

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GIUSEPPE PIREDDA FILHO

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS ESTRUTURAIS E AMBIENTAIS DEVIDO A
SUBSTITUIÇÃO DO CONCRETO CONVENCIONAL PELO CONCRETO DE ALTA
RESISTÊNCIA NA OTIMIZAÇÃO DAS SEÇÕES DE PILARES EM EDIFÍCIO
MULTIPAVIMENTO

MARINGÁ

2025

GIUSEPPE PIREDDA FILHO

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS ESTRUTURAIS E AMBIENTAIS DEVIDO A
SUBSTITUIÇÃO DO CONCRETO CONVENCIONAL PELO CONCRETO DE ALTA
RESISTÊNCIA NA OTIMIZAÇÃO DAS SEÇÕES DE PILARES EM EDIFÍCIO
MULTIPAVIMENTO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei

MARINGÁ

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

P667a Piredda Filho, Giuseppe
Avaliação dos efeitos estruturais e ambientais devido a substituição do concreto convencional pelo concreto de alta resistência na otimização das seções de pilares em edifício multipavimento / Giuseppe Piredda Filho. -- Maringá, 2025.
122 f. : il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

1. Concreto de alta resistência. 2. Estabilidade global. 3. Pilares - Edifício multipavimento. 4. Dióxido de carbono (CO₂). 5. Concreto armado. I. Vanderlei, Romel Dias, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título. III. Título.

CDD 23.ed.693.5

GIUSEPPE PIREDDA FILHO

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS ESTRUTURAIS E AMBIENTAIS DEVIDO
A SUBSTITUIÇÃO DO CONCRETO CONVENCIONAL PELO CONCRETO
DE ALTA RESISTÊNCIA NA OTIMIZAÇÃO DAS SEÇÕES DE PILARES
EM EDIFÍCIO MULTIPAVIMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 18/08/2025, julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ROMEL DIAS VANDERLEI**
Data: 18/08/2025 16:06:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Professor Orientador de Estudos

Documento assinado digitalmente
 **VLADIMIR JOSE FERRARI**
Data: 19/08/2025 14:19:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Vladimir José Ferrari
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá

Documento assinado digitalmente
 **GUSTAVO DE MIRANDA SALEME GIDRAO**
Data: 18/08/2025 17:27:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gustavo De Miranda Saleme Gidrão
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de toda sabedoria e força, por me sustentar nos momentos de dúvida e cansaço.

A São Miguel Arcanjo, minha inspiração e protetor, por me guiar e me fortalecer ao longo desta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei, pelo conhecimento compartilhado, pela paciência e pela confiança no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, *in memoriam*, cujo exemplo de vida e valores continuam sendo faróis em minha caminhada.

Aos meus filhos, Giuseppe Piredda Netto e Giovanni Piredda, por serem minha maior motivação e razão para seguir em frente.

A minha esposa, Márcia, por todo amor, compreensão e apoio incondicional durante esse percurso.

A minha família, pelo incentivo constante, mesmo nos momentos mais desafiadores.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho — meu mais sincero agradecimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

PIREDDA FILHO, Giuseppe. **Avaliação dos efeitos estruturais e ambientais devido a substituição do concreto convencional pelo concreto de alta resistência na otimização das seções de pilares em edifício multipavimento.** 2025. 121p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2025.

A estabilidade global em edifícios de concreto armado, conforme estabelecido pela ABNT NBR 6118:2023, requer a consideração rigorosa dos efeitos de segunda ordem (*P-Delta*) e a verificação do coeficiente γ_z como parâmetros indispensáveis à garantia de segurança e desempenho estrutural. Inserida nesse contexto, a presente dissertação tem por objetivo investigar, de forma sistemática, a otimização das seções transversais dos pilares por meio da aplicação do concreto de alta resistência (CAR) em substituição ao concreto convencional em estruturas de múltiplos pavimentos. Parte-se do entendimento de que a construção civil, embora fundamental para o desenvolvimento socioeconômico, figura entre os setores que mais contribuem para as emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), sendo a produção de cimento uma das principais fontes. Tal cenário reforça a necessidade de soluções construtivas que conciliem elevado desempenho estrutural, eficiência no uso de materiais e mitigação de impactos ambientais. Entre as alternativas tecnológicas disponíveis, o CAR se destaca por possibilitar a redução significativa das dimensões dos elementos verticais, mantendo a segurança e a durabilidade exigidas por norma, além de favorecer a racionalização construtiva e a sustentabilidade do processo edificatório. O estudo desenvolvido fundamenta-se na modelagem de um edifício real de 21 pavimentos, utilizando o *software Eberick 2025* para a realização de simulações paramétricas, com variação da resistência característica à compressão (f_{ck}) entre 30 MPa e 90 MPa. A avaliação da estabilidade global foi conduzida com base no parâmetro γ_z e no processo *P-Delta*, em estrita conformidade com os procedimentos prescritos pela ABNT NBR 6118:2023. Os resultados obtidos indicaram que, mesmo com a redução das seções dos pilares, a estrutura manteve-se dentro dos limites normativos de estabilidade global, sem comprometimento da segurança, além de apresentar expressiva diminuição nas emissões de CO₂ decorrente do menor consumo de concreto e aço. A comparação entre soluções estruturais em concreto convencional e com CAR evidenciou reduções relevantes na massa de materiais e na área total dos pilares. A análise incluiu ainda referências técnicas e históricas de aplicação do CAR em obras emblemáticas no Brasil, como o MASP, a E-Tower e o Edifício Leopoldo 1201, reforçando sua viabilidade técnica, econômica e ambiental como solução para projetos estruturais de grande porte.

Palavras-chave: Concreto de alta resistência. Estabilidade global. Emissões de CO₂.

ABSTRACT

PIREDDA FILHO, Giuseppe. **Assessment of structural and environmental effects due to the replacement of conventional concrete with high-strength concrete in the optimization of column sections in multi-story buildings.** 2025. 121p. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2025.

Global stability in reinforced concrete buildings, as established by ABNT NBR 6118:2023, requires strict consideration of second-order effects (*P-Delta*) and verification of the γ_z coefficient as indispensable parameters for ensuring safety and structural performance. Within this context, the present dissertation aims to systematically investigate the optimization of column cross-sections through the use of high-strength concrete (HSC) as a replacement for conventional concrete in multi-story structures. This study begins with the understanding that the construction industry, although essential to socioeconomic development, is among the sectors that most contribute to global carbon dioxide (CO₂) emissions, with cement production being one of the main sources. This scenario reinforces the need for construction solutions that combine high structural performance, efficient use of materials, and mitigation of environmental impacts. Among the available technological alternatives, HSC stands out for enabling a significant reduction in the dimensions of vertical elements while maintaining the safety and durability required by standards, in addition to promoting construction rationalization and the sustainability of the building process. The study is based on the modeling of a real 21-story building, using the *Eberick 2025* software to perform parametric simulations with variations in the characteristic compressive strength (f_{ck}) between 30 MPa and 90 MPa. The assessment of global stability was carried out based on the γ_z parameter and the *P-Delta* process, in strict accordance with the procedures prescribed by ABNT NBR 6118:2023. The results indicated that, even with the reduction of column cross-sections, the structure remained within the normative limits for global stability, without compromising safety, and presented a significant decrease in CO₂ emissions resulting from lower consumption of concrete and steel. The comparison between structural solutions using conventional concrete and HSC revealed relevant reductions in material mass and the total column area. The analysis also included technical and historical references to the application of HSC in landmark projects in Brazil, such as the MASP, the E-Tower, and the Leopoldo 1201 Building, reinforcing its technical, economic, and environmental feasibility as a solution for large-scale structural designs.

Keywords: High-strength concrete. Global stability. CO₂ emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de ações permanentes sobre edificação.....	22
Figura 2 - Cálculo de peso próprio de um pilar	23
Figura 3 - Modelo de telhado simétrico, com duas águas.	26
Figura 4 - Modelo de telhado assimétrico, com uma água.....	27
Figura 5 - Exemplo de ação excepcional: enchente.	27
Figura 6 - Pilares contraventados.	29
Figura 7 - Identificação da presença de pilares em uma obra da construção civil.	30
Figura 8 - Modelo de pilar intermediário em uma obra.	31
Figura 9 - Exemplo de pilar de extremidade	32
Figura 10 - Exemplo de pilar de canto	32
Figura 11 - Exemplo de modelo estrutural no software Eberick 2025.....	35
Figura 12 - Ilustração de efeitos de primeira e segunda ordem.....	36
Figura 13 - Diferenças entre efeitos de segunda ordem.	37
Figura 14 - Diagrama tensão-deformação não linear.	38
Figura 15 - Exemplificação de iterações no processo P-Delta.	42
Figura 16 - Situação não deslocada < Situação deslocada < Análise das forças.....	43
Figura 17 - Variações de altura das seções transversais dos pilares frente ao aumento do f_{ck} . 50	
Figura 18 - Módulo de elasticidade estimado do concreto em vigas nas pesquisa de Lararini (2019).	51
Figura 19 - Museu de Arte de São Paulo.....	53
Figura 20 - Cortes da estrutura do MASP.	54
Figura 21 - E-Tower, São Paulo.....	55
Figura 22 - Croqui de estudo da E-Tower.	55
Figura 23 - Modelagem da E-Tower.	55
Figura 24 - Sapata central da E-Tower.....	56
Figura 25 - Edifício Leopoldo 1201.	57
Figura 26 - Fachada do Edifício Leopoldo 1201.....	57
Figura 27 - Ilustração da variação do f_{ck} do concreto ao longo do edifício.....	58
Figura 28 - CAR em aspecto fresco do Edifício Leopoldo 1201.	59
Figura 29 - Edifício Florença.....	65
Figura 30 - Planta mobiliada dos apartamentos residenciais.....	65

Figura 31 - Edifício em construção I	66
Figura 32 - Edifício em construção II.....	66
Figura 33 - Edifício em construção III.	66
Figura 34 - Edifício em construção IV	67
Figura 35 - Edifício em construção V	67
Figura 36 - Fluxograma da metodologia	68
Figura 37 - Exemplo de pórtico espacial.....	70
Figura 39 - Lançamento de pilares	73
Figura 40 - Personalização de cargas individuais nas vigas.....	74
Figura 41 - Simulador para pilares: P1 (22 x 66) atendendo o coeficiente de segurança	75
Figura 42 - Simulador para pilares: P1 (22 x 50) com coeficiente de segurança insuficiente .	75
Figura 43 - Tabela de registro dos resultados do redimensionamento das seções dos pilares .	76
Figura 44 - Momentos fletores de cálculo - P1	78
Figura 45 - Recurso grelha para pórtico em 3D do <i>Eberick 2025</i>	81
Figura 47 - Funcionalidade da calculadora de emissões de CO ₂ no software <i>Eberick 2025</i>	84
Figura 48 - Concreto convencional: vento a 90°	88
Figura 49 - Parâmetros com CAR	89
Figura 50 - Características do concreto: materiais e durabilidade.....	90
Figura 51 - Características do concreto: classes.....	91
Figura 52 - Características do concreto: análise	92
Figura 53 - Representação de pilares de concreto convencionais x pilares de CAR.....	96
Figura 54 - Ilustração dos deslocamentos em uma estrutura, segundo o <i>Eberick 2025</i>	97
Figura 55 - Ilustração dos deslocamentos em uma estrutura com absorção dos mesmos	97
Figura 56 - Variação do coeficiente de rigidez.....	98
Figura 57 – Comparativo da redução da área de armadura longitudinal entre pilares (concreto convencional X CAR)	100
Figura 58 - Comparação de Gamma-Z e deslocamento horizontal: convencional x CAR	106
Figura 59 - Geração de CO ₂ em toneladas (concreto convencional x CAR).....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise comparativa das seções transversais dos pilares (convencionais x CAR) e redução percentual

Tabela 2 - Análise comparativa da área de aço na seção

Tabela 3 – Comparação entre concreto convencional e CAR

Tabela 4 – Quantificação do CO₂ incorporado nos pilares de concreto convencional, considerando aço e concreto

Tabela 5 – Descrição das quantidades de CO₂ incorporado no concreto e no aço - CAR

Tabela 6 - Emissão de CO₂ com concreto convencional

Tabela 7 - Emissão de CO₂ com CAR

Tabela 8 - Emissões de CO₂ totais consolidadas

Tabela 9 – Redução das emissões de CO₂

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)

ACV (Avaliação do Ciclo de Vida)

CAR (Concreto de Alta Resistência)

CO₂ (Dióxido de Carbono)

ELS (Estado-limite de Serviço)

ELU (Estado-limite Último)

f_{ck} (resistência característica do concreto à compressão)

MASP (Museu de Arte de São Paulo)

NBR (Norma Brasileira)

NLF (Não linearidade física)

NLG (Não linearidade geométrica)

SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
3.1 REQUISITOS DO PROJETO	20
3.1.1 O conceito de ações	20
3.1.1.1 Ações permanentes	21
3.1.1.2 Ações variáveis.....	24
3.1.1.2.1 Vento	25
3.1.1.3 Ações excepcionais.....	27
3.1.1.3.1 Contraventamento.....	28
3.1.2 Pilares	29
3.1.3 Estado-limite último	33
3.2 ESTABILIDADE GLOBAL DA ESTRUTURA.....	35
3.2.1 Efeitos de segunda ordem	36
3.2.2 Parâmetros de estabilidade global	37
3.2.2.1 Coeficiente γ_z	40
3.2.2.2 Processo <i>P-Delta</i>	41
3.3 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA	44
3.3.1 A estabilidade global em edifícios com múltiplos pavimentos.....	45
3.3.2 Comparativo da estabilidade global em edifícios fazendo uso do γ_z	47
3.3.3 Influência do CAR no redimensionamento de pilares	49
3.3.4 O CAR no dimensionamento de viga.....	51

3.4 CAR EM EDIFÍCIOS BRASILEIROS	52
3.4.1 Museu de Arte de São Paulo	52
3.4.2 O edifício E-Tower.....	54
3.4.3 O edifício Leopoldo 1201.....	57
3.5 O CAR E A EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO	60
3.6 EDIFÍCIO EM ANÁLISE	64
4. METODOLOGIA.....	68
4.1 MODELAGEM ESTRUTURAL	69
4.2 REDUÇÃO DAS SEÇÕES DOS PILARES.....	81
4.3 REDUÇÃO NA EMISSÃO DE CO ₂	84
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
5.1 REDUÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS E VOLUME DE CONCRETO.....	87
5.2 OTIMIZAÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS PILARES	93
5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS SEÇÕES	94
5.3.1 Classe de agressividade, definição de f_{ck} e módulo de elasticidade do CAR	96
5.4 ECONOMIA DE CONCRETO E IMPACTO AMBIENTAL.....	99
5.5 REDUÇÃO DA ÁREA E MASSA DE AÇO	99
5.6 ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL (γ_z e P-delta)	102
5.6.1 Não linearidade física e geométrica	102
5.6.2 Ações verticais consideradas.....	102
5.6.3 Ações horizontais – vento.....	103
5.6.4 Avaliação dos coeficientes de estabilidade global (γ_z e P-Delta)	104
5.7 EMISSÕES DE CO ₂	107
5.7.1 Procedimento para determinação da emissão de carbono equivalente	109
5.7.2 Comparação internacional da emissão de CO₂.....	111
5.8 SÍNTESE DOS RESULTADOS	112
6. CONCLUSÕES.....	114

REFERÊNCIAS	115
APÊNDICE 1 - PLANTA FORMA COM DETALHAMENTOS	121
APÊNDICE 2 - FORMA TIPO: PILARES EXECUTADOS.....	122

1. INTRODUÇÃO

Toda edificação está sujeita a ações externas e internas que comprometem sua segurança. Sabendo disso, estuda-se a estabilidade global das construções de grande porte a fim de garantir o uso racional de recursos e o equilíbrio da edificação.

Nesse contexto, define-se estabilidade global como a capacidade de um sistema estrutural de manter seu equilíbrio, resistindo à ação de forças externas e internas do próprio sistema (FEITOSA; ALVES, 2015). Observar esse conceito é fundamental no projeto de construções de grande porte, como pontes, edifícios ou outras estruturas de magnitude equivalente, com o objetivo de garantir que suportem as cargas aplicadas sobre si, mantendo-se íntegras em termos de segurança e estrutura física.

No Brasil, o uso do concreto armado é recorrente na engenharia civil, o que impacta diretamente a estabilidade global de prédios com múltiplos andares, começando por seu peso próprio. Somado às ações do vento e às cargas acidentais, isso exige elementos estruturais robustos para que a segurança da construção seja garantida. Todavia, esse pressuposto tem sido alterado à medida que novas tecnologias aprimoram a resistência do concreto.

Como forma de melhorar o desempenho dos materiais utilizados na construção civil, surgiu o chamado concreto de alta resistência (CAR), um material projetado para suportar grandes cargas e elevadas pressões. Sua resistência à compressão é superior à do concreto convencional, podendo atingir até 90MPa, enquanto o convencional atinge, no máximo, 50MPa (CALDARONE, 2009).

O CAR se destaca por suas características de composição e mistura, como a relação água-cimento e a densidade-durabilidade, fatores que conferem vantagens à construção civil, como alta resistência, durabilidade e eficiência. Trata-se de um material que suporta grandes cargas, permitindo a construção de estruturas mais esbeltas, o que resulta em economia de material e espaço. Quanto à durabilidade, são materiais bem estruturados, com baixa porosidade e menos suscetíveis à interação com outros materiais, o que reduz riscos de alterações na composição, como em ataques químicos. Devido a essas características, o uso do CAR permite estruturar construções mais altas e com maior capacidade de suportar cargas e compressões sem comprometer a segurança da edificação (FREGONEZI, 2017).

No entanto, em comparação ao concreto convencional, o custo do CAR é mais elevado. Apesar disso, estudos demonstram que o custo-benefício de sua aplicação em grandes construções é compensador. Ainda assim, são necessárias estimativas que comprovem, por

meio de análises comparativas ao longo do projeto, a viabilidade de sua utilização no processo construtivo.

Pressupondo a estreita relação entre engenharia civil e sustentabilidade, a avaliação da estabilidade global de uma edificação por meio da redução da esbeltez de suas peças revela a importância do controle da emissão de gases poluentes, como o dióxido de carbono (CO₂). Embora o CO₂ não seja tóxico e seja naturalmente produzido, seu excesso causa impactos ambientais negativos, pois contribui para o efeito estufa e, consequentemente, para o aquecimento global (LIMA, 2025).

Atualmente, a produção de cimento Portland é responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO₂ (LIMA, 2025), o que comprova que a redução do uso desse material, por meio da substituição pelo CAR, é uma forma de colaborar com a sustentabilidade.

Frente a isso, é necessário compreender que sustentabilidade consiste na busca pelo equilíbrio entre preservação ambiental, desenvolvimento econômico e bem-estar social (POMPERMAYER SESSO et al., 2023). Esses três pilares, quando bem estabelecidos, garantem que as necessidades das gerações presentes e futuras sejam atendidas, minimizando os danos ao meio ambiente. A preservação ambiental está associada à proteção dos recursos naturais, como água, solo, ar e biodiversidade (CHIVIAN; BERNSTEIN, 2008), por meio de práticas que minimizem os impactos negativos. O desenvolvimento econômico refere-se à geração de riqueza com viabilidade financeira e baixo impacto ambiental. Tanto empresas quanto o governo devem gerar recursos, mas sem esgotar os bens naturais, visando à redução das desigualdades sociais. Já o bem-estar social diz respeito à qualidade de vida, justiça social e igualdade de acesso à saúde, segurança e educação, ou seja, à garantia dos direitos humanos, da cultura, do desenvolvimento e da inclusão (IPCC, 1995).

Buscando respeitar os três pilares da sustentabilidade, a engenharia civil atual tem se mobilizado para aplicar práticas como: uso de materiais ecológicos; redução do consumo energético; diminuição da emissão de gases poluentes; implementação de tecnologias sustentáveis — como cidades inteligentes, com infraestrutura integrada; construção de edificações mais resilientes às mudanças climáticas; uso de materiais inovadores como concretos de alta resistência, autorregenerativos e compósitos; aplicação de inteligência artificial e automação para previsão de falhas estruturais e otimização de processos; e uso de soluções eficientes no tratamento de água, nas redes de abastecimento e no desenvolvimento de fontes energéticas sustentáveis.

Sendo assim, conter a emissão de CO₂ por meio da utilização do CAR contribui tanto para a manutenção das condições climáticas quanto para a otimização dos processos construtivos, aproximando a engenharia civil dos preceitos da sustentabilidade.

Visando a busca por materiais que apresentem melhores qualidades, eficiência e excelentes propriedades físicas, químicas e mecânicas, sem agredir o meio ambiente, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar a estabilidade global e a redução da emissão de CO₂ associadas ao uso do CAR, promovendo a redução das dimensões dos pilares de um edifício. O estudo foi realizado com base no projeto estrutural de um edifício já construído, localizado no município de Ourinhos, no estado de São Paulo. A edificação possui 21 andares, 80 apartamentos, além de áreas sociais como salão de festas, piscina, quadra poliesportiva, *playground* e academia, totalizando 16.810,04 m² de área construída, com 73,62 metros de altura.

A pertinência do tema se justifica pela observação de que pesquisas na área estão em constante atualização, visto que, dada a funcionalidade do concreto, há espaço para novas adaptações tecnológicas que aumentem sua resistência e reduzam o uso de insumos, justificando a delimitação desse estudo. Para a análise dos dados estruturais, foi utilizado o *software Eberick 2025*, cujas funcionalidades estão diretamente relacionadas ao redimensionamento dos pilares estruturais do edifício. O uso do CAR, por possibilitar a redução do volume de concreto aplicado, atua diretamente na diminuição da emissão de gases poluentes como o CO₂, o que constitui um dos principais objetivos desse trabalho.

Com base nos objetivos propostos e considerando as demandas atuais do mercado da construção civil, os resultados da simulação sobre a redução dos pilares indicaram que o CAR se configura, de fato, como um material desejável para a construção de grandes estruturas, como edifícios e pontes, e, do ponto de vista ambiental, contribuíram com a discussão sobre a viabilidade do uso do CAR como alternativa à emissão excessiva de gases poluentes, como o CO₂, resultante do concreto tradicional.

1.1 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa fundamenta-se no pressuposto que a adoção do CAR justifica-se pelas suas propriedades físicas, químicas e mecânicas superiores, que conferem maior desempenho aos elementos estruturais e possibilitam otimizações significativas no projeto. Tendo em vista que o desenvolvimento do CAR é resultado de avanços técnicos e científicos

que buscaram atender às exigências contemporâneas da engenharia estrutural, tais como a redução das dimensões dos elementos, o uso mais eficiente dos materiais e a diminuição dos custos da construção, sem comprometer a segurança das edificações.

No contexto dessa pesquisa, a aplicação do CAR permitiu a redução das seções transversais dos pilares, implicando também na diminuição da quantidade de concreto, de aço e do peso próprio da estrutura. Tais alterações favorecem a racionalização do projeto, mantendo a capacidade da edificação de resistir às ações permanentes, variáveis e acidentais, conforme exigido pelas normas técnicas.

Além dos benefícios estruturais e econômicos, o CAR apresenta um relevante potencial de contribuição ambiental. Sua aplicação está diretamente associada à redução da emissão de CO₂, em função do menor volume de cimento Portland necessário. Esse aspecto reforça o papel do CAR como solução sustentável, uma vez que a construção civil é reconhecida como uma das atividades humanas de maior impacto ambiental. Estruturas mais esbeltas e eficientes, que ocupam menor volume e utilizam menos recursos, são capazes de atender às mesmas exigências de desempenho, com menores emissões de poluentes e consumo de materiais.

Frente a tanto, a pesquisa propõe uma análise comparativa entre pilares dimensionados com concreto convencional e com CAR, considerando-se variáveis estruturais relevantes à verificação da estabilidade global da edificação, objetivo central deste estudo. Entre essas variáveis, destacam-se a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), o coeficiente de estabilidade global (γ_z) e os efeitos *P-Delta*.

O f_{ck} é um parâmetro essencial para o dimensionamento estrutural, definido como o valor abaixo do qual apenas 5% dos resultados de ensaios de corpos de prova cilíndricos devem se situar. É expresso em megapascal (MPa) e, de acordo com os critérios normativos, representa a resistência mecânica de referência do concreto aos 28 dias de cura. Nessa pesquisa, a adoção de diferentes valores de f_{ck} permitiu investigar o comportamento da estrutura sob diferentes condições de resistência do material, possibilitando avaliar sua influência no dimensionamento dos pilares, na estabilidade global e na quantidade de emissões associadas à produção dos materiais.

Dentre os critérios adotados para avaliar a estabilidade global, destaca-se a análise do coeficiente γ_z , o qual permite estimar os momentos fletores atuantes na estrutura em decorrência das ações verticais e horizontais. Conforme definido na NBR 6118 (ABNT, 2023), o γ_z aplica-se a estruturas reticuladas com quatro ou mais pavimentos e sua correta determinação é fundamental para assegurar a integridade e a estabilidade do edifício ao longo do tempo.

Complementando a análise estrutural, o presente estudo também considera os efeitos *P-Delta*, fenômeno associado à não linearidade geométrica que ocorre quando forças verticais atuam sobre elementos submetidos a deslocamentos laterais. Esse deslocamento induz momentos adicionais na estrutura, aumentando as solicitações internas e potencialmente comprometendo sua estabilidade. A inclusão dessa análise é indispensável em estruturas de múltiplos pavimentos, cuja estabilidade global depende do controle rigoroso dos deslocamentos e da interação entre esforços verticais e horizontais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos da substituição do concreto convencional pelo CAR, quanto aos aspectos estruturais e ambientais, em pilares de edifício de múltiplos pavimentos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atender ao objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- otimizar as seções dos pilares com o uso do CAR, sem comprometer a estabilidade global e a segurança da edificação;
- demonstrar a análise os parâmetros γ_z e os efeitos *P-Delta* de deslocamento na estrutura, conforme as diretrizes da NBR 6118:2023;
- estimar a emissão de CO₂ decorrente da otimização estrutural;
- propor a redução no consumo de materiais em decorrência da otimização das seções dos pilares.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica necessária para embasar os objetivos propostos nesse trabalho. As subseções a seguir têm como finalidade proporcionar uma compreensão mais aprofundada acerca da otimização das seções dos pilares e sua relação com a estabilidade global da estrutura. Além disso, este capítulo visa descrever e analisar as ações que fundamentam a presente pesquisa, por meio da apreciação de estudos anteriores e relevantes que guardam relação com a temática abordada.

3.1 REQUISITOS DO PROJETO

O uso de inovações na engenharia civil tem se tornado cada vez mais recorrente, com o objetivo de viabilizar construções a partir de materiais que possuam propriedades aprimoradas, alto desempenho e excelente custo-benefício. Nesse contexto, o estudo do CAR se destaca como um diferencial, por se tratar de um material que atende às exigências técnicas da construção civil moderna.

Diversas são as definições relacionadas ao tema em discussão. Para garantir maior clareza quanto aos resultados obtidos ao final desse estudo, apresentam-se, a seguir, os principais conceitos pertinentes à pesquisa.

3.1.1 O conceito de ações

Entende-se por ação todo efeito capaz de influenciar o estado de tensão ou deformação de uma edificação. De acordo com a ABNT NBR 6118:2023, a análise estrutural deve considerar a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a segurança da estrutura, levando em conta os estados-limites últimos (ELU) e os estados-limites de serviço (ELS).

Com o objetivo de garantir a estabilidade de uma obra, não devem ser consideradas apenas as ações que influenciam a estética, mas, sobretudo, aquelas que possam comprometer a estabilidade global da estrutura. Nesses casos, a análise da estabilidade global e a avaliação dos efeitos de segunda ordem tornam-se de fundamental importância no projeto estrutural. Além disso, é importante considerar que toda estrutura pode ser descrita como deslocável. Quando se tratam de deslocamentos horizontais, em estruturas mais rígidas esses

deslocamentos tendem a ser quase imperceptíveis. No entanto, em estruturas menos rígidas, tais deslocamentos tornam-se mais evidentes e devem ser rigorosamente analisados, sob o risco de comprometer a segurança e a integridade da construção (FREGONEZI, 2017).

O elemento determinante da supramencionada estabilidade é o concreto, cujo conceito define-se como um material de construção composto por uma mistura de cimento, água, areia e brita, podendo, em alguns casos, conter aditivos que modificam suas propriedades (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Trata-se de um material amplamente utilizado no setor da construção civil, devido à sua elevada resistência, durabilidade e facilidade de ser moldado.

No contexto das estruturas de concreto, as ações atuantes podem ser classificadas em permanentes, variáveis e excepcionais, as quais serão detalhadas a seguir.

3.1.1.1 Ações permanentes

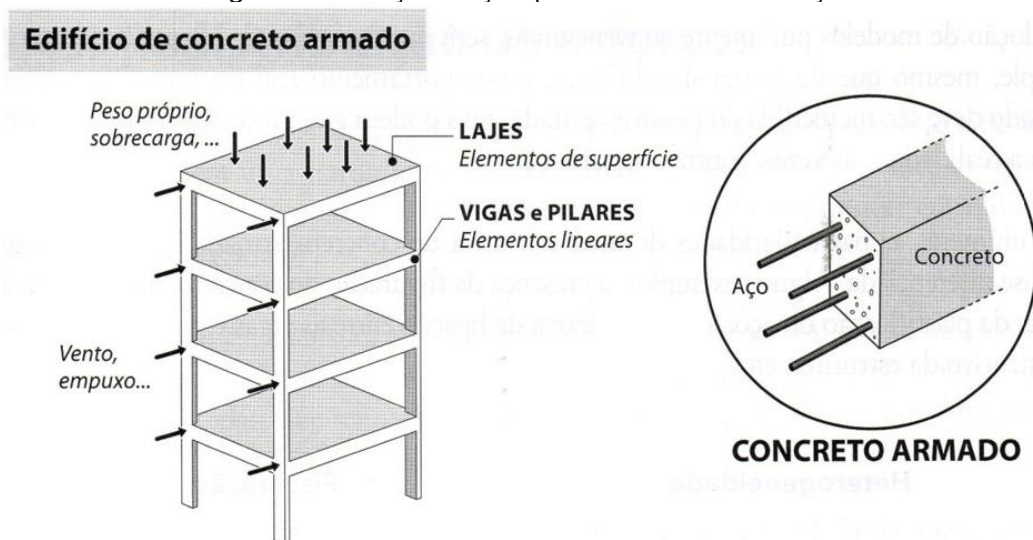
As ações permanentes são aquelas que atuam de forma constante ao longo de toda a vida útil da edificação e, por isso, podem ser previstas com relativa exatidão. Essas ações incluem, principalmente, o peso próprio das estruturas e dos elementos construtivos fixos. Em contrapartida, as ações variáveis, muitas vezes chamadas de acidentais, devem ser estimadas com base na utilização prevista para o espaço, conforme estabelece a ABNT NBR 6120:2023, norma vigente e referência nacional no que diz respeito às cargas para cálculo de estruturas de edificações.

De acordo com essa norma, as cargas adicionais referentes ao uso de ambientes em edifícios residenciais (quartos, salas, áreas de serviço, escadas particulares etc.) e edifícios comerciais (escadas públicas, salas de espera, restaurantes, entre outros) são expressas em kN/m^2 (FREGONEZI, 2017), devendo ser aplicadas conforme a função de cada ambiente.

Já segundo a ABNT NBR 6118:2023, as ações permanentes compreendem não apenas àquelas que permanecem constantes ao longo do tempo, mas também àquelas que, embora variem, tendem a se estabilizar em um valor-limite. Isso inclui, por exemplo, ações que se acumulam gradualmente com o tempo, como apontado por Carvalho e Figueiredo Filho (2017).

A Figura 1 ilustra exemplos de ações permanentes que atuam sobre uma edificação, como o peso próprio dos elementos estruturais (lajes, vigas, pilares), elementos da superfície, instalações fixas, além de empuxos provocados pelo solo ou pela água. Ainda que ações da natureza, como chuvas e ventos, influenciem a estrutura, elas são classificadas como ações variáveis, conforme a própria norma.

Figura 1 - Ilustração de ações permanentes sobre edificação



Fonte: ROLIM, 2023.

Segundo a ABNT NBR 6118:2023, as ações permanentes se subdividem em:

- **Ações permanentes diretas:** referem-se ao peso próprio da estrutura, ao peso dos elementos construtivos fixos (como alvenarias e revestimentos), às instalações permanentes (como reservatórios e tubulações embutidas), bem como a empuxos permanentes do solo ou da água.
- **Ações permanentes indiretas:** são aquelas decorrentes de efeitos físicos ou deformações ao longo do tempo, como retração e fluência do concreto; deslocamentos dos apoios; imperfeições geométricas globais e locais; momentos mínimos; protensão (quando houver); variações térmicas, entre outros fatores que não resultam de cargas diretamente aplicadas, mas que geram esforços na estrutura.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2023, existem especificações a serem observadas para cada uma das ações estruturais descritas anteriormente. Os fatores classificados como ações permanentes devem ser cuidadosamente avaliados, uma vez que podem influenciar diretamente em intervenções estruturais, como, por exemplo, o redimensionamento de pilares.

Nessas situações, é fundamental considerar os percentuais de redução de carga permitidos, levando-se em conta o número de pavimentos da edificação. Além disso, por razões de segurança estrutural, deve-se sempre adotar a situação mais desfavorável no dimensionamento dos pilares, conforme orientam Carvalho e Figueiredo Filho (2017).

Em meio a tanto, a ABNT NBR 6120:2023 estabelece que é pertinente listar alguns dos materiais mais utilizados na construção civil, considerando seus pesos específicos, conforme demonstrado no Quadro 1.

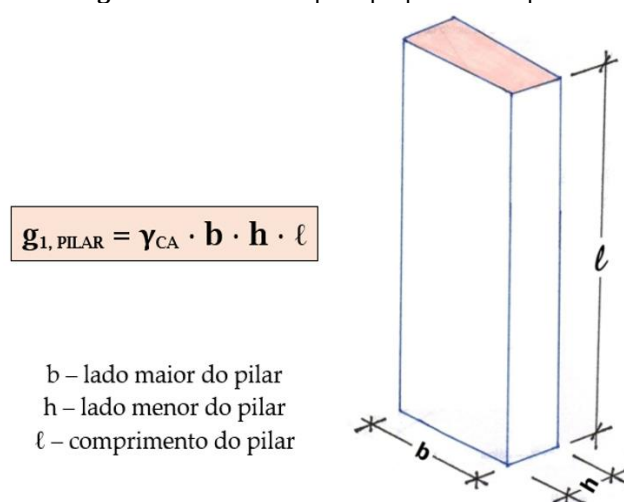
Quadro 1 - Peso específico de materiais recorrentes na construção civil

Material	Peso específico (kN / m3)
Concreto simples	24
Concreto armado	25
Argamassa de cimento e areia	21
Argamassa de cal, cimento e areia	19
Alvenaria de tijolo maciço	18
Alvenaria de bloco cerâmico furado	13
Alvenaria de bloco de concreto	14
Enchimento com entulho	15
Enchimento com argila expandida	9
Enchimento com terra (média)	18
Granito e mármore	28

Fonte: ROLIM, 2023.

A relevância das informações apresentadas no Quadro 1 reside no fato de que os materiais listados poderão compor as estruturas que se pretende redimensionar nesse trabalho. No caso do cálculo do peso próprio dos pilares, considera-se o peso correspondente ao andar em que o elemento estrutural estará alocado, conforme demonstrado na Equação 1 e ilustrado na Figura 2.

$$g_{1,PILAR} = \gamma_{CA} \cdot b \cdot h \cdot \ell \quad (\text{Eq. 1})$$

Figura 2 - Cálculo de peso próprio de um pilar

Fonte: ROLIM, 2023.

A Equação 1 permite calcular o peso próprio de um pilar, relacionando as dimensões deste como seu lado maior (b), lado menor (h) e seu comprimento (ℓ), além da grandeza física γ_{CA} , que é o peso específico do concreto armado.

Além dos pilares, outras peças estruturais também possuem especificações próprias quanto ao cálculo do peso próprio. No entanto, para os fins dessa análise, serão consideradas apenas as referências relativas aos pilares, que constituem o objeto de estudo.

A seguir, serão descritas as chamadas ações variáveis, que também apresentam relevância significativa no comportamento e na estabilidade das edificações.

3.1.1.2 Ações variáveis

As ações variáveis são determinadas pelas chamadas cargas acidentais, que se referem aos pesos móveis adicionados à estrutura. Entre os exemplos mais comuns estão o fluxo de pessoas, mobiliário, veículos e ações climáticas, como vento e temperatura — sendo os dois últimos especialmente considerados e ponderados pelas normas técnicas aplicáveis ao concreto armado.

De acordo com a ABNT NBR 6118:2023, as ações variáveis são classificadas em dois grupos: ações variáveis diretas e ações variáveis indiretas, conforme descrito a seguir:

- **Ações variáveis diretas:** são aquelas originadas do uso previsto da edificação, como sobrecargas de utilização, além de ações do vento e da água, quando essas forem tratadas como variáveis diretas. Essas ações devem atender às normas específicas, incluindo aquelas que tratam das ações atuantes durante a execução da obra (ABNT, 2023);
- **Ações variáveis indiretas:** compreendem variações de temperatura, que podem ser uniformes (decorrentes de alterações atmosféricas ou insolação global) ou não uniformes (com distribuições desiguais de temperatura). Também se enquadram nesse grupo as ações dinâmicas, como choques, vibrações e fadiga dos materiais, que podem causar efeitos cumulativos ao longo do tempo.

Autores que tratam do tema alertam que, em estruturas com possibilidade de acúmulo de água, deve-se considerar a presença de uma lâmina d'água correspondente ao nível de drenagem efetivamente garantido pela construção.

Ainda sobre as ações variáveis, é importante destacar que essas podem ocorrer durante as fases de execução da obra, motivo pelo qual a segurança estrutural deve ser garantida em todas as etapas construtivas, com cada fase devidamente prevista e discriminada no projeto. A verificação dessas etapas deve levar em conta tanto a parte da estrutura já executada, quanto as estruturas provisórias auxiliares, incluindo seus respectivos pesos próprios, além das cargas incidentes durante a execução da obra (ABNT, 2023).

Dada sua relevância e impacto sobre a estabilidade das edificações, a seguir serão detalhadas as ações decorrentes de fenômenos naturais, com ênfase na ação do vento, por se tratar de um fator que não deve ser negligenciado no tipo de estudo desenvolvido nesse trabalho.

3.1.1.2.1 Vento

O vento é classificado como o movimento do ar na atmosfera terrestre, causado pelas diferenças de pressão atmosférica. Essas diferenças são geradas, principalmente, pelo aquecimento desigual da superfície terrestre provocado pela radiação solar.

No presente estudo, a análise do vento será realizada considerando-o como uma ação horizontal, devendo ser analisado sob dois aspectos fundamentais: os aspectos aerodinâmicos do edifício e os aspectos meteorológicos do vento.

O primeiro aspecto, aerodinâmico, refere-se ao formato da edificação, cuja interação com o vento pode gerar esforços significativos e, em alguns casos, causar danos à estrutura. Já o segundo aspecto, meteorológico, está relacionado à velocidade do vento, que varia conforme fatores como a localização geográfica da edificação, a altura da construção, a rugosidade do terreno e o formato arquitetônico da obra (FREGONEZI, 2017).

Para determinar a ação do vento sobre uma edificação, utiliza-se a equação apresentada na ABNT NBR 6123:2023, em que a velocidade básica do vento é corrigida por diversos fatores, como:

- variação do relevo do terreno;
- rugosidade superficial, que representa os obstáculos naturais ou artificiais ao fluxo do vento;
- fatores estatísticos, que consideram a probabilidade de ocorrência de ventos extremos com base no tempo de retorno.

À luz dessas circunstâncias, a Equação 2 representa essa relação e permite calcular a pressão dinâmica do vento atuante sobre a estrutura.

$$V_K = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (\text{Eq. 2})$$

Na Equação 2, tem-se:

V_K – velocidade característica do vento;

V_0 – velocidade do vento;

S_1 – variação do relevo, de acordo com a ABNT NBR 6123:2023;

S_2 – rugosidade, variação do vento, dimensões da edificação combinados e divididos em categorias, de acordo com a ABNT NBR 6123:2023;

S_3 – estatísticas que mostram o grau de segurança da edificação relacionado com a vida útil da mesma e determinadas por valores mínimos, de acordo com a ABNT NBR 6123:2023.

Na mesma perspectiva, ainda deve ser considerada a força de arrasto do vento, cujo resultado implica diretamente na análise global da estrutura a ser construída, mostrada na Equação 3.

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (\text{Eq. 3})$$

Na Equação 3, vê-se:

F_a – força de arrasto;

C_a – coeficiente de arrasto;

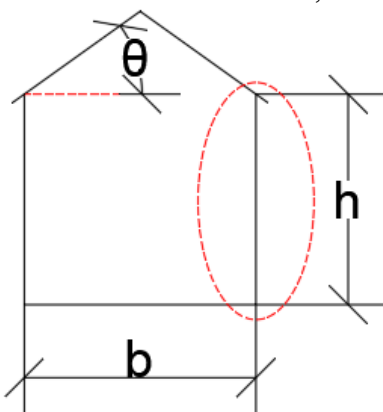
q – pressão dinâmica do vento;

A_e – área frontal efetiva.

Para o cálculo do coeficiente de arrasto (C_a), deve-se considerar a superposição entre o formato da edificação e as aberturas existentes na estrutura, adotando-se uma perspectiva de comportamento global.

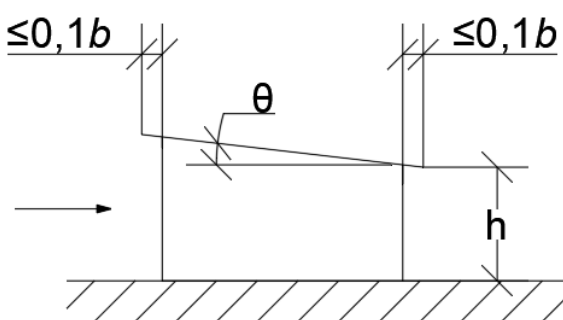
A ação do vento deve ser analisada levando em conta o formato geométrico da edificação, como, por exemplo, se a planta é retangular, circular ou de outra geometria específica, bem como o tipo de cobertura, que pode ser: aparente (sem inclinação significativa); simétrica, conforme ilustrado na Figura 3; assimétrica, como mostrado na Figura 4.

Figura 3 - Modelo de telhado simétrico, com duas águas.



Fonte: ADAPTADO DE ABNT, 1988.

Figura 4 - Modelo de telhado assimétrico, com uma água.



Fonte: ADAPTADO DE ABNT, 1988.

Com base no que foi exposto e conforme estabelece a ABNT NBR 6123:2023, o cálculo da ação do vento sobre uma edificação exige a consideração de parâmetros aerodinâmicos e meteorológicos, que devem ser aplicados de acordo com as características regionais e o modelo estrutural da construção em análise.

3.1.1.3 Ações excepcionais

As ações excepcionais são definidas como aquelas de ocorrência rara, imprevisível e de difícil controle, podendo incluir eventos como terremotos, explosões, incêndios, entre outros. Essas ações, embora não sejam constantes, devem ser consideradas em situações específicas, especialmente, em projetos localizados em zonas de risco ou expostos a condições ambientais extremas.

A Figura 5 ilustra um exemplo de ação excepcional: uma edificação atingida por alagamento decorrente de enchentes.

Figura 5 - Exemplo de ação excepcional: enchente.



Fonte: GAZETA, 2020.

As ações excepcionais geralmente são de curta duração e apresentam uma probabilidade muito reduzida de ocorrência ao longo da vida útil da edificação — excetuando-se os casos de construções localizadas em áreas de risco ou em regiões propensas a desastres naturais. Ainda assim, essas ações devem ser consideradas no projeto sempre que os efeitos por elas causados não puderem ser controlados por outros métodos além daqueles predefinidos pelas normas técnicas (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2017).

3.1.1.3.1 Contraventamento

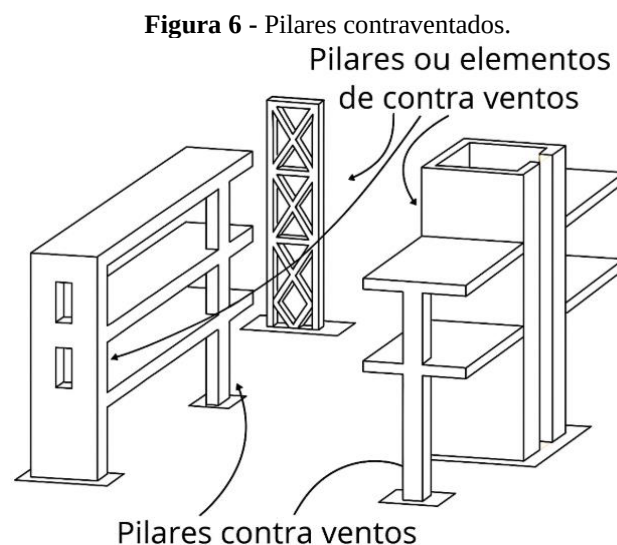
Embora o termo estrutura de contraventamento esteja geralmente associado à ação do vento, é importante destacar que outras forças horizontais também podem afetar a edificação, como as ações geradas por estruturas fora de prumo, abalo sísmico (terremotos) ou tsunamis (CRUZ; FERREIRA; LUCENA, 2019).

A estrutura global de uma edificação pode ser analisada com base em duas configurações principais:

- **Sistema estrutural contraventado:** sistema que resiste apenas às cargas verticais e garante a estabilidade local e localizada do edifício.
- **Sistema estrutural de contraventamento:** sistema projetado para resistir tanto às cargas verticais quanto horizontais, assegurando a estabilidade global, local e localizada da estrutura (CRUZ; FERREIRA; LUCENA, 2019).

Para facilitar a análise, é possível identificar dentro da edificação as chamadas subestruturas de contraventamento, que apresentam alta rigidez frente às ações horizontais e, por isso, absorvem a maior parte dos esforços gerados por essas ações. Segundo a ABNT (2023), essas subestruturas podem ser constituídas por: pilares de grandes dimensões (pilares-parede); paredes estruturais; pórticos rígidos; treliças estruturais; núcleos de rigidez, entre outros.

A ABNT NBR 6118:2023 define que os elementos que não participam da subestrutura de contraventamento são denominados elementos contraventados (Figura 6). O dimensionamento do sistema de contraventamento deve considerar a rigidez estrutural, de forma a evitar deslocamentos excessivos nos nós da estrutura.



Fonte: ADAPTADO DE CARNEIRO E MARTINS (2008).

O contraventamento será garantido na busca pela estabilidade global da estrutura, quando essa for composta por pórticos, pilares-parede ou núcleos rígidos, sem a necessidade de considerar nós fixos ou móveis individualmente, como já mencionado anteriormente nos contextos de efeitos de primeira ordem e efeitos de segunda ordem (SILVA NETO, 2021).

Em consonância com essas considerações, Bastos (2015) afirma que a estrutura de um edifício é organizada em um sistema tridimensional, composta pela união de elementos lineares e laminares, cuja condição fundamental é a estabilidade global. Nesse sistema, os pilares são responsáveis por garantir a estabilidade vertical, enquanto os demais elementos estruturais atuam para assegurar a estabilidade horizontal, evitando deslocamentos nos nós. Trata-se, portanto, de um sistema coeso, no qual cada elemento possui uma função específica que contribui para a segurança e integridade da estrutura como um todo.

Independentemente do número de pavimentos, toda estrutura deve ser projetada com um sistema de contraventamento, cuja eficácia deve ser avaliada antes do início da construção. Recomenda-se que esse sistema seja constituído, no mínimo, por dois elementos de contraventamento, em conjunto com as lajes, de modo a garantir a rigidez estrutural necessária à estabilidade da edificação.

3.1.2 Pilares

Os pilares constituem-se em elementos estruturais verticais essenciais na construção civil, cuja função principal é suportar cargas e transferi-las para as fundações, garantindo a estabilidade global da edificação (ABNT NBR 6118:2023). De suma importância, os pilares

resistem às forças de compressão oriundas do peso próprio da estrutura, como lajes e vigas, mantendo o equilíbrio do conjunto.

Abaixo a Figura 7 exemplifica onde se localizam os pilares e as vigas, assim como, a união entre esses dois elementos, o que forma os pórticos, onde ocorre o chamado momento fletor em um edifício.

Figura 7 - Identificação da presença de pilares em uma obra da construção civil.



Fonte: ASOPE ENGENHEIRA, 2017.

O espaçamento e a disposição dos pilares são fundamentais para garantir a estabilidade das vigas e da estrutura como um todo. Os pilares suportam as cargas provenientes do telhado, lajes, paredes, além das cargas variáveis e excepcionais.

Para tanto, os materiais utilizados na construção dos pilares são determinantes e devem ser empregados conforme as necessidades do projeto, as condições ambientais e os requisitos de resistência. Entre os referidos materiais destacam-se:

- **Concreto armado:** o material mais comum, composto por uma mistura de cimento, areia, brita e água, reforçado com barras de aço que conferem resistência à tração e compressão;
- **Aço:** empregado em estruturas de grande porte, como arranha-céus e pontes, apresenta alta resistência e flexibilidade, podendo ser utilizado na forma de vigas ou tubos;
- **Madeira:** utilizado onde disponível em abundância, especialmente em construções menores. A madeira laminada permite pilares mais resistentes, com vantagens de sustentabilidade, leveza e facilidade de manuseio;

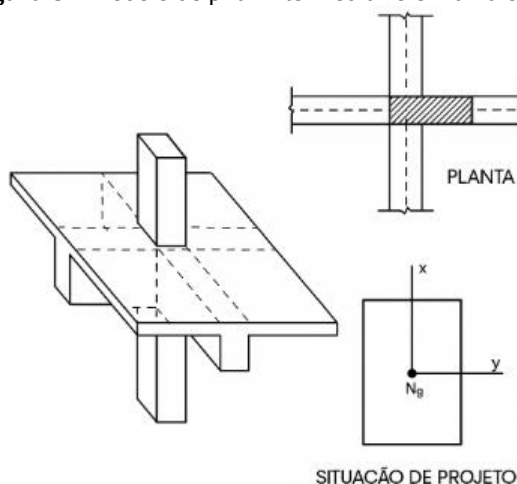
- **Alvenaria estrutural:** constituída por tijolos ou blocos de concreto, comum em construções residenciais de menor porte, com custo relativamente baixo e execução simplificada;

- **Fibras de carbono:** material tecnológico avançado, aplicado em casos especiais que exigem alta resistência e leveza, porém com custo elevado.

Ainda sob o objetivo de determinar a estabilidade da edificação, os pilares recebem classificações que denotam em suas funções e posições nas construções, conforme a enumeração a seguir:

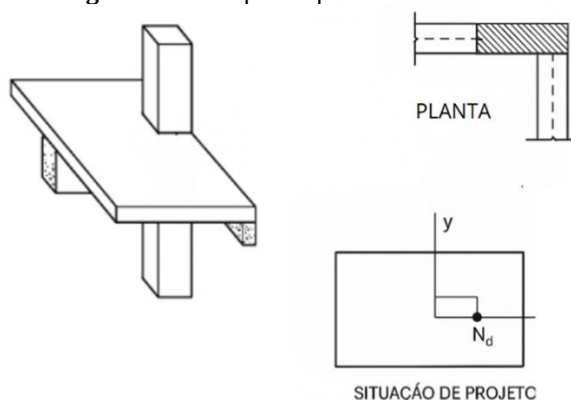
1) Pilares intermediários: São elementos verticais situados sob lajes e vigas contínuas, onde a compressão atua centralizadamente, com momentos fletores desprezíveis devido à ausência de excentricidade inicial. Estão localizados no interior da edificação, entre as extremidades (Figura 8). Sua função principal é redistribuir as cargas verticais, transferindo o peso para as fundações, contribuindo para a estabilidade e segurança da estrutura.

Figura 8 - Modelo de pilar intermediário em uma obra.



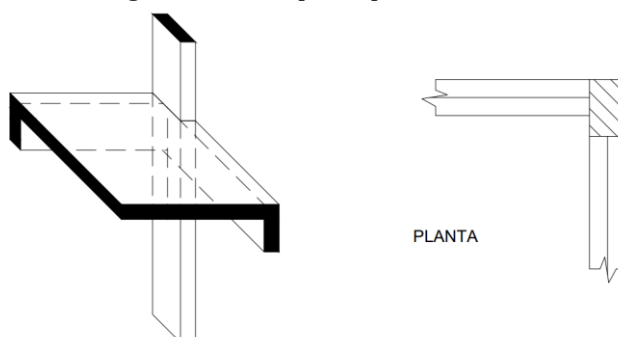
Fonte: ADAPTADO DE BASTOS (2015).

2) Pilares de extremidade: Localizam-se nas extremidades das vigas e suportam parte das cargas próximas, permitindo redistribuição dos esforços. Em algumas situações, sofrem flexão composta normal, devido à descontinuidade da viga, o que gera excentricidades de primeira ordem (desalinhamento da força aplicada com o centro geométrico do pilar) e momentos fletores (Figura 9).

Figura 9 - Exemplo de pilar de extremidade

Fonte: ADAPTADO DE BASTOS (2015).

3) Pilares de canto: Sustentam duas vigas que se encontram formando um canto da edificação, submetendo-se à flexão composta oblíqua (Figura 10). Apresentam excentricidades de primeira ordem em duas direções (e_{1x} e e_{1y}) nas seções de topo e base, gerando momentos fletores correspondentes. O dimensionamento considera as forças normais, momentos fletores e forças cortantes advindas das ações horizontais.

Figura 10 - Exemplo de pilar de canto

Fonte: ADAPTADO DE BASTOS (2015).

A compreensão das características dos pilares – em especial, sua tipologia, localização e os materiais utilizados em sua execução – é fundamental para o redimensionamento proposto nessa pesquisa. Dado seu papel central na estabilidade global de uma estrutura, qualquer alteração em suas seções deve observar rigorosamente os critérios normativos, bem como os aspectos funcionais e estruturais descritos nessa seção. A seguir, será apresentada a análise dos estados-limite, indispensável para o dimensionamento seguro e eficiente desses elementos.

3.1.3 Estado-limite último

O termo estado-limite último (ELU) é um conceito fundamental na engenharia civil, especialmente, no campo da engenharia estrutural e no dimensionamento de estruturas. Trata-se de um critério vinculado à segurança e integridade da construção, representando o ponto máximo de resistência que uma estrutura pode suportar antes de apresentar falha ou colapso.

De forma mais específica, o ELU corresponde ao limite de carga além do qual a estrutura não é mais capaz de garantir seu desempenho, seja por ruptura, perda de estabilidade, deformação plástica excessiva ou outros modos de falha. A partir desse ponto, a aplicação de quaisquer cargas adicionais comprometerá seriamente a segurança da edificação.

Segundo a ABNT NBR 8681:2004, os estados-limites últimos são definidos como aqueles que, se atingidos, determinam a interdição parcial ou total do uso da estrutura, devido à perda da sua capacidade resistente ou de equilíbrio.

Os principais fatores que podem levar uma estrutura a exceder o ELU incluem utilização inadequada de materiais ou métodos construtivos; perda de equilíbrio (global ou parcial); ruptura ou plastificação dos materiais; transformação da estrutura em sistema hipostático; instabilidades por deformação (efeito *P-Delta*) ou dinâmicas; ações externas imprevisíveis, como impactos, abalos sísmicos, incêndios ou condições ambientais extremas.

O ELU está diretamente relacionado às ações permanentes e variáveis que incidem sobre a estrutura. Para analisar essas ações e garantir a segurança, são utilizados coeficientes de ponderação, conforme estabelece a ABNT NBR 6118:2023.

Tais coeficientes são aplicados no dimensionamento das estruturas para garantir que a resistência da edificação seja compatível com os carregamentos esperados ao longo de sua vida útil. A Equação 4 apresenta a forma de cálculo desses coeficientes, e o Quadro 2 apresenta os valores recomendados para os estados-limite últimos, de acordo com as diferentes categorias de ações.

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \times \gamma_{f3} \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo que:

γ_f : coeficiente de ponderação global;

γ_{f1} : coeficiente de ponderação parcial;

γ_{f3} : fator de ponderação adicional.

Quadro 2: Coeficientes de ponderação das ações nos estados-limite últimos.

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4 ^a	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

Onde:

D é desfavorável, F é favorável, G representa as cargas variáveis, em geral, e T é a temperatura.

^a para as ações permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3. Neste caso, as demais ações permanentes devem ser ponderadas conforme a norma ABNT 8681:2003. Versão corrigida: 2004, Tabela 1.

Fonte: ABNT, 2023.

O Quadro 3 ilustra os valores de γf_2 , que também compreendem aos coeficientes de ponderação para cálculo do ELU.

Quadro 3: Coeficientes de ponderação das ações no ELU: valores dos coeficientes γf_2 .

Ações		γf_2		
		ψ_0	ψ_1^a	ψ_2
Cargas de utilização de edificações	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3

^a para os valores de ψ_1 relativos às pontes e, principalmente para os problemas de fadiga.

^b áreas com ocupação residencial ou hospedagem e áreas de acesso restrito.

^c Áreas com ocupação comercial, de escritórios, lojas, estações de passageiros, edifícios públicos e áreas de acesso público.

Fonte: ABNT, 2023.

Determinar os parâmetros que permitem calcular os ELU é uma forma de garantir a segurança dos usuários da edificação e de seu entorno. A correta aplicação dos coeficientes de ponderação assegura a estabilidade estrutural da obra, o que deve ser feito com base na análise de estruturas similares, na utilização de teorias quantitativas e no embasamento nas normas técnicas aplicáveis, aquelas que abordam a resistência dos materiais, os efeitos das ações sobre

a estrutura e, sobretudo, o dimensionamento e a estabilidade das estruturas (ABNT NBR 8681:2004; ABNT NBR 6118:2023).

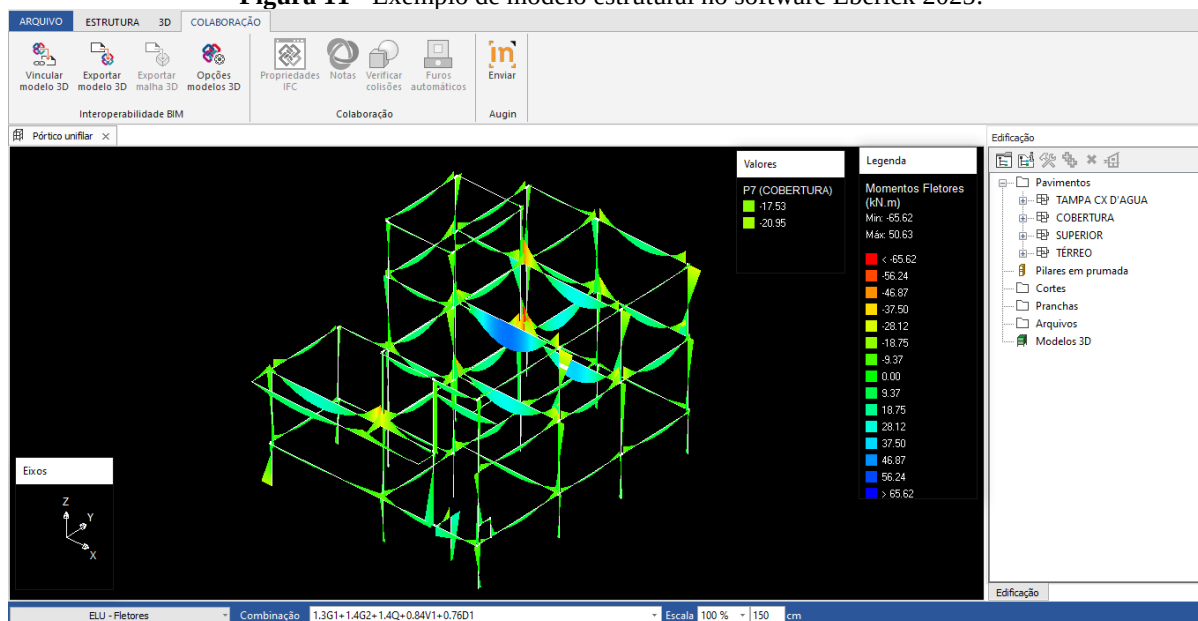
3.2 ESTABILIDADE GLOBAL DA ESTRUTURA

Entende-se por estabilidade global de uma estrutura a capacidade da edificação manter-se em equilíbrio, mesmo sob a ação de forças externas ou internas, sem colapsar. Ainda que tais interferências estejam presentes, considera-se que a estrutura é estável quando suporta essas ações e mantém suas condições de funcionamento.

Para garantir a referida estabilidade, a estrutura deve apresentar adequada distribuição e resistência às cargas, sistema de contraventamento, equilíbrio estrutural, resistência à flambagem global, interação solo-estrutura e capacidade de resistir às ações excepcionais, como abalos sísmicos. A ABNT NBR 6118:2023 destaca que, durante a análise da estabilidade global, pode ser necessária a adoção de diferentes modelos estruturais, visando obter a solução mais segura, viável e econômica para o projeto.

A Figura 11 ilustra um modelo estrutural gerado no *software Eberick 2025*, que representa os caminhos dos esforços até os apoios da estrutura — parâmetros essenciais na avaliação da estabilidade global.

Figura 11 - Exemplo de modelo estrutural no *software Eberick 2025*.

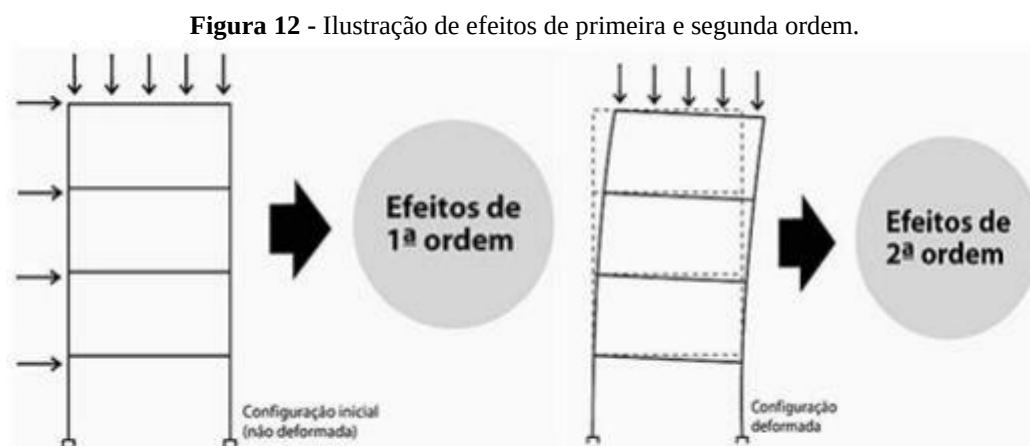


Fonte: INBEC, 2021.

Ainda sobre a Figura 11, nela é possível visualizar abas de ferramentas que abragem os principais parâmetros a serem observados na investigação da estabilidade global de uma estrutura, de acordo com a ABNT NBR 6118:2023, como: a geometria dos elementos estruturais, os carregamentos atuantes, as condições de contorno, as propriedades dos materiais utilizados e suas respostas mecânicas.

3.2.1 Efeitos de segunda ordem

Diferentemente dos efeitos de primeira ordem – nos quais a estrutura é considerada indeformada – os efeitos de segunda ordem implicam na consideração das deformações sofridas pela estrutura sob as ações aplicadas. A Figura 12 ilustra comparativamente os dois efeitos: no primeiro caso, há distribuição de cargas sem alteração significativa da geometria; no segundo, o carregamento provoca deformações que influenciam nos esforços internos.



Fonte: VALANDRO; TROMBETTA, 2016.

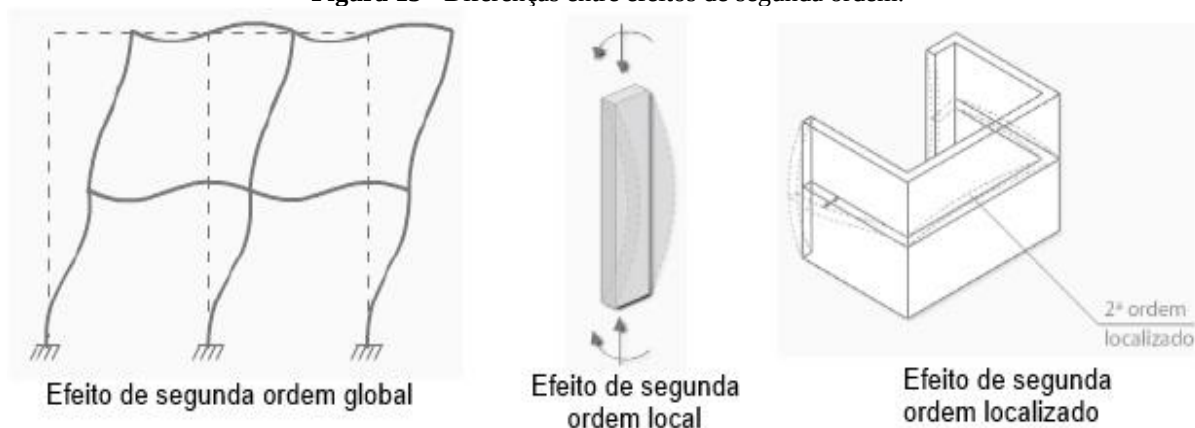
A análise global dos esforços deve considerar a soma dos efeitos de primeira e segunda ordem, pois, ambos estão sempre presentes na construção de edifícios. Os efeitos de segunda ordem exercem influência direta sobre os esforços solicitantes, podendo comprometer a segurança da edificação se não forem corretamente considerados (ABNT, 2023).

Os referidos efeitos são classificados, conforme ilustrado na Figura 13, em:

- **Efeitos globais de segunda ordem:** ocorrem quando há deslocamento generalizado dos nós estruturais, como no caso de ação de vento;
- **Efeitos locais de segunda ordem:** manifestam-se em elementos isolados, como pilares específicos;

- **Efeitos localizados de segunda ordem:** limitam-se a regiões específicas da estrutura.

Figura 13 - Diferenças entre efeitos de segunda ordem.



Fonte: KRISTEN, 2017.

Desse modo, a compreensão e a correta consideração dos efeitos de segunda ordem são fundamentais para a análise estrutural, especialmente em edifícios de múltiplos pavimentos. Esses efeitos, ao interagirem com os esforços de primeira ordem, alteram significativamente o comportamento da estrutura e, portanto, devem ser incorporados nos modelos de cálculo conforme estabelecido pelas normas técnicas. A distinção entre os efeitos globais, locais e localizados de segunda ordem permite uma avaliação mais precisa das instabilidades potenciais, contribuindo para a segurança e a eficiência do dimensionamento estrutural.

3.2.2 Parâmetros de estabilidade global

A avaliação da estabilidade global requer a consideração conjunta dos efeitos de segunda ordem e dos parâmetros estruturais da edificação. A análise pode ser realizada de duas formas: linear ou não linear. Em resumo, a primeira considera uma relação proporcional entre forças e deformações, válida para pequenas deformações. Baseia-se na suposição de que os materiais seguem a Lei de Hooke; enquanto a segunda incorpora efeitos geométricos e materiais mais complexos, sendo adequada para estruturas com grandes deformações ou submetidas a ações intensas, como as ações de ventos fortes ou instabilidades estruturais. A seguir, ambas serão melhor detalhadas.

A **análise global linear** da estrutura consiste em um método utilizado na engenharia civil, capaz de avaliar o comportamento da estrutura de um edifício sob a ação de diferentes tipos de cargas. Diante disso, é considerada a relação linear entre forças e deformações. Para

esse tipo de análise, deve-se considerar que as deformações sofridas são pequenas e os materiais submetidos a tais deformações obedecem à Lei de Hooke, dada pela Equação 5.

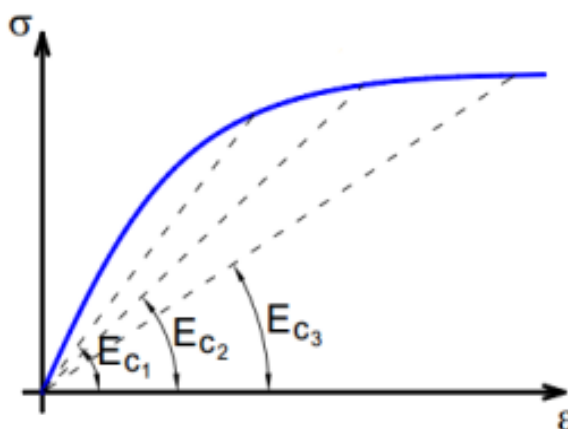
$$\|\vec{F}\| = k \cdot x \quad (\text{Eq. 5})$$

A Lei de Hooke estabelece que a relação entre tensão e deformação é linear e proporcional, desde que o material não ultrapasse seu limite elástico. A ABNT NBR 6118:2023 destaca que a análise linear é amplamente utilizada na verificação do ELS. Os esforços solicitantes obtidos por meio dessa análise podem ser utilizados como base para o dimensionamento dos elementos estruturais no ELU, desde que se considere a possibilidade de plastificação dos materiais, assegurando, no entanto, uma ductilidade mínima nas peças estruturais (ABNT, 2023).

A **análise global não linear** é especialmente aplicável a estruturas com alto grau de exigência estética e arquitetônica, como os edifícios de padrão elevado. No caso do concreto armado, essa análise tende a ser mais complexa, considerando a interação entre dois materiais distintos, o concreto e o aço, os quais apresentam comportamentos mecânicos diferentes sob solicitação. Tal complexidade se traduz, muitas vezes, em diagramas tensão versus deformação com comportamento não linear e variável, conforme a classe de resistência dos materiais utilizados (VALANDRO; TROMBETTA, 2016).

Complementar à definição supracitada, a Figura 14 ilustra esse tipo de interação entre as grandezas físicas de tensão e deformação. Conforme o gráfico demonstrado, observa-se que a relação entre essas variáveis deixa de ser proporcional à medida que as solicitações aumentam, caracterizando uma análise não linear.

Figura 14 - Diagrama tensão-deformação não linear.



Fonte: VALANDRO; TROMBETTA, 2016.

Esse tipo de diagrama expressa a resposta da estrutura a carregamentos progressivos, revelando alterações no comportamento estrutural à medida que os esforços se intensificam. Nesses casos, dois tipos de não linearidade devem ser considerados:

- **Não linearidade física (NLF):** refere-se ao comportamento não linear dos materiais constituintes da estrutura, como o escoamento do aço ou o esmagamento do concreto;
- **Não linearidade geométrica (NLG):** relaciona-se à mudança de geometria da estrutura durante o carregamento, trata-se do deslocamento lateral dos elementos ou dos nós da estrutura, implicando diretamente nos efeitos globais de segunda ordem (VALANDRO; TROMBETTA, 2016).

O deslocamento horizontal da estrutura provoca excentricidades nas cargas verticais, que anteriormente estavam alinhadas ao eixo dos elementos estruturais, gerando novos momentos fletores e exigindo atenção no dimensionamento.

Para fins de cálculo, as estruturas são consideradas como de nós fixos quando os deslocamentos horizontais dos nós são pequenos. Nesses casos, os efeitos globais de segunda ordem são usualmente desprezíveis, desde que inferiores a 10% dos respectivos esforços de primeira ordem. Assim, considera-se apenas os efeitos locais e localizados de segunda ordem.

Por outro lado, estruturas com nós móveis são aquelas em que os deslocamentos horizontais dos nós são significativos, e os efeitos globais de segunda ordem se tornam relevantes, ou seja, superiores a 10% dos esforços de primeira ordem. Nesses casos, é necessário considerar tanto os efeitos globais quanto os locais e localizados de segunda ordem (ABNT, 2023).

Como a presente pesquisa está delimitada à análise e redimensionamento dos pilares de um edifício, os conceitos aqui apresentados servirão como base teórica e embasamento técnico para o desenvolvimento dos cálculos, admitindo a Equação 6.

$$\text{Pilares: } (El)_{sec} = 0,8 E_c l_c \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

E_c – é o módulo de deformação do concreto.

l_c – é o momento de inércia da seção bruta de concreto.

A deformação elástica do concreto depende da composição do traço, em especial da natureza dos agregados utilizados. Ao analisar o comportamento de um elemento estrutural, ou

mesmo de uma seção transversal, pode-se adotar um módulo de elasticidade único, representado pelo módulo de deformação secante, denotado por E_{cs} (ABNT, 2023).

Na prática, ao aplicar esses conceitos, realiza-se uma análise global da estrutura. Para isso, devem ser considerados os seguintes elementos: um parâmetro de instabilidade α (cujo aprofundamento foge ao escopo desse estudo), o coeficiente γ_z e o processo *P-Delta*, esses correspondem à pesquisa e serão abordados individualmente a seguir.

3.2.2.1 Coeficiente γ_z

O coeficiente γ_z é definido como um parâmetro utilizado no cálculo estrutural para avaliar a estabilidade global de edificações. Sua principal função é estimar o efeito de amplificação das ações de segunda ordem em elementos comprimidos, como pilares ou colunas. Considerando a perspectiva de redimensionamento de pilares, o coeficiente γ_z torna-se especialmente relevante, uma vez que permite avaliar, de forma prática, a influência dos deslocamentos laterais na estabilidade da estrutura, além de possibilitar a obtenção dos esforços finais sem a necessidade de considerar separadamente os momentos de primeira e segunda ordem (SILVA NETO, 2021).

Esse coeficiente considera os efeitos de deformação e deslocamentos horizontais que atuam sobre elementos comprimidos, podendo indicar situações de instabilidade ou até mesmo o risco de flambagem. A ABNT NBR 6118:2023 especifica que o coeficiente γ_z deve ser utilizado preferencialmente em edificações com quatro ou mais pavimentos, permitindo uma avaliação simplificada da estabilidade global da estrutura.

Além disso, o coeficiente γ_z pode ser obtido a partir dos resultados de uma análise linear de primeira ordem, utilizando os valores de momentos e forças conforme descrito na Equação 7:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{tot,d}}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

$M_{1,tot,d}$ - é o momento de tombamento total da estrutura (soma dos momentos de todas as forças horizontais em relação à base);

$\Delta M_{tot,d}$ - é a soma dos produtos das forças verticais pelos deslocamentos horizontais de seus pontos de aplicação, obtidos na análise de primeira ordem.

Quando $\gamma_z \leq 1,10$, considera-se que a estrutura apresenta nós fixos e que os efeitos globais de segunda ordem podem ser desprezados. Caso contrário, é necessário levar em conta os efeitos globais, além dos efeitos locais e localizados (ABNT, 2023; FREGONEZI, 2017).

Com base na Equação 7, vê-se que o coeficiente γ_z denota a relação entre dois momentos, onde os valores utilizados nos cálculos devem ser obtidos para uma mesma seção, na qual o numerador é calculado com a consideração da análise não-linear e o denominador, a partir de análise linear (SILVA NETO, 2021). Nessa análise, será calculado: o momento de primeira ordem (M_1) em relação à base da estrutura e os deslocamentos horizontais de cada pavimento. Assim, verifica-se que há o surgimento de acréscimos de momentos (ΔM_2) provenientes dos deslocamentos conjugados com as ações verticais solicitantes, e que esses acréscimos proporcionam o surgimento de novos deslocamentos (FREGONEZI, 2017). Esse processo ocorre sucessivamente, em forma de série, ao longo de várias etapas, diminuindo ao longo dessas até que a estrutura atinja a estabilidade. O que pode ser exemplificado através da Equação 8.

$$M_2 = M_1 + \Delta M_2 + \Delta M_3 + \Delta M_4 + \dots + \Delta M_j \quad (\text{Eq. 8})$$

Esse processo iterativo reflete o comportamento real da estrutura até que se atinja a estabilidade final do sistema.

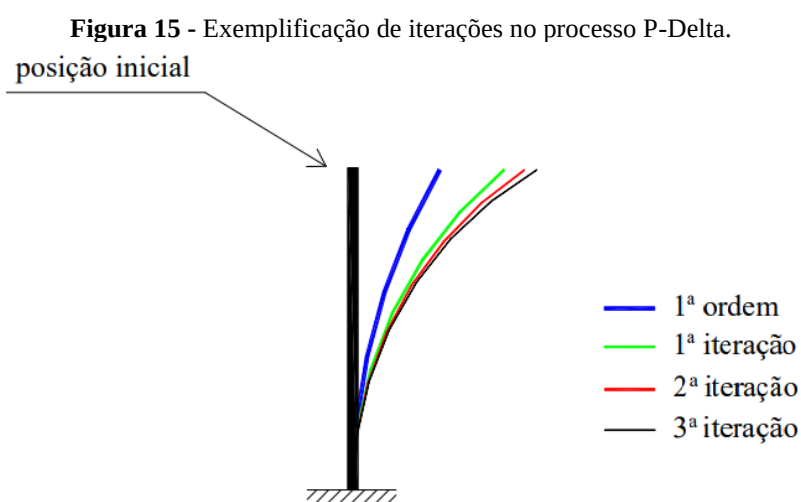
Dessa forma, o coeficiente γ_z revela-se uma ferramenta essencial para a avaliação da estabilidade global de edificações, especialmente, em estruturas altas, nas quais os deslocamentos horizontais e os efeitos de segunda ordem exercem influência significativa no comportamento estrutural.

3.2.2.2 Processo *P-Delta*

O processo *P-Delta*, embora não seja um parâmetro de estabilidade propriamente dito, é uma metodologia empregada para determinar os esforços estruturais resultantes dos efeitos globais de primeira e segunda ordem. A sua aplicação baseia-se em uma análise não linear geométrica, na qual ocorre a associação entre carga axial (P) e deslocamento horizontal (Δ), utilizando procedimentos iterativos. A escolha do método mais apropriado é feita a critério do

engenheiro responsável, considerando o grau de importância da estrutura e sua sensibilidade aos efeitos globais de segunda ordem (FREGONEZI, 2017).

O método mais tradicional para aplicação do processo *P-Delta* é o Método da Carga Lateral Fictícia, também conhecido como Método *P-Delta* Clássico. Nele, após a realização da análise linear de primeira ordem, são feitas sucessivas iterações com deformações crescentes até que se alcance o equilíbrio estrutural. A Figura 15 ilustra essas iterações, mostrando o deslocamento progressivo da estrutura.

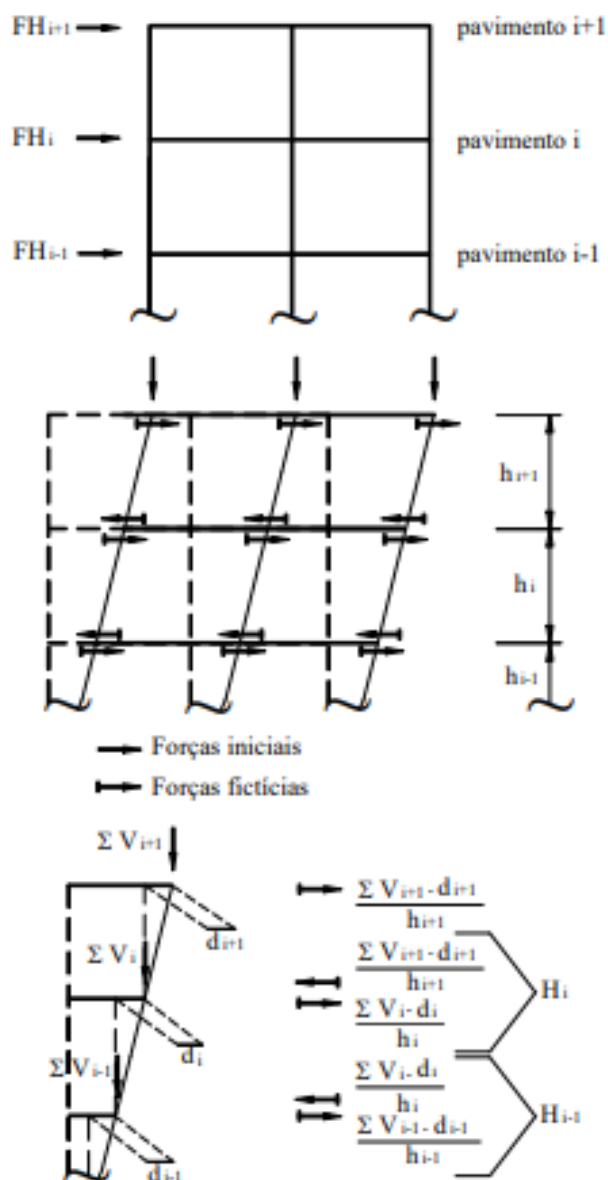


Fonte: LIMA, 2001.

Durante a análise, as forças horizontais e verticais são combinadas para gerar momentos fletores, os quais originam forças horizontais fictícias. Essas são somadas às forças horizontais originais, obtendo assim as forças horizontais modificadas, que refletem com maior precisão o comportamento real da estrutura (Figura 16).

Com base nas novas forças horizontais, são obtidos novos deslocamentos, que alimentam o ciclo iterativo até a convergência dos resultados. O processo *P-Delta* é, portanto, essencial para garantir que as análises estruturais considerem com precisão os efeitos não lineares que afetam a estabilidade global da edificação.

Figura 16 - Situação não deslocada < Situação deslocada < Análise das forças.



Fonte: LIMA, 2001.

O processo *P-Delta* configura-se como uma ferramenta indispensável na análise estrutural de edificações sensíveis aos efeitos de segunda ordem, permitindo a consideração precisa das interações entre cargas verticais e deslocamentos horizontais. Embora não seja um parâmetro normativo, sua aplicação complementa os métodos tradicionais ao proporcionar uma avaliação mais realista do comportamento estrutural frente às deformações sucessivas. A abordagem iterativa do método, especialmente na forma clássica por carga lateral fictícia, assegura que os esforços finais reflitam adequadamente as não linearidades geométricas, contribuindo para um dimensionamento mais seguro e conforme as exigências de desempenho estrutural.

3.3 CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

O concreto é um material heterogêneo, amplamente utilizado na construção civil devido à sua facilidade de moldagem e desempenho estrutural. Ele resulta da combinação de cimento, água e agregados finos e graúdos, podendo ter suas propriedades ajustadas por meio de aditivos, bem como pela escolha do tipo de cimento e da granulometria dos agregados (BASTOS, 2015).

O concreto armado combina o concreto com armaduras de aço, unindo suas propriedades de forma complementar: o aço suporta esforços de tração, enquanto o concreto resiste à compressão, resultando em um material estrutural mais eficiente do que os componentes isolados.

Entre os tipos de concreto, o CAR destaca-se por resistências superiores ao concreto convencional. Produzido com cimento Portland tradicional, agregados selecionados e dosagem rigorosa de seus componentes – cimento, água, agregados e aditivos – o CAR garante elevada resistência mecânica e boa trabalhabilidade. Além disso, apresenta baixa permeabilidade, elevada estabilidade dimensional, resistência ao ataque de agentes agressivos e maior durabilidade em condições adversas (PEINADO; VANDERLEI; NAGANO, 2014).

Outro diferencial do CAR é sua elevada coesão interna, que permite melhor trabalhabilidade sem excesso de água, reduzindo o risco de fissuração por retração, característica particularmente importante em elementos delgados, como pilares e lajes esbeltas (AÏTCIN, 2019; SCHNEIDER; MEIER, 2019). O controle rigoroso da dosagem e da homogeneidade dos materiais é essencial para garantir desempenho uniforme, pois pequenas variações podem impactar significativamente a resistência e a durabilidade do material (THOMAS et al., 2020). Adições minerais, como sílica ativa e metacaulim, aumentam a resistência mecânica e reduzem a permeabilidade, prolongando a vida útil das estruturas (SANTOS et al., 2021).

O comportamento do CAR a longo prazo também merece destaque: devido à baixa porosidade e elevada densidade, apresenta menor retração e fluência, reduzindo tensões internas e mantendo a durabilidade mesmo sob cargas contínuas e variações térmicas (ACI COMMITTEE 363, 2017). Essa característica permite seu uso em projetos de alta exigência estrutural, como pontes, edifícios altos e estruturas expostas a ambientes agressivos.

No Brasil, o concreto é considerado de alta resistência a partir de 55 MPa (NBR 8953:2024), exigindo ensaios que comprovem sua resistência e adequação à estrutura projetada. Historicamente, concretos de elevada resistência já eram observados desde a Antiguidade, embora obtidos incidentalmente e sem a intenção de produzir CAR. A evolução técnica do

CAR, desde a década de 1950, incluiu o uso sistemático de aditivos, cinzas volantes, microsilica e superplastificantes, possibilitando concretos com resistência superior a 100 MPa e baixa permeabilidade (SILVA, 1995).

O Quadro 4 apresenta a classificação internacional do CAR, com base em sua resistência característica à compressão:

Quadro 4 – Determinação internacional do CAR.

Localidade	MPa
Comitê Euro-internacional Du Béton (1990)	> 50 MPa
American Concrete Institute (1992)*	62 a 103 MPa
Brasil (2014/2015)**	55 a 99 MPa

* Atual: ACI 363R-10 (reafirmado em 2016).

** Atual: NBR 8953:2015 (em vigor).

Fonte: ADAPTADO DE CARVALHO, FIGUEIREDO FILHO, 2017; FREGONEZI, 2017.

O desempenho do CAR depende do controle rigoroso da produção, da homogeneidade dos materiais e da cura adequada, garantindo que as propriedades obtidas em laboratório sejam reproduzidas na obra (ACI COMMITTEE 363, 2017; THOMAS et al., 2020). Sua elevada resistência possibilita a redução de seções estruturais, diminuindo o consumo de materiais e o peso próprio das edificações, além de permitir fundações mais econômicas (SCHNEIDER; MEIER, 2019).

A durabilidade é igualmente favorecida, com menor permeabilidade e maior resistência à penetração de agentes agressivos, como cloretos e CO₂, que podem causar corrosão da armadura. A combinação de adições minerais e superplastificantes aumenta a resistência mecânica e prolonga a vida útil, tornando o CAR adequado para ambientes severos (SANTOS et al., 2021).

Embora ainda haja escassez de publicações específicas sobre seu uso, estudos recentes abordam sua aplicação em pilares, vigas e lajes, considerando a estabilidade global de edifícios, com trabalhos de destaque como dos autores Paixão e Alves (2017), Vieira (2017), Fregonezi (2019) e Lazarini (2019).

3.3.1 A estabilidade global em edifícios com múltiplos pavimentos

Embora o estudo de Paixão e Alves (2017) não tenha se centrado especificamente no uso do CAR, sua relevância para este trabalho se justifica pela análise da estabilidade global de

edificações com múltiplos pavimentos sob diferentes hipóteses de contraventamento. Os autores desenvolveram um modelo estrutural fictício de edifício alto, sob três cenários distintos de contraventamento: pórticos, núcleos rígidos e sistemas do tipo pilar-parede.

A análise considerou ligações do tipo rígidas e semi-rígidas entre os elementos estruturais, totalizando seis modelos, com espaçamento entre pilares de aproximadamente 13 metros e altura total de 52 metros. As simulações foram realizadas no *software Eberick V9*, amplamente utilizado em projetos estruturais, que permite a consideração automática das ações permanentes e acidentais com base no modelo inserido.

Para efeitos de carga, os autores adotaram cargas permanentes $\approx 1,5 \text{ kN/m}^2$ e cargas acidentais $\approx 2,0 \text{ kN/m}^2$.

Além disso, a ação do vento foi considerada com base na norma ABNT NBR 6123:2023 – atualmente ainda em vigor, apesar de ser tecnicamente defasada frente a normas internacionais mais recentes. A norma estabelece critérios para classificação da edificação, definição do fator estatístico e coeficientes de arrasto.

Os seis modelos estruturais considerados estão organizados no Quadro 5.

Quadro 5 – Modelos estruturais analisados por Paixão e Alves (2017).

Número do modelo	Sistema estrutural	Tipo de ligação
1	Pórticos	Rígido
2	Pórticos	Semi-rígido
3	Núcleo rígido “U”	Rígido
4	Núcleo rígido “U”	Semi-rígido
5	Pilar-parede	Rígido
6	Pilar-parede	Semi-rígido

Fonte: PAIXÃO; ALVES (2017).

A variação das seções transversais dos pilares foi realizada com o objetivo de manter o coeficiente γ_z próximo do limite de 1,3, conforme estabelecido pela ABNT NBR 6118:2023.

Durante as análises, Paixão e Alves (2017) observaram que a introdução de ligações semi-rígidas contribuiu significativamente para o aumento dos deslocamentos horizontais e dos esforços solicitantes nas estruturas. Isso ocorre porque a menor participação das vigas no contraventamento compromete a rigidez global do sistema estrutural, o que pode resultar em maiores custos com fundações e estrutura.

Com base nos resultados, os autores concluíram que todos os modelos são viáveis para execução, embora apresentem variações consideráveis nos custos e desempenho estrutural. A escolha do sistema estrutural deve considerar não apenas a estabilidade, mas também fatores como estética arquitetônica e viabilidade econômica. Por exemplo:

- **Pórticos:** recomendados como primeira opção devido à simplicidade e estética, porém, pouco eficientes em edificações de grande altura;
- **Núcleo rígido:** proporciona boa estabilidade global com possibilidade de redução das seções dos pilares, embora essa abordagem não tenha sido o foco da análise no estudo em questão;
- **Pilar-parede:** apresenta boa rigidez, mas pode impactar negativamente o projeto arquitetônico.

Em síntese, a pesquisa evidenciou a importância da escolha criteriosa do sistema de contraventamento e da rigidez das ligações na definição da estabilidade global de estruturas altas. Embora não tenha utilizado CAR, o estudo fornece uma base sólida para o entendimento dos impactos que o uso desse tipo de concreto pode ter, sobretudo, no redimensionamento e na eficiência estrutural de pilares em edifícios de múltiplos pavimentos.

3.3.2 Comparativo da estabilidade global em edifícios fazendo uso do γ_z

Vieira (2017) desenvolveu uma análise comparativa entre o coeficiente de estabilidade global γ_z e o fator de carga crítica global de flambagem, visando avaliar o comportamento estrutural de edifícios de concreto armado com diferentes configurações de pavimentos e pilares. A proposta do autor foi comparar esses dois parâmetros sob o ponto de vista da estabilidade global, com base em uma série de modelos simulados compostos por pórticos espaciais, mantendo a mesma geometria da fôrma e variando a quantidade de pavimentos e pilares.

Para a modelagem computacional, Vieira (2017) utilizou o *software* SAP2000, amplamente reconhecido por sua precisão na análise estrutural pelo método dos elementos finitos. Nesse processo, os pilares e vigas foram modelados como elementos de barra com trechos rígidos nas ligações viga-pilar, conforme recomenda a ABNT NBR 6118:2014. Embora a norma tenha sido atualizada para a versão ABNT NBR 6118:2023, os critérios adotados por Vieira permanecem válidos, uma vez que a metodologia de discretização estrutural e os critérios para rigidez entre elementos estruturais mantiveram-se consistentes na nova versão da norma.

As lajes foram representadas como elementos de placa, com efeito de diafragma rígido na distribuição dos esforços horizontais, o que permitiu simular com precisão a transferência de esforços entre os pavimentos. A não linearidade física foi abordada de forma aproximada, por meio da redução da rigidez dos elementos estruturais, conforme permitido pela norma técnica.

Em relação à ação do vento, Vieira (2017) seguiu os critérios da norma ABNT NBR 6123:2023, atualmente em vigor, ainda que tecnicamente defasada frente a normas internacionais mais recentes como a EN 1991-1-4:2005 (Eurocode) e a ASCE/SEI 7-22. A norma brasileira, contudo, segue sendo referência normativa nacional obrigatória.

Para o desenvolvimento da análise comparativa, Vieira (2017) utilizou 25 versões distintas de edifícios simulados, variando a quantidade de pavimentos e o número de pilares. Apesar de não considerar os ELU nem as dimensões mínimas normativas dos pilares, a distância entre fundação e pavimentos foi mantida constante em todos os modelos. O objetivo a influência dos parâmetros γ_z e λ (índice de estabilidade global) no comportamento estrutural global.

Como resultado, o autor identificou que a relação entre os parâmetros γ_z e λ é quase linear até o valor de $\gamma_z \approx 1,50$, o que permitiu propor uma equação de correlação entre os dois índices, como exposto na Equação 9.

$$\lambda = \frac{\gamma_z}{\gamma_z - 1} \quad (\text{Eq. 9})$$

Com base na Equação 9, Vieira (2017) demonstrou que é possível estimar o grau de afastamento de uma estrutura em relação ao seu ponto crítico de instabilidade apenas com base no coeficiente γ_z . Nos modelos idealizados, os erros verificados para o uso da equação foram:

- Inferiores a 15%, nos casos contrários à segurança;
- Inferiores a 10%, nos casos favoráveis à segurança.

Para validar sua proposta, o autor aplicou a metodologia a três edifícios reais, alcançando resultados satisfatórios no que se refere à estabilidade elástica global. No entanto, Vieira (2017) alertou que o parâmetro γ_z pode não ser suficiente para a análise de estruturas cujo modo crítico de instabilidade seja por torção, sendo necessário, nesses casos, complementar a análise com outros critérios, como os modos de flambagem lateral-torcional e análise modal de instabilidade.

A pesquisa reforça que, embora o γ_z seja um parâmetro amplamente aceito e de fácil aplicação (conforme a ABNT NBR 6118:2023), sua aplicação deve considerar as limitações impostas pelas características geométricas e dinâmicas da estrutura.

3.3.3 Influência do CAR no redimensionamento de pilares

Fregonezi (2019) investigou a influência do aumento da resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) na deformabilidade e nos parâmetros de estabilidade global em edifícios com múltiplos pavimentos, empregando um modelo computacional de pórtico espacial. A análise foi conduzida com auxílio da plataforma *CAD/TQS*, considerando a interação das lajes com o pórtico estrutural por meio do efeito de diafragma rígido, o que possibilitou uma aproximação do comportamento real da estrutura.

A metodologia adotada teve como base o ELU, considerando a não linearidade física dos elementos estruturais por meio da redução do produto EI (módulo de elasticidade $\times$ inércia), conforme as proporções abaixo, recomendadas pela NBR 6118:2023:

- Lajes: $(EI)_{sec} = 0,3 E_c I_c$
- Vigas: $(EI)_{sec} = 0,4 E_c I_c$
- Pilares: $(EI)_{sec} = 0,8 E_c I_c$

Além disso, foram estimadas as ações do vento sobre a estrutura, com base na norma ABNT NBR 6123:2023. Fregonezzi (2019) também elencou as ações das cargas na laje e nas vigas, apreciando cargas permanentes e acidentais já pré-determinadas pelos *CAD/TQS*. O autor dispôs do dimensionamento original do prédio, destacando que o edifício em análise possuía núcleo rígido, que exercia função de contraventamento. Assim, relacionou os esforços com as dimensões e propôs o aumento gradativo do f_{ck} do concreto aumentando de 5 em 5 MPa, partindo de 35 MPa até atingir 90 MPa. As seções transversais dos pilares foram otimizadas (para cada f_{ck}), fixando as larguras em 25 cm e reduzindo as alturas de forma iterativa, buscando manter os esforços resistentes da seção bem próximos dos esforços solicitantes, por meio da envoltória de momentos resistentes do pilar e visando atender às restrições normativas quanto à deslocabilidade horizontal do edifício (FREGONEZZI, 2019).

Quanto aos resultados obtidos, Fregonezzi (2019) não alterou nada nas peças que não fossem pilares, desconsiderando também o núcleo rígido. Ao ampliar o f_{ck} do concreto substituindo-o pelo CAR, o resultado foram pilares com 25 cm de largura e redução da altura

das seções transversais. No estudo, não foram observados os parâmetros de estabilidade global, a deslocabilidade horizontal e o efeitos de segunda ordem. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 17. Nota-se que, conforme o f_{ck} aumentava, houve a possibilidade de reduzir a altura dos pilares. Com base nos resultados mostrados, a redução da área total dos pilares ficou estabelecida em 32,26% após aumentar o f_{ck} do concreto de 35 MPa para 90 MPa.

Figura 17 - Variações de altura das seções transversais dos pilares frente ao aumento do f_{ck} .

Alturas mínimas das seções transversais dos pilares

f_{ck} (MPa)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
35	1,50	2,00	2,20	2,00	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	2,20	2,80	2,20	1,50
35 - Ot	1,35	1,65	1,40	1,65	1,50	0,85	0,85	0,60	0,60	1,30	1,75	1,65	1,95	1,50
40	1,20	1,60	1,35	1,65	1,40	0,60	0,80	0,60	0,60	1,30	1,65	1,50	1,75	1,50
45	1,05	1,55	1,35	1,60	1,20	0,60	0,60	0,60	0,60	1,30	1,65	1,40	1,70	1,45
50	0,90	1,55	1,30	1,55	1,05	0,60	0,60	0,60	0,60	1,30	1,65	1,40	1,65	1,25
55	0,80	1,50	1,30	1,55	0,95	0,60	0,60	0,60	0,60	1,20	1,55	1,40	1,65	1,15
60	0,70	1,45	1,30	1,45	0,85	0,60	0,60	0,60	0,60	0,95	1,55	1,35	1,55	1,05
65	0,70	1,35	1,30	1,40	0,80	0,60	0,60	0,60	0,60	0,95	1,55	1,30	1,55	0,95
70	0,65	1,30	1,30	1,35	0,75	0,60	0,60	0,60	0,60	0,95	1,50	1,30	1,55	0,90
75	0,65	1,30	1,30	1,35	0,70	0,60	0,60	0,60	0,60	0,85	1,45	1,30	1,55	0,85
80	0,60	1,30	1,30	1,30	0,65	0,60	0,60	0,60	0,60	0,80	1,40	1,30	1,55	0,80
85	0,60	1,30	1,20	1,20	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,75	1,35	1,30	1,45	0,75
90	0,60	1,20	1,15	1,20	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,70	1,35	1,30	1,45	0,65

Fonte: FREGONEZZI, 2019.

Frente aos resultados, Fregonezzi (2019) considerou que, ao otimizar as seções dos pilares, a estrutura ficou mais suscetível aos deslocamentos horizontais, e esses, por sua vez, foram o fator limitante para a redução das seções, já que ultrapassar tal limitação comprometeria a segurança da edificação. O limite de 90 Mpa foi considerado um fator limitante a deslocabilidade horizontal do topo da construção.

Fregonezzi (2019) concluiu que os deslocamentos horizontais, tanto de topo quanto entre os pavimentos, aumentaram conforme a resistência à compressão aumentou e, consequentemente, reduziu-se a área dos pilares. Em comparativo entre o início e o fim da análise, o autor constatou um aumento no deslocamento horizontal superior a 15%. Nas conclusões, o autor também verificou os parâmetros de estabilidade global da estrutura α e γ_z e constatou que, como os dois parâmetros são influenciados pelo peso próprio da estrutura e pela redução da rigidez, seus resultados diminuiram à medida que as seções dos pilares foram reduzidas.

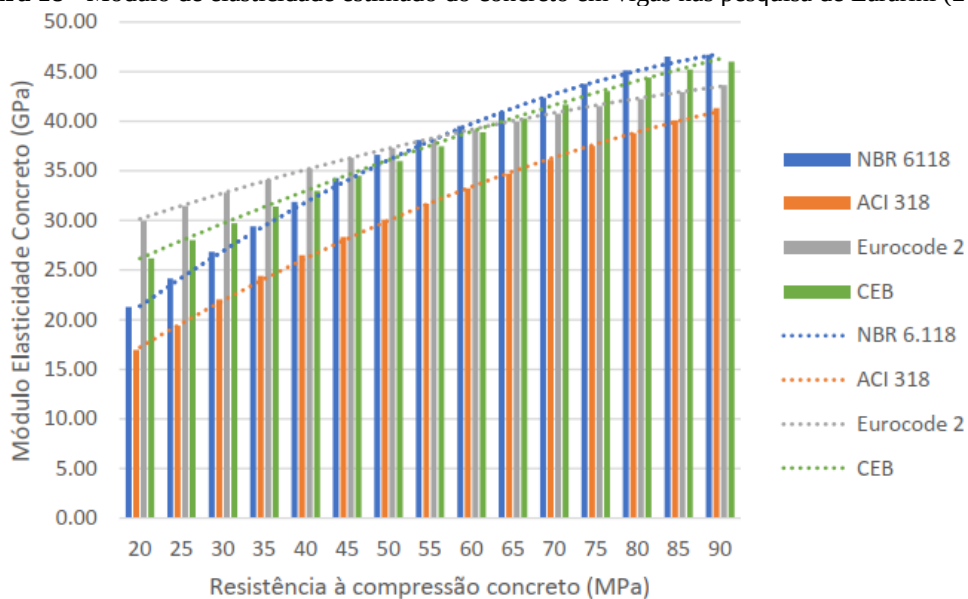
3.3.4 O CAR no dimensionamento de viga

Lazarini (2019) desenvolveu um estudo sobre o CAR em vigas bi-apoiadas sobre seções transversais fixas e sob esforços de flexão simples, onde analisou a resistência do concreto e a taxa de armadura das peças. Para isso, embasou-se em normas nacionais e internacionais, como: ABNT NBR 6118:2014, ABNT NBR 6120:2023, ACI 318R:2014, *Eurocode 2/2004* e CEB/2010. Isso permitiu um estudo com variações quanto aos resultados de ELU e ELS, pois, ainda que as cargas permanentes e variáveis sobre as lajes se repitam ao longo da estrutura, cada norma tem suas especificidades.

Quanto à aplicação do CAR, Lazarini (2019) manteve a geometria da estrutura escolhida e foi aumentando o f_{ck} do concreto gradativamente, de 5 em 5 MPa, variando de 20 até 90 Mpa. Como consequência, o módulo de elasticidade do material e armadura longitudinal positiva também sofreram alterações.

Com os resultados, o autor traçou um gráfico que demonstra a variação do módulo de elasticidade (Figura 18) de acordo com as determinações de cada norma usada como referência de cálculo, comprovando que: quando a resistência se encontra abaixo de 50 MPa, os resultados são bastante distintos, o que se equilibra na referida altura de resistência no gráfico, com exceção da norma ACI 318R:2014 que se manteve distante das demais, ao longo de toda análise.

Figura 18 - Módulo de elasticidade estimado do concreto em vigas nas pesquisa de Lararini (2019).



Fonte: LARAZINI, 2019.

No decorrer de seu estudo, o autor seguiu traçando gráficos comparativos, como ilustrado na Figura 18, analisando os parâmetros seguintes: a resistência do concreto à tração, o momento fletor nas vigas em ELU, a variação desse momento de acordo com a distância dos vãos entre pilares, o momento fletor solicitante em ELS para cada norma e vãos já citados e as deflexões relativa e absoluta.

Ao término das análises, Lazarini (2019) concluiu que, mesmo usando cimento com recorrência em construções pelo mundo, não há um consenso entre as normas sobre as características dele aplicado como CAR, especialmente, na estimativa das deflexões, onde os resultados ficaram bastante divergentes já que as variáveis utilizadas nos cálculos se mostraram às vezes menos, às vezes mais divergentes ao longo do estudo. Assim, o autor encerrou sua pesquisa pontuando as variações que encontrou ao longo dos tópicos supramencionados e concluiu que a norma brasileira apresentou um melhor comportamento dos dados, quando comparada com as demais normas.

Apesar de datar do mesmo ano da norma americana, o que mostra que ambas as normas se basearam nos mesmos critérios científicos disponíveis, o ACI 318R:2014 apresentou respostas muito similares às do CEB:2010, em se tratando de deflexão estimada (LAZARINI, 2019). Por fim, o autor concluiu que o CAR é favorável à redução de armadura e aumento da rigidez, permitindo o acesso a vãos maiores quando aplicados em lajes e vigas.

3.4 CAR EM EDIFÍCIOS BRASILEIROS

Alguns edifícios de referência foram construídos no Brasil utilizando o CAR. Desses, foram escolhidas três edificações para serem apresentadas no presente estudo.

3.4.1 Museu de Arte de São Paulo

Construído em 1968, o MASP (Museu de Arte de São Paulo), visto lateralmente na Figura 19, além de ser um ícone da cidade, é uma construção surpreendente para a época.

Figura 19 - Museu de Arte de São Paulo.



Fonte: MASP, 2024.

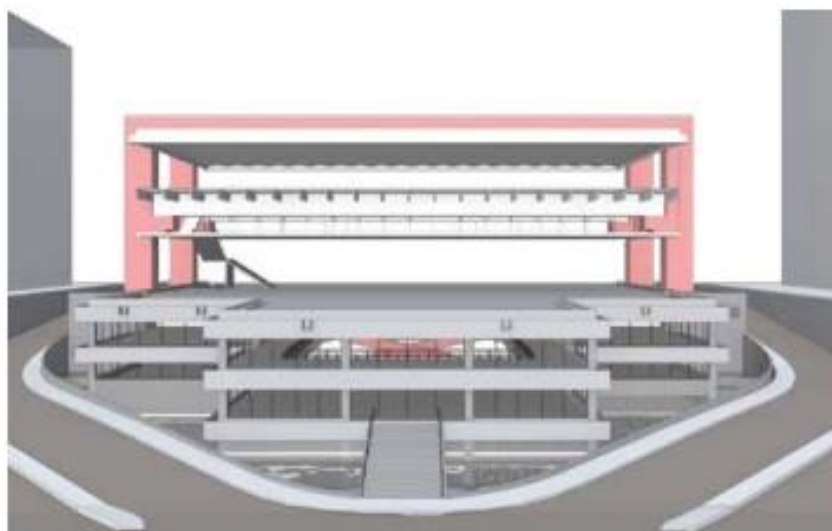
Com o desafio de manter a visão desobstruída para ambas as ruas que o contornam, a edificação de 10.000 m² foi suspensa a 8 metros do solo, sob um vão livre de 74 metros (MASP, 2024), conforme pode ser observado na Figura 19. Trata-se de um registro pioneiro da aplicação de CAR na década de 1960.

Para a construção do MASP, utilizou-se um concreto que atingiu 45 MPa aos 28 dias, uma resistência notável para o período. Além do uso do CAR, destacam-se os seguintes elementos construtivos:

- As colunas partem logo acima das sapatas e são executadas com concreto armado de tela dupla de aço, com dimensões de 4 m × 2,5 m. Acima do nível +14,40 m, os pilares do lado direito, a partir da perspectiva da Avenida Paulista, passam a ser ocos, consistindo em tubos retangulares (4 m × 2,5 m) com interior vazio. Dentro desses vazios estão localizados pêndulos de concreto armado com articulações do tipo Freyssinet nas extremidades, que permitem os movimentos horizontais das vigas da cobertura provocados por variações térmicas, dilatações, retrações, entre outros fatores.
- As quatro vigas principais são protendidas. Um par sustenta a cobertura, enquanto o outro, que atravessa o interior do edifício (com protensão em apenas um dos extremos), sustenta dois pavimentos simultaneamente: um apoiado diretamente e outro suspenso por tirantes metálicos. As vigas são tubos ocos de seção retangular com septos internos espaçados a cada 3,5 metros. Possuem liberdade de movimento horizontal no lado onde os pilares são ocos, garantido por um pêndulo de 4 metros de altura. Os momentos fletores máximos no centro dos vãos das vigas alcançam 9.000 tf·m, e o concreto empregado apresenta resistência média à compressão de 250 kgf/cm². Cada viga contém 62 cabos com 36 fios de 5 mm cada (CÁRDENAS, 2015).

A Figura 20 ilustra a construção subterrânea e a estrutura suspensa do MASP, com cortes que detalham os elementos anteriormente descritos.

Figura 20 - Cortes da estrutura do MASP.



Fonte: PET CIVIL UFJF, 2016.

A análise da estrutura do MASP evidencia não apenas uma solução arquitetônica arrojada, mas também um marco na engenharia brasileira pelo uso pioneiro do CAR em uma época em que tais resistências eram incomuns. A adoção de tecnologias como a protensão, os pêndulos com articulações especiais e os pilares ocos articulados demonstra a inovação estrutural necessária para vencer grandes vãos e permitir a concepção de um espaço livre e funcional, consolidando o edifício como uma referência técnica e cultural no cenário nacional e internacional.

3.4.2 O edifício E-Tower

Outro exemplo notável de aplicação do concreto de alta resistência (CAR) é o edifício E-Tower (Figura 21), construído em São Paulo entre os anos de 2000 e 2005. Projetado com o objetivo de ser o edifício mais alto do Brasil à época, o E-Tower atinge 162 metros de altura a partir do subsolo, distribuídos em 42 pavimentos até o heliponto (LOTURCO, 2005).

Figura 21 - E-Tower, São Paulo.



Fonte: SP CORPORATE, 2024.

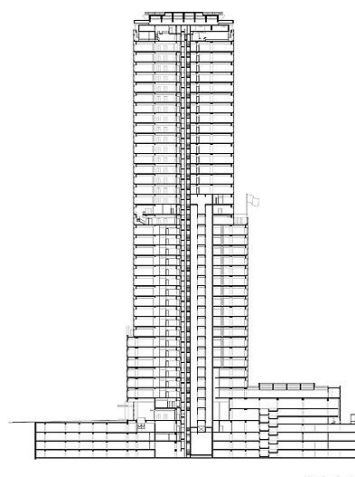
O projeto estrutural (Figuras 22 e 23) previa inicialmente o uso de concreto com resistência característica de 80 MPa. Contudo, visando otimizar o número de vagas no subsolo, foi necessário reduzir a seção dos pilares, o que exigiu o desenvolvimento de concretos com resistências superiores. Assim, foram realizados estudos que resultaram na aplicação de concreto com resistência de até 125 MPa em cinco pilares, os quais atingiram 155 MPa aos 63 dias de cura (VOTORANTIM, 2024).

Figura 22 - Croqui de estudo da E-Tower.



Fonte: HERMAN; AFLALO; GASPERINI, 2000.

Figura 23 - Modelagem da E-Tower.



Fonte: HERMAN; AFLALO; GASPERINI, 2000.

Em entrevista concedida à Revista Técnica (LOTURCO, 2005), o Professor Paulo Helene, um dos principais colaboradores no desenvolvimento do concreto de alta resistência

utilizado na E-Tower, destacou que a obra foi concebida para atender a diversos objetivos, entre eles: atender ao projeto arquitetônico; proporcionar economia e segurança; liberar mais espaço nas garagens; aumentar a construtibilidade; reduzir deformações imediatas e de longo prazo (fluência); e, sobretudo, demonstrar a viabilidade da aplicação de concretos de altíssima resistência com os materiais, equipamentos e mão de obra já disponíveis na cidade de São Paulo.

Helene ainda ressaltou que, para alcançar os 125 MPa, não foi utilizado nenhum processo extraordinário, sendo os ensaios limitados a procedimentos convencionais, como o slump-test e a moldagem de corpos de prova.

Na composição do CAR utilizado na obra, empregaram-se: cimento Portland de alta resistência inicial, brita 1 basáltica, aditivos hiperplastificantes e estabilizadores de hidratação, sílica ativa, pigmento e areia de quartzo rosa. As normas vigentes também exigiram a aplicação de baixo fator água/aglomerante para garantir fluidez e o uso de brita de elevada resistência à compressão (VOTORANTIM, 2024).

Como resultado direto da redução das seções dos pilares, foi possível ampliar em 16 o número de vagas na garagem, o que representou uma economia estimada de 80 mil dólares (VOTORANTIM, 2024).

A fundação do edifício também apresenta características notáveis. Os pilares-parede centrais estão apoiados sobre uma sapata de 392 m² de área, que recebeu, por meio de três bombas simultâneas, 795,50 m³ de concreto resfriado (LOTURCO, 2005), conforme mostra a Figura 24.

Figura 24 - Sapata central da E-Tower



Fonte: LOTURCO, 2005.

Sob essa ótica, é importante destacar que o concreto foi analisado inicialmente em laboratório, por meio de ensaios de resistência à tração, ruptura, cura, entre outros. No entanto,

o comportamento do concreto em campo está sujeito a variações ambientais que influenciam diretamente em sua performance. A combinação do CAR com modelos matemáticos atualizados permite aprimorar a resistência, reduzir seções estruturais e ainda conservar a estética das peças (TORRICO, 2010).

Adicionalmente, conforme observa Fregonezi (2017), a resposta do concreto às tensões aplicadas depende não apenas do tipo de tensão, mas também da interação de diversos fatores que podem alterar a porosidade dos seus componentes estruturais.

Com isso, reafirma-se que o CAR é um material adequado para atender às exigências de resistência das estruturas contemporâneas, sendo possível, por meio de normas, testes e tecnologias disponíveis, alcançar elevados desempenhos mecânicos e construtivos.

3.4.3 O edifício Leopoldo 1201

Construído em 2021 na cidade de São Paulo, o Edifício Residencial Leopoldo 1201 (Figuras 25 e 26) foi projetado sob o desafio de um terreno com espaço limitado e uma arquitetura diferenciada. Tais condições exigiram um processo de concretagem criterioso, que aliou desempenho estrutural à estética do concreto aparente.

Figura 25 - Edifício Leopoldo 1201.



Fonte: MOREIRA, 2022.

Figura 26 - Fachada do Edifício Leopoldo 1201.



Fonte: MOREIRA, 2022.

Segundo a equipe responsável pelo projeto, o principal desafio foi a otimização dos pilares, a fim de liberar mais área útil nos apartamentos — que ocupam um por andar — e nas

garagens. A complexidade aumentou devido à fachada possuir quatro diferentes modulações com o suporte de apenas dois pilares esbeltos, os quais foram moldados com CAR de 90 MPa aos 28 dias. Esse foi o primeiro edifício residencial no Brasil a empregar tal resistência nesse intervalo de cura.

O concreto de classe C90 foi produzido e entregue ao longo de 11 meses, totalizando 51 caminhões betoneira e aproximadamente 410m³. De acordo com o controle tecnológico realizado, a resistência média aos 28 dias foi de 98 MPa, com desvio padrão de 4,01 MPa e f_{ck} igual a 91,5 MPa (REVISTA ESTRUTURA, 2021).

Para otimizar os custos da obra, foi desenvolvida uma escala de variação do f_{ck} ao longo da altura da edificação, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Ilustração da variação do f_{ck} do concreto ao longo do edifício.



Fonte: REVISTA ESTRUTURA, 2021.

A elevada resistência do concreto resultou em uma mistura mais seca, com fator água/aglomerante de 0,25, o que comprometeria sua trabalhabilidade. Esse problema foi

resolvido com a utilização de aditivos apropriados. Para garantir a durabilidade exigida pela ABNT NBR 6118:2023 e preservar o aspecto estético do concreto aparente, foi especificado, nas fachadas, um concreto especial autoadensável, com baixa retração e resistência característica de 50 MPa (REVISTA ESTRUTURA, 2021).

Um ponto crítico durante a execução foi o controle da logística da concretagem, visto que os pilares de CAR eram concretados simultaneamente aos demais pilares convencionais do pavimento. Para evitar erros de identificação, o concreto de alta resistência foi pigmentado na cor vermelha (Figura 28), facilitando seu reconhecimento no canteiro de obras.

Figura 28 - CAR em aspecto fresco do Edifício Leopoldo 1201.



Fonte: REVISTA ESTRUTURA, 2021.

Quanto à fundação, foi executada uma sapata com 400m³ de concreto de f_{ck} 40 MPa, cujo monitoramento térmico foi realizado durante todo o processo de hidratação.

Com o intuito de avaliar a sustentabilidade do projeto, ao final da obra foi realizado um estudo comparativo entre o concreto convencional (50 MPa) e o CAR de 90 MPa, considerando o consumo de materiais, emissão de CO₂ e eficiência da aplicação (Quadros 6 e 7).

Quadro 6 – Comparação do consumo de clínquer para concretos de diferentes f_{ck} .

F_{ck} do concreto	Consumo de clínquer	Clínquer por MPa	Variação entre o consumo de clínquer
90MPa	438 kg/m ³	4,87kg/MPa	1,19 kg/MPa
50MPa	303 kg/m ³	6,06kg/MPa	

Fonte: REVISTA ESTRUTURA, 2021.

Conforme observado, o traço com CAR de 90 MPa apresenta uma eficiência cerca de 20% superior em relação ao consumo de clínquer por MPa. Essa eficiência reflete diretamente na redução das emissões de CO₂, conforme evidenciado no Quadro 7.

Quadro 7 - Comparação do consumo de materiais e emissão de CO₂ para concretos C90 e C50.

ITEM	CONSUMO PARA C90	CONSUMO PARA C50	CO ₂ – C90/ CO ₂ – C50
Volume de concreto	1.34 m ³	1.85 m ³	-
Áreas de formas	9.61 m ²	10.75 m ²	0.5
Qtd. De armadura	339.39 kg	446.66 kg	1.9
Qtd. Clinquer	586.92 kg	560.55 kg	1.0
Qtd. de areia	713 kg	1689 kg	0.09
Qtd. de brita	1350.7 kg	1672.4 kg	0.09
Qtd. de água	234.5 kg	327.5 kg	-
Emissão de CO ₂	1.42 ton / m ³	1.72 ton / m ³	-17.5%

Fonte: REVISTA ESTRUTURA, 2021.

Com base nos dados apresentados, estimou-se uma redução de 17,5% na emissão de CO₂ ao se comparar o CAR de 90 MPa com a hipótese de uso de concreto convencional de 50 MPa na mesma estrutura. Os resultados demonstram que o uso do CAR pode ser, simultaneamente, uma solução técnica, arquitetônica e ambientalmente mais eficiente.

3.5 O CAR E A EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

De acordo com a União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene (UBRABIO, 2020), entende-se por emissão de gases de efeito estufa o conjunto de resíduos gasosos lançados na atmosfera por ações humanas, de maneira individual ou coletiva, os quais contribuem para o aumento do efeito estufa e o agravamento das mudanças climáticas. Entre os gases mais prejudiciais estão o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), com destaque para o CO₂, dado seu volume significativo na atmosfera.

A emissão de carbono pode ser mensurada em diversas atividades cotidianas e industriais, como o uso de transporte, a geração de resíduos, o consumo de energia e, especialmente, os processos produtivos da construção civil. Esse setor é reconhecidamente um dos mais poluentes, dada a extração de matérias-primas, o consumo de energia e a liberação de CO₂ na produção de cimento e aço. Tal emissão pode ser analisada por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), metodologia preconizada pela norma ISO 14067:2018, a qual quantifica os impactos ambientais desde a extração da matéria-prima até o descarte final de um produto (PEINADO; VANDERLEI; NAGANO, 2014).

No contexto da construção civil, a produção do concreto armado representa parcela significativa da emissão global de CO₂. Isso ocorre em função da alta demanda por cimento

Portland e aço, ambos com processos de fabricação intensivos em energia. Segundo dados de Agopyan et al. (2005), o setor siderúrgico era responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de CO₂. Em atualização mais recente, o Instituto Aço Brasil (2021) reportou uma redução para 4%, resultado de medidas mitigadoras e avanços tecnológicos.

Diante do exposto, a discussão sobre a emissão de CO₂ na construção civil tem ganhado crescente relevância nas últimas décadas, impulsionada pela intensificação das preocupações ambientais e pela necessidade de mitigar os impactos causados pelo uso intensivo de materiais como o concreto e o aço.

Segundo Lima (2025), a avaliação da pegada de carbono em estruturas deve ser conduzida com rigor técnico, por meio da incorporação de dados reais dos projetos estruturais e da aplicação de fatores de emissão específicos para a realidade brasileira. Em sua tese de doutorado, o autor propõe uma metodologia aplicada a edifícios de múltiplos pavimentos, fundamentada no cálculo da massa de concreto e aço consumidos, correlacionada a fatores médios de emissão de CO₂, segmentados por classes de resistência do concreto (f_{ck}). Tal abordagem, por reunir aplicabilidade prática e confiabilidade metodológica, foi adotada como base conceitual no presente estudo.

Complementarmente, o estudo de Sheng et al. (2024), ainda que voltado ao contexto canadense, apresenta uma matriz de inventário detalhada sobre as emissões incorporadas em estruturas de concreto armado. Apesar das particularidades regionais, a estrutura metodológica empregada pelos autores canadenses contribui com parâmetros comparativos importantes e reforça a necessidade de adequação dos fatores de emissão à realidade construtiva e tecnológica local.

No cenário nacional, Azevedo et al. (2025) apresentam uma abordagem abrangente sobre práticas sustentáveis na construção civil brasileira. Os autores enfatizam aspectos como a gestão de resíduos, eficiência energética, uso de tecnologias limpas e a adesão a certificações ambientais reconhecidas, como o LEED e a ISO 14001. O estudo destaca que a construção civil responde por cerca de 40% das emissões globais de gases de efeito estufa, o que evidencia a urgência por soluções estruturais de menor impacto ambiental. Entre essas soluções, os autores mencionam o uso do CAR, cuja aplicação permite a redução das seções estruturais, com consequente economia de materiais e menor emissão de CO₂. Nessa mesma direção, Possan *et al.* (2014; 2018) demonstram que, embora concretos de alta resistência apresentem emissões iniciais mais elevadas devido ao maior consumo de clínquer, a sua maior durabilidade pode compensar parte desse impacto ao longo do ciclo de vida das estruturas. De forma convergente, Habert *et al.* (2010) e Gartner e Hirao (2015) apontam que o emprego de adições minerais,

como sílica ativa, cinza volante e escória de alto-forno, reduz significativamente a pegada de carbono do concreto, mantendo ou até elevando o desempenho mecânico exigido em aplicações estruturais.

Ainda nessa direção, Vieira et al. (2025) reforçam a necessidade de compatibilização entre desempenho estrutural e eficiência ambiental. Em seu artigo técnico, os autores comparam diferentes soluções estruturais otimizadas utilizando classes variadas de concreto e avaliam as respectivas emissões de CO₂ incorporadas. Os resultados indicam que a otimização estrutural, aliada ao uso de CAR, pode representar uma estratégia eficaz de redução da emissão de CO₂, sem comprometer a segurança ou a funcionalidade das edificações.

Dessa forma, esse trabalho fundamenta-se em um conjunto robusto de referências nacionais e internacionais atualizadas que oferecem respaldo teórico e metodológico para propor uma análise integrada entre desempenho estrutural e impacto ambiental. As contribuições de Possan *et al.* (2014; 2018), Habert *et al.* (2010) e Gartner e Hirao (2015) complementam esse quadro ao indicar que a escolha criteriosa das classes de resistência e o emprego de adições minerais podem reduzir substancialmente as emissões do setor, reforçando o potencial do CAR como solução técnica e ambientalmente vantajosa.

Seguindo os mesmos preceitos, a aplicação do CAR contribui para a redução das emissões de CO₂ ao permitir a diminuição das seções de pilares, otimizando o uso de concreto e aço e aumentando a eficiência estrutural. Isso favorece a sustentabilidade, reduzindo impactos ambientais e viabilizando projetos mais esbeltos, com fundações menos onerosas e menor consumo de insumos indiretos, o que pode gerar economias adicionais de emissões não consideradas em análises simplificadas (VIEIRA et al., 2025).

No entanto, é necessário considerar que, embora o CAR reduza a quantidade total de material, sua formulação demanda uma maior proporção de cimento, o que pode elevar, pontualmente, as emissões. Assim, o balanço entre a economia de volume e o aumento do cimento precisa ser cuidadosamente avaliado para cada caso específico (PEINADO; VANDERLEI; NAGANO, 2014).

Estudos indicam que, devido à sua baixa porosidade, o CAR apresenta menor potencial de carbonatação e, conseqüentemente, reduzida capacidade de capturar CO₂ atmosférico em comparação ao concreto convencional (POSSAN et al., 2018). Além disso, o uso intensivo de aditivos de alto desempenho e adições minerais incorpora energia e emissões ao ciclo produtivo, devendo ser contabilizados em análises de ciclo de vida mais abrangentes (HABERT, 2012).

Outro aspecto relevante é o processo de carbonatação do concreto, no qual parte do CO₂ atmosférico é reabsorvido pela estrutura ao longo de sua vida útil. Embora benéfico do ponto

de vista ambiental, esse fenômeno pode promover a corrosão da armadura, especialmente quando associado ao aumento da temperatura global, destacando a importância do correto dimensionamento das estruturas e da escolha de materiais de elevada durabilidade.

Por fim, a aplicação do CAR tem sido reconhecida em certificações ambientais, como LEED e AQUA-HQE, devido à sua contribuição na redução da pegada de carbono e no aumento da durabilidade estrutural, reforçando seu potencial como solução alinhada às demandas de sustentabilidade contemporâneas.

No cenário global, o Brasil ocupa posição de destaque na produção de cimento, conforme apresentado no Quadro 8. Em 2017, o país ocupava o 12º lugar no ranking mundial, sendo o único da América Latina a figurar entre os maiores produtores.

Quadro 8 – Produção de cimento no mundo.

PAÍS	Ranking	2016	2017
		Milhões de toneladas	Milhões de toneladas
China	1º	2400	2400
Índia	2º	280	270
EUA	3º	85	86,3
Vietnã	4º	77,3	78
Turquia	5º	75,4	77
Indonésia	6º	63	66
Arábia Saudita	7º	62	63
Coreia do Sul	8º	57	59
Egito	9º	55	58
Rússia	10º	56	58
Irã	11º	55	56
Brasil	12º	58	55
Japão	13º	53,3	53
Outros países		723	720,7
TOTAL		4099,9	4098,7

Fonte: ADAPTADO DE QUEIROZ FILHO; AMORIM NETO, 2017.

Contudo, segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2025), em 2024, a produção de cimento no Brasil alcançou 65.498.224 quilos, evidenciando uma tendência de crescimento no setor. Desse total, mais de 64 toneladas foram consumidas internamente, refletindo a contínua demanda da construção civil nacional. Embora esses números indiquem o fortalecimento do setor, também reforçam a urgência de integrar práticas

sustentáveis à engenharia civil, com ênfase na mitigação da emissão de CO₂, considerando os impactos ambientais associados à produção e ao uso intensivo do cimento.

Dessa forma, o uso consciente do CAR pode ser uma estratégia eficaz para conter a elevação do consumo de cimento no País, ao mesmo tempo em que contribui para construções mais duráveis e com menores impactos ambientais (MEHTA; MONTEIRO, 2014; HABERT, 2012).

Em meio a tanto, é necessário reconhecer que, embora o CAR seja promissor do ponto de vista estrutural e ambiental, a escolha do material deve ser feita com base numa análise técnica detalhada, considerando o ciclo de vida da edificação, o impacto ambiental, a durabilidade da estrutura e o custo-benefício do empreendimento (SOUZA et al., 2020; KHEMIRI; GHEDIRA, 2018).

De modo geral, o concreto – incluindo o CAR – contribui para a emissão de CO₂ durante várias etapas de sua produção, especialmente, na fabricação do cimento, que é um de seus principais constituintes. Nesse processo, há significativa liberação de CO₂, tanto pela queima de combustíveis fósseis utilizados para gerar calor nos fornos, quanto pela decomposição térmica do calcário (CaCO₃), reação química essencial na obtenção do clínquer (IPCC, 2021; SCRIVENER et al., 2018).

Em resumo, a utilização do CAR na construção civil mostra-se promissora para a redução das emissões de CO₂, ao permitir estruturas mais esbeltas e com menor consumo de materiais. Contudo, o aumento na proporção de cimento em sua composição requer atenção, já que pode elevar pontualmente as emissões. Dessa forma, o uso do CAR deve ser avaliado com base em critérios técnicos e ambientais, considerando tanto a eficiência estrutural quanto os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida da edificação (HABERT, 2012; VIEIRA et al., 2025).

3.6 EDIFÍCIO EM ANÁLISE

O edifício selecionado como objeto de estudo (Figura 29) está localizado no município de Ourinhos, Estado de São Paulo. A construção conta com 21 pavimentos, distribuídos entre áreas sociais e residenciais.

Figura 29 - Edifício Florença

Fonte: AUTOR (2025)

A edificação possui quatro apartamentos por andar, totalizando 80 unidades residenciais, com áreas variando entre 135m² e 143m² (Figura 30).

Figura 30 - Planta mobiliada dos apartamentos residenciais.

Fonte: LIMA, 2024.

As áreas sociais incluem salão de festas, academia, praças de lazer, espaços de convivência e trilhas para caminhada. Ao todo, o edifício possui uma área construída de 16.810,04 m², com altura total de 73,62 metros.

Entre os anos de 2020 e 2022, a edificação esteve em fase de construção, conforme ilustram os registros fotográficos das Figuras 31 a 35.

Figura 31 - Edifício em construção I.



Fonte: CIDADE DE OURINHOS SP, 2020.

Figura 32 - Edifício em construção II.

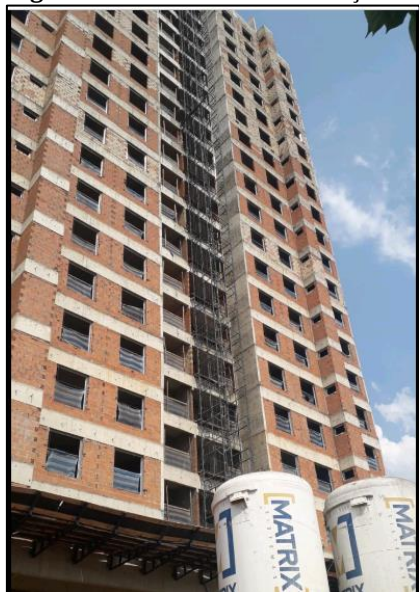


Fonte: GOOGLE, 2022.

Figura 33 - Edifício em construção III.



Fonte: GOOGLE, 2022.

Figura 34 - Edifício em construção IV

Fonte: GOOGLE, 2022.

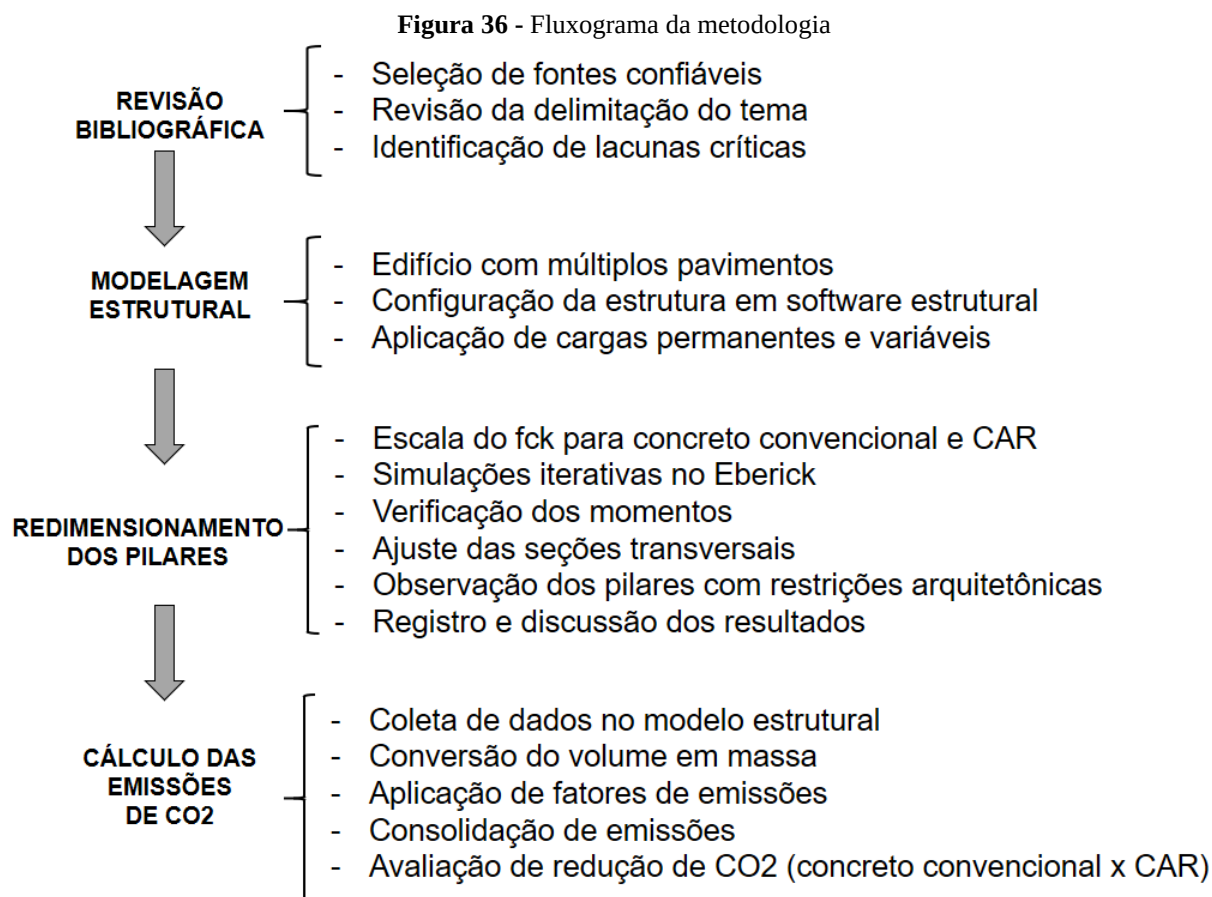
Figura 35 - Edifício em construção V

Fonte: GOOGLE, 2022.

A caracterização da edificação analisada nesse capítulo forneceu os subsídios necessários para o desenvolvimento das etapas subsequentes de modelagem, análise estrutural e avaliação de impacto ambiental, tendo em vista que a estrutura apresenta características típicas de edificações verticais contemporâneas voltadas ao uso misto, com integração entre áreas sociais e residenciais. A dimensão significativa da área construída, somada à altura total torna o edifício um exemplo representativo para estudos de desempenho estrutural e sustentabilidade em projetos de grande porte. A definição precisa do objeto de estudo, aliada ao levantamento documental e fotográfico da obra, garante a consistência metodológica necessária para as análises técnicas e ambientais apresentadas nos capítulos seguintes.

4. METODOLOGIA

A metodologia do presente estudo seguiu a organização do fluxograma abaixo (Figura 36), composta por macroesferas que contemplam suas respectivas atividades.



Fonte: AUTOR, 2025

A revisão bibliográfica seguiu critérios de seleção de fontes confiáveis – artigos, dissertações, teses e livros – especialmente, aquelas relacionados ao redimensionamento de pilares, estabilidade global, efeitos de segunda ordem, processos *P-Delta* e emissões de CO₂. Um dos desafios foi a limitação na disponibilidade de materiais atualizados, mas esse obstáculo foi atenuado pela profundidade da análise crítica das fontes disponíveis.

A etapa exploratória consistiu na modelagem estrutural de um edifício residencial de 21 andares, localizado em Ourinhos (SP), com foco no comportamento dos pilares sob diferentes valores de f_{ck} . O edifício foi modelado no *software Eberick 2025*, que permitiu simular diferentes cenários de redução de seção dos pilares conforme se adotavam concretos de maior resistência.

A modelagem considerou: 1) a estrutura espacial tridimensional composta por pilares, vigas e lajes, 2) cargas permanentes e variáveis normatizadas pela NBR 6120:2023, 3) análise de esforços internos, deslocamentos e estabilidade global com base no coeficiente γ_z e no processo *P-Delta*. Para cada alteração na seção dos pilares, o software indicava a viabilidade ou não da solução, de acordo com os critérios de resistência e deslocamento.

Por fim, a metodologia incluiu a estimativa das emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas ao uso dos materiais estruturais empregados no edifício em estudo. Para tanto, utilizou-se o *software* Eberick 2025, que dispõe de um banco de dados integrado capaz de aplicar fatores de emissão específicos para cada tipo de material (concreto, aço, madeira, entre outros), considerando o ciclo de vida dos elementos estruturais.

Os cálculos foram realizados a partir da base de dados do Ecoinvent (2024), em conformidade com o IPCC AR5, de onde foram extraídos os fatores de emissão por material e classe de resistência. Para o concreto, adotou-se uma densidade de referência de 2.500 kg/m³, sendo o volume obtido diretamente do modelo estrutural. A partir desse valor, aplicou-se o respectivo fator de emissão, que está relacionado principalmente ao consumo de cimento, permitindo assim determinar a carga de emissões associada a cada resistência característica (f_{ck}) analisada.

Os resultados obtidos foram comparados entre os dois cenários modelados – o edifício dimensionado com concreto convencional e aquele redimensionado com CAR – possibilitando a quantificação da redução percentual de CO₂ decorrente da substituição do material, por meio da Equação 10:

$$\text{Emissão total (kg CO}_2\text{ e)} = \sum (Q_i \times FE_i) \quad (\text{Eq. 10})$$

Em que: **Q_i** representa a quantidade do material, e **FE_i** , seu fator de emissão.

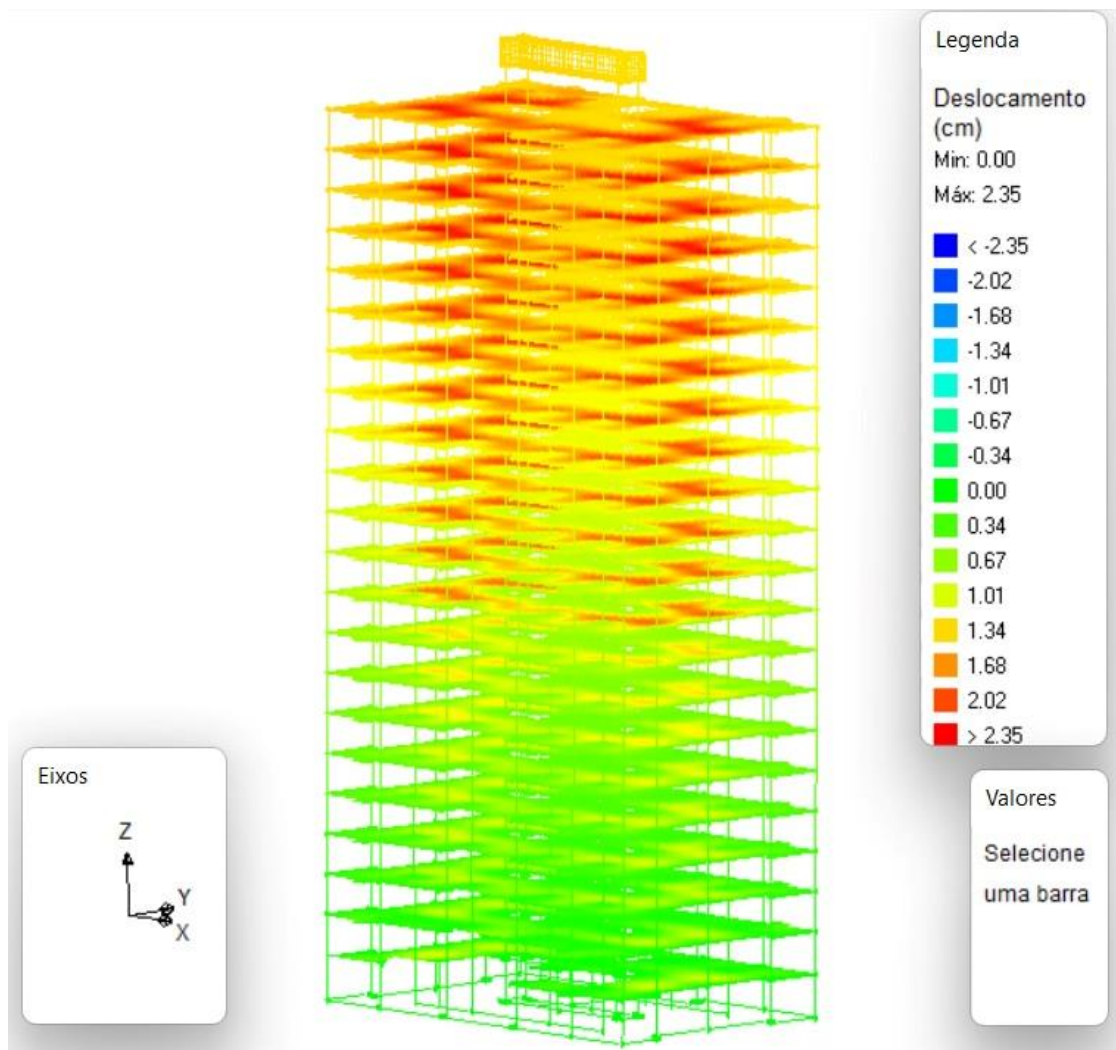
Como resultado, observou-se redução significativa de CO₂ em pilares redimensionados com CAR, refletindo a economia de materiais como fôrmas, aço e volume de concreto.

4.1 MODELAGEM ESTRUTURAL

Como já foi mencionado, o edifício em análise é composto por 21 andares e possui infraestrutura e estrutura com fundações profundas, lajes maciças e vigas projetadas para suportar e distribuir as cargas. A edificação contempla áreas comuns como hall de entrada,

elevadores, escadas de emergência e garagens. Quanto à distribuição dos pavimentos, constata-se com um pavimento térreo, um mezanino, 19 pavimentos-tipo, dois andares duplex, um barrilete e uma caixa d'água, totalizando 73,62 metros de altura e uma área construída de 16.810,04 m², cuja exemplificação dos pórticos pode ser vista na Figura 37.

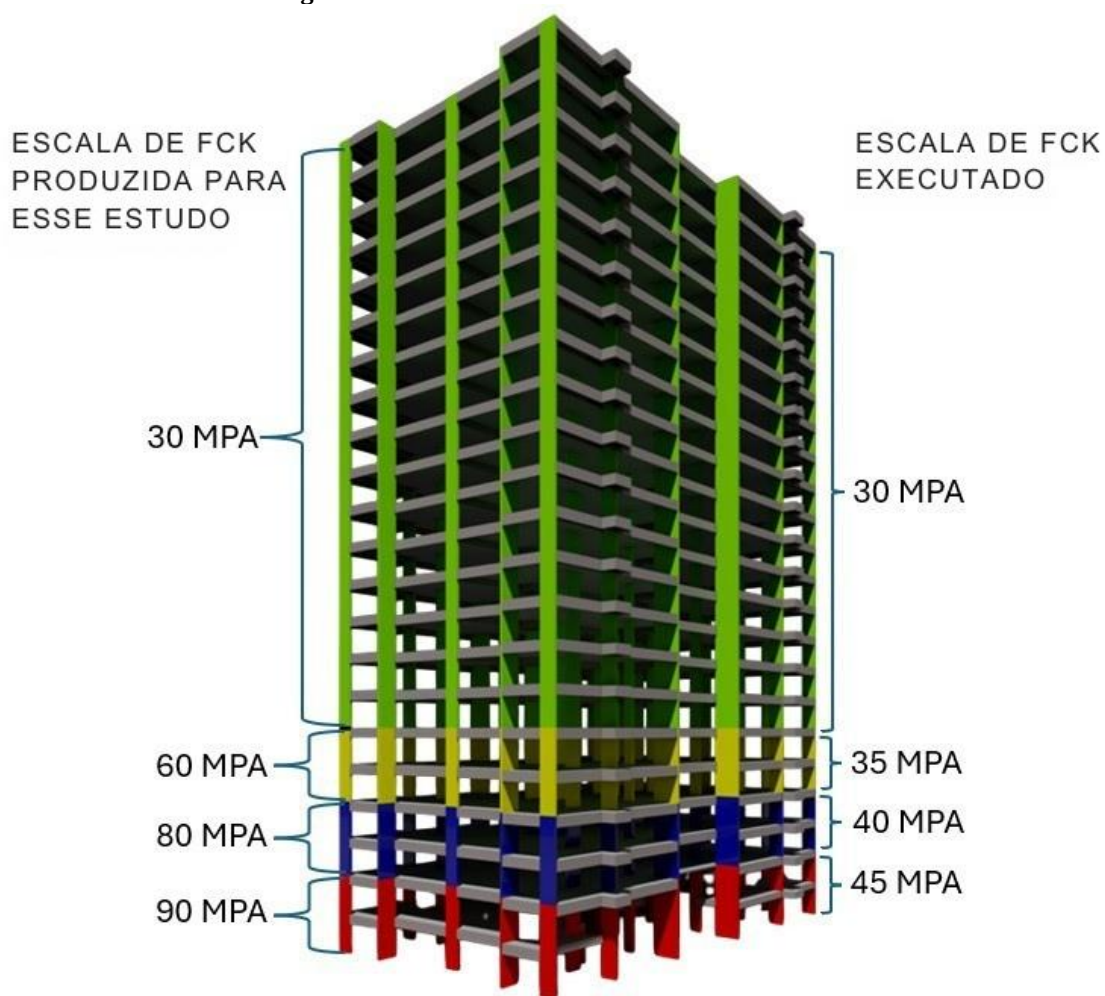
Figura 37 - Exemplo de pórtico espacial



Fonte: AUTOR (2025).

O edifício foi redimensionado com o auxílio do *software Eberick 2025*, a partir dos dados reais do projeto estrutural executado. As simulações tiveram como objetivo principal a otimização das seções transversais dos pilares, por meio da substituição progressiva do concreto convencional por CAR, com base em uma escala de distribuição dos valores de f_{ck} especialmente definida para esse estudo (Figura 38).

Figura 38 - Estrutura de um edifício de 21 andares



Fonte: AUTOR (2025).

A Figura 38 apresenta a distribuição comparativa entre as escalas de f_{ck} executadas e otimizadas. Apesar da régua de f_{ck} do lado esquerdo já apresentar o resultado da variação atingida nessa pesquisa, é conveniente que essa imagem apareça no contexto da metodologia, tendo em vista que essa substituição do f_{ck} do concreto permitiu a reavaliação de todos os pilares do edifício, com vistas à redução de suas seções transversais, mantendo os critérios de estabilidade global e segurança estrutural.

Na Figura 38, observa-se que a escala de f_{ck} otimizada foi obtida através de tentativas, variando o f_{ck} de 5 em 5 MPa, iniciando com $f_{ck} = 90$ MPa nas seções de pilares mais solicitadas no nível do andar térreo, buscando atingir a menor dimensão da seção transversal com capacidade resistente suficiente para suportar os esforços solicitantes, sem prejuízo para a estabilidade global da estrutura. A menor seção transversal do pilar elegida para a situação de maior solicitação foi mantida constante ao longo de toda altura da edificação, sendo reduzido o f_{ck} a medida que os esforços solicitantes diminuía, definindo assim a escala de f_{ck} otimizada.

É possível comparar que a escala de f_{ck} utilizada na construção do edifício foi reproduzida com fidelidade a partir do projeto original e adotada como parâmetro de comparação. De acordo com o projetista, foram especificadas as seguintes resistências para os pilares ao longo da altura da edificação:

- 45 MPa para o térreo e o 1º pavimento;
- 40 MPa para o 2º e 3º pavimentos;
- 35 MPa para o 4º e 5º pavimentos;
- 30 MPa do 6º pavimento até a cobertura.

Esses valores se encontram em conformidade com a ABNT NBR 6118:2023 e se enquadram no Grupo I, conforme classificação da ABNT NBR 8953:2015, que estabelece duas faixas de resistência para concretos estruturais:

- Grupo I: 20 MPa a 50 MPa (C20 a C50);
- Grupo II: 55 MPa a 90 MPa (C55 a C90), correspondente ao CAR.

A proposta desse estudo consistiu em substituir os valores do projeto original por f_{ck} mais elevados, pertencentes ao Grupo II. A nova escala adotada seguiu a seguinte lógica:

- Onde foi utilizado 35 MPa, adotou-se 60 MPa;
- Onde foi utilizado 40 MPa, adotou-se 80 MPa;
- Onde foi utilizado 45 MPa, adotou-se 90 MPa;
- Mantendo-se 30 MPa do 6º pavimento em diante, tal como na versão original.

Essa adaptação permitiu um paralelo metodológico com outros estudos relevantes da literatura, como o caso do Edifício Leopoldo 1201, construído em 2021, na cidade de São Paulo, onde também foi aplicada uma substituição direta do f_{ck} de 50 MPa por 90 MPa, sem abordagens intermediárias entre as faixas de 55 MPa a 85 MPa. Tal abordagem simplificada tem sido utilizada com sucesso em projetos com alta demanda de desempenho e restrições espaciais.

Para representar o comportamento tridimensional da estrutura, utilizou-se o processo de pórtico espacial, uma técnica que envolve a modelagem e análise de estruturas compostas por vigas e pilares interligados. As etapas foram realizadas no *software Eberick 2025* e contemplaram:

- 1. Modelagem da estrutura:** definição de elementos como pilares, vigas, lajes e fundações;
- 2. Aplicação de cargas:** cargas permanentes, variáveis e excepcionais atribuídas pelo usuário;
- 3. Análise estrutural:** cálculo automático das reações, esforços internos e deformações;

4. Dimensionamento: dimensionamento normativo dos elementos com base nos resultados obtidos; e

5. Verificação normativa: checagem do atendimento às normas técnicas nacionais e/ou internacionais.

Para simular a construção real do edifício, foi atribuída rigidez axial crescente aos pilares inferiores, minimizando deslocamentos acumulados conforme o avanço dos pavimentos.

O *Eberick 2025* foi a ferramenta utilizada por oferecer recursos como: modelagem 3D, análises estática e dinâmica, cálculo de emissão de CO₂, integração com outros *softwares* e geração automática de documentação técnica. Isso foi possível porque o *Eberick 2025* detém como principais funcionalidades:

- Modelagem 3D detalhada.
- Análise de cargas verticais, horizontais, de vento e sísmicas.
- Dimensionamento de diversos elementos estruturais.
- Emissão de relatórios, desenhos técnicos e planilhas quantitativas.
- Cálculo da emissão de CO₂ com base em ciclo de vida dos materiais.
- Compatibilidade com outros softwares de projeto.

Durante o processo de modelagem, destacou-se o recurso “copiar pilares”, que permitiu replicar elementos estruturais nos demais pavimentos (Figura 39).

Figura 39 - Lançamento de pilares

Pilar

Dados do pilar

Nome Ambiente

☐ Detalhamento contínuo no lance

Modelo

Vínculo Verticalidade

Seção

Tipo

b cm h cm

b1 cm h1 cm

Ângulo de abertura °

Ângulo de rotação °

Elevação cm

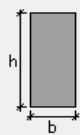
☒ Manter seção constante na prumada

Capitel

☐ Usar capitel

Ângulo de rotação ° b cm

Espessura cm h cm



Fonte: Autor (2025).

A janela de lançamento de pilares do *Eberick 2025* permite ao usuário visualizar e alimentar o sistema com os dados geométricos e físicos necessários para o dimensionamento, nesse estudo, partindo da constatação de que o edifício analisado não apresenta núcleo rígido, caracterizando-se como um sistema em pórticos.

O *software* possui diversas cargas pré-definidas conforme a NBR 6120:2023, podendo ser ajustadas pelo usuário. No modo 3D, é possível personalizar cargas individualmente (Figura 40), como as aplicadas sobre vigas e aberturas. Nesse contexto, quanto à flexibilidade das ligações, o *Eberick 2025* permite duas abordagens de análise estrutural:

- modelo de pórtico espacial, no qual as lajes não participam da rigidez global; e
- modelo integrado, em que as lajes são consideradas como diafragmas rígidos.

No presente estudo, adotou-se o modelo integrado, onde observou-se que, quando a análise é realizada apenas como pórtico espacial, há um aumento do deslocamento e o γ_z tende a ser ligeiramente maior. Já no modelo integrado, os deslocamentos e o valor de γ_z são reduzidos, uma vez que a laje contribui para a rigidez do sistema. Ressalta-se que, em todos os casos, foram consideradas lajes maciças.

Figura 40 - Personalização de cargas individuais nas vigas

Viga

Dados da viga
 Nome:
 Ambiente:

Seção do trecho
 Tipo:
 bw: cm h: cm
 bf: cm hf: cm
☐ Obter elevação para viga invertida
 Elevação: cm
☒ Manter seção constante na viga

Cargas no trecho
 Carga de parede: kgf/m
 Carga extra: kgf/m
 Temperatura e retração: °C

Parede

Dimensões
 Grupo:
 Altura: cm Espessura: cm
 Carga: kgf/m Peso: kgf/m³

Aberturas

Fonte: AUTOR (2025).

A ferramenta “Simulador” foi utilizada para testar reduções nas seções dos pilares com variações de f_{ck} , avaliando momentos solicitantes, momento resistente e coeficiente de segurança, que deve ser superior a 1,05. Por exemplo, o pilar de canto P1, com seção de $22 \times$

66 cm, atendeu aos critérios (Figura 41). Ao ser reduzida a seção para 22×50 cm, o coeficiente aproximou-se de 1, indicando insuficiência estrutural (Figura 42). O *software* sinalizou automaticamente as seções inadequadas, impedindo a geração do detalhamento.

Figura 41 - Simulador para pilares: P1 (22 x 66) atendendo o coeficiente de segurança

Simulador

Seção
Tipo: retangular

b: 22 cm h: 66 cm
b1: 0 cm h1: 0 cm

Alturas
Desenho: 330 cm
☐ L fixo
Vínculo B: RR LB: 330 cm
Vínculo H: RR LH: 330 cm

Esforços característicos
N: 306.65 tf
Mb topo: 2681 kgf.m Mb base: 2088 kgf.m
Mh topo: 2140 kgf.m Mh base: 12301 kgf.m

Armaduras
As b: 3 ø 16.0 As h: 9 ø 16.0
☒ Fixar
Obter momentos

OK Ajuda

Mrd/Msd = 1.25

Fonte: AUTOR (2025).

Figura 42 - Simulador para pilares: P1 (22 x 50) com coeficiente de segurança insuficiente

Simulador

Seção
Tipo: retangular

b: 22 cm h: 50 cm
b1: 0 cm h1: 0 cm

Alturas
Desenho: 30 cm
☐ L fixo
Vínculo B: RR LB: 30 cm
Vínculo H: RR LH: 30 cm

Esforços característicos
N: 308.32 tf
Mb topo: 966 kgf.m Mb base: 1326 kgf.m
Mh topo: 10950 kgf.m Mh base: 12295 kgf.m

Armaduras
As b: 4 ø 12.5 As h: 12 ø 12.5
☐ Fixar
Obter momentos

OK Ajuda

Mrd/Msd = 0.97

Fonte: AUTOR (2025).

A aplicação da ferramenta de dimensionamento do Pilar P1 permitiu observar, por meio da comparação entre as Figuras 41 e 42, que é possível reduzir a seção transversal. No entanto, a relação entre o momento resistente e o momento solicitante (M_{rd}/M_{sd}) ficou abaixo de 1,00, evidenciando que, embora a tensão no concreto suporte a carga axial solicitante, não há capacidade suficiente para resistir aos momentos fletores atuantes. Ainda que o *software* calcule uma armadura para essa condição, o dimensionamento aparece destacado em vermelho, sinalizando o não atendimento ao critério de resistência à flexo-compressão, conforme a relação $M_{rd}/M_{sd} < 1,00$.

À medida que os resultados das simulações foram sendo obtidos, foi organizada uma planilha no *software Excel* (Figura 43) com o objetivo de registrar os valores calculados e definir os limites mínimos de seção viável para cada pilar analisado, respeitando as exigências normativas.

Figura 43 - Tabela de registro dos resultados do redimensionamento das seções dos pilares

Geometria			Carga		Concreto				Limetes	
b (cm)	h (cm)	Ac (cm²)	Nsd(kgf)	Tensão de calc. (kgf/cm²)	fck (Mpa)		gama c	fcd (kgf/cm²)	0,50.fcd	Status
22	120	2640	431650	163,5037879	90	0,85	1,4	546,4285714	273,214286	ok
22	100	2200	431650	196,2045455	90	0,85	1,4	546,4285714	273,214286	ok
22	90	1980	431650	218,0050505	90	0,85	1,4	546,4285714	273,214286	ok
22	80	1760	431650	245,2556818	90	0,85	1,4	546,4285714	273,214286	ok
22	70	1540	431650	280,2922078	90	0,85	1,4	546,4285714	273,214286	ok
22	66	1452	431650	297,2796143	90	0,85	1,4	546,4285714	273,214286	ok
22	65	1430	431650	301,8531469	90	0,85	1,4	546,4285714	273,214286	erro
22	60	1320	431650	327,0075758	90	0,85	1,4	546,4285714	273,214286	erro
22	50	1100	431650	392,4090909	90	0,85	1,4	546,4285714	273,214286	erro
22	40	880	431650	490,5113636	90	0,85	1,4	546,4285714	273,214286	erro
22	35	770	431650	560,5844156	90	0,85	1,4	546,4285714	273,214286	erro

Fonte: AUTOR (2025).

A verificação das seções transversais dos pilares foi conduzida com base nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023, levando em consideração os ELU para compressão simples e flexo-compressão normal. Inicialmente, determinou-se a tensão de cálculo do concreto (f_{cd}) com a Equação 11:

$$f_{cd} = 0,85 \times f_{ck} / \gamma_c \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

f_{ck} é a resistência característica do concreto (em MPa);

γ_c é o coeficiente de segurança do concreto, adotado como 1,4 (conforme item 8.2.10 da NBR 6118:2023);

f_{cd} representa a tensão de cálculo à compressão (em MPa), sendo o valor máximo admissível para o dimensionamento.

Com o valor de f_{cd} definido, verificou-se a área mínima necessária da seção transversal (A_c) do pilar com base na carga axial de cálculo (N_d), utilizando-se a relação dada pela Equação 12:

$$A_c \geq N_d / f_{cd} \quad (\text{Eq. 12})$$

Como exemplo, para um pilar submetido a uma carga axial de 431.650 kgf (ou 4316,5 kN), com $f_{ck} = 30$ MPa, obtém-se:

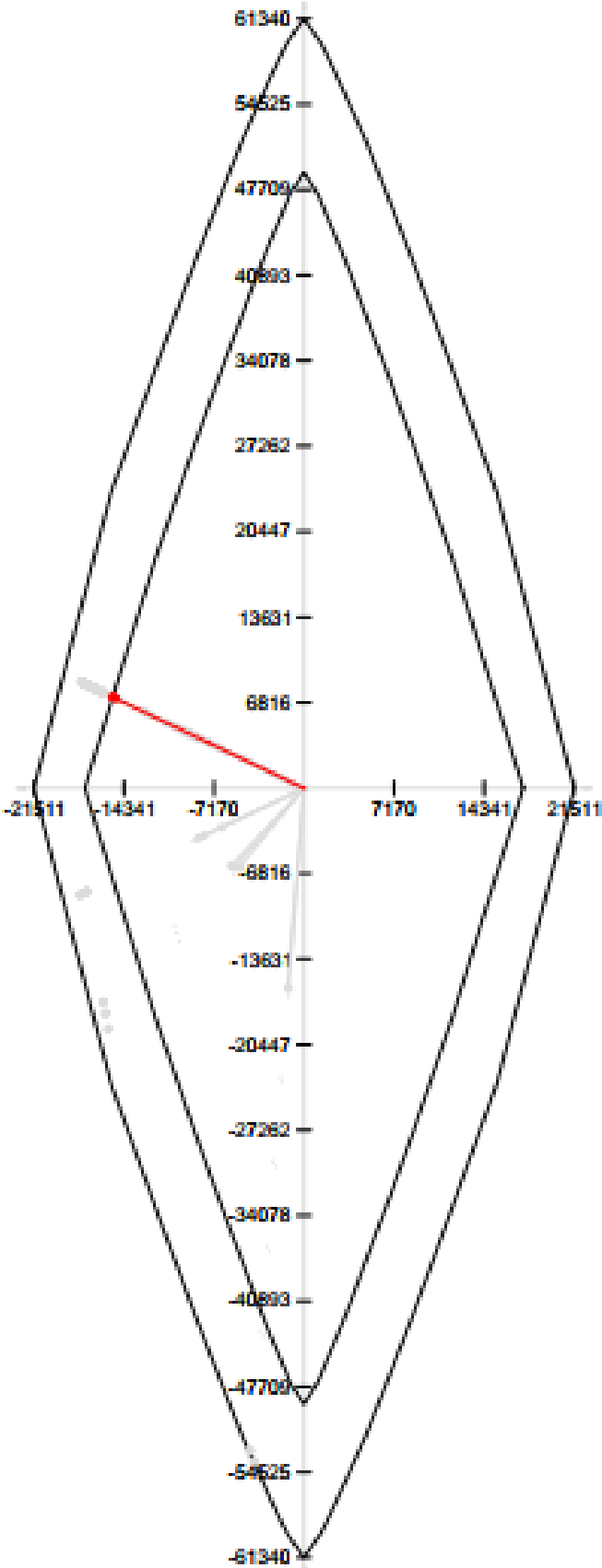
$$\begin{aligned} f_{cd} &= 0,85 \times 30 / 1,4 = 18,21 \text{ MPa} (182,10 \text{ kgf/cm}^2) \\ A_c &\geq 431.650 / 182,10 = 2370,40 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Nesse caso, uma seção de 22 x 110 cm atende à carga axial. No entanto, mesmo que a seção atenda à compressão centrada, é obrigatória a verificação à flexo-compressão, conforme o item 15.5 da NBR 6118:2023. Essa etapa envolve a comparação entre o momento solicitante (M_{sd}) e o momento resistente (M_{rd}), devendo-se atender ao critério (Equação 13):

$$M_{sd} / M_{rd} \leq 1,0 \quad (\text{Eq. 13})$$

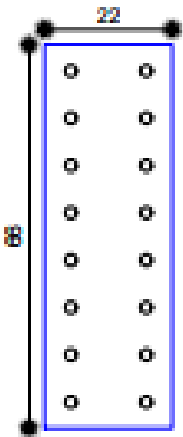
Na aba “Iterações” do pilar no Eberick 2025, o gráfico (Figura 44) apresentado ilustra o processo de convergência do dimensionamento, considerando os efeitos de 2ª ordem e a rigidez efetiva (EI) dependente da armadura. Em termos práticos, o *software* ajusta o momento de cálculo e a área de armadura, recalcula a rigidez e os esforços associados, repetindo esse processo iterativamente até alcançar a estabilização dos valores.

Figura 44 - Momentos fletores de cálculo - P1
MOMENTOS FLETORES DE CÁLCULO



P1
Térreo

ESCALA 1:12.5



16 ϕ 20,0

Nd máximo = 471.07 tf
Nd mínimo = 79.49 tf

SITUAÇÃO CRÍTICA:
Nd = 471.07 tf
Msd = 16603 kgf.m
Msd = 16867 kgf.m
Msd/Msd=1.02

Acerca da interpretação do gráfico (Apêndice 3), compreende-se que:

- Eixo horizontal (x): representa o número da iteração. A Iteração 1 corresponde à estimativa inicial, enquanto as subseqüentes refletem os ajustes sucessivos realizados pelo programa.
- Eixo vertical (y): indica a grandeza monitorada em cada iteração. Nas versões atuais, geralmente corresponde à área total de aço do lance e/ou ao momento de cálculo ($M_{2,d}$), conforme especificado no título ou legenda do gráfico.
- Curvas/cores: cada curva normalmente representa um lance do pilar ou uma direção específica.
- Convergência: ocorre quando as curvas se tornam praticamente horizontais, evidenciando que as variáveis estabilizaram (armadura e momento deixam de variar entre iterações). Esse é o valor efetivamente adotado pelo programa.
- Não convergência: quando as curvas apresentam oscilações ou crescimento sem estabilização, indicando que o dimensionamento não foi satisfeito. As principais causas incluem elevada esbeltez (N/N_{cr} elevado), rigidez insuficiente ou condições de vinculação e comprimento equivalente desfavoráveis.

Tais considerações, permitiram a análise do gráfico, apreciando:

- Um salto significativo entre a 1ª e a 2ª iteração sinaliza que os efeitos de 2ª ordem tiveram grande influência, característica de pilares mais esbeltos.
- Poucas iterações com curvas estáveis indicam um modelo estrutural adequado e equilibrado.
- Múltiplas iterações sem estabilização sugerem necessidade de revisão na seção, taxa de armadura, condições de vinculação (valores de k e l_e), resistência característica do concreto (f_{ck}) ou redistribuição de esforços.

Para efeitos de reprodução, recomenda-se, em situações de não convergência:

- aumentar a seção transversal;
- reduzir o comprimento equivalente (l_e) por meio de melhorias nos engastamentos;
- adotar concreto de maior resistência (f_{ck});
- redistribuir a armadura entre os lances.

Além disso, é essencial verificar os indicadores complementares fornecidos no relatório, como λ , N_{cr} e γ_z/δ , que auxiliam na identificação das razões pelas quais os efeitos de 2ª ordem se tornaram significativos.

No dimensionamento dos pilares, o *software* Eberick 2025 disponibiliza diferentes alternativas de cálculo, dentre as quais se destacam: o método geral, o método da rigidez aproximada, o de curvatura aproximada e o de momento de curvatura. Considerando a complexidade do edifício em estudo e a necessidade de análises mais abrangentes, optou-se por manter todas essas opções habilitadas, permitindo que o programa selecionasse automaticamente a metodologia mais adequada para cada situação estrutural.

Essa configuração assegurou maior precisão e confiabilidade nos resultados, uma vez que o *software* pôde recorrer a diferentes critérios de dimensionamento de acordo com as características específicas de cada pilar, garantindo que as condições de estabilidade e segurança estivessem em conformidade com os parâmetros normativos.

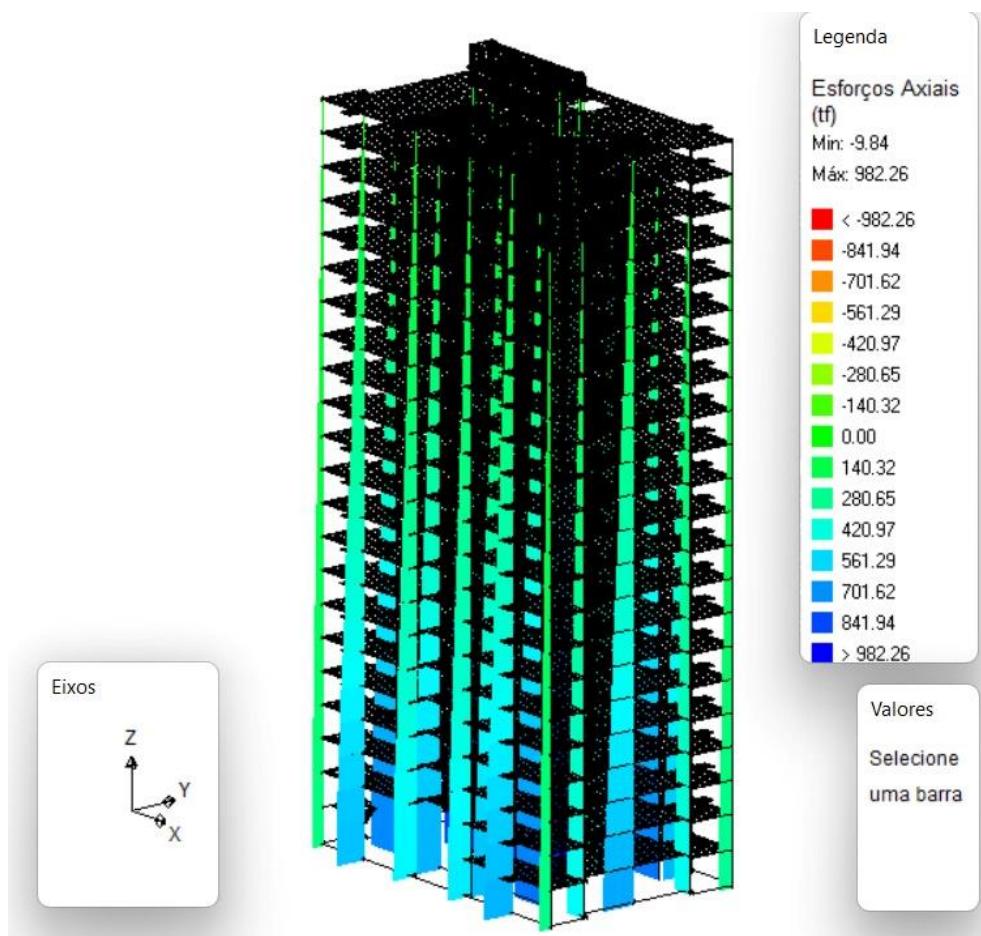
Essa verificação garante que a seção não apenas resista às forças verticais, mas também aos efeitos combinados de flexão e compressão excêntrica, inclusive com consideração dos efeitos de segunda ordem. A não observância desse critério indica que a seção está subdimensionada quanto à estabilidade frente aos esforços fletores e instabilizantes.

Portanto, o procedimento adotado nesse trabalho, fundamentado na NBR 6118:2023, assegura que os pilares sejam dimensionados com base em critérios rigorosos de segurança estrutural. A verificação da tensão de cálculo do concreto, da área mínima da seção transversal e da capacidade resistente ao momento fletor constitui uma etapa essencial para garantir o desempenho seguro e eficiente da estrutura.

A utilização do *software* Eberick 2025 foi decisiva nesse processo, devido à sua capacidade de simular com precisão a redução das seções dos pilares, variações de esbeltez, diferentes classes de f_{ck} , bem como o detalhamento da armadura. O programa realiza automaticamente a verificação dos parâmetros normativos, como a relação M_{rd}/M_{sd} , o coeficiente de estabilidade global γ_z , os efeitos de segunda ordem (*P-Delta*) e os deslocamentos horizontais, promovendo maior segurança e aderência às exigências da ABNT.

Além disso, o recurso de grelha tridimensional (Figura 45) permite a visualização em 3D dos deslocamentos e esforços atuantes nos pórticos estruturais, facilitando a identificação de inconformidades que eventualmente demandem ajustes por parte do projetista.

Figura 45 - Recurso grelha para pórtico em 3D do *Eberick 2025*



Fonte: ALTOQI, 2024.

Complementarmente, o *Eberick 2025* também gera automaticamente o memorial de cálculo, relatórios e plantas com os respectivos detalhamentos técnicos (Apêndice 1), que podem ser integrados diretamente às pranchas de projeto para fins de aprovação e execução. Em síntese, a escolha dessa ferramenta se justifica por sua robustez técnica e por oferecer um ambiente de simulação confiável e normativamente compatível, essencial para o desenvolvimento de estudos de otimização estrutural como o aqui proposto.

4.2 REDUÇÃO DAS SEÇÕES DOS PILARES

Após o pré-dimensionamento estrutural realizado no *software Eberick 2025*, foi conduzida uma análise detalhada dos esforços atuantes nos pilares localizados no pavimento térreo, por serem os responsáveis por suportar as maiores cargas verticais da edificação. Com base nesses resultados, procedeu-se à redução das seções transversais dos pilares, utilizando a

escala de f_{ck} desenvolvida especificamente para esse estudo, respeitando os limites normativos estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023.

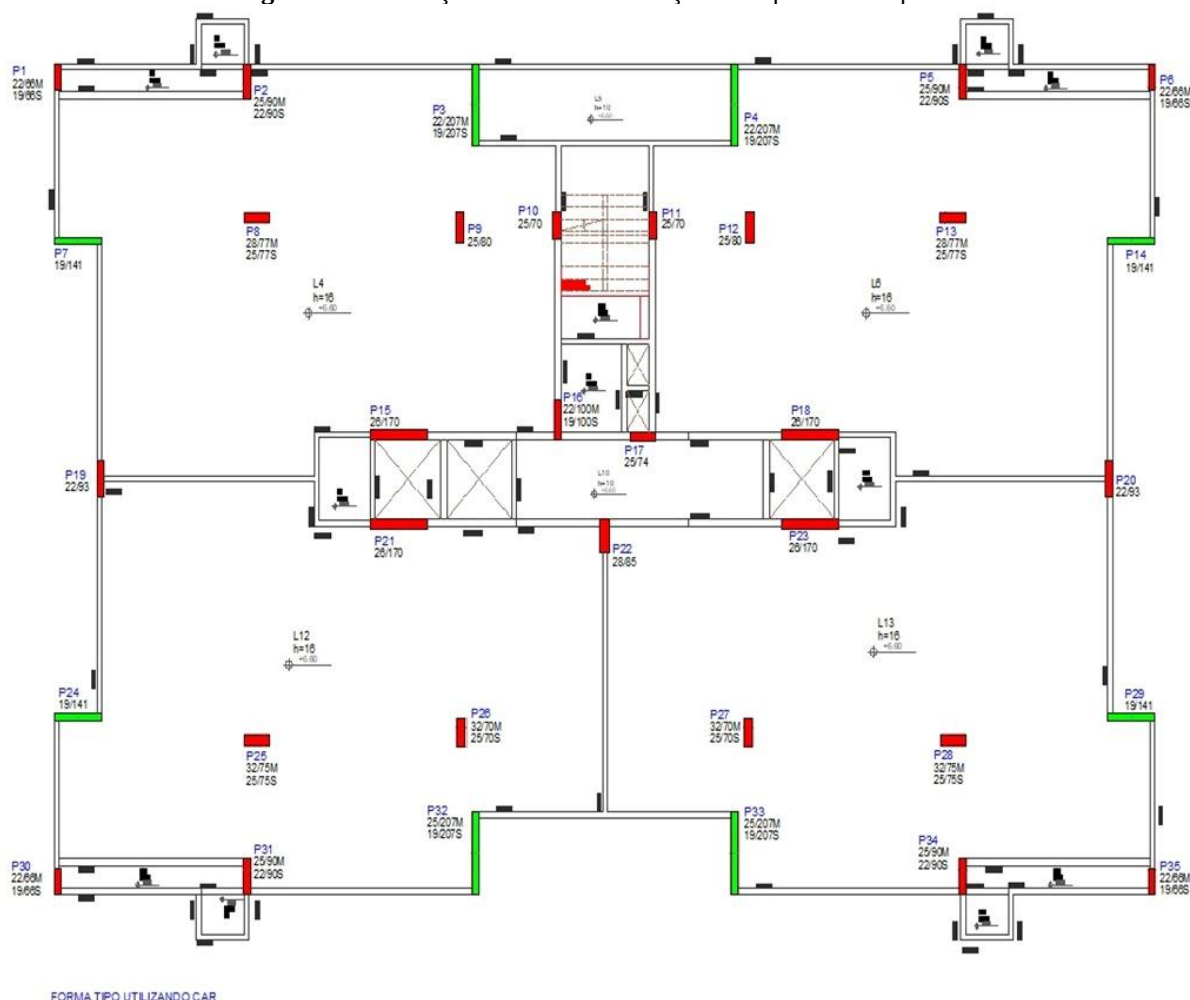
O processo de otimização foi conduzido de forma iterativa, por meio da ferramenta “Simulador de Pilares” do *Eberick 2025*, com o objetivo de maximizar a eficiência estrutural das seções. Foram considerados, para cada pilar, os valores de f_{ck} atribuídos por pavimento, bem como a envoltória de esforços solicitantes, garantindo que os momentos resistentes estivessem adequadamente atendidos. Apenas os pilares com seção transversal constante ao longo de sua altura foram redimensionados, o que permitiu a uniformização das análises comparativas e o controle dos parâmetros estruturais ao longo da prumada.

A cada nova simulação, foram reavaliados os principais parâmetros de estabilidade global, incluindo:

- O coeficiente de estabilidade global γ_z ;
- Os efeitos de segunda ordem (não linearidade geométrica): *P-Delta*;
- Os deslocamentos horizontais no topo da edificação.

O edifício em estudo conta com 36 pilares estruturais, sendo 35 contínuos ao longo da prumada e 1 pilar interrompido no mezanino. Dentre esses, 8 pilares – identificados como P3, P4, P7, P14, P24, P29, P32 e P33 – não puderam ter suas dimensões transversais alteradas devido às restrições arquitetônicas, como recuos e avanços de fachada, conforme ilustrado em verde na Figura 46.

Figura 46 - Ilustração dos recuos e avanços da arquitetura do prédio



Fonte: AUTOR (2025).

Ainda assim, nesses pilares, foi observada uma redução significativa na área de armadura de aço, resultado direto da substituição do concreto convencional pelo CAR, mesmo sem alteração da geometria das seções.

A escala de f_{ck} adotada nesse trabalho seguiu o mesmo critério utilizado pelo projetista da estrutura executada, que empregou concreto com f_{ck} de 30 MPa do 6º pavimento até a cobertura. Essa decisão foi justificada pela redução progressiva dos esforços verticais à medida que sobe na edificação, o que permite o uso de concretos com menor resistência sem comprometer a segurança estrutural.

Inspirando-se nesse raciocínio, o presente estudo manteve o f_{ck} de 30 MPa nos andares superiores, porém substituiu os níveis intermediários da escala original por classes mais elevadas de concreto de alta resistência, como foi anteriormente aqui evidenciado.

Como resultado, obteve-se uma redução média de 31,72% na área das seções transversais dos pilares, mantendo todos os parâmetros de estabilidade global dentro dos limites

normativos: o coeficiente γ_z permaneceu inferior a 1,30 e os deslocamentos horizontais atenderam aos critérios de desempenho estabelecidos pela NBR 6118:2023.

4.3 REDUÇÃO NA EMISSÃO DE CO₂

A avaliação das emissões de CO₂ foi realizada a partir dos coeficientes de Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential – GWP*), estabelecidos no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), os quais submetem: dióxido de carbono – CO₂ (1), metano – CH₄ (28) e óxido nitroso – N₂O (265).

Esses coeficientes permitiram a conversão dos diferentes gases em equivalentes de CO₂ (CO₂e), viabilizando a quantificação agregada dos impactos ambientais associados à construção.

A análise considerou os módulos A1 a A5 do ciclo de vida da edificação, abrangendo as fases de produção dos materiais (A1–A3), transporte (A4) e execução da obra (A5), etapas nas quais as decisões estruturais exercem maior influência sobre as emissões. Com isso, tornou-se possível comparar as emissões entre os modelos em concreto convencional e em CAR, com base no consumo de materiais estruturais dos pilares.

O *software Eberick 2025* foi utilizado para quantificar as massas de concreto e aço, convertendo os valores em kg de CO₂ equivalente a partir de bases de dados internacionais, como a Ecoinvent. A funcionalidade “Calculadora de Emissões”, ilustrada na Figura 47, auxiliou na geração do inventário estimado de emissões por classe de material.

Figura 47 - Funcionalidade da calculadora de emissões de CO₂ no software Eberick 2025



Fonte: AUTOR (2025).

Para o concreto, os fatores de emissão médios foram adotados conforme o Quadro 9:

Quadro 9 – Fatores de emissão CO₂/kg

Classe	Fator de emissão (kg CO ₂ /kg)
C30	0,118
C35	0,124
C40	0,130
C45	0,135
C60	0,145
C80	0,155
C90	0,160

Fonte: AUTOR (2025).

Com esses fatores, foram estimadas as emissões totais relativas ao concreto de cada cenário construtivo, conforme as massas empregadas em cada classe de resistência.

A análise foi estruturada em cinco etapas metodológicas, descritas no Quadro 10, abrangendo desde a coleta dos dados até a consolidação e comparação dos resultados entre os dois modelos.

Quadro 10 – Passo a passo para o cálculo da emissão de CO₂

Etapa	Nome da etapa	Descrição da etapa
1	Coleta de dados do modelo estrutural	Os dados de entrada foram obtidos diretamente das modelagens computacionais realizadas no <i>software Eberick 2025</i> . Foram extraídos os volumes de concreto segregados por classe de resistência (f_{ck}) e a massa total de aço longitudinal prevista para cada um dos dois cenários modelados: um com concreto convencional (C30 a C45) e outro com concreto de alta resistência (C30, C60, C80 e C90). Essa coleta assegurou consistência técnica e correspondência direta com os quantitativos de projeto.
2	Conversão do volume de concreto em massa	O volume de concreto foi convertido em massa (kg), considerando uma densidade padrão de 2.500 kg/m ³ , conforme prática comum na literatura técnica e normas brasileiras. Essa conversão permitiu aplicar os fatores de emissão (kg CO ₂ e/kg) de forma uniforme e comparável entre os modelos.
3	Cálculo das emissões associadas aos materiais	Com base nas massas obtidas, aplicaram-se fatores de emissão específicos para concreto e aço, conforme dados fornecidos pelo <i>software Eberick 2025</i> . Para o concreto, os fatores foram ajustados por classe de resistência, refletindo o aumento de emissões associado ao uso de CAR. Para o aço, foi adotado um fator médio de 1,80 kg

CO ₂ e/kg. Em relação à madeira (fôrmas), considerou-se emissão neutra ou negativa, conforme a origem florestal.		
4	Consolidação das emissões totais	As emissões totais de CO ₂ foram calculadas separadamente para o concreto e para o aço, em cada modelo estrutural. Os resultados foram organizados em tabelas, possibilitando análise comparativa entre o cenário convencional e o otimizado com CAR. A soma das emissões por material permitiu quantificar o total de carbono incorporado em cada solução estrutural.
5	Avaliação das reduções de emissões	Foram quantificadas as reduções absolutas (em kg CO ₂ e) e relativas (em %) obtidas com a substituição do concreto convencional pelo CAR. Essa etapa permitiu avaliar, de forma objetiva, os ganhos ambientais viabilizados pela estratégia de otimização estrutural, especialmente em termos de redução de consumo de materiais e emissões associadas.

Fonte: AUTOR (2025).

Em resumo, a metodologia descrita nesse capítulo integra fundamentos da engenharia estrutural e da sustentabilidade, por meio da aplicação de ferramentas computacionais e técnicas de análise ambiental reconhecidas internacionalmente. A modelagem paramétrica permitiu simular diferentes cenários de resistência do concreto, avaliando o impacto das decisões de projeto na redução do consumo de materiais e na diminuição da emissão de CO₂ da estrutura.

A abordagem adotada garantiu rastreabilidade dos dados, coerência normativa e reprodutibilidade da análise, fornecendo uma base sólida para a discussão dos resultados no capítulo seguinte. O uso do *Eberick 2025*, aliado à estruturação sistemática da Avaliação do Ciclo de Vida, contribuiu para uma avaliação integrada da eficiência estrutural e do desempenho ambiental, fortalecendo a proposta de utilização do CAR como alternativa técnica e sustentável no contexto da construção civil verticalizada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do CAR no redimensionamento dos pilares do edifício em estudo resultou em reduções expressivas nas seções transversais. Em média, os pilares apresentaram diminuição de até 31,72% em sua área, com ganhos diretos de área útil nos pavimentos. Além disso, observou-se redução da taxa de armadura longitudinal e transversal, sem comprometer os parâmetros de estabilidade global.

A análise foi conduzida sobre 36 pilares do edifício, dos quais 28 foram efetivamente redimensionados, mantendo-se inalterados os demais elementos estruturais (vigas, lajes, escadas e fundações). Os resultados são apresentados a seguir em três etapas: (i) redimensionamento dos pilares; (ii) verificação dos parâmetros γ_z e efeitos de segunda ordem (*P-Delta*); e (iii) estimativa da redução nas emissões de CO₂.

5.1 REDUÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS E VOLUME DE CONCRETO

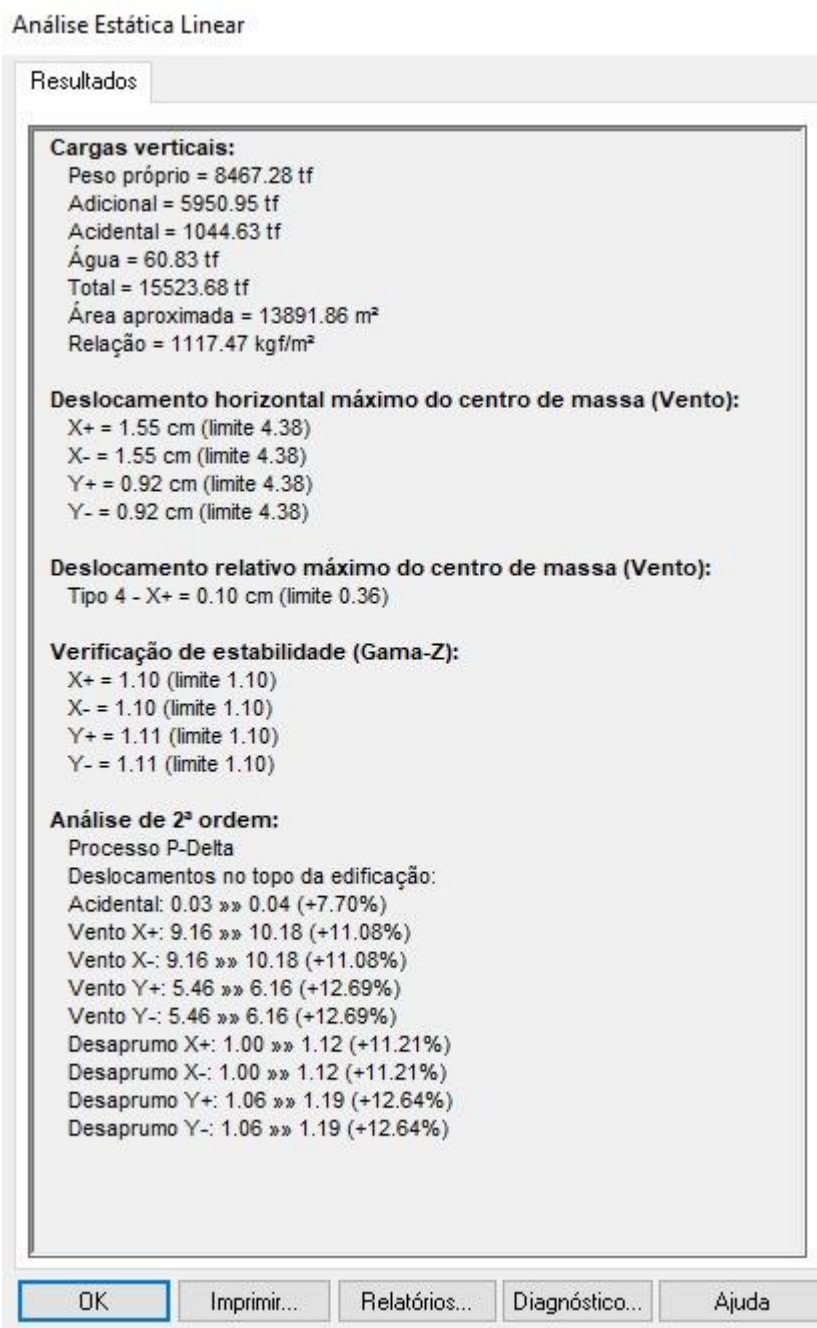
Com uso da ferramenta "Simulador de Pilares" do *Eberick 2025*, reduziu-se as seções transversais dos pilares variando a resistência à compressão do concreto (f_{ck}), iniciando em 90 MPa e chegando ao valor de 30 MPa. As seções transversais dos pilares foram ajustadas iterativamente para maximizar a utilização da seção, levando em conta o valor do concreto (f_{ck}) adotado e a envoltória dos momentos resistentes do pilar. É importante ressaltar que os pilares selecionados para modificação possuem seção transversal uniforme ao longo de toda a altura, o que simplifica a interpretação e análise dos resultados.

A cada alteração nas características do concreto, foi avaliado o parâmetro γ_z , que representa o coeficiente de amplificação das cargas verticais devido aos efeitos de segunda ordem (efeitos *P-Delta*), o que impacta diretamente na estabilidade global da estrutura. O objetivo foi mantê-lo sempre abaixo do limite de 1,3, conforme estabelecido pela ABNT NBR 6118:2023, garantindo que os efeitos de instabilidade não comprometessem a segurança estrutural. Além disso, a cada iteração, foi analisado o processo *P-Delta*, seguindo rigorosamente as recomendações da ABNT NBR 6118:2023.

Durante essas análises, foram avaliados detalhadamente os efeitos da substituição do concreto convencional pelo CAR nas seções dos pilares, observando o impacto na estabilidade “lateral” global da edificação, na resistência contra ações de vento e em outros aspectos

relevantes (Figuras 48 e 49). O objetivo principal foi alcançar o equilíbrio eficiente entre a economia de material e a garantia da estabilidade global da estrutura.

Figura 48 - Concreto convencional: vento a 90°



Fonte: AUTOR (2025).

A Figura 48 ilustra os valores gerais obtidos na análise das características do concreto convencional (C30, C35, C40 e C45), previamente utilizados na construção do edifício. Esses valores correspondem às resistências especificadas no projeto original da edificação. Nessa conjuntura, o edifício em análise foi caracterizado como uma estrutura convencional, modelada

como um pórtico espacial, uma vez que o objetivo do estudo é observar exclusivamente a capacidade resistente dos pilares, considerando os efeitos horizontais e realizando as devidas verificações quanto à estabilidade global da estrutura.

Figura 49 - Parâmetros com CAR



Fonte: AUTOR (2025).

Após a substituição do concreto convencional pelo CAR, a Figura 49 apresenta os parâmetros de estabilidade global: o coeficiente γ_z , os efeitos do processo *P-Delta* e os deslocamentos horizontais. A figura também ilustra a interface do *software* utilizada para

modificar os valores associados ao concreto convencional, substituindo-os pelos correspondentes ao CAR. Esses valores estão diretamente relacionados à redução das seções transversais dos pilares, conforme os percentuais previamente descritos nesse trabalho, e fundamentam-se nas diretrizes da ABNT NBR 6118:2023.

Ressalta-se que um dos parâmetros considerados na caracterização do CAR foi o seu módulo de elasticidade (Figura 50), calculado de acordo com a classe de agressividade do ambiente e em conformidade com as exigências do projeto estrutural.

Figura 50 - Características do concreto: materiais e durabilidade

Materiais e durabilidade

Aplicação
☐ Projeto inteiro
☒ Por pavimento

Pavimento
 Tipo 19
 Tipo 18
 Tipo 17
 Tipo 16
 Tipo 15
 Tipo 14
 Tipo 13
 Tipo 12
 Tipo 11
 Tipo 10
 Tipo 9
 Tipo 8
 Tipo 7
 Tipo 6
 Tipo 5
 Tipo 4
 Tipo 3
 Tipo 2
 Tipo 1
 Mezanino
 Térreo
 Baldrame

Avisos
 Todas as informações estão definidas corretamente
 Detalhes...

Geral
 Classe de agressividade: II (moderada)
 Dimensão do agregado: 19 mm
☒ Controle rigoroso nas dimensões dos elementos
☐ Considerar redução no cobrimento para peças com f_{ck} acima do requerido para a classe de agressividade

Abertura máxima das fissuras
 Contato com o solo: 0.2 mm
 Contato com a água: 0.1 mm
 Demais peças: 0.3 mm
 Combinações: Frequentes

Elementos

	Concreto	Cobrimento (peças externas)	Cobrimento (peças internas)	Cobrimento (contato com o solo)	
Vigas	C-30	3 cm	2.5 cm	3 cm	Bitolas...
Pilares e NR	C-90	3 cm	2.5 cm	4.5 cm	Bitolas...
Lajes	C-30	2.5 cm		3 cm	Bitolas...
Reservatórios	C-30	3 cm			Bitolas...
Blocos	C-30			4.5 cm	Bitolas...
Sapatas	C-30			4.5 cm	Bitolas...
Tubulões	C-30			4.5 cm	Bitolas...
Muros	C-30			3 cm	Bitolas...
Radier	C-30			4.5 cm	Bitolas...

Elementos pré-moldados

	Concreto	Cobrimento (peças externas)	
Vigas	C-25	3 cm	Bitolas...
Pilares	C-25	3 cm	Bitolas...

Etapas... Tipo: Pré-moldado

Fluência... Barras... Classes... Protensão... OK Cancelar Ajuda

Fonte: AUTOR (2025).

A Figura 50 apresenta a classificação dos materiais, bem como sua durabilidade, conforme a definição dos valores de f_{ck} aplicados aos pilares em CAR. Embora o foco desse estudo esteja voltado à aplicação do CAR especificamente nos pilares do edifício, ressalta-se que esse procedimento pode ser adotado para qualquer elemento estrutural, conforme as necessidades do projeto.

Na definição dos materiais e da durabilidade, considerou-se a classe de agressividade como moderada, o diâmetro máximo do agregado de 19 mm e os limites de abertura de fissuras em conformidade com a ABNT NBR 6118:2023. Esses parâmetros foram relacionados aos valores de f_{ck} do CAR, que foram atribuídos em uma escala crescente do baldrame até o quinto

pavimento, atingindo o valor máximo de 90 MPa. Conforme mencionado anteriormente, o f_{ck} variou entre 30 MPa e 90 MPa, com redução progressiva à medida que os pavimentos superiores foram considerados, de modo a manter a estabilidade global da estrutura.

O mesmo critério de gradação da resistência do concreto foi adotado no projeto original do edifício em questão, com a diferença de que, na construção real, foi utilizado concreto convencional. Para a simulação nesse estudo, adotaram-se os seguintes valores de f_{ck} ao longo da altura da edificação:

- O edifício teve sua construção iniciada com concreto de $f_{ck} = 45$ MPa, valor mantido até a primeira laje tipo;
- Em seguida, o f_{ck} foi reduzido para 40 MPa até o terceiro andar tipo;
- Do terceiro ao quinto andar tipo, o f_{ck} adotado foi de 35 MPa;
- Do sexto andar até o reservatório superior, o valor de f_{ck} foi reduzido para 30 MPa, conforme a escala de f_{ck} (Figura 38), apresentada seção 4.1.

A Figura 51, por sua vez, mostra que foi adotado f_{ck} de 60 MPa (concreto C-60), valor sugerido pelo próprio *software*. A partir desse valor de referência, o *Eberick 2025* aplicou o coeficiente de minoração previsto na ABNT NBR 6118:2023, obtendo a resistência de cálculo do concreto, conforme as atualizações normativas incorporadas ao sistema.

Figura 51 - Características do concreto: classes

Classes de concreto

Classes de resistência

- C-10
- C-20
- C-25
- C-30
- C-35
- C-40
- C-45
- C-50
- C-60**
- C-80
- C-90

Identificação

C-60

Resistência à compressão

Resistência característica (f_{ck})

600 kgf/cm²

Coeficiente de minoração (γ_c)

1.4

Resistência de cálculo (f_{cd})

428.57 kgf/cm²

Peso específico

2400 kgf/m³

Abatimento (slump)

8 cm

Coeficiente de dilatação térmica

0.00001 /°C

Tipo de agregado

basalto

Custo

Material

700 R\$/m³

Execução

250 R\$/m³

Módulo de elasticidade

☒ Obter a partir do f_{ck}

Módulo secante (E_{cs})

474376 kgf/cm²

Módulo inicial (E_{ci})

499343 kgf/cm²

Resistência à tração

☒ Obter a partir do f_{ck}

Resistência média (f_{ctm})

43.55 kgf/cm²

Característica inferior ($f_{ctk,inf}$)

30.48 kgf/cm²

Característica superior ($f_{ctk,sup}$)

56.61 kgf/cm²

Resistência de cálculo (f_{ctd})

21.77 kgf/cm²

Cimento

☒ Obter a partir da classe de agressividade

Consumo

280 kgf/m³

Tipo

CP-V-ARI

OK Cancelar Ajuda

Fonte: AUTOR (2025).

Com base na resistência C-60 e na seleção do tipo de agregado – nesse caso, basalto –, foi possível obter dados complementares diretamente do *software* – o que permitiu maior

precisão na caracterização do concreto utilizado –, como: peso específico (2400 kgf/m^3), abatimento (*slump*) de 8 cm e coeficiente de dilatação térmica ($1,0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$).

Na aba “Classes de Resistência”, disponível no *software Eberick 2025*, é possível classificar o tipo de agregado, o módulo de elasticidade, o tipo de cimento, a resistência à tração (valores *fct*) e demais parâmetros mecânicos do concreto. Esses dados são fundamentais para a definição precisa do material a ser utilizado na modelagem estrutural, permitindo a caracterização completa do concreto de acordo com suas propriedades específicas.

Durante o processo de análise, também foi ajustada a rigidez axial dos pilares de cada pavimento, com base em um multiplicador definido pelo usuário. Esse ajuste foi realizado no *software Eberick 2025*, acessando o seguinte caminho: *Estrutura* → *Configurações* → *Projeto* → *Análise*, conforme ilustrado na Figura 52, que apresenta a interface correspondente à etapa denominada “Análise”.

Figura 52 - Características do concreto: análise

Análise

Geral

Redução no engaste para nós semirrígidos: 15 %

Redução na torção para os pilares: 85 %

Redução na torção para as vigas: 85 %

Aumento na rigidez axial dos pilares: 1.1 - ...

☒ Salvar automaticamente o projeto após o processamento

Ligação viga-pilar

☒ Flexibilizar ligação com pilar equivalente

Aplicar para relação h/b maior que: 5 ...

Não linearidade física

Rigidez das vigas: 0.4 Ec.Ic

Rigidez dos pilares: 0.8 Ec.Ic

Rigidez das lajes: 0.5 Ec.Ic

Rigidez das estacas: 0.8 Ec.Ic

Rigidez alvenaria estrutural: 0.8 Ea.I

Não linearidade geométrica

☒ Utilizar o processo P-Delta

Número máximo de iterações: 10

Precisão mínima: 1 %

Combinação vertical de cálculo: 1.4G1+1.4G2+1.4Q+1.1A+1.3V1+1.3V2+1.3V3+1.3V4 ...

Imperfeições globais

Tipo de estrutura: Estruturas usuais

Combinação vertical característica: G1+G2+Q+A ...

Processo

☒ Grelhas + pórtico espacial

☐ Modelo integrado

Painéis de lajes... Modelo da fundação...

Modelo ELS... Avançado...

Análise dinâmica...

OK Cancelar **Ajuda**

Fonte: AUTOR (2025).

A modificação do parâmetro de rigidez axial mostrou-se fundamental para considerar os efeitos construtivos que, por padrão, não são contemplados pelo modelo matemático empregado no *software*.

Deve-se ressaltar, que, na etapa de análise estrutural, foram considerados nós semirrígidos com 15% de rigidez, como ilustra a Figura 52, de acordo com o que orienta a ABNT NBR 6118:2023.

Também foi aplicado um incremento na rigidez axial dos pilares, permitindo simular de forma mais precisa o carregamento progressivo da estrutura a cada novo pavimento, o que possibilita considerar os efeitos da rigidez dos pilares ao longo da edificação.

No que se refere à não linearidade física, foram considerados os efeitos de rigidez não apenas nos pilares, mas também nas vigas, lajes e estacas, em conformidade com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023.

Quanto à não linearidade geométrica, o *software Eberick 2025* contemplou a análise por meio do parâmetro γ_z e do processo *P-Delta*. O parâmetro α , por sua vez, não foi avaliado, pois não é implementado no referido *software*. Contudo, a análise do parâmetro γ_z já abrange os efeitos de segunda ordem, os quais também seriam refletidos na verificação do parâmetro α .

5.2 OTIMIZAÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DOS PILARES

O processo de otimização teve início pela análise dos pilares do pavimento térreo, por serem os mais solicitados verticalmente. O redimensionamento desses elementos foi realizado com base em critérios estruturais de resistência à compressão, flexo-compressão e estabilidade, respeitando a relação $M_{sd}/M_{rd} \leq 1,0$ e o limite de $\gamma_z \leq 1,30$. A redução média das áreas seccionais dos pilares foi de 31,72%, desconsiderando os elementos não otimizados. Essa diminuição contribuiu diretamente para a redução da carga vertical total e, conseqüentemente, para menor solicitação das fundações.

Considerando os dados obtidos na análise do modelo estrutural, a avaliação comparativa entre o concreto convencional e o CAR baseou-se na extração de dados quantitativos do referido modelo, com destaque para os volumes de concreto e as massas de aço empregados nos pilares:

- **Volume total de concreto por classe de resistência (f_{ck}):**
 - Modelo convencional: 805,8 m³ (C30, C35, C40 e C45)
 - Modelo com CAR: 603,8 m³ (C30, C60, C80 e C90)
- **Massa total de aço:**
 - Modelo convencional: 147.173,4 kg
 - Modelo com CAR: 119.101,4 kg

A planta de forma do pavimento tipo, já apresentada na Figura 46, na seção 4.2 desse estudo e evidencia as novas seções dos pilares resultantes da aplicação do CAR, onde as alterações geométricas, concentradas nos elementos verticais, refletem a racionalização viabilizada pela elevação do f_{ck} , mantendo os critérios normativos de segurança e estabilidade global.

5.3 ANÁLISE COMPARATIVA DAS SEÇÕES

Considerando todos os pilares de suporte do edifício em estudo, suas respectivas áreas foram calculadas, primeiro, para o concreto convencional, em seguida, para o CAR. Cada área foi obtida em centímetros quadrados (cm^2), com base nas dimensões da base (b) e da altura (h) de cada seção transversal. Esse cálculo é fundamental para o presente estudo, pois evidencia o efeito da redução nas dimensões dos pilares quando se utiliza CAR.

A Tabela 1 apresenta a comparação entre as áreas das seções transversais nos dois modelos e o percentual de redução para cada pilar. Com exceção dos pilares restritos, todos os demais elementos estruturais apresentaram reduções, com destaque para pilares como P1, P6, P30 e P34, que atingiram 45% de diminuição.

Tabela 1 – Análise comparativa das seções transversais dos pilares (convencionais x CAR) e redução percentual.

Pilar	Concreto convencional			CAR			Redução (%)
	b (cm)	h (cm)	Área [cm^2]	b (cm)	h (cm)	Área [cm^2]	
P1	22	120	2640	22	66	1452	45.00%
P2	25	120	3000	25	90	2250	25.00%
P3	22	207	4554	22	207	4554	0.00%*
P4	22	207	4554	22	207	4554	0.00%*
P5	25	120	3000	25	90	1452	25.00%
P6	22	120	2640	22	66	1452	45.00%
P7	19	141	2679	19	141	2679	0.00%*
P8	28	120	3360	28	77	2156	35.83%
P9	25	95	2375	25	80	2000	15.79%
P10	25	120	3000	25	70	1750	41.67%
P11	25	120	3000	25	70	1750	41.67%
P12	25	95	2375	25	80	2000	15.79%
P13	28	120	3360	28	77	2156	35.83%
P14	19	141	2679	19	141	2679	0.00%*

P15	26	227,50	5915	26	170	4420	25.26%
P16	22	129	2838	22	100	2200	22.47%
P17	25	99	2475	25	74	1850	25.25%
P18	16	227.5	5915	26	170	4420	25.26%
P19	22	147	3234	22	93	2046	36.74%
P20	22	147	3234	22	93	2046	36.74%
P21	26	227.5	5915	26	170	4420	25.26%
P22	28	129	3612	28	85	2380	34.12%
P23	26	227.5	5915	26	170	4420	25.26%
P24	19	141	2679	19	141	2679	0.00%*
P25	32	120	3840	32	75	2400	37.50%
P26	32	95	3040	32	70	2240	26.32%
P27	25	95	2375	25	80	2000	15.79%
P28	32	120	3840	32	75	2400	37.50%
P29	19	141	2679	19	141	2679	0.00%*
P30	22	120	2640	22	66	1452	45.00%
P31	25	207	5175	25	207	5175	0.00%
P32	25	207	5175	25	207	5175	0.00%
P33	25	207	5175	25	207	5175	0.00%
P34	22	120	2640	22	66	1452	45.00%
P35	25	120	3000	25	90	2250	25.00%
P36	19	50	950	19	30	570	40.00%

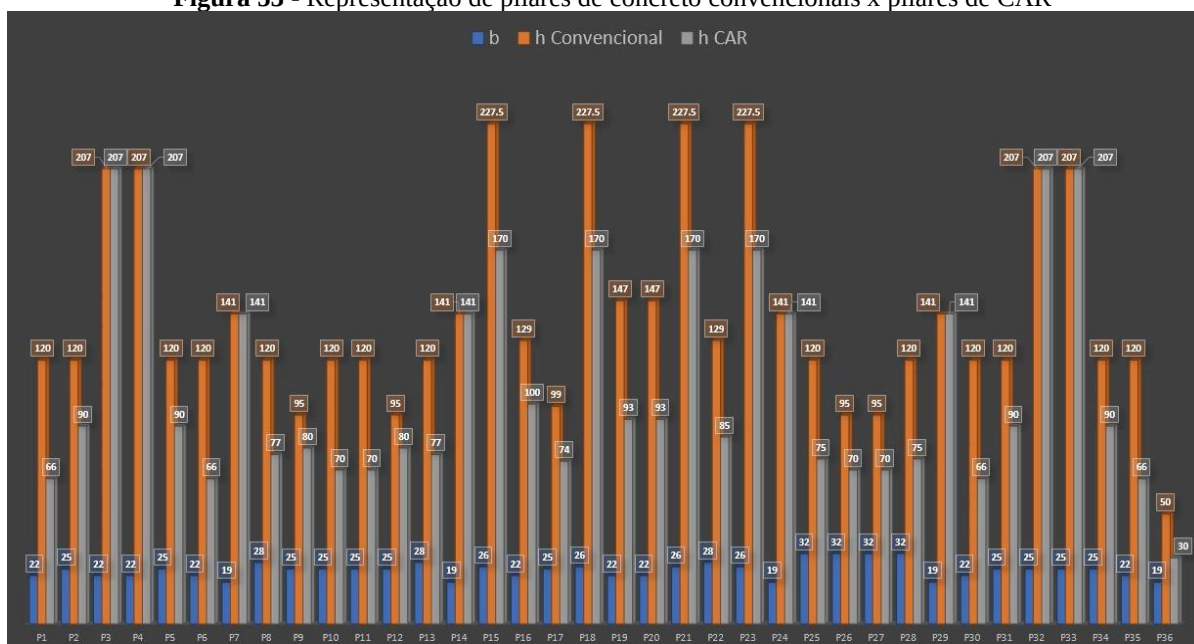
*Pilares com restrições arquitetônicas.

Fonte: AUTOR (2025).

A Tabela 1 elenca a análise comparativa das áreas das seções transversais dos pilares, permitindo calcular o percentual de redução da área para cada elemento. Os dados evidenciam que houve diminuição nas seções transversais de todos os pilares submetidos à substituição do concreto convencional pelo CAR.

Ressaltando que as seções transversais dos pilares foram otimizadas mantendo constante a dimensão da base (b) e variando apenas a altura (h), o que assegura a comparação direta entre os modelos, pois permitiu isolar a influência do f_{ck} elevado no desempenho estrutural.

Com os resultados, já expostos na tabela acima, foi possível também organizar um gráfico comparativo (Figura 53) com os pilares nos dois modelos, considerando as dimensões constantes ao longo de toda a prumada.

Figura 53 - Representação de pilares de concreto convencionais x pilares de CAR

Fonte: AUTOR (2025).

Esses dados serão posteriormente utilizados como base para a discussão dos parâmetros de estabilidade global da edificação, considerando a variação do parâmetro γ_z , os efeitos do processo *P-Delta* e os deslocamentos horizontais correspondentes a cada valor de f_{ck} utilizado.

5.3.1 Classe de agressividade, definição de f_{ck} e módulo de elasticidade do CAR

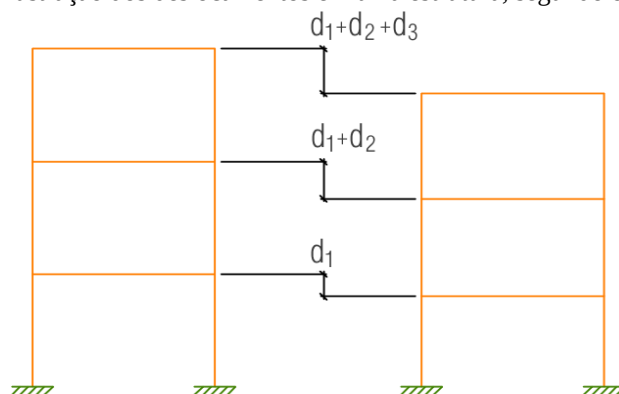
O módulo de elasticidade, a resistência à tração e o consumo de cimento também puderam ser determinados com base nas informações fornecidas pelo *software*, uma vez que esses parâmetros foram vinculados ao valor de f_{ck} previamente definido pelo usuário.

Observando o comportamento estrutural analisado por meio do modelo de pórtico espacial, e considerando que o *software Eberick 2025* é capaz de gerar um modelo tridimensional da estrutura, aplicando os carregamentos conforme definidos pelo usuário, o cálculo adotado pressupõe que o carregamento da edificação é aplicado de forma única e instantânea, ou seja, assume-se o projeto como já totalmente executado. Com isso, o *Eberick 2025* interpreta que todos os deslocamentos da estrutura ocorrem simultaneamente, como ilustrado na Figura 54. Sob essa lógica, a compressão de um pilar nos pavimentos inferiores provoca o deslocamento vertical descendente de toda a sua prumada.

Esse comportamento é relevante, pois, caso os deslocamentos verticais sejam significativos ou ocorram com intensidades distintas ao longo da altura da edificação, podem surgir esforços adicionais indesejados para conter esses deslocamentos. Consequentemente, o

dimensionamento estrutural dos elementos deve ser mais robusto, a fim de garantir a estabilidade global e a segurança da estrutura.

Figura 54 - Ilustração dos deslocamentos em uma estrutura, segundo o Eberick 2025



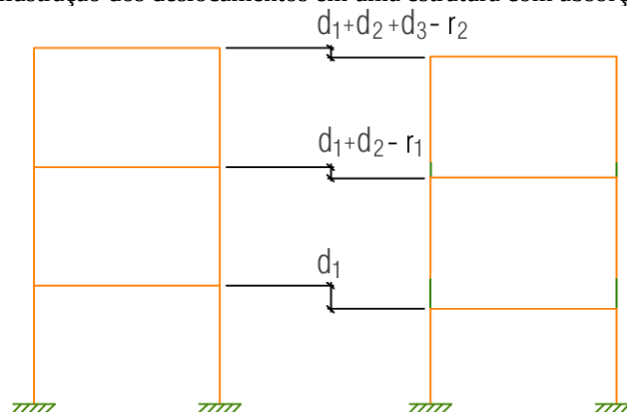
Fonte: ALTOQI, 2024.

Considerando uma edificação real, os deslocamentos estruturais não ocorrem de forma simultânea, mas sim, de maneira progressiva ao longo do processo construtivo. É importante observar que os pavimentos são construídos sequencialmente, e, assim, a cada nova etapa, a estrutura sofre deslocamentos imediatos em função das cargas adicionais introduzidas.

Como a concretagem de cada novo pavimento é executada sempre a prumo, os pequenos deslocamentos acumulados nos elementos estruturais inferiores são naturalmente compensados pelo nivelamento realizado no momento da concretagem. Esse comportamento construtivo progressivo é essencial para a avaliação realista do desempenho estrutural.

No presente estudo, esse fator foi devidamente considerado, e os efeitos construtivos foram incorporados à otimização dos pilares, conforme ilustrado na Figura 55.

Figura 55 - Ilustração dos deslocamentos em uma estrutura com absorção dos mesmos



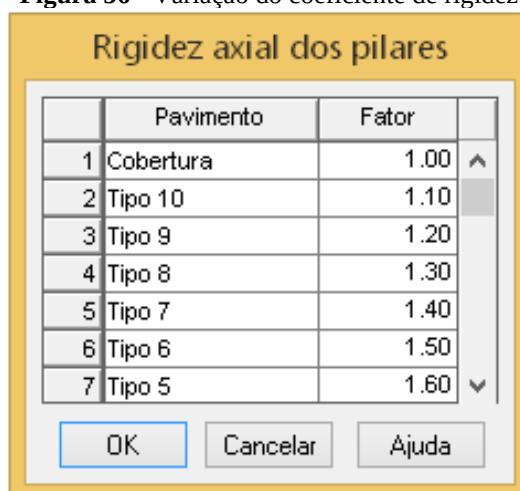
Fonte: ALTOQI, 2024.

A Figura 55 ilustra os deslocamentos em uma estrutura e sua correspondente absorção, efeito representado por um fator de regularização evidenciado em cor verde na referida figura. Nela, observa-se que os deslocamentos finais se mostraram significativamente menores. No *software Eberick 2025*, esse efeito pôde ser considerado por meio da atribuição de uma rigidez axial crescente para os pilares dos pavimentos inferiores, estratégia que foi adotada nesse estudo. Com isso, os pilares inferiores apresentaram menor deslocamento, o que corresponde à parcela de regularização da estrutura.

O *Eberick 2025* demonstrou que o aumento da rigidez axial dos pilares pode ser ajustado por meio de um multiplicador definido pelo usuário, configurável através do seguinte caminho no *software*: *Estrutura* → *Configurações* → *Projeto* → *Análise*. Essa configuração foi fundamental para a consideração dos efeitos construtivos que, por padrão, não são contemplados pelo modelo matemático convencional utilizado na análise.

Ainda tratando dos parâmetros de rigidez axial, a Figura 56 também apresenta a variação dos coeficientes adotados ao longo da altura da estrutura. Alertando que é fundamental que os incrementos de rigidez sejam aplicados com cautela, evitando exageros que possam superestimar a rigidez da estrutura e comprometer a segurança do dimensionamento. De forma geral, recomenda-se uma variação moderada, em torno de 0,10 por pavimento, valor que foi adotado no presente estudo como parâmetro de ajuste entre os diferentes pavimentos da edificação.

Figura 56 - Variação do coeficiente de rigidez



	Pavimento	Fator
1	Cobertura	1.00
2	Tipo 10	1.10
3	Tipo 9	1.20
4	Tipo 8	1.30
5	Tipo 7	1.40
6	Tipo 6	1.50
7	Tipo 5	1.60

Fonte: AUTOR (2025).

A análise detalhada dos parâmetros estruturais relacionados ao CAR, com ênfase na rigidez axial, resistência à compressão e comportamento dos pilares ao longo da altura da

edificação, permitiu avaliar de forma mais realista os efeitos construtivos envolvidos em edificações verticais. A utilização do *software Eberick 2025*, com recursos que possibilitam o ajuste progressivo da rigidez dos pilares e a consideração dos deslocamentos diferenciais entre pavimentos, foi essencial para a simulação precisa da estabilidade global da estrutura.

Os ajustes realizados – como a aplicação de rigidez axial crescente, a definição criteriosa do f_{ck} conforme os pavimentos e o controle dos deslocamentos estruturais – demonstraram-se eficazes para representar as condições reais de carregamento e construção. Esses procedimentos contribuíram para um dimensionamento mais seguro e racional, alinhado às diretrizes da ABNT NBR 6118:2023 e aos princípios de sustentabilidade, como a redução do uso de materiais e das emissões de CO₂.

5.4 ECONOMIA DE CONCRETO E IMPACTO AMBIENTAL

A substituição do concreto convencional pelo CAR, associada à otimização geométrica, resultou em uma economia acumulada de 202 m³ de concreto ao longo da estrutura. Essa redução representa não apenas menor consumo de materiais, mas também menor impacto ambiental, refletido em:

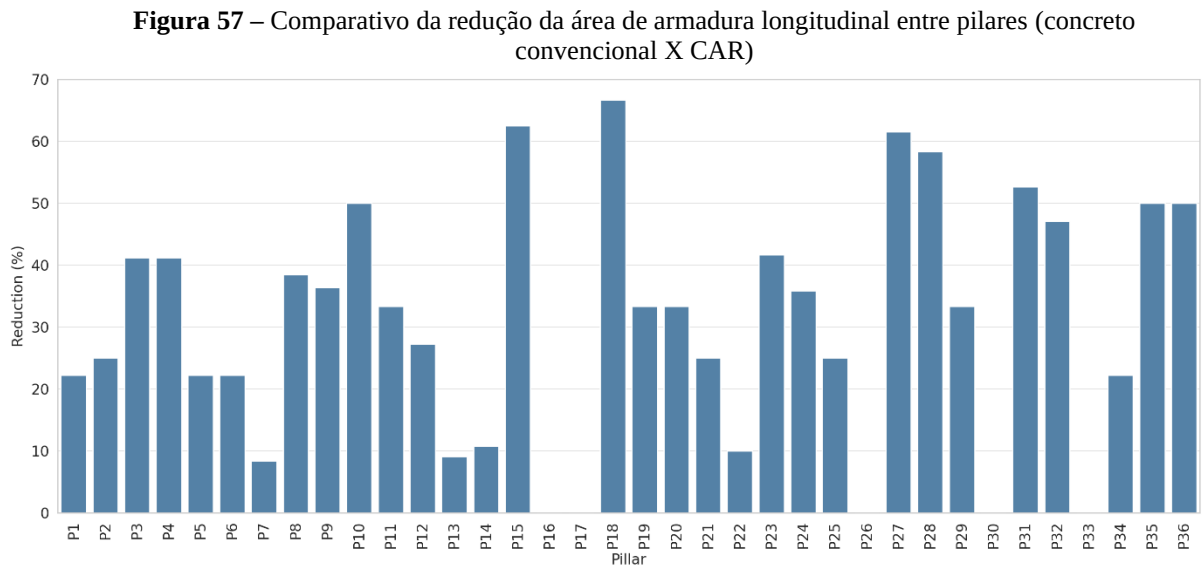
- Redução do peso próprio da edificação;
- Menor emissão de CO₂ associada aos materiais estruturais;
- Utilização de concreto com maior durabilidade; e
- Otimização das fundações.

A análise reforça o potencial do CAR na racionalização de estruturas verticais, promovendo desempenho técnico aliado à sustentabilidade.

5.5 REDUÇÃO DA ÁREA E MASSA DE AÇO

A substituição do concreto convencional pelo CAR nos pilares da edificação resultou em uma redução expressiva na área total de armadura longitudinal necessária para o dimensionamento estrutural. Tal redução está diretamente relacionada à maior resistência à compressão proporcionada pelo CAR, que viabiliza seções mais esbeltas e, por consequência, menores solicitações nas armaduras.

Nesse cenário, a Figura 57 apresenta a comparação gráfica das reduções percentuais na área total de armadura longitudinal dos pilares entre os dois modelos estruturais: com concreto convencional e com CAR.



Fonte: AUTOR (2025).

Os dados evidenciam o impacto positivo da adoção do CAR na racionalização do uso de aço, mantendo os critérios normativos de segurança e estabilidade global, visto que a maior resistência mecânica do CAR permite a otimização das seções transversais, reduzindo diretamente as solicitações de esforço interno sobre as armaduras longitudinais.

Ampliando a discussão dos resultados, a Tabela 2 apresenta os dados comparativos detalhados entre os dois modelos, incluindo as áreas totais de aço por pilar, a redução absoluta e o percentual correspondente.

Tabela 2 - Análise comparativa da área de aço na seção.

Pilar	Área de aço total (Convencional) [cm²]	Área de aço total (CAR) [cm²]	Redução absoluta [cm²]	Redução (%)
P1	56,52	43,96	12,56	22.22%
P2	78,56	58,92	19,64	25.00%
P3	166,94	98,2	68,74	41.17%
P4	166,94	98,2	68,74	41.17%
P5	78,56	49,1	29,46	22.22%
P6	56,52	43,96	12,56	22.22%
P7	75,36	69,08	6,28	8.33%
P8	127,66	78,56	49,1	38.46%

P9	108,02	68,74	39,28	36.36%
P10	117,84	58,92	58,92	50.00%
P11	117,84	78,56	39,28	33.33%
P12	108,02	88,38	19,64	27.27%
P13	127,66	98,2	29,46	9.09%
P14	75,36	37,68	37,68	10.71%
P15	235,68	88,38	147,3	62.50%
P16	88,38	88,38	0	0.00%
P17	78,56	78,56	0	0.00%
P18	235,68	78,56	157,12	66.67%
P19	117,84	78,56	39,28	33.33%
P20	117,84	88,38	29,46	33.33%
P21	235,68	176,76	58,92	25.00%
P22	98,20	88,38	9,82	10.00%
P23	235,68	186,58	49,1	41.67%
P24	75,36	43,96	31,4	35.88%
P25	137,48	88,38	49,1	25.00%
P26	117,84	49,1	68,74	0.00%
P27	108,02	78,56	29,46	61.53%
P28	127,66	49,1	78,56	58.33%
P29	75,36	37,68	37,68	33.33%
P30	56,52	56,52	0	0.00%
P31	78,56	58,92	19,64	52.63%
P32	119,32	56,52	62,8	47.05%
P33	106,76	75,36	31,4	0.00%
P34	78,56	78,56	0	22.22%
P35	56,52	43,96	12,56	50.00%
P36	25,12	12,56	12,56	50.00%

Fonte: AUTOR (2025).

Considerando os dados supracitados, destaca-se, por exemplo, o Pilar P15, que apresentou uma redução absoluta de 147,30 cm², enquanto o Pilar P18 registrou a maior redução percentual, 66,67%, evidenciando o elevado potencial do CAR para promover economia de material sem comprometer os requisitos estruturais estabelecidos pelas normas técnicas.

A análise geral indica que a redução percentual superou 50% em diversos pilares, o que evidencia a racionalização significativa de recursos estruturais possibilitada pelo uso do CAR. Cabe ressaltar que, nos poucos casos em que não houve redução de armadura, isso se deveu à

manutenção das dimensões seccionais por razões arquitetônicas ou estruturais específicas, como foi mencionado do longo desse estudo.

Com base nas áreas reduzidas e considerando a massa específica do aço (7.850 kg/m^3), estima-se uma economia total de aproximadamente 28.072,00 kg de aço longitudinal ao longo da estrutura. Essa economia reflete ganhos não apenas em termos econômicos e de execução, mas também em termos ambientais, ao reduzir as emissões associadas à produção e transporte do aço.

Portanto, a aplicação do CAR mostra-se eficaz na redução da demanda de aço nas estruturas verticais, contribuindo diretamente para uma construção mais leve, eficiente e sustentável, sem comprometer o desempenho técnico e normativo da edificação.

5.6 ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL (γ_z e P-delta)

A análise de estabilidade global da edificação foi realizada considerando as não linearidades física e geométrica, conforme estabelecido pela ABNT NBR 6118:2023. Foram avaliados os efeitos de segunda ordem, os deslocamentos horizontais e o coeficiente γ_z , com base na modelagem computacional por meio do *software Eberick 2025*.

5.6.1 Não linearidade física e geométrica

O modelo de cálculo utilizado incorpora:

- **Não linearidade física**, representando o comportamento real dos materiais (concreto e aço) por meio de diagramas tensão-deformação não lineares. Essa abordagem permite a consideração do escoamento do aço e da plastificação das seções de concreto, tanto nos ELS quanto nos ELU.
- **Não linearidade geométrica**, responsável por contemplar os efeitos das deformações na configuração da estrutura (efeitos $P-\Delta$ e $P-\delta$), fundamentais para edifícios altos. O *Eberick 2025* realiza automaticamente a análise *P-Delta* e calcula o coeficiente γ_z , conforme exigido pela NBR 6118:2023, permitindo avaliar o impacto dos deslocamentos horizontais nos esforços internos da estrutura.

5.6.2 Ações verticais consideradas

As ações verticais foram aplicadas conforme a ABNT NBR 6120:2023, incluindo:

- Peso próprio dos elementos estruturais;
- Sobrecargas permanentes e acidentais nos pavimentos;
- Revestimentos, alvenarias e cargas operacionais típicas de edifícios residenciais;
- Combinações normativas para os estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS), conforme NBR 8681:2004.

5.6.3 Ações horizontais – vento

A ação do vento foi considerada conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6123:2023 – Forças devidas ao vento em edificações, que define os procedimentos para a avaliação das pressões e forças aerodinâmicas em estruturas. No presente estudo, o carregamento e a distribuição das forças de vento foram realizados automaticamente pelo *software Eberick 2025*, com aplicação nas quatro direções principais da edificação: X+ (frontal), X- (posterior), Y+ (lateral direita) e Y- (lateral esquerda). A modelagem considerou a exposição da edificação, o fator de forma e a altura total, respeitando as diretrizes para construções de grande porte. As ações do vento foram incorporadas à análise global para avaliação da estabilidade e das deformações horizontais, conforme os efeitos estáticos previstos pela norma:

- $V_0 = 42 \text{ m/s}$;
- $S_1 = 1,00$, pois o edifício foi projetado para um terreno plano ou fracamente acidentado;
- $S_2 = 1,02$, sendo que o edifício se enquadra na classe C de dimensões (edificação que exceda 50 metros) e categoria III;
- $S_3 = 1,00$, edificações para residências, hotéis, comércio, indústrias. Estruturas ou elementos estruturais desmontáveis com vistas à reutilização. Vedações das edificações do grupo 3 (telhas, vidros, painéis de vedação).
- Altura da edificação: 73,62 m;
- Distribuição dos esforços de vento nos diferentes níveis da estrutura, conforme os coeficientes de forma definidos pela norma.

Com esse modelo de cálculo, o *Eberick 2025* fornece uma análise que simula com alto nível de precisão os efeitos reais da instabilidade global, redistribuição de esforços e deformações ao longo da estrutura. A adoção de CAR implicou em alterações significativas nas propriedades de rigidez e comportamento global, exigindo a análise integrada desses efeitos

para validar o desempenho estrutural, como demonstrado nos resultados do coeficiente γ_z , nos deslocamentos horizontais e nos momentos de segunda ordem.

5.6.4 Avaliação dos coeficientes de estabilidade global (γ_z e *P-Delta*)

A avaliação do coeficiente de estabilidade global γ_z e do efeito *P-Delta* foi realizada para diferentes valores de f_{ck} e seções transversais otimizadas. Com o uso do CAR, γ_z variou entre 1,10 e 1,12, e o deslocamento horizontal máximo foi de 1,79 cm em ambas as direções. Mesmo com a redução das seções dos pilares, γ_z e os deslocamentos no topo apresentaram variações mínimas e ficaram dentro dos limites da ABNT NBR 6118:2023, que exige $\gamma_z < 1,30$ e deslocamento horizontal inferior a $H/1700$ — ou 4,38 cm para 73,62 m de altura. Todos os valores obtidos ficaram bem abaixo desses limites

A comparação do desempenho estrutural das duas edificações quanto à estabilidade global e aos efeitos de segunda ordem, com base em análises lineares e no processo *P-Delta*, conforme a NBR 6118:2023, pôde ser feita conforme a Tabela 3. Os dados mostram que ambas as estruturas atendem aos limites normativos de deslocamentos e coeficiente γ_z . A estrutura com CAR apresentou redução de deslocamento em X, mas aumento expressivo em Y, além de um leve acréscimo no coeficiente γ_z , caracterizando instabilidade fraca — o que exige a análise de segunda ordem, aplicada corretamente nos dois casos. Os acréscimos nos deslocamentos devido ao efeito *P-Delta* permaneceram bem abaixo do limite de 25%, indicando bom desempenho.

Tabela 3 – Comparação entre concreto convencional e CAR.

Parâmetro	Concreto Convencional	Concreto de Alta Resistência (CAR)	Limite NBR 6118	Varição (%)
Deslocamento X+ (cm)	1,55	1,33	$\leq 4,38$	-14,19%
Deslocamento Y+ (cm)	0,92	2,06	$\leq 4,38$	+123,91%
Deslocamento relativo (cm)	0,10	0,14	$\leq 0,36$	+40,00%
Gama-Z X+	1,10	1,13	$\leq 1,30$	+2,73%
Gama-Z Y+	1,11	1,11	$\leq 1,30$	0,00%
Gama-Z X-	1,10	1,13	$\leq 1,30$	+2,73%
Gama-Z Y-	1,11	1,11	$\leq 1,30$	0,00%
P-Delta Vento X+ (cm)	9,16 → 10,18	7,33 → 8,47	-	-16,83%
P-Delta Vento Y+ (cm)	5,46 → 6,16	11,93 → 13,57	-	+118,78%
Acréscimo por P-Delta X+ (%)	+11,08%	+15,43%	$\leq 25\%$	+39,28%
Acréscimo por P-Delta Y+ (%)	+12,69%	+13,74%	$\leq 25\%$	+8,27%

Fonte: AUTOR (2025).

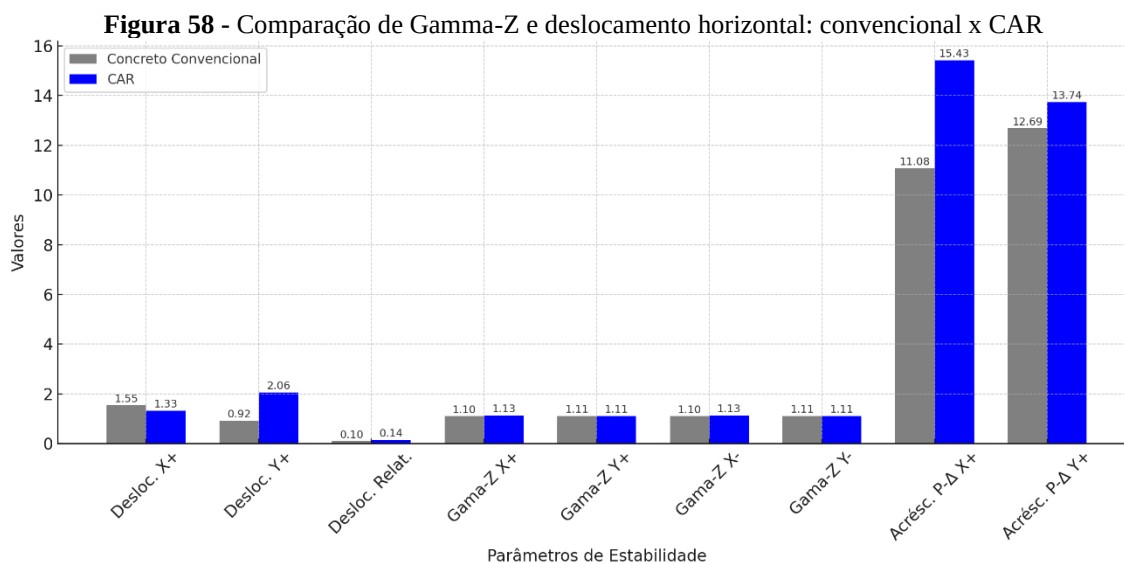
Segundo a NBR 6118:2023, quando o coeficiente γ_z estiver entre 1,10 e 1,30, a estrutura é considerada com instabilidade fraca e é obrigatória a realização da análise de 2ª ordem, como foi corretamente feito nos dois casos apresentados.

A comparação percentual evidencia as diferenças entre as estruturas, com destaque para os ganhos e perdas relativos ao uso do CAR conforme Tabela 3. Embora o CAR proporcione maior rigidez e permita redução das seções dos pilares, isso pode aumentar a esbeltez, afetando os deslocamentos horizontais. Ainda assim, os resultados confirmam a viabilidade técnica do CAR para edificações altas, com desempenho estrutural seguro e eficiente.

Portanto, o uso do CAR deve ser acompanhado de uma análise criteriosa da estabilidade global, com especial atenção à geometria dos elementos e ao sistema de contraventamento. Quando bem empregado, o CAR pode otimizar o consumo de materiais e reduzir a emissão de CO₂ da edificação, sem comprometer a segurança estrutural.

A análise comparativa confirma que ambas as estruturas estão dentro dos padrões de segurança e desempenho exigidos pela NBR 6118:2023. Apesar dos coeficientes de instabilidade indicarem a necessidade de análise de segunda ordem, os deslocamentos adicionais permanecem controlados, garantindo estabilidade global adequada. A estrutura com concreto convencional apresenta comportamento um pouco mais equilibrado no eixo Y, enquanto a estrutura com CAR mostra maior deslocamento nesse sentido, ainda dentro dos limites admissíveis.

A Figura 58 apresenta um comparativo dos principais parâmetros de estabilidade global entre dois modelos estruturais de um edifício de múltiplos pavimentos: um utilizando concreto convencional ($f_{ck} = 30$ MPa) e outro com concreto de alta resistência (CAR, $f_{ck} = 90$ MPa). Os dados foram obtidos por meio de simulações numéricas no *software Eberick 2025*, considerando o mesmo arranjo arquitetônico, cargas atuantes e condições de contorno.



Fonte: AUTOR (2025).

Foram analisados os deslocamentos horizontais nas direções principais (X+ e Y+), deslocamento relativo entre pavimentos (*drift*), os coeficientes de estabilidade global γ_z para as quatro direções (X+, X-, Y+, Y-) e os acréscimos percentuais devido aos efeitos de segunda ordem, calculados pelo método *P-Delta*.

Observa-se que o modelo com CAR apresentou redução dos deslocamentos horizontais em ambas as direções (X+ de 1,55 cm para 1,33 cm; Y+ de 0,92 cm para 0,14 cm), além de redução expressiva do deslocamento relativo, indicando maior rigidez global da estrutura. Os coeficientes γ_z mantiveram-se dentro dos limites normativos ($< 1,30$), evidenciando a estabilidade global adequada em ambos os casos, com pequenas variações entre os modelos.

Entretanto, os acréscimos devido ao efeito *P-Delta* foram mais elevados no modelo com CAR, com aumento de 11,08% para 15,43%, em X+, e de 12,69% para 13,74%, em Y+, indicando que o ganho de rigidez associado ao CAR também resulta em maior sensibilidade a efeitos de segunda ordem, possivelmente, em função da redução seccional dos pilares.

Esse comportamento reforça a importância de análises integradas entre rigidez, estabilidade e não linearidade geométrica, especialmente, em projetos que utilizam concretos de alto desempenho com vistas à otimização geométrica dos elementos estruturais.

Os resultados evidenciam que o uso do CAR proporciona maior rigidez estrutural e redução dos deslocamentos, mantendo os parâmetros de estabilidade global dentro dos limites normativos. Contudo, a maior sensibilidade aos efeitos de segunda ordem observada destaca a necessidade de cautela no dimensionamento e valida a importância de análises não lineares em projetos otimizados com CAR.

A avaliação do parâmetro γ_z e do efeito P-Delta foi realizada para cada variação na resistência característica do concreto f_{ck} dos pilares e para as seções transversais otimizadas. Com o uso do CAR, o γ_z variou de 1,10 a 1,11, e o deslocamento horizontal aumentou ligeiramente para 1,79 cm em ambas as direções. Apesar da redução das áreas das seções transversais dos pilares, os principais parâmetros relacionados à estabilidade global da estrutura – como o coeficiente γ_z e o deslocamento horizontal no topo – apresentaram variação mínima. Ambos permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2023, com γ_z abaixo de 1,3 e deslocamento horizontal máximo abaixo de 4,38 cm.

5.7 EMISSÕES DE CO₂

Para fins de comparação, calcularam-se os valores de CO₂ incorporado associados à confecção dos pilares. A Tabela 4 apresenta os dados correspondentes ao concreto convencional, considerando tanto a incorporação de CO₂ proveniente do próprio concreto quanto do aço. Os valores apresentados referem-se às classes de resistência C30, C35, C40 e C45, resultando em um total de 540.650,97 kg de CO₂ incorporados.

No que se refere ao aço, foram consideradas as classes CA50 e CA60, totalizando 194.176,6 kg de CO₂ incorporados. Esses valores serão fundamentais na comparação com os resultados obtidos a partir da substituição do concreto convencional pelo CAR. Tal comparação permitirá, posteriormente, avaliar a redução nas emissões de CO₂ associada à diminuição no consumo de materiais de construção.

Tabela 4 – Quantificação do CO₂ incorporado nos pilares de concreto convencional (aço e concreto).

		Pilares
Peso total + 10% (kg)	CA50	136,655.2
	CA60	10,518.2
	Total	147,173.4
Volume concreto (m³)	C-30	570.7
	C-35	70.5
	C-40	73.1
	C-45	91.5
	Total	805.8
Área de forma (m²)		8,161.4
Consumo de aço (kg/m³)		182.6

Fonte: AUTOR (2025).

A Tabela 5 apresenta os valores referentes ao concreto de alta resistência, considerando tanto o carbono incorporado no concreto quanto no aço. Os dados referem-se às classes de resistência C30, C50, C80 e C90, resultando em um total de 266.265,9 quilogramas de carbono incorporado ao concreto.

Quanto ao aço, considerando novamente as classes CA50 e CA60, a incorporação de carbono atingiu o total de 148.493,3 quilogramas. Esses resultados reforçam o impacto positivo da adoção do CAR na redução das emissões associadas à construção dos pilares.

Tabela 5 – Descrição das quantidades de CO₂ incorporado no concreto e no aço - CAR.

		Pilares
Peso total + 10% (kg)	CA50	111,821.5
	CA60	7,279.9
	Total	119,101.4
Volume concreto (m³)	C-30	349.7
	C-60	79.9
	C-80	79.9
	C-90	94.3
	Total	603.8
Área de forma (m²)		6,533.6
Consumo de aço (kg/m³)		197.3

Fonte: AUTOR (2025).

Ao comparar os valores de CO₂ incorporados nas classes dos pilares, tanto no uso de concreto convencional quanto de CAR, observou-se uma redução de aproximadamente 80.724,7 kg. Esse valor indica uma diminuição expressiva na quantidade de material utilizado.

Em relação ao aço, a comparação entre os valores obtidos com o uso de concreto convencional e com CAR também revelou uma redução significativa, da ordem de 45.683,3 kg de CO₂ incorporado.

Dessa forma, os dados apresentados evidenciam que a adoção do CAR proporciona uma redução significativa nas emissões de CO₂ incorporado, tanto no concreto quanto no aço utilizados na execução dos pilares. A diminuição total de aproximadamente 126 mil kg de CO₂ demonstra o potencial do CAR como uma alternativa mais sustentável, contribuindo para a eficiência estrutural e a mitigação dos impactos ambientais no setor da construção civil.

5.7.1 Procedimento para determinação da emissão de carbono equivalente

Primeiramente, foi aplicada a conversão do volume de concreto em massa. Nessa etapa, o volume de concreto é convertido em massa, utilizando um valor padrão de densidade de 2.500 kg/m³. As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados para os sistemas em concreto convencional e CAR, respectivamente.

Tabela 6 - Emissão de CO₂ com concreto convencional.

Classe	Volume (m ³)	Massa (kg)	Emissão (kg CO ₂)
C-30	570,7	1.426.750	168.356,53
C-35	102,27	255.675	31.703,70
C-40	103,87	259.675	33.757,75
C-45	124,21	310.525	41.920,87
Total	901,05	—	275.738,85

Fonte: AUTOR (2025).

Tabela 7 - Emissão de CO₂ com CAR.

Classe	Volume (m ³)	Massa (kg)	Emissão (kg CO ₂)
C-30	349,7	874.250	103.161,50
C-60	79,9	199.750	28.468,75
C-80	79,9	199.750	30.461,25
C-90	94,3	235.750	37.720,00
Total	603,8	—	199.811,50

Fonte: AUTOR (2025).

Em seguida, foi possível apresentar as emissões totais consolidadas para os sistemas de concreto convencional e CAR, conforme indicado na Tabela 8.

Tabela 8 - Emissões de CO₂ totais consolidadas.

Sistema	Concreto (kg CO ₂)	Aço (kg CO ₂)	Total (kg CO ₂)	Percentual de cada item (%)
Convencional	275.738,85	264.912,12	540.650,97	Concreto: 51,00 Aço: 48,99
CAR	199.811,50	214.382,52	414.194,02	Concreto: 48,24 Aço: 51,75

Fonte: AUTOR (2025).

Para tanto, foi utilizado o fator de emissão de 1,80 kg de CO₂ por kg de aço consumido. Apreciando:

- Modelo convencional: $147.173,4 \text{ kg} \times 1,80 = 264.912,12 \text{ kg de CO}_2$
- Modelo com CAR: $119.101,4 \text{ kg} \times 1,80 = 214.382,52 \text{ kg de CO}_2$

Os dados acima permitiram calcular a redução da emissão de CO₂ através de uma análise comparativo, tanto em volume quanto em massa, entre o sistema convencional e o sistema com CAR (Tabela 9).

Tabela 9 – Redução das emissões de CO₂.

Item	Convencional	CAR	Redução Absoluta	Redução Relativa (%)
Volume de concreto (m ³)	901,05	603,8	297,75	32,98
Massa de aço (kg)	147.173,4	119.101,4	28.072,0	19,07
Emissão total (kg CO ₂)	540.650,97	414.194,02	126.456,95	23,39

Fonte: AUTOR (2025).

A análise revela uma redução significativa na emissão de CO₂ por meio do uso do CAR, destacando seu potencial para a construção sustentável. A substituição das classes de resistência convencionais por alternativas de maior desempenho possibilitou ganhos ambientais substanciais, sem comprometer a estabilidade estrutural. Os dados demonstram que a seleção consciente de materiais, combinada com um projeto estrutural otimizado, pode reduzir as emissões em mais de 126 toneladas de CO₂, representando uma redução total de aproximadamente 23%.

Além disso, a quantidade total de CO₂ incorporado no concreto convencional foi de 275.738,85 kg. Com a adoção do CAR, esse valor foi reduzido para 199.811,50 kg, resultando em uma diminuição de 75.927,35 kg, o que corresponde a uma redução de 27,53% nas emissões associadas ao concreto. No caso do aço, o projeto original apresentou emissão de 264.912,12 kg de CO₂, enquanto o modelo com CAR totalizou 214.382,52 kg, representando redução de 50.529,60 kg, ou seja, 19,07% a menos de CO₂ incorporado (Figura 59).

Figura 59 - Geração de CO₂ em toneladas (concreto convencional x CAR)
Comparação Concreto Convencional da estrutura executada x CAR
 Geração de CO₂ em Tonelada



Fonte: AUTOR (2025).

Somando as reduções de ambos os materiais, o uso do CAR permitiu evitar a emissão de aproximadamente 126,45 toneladas de CO₂, evidenciando o impacto ambiental positivo proporcionado pela otimização estrutural com materiais de maior desempenho.

Em comparação com o estudo do Edifício Leopoldo 1201, que obteve redução de 17,5% nas emissões de carbono ao substituir o concreto convencional de 50 MPa pelo CAR de 90 MPa no mesmo tipo de elemento estrutural, os resultados aqui obtidos — redução global de 23,39% — demonstram benefício ambiental compatível e até superior. Dessa forma, os dados reforçam que a adoção do CAR é uma estratégia eficaz para a descarbonização da construção civil, promovendo significativa economia de materiais e redução de emissões sem comprometer a segurança ou o desempenho estrutural.

5.7.2 Comparação internacional da emissão de CO₂

Em edifícios, as emissões de CO₂ podem chegar a até 20% — valor muito próximo dos 23,39% encontrados nesse estudo. A comparação entre os resultados obtidos e estudos internacionais reforça a validade da abordagem adotada. Yang et al. (2019) analisaram a emissão de CO₂ tanto do concreto convencional quanto do CAR utilizado em edificações, identificando os seguintes valores médios (Quadro 11).

Quadro 11 - Emissões de CO₂ associadas a diferentes classes de concreto.

Classe do concreto	Emissão de CO ₂ (kg/m ³)
C30	300
C50	370
C90	450

Fonte: LIMA, 2025.

Esses valores são consistentes com os fatores de emissão usados na presente pesquisa. A principal conclusão é que, embora o CAR tenha uma emissão unitária de CO₂ maior, a redução significativa no volume estrutural leva à diminuição geral da emissão de CO₂ (YANG et al., 2019), como também observado nesse estudo. Essa similaridade valida a metodologia adotada e destaca que a otimização do projeto estrutural por meio do uso do CAR produz resultados ambientalmente vantajosos mesmo em contextos distintos, como os casos canadense e brasileiro.

5.8 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nesse estudo demonstram, de forma inequívoca, os impactos positivos da substituição do concreto convencional pelo CAR na racionalização estrutural e ambiental de edificações verticais.

A análise detalhada de um edifício residencial de 21 pavimentos revelou que a utilização do CAR, associada à otimização geométrica dos pilares, possibilitou significativas reduções de área seccional, mantendo todos os critérios normativos de segurança e estabilidade global conforme preconizado pela ABNT NBR 6118:2023.

No âmbito estrutural, observou-se uma redução média de 31,72% nas seções transversais dos pilares, com casos específicos superando 45% de diminuição. Essa otimização contribuiu diretamente para a redução do volume total de concreto em 202 m³ e da massa de aço longitudinal em aproximadamente 28 toneladas, implicando menor carregamento nas fundações e maior eficiência construtiva.

Na questão estabilidade, mesmo com seções mais esbeltas, os coeficientes de estabilidade global (γ_z) permaneceram entre 1,10 e 1,13, caracterizando instabilidade fraca com segurança estrutural plenamente atendida, e os deslocamentos horizontais máximos foram inferiores ao limite normativo de H/1700, comprovando o adequado comportamento global da edificação.

Do ponto de vista ambiental, a substituição do concreto convencional por CAR resultou em uma redução de 126,45 toneladas nas emissões totais de CO₂, representando uma diminuição global de 23,39% nas emissões associadas aos pilares. Tal desempenho supera dados de estudos internacionais similares, reforçando o papel do CAR como ferramenta eficaz para a descarbonização do setor da construção civil.

Adicionalmente, a modelagem computacional com consideração de efeitos construtivos progressivos, rigidez axial variável e não linearidades física e geométrica, proporcionou uma avaliação mais realista e robusta do comportamento estrutural, contribuindo para a precisão dos resultados obtidos.

Em síntese, os achados dessa pesquisa confirmam que a utilização do CAR, aliada a critérios de otimização seccional fundamentados em simulações avançadas, permite alcançar soluções estruturais mais leves, eficientes e sustentáveis, sem comprometer o desempenho normativo. A abordagem proposta mostra-se, portanto, tecnicamente viável, ambientalmente responsável e alinhada às diretrizes contemporâneas de engenharia estrutural de alto desempenho.

6. CONCLUSÕES

Esse trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos do uso do CAR no redimensionamento de pilares, com foco na estabilidade global de edifícios altos e na mitigação das emissões de CO₂. Por meio da modelagem computacional de uma edificação de 21 pavimentos, verificou-se que a substituição do concreto convencional por CAR resultou em benefícios estruturais, arquitetônicos e ambientais.

Entre os principais resultados, destacam-se a redução significativa da área transversal dos pilares, com ganhos expressivos na área útil dos ambientes internos, e a diminuição da taxa de armadura longitudinal e transversal. Além disso, os parâmetros de estabilidade global, especialmente o coeficiente γ_z e os efeitos de segunda ordem (*P-Delta*), permaneceram dentro dos limites normativos, evidenciando a segurança do sistema mesmo com seções otimizadas.

Outro aspecto relevante foi a redução de aproximadamente 23,39% nas emissões de CO₂, contribuindo para o desenvolvimento de edificações mais sustentáveis. Essa diminuição está associada tanto à menor quantidade de concreto utilizada quanto à racionalização do uso de aço, o que reforça a viabilidade ambiental do CAR em projetos de Engenharia Civil.

Dessa forma, conclui-se que a aplicação do CAR em edifícios altos é tecnicamente viável e vantajosa, sendo uma alternativa promissora para a engenharia estrutural contemporânea.

Em meio a tanto, para possíveis trabalhos futuros acerca do tema, recomenda-se: a ampliação das análises para outras tipologias estruturais, com avaliação específica da dinâmica das estruturas e dos efeitos adicionais de vibrações; o estudo da área de influência do uso do CAR, considerando diferentes contextos urbanos e geográficos; a investigação do preço do imposto por emissão de CO₂ por tonelada de edificação, de modo a quantificar impactos econômicos associados às políticas ambientais; e a realização de análises comparativas envolvendo custos de ciclo de vida, desempenho a longo prazo e diferentes condições de agressividade ambiental.

Por fim, ressalta-se que a continuidade dos estudos nessa área pode ampliar significativamente o conhecimento sobre o CAR, consolidando-o como material estratégico para a Engenharia Civil contemporânea, capaz de integrar eficiência estrutural, viabilidade econômica e compromisso ambiental.

REFERÊNCIAS

ACI COMMITTEE 363. State-of-the-art report on high-strength concrete. American Concrete Institute, ACI 363R-17, 2017.

AÇO BRASIL. A Indústria do Aço está e continuará colaborando para minimizar os impactos sobre a mudança do clima. Instituto Aço Brasil: Rio de Janeiro, 2021.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M.; MEDEIROS, M. H. F.; SOUZA, U. E. L. Tecnologias e materiais alternativos de construção: caracterização, aplicação e viabilidade técnica e econômica. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

AÏTCIN, P.-C. High-performance concrete. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

ALTOQI. Conheça o AltoQi Eberick. 2024. (9m45s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=KarnhBeg8pk&t=1s>. Acesso em: 12 jan. 2024.

ASOPE ENGENHARIA. Estrutura metálica x estrutura de concreto em 11 etapas. 2017. Disponível em: <https://www.asope.com.br/single-post/2017/11/21/estrutura-metalica-x-estrutura-de-concreto-em-11-etapas>. Acesso em: 22 dez. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953:2024 – Concreto de cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2024.

_____. NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

_____. NBR 6120:2023 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2023.

_____. NBR 6123:2023 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 2023.

_____. NBR 8681:2004 – Ações e segurança nas estruturas. Rio de Janeiro, 2004.

AZEVEDO, M. C. et al. Construção sustentável no contexto da engenharia civil. Revista Aracê, São José dos Pinhais, v. 7, n. 5, p. 25549-25567, 2025. DOI: <https://doi.org/10.56238/arev7n5-260>.

BASTOS, P. S. S. Pilares de concreto armado. Notas de aula. Faculdade de Engenharia – UNESP, Bauru, SP, 2015.

CALDARONE, M. A. High-strength concrete: a practical guide. Boca Raton: Taylor & Francis, 2009.

CALDAS, L. R. Como calcular a pegada de carbono de uma edificação. 2020. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/943023/como-calcular-a-pegada-de-carbono-de-uma-edificacao#:~:text=Exemplo%20de%20c%C3%A1lculo%3A%20Vamos%20supor,resultado%20da%20pegada%20de%20carbono>. Acesso em: 07 jan. 2024.

CÁRDENAS, A. S. MASP – estrutura, proporção, forma. Editora Escola da Cidade: São Paulo, 2015.

CARNEIRO, L. C.; MARTINS, A. R. Análise das estruturas: contraventamento de estruturas. 2008. Disponível em: <https://pilaresedificios.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/10/contraventamento-de-estruturas.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

CARVALHO, R. C. FIGUEIREDO FILHO, J. R. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118/2014. 4. ed. São Carlos: EduFSCar, 2017. p. 19-67).

CHIVIAN, E.; BERNSTEIN, A. (Org.). Saúde humana e mudanças climáticas globais. São Paulo: Fundação Oswaldo Cruz, 2008.

CIDADE DE OURINHOS SP. Residencial Florença já em construção. 2020. Disponível em: <https://www.facebook.com/Cidadedeourinhos/posts/2699988060323456/>. Acesso em: 13 jan. 2024.

CRUZ, J. M. F.; FERREIRA, E. T.; LUCENA, C. A. T. Estruturas: a estabilidade global dos edifícios altos. João Pessoa: Leia Livros, 2019.

ECOINVENT. O banco de dados de inventário de ciclo de vida mais transparente do mundo. 2024. Disponível em: <https://ecoinvent.org/>. Acesso em: 30 mar. 2024.

FEITOSA, H. A.; ALVES, M. C. Concreto: tecnologia e aplicações. São Paulo: LTC, 2015.

FREGONEZI, G. M. Estudo da influência dos concretos de alta resistência em pilares no dimensionamento de edifícios. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Maringá, 2017.

_____. Estudo da influência da resistência à compressão do concreto em pilares no dimensionamento de edifícios. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 12, n. 5, p. 1126-1147, outubro, 2019.

GARTNER, E.; HIRAO, H. Eco-efficient cements: potential for reduction of CO₂ emissions. Cement and Concrete Research, v. 78, p. 118–127, 2015.

GAZETA. Chuvas no ES: entenda como a tragédia poderia ter sido evitada. 2020. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/es/sul/chuvas-no-es-entenda-como-a-tragedia-poderia-ter-sido-evitada-0120>. Acesso em: 12 dez. 2023.

GOOGLE. Edifício Residencial Florença. 2022. Disponível em: https://www.google.com/maps/place/EDIFICIO+RESIDENCIALFLOREN%C3%87A/@-22.9880944,-49.8742933,3a,75y,90t/data=!3m8!1e5!3m6!1sAF1QipMH-vSODNaiDjKhUOD2kJVQh612Yzfy_oHZ9kUT!2e10!3e10!6shttps:%2F%2F1h5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipMH-vSODNaiDjKhUOD2kJVQh612Yzfy_oHZ9kUT%3Dw152-h86-k-no!7i1920!8i1080!4m7!3m6!1s0x94c019eec5b39051:0x7995ca79f703be37!8m2!3d-22.988169!4d-49.8741863!10e5!16s%2Fg%2F11fn46z5k0?entry=ttu. Acesso em: 13 jan. 2024.

HABERT, M. Sustainable construction: concrete and the environment. Londres: Woodhead Publishing, 2012.

HABERT, M.; BUCHET, S.; GIBERT, J. Environmental impacts of cement production: quantitative assessment of emissions and mitigation potential. *Cement and Concrete Research*, v. 40, n. 8, p. 1292–1301, 2010.

HERMAN, F. A.; AFLALO FILHO, R.; GASPERINI, G. C. E-Tower. Acervo Aflalo/Gasparini Arquitetos, 2000. Disponível em: <https://acervoafalogasperini.arq.br/e-tower/>. Acesso em: 23 dez. 2023.
<http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1752521367.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO CONTINUADA. Curso de projeto estrutural utilizando o Eberick 2024 - conceito, análise e soluções. 2021. Disponível em: <https://inbec.com.br/cursos/curso-projeto-estrutural-utilizando-Eberick-2024-nivel-2-conceito-analise-solucoes-curso-avancado>. Acesso em: 09 jan. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 1995: the science of climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

_____. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Geneva: IPCC, 2021.

_____. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, R.K. Pachauri e L.A. Meyer (eds.). Genebra: IPCC, 2014. 151 p. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia_do_clima/painel_intergovernamental_sobre_mudanca_do_clima.html. Acesso em: 07 set. 2023.

KHEMIRI, R.; GHEDIRA, K. Performance assessment of high-performance concrete structures. *Construction and Building Materials*, v. 174, p. 12–22, 2018.

KRISTEN, A. E. Principais métodos de cálculo dos efeitos de segunda ordem local em pilares. *Mais Engenharia* [online], jan. 2017. Disponível em: <https://maisengenharia.altoqi.com.br/estrutural/efeitos-de-segunda-ordem-local-em-pilares/>. Acesso em: 09 jan. 2024.

LAZARINI, P. R. S. Influência do concreto de alta resistência no dimensionamento de vigas: deflexão em estados limites de serviço. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Maringá, 2019.

LIMA, J. A. R. Avaliação da Pegada de Carbono em Edifícios de Múltiplos Pavimentos com Concreto de Alta Resistência. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Maringá, 2025.

LIMA, J. S. Análise dos efeitos P-Delta em edifícios altos. São Paulo: USP, 2001. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-12082016-121356/publico/Dissert_Lima_JulianaS.pdf. Acesso em: 13 jan. 2024.

LIMA, M. Maurício Lima – corretor de imóveis – Edifício Florença. 2024. Disponível em: <http://simvirtual.com.br/imovel/1648150/apartamento-venda-ourinhos-sp-jardim-ouro-verde>. Acesso em: 13 jan. 2024.

LOTURCO, B. Desempenho elevado. *Téchne*, São Paulo, v. 1, n. 100, p. 34-39, julho, 2005.
MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 4. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOREIRA, S. Edifício Residencial Leopoldo 1201. 2022. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/962405/edificio-residencial-leopoldo-1201-aflalo-gasperini-arquitetos>. Acesso em: 10 abr. 2024.

MUSEU DE ARTE DE SÃO PAULO. Sobre o MASP. 2024. Disponível em: <https://www.masp.org.br/sobre>. Acesso em: 04 jan. 2024.

PAIXÃO, J. F. M.; ALVES, E. C. Análise de estabilidade global em edifícios altos. *Revista Eletrônica de Engenharia*, v. 13, n. 1, p. 48-63, janeiro, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufg.emnuvens.com.br/reec/index>. Acesso em: 02 abr. 2024.

PEINADO, H. S.; VANDERLEI, R. D.; NAGANO, M. F. Produção de pilares com concreto de alta resistência: aspectos econômicos e ambientais. *In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL*, 36., 2014, Montevideu. Anais [...] Montevideu, 2014, p. 1-15.

PET ENGENHAIRA CIVIL UFJF. A técnica se incorporou à arte – Edifício MASP. 2016. Disponível em: <https://petcivilufjf.wordpress.com/2016/09/12/a-tecnica-se-incorporou-a-arte-edificio-masp/>. Acesso em: 22 dez. 2023.

POMPERMAYER SESSO et al. Sustentabilidade e desenvolvimento socioambiental: fundamentos e práticas. Local: Editora, 2023.

POSSAN, E.; POZZOBON, J. P.; SCHMITT, R. Análise do desempenho estrutural de concretos de alto desempenho. *Revista Engenharia Civil*, v. 21, n. 3, p. 45–58, 2014.

_____. Avaliação ambiental de concretos de alto desempenho: emissões de CO₂. *Materials Research*, v. 21, n. 6, p. 1–12, 2018.

QUEIROZ FILHO, A.; AMORIM NETO, A. A. Sumário mineral: Cimento. Agência Nacional de Mineração, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/cimento#:~:text=O%20consumo%20m%C3%A9dio%20de%20cimento,foi%20de%20a%20proximadamente%2065%20kg>. Acesso em: 20 dez. 2023.

REVISTA ESTRUTURA. Tecnologia a serviço da estética. *Revista Estrutura*, São Paulo, p. 11-16, dezembro, 2021.

ROLIM, A. Aula 5 - Carregamento das estruturas de concreto. 2023. Disponível em: <https://www.concretoarmado.org/post/aula-5-carregamento-das-estruturas-de-concreto>. Acesso em: 22 nov. 2023.

SANTOS, R. F.; LIMA, D. A.; OLIVEIRA, P. R. Avaliação do dimensionamento estrutural em concreto de alto desempenho: estudo de caso em edifícios comerciais. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 32, n. 3, p. 102–116, 2021.

SCHNEIDER, M.; MEIER, U. Structural design of high-performance concrete elements: practical considerations. *Journal of Structural Engineering*, v. 145, n. 6, 2019.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARCÍA, D. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for reducing CO₂ emissions. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2–26, 2018.

SHENG, K.; WOODS, J. E.; BENTZ, E.; HOULT, N. A. Assessing embodied carbon for reinforced concrete structures in Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 51, n. 9, p. 829-840, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjce-2023-0345>.

SILVA NETO, F. S. Relações entre o coeficiente Gama-Z e o parâmetro de instabilidade Alfa para concretos de classe II. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

SILVA, I. S. Concreto de alta resistência: composição, propriedades e dimensionamento. 1995. Dissertação (Mestre em Engenharias de Estrutura) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Dados de produção e emissões. 2025. Disponível em: < <http://snic.org.br/assets/pdf/numeros/1752521165.pdf> > e

SOUZA, F. R.; LIMA, R. M.; COSTA, A. F. Avaliação ambiental de edificações: impacto do concreto de alto desempenho. *Revista Engenharia Civil*, v. 25, n. 1, p. 33–47, 2020.

SP CORPORATE. Sobre o E-Tower. 2024. Disponível em: <https://spcorporate.com.br/imoveis/e-tower>. Acesso em 20 fev. 2023.

THOMAS, M. D. A.; HARRIS, D.; GRIEG, J. High-performance concrete: properties, materials and applications. London: Elsevier, 2020.

TORRICO, F. A. Análise teórica e experimental do comportamento de pilares esbeltos de concreto de alta resistência, considerando a ductilidade. 345f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

UNIÃO BRASILEIRA DO BIODIESEL E BIOQUEROSENE. O que é pegada de carbono? 2020. (0m43s). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=FXiLxqKBQ00&t=5s>. Acesso em: 08 jan. 2024.

VALANDRO, A.; TROMBETTA, D. T. Estabilidade global de edifícios – aplicação do parâmetro de instabilidade α e processo P-delta. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

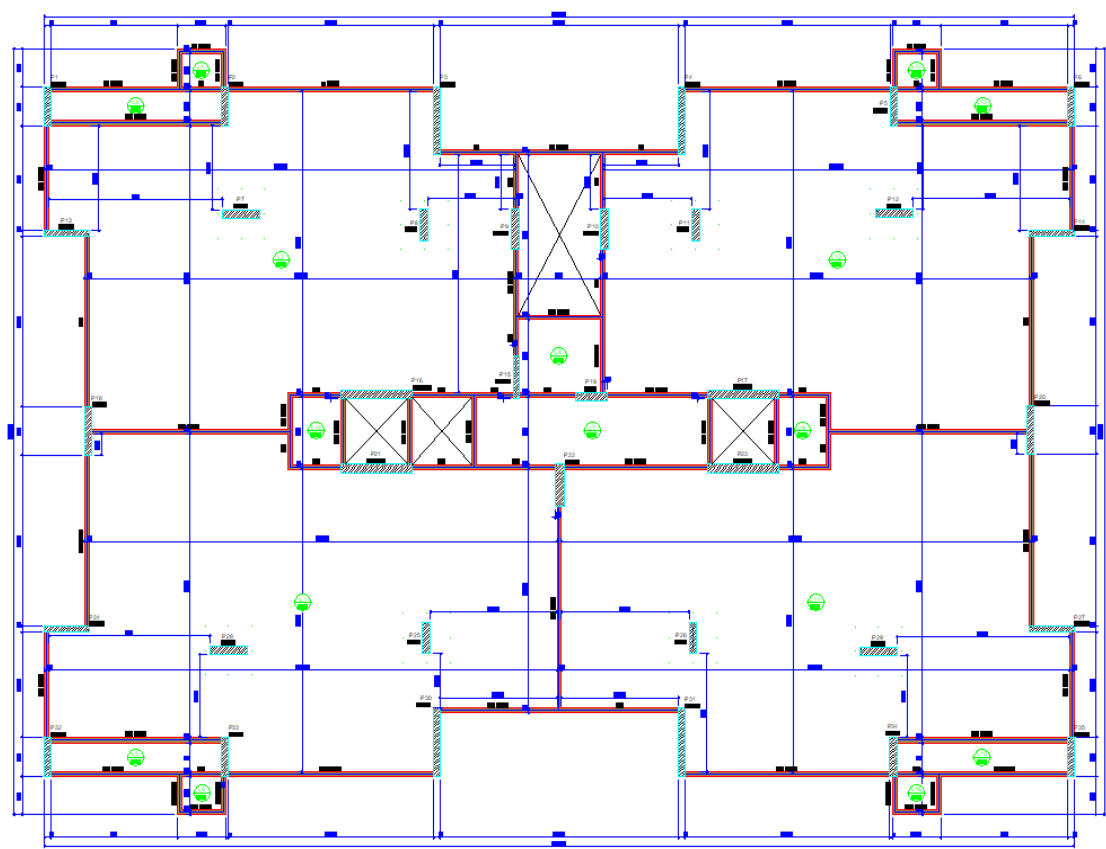
VIEIRA, F. F. Avaliação da estabilidade de estruturas verticais. Dissertação (Mestrado) – UFES, 2017.

VIEIRA, J. C. et al. Concreto de alto desempenho e sustentabilidade: análise estrutural e ambiental. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 31, n. 4, p. 89–102, 2025.

VOTORANTIM. E-Tower recebe concreto com resistência média de 125 Mpa. AECWeb, 2024. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/empresa/votorantim-cimentos/18069/conteudo/e-tower-recebe-concreto-com-resistencia-media-de-125-mpa/15710>>. Acesso em: 23 dez. 2023.

YANG, X.; LI, Y.; ZHANG, H.; et al. Life cycle assessment of CO₂ emissions in conventional and high-performance concrete in buildings. *Journal/Book Name, Local/City: Editora*, 2019.

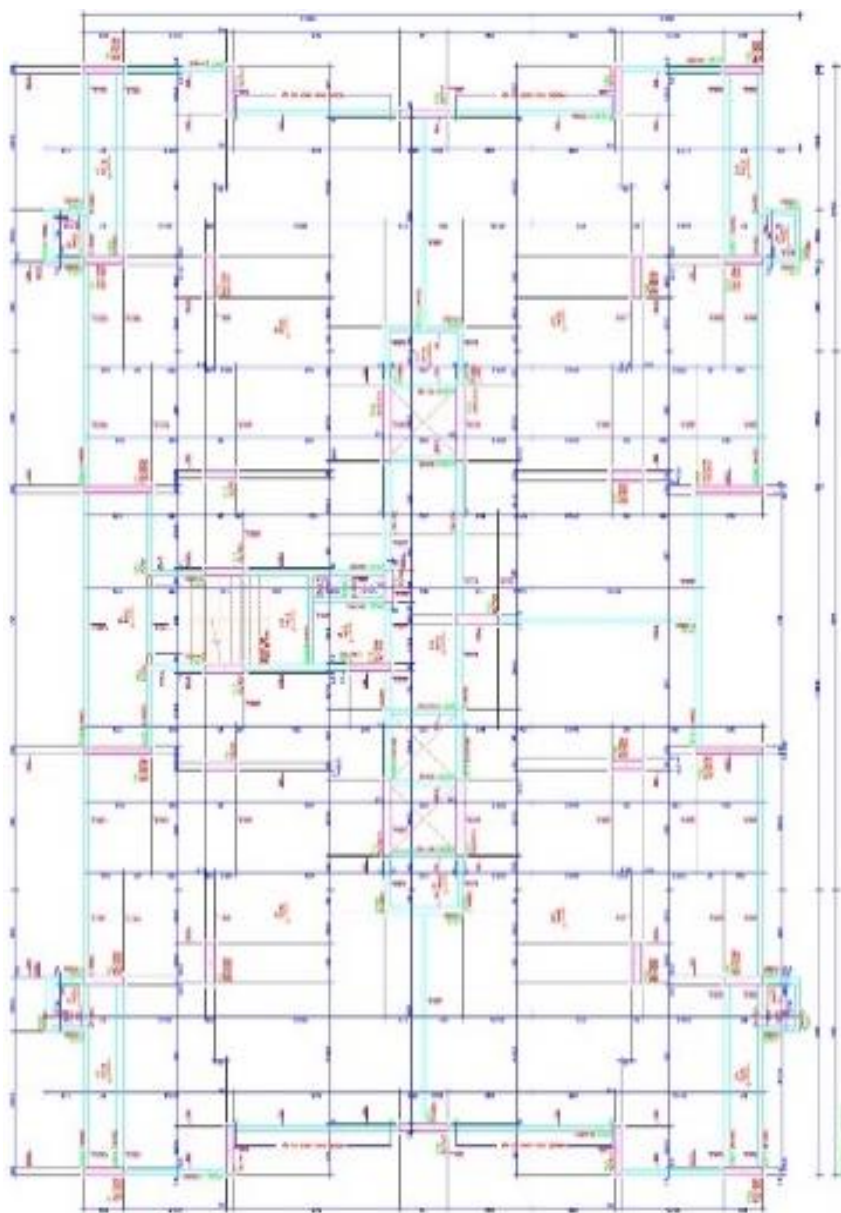
APÊNDICE 1 - PLANTA FORMA COM DETALHAMENTOS



Forma do pavimento Tipo 1 (Nível 970)
escala 1:50

Fonte: ALTOQI, 2024.

APÊNDICE 2 - FORMA TIPO: PILARES EXECUTADOS



Fonte: AUTOR (2025).