostos por uma ou mais superfícies associadas. Para que se tenha um pilar-parede, em alguma dessas superfícies a menor dimensão deve ser menor que $1/5$ da maior, ambas consideradas na seção transversal do elemento estrutural.

Conforme abordado anteriormente, os pilares-parede são elementos estruturais predominantemente submetidos a esforços de compressão. No entanto, apresentam características específicas que os diferenciam dos pilares convencionais. De acordo com KIMURA (2016), em edifícios altos, os pilares-parede assumem um papel fundamental na manutenção da estabilidade global da estrutura, o que o torna um elemento de contraventamento. Nessa condição, além de resistirem aos esforços verticais, esses elementos são solicitados por

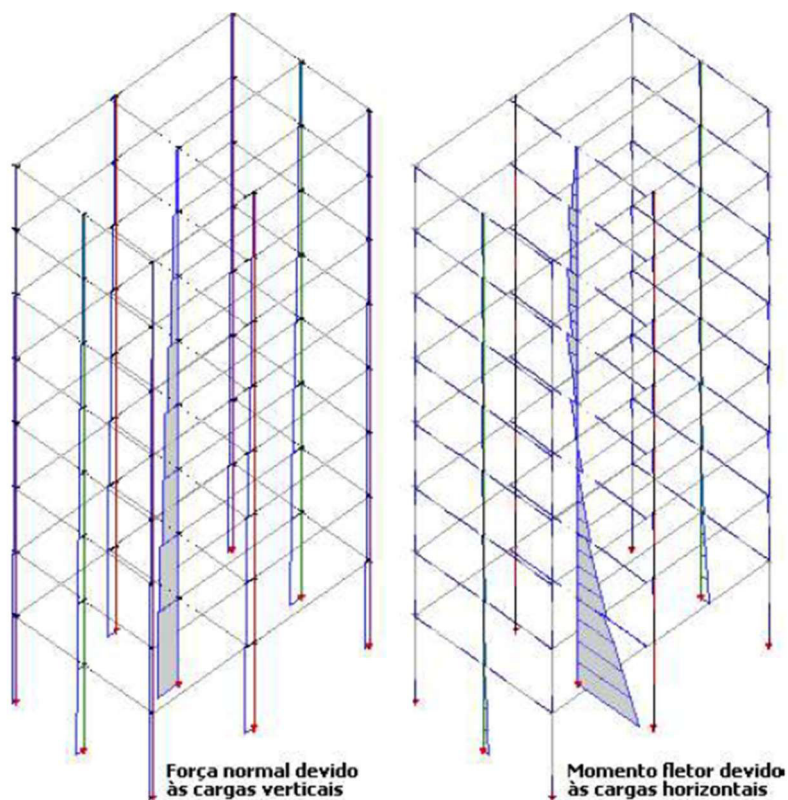
ações horizontais, como aquelas decorrentes da ação do vento, contribuindo de forma significativa na resistência desses esforços no sistema estrutural.

Figura 1 - Conceito de Pilar-Parede.



Fonte: KIMURA (2016).

Figura 2 - Exemplo de pilar-parede quando solicitado por ações horizontais.



Fonte: KIMURA (2016).

Com base na Figura 2 (KIMURA, 2016), observa-se que o pilar central corresponde a um pilar-parede. Quando submetido a ações horizontais, como as provenientes do vento, esse elemento passa a desempenhar a função de contraventamento da estrutura. Tal comportamento torna-se evidente ao analisar os diagramas de momento fletor resultantes dessas ações, nos quais se constata uma resistência significativamente superior nos primeiros pavimentos em comparação aos demais pilares, que não apresentam a mesma relevância estrutural sob tais solicitações.

Apesar da crescente utilização dos pilares-parede em projetos estruturais, ainda são poucos os estudos que abordam, de forma aprofundada, o comportamento desses elementos. Segundo KIMURA (2016), esse é um problema que ainda necessita ser resolvido e melhor compreendido, uma vez que as particularidades geométricas e estruturais dos pilares-parede exigem análises específicas, distintas daquelas aplicadas aos pilares convencionais.

Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de ampliar e aprofundar as investigações relacionadas ao dimensionamento e detalhamento desses elementos estruturais. A compreensão mais precisa do modo como a configuração do detalhamento influencia na capacidade resistente do pilar-parede é essencial para garantir maior segurança e confiabilidade nos projetos.

Nesse cenário, a utilização de softwares de modelagem e análise estrutural, como o TQS, torna-se indispensável para a elaboração de modelos mais precisos e representativos do comportamento real das estruturas. Conforme destaca KIMURA (2007), a evolução tecnológica não se restringe apenas ao aprimoramento de equipamentos e programas, mas também à forma como esses sistemas interagem entre si. O aumento da capacidade de processamento e armazenamento de dados, aliado ao desenvolvimento de ferramentas computacionais mais eficientes e inteligentes, consolidou um novo patamar de precisão e agilidade na engenharia estrutural. Esse avanço proporcionou aos engenheiros estruturais maior precisão, eficiência e racionalização nos processos de dimensionamento e detalhamento dos elementos estruturais, resultando em projetos mais seguros, otimizados e economicamente viáveis.

Dessa forma, neste trabalho será empregado o software TQS como ferramenta principal para a análise estrutural e o detalhamento dos modelos adotados. Serão avaliadas e comparadas diferentes estratégias de modelagem de pilares-parede. Todos os procedimentos serão conduzidos conforme os parâmetros prescritos pela NBR 6118:2023, complementados pelas recomendações consolidadas na literatura técnica especializada, de modo a garantir rigor metodológico e aderência aos critérios normativos vigentes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o dimensionamento dos pilares-parede para diferentes configurações de detalhamento.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a. Verificar a influência das diferentes configurações de detalhamento na capacidade resistente dos pilares-parede;
- b. Analisar comparativamente os diferentes detalhamentos do pilar-parede por meio da verificação dos efeitos localizados considerando faixas independentes, de acordo com NBR 6118:2023, e uma análise por malha;
- c. Avaliar se a distribuição não uniforme das armaduras longitudinais contribui para a redução do consumo de armadura longitudinal e transversal do pilar-parede.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, organizados de forma a conduzir o leitor desde a contextualização teórica até a análise dos resultados obtidos. O Capítulo 1 apresenta a introdução do tema, expondo a relevância do estudo, seus objetivos e a estrutura geral do trabalho, de modo a situar o leitor quanto ao desenvolvimento da pesquisa. O Capítulo 2 aborda os critérios de detalhamento dos pilares-parede conforme a NBR 6118:2023, destacando os principais parâmetros normativos e fundamentos teóricos aplicáveis ao dimensionamento desses elementos estruturais. O Capítulo 3 apresenta a metodologia do trabalho, na qual são definidas as alternativas de detalhamento do pilar-parede e os procedimentos adotados para a realização das análises comparativas. O Capítulo 4 contempla a análise comparativa dos resultados obtidos, discutindo as diferenças de desempenho estrutural entre os modelos de detalhamento propostos e seus respectivos comportamentos frente às solicitações. Por fim, o Capítulo 5 reúne as conclusões do estudo, sintetizando as principais observações obtidas e apresentando considerações sobre a aplicabilidade dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição de Pilar-Parede

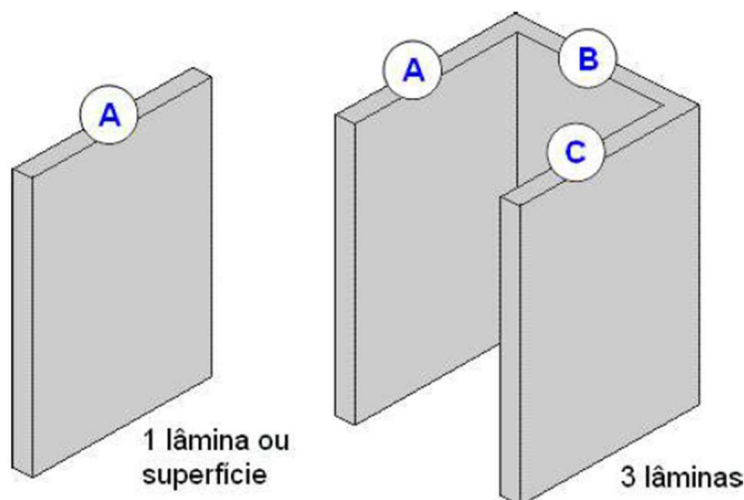
Inicialmente, para a adequada compreensão do comportamento do pilar-parede, é fundamental reconhecer que esse elemento não pode ser classificado como um pilar convencional. Segundo KIMURA (2016), o pilar-parede não pode ser considerado um pilar comum por conta das suas funções e particularidades, entre elas a manutenção da estabilidade global da estrutura, a particularidade geométrica e a aparição dos efeitos localizados que serão discutidos no decorrer do capítulo.

Diante desse contexto, pode-se avaliar as definições dadas pela norma NBR 6118:2023 para cada elemento. Pelo item 14.4.1.2 da NBR 6118:2023, pilares são definidos como “Elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes.”. Ademais, o item 14.4.1 da NBR 6118:2023 afirma que elementos lineares são denominados barras, cujo seu comprimento longitudinal deve ser superior a pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal.

Em contraste com o pilar convencional, a NBR 6118:2023, no item 14.4.2.4, descreve os pilares-parede como:

Elementos de superfície plana ou casca cilíndrica, usualmente dispostos na vertical e submetidos preponderantemente à compressão. Podem ser compostos por uma ou mais superfícies associadas. Para que se tenha um pilar-parede, em alguma dessas superfícies a menor dimensão deve ser menor que $1/5$ da maior, ambas consideradas na seção transversal do elemento estrutural.

Figura 3 - Pilar-parede simples e composto.



Fonte: KIMURA (2016).

Entretanto, conforme o item 15.9.1 da NBR 6118:2023, estabelece-se que:

Para que os pilares-parede possam ser incluídos como elementos lineares no conjunto resistente da estrutura, deve-se garantir que sua seção transversal tenha sua forma mantida por travamentos adequados nos diversos pavimentos e que os efeitos de 2ª ordem locais e localizados sejam convenientemente avaliados.

Diante disso, observa-se que os pilares-parede apresentam características específicas que os diferenciam dos pilares convencionais. Essas particularidades exigem uma análise criteriosa dos parâmetros normativos. A verificação detalhada de cada um desses fatores é essencial para garantir a segurança e o desempenho adequado do elemento estrutural conforme os requisitos estabelecidos pela NBR 6118:2023.

ARAÚJO (2014) chama atenção para o fato de que a definição normativa de pilar-parede, fundamentada apenas em critérios geométricos, não descreve adequadamente o comportamento estrutural desses elementos. Este define o pilar-parede como “pilares com seção de parede fina”. Em suas análises, afirma-se que os pilares-parede possuem seções que conferem elevada rigidez em relação ao peso próprio em comparação à solução de seção maciça. Essa configuração possibilita redução significativa no volume de concreto empregado, embora exija maior investimento em formas e em armaduras, devido às particularidades de detalhamento. Este ainda afirma que a implementação de pilares-parede apresentará vantagens apenas em edifícios de grande altura.

Como referência comparativa, destaca-se a abordagem apresentada por WIGHT (2016), que oferece um tratamento mais abrangente aos pilares-parede, em conformidade com os critérios da norma americana ACI 318. O autor dedica um capítulo específico ao estudo desses elementos. Segundo a ACI 318, classifica-se como parede o elemento vertical submetido a ações verticais e horizontais cuja razão largura/espessura excede 3. A designação parede estrutural é aplicada àqueles elementos capazes de resistir, em seu plano médio, às solicitações de cisalhamento, flexão e força normal.

Essa definição evidencia diferenças relevantes em relação à NBR 6118, particularmente porque, no contexto norte-americano, esses elementos são geralmente concebidos com maior robustez. Tal característica decorre, sobretudo, da necessidade de atender às exigências de desempenho sísmico impostas pelas ações dinâmicas predominantes em diversas regiões dos Estados Unidos, o que influencia diretamente os critérios de dimensionamento e detalhamento adotados naquela normativa.

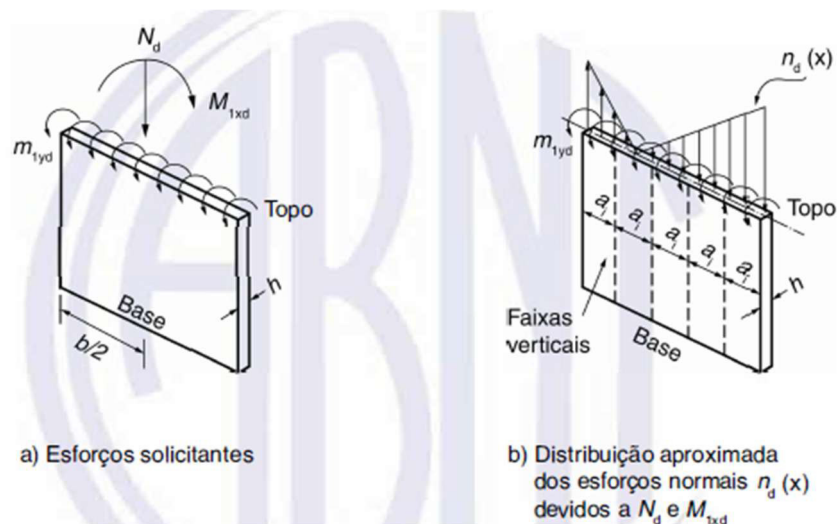
2.2 Efeitos de 2ª Ordem

Segundo ARAÚJO (2014), o processo de dimensionamento dos pilares-parede segue, em linhas gerais, os mesmos critérios adotados para os pilares convencionais. No entanto, os pilares-parede estão frequentemente sujeitos a flexo-torção. Essa particularidade torna os efeitos de segunda ordem significativamente mais relevantes nesse tipo de elemento, exigindo uma análise mais criteriosa durante o dimensionamento, a fim de garantir a segurança e o desempenho estrutural adequado da edificação.

Um pilar pode ser submetido a efeitos de 2ª ordem, os quais são divididos em efeitos globais, locais e localizados. Segundo a NBR 6118:2023, os efeitos globais de 2ª ordem dizem respeito ao comportamento da estrutura como um conjunto, sendo determinados a partir de uma modelagem global, usualmente representada por um pórtico espacial. Os efeitos locais de 2ª ordem ocorrem nas barras das estruturas, exemplo um lance de um pilar, quando os eixos não se mantêm retilíneos após o deslocamento, sendo calculados por meio de uma modelagem local.

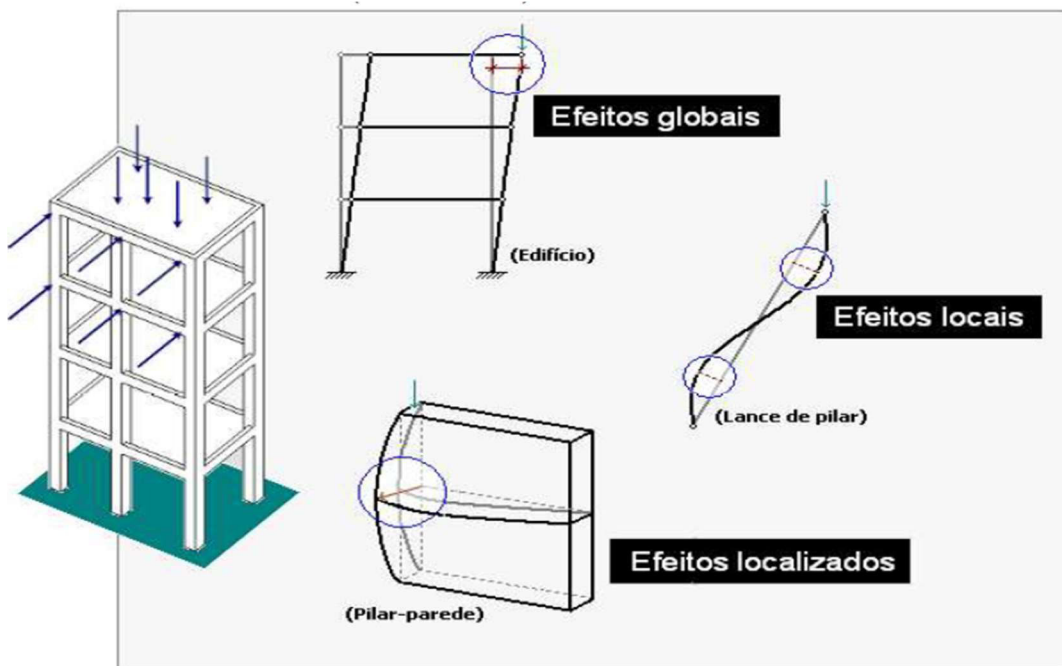
Por fim, especificamente para o caso de pilares-parede, ocorre o caso dos efeitos localizados, os quais se manifestam predominantemente em regiões específicas do pilar-parede, especialmente nas extremidades de menor rigidez, que apresentam maior suscetibilidade ao desenvolvimento de efeitos de segunda ordem mais expressivos, em razão da concentração de tensões. Segundo KIMURA (2016), os efeitos localizados são efeitos concentrados nas extremidades dos pilares-parede devido ao aumento do esforço normal provocado pela atuação do momento fletor segundo sua direção mais rígida.

Figura 4 - Método aproximado para consideração do efeito localizado de segunda ordem.



De acordo com ARAÚJO (2014), os pilares-parede estão sujeitos a manifestações de esforços localizados ao longo de suas lâminas, os quais podem exercer influência significativa no comportamento estrutural global do elemento. Esses efeitos localizados podem ser determinantes no processo de dimensionamento, exigindo atenção especial quanto à distribuição de tensões, à estabilidade local e à adequação do detalhamento das armaduras.

Figura 5 - Efeitos de 2ª ordem.



Fonte: KIMURA (2016).

2.2.1 Dispensa dos efeitos locais de 2ª Ordem

O item 15.8.2 da NBR 6118:2023 estabelece critérios técnicos que permitem, sob determinadas condições, a dispensa da consideração dos efeitos de segunda ordem locais. Essa condição é atendida quando o índice de esbeltez (λ) apresenta valor inferior ao limite estabelecido (λ_1). Conforme o item correspondente da NBR 6118:2023, encontramos o valor limite de λ_1 a partir de:

O valor de λ_1 depende de diversos fatores, mas os preponderantes são:

- a excentricidade relativa de 1ª ordem e_1/h na extremidade do pilar onde ocorre o momento de 1ª ordem de maior valor absoluto;
- a vinculação dos extremos da coluna isolada;
- a forma do diagrama de momentos de 1ª ordem.

Esse valor limite e o índice de esbeltez poderão ser calculados pelas seguintes expressões:

$$\lambda_1 = \frac{25 + 12,5e_1/h}{\alpha_b} \quad (\text{Equação 2.1})$$

$$\lambda = \ell_e / i \quad (\text{Equação 2.2})$$

Deve-se destacar que o valor limite de λ_1 deve estar em conformidade com a inequação apresentada a seguir:

$$35 \leq \lambda_1 \leq 90 \quad (\text{Equação 2.3})$$

O valor de α_b deverá ser obtido conforme as exigências do item 15.8.2 da NBR 6118:2023, os quais são:

onde o valor de α_b deve ser obtido conforme estabelecido a seguir:

a) para pilares biapoiados sem cargas transversais:

$$\alpha_b = 0,60 + 0,40 \frac{M_B}{M_A} \geq 0,40 \quad (\text{Equação 2.4})$$

sendo $1 \geq \alpha_b \geq 0,4$. (Equação 2.5)

Onde M_A e M_B são momentos de 1ª ordem nos extremos do pilar, obtidos na análise de 1ª ordem no caso de estruturas de nós fixos e os momentos totais (1ª ordem + 2ª ordem global) no caso de estruturas de nós móveis. Deve ser adotado para M_A o maior valor absoluto ao longo do pilar biapoiado e para M_B o sinal positivo, se tracionar a mesma face que M_A , e negativo, em caso contrário.

b) para pilares biapoiados com cargas transversais significativas ao longo da altura:

$$\alpha_b = 1,0$$

c) para pilares em balanço:

$$\alpha_b = 1,0$$

d) para pilares biapoiados ou em balanço com momentos menores que o momento mínimo estabelecido em 11.3.3.4.3:

$$\alpha_b = 1,0$$

2.2.2 Análise dos efeitos locais de segunda ordem

Conforme mencionado anteriormente, os efeitos locais de segunda ordem manifestam-se nos elementos lineares da estrutura, por exemplo, em um trecho de pilar, quando o eixo da peça deixa de permanecer retilíneo após o deslocamento. Tais efeitos devem ser devidamente considerados na análise dos pilares, podendo ser determinados tanto pelo método geral quanto por métodos aproximados, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 6118:2023. A escolha do método de cálculo é condicionada ao índice de esbeltez do elemento estrutural. Nos tópicos seguintes, serão detalhadas as particularidades e aplicações de cada um desses métodos.

2.2.2.1 Método do pilar-padrão com curvatura aproximada

O item 15.8.3.3.2 da NBR 6118:2023 estabelece os critérios e parâmetros necessários para a aplicação desse método aproximado. Esse procedimento é admissível apenas para o dimensionamento de pilares cujo índice de esbeltez (λ) seja menor ou igual a 90, apresentando seção transversal constante e armadura constante e simétrica ao longo do eixo do elemento. Ressalta-se ainda que, nesse método, tanto a não linearidade geométrica quanto a não linearidade física são consideradas de forma simplificada. É importante ressaltar que a não linearidade física é avaliada através de uma aproximação da curvatura na seção crítica.

Neste item da norma, é informado que o momento total máximo pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$M_{d,tot} = \alpha_b M_{1d,A} + N_d \frac{\ell_e^2}{10r} \geq M_{1d,A} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Sendo:

$M_{1d,A}$ = o valor de cálculo de 1ª ordem do momento M_A ;

ℓ_e = comprimento equivalente;

α_b = o mesmo valor descrito no item 15.8.2 da NBR 6118:2023.

A norma define $1/r$ como a curvatura na seção crítica. Tal curvatura pode ser avaliada através da expressão a seguir:

$$\frac{1}{r} = \frac{0,005}{h(v+0,5)} \leq \frac{0,005}{h} \quad (\text{Equação 2.7})$$

Na qual v representa a força normal adimensional e h corresponde à altura da seção transversal na direção considerada. A referida força normal adimensional é obtida por meio da

seguinte expressão:

$$v = N_d / (A_c f_{cd}) \quad (\text{Equação 2.8})$$

2.2.2.2 Método do pilar-padrão com rigidez k aproximada

O item 15.8.3.3.3 da NBR 6118:2023 estabelece os critérios e parâmetros necessários para a aplicação desse método aproximado. De forma análoga ao método anteriormente descrito, o presente método aproximado é aplicável exclusivamente a pilares cujo índice de esbeltez (λ) seja inferior ou igual a 90. Exige-se, ainda, que a distribuição das armaduras seja simétrica e constante e a seção transversal também seja constante. Cabe destacar que, na aplicação desse método, as não linearidades física e geométrica são tratadas de forma aproximada. Ademais, deve-se considerar a não linearidade física através da avaliação aproximada da rigidez.

Neste item da norma, é informado que o momento total máximo pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$M_{Sd,tot} = - \frac{\alpha_b M_{1d,A}}{1 - \frac{\lambda^2}{120\kappa}} \geq M_{1d,A} \quad (\text{Equação 2.9})$$

A norma define κ como o valor da rigidez adimensional. Este valor aproximado pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$\kappa_{aprox} = 32 \left(1 + 5 \frac{M_{Rd,tot}}{h N_d} \right) v \quad (\text{Equação 2.10})$$

2.2.2.3 Método do pilar-padrão acoplado a diagramas M , N , $1/r$

O item 15.8.3.3.4 da NBR 6118:2023 define os critérios e condições necessárias para a aplicação do método aproximado do pilar-padrão acoplado a diagramas M , N , $1/r$. Diferentemente dos métodos anteriormente apresentados, esse procedimento é aplicável a pilares com índice de esbeltez (λ) superior a 90 e limitado a 140. Nessa abordagem, são empregados diagramas M , N , $1/r$ específicos para cada caso, os quais permitem a determinação da curvatura da seção crítica do elemento estrutural.

2.2.2.4 Método Geral

O método geral é descrito no item 15.8.3.2 da NBR 6118:2023 e aplica-se a pilares cujo índice de esbeltez (λ) seja superior a 140, ultrapassando, portanto, o limite de validade dos métodos aproximados. Nesse procedimento, a análise estrutural é conduzida considerando explicitamente os efeitos de segunda ordem não linear. Para tanto, a barra é discretizada em segmentos adequados, empregando-se a relação momento–curvatura real em cada seção transversal, com a inclusão rigorosa das não linearidades geométricas, sem adoção de aproximações.

2.2.3 Dispensa dos efeitos localizados de 2ª Ordem

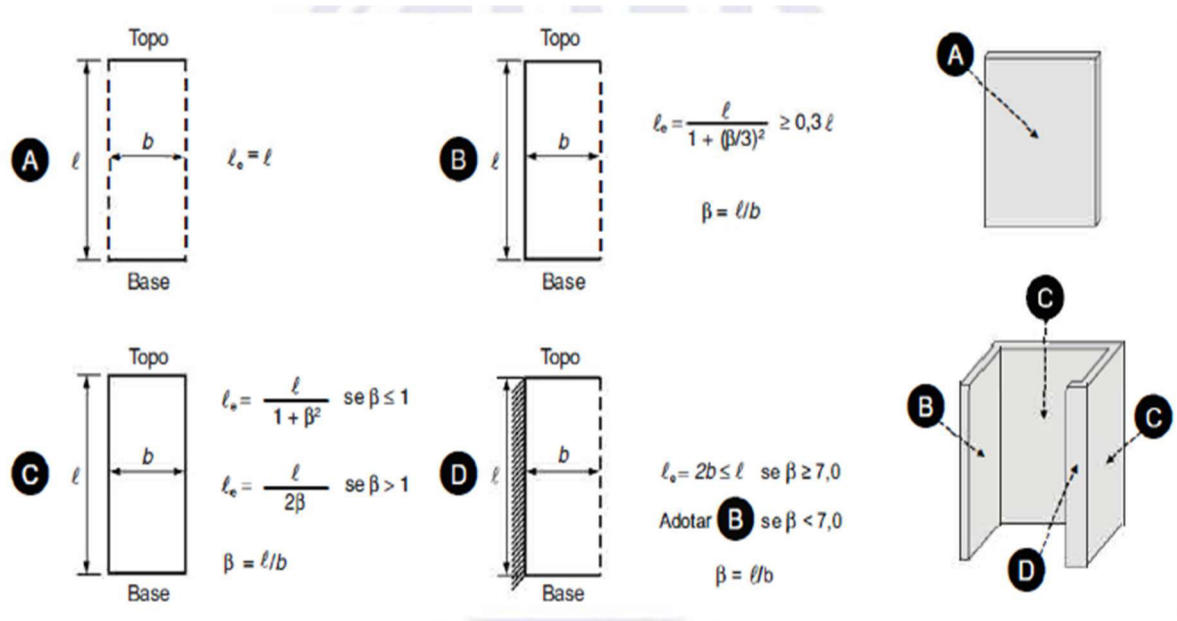
Da mesma forma que se pode dispensar os efeitos locais de 2ª ordem, o item 15.9.2 da NBR 6118:2023 afirma que existe a possibilidade de dispensar a análise dos efeitos localizados de 2ª ordem se cada lâmina respeitar as seguintes situações:

Os efeitos localizados de 2ª ordem de pilares-parede podem ser desprezados se, para cada uma das lâminas componentes do pilar-parede, forem obedecidas as seguintes condições:

- a) A base e o topo da lâmina devem estar convenientemente fixados às lajes do edifício, que conferem ao todo o efeito de diafragma horizontal.
- b) a esbeltez λ_i de cada lâmina deve ser menor que 35, podendo o cálculo dessa esbeltez λ_i ser efetuado através da expressão dada a seguir:

$$\lambda_i = 3,46 \cdot \frac{l_{ei}}{h_i} \quad (\text{Equação 2.11})$$

Nessa expressão, verificamos que z é o comprimento equivalente e h_i a espessura, ambos para cada lâmina analisada. De acordo com a NBR 6118:2023, o comprimento equivalente depende dos vínculos de cada uma das extremidades da lâmina. Dessa forma, verifica-se que, para pilares-parede simples, o cálculo do comprimento equivalente deve ser realizado conforme o caso “A” apresentado na imagem a seguir. Para pilares-parede compostos, por sua vez, é necessário avaliar as condições de vínculo nas extremidades a fim de determinar o caso aplicável ao cálculo do comprimento equivalente.

Figura 6 - Comprimento equivalente ℓ_{ei} .

Fonte: NBR 6118:2023

Por último, é importante salientar que segundo o item 15.9.2 da NBR 6118:2023, se o topo e a base forem engastados e $\beta \leq 1$, os valores de λ_i podem ser multiplicados por 0,85.

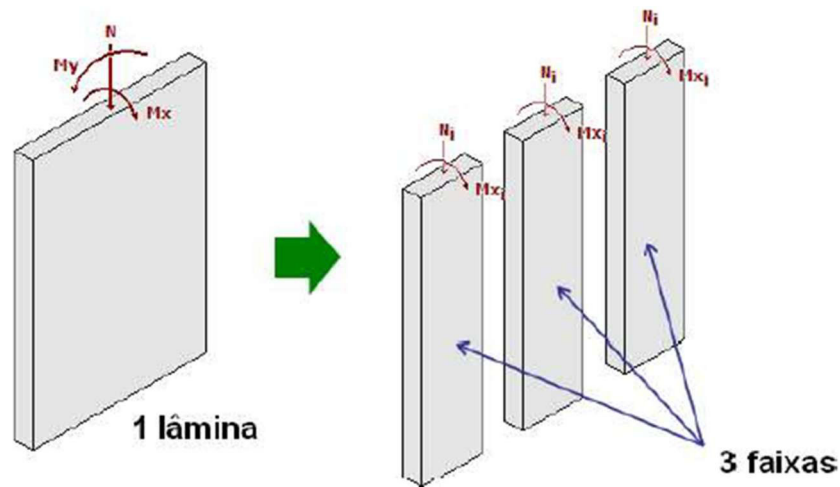
2.2.4 Análise dos efeitos localizados de 2ª Ordem

A NBR 6118:2023 traz em seu item 15.9.3 um processo aproximado para o cálculo dos efeitos localizados de segunda ordem. Este método pode ser aplicado apenas se as lâminas tiverem um índice de esbeltez (λ) menor que 90. Ao aplicar o método, as lâminas são subdivididas em faixas, de comprimento a_i , as quais devem ser analisadas como pilares isolados, submetidos a esforços normais e momentos. Cada faixa deve obedecer a seguinte inequação:

$$a_i = 3h \leq 100\text{cm} \text{ (Equação 2.12)}$$

Onde h é a largura do pilar-parede.

Figura 7 - Faixas a_i das lâminas dos pilares-parede.



Fonte: KIMURA (2016)

A NBR 6118:2023 afirma que após ser separados em faixas, pode-se calcular cada faixa como se fosse um pilar isolado. Segundo KIMURA (2016), para verificar os efeitos de segunda ordem podem ser utilizados qualquer método aproximado, como pilar padrão com $1/r$ aproximada, pilar-padrão com rigidez k aproximada ou pilar-padrão acoplado a diagrama $N, M, 1/r$, ou o Método Geral. Além disso, KIMURA (2016) também afirma que a análise das faixas de forma isolada é uma das grandes críticas ao método aproximado para consideração dos efeitos localizados de segunda ordem, pois a interação entre as faixas é ignorada.

Adicionalmente, a NBR 6118:2023 afirma que os efeitos localizados de segunda ordem em torno da menor dimensão de cada faixa deve ser tratado de forma análoga ao efeito de segunda ordem atuante em um pilar isolado equivalente. Nessa análise, não se torna necessário adotar valores de αb superiores a 0,6, desde que seja verificada a condição $M_{yid} < M_{1d,min}$, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 6118:2023.

Segundo ARAÚJO (2014), o fenômeno da flambagem localizada é amplamente documentado no contexto de pilares metálicos, porém ainda há escassez de investigações teóricas e ensaios experimentais voltados aos pilares de concreto armado. Nas estruturas mais antigas, essa instabilidade raramente se manifestava, uma vez que os concretos utilizados possuíam resistências reduzidas, o que demandava espessuras maiores para os pilares-parede. Como resultado, esses elementos apresentavam baixos índices de esbeltez e, consequentemente, cargas críticas de flambagem significativamente superiores às ações atuantes, praticamente eliminando o risco de flambagem localizada.

Com a crescente utilização de concretos de alta resistência nas edificações

modernas, tornou-se viável empregar pilares-parede com espessuras mais reduzidas. Essa redução, embora vantajosa do ponto de vista arquitetônico e econômico, elevou a suscetibilidade à flambagem localizada, sobretudo em lâminas com bordos livres. Diante desse cenário, ARAÚJO (2014) recomenda a adoção de lintéis como solução eficaz para reduzir o comprimento de flambagem das lâminas mais vulneráveis, contribuindo para a estabilidade global do pilar-parede e para a segurança estrutural da edificação.

No que se refere às imperfeições localizadas, ARAÚJO (2014) propõe tratá-las por meio de uma analogia com o comportamento de placas, incorporando obrigatoriamente os efeitos de segunda ordem. Considerando uma lâmina comprimida com apoios na extremidade superior e inferior, a deformação lateral adicional ocorre de forma mais pronunciada na região central, gerando um momento suplementar decorrente da excentricidade de aplicação da carga.

O momento fletor vertical associado a essa imperfeição tende a ser pouco significativo, uma vez que a excentricidade produzida é distribuída por toda a largura da seção transversal, podendo inclusive ser compensada pela ação de outra lâmina adjacente de geometria semelhante. Em contraste, o momento fletor no plano horizontal pode atingir valores relevantes, pois sua resistência fica integralmente atribuída à própria lâmina instável, sem contribuição das demais.

Apesar disso, ARAÚJO (2014) destaca que, na prática, as taxas de armadura necessárias para resistir a esse momento adicional costumam ser inferiores às armaduras normalmente previstas para controle de fissuração por retração e variações térmicas, o que limita o impacto dessa verificação no detalhamento final do elemento, considerando esse efeito de imperfeição localizada de importância secundária.

No estudo conduzido por ARAÚJO (2007), é apresentada uma avaliação crítica do procedimento aproximado previsto pela NBR 6118 para a consideração dos efeitos localizados de segunda ordem em pilares-parede. O autor compara o método simplificado normativo com uma abordagem fundamentada na teoria não linear aplicada a placas, empregando análises numéricas avançadas por meio do método dos elementos finitos. Os resultados mostraram que o procedimento aproximado da NBR 6118 conduziu a valores de momento maiores do que aqueles obtidos pela solução fundamentada na teoria das placas.

De acordo com ARAÚJO (2007), uma discretização mais detalhada das faixas empregadas no método simplificado da NBR 6118 tenderia a ampliar ainda mais a divergência entre os valores dos momentos calculados em torno do eixo de menor inércia. Esse refinamento excessivo resultaria na superestimação dos efeitos localizados de segunda ordem, conduzindo, por consequência, a um super-dimensionamento das armaduras longitudinais.

O autor destaca ainda que a magnitude do momento atuante em torno do eixo de maior inércia exerce influência direta na determinação desses efeitos de segunda ordem. Em outras palavras, o gradiente de esforço normal distribuído ao longo da maior dimensão da seção transversal do pilar-parede constitui um parâmetro crítico na avaliação dos esforços adicionais previstos pelo processo simplificado normativo.

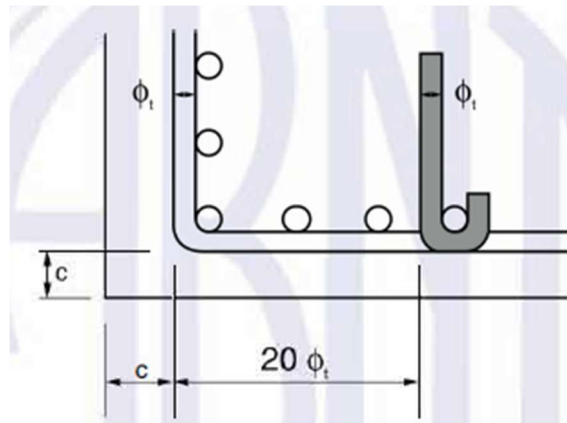
Sob uma perspectiva comparativa, podemos citar o caso do ACI 318 que não estabelece requisitos específicos para a consideração dos efeitos localizados de segunda ordem nas extremidades de paredes estruturais convencionais. Contudo, quando se trata de paredes estruturais especiais, elementos que integram o sistema de contraventamento em edificações sujeitas a ações sísmicas, embora a norma não apresente um procedimento explícito para a quantificação desses esforços adicionais, são fornecidas diversas recomendações visando ao tratamento diferenciado das extremidades desse elemento estrutural.

2.3 Armadura transversal do Pilar-Parede

Outro aspecto relevante abordado pela NBR 6118:2023 diz respeito à definição da armadura transversal em pilares-parede. O item 18.5 desta norma orienta que, caso o elemento estrutural seja analisado e dimensionado como uma placa submetida à flexão, a armadura transversal deve atender aos requisitos mínimos previstos para placas, conforme o comportamento bidimensional adotado. Entretanto, quando tal análise não é realizada, a norma impõe um critério alternativo, estabelecendo que a armadura transversal mínima por metro de face deve ser, no mínimo, igual a 25% da armadura longitudinal por metro da maior face da lâmina. Para KIMURA (2016), “Esse é um outro item que gerou uma grande discussão no meio técnico profissional, principalmente por ter gerado um consumo excessivo de armadura transversal em pilares-parede”.

Outrossim, segundo o item 18.2.4 da NBR 6118:2023, é necessário a implantação de estribos poligonais para a proteção contra flambagem das barras longitudinais. Estes devem ser colocados a uma distância máxima de $20\phi_t$ do canto, tendo no máximo até 3 barras longitudinais nessa distância. Quando houver mais de 3 barras longitudinais nessa distância, deve-se implementar estribos suplementares.

Figura 8 - Proteção contra flambagem das barras longitudinais.



Fonte: NBR 6118:2023

2.4 Modelos de dimensionamento do pilar-parede

Em 2006, durante o 9º Encontro Nacional de Engenharia e Consultoria Estrutural (ENECE), FRANÇA E KIMURA (2006) apresentaram um estudo sobre o dimensionamento das armaduras longitudinais e transversais aplicadas a pilares-parede. O estudo contemplou a avaliação de três modelos distintos de dimensionamento, cada um submetido a diferentes premissas de análise estrutural.

No primeiro modelo analisado, os autores procederam ao dimensionamento de um pilar-parede com seção retangular sem a consideração dos efeitos localizados de segunda ordem, sendo analisados apenas os efeitos de primeira ordem e os efeitos locais de segunda ordem, caracterizando um procedimento em desacordo com as diretrizes estabelecidas pela NBR 6118. Para essa configuração, utilizando-se o método geral, obteve-se uma taxa de armadura longitudinal de 1,3%, correspondente à adoção de 24 barras de 20 mm de diâmetro. Ademais, foi encontrada uma armadura transversal referente a 50% da armadura longitudinal, ou seja, $A_{st}=10,5 \text{ cm}^2/\text{m}$.

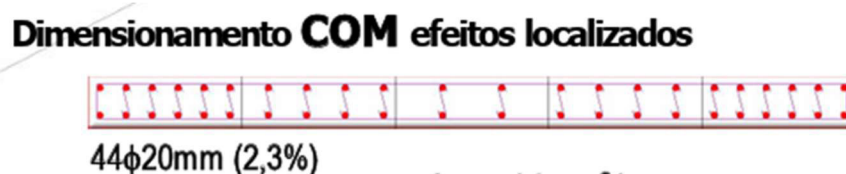
Figura 9 - Detalhamento do pilar-parede desconsiderando os efeitos localizados.



Fonte: FRANÇA E KIMURA (2006).

Na sequência, os autores apresentaram um segundo modelo de dimensionamento de pilar-parede no qual os efeitos localizados de segunda ordem foram incorporados à análise, em conformidade com os parâmetros da NBR 6118. Para essa verificação, adotou-se o processo aproximado recomendado pela norma. Nessa configuração, o dimensionamento resultou em uma taxa de armadura longitudinal de 2,3%, equivalente à utilização de 44 barras com diâmetro de 20 mm. Sobretudo, foi encontrada uma armadura transversal referente a 25% da armadura longitudinal, ou seja, $A_{st}=5,8 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Figura 10 - Detalhamento do pilar-parede considerando os efeitos localizados.



Fonte: FRANÇA E KIMURA (2006)

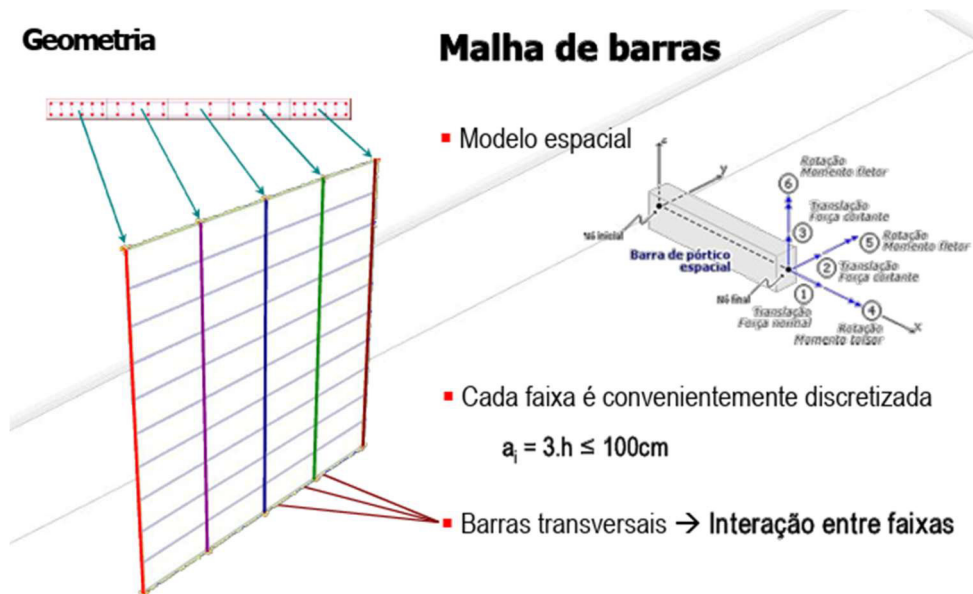
Diante das limitações atribuídas ao processo simplificado, especialmente quanto à consideração de faixas independentes que tratam o pilar-parede como um conjunto de pilares isolados, FRANÇA E KIMURA (2006) propuseram uma modelagem alternativa para o dimensionamento do mesmo elemento avaliado no primeiro exemplo. Nessa abordagem, o pilar-parede foi representado por uma discretização em malha de barras, substituindo a subdivisão tradicional por faixas não conectadas. Embora o elemento ainda seja particionado em regiões longitudinais, essas faixas passam a ser rigidamente interligadas por barras transversais, formando uma malha estrutural contínua.

A distribuição dos esforços entre as faixas foi realizada com base nas rigidezes EI_{sec} individuais de cada faixa, determinadas a partir da construção dos respectivos diagramas $N-M-1/r$. Os efeitos de segunda ordem foram calculados por um processo iterativo. As imperfeições geométricas foram incorporadas ao modelo por meio da aplicação do momento mínimo de primeira ordem em cada faixa do pilar-parede. Assim, essa modelagem equivale essencialmente à aplicação do Método Geral a um sistema composto por um conjunto de barras, uma vez que incorpora de maneira refinada as não linearidades física e geométrica.

A distinção fundamental dessa modelagem reside no fato de que, além das barras verticais representativas das faixas, foram introduzidos elementos transversais que promovem a ligação horizontal entre elas. Essa configuração permite não apenas a obtenção dos esforços

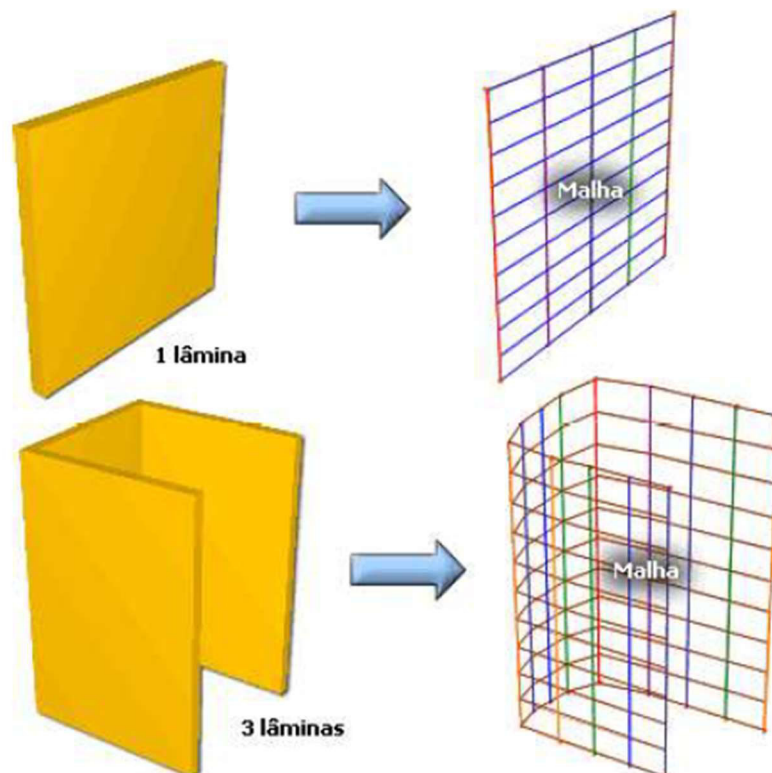
verticais atuantes em cada faixa, mas também a determinação dos esforços solicitantes na direção horizontal da parede, compreendendo força normal, momento fletor e esforço cortante.

Figura 11- Modelagem por malha de barras.



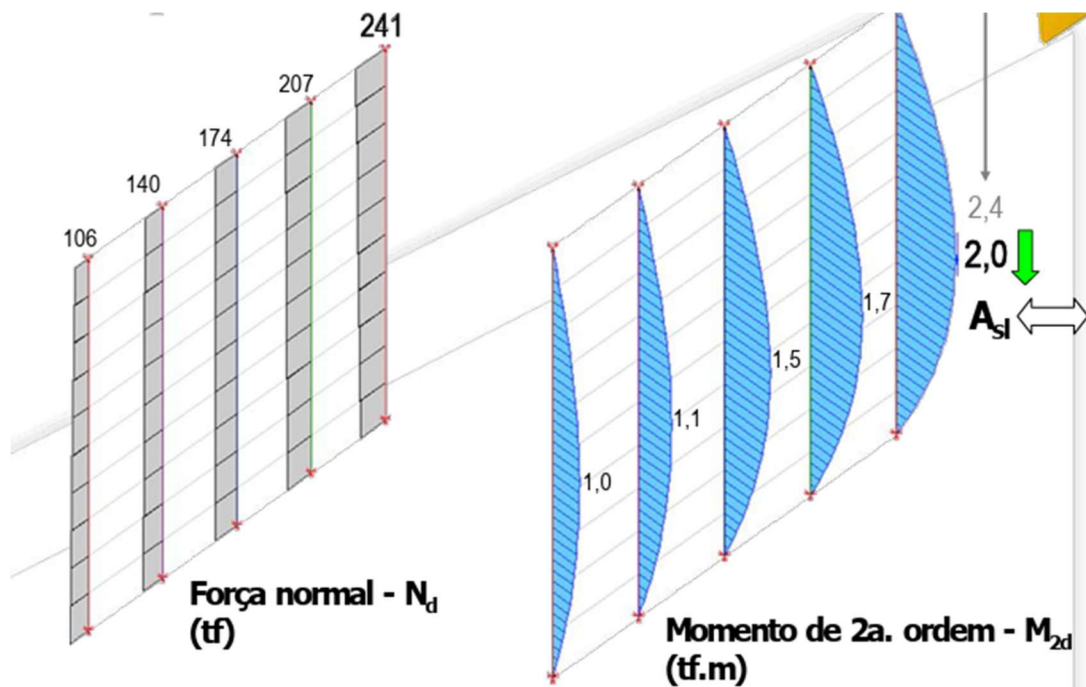
Fonte: FRANÇA E KIMURA (2006)

Figura 12 - Modelagem por malha de barras.



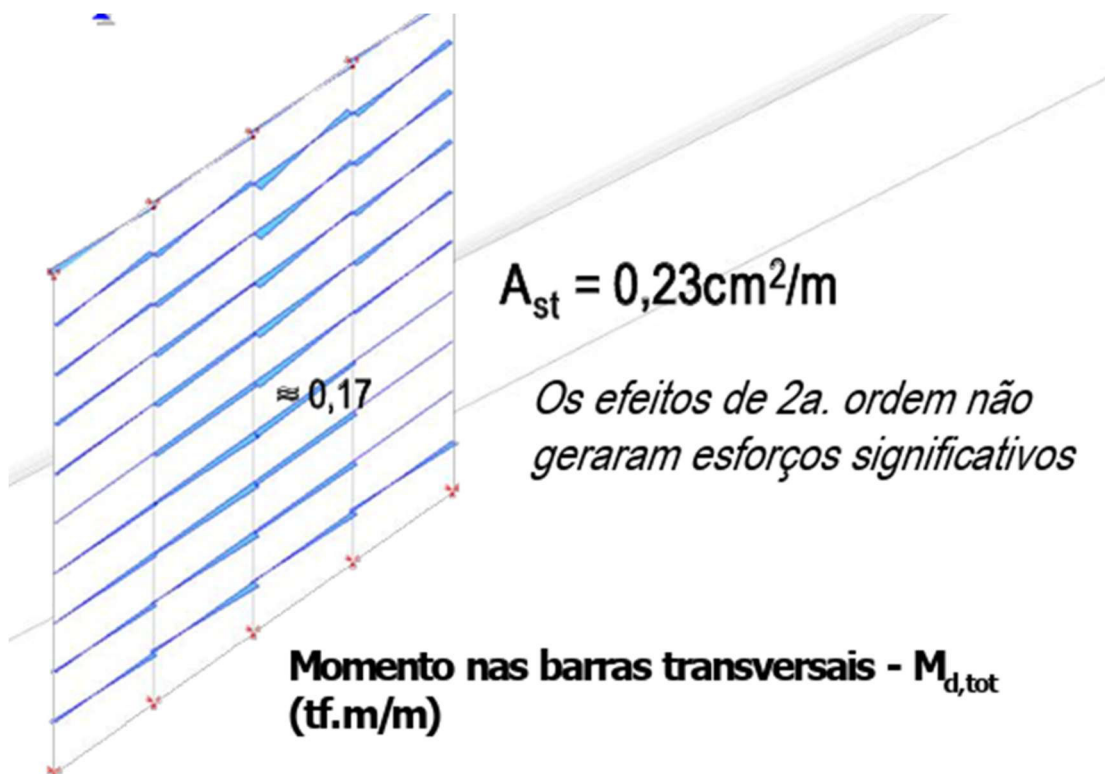
Fonte: KIMURA (2016)

Figura 13 - Esforços no modelo de malha de barras.



Fonte: FRANÇA E KIMURA (2006)

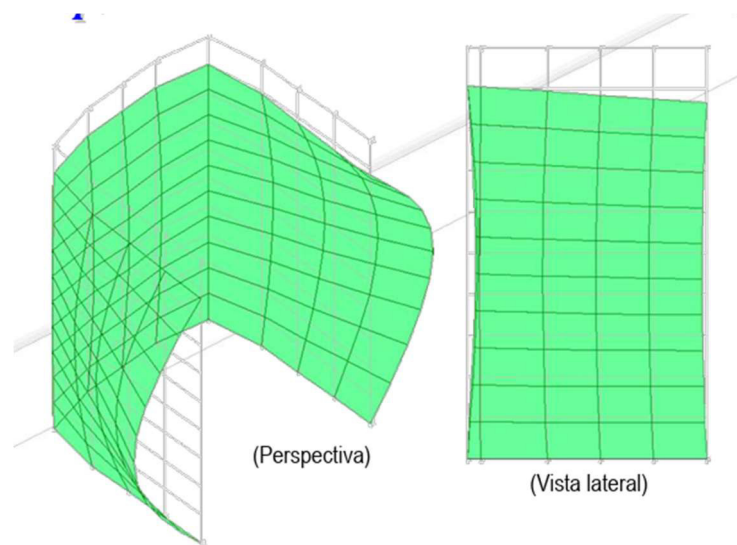
Figura 14 - Armadura transversal no modelo de malha de barras.



Fonte: FRANÇA E KIMURA (2006)

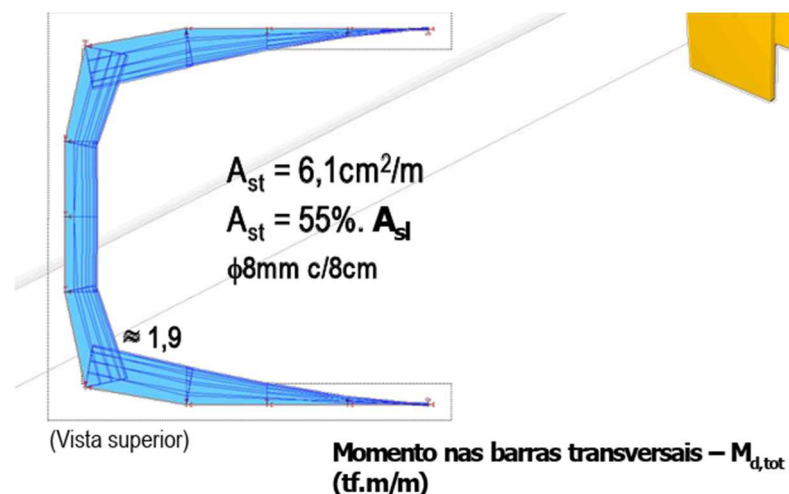
Além disso, os autores aplicaram a modelagem em malha de barras a um pilar-parede composto em configuração em “U”. Para essa geometria, a análise resultou em uma demanda de armadura transversal superior ao limite mínimo de 25% estabelecido pela NBR 6118, evidenciando a maior sensibilidade desse tipo de elemento às ações transversais e aos efeitos de interação entre as lâminas. Diante disso, FRANÇA E KIMURA (2006) afirmaram que “evidenciou também que a taxa mínima de armadura transversal poderia ser balizada de forma mais precisa em certos casos.”

Figura 15 - Deslocamentos de pilar-parede pelo modelo de malha de barras.



Fonte: FRANÇA E KIMURA (2006)

Figura 16 - Armadura transversal de pilar-parede pelo modelo de malha de barras.

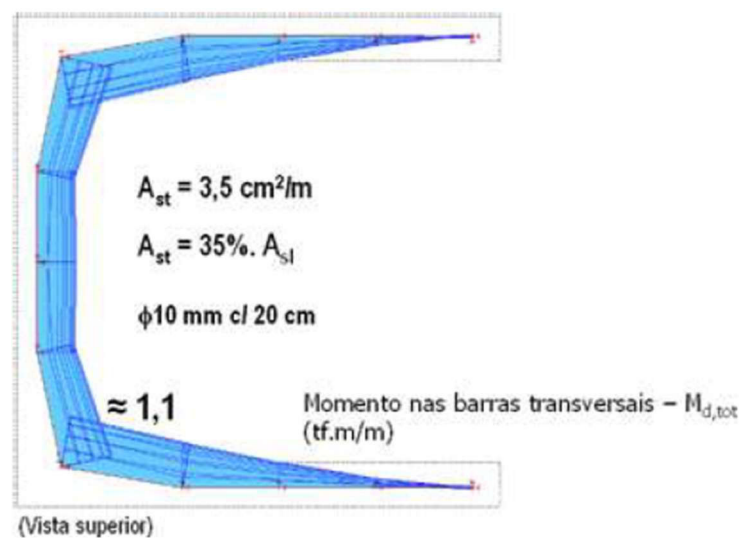


Fonte: FRANÇA E KIMURA (2006)

Por último, destaca-se ainda a modelagem em malha de barras apresentada por Kimura em sua obra “Cálculo de Pilares de Concreto Armado”, na qual igualmente se obtiveram valores de armadura transversal superiores ao limite mínimo de 25% previsto pela NBR 6118. Esse resultado reforça a necessidade de uma avaliação detalhada dos esforços atuantes, especialmente em modelos que consideram de forma mais realista a interação entre as lâminas e os efeitos de segunda ordem. Para KIMURA (2016), “A modelagem com malha se comportou de forma adequada”. Além disso, KIMURA (2016) afirmou:

Os momentos fletores nas barras transversais não foram tão pequenos, pois as lâminas com uma borda livre praticamente “engastaram” na superfície vinculada do pilar-parede. Esses esforços indicaram a necessidade da colocação de armaduras transversais (estribos).

Figura 17 - Armadura transversal de pilar-parede pelo modelo de malha de barras.



Fonte: KIMURA (2016)

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Conforme observado por KIMURA (2007), o desenvolvimento de projetos estruturais na atualidade depende de maneira decisiva do uso de ferramentas computacionais. As demandas crescentes por agilidade, precisão e produtividade tornam impraticável a elaboração integralmente manual de documentos técnicos.

Como ilustração dessa relevância, pode-se mencionar o processo de compatibilização entre o modelo estrutural e o projeto arquitetônico: ajustes em plantas de forma, revisões de detalhamentos e alterações em armaduras de lajes podem ser implementados rapidamente em ambiente digital. Sem esse suporte tecnológico, tais revisões exigiriam esforço operacional significativamente maior e consumo elevado de tempo.

Nesse cenário, destaca-se o software TQS, uma plataforma voltada ao desenvolvimento completo de projetos estruturais, contemplando desde elementos de superestrutura até componentes de infraestrutura. O ambiente computacional oferece recursos para a concepção e verificação de estruturas em concreto armado, concreto protendido, alvenaria estrutural, paredes de concreto, sistemas pré-moldados, modelos de interação solo-estrutura, além de permitir a análise e o dimensionamento de elementos metálicos e sistemas mistos, entre outras tipologias estruturais.

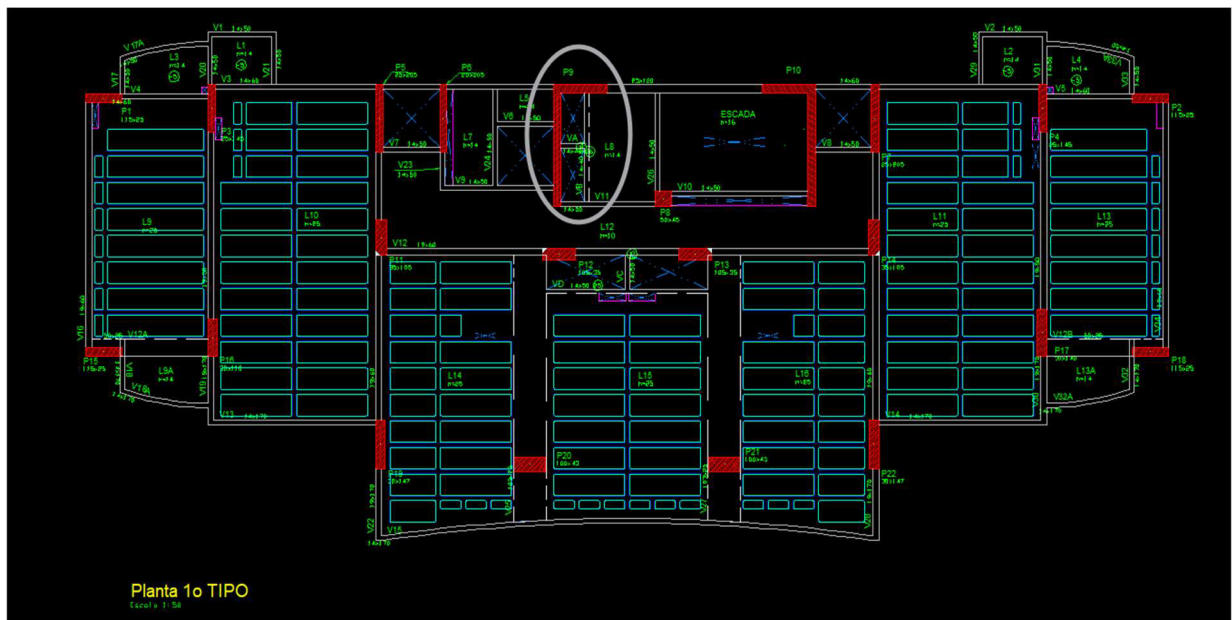
De acordo com o site da empresa, o software TQS direciona o desenvolvimento de seus sistemas para permitir que todo o fluxo de projeto, desde a modelagem estrutural, passando pelas verificações de dimensionamento, até a obtenção dos detalhamentos e desenhos executivos. Essa abordagem garante ao engenheiro um processo de projeto mais seguro, eficiente e alinhado com as práticas de BIM.

Neste estudo, o software TQS desempenhou papel central, sendo empregado desde a concepção estrutural e desenvolvimento do modelo final até a geração dos detalhamentos dos elementos. Diante disso, destaca-se o módulo “TQS-Pilar”, que possibilita a avaliação dos efeitos de primeira e segunda ordem em pilares-parede, a realização de análises em malha e a verificação do dimensionamento das armaduras transversais desses elementos.

3.2 Propriedades do edifício

A estrutura analisada corresponde a um edifício de 27 pavimentos, composto por 1 subsolo, pavimento térreo, 3 pavimentos de garagem, 19 pavimentos tipo, pavimento lazer, cobertura e casa de máquinas, totalizando aproximadamente 80 metros de altura. Para fins de estudo deste trabalho, selecionou-se um pilar-parede com geometria em formato “L”, identificado como P9, por se tratar de um elemento representativo e sujeito a solicitações significativas no contexto estrutural analisado. A figura 18 ilustra a localização e a configuração geral desse componente estrutural no modelo adotado.

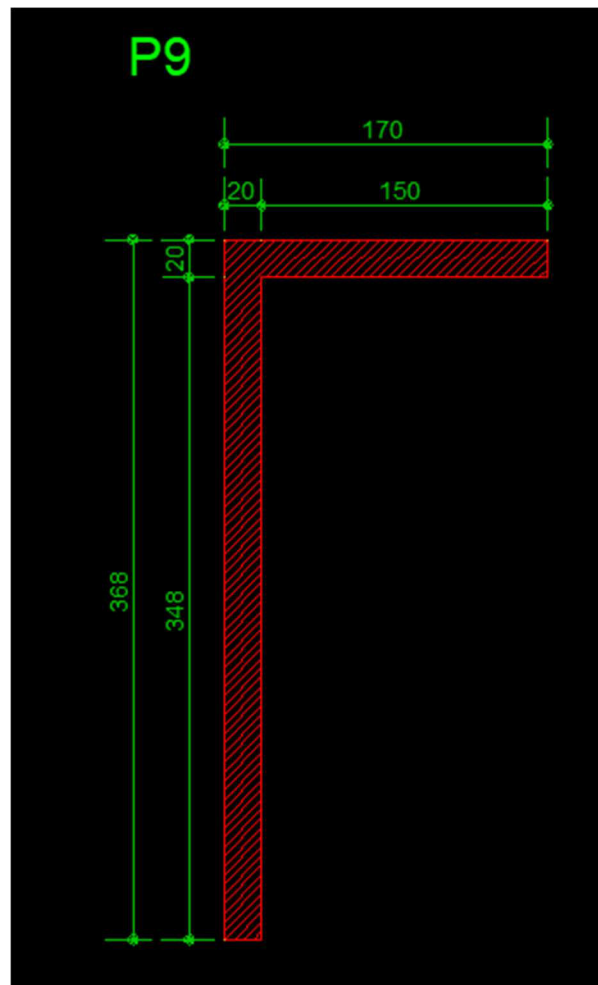
Figura 18 - Pilar-parede P9.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme mencionado anteriormente, o elemento estrutural selecionado para análise corresponde a um pilar-parede com geometria em “L”. Na figura 19, são indicadas as dimensões exatas desse componente, permitindo a caracterização completa de sua configuração geométrica.

Figura 19 - Geometria do pilar-parede P9.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros de projeto adotados para a modelagem estrutural foram previamente definidos de modo a representar, de forma coerente, as condições reais da edificação analisada. O pé-direito dos pavimentos foi considerado igual a 3,24 metros. A estrutura foi concebida em concreto armado, adotando-se para o material um concreto com resistência característica à compressão $f_{ck} = 35 \text{ Mpa}$.

Quanto às condições de exposição, a edificação foi enquadrada na Classe de Agressividade Ambiental II, conforme estabelecido na Tabela 6.1 da NBR 6118:2023, a qual pode ser observada na Figura 20. Em função dessa classificação, os cobrimentos nominais das armaduras foram definidos de acordo com os valores mínimos prescritos na Tabela 7.2 da NBR 6118:2023, apresentados na Figura 21, garantindo o atendimento aos requisitos de durabilidade e proteção das armaduras contra agentes agressivos.

Figura 20 - Classe de agressividade ambiental.

Tabela 6.1 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fracá	Rural	Insignificante
		Submerso	
II	Moderada	Urbano ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinho ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: NBR 6118:2023

Figura 21 - Relação entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento.

Tabela 7.2 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c = 10$ mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga ^b /pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

Fonte: NBR 6118:2023

Por fim, foram definidos os parâmetros associados à ação do vento incidente sobre a edificação, os quais se encontram ilustrados na Figura 22. Tais parâmetros compreendem a velocidade básica, o fator de terreno (S1), a categoria de rugosidade e a classe da edificação (S2), bem como o fator estatístico (S3) e os coeficientes de arrasto (C.A), empregados na determinação das ações de vento consideradas na análise estrutural.

Figura 22 - Parâmetros para carga de vento.

V0 - Velocidade básica	30	m/s
S1 - Fator do terreno	1.00	
S2 - Categoria de rugosidade	III	
S2 - Classe da edificação	C	
S3 - Fator estatístico	1.00	

	Ângulo	C.A.	Def Cot	Cot ini
1	90	1.28	Não	0
2	270	1.28	Não	0
3	0	1.13	Não	0
4	180	1.13	Não	0

Fonte: TQS.

Adicionalmente, destaca-se que a estrutura em estudo foi modelada por meio do Modelo VI, o qual corresponde a um modelo de vigas, pilares e lajes, flexibilizados conforme os critérios de modelagem. Nesse tipo de representação, o conjunto estrutural é avaliado como um pórtico espacial único, permitindo a consideração integrada dos efeitos globais.

Segundo informações disponibilizadas pela própria TQS, esse modelo apresenta as seguintes características:

No Modelo VI, as grelhas não existem mais. As malhas de barras das lajes estão inseridas no próprio modelo espacial. Dessa forma, uma vez aplicadas as ações no pórtico, todo o conjunto formado pelas vigas, pilares e lajes se deforma de uma maneira totalmente compatível, distribuindo as solicitações entre os elementos de acordo com o equilíbrio espacial de toda a estrutura.

Ademais, no site da TQS também é afirmado que:

O modelo é mais consistente, pois há total compatibilidade de deformações e equilíbrio de esforços entre todos os elementos que compõem a estrutura. Não é mais necessária transferência de cargas entre os modelos dos pavimentos e o modelo global. Toda a análise estrutural fica restrita a um único modelo, tornando mais simples a verificação dos resultados. Enfim, o Modelo VI traz mais consistência e simplicidade à análise estrutural, uma vez que toda a estrutura é analisada em conjunto, tanto para ações verticais quanto horizontais, sem a necessidade da separação do modelo global do edifício do modelo dos pavimentos. Tudo fica restrito ao estudo de um único pórtico espacial.

3.3 Configurações de detalhamento

Para a condução deste trabalho, foram estabelecidos dois distintos procedimentos de detalhamento do pilar-parede selecionado. Cada uma dessas alternativas são apresentadas e descritas em detalhe nas subseções seguintes.

3.3.1 Alternativa 1

Na alternativa de detalhamento 1, o pilar-parede é analisado considerando-se os efeitos globais, locais e localizados de segunda ordem, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 6118:2023. Nesse detalhamento, a distribuição das armaduras longitudinais é realizada de maneira uniforme ao longo da seção transversal, adotando-se um arranjo convencional, análogo ao de um pilar usual. Dessa forma, as barras longitudinais são dispostas de forma regular, independentemente das particularidades de cada faixa do pilar-parede, permitindo que a análise se concentre nos efeitos estruturais decorrentes da consideração dos efeitos de segunda ordem localizados, isolando-os da influência de distribuições diferenciadas de armadura.

3.3.2 Alternativa 2

Na alternativa de detalhamento 2, o pilar-parede também é analisado considerando-se os globais, locais e efeitos localizados de segunda ordem, em conformidade com os critérios estabelecidos pela NBR 6118:2023. Diferentemente da anterior, a distribuição das armaduras longitudinais não é realizada de forma uniforme ao longo da seção transversal.

Nesse procedimento, a disposição das barras longitudinais é definida de maneira diferenciada para cada faixa do pilar-parede, em função das solicitações atuantes em cada região do elemento. Assim, a quantidade e a posição das armaduras são ajustadas de acordo com os esforços específicos de cada faixa. Essa abordagem possibilita uma avaliação mais realista da influência dos efeitos localizados de segunda ordem, uma vez que a distribuição da armadura passa a refletir diretamente a variação das solicitações ao longo da lâmina, evidenciando as regiões mais solicitadas e os trechos críticos do elemento estrutural.

3.4 Análise da armadura transversal do pilar-parede

A análise da armadura transversal do pilar-parede é feita conforme a recomendação da NBR 6118:2023. O item 18.5 da norma estabelece que, quando o elemento estrutural for avaliado e dimensionado como uma placa em regime de flexão, a armadura transversal deve obedecer aos valores mínimos previstos para placas, em consonância com o comportamento bidimensional assumido na análise. Caso essa abordagem não seja empregada, a norma define um critério substitutivo, determinando que a armadura transversal mínima, por metro de face, deve corresponder a no mínimo 25% da armadura longitudinal, calculada por metro da maior face da lâmina.

No software TQS a verificação dos estribos de um pilar-parede pode ser feita pelo seguinte comando:

Figura 23 - Verificação dos estribos.



Fonte: TQS.

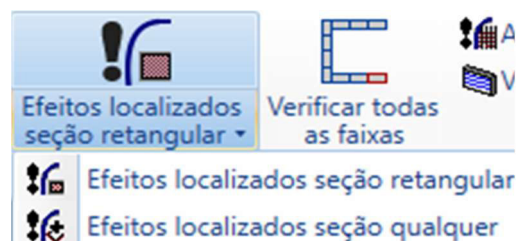
3.5 Análise comparativa das alternativas de detalhamento do pilar-parede

Para a realização da análise comparativa, será utilizado o software TQS, com o objetivo de verificar as diferenças na capacidade resistente de cada faixa do pilar-parede, as quais foram definidas a partir da fórmula apresentada na equação 2.12. Essa avaliação permite identificar como as distintas hipóteses de detalhamento e distribuição de armaduras influenciam o comportamento resistente do elemento estrutural.

A primeira análise é realizada com o auxílio do comando “Efeitos localizados de uma seção retangular”, disponibilizado pelo programa, o qual possibilita a consideração explícita dos efeitos de segunda ordem localizados em cada faixa analisada. Dessa forma, torna-se viável a comparação direta da capacidade resistente entre as diferentes regiões do pilar-parede, contribuindo para uma avaliação mais precisa e fundamentada do desempenho estrutural do elemento sob as ações solicitantes.

É importante salientar que, nesta primeira etapa de análise, as barras que compõem o modelo do pilar-parede são avaliadas de forma individualizada, não sendo considerada a interligação entre elas. Dessa forma, cada barra é analisada de maneira independente, permitindo a avaliação isolada de seu comportamento estrutural, sem a consideração dos efeitos de redistribuição de esforços decorrentes da interação entre as faixas adjacentes.

Figura 24 - Comando para a análise dos efeitos localizados de segunda ordem.



Fonte: TQS.

Além da análise individual dos efeitos localizados de cada faixa do pilar-parede, também será realizada uma análise em malha conforme exemplo mostrado no item 2.4 deste trabalho no estudo feito por KIMURA E FRANÇA (2006), sendo também comparada a capacidade resistente de cada faixa do pilar-parede. Segundo o site da TQS, nessa forma de modelagem, cada faixa é representada por um conjunto de elementos verticais contínuos, conectados entre si por barras transversais que asseguram a interação entre os alinhamentos. Dessa maneira, a faixa deixa de ser tratada como um elemento independente, passando a integrar um sistema acoplado.

Os efeitos de segunda ordem, tanto de natureza local quanto localizada, são determinados por meio do Método Geral. Conforme informações disponibilizadas pela TQS, esse tipo de modelagem proporciona uma avaliação mais detalhada e representativa dos esforços atuantes no pilar-parede, abrangendo tanto as ações axiais quanto as transversais. Como consequência, o método permite uma maior precisão no processo de dimensionamento, favorecendo a otimização das armaduras longitudinais e transversais necessárias ao atendimento dos requisitos de resistência e estabilidade do elemento.

Nesse modelo de análise, o software incorpora de forma conjunta e aprimorada tanto a não linearidade física quanto a não linearidade geométrica. A rigidez equivalente de cada faixa é determinada a partir dos diagramas $N-M-1/r$, enquanto a configuração deformada final das barras é obtida por meio de um processo iterativo.

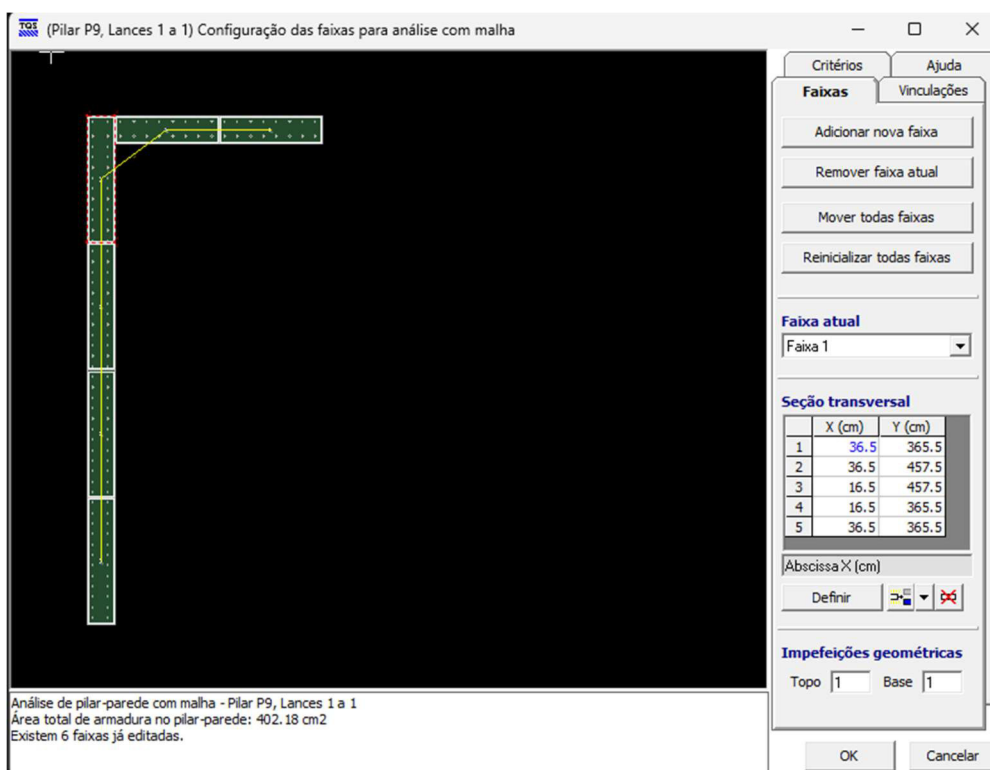
No software TQS a análise por malha pode ser feita pelo seguinte comando:

Figura 25 - Comando para análise com malha do pilar-parede.



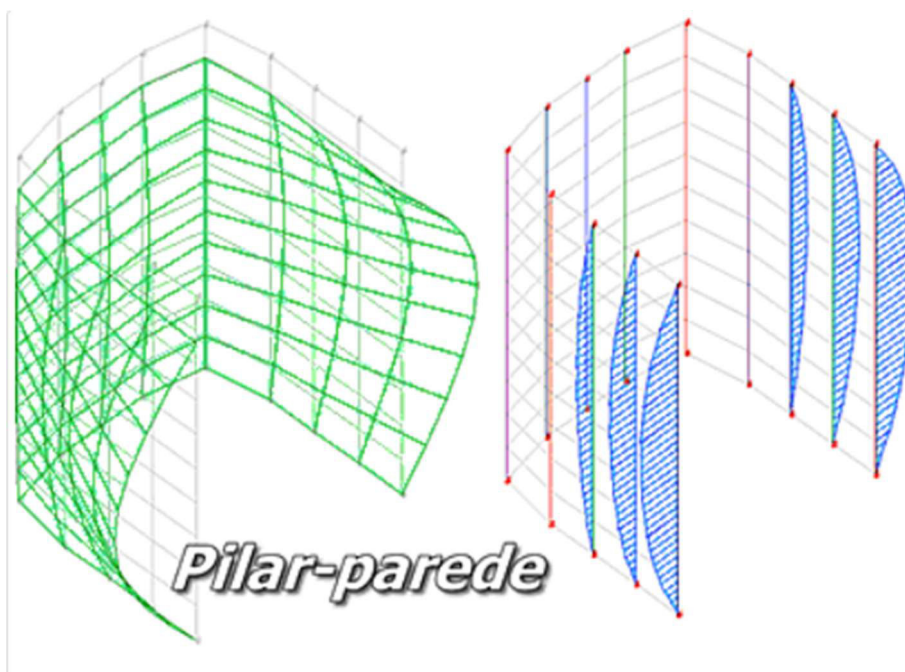
Fonte: TQS.

Figura 26 - Aba de análise por malha.



Fonte: TQS.

Figura 27 - Exemplo de modelagem em malha de um pilar-parede.



Fonte: TQS Docs.

Por fim, será realizada uma análise comparativa do consumo de materiais do pilar-parede entre os dois detalhamentos propostos. Essa etapa tem como finalidade avaliar o impacto das diferentes estratégias de distribuição das armaduras longitudinais no volume total de aço empregado. A partir da análise do consumo de aço obtidos para cada detalhamento, será possível comparar a eficiência estrutural e econômica das alternativas estudadas, fornecendo subsídios para a escolha do método que apresente melhor equilíbrio entre desempenho resistente, racionalidade construtiva e viabilidade econômica.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados das diferentes configurações de detalhamento do pilar-parede

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das diferentes configurações de detalhamento adotadas ao longo do estudo. Inicialmente, ressalta-se que a análise será do lance mais solicitado do pilar-parede, uma vez que este representa a situação mais crítica do ponto de vista estrutural e, portanto, demanda uma avaliação mais criteriosa e refinada. Todavia, serão apresentados os valores correspondentes às armaduras longitudinais e transversais dos lances remanescentes do pilar-parede, de forma a permitir uma visão global do comportamento do elemento ao longo de sua altura. Ademais, ao final do trabalho, será possível verificar os desenhos completos dos respectivos detalhamentos, os quais sintetizam as soluções adotadas.

O lance selecionado corresponde ao primeiro lance do pilar, no qual se concentram os maiores esforços atuantes, resultantes das combinações de ações consideradas na modelagem estrutural. Em função de sua relevância, os resultados apresentados nesta seção referem-se exclusivamente a esse trecho, permitindo uma comparação mais precisa entre os diferentes detalhamentos analisados.

Cabe destacar que os efeitos localizados de segunda ordem não puderam ser desprezados no dimensionamento do pilar-parede em análise, uma vez que ambas as lâminas apresentam índices de esbeltez superiores a 35. Essa condição evidencia a necessidade de consideração desses efeitos, conforme os critérios da NBR 6118:2023.

Figura 28 - Índice de esbeltez de cada lâmina.

Lâmina	λ	l_e (cm)
1	38	219
2	50	286.9

Fonte: TQS

Todos os valores dos esforços solicitantes apresentados neste trabalho foram extraídos diretamente do software TQS, a partir da modelagem estrutural adotada. Ressalta-se que tais esforços encontram-se expressos na unidade de medida tf (tonelada-força), a qual é usualmente empregada por engenheiros calculistas em análises e dimensionamentos estruturais.

Os valores dos esforços solicitantes associados a esse lance estão apresentados na Tabela 1, a seguir, e constituem a base para as análises comparativas desenvolvidas ao longo deste capítulo, servindo de referência para a avaliação do comportamento estrutural e para a verificação da influência dos diferentes detalhamentos adotados.

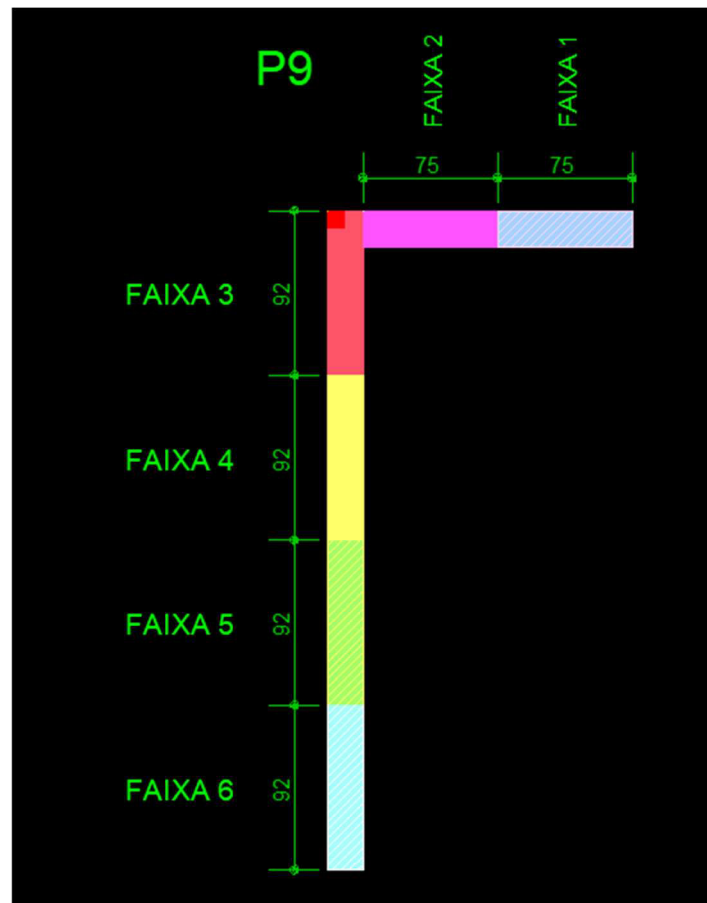
Tabela 1 - Esforços no 1º lance do pilar-parede.

Esforços	
Nd (tf)	1009,28
Mx (tf.m)	-66,63
My (tf.m)	1301,34

Fonte: Elaborado pelo autor.

O pilar-parede foi subdividido em faixas com o objetivo de possibilitar a análise dos efeitos localizados de segunda ordem, conforme ilustrado na Figura 29. Nessa figura, são apresentadas de forma detalhada as dimensões e a nomenclatura adotada para cada faixa, as quais servem de base para a avaliação individualizada dos esforços solicitantes e para o posterior dimensionamento das armaduras correspondentes a cada região do elemento estrutural.

Figura 29 - Nomenclatura e dimensão de cada faixa do pilar-parede.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1 Alternativa 1 – Detalhamento do pilar-parede

Conforme mencionado no capítulo anterior, a alternativa de detalhamento 1 adota a distribuição das armaduras longitudinais de forma uniforme ao longo de toda a seção transversal do pilar-parede. Esse arranjo segue um critério convencional, análogo ao utilizado no dimensionamento de pilares usuais, no qual as barras longitudinais são dispostas de maneira regular, sem diferenciação entre as diversas faixas que compõem o elemento estrutural.

A partir do dimensionamento realizado, verificou-se a necessidade de 128 barras longitudinais com diâmetro de 20 mm, resultando em uma área total de aço de 402,12 cm². Tal valor corresponde a uma taxa de armadura de aproximadamente 3,88%, situando-se muito próxima do limite máximo de 4% da área da seção, conforme prescrito pela NBR 6118:2023.

Além disso, a partir da determinação da armadura longitudinal, tornou-se possível definir os parâmetros relativos à armadura transversal do pilar-parede. Conforme discutido anteriormente, o item 18.5 da NBR 6118:2023 estabelece que, quando o elemento não é analisado como uma placa submetida à flexão, a armadura transversal mínima por metro de face deve corresponder, no mínimo, a 25% da armadura longitudinal por metro da maior face da lâmina. Com base nesse critério normativo, foi adotado um estribo com diâmetro de 10 mm a cada 7 cm, resultando em uma área de aço para a armadura transversal de 11,21 cm²/m.

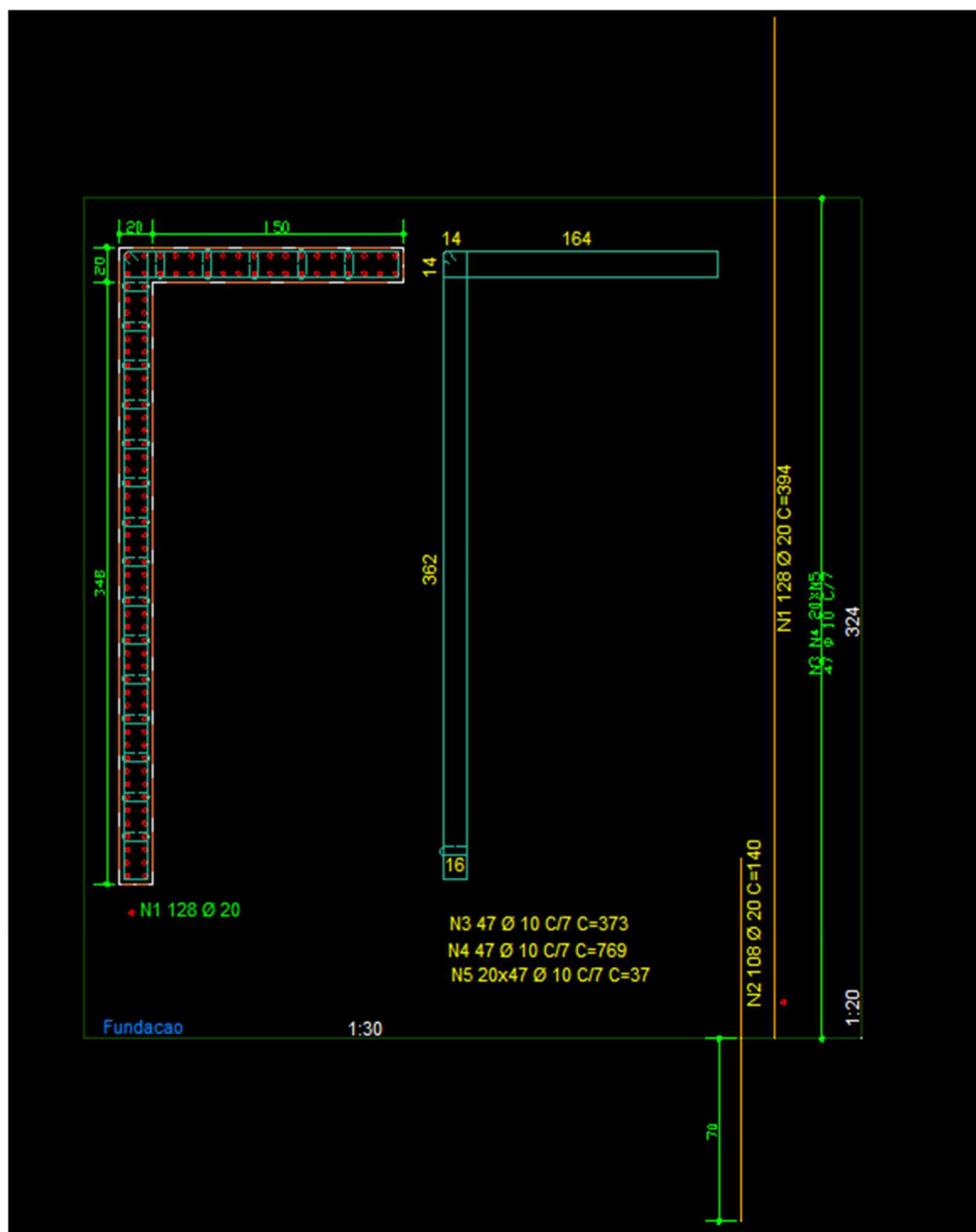
Os grampos foram dimensionados com a mesma bitola da armadura do estribo e posicionados respeitando o espaçamento máximo de $20 \phi_t$, equivalente a 20 cm. Dessa forma, adotou-se um arranjo no qual foi previsto, em média, um grampo para cada duas barras longitudinais.

O detalhamento correspondente a essa alternativa pode ser visualizado na figura 30, na qual se observa o arranjo completo das armaduras uniformemente distribuídas no primeiro lance do pilar-parede, evidenciando a aplicação prática dos critérios adotados nesta etapa da análise.

Em relação aos demais pavimentos, a tabela 2 apresenta os resultados obtidos para as armaduras longitudinais e transversais do pilar-parede analisado ao longo de seus diferentes lances. A partir da análise desses dados, observa-se que, desde o lance 7, passa a ser adotada a armadura longitudinal mínima, composta por 72 barras com bitola de 10 mm, a qual se mantém constante até o último lance do pilar-parede.

Esse comportamento indica uma redução progressiva das solicitações estruturais ao longo da altura do elemento, permitindo a adoção de uma solução de armadura mínima nos lances superiores, sem prejuízo ao atendimento dos critérios normativos de resistência e segurança estrutural.

Figura 30 - Alternativa 1 do detalhamento do pilar-parede.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Detalhamento do pilar-parede P9 – Alternativa 1.

Lance	Num. de ferros	ϕ - Bitola (mm)	As long. (cm ²)	Taxa de aço (%)	As transv. (cm ² /m)	Estribo
1	128	20	402,12	3,88	11,22	10 c/7
2	128	16	257,36	2,48	7,14	10 c/11
3	128	16	257,36	2,48	7,14	10 c/11
4	86	16	172,91	1,67	4,57	8 c/11
5	72	16	144,76	1,40	3,59	8 c/14
6	72	12,5	88,36	0,85	2,51	8 c/20
7	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
8	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
9	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
10	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
11	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
12	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
13	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
14	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
15	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
16	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
17	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
18	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
19	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
20	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
21	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
22	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
23	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
24	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
25	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
26	72	10	56,55	0,55	1,64	5 c/12

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Alternativa 2 – Detalhamento do pilar-parede

Conforme mencionado no capítulo anterior, na alternativa de detalhamento 2, o pilar-parede é tratado de forma distinta em relação à alternativa precedente, uma vez que a distribuição das armaduras longitudinais não é realizada de maneira uniforme ao longo da seção transversal. Nesse método, abandona-se o critério convencional de armadura regular, adotando-se uma abordagem que considera de forma mais precisa o comportamento estrutural do elemento. Nesse procedimento, a disposição das barras longitudinais é definida de maneira diferenciada para cada faixa do pilar-parede, levando em conta as solicitações específicas atuantes em cada região do elemento estrutural.

A partir dessa análise, verificou-se que a lâmina 1 apresenta solicitações inferiores quando comparada à lâmina 2, o que possibilitou a redução da bitola das barras longitudinais de 20 mm para 16 mm nessa região, sem prejuízo ao atendimento dos critérios normativos de resistência. Ao analisar cada faixa isoladamente, observou-se que, na lâmina 1, a faixa mais solicitada corresponde à faixa 1, na qual se fez necessária uma maior concentração de armaduras, sendo adotadas 14 barras com diâmetro de 16 mm. Por outro lado, na lâmina 2, a faixa 8 apresentou as maiores solicitações, demandando uma solução mais robusta, com a adoção de 24 barras com diâmetro de 20 mm.

Em função dessas definições, a armadura longitudinal total do pilar-parede passou a ser composta por 22 barras de 16 mm + 58 barras de 20 mm, resultando em uma área total de aço de 226,45 cm² e em uma taxa de armadura de aproximadamente 2,19%. Esse valor evidencia uma redução significativa no consumo de aço quando comparado à alternativa de detalhamento uniforme, mantendo, contudo, o atendimento às exigências normativas.

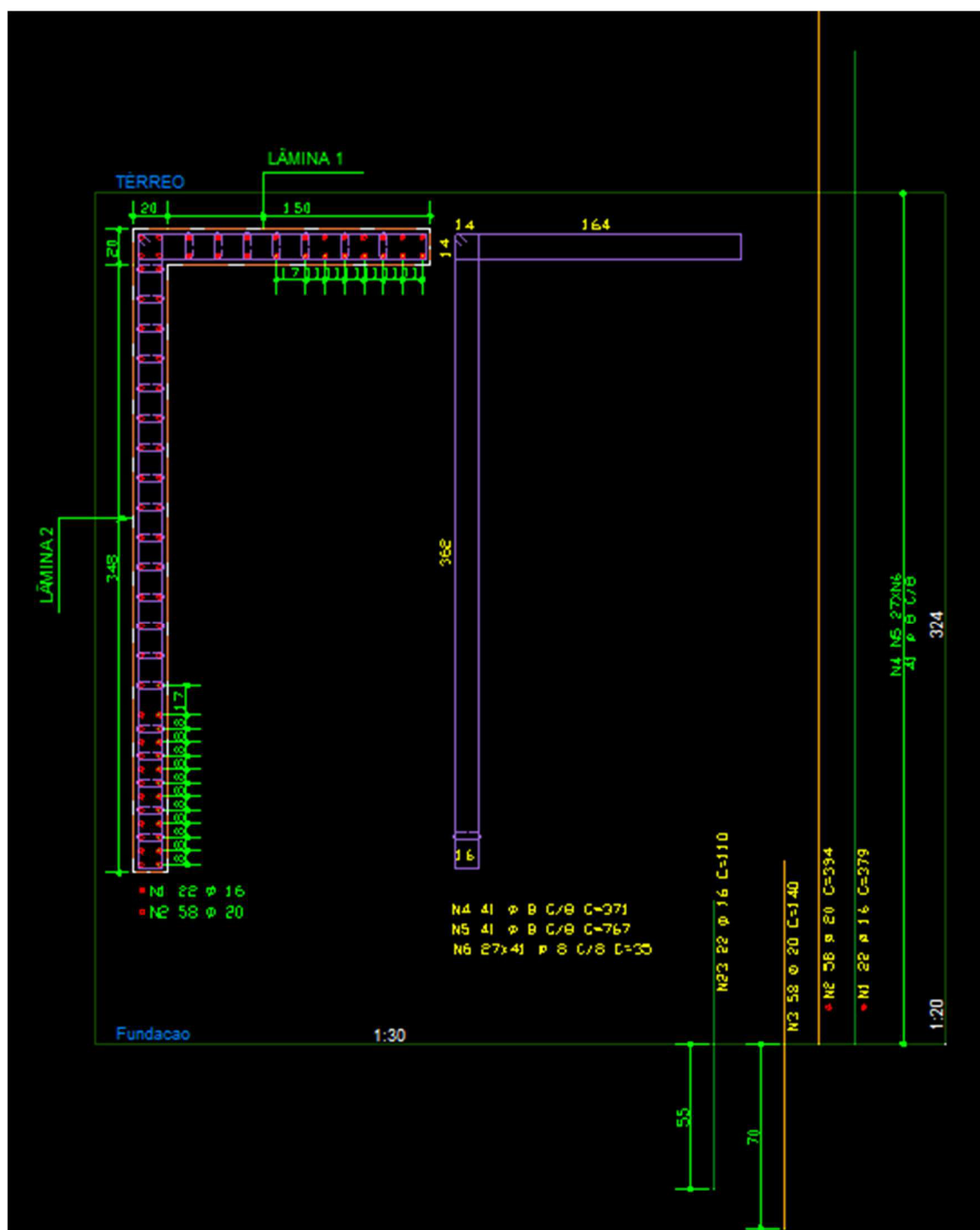
No que se refere à armadura transversal, e em conformidade com os critérios estabelecidos pela NBR 6118:2023, foi adotado um estribo com diâmetro de 8 mm, disposto a cada 8 cm. Os grampos foram dimensionados com a mesma bitola e o mesmo espaçamento dos estribos, respeitando o limite máximo de $20\phi_t$ indicado pela norma.

O detalhamento correspondente a essa alternativa pode ser visualizado na Figura 31, na qual se observa a distribuição não uniforme das armaduras longitudinais ao longo da seção do pilar-parede. Nessa representação, evidencia-se que a disposição das barras foi definida de acordo com a solicitação específica de cada faixa, resultando em um arranjo mais racional e compatível com o comportamento estrutural do elemento.

No que se refere aos demais pavimentos, a Tabela 3 reúne os resultados relativos às armaduras longitudinais e transversais do pilar-parede ao longo de seus diferentes lances. A análise desses dados indica que, a partir do lance 7, passa a ser adotada a armadura longitudinal mínima, constituída por 72 barras de diâmetro 10 mm, configuração que se mantém inalterada até o último lance do pilar-parede.

Ademais, cabe destacar que, para esse modo de detalhamento, a diferenciação de bitolas e a distribuição não uniforme das armaduras longitudinais mostraram-se necessárias apenas até o lance 6 do pilar-parede. A partir desse lance, tornou-se possível adotar uma distribuição uniforme das armaduras, uma vez que os efeitos localizados passaram a ser adequadamente resistidos sem a necessidade de um detalhamento diferenciado.

Figura 31 - Alternativa 2 do detalhamento do pilar-parede.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Detalhamento do pilar-parede P9 – Alternativa 2.

Lance	Num. de ferros + ϕ (mm)	As long. (cm ²)	Taxa de aço (%)	As transv. (cm ² /m)	Estribo
1	58 ϕ 20 + 22 ϕ 16	226,45	2,19	6,28	8 c/8
2	54 ϕ 20 + 22 ϕ 16	213,88	2,06	6,28	8 c/8
3	54 ϕ 16 + 22 ϕ 12,5	135,57	1,31	3,87	8 c/13
4	54 ϕ 16 + 22 ϕ 12,5	135,57	1,31	3,87	8 c/13
5	52 ϕ 16 + 20 ϕ 12,5	129,10	1,25	3,87	8 c/13
6	72 ϕ 12,5	88,36	0,85	2,51	8 c/20
7	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
8	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
9	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
10	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
11	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
12	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
13	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
14	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
15	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
16	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
17	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
18	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
19	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
20	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
21	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
22	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
23	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
24	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
25	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12
26	72 ϕ 10	56,55	0,55	1,64	5 c/12

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Análises comparativas dos detalhamentos

Inicialmente, procedeu-se à análise da capacidade resistente de cada faixa do pilar-parede no primeiro lance, o qual representa a condição crítica do elemento, por se tratar do trecho mais solicitado. Para ambos os detalhamentos adotados, as análises dos efeitos localizados foram realizadas de forma individualizada para cada faixa, sem a consideração da interligação entre elas, permitindo uma avaliação isolada do comportamento resistente de cada região.

Foram considerados 20 casos de carregamentos, os quais incluem combinações envolvendo as cargas permanentes, acidentais e vento, para a análise de cada faixa do pilar-

parede. Entretanto, para os fins da análise apresentada neste trabalho, foram selecionados apenas os casos críticos de cada faixa, isto é, aqueles que resultaram nas maiores solicitações estruturais, por serem os mais representativos para a avaliação da capacidade resistente do elemento. Na Tabela 4, são apresentados os valores referentes à capacidade resistente de cada faixa para os dois detalhamentos analisados, bem como a comparação percentual entre os resultados, possibilitando uma análise quantitativa das diferenças observadas entre as soluções adotadas.

Tabela 4 - Verificação por faixas independentes da capacidade resistente.

Faixa	Alternativa 1 (Sd/Rd)	Alternativa 2 (Sd/Rd)	Percentual (%)
1	0,71	0,85	-19,72
2	0,70	0,94	-34,29
3	0,59	0,69	-16,95
4	0,52	0,69	-32,69
5	0,68	0,86	-26,47
6	0,97	0,97	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, verifica-se que ambos os detalhamentos analisados, alternativa 1 e 2, mostraram-se satisfatórios quanto à manutenção da capacidade resistente requerida para o pilar-parede em estudo, atendendo aos critérios normativos de segurança estrutural.

A partir da comparação entre os valores de Sd/Rd obtidos para os dois detalhamentos, observa-se que a alternativa 2 apresenta, de modo geral, valores superiores aos da alternativa 1 para a maioria das faixas analisadas, indicando uma redução da margem resistente, porém ainda dentro de níveis admissíveis. As diferenças percentuais variam entre aproximadamente 17% e 35% nas faixas de 1 a 5, enquanto a faixa 6 apresenta comportamento idêntico em ambos os detalhamentos. Esse resultado está diretamente associado à redução e redistribuição das armaduras longitudinais no detalhamento 2, realizadas de forma compatível com as solicitações específicas de cada faixa. Ainda assim, os valores obtidos permanecem inferiores à unidade, confirmando que o detalhamento diferenciado mantém a segurança estrutural do pilar-parede, ao mesmo tempo em que promove um uso mais racional do material.

Após a execução da análise anterior, procedeu-se à verificação da capacidade resistente do pilar-parede para cada um dos detalhamentos por meio de uma análise por malha. Conforme discutido anteriormente, nesse tipo de abordagem cada faixa deixa de ser tratada como um elemento independente e passa a integrar um sistema estrutural acoplado, no qual as

faixas encontram-se interligadas entre si. Dessa forma, os efeitos localizados passam a ser avaliados sob uma perspectiva distinta daquela adotada na análise individualizada, uma vez que se considera a possibilidade de redistribuição e propagação dos esforços para as faixas adjacentes.

A Tabela 5 reúne os valores correspondentes à capacidade resistente de cada faixa para ambos os detalhamentos avaliados, além de apresentar a comparação percentual entre os resultados obtidos, permitindo uma análise quantitativa e comparativa do desempenho estrutural das soluções adotadas.

Tabela 5 - Verificação por malha da capacidade resistente de cada faixa.

Faixa	Alternativa 1 (Sd/Rd)	Alternativa 2 (Sd/Rd)	Percentual (%)
1	0,71	0,85	-19,72
2	0,76	0,98	-28,95
3	0,60	0,71	-18,33
4	0,54	0,72	-33,33
5	0,67	0,91	-35,82
6	0,96	0,96	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise por malha, na qual as faixas do pilar-parede passam a atuar de forma interligada, observa-se que a alternativa 2 apresenta, de modo geral, valores mais elevados da razão Sd/Rd quando comparado ao detalhamento 1, indicando uma redução da margem de segurança resistente em praticamente todas as faixas analisadas. As diferenças percentuais variam entre aproximadamente 18% e 36% para as faixas de 1 a 5, enquanto a faixa 6 mantém valores idênticos em ambos os detalhamentos. Esse comportamento está associado à redistribuição das solicitações entre as faixas, característica da análise por malha, aliada à redução e distribuição não uniforme das armaduras longitudinais adotadas na alternativa 2. Ainda assim, os valores de Sd/Rd permanecem inferiores à unidade, confirmando que, mesmo com a interação entre as faixas, o pilar-parede apresenta capacidade resistente adequada, evidenciando que o detalhamento diferenciado continua estruturalmente satisfatório e eficiente sob uma análise mais realista do comportamento do elemento.

Ao se comparar os resultados obtidos nas duas abordagens de análise adotadas, observa-se uma diferença consistente no comportamento resistente do pilar-parede. Na análise individual, em que cada faixa é avaliada de forma independente da outra, as diferenças percentuais entre os detalhamentos mostraram-se mais moderadas, refletindo exclusivamente a influência direta da redução e redistribuição das armaduras longitudinais no detalhamento 2.

Por outro lado, na análise por malha, em que as faixas passam a atuar de forma interligada, verifica-se um aumento das diferenças percentuais de S_d/R_d , especialmente nas faixas mais solicitadas, evidenciando a redistribuição dos esforços entre regiões adjacentes e a maior sensibilidade do modelo à interação estrutural entre as faixas. Ainda assim, em ambas as análises, os valores de S_d/R_d permaneceram inferiores à unidade, confirmando que os dois detalhamentos atendem aos critérios de segurança estrutural. Esses resultados indicam que a alternativa 2 mantém desempenho satisfatório, aliando segurança estrutural a uma redução significativa no consumo de armadura, quando comparado ao detalhamento convencional, no caso a alternativa 1.

Por fim, a análise comparativa entre os dois detalhamentos evidencia uma redução significativa da taxa de armadura no primeiro lance do pilar-parede, que corresponde ao trecho mais crítico do elemento. Observa-se que, para o detalhamento com armadura uniformemente distribuída, obteve-se uma taxa de aço de 3,88%, enquanto, para o detalhamento com distribuição não uniforme das armaduras longitudinais, a taxa foi reduzida para 2,19%. Essa diferença representa uma redução percentual de aproximadamente 43,6% na taxa de armadura do primeiro lance analisado.

Tal redução está diretamente associada à adoção da distribuição não uniforme das armaduras, a qual possibilitou o posicionamento das barras longitudinais de acordo com a solicitação específica de cada faixa do pilar-parede. Dessa forma, foi possível obter um aproveitamento mais eficiente da armadura longitudinal, evitando concentrações excessivas de aço em regiões menos solicitadas e promovendo uma solução estrutural mais racional.

Em uma análise de caráter global do pilar-parede, verifica-se, a partir das tabelas de aço extraídas pelo software TQS, que o detalhamento correspondente à alternativa 1 resulta em um consumo total de 9.304 kgf de aço CA-50 e 1.716 kgf de aço CA-60 para a execução de todo o elemento. Por sua vez, o detalhamento referente à alternativa 2 apresenta um consumo de 7.587 kgf de aço CA-50, mantendo-se inalterado o consumo de 1.716 kgf de aço CA-60.

Com base nesses valores, constata-se uma redução absoluta de 1.717 kgf de aço CA-50 ao se adotar o detalhamento da alternativa 2, o que corresponde a uma redução percentual de aproximadamente 18,5% no consumo desse tipo de aço para o pilar-parede como um todo, evidenciando a eficiência do detalhamento com distribuição não uniforme das armaduras.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa do dimensionamento de pilares-parede para diferentes configurações de detalhamento, com base nos critérios estabelecidos pela NBR 6118:2023 e no emprego de ferramentas computacionais, em especial o software TQS. A partir da revisão bibliográfica, da modelagem estrutural adotada e das análises desenvolvidas, foi possível atingir plenamente os objetivos propostos, bem como extrair conclusões relevantes para a prática profissional.

Os resultados obtidos demonstraram que ambas as alternativas de detalhamento analisadas, distribuição uniforme das armaduras longitudinais (alternativa 1) e distribuição não uniforme das armaduras longitudinais (alternativa 2), apresentaram desempenho estrutural satisfatório, mantendo a capacidade resistente requerida do pilar-parede em todas as verificações realizadas. Em todas as análises, tanto na avaliação por faixas independentes quanto na análise por malha, os valores da razão S_d/R_d permaneceram inferiores à unidade, confirmando o atendimento aos critérios normativos de segurança estrutural.

A alternativa de detalhamento 1, baseada em um arranjo convencional com armaduras uniformemente distribuídas, mostrou-se eficaz do ponto de vista resistente, porém resultou em taxas de armadura elevadas, especialmente no primeiro lance do pilar-parede, aproximando-se do limite máximo permitido pela norma.

Por sua vez, a alternativa de detalhamento 2 evidenciou as vantagens de uma análise mais refinada, permitindo que a distribuição das armaduras longitudinais fosse realizada de acordo com as solicitações específicas de cada faixa do pilar-parede. Essa abordagem possibilitou uma redução significativa no consumo de armadura, sem prejuízo à segurança estrutural. Destaca-se, em especial, a redução de aproximadamente 43,6% na taxa de armadura no primeiro lance do pilar-parede e de cerca de 18,5% no consumo global de aço CA-50, resultados que comprovam a maior eficiência estrutural e econômica do detalhamento não uniforme.

A comparação entre a análise individual das faixas e a análise por malha reforçou a importância de considerar a interação entre as lâminas do pilar-parede. Embora a análise por malha tenha apresentado valores de S_d/R_d ligeiramente superiores, refletindo uma redução da margem resistente, os resultados permaneceram plenamente aceitáveis.

Dessa forma, conclui-se que a alternativa de detalhamento 2 se mostrou tecnicamente adequada e mais racional, ao aliar segurança estrutural, redução no consumo de materiais e melhor aproveitamento das armaduras longitudinais. Esse resultado evidencia que a adoção de estratégias de detalhamento baseadas na análise das solicitações locais pode trazer ganhos expressivos tanto do ponto de vista estrutural quanto econômico.

Por fim, destaca-se a relevância deste estudo para a prática profissional dos engenheiros calculistas, uma vez que fornece embasamento técnico consistente para a tomada de decisões relacionadas ao dimensionamento e ao detalhamento de pilares-parede, contribuindo para a adoção de soluções mais eficientes, seguras e alinhadas ao comportamento estrutural real desses elementos, além de favorecer a racionalização do uso de materiais nos projetos estruturais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ACI. **ACI 318 - Building Code Requirements for Structural Concrete**. [S.l.]: [s.n.], 2014.

ARAÚJO, J.M.; **Curso de Concreto Armado**. Volume 3. 4.ed. Rio Grande: Dunas, 2014.

ARAÚJO, J. M. D. Análise do processo aproximado da NBR 6118 para consideração dos efeitos localizados de segunda ordem. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio de Janeiro, n. 10, p. 1-10, Julho 2007.

Brasil tem dez milhões de apartamentos e passa por verticalização, diz IBGE. **JORNAL DO VALE**, 15 de setembro de 2021. Disponível em: <https://www.jdv.com.br/brasil-tem-dez-milhoes-de-apartamentos-e-passa-por-verticalizacao-diz-ibge/> . Acesso em: 13 de novembro de 2025.

Calcular Efeitos de 2ª Ordem em Pilar Parede com Malha. **TQS DOCS**. Disponível em: <https://docs.tqs.com.br/Docs/Details?id=3547&language=pt-BR>. Acesso em: 06, dezembro de 2025.

IBRACON. **Comentários Técnicos e Exemplos de Aplicação NB-1**. Comitê Técnico Concreto Estrutural. São Paulo. 2015.

KIMURA, A.E; **Cálculo de Pilares de Concreto Armado**. Apostila do curso ministrado na ABECE.

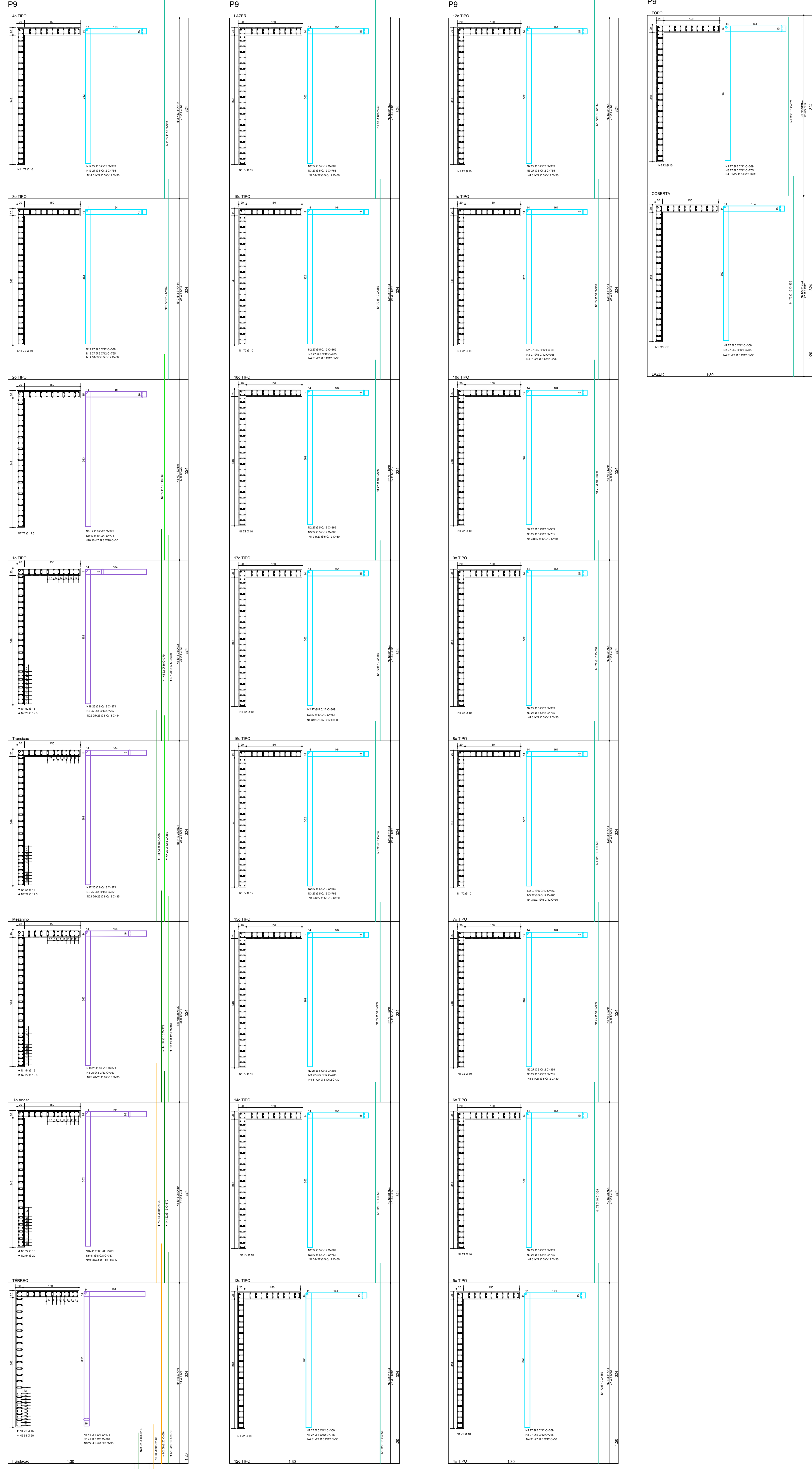
KIMURA, A. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado**. São Paulo: PINI, 2007.

KIMURA, A. E.; FRANÇA, R. L. S. **Resultados de recentes pesquisas para o dimensionamento das armaduras longitudinal e transversal em pilares-parede**. ENECE. 2006.

Modelo VI. **CAD/TQS 16**. Disponível em: <https://www.tqs.com.br/v16/destaques/modelo-vi-projeto-estrutural.html>. Acesso em: 06, dezembro de 2025.

WIGHT, J. K. **Reinforced Concrete - Mechanics and Design**. 7ª. ed. New Jersey: Pearson, 2016.

**ANEXO A – PRANCHA COM AS 2 ALTERNATIVAS DE DETALHAMENTO DO
PILAR-PAREDE**



RESUMO DE AÇO			
AÇO	BIT	COMPR	PESO
	mm	m	kgf
60A	5	22291	3433
50A	8	4873	1925
50A	10	12286	7588
50A	12,5	768	739
50A	16	2366	3734
50A	20	1178	2905
Peso Total	60A =		3433 kgf
Peso Total	50A =		16891 kgf

06				
05				
04				
03				
02				
01				
00				
REV.		DISCRIMINAÇÃO		DESENHO DATA
CLIENTE				
OPERA				
ASSIGNADO				FOLHA 001 DE R00
P9				
RESPONSÁVEL	REVISOR	SECAL	ARQUIVO	FAZE
		1:50	TRP-MET-PIL-001-R00	