



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

YURI JOSÉ RODRIGUES

**INDICADORES DE CONSUMO EM EDIFÍCIOS ALTOS: UMA ANÁLISE CRÍTICA
DOS PARÂMETROS DE PROJETO SEGUNDO A LITERATURA TÉCNICA E
NORMATIVA**

**FORTALEZA
2026**

YURI JOSÉ RODRIGUES

INDICADORES DE CONSUMO EM EDIFÍCIOS ALTOS: UMA ANÁLISE CRÍTICA
DOS PARÂMETROS DE PROJETO SEGUNDO A LITERATURA TÉCNICA E
NORMATIVA

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

Orientador: Prof. Dr. Augusto Teixeira de
Albuquerque.

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R617i Rodrigues, Yuri José.

Indicadores de consumo em edifícios altos : uma análise crítica dos parâmetros de projeto segundo a literatura técnica e normativa / Yuri José Rodrigues. – 2026.
65 f. : il. color.

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

Orientação: Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque.

1. Edifícios altos. 2. Consumo de materiais. 3. Concreto. 4. Aço. 5. Projeto estrutural. I. Título.
CDD 620

YURI JOSÉ RODRIGUES

INDICADORES DE CONSUMO EM EDIFÍCIOS ALTOS: UMA ANÁLISE CRÍTICA
DOS PARÂMETROS DE PROJETO SEGUNDO A LITERATURA TÉCNICA E
NORMATIVA

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

Aprovada em: 14 / 01 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dra. Marisete Dantas de Aquino
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Otávio Rangel de Oliveira e Cavalcante
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder luz, força e perseverança ao longo de toda esta trajetória, permitindo que eu superasse os desafios e seguisse adiante com fé e determinação.

A minha família, base fundamental de tudo o que sou. Obrigado pelo amor incondicional, pelo apoio constante, pela paciência nos momentos difíceis e pela compreensão nas ausências necessárias ao longo deste percurso. Cada conquista minha é também de vocês, e este trabalho representa não apenas um esforço individual, mas o reflexo do incentivo, dos valores e do cuidado que sempre recebi. Dedico este trabalho à minha família, com profundo carinho, respeito e gratidão.

A Lia Alves e à sua família por todo o acolhimento, carinho e suporte oferecidos durante o desenvolvimento deste trabalho, que foram essenciais para a conclusão desta etapa.

Aos meus amigos que tornaram toda essa trajetória mais leve e rica de memórias que levarei para toda a vida dos bons momentos que passamos juntos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Augusto Teixeira de Albuquerque, pela disponibilidade, atenção e orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua postura profissional, conhecimento e dedicação foram fonte de aprendizado e inspiração.

A todos os professores da graduação pelos ensinamentos transmitidos, pelas oportunidades proporcionadas e pelas reflexões que contribuíram de forma decisiva para a minha formação acadêmica e profissional. Cada aula, cada orientação e cada desafio proposto permanecem como marcos importantes no meu processo de crescimento e realização.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise crítica dos parâmetros estruturais que influenciam o consumo de materiais em edifícios altos, com ênfase nos três principais componentes: concreto, aço e formas. A pesquisa se justifica diante da lacuna técnica quanto à sistematização de indicadores de consumo segundo tipologias estruturais adotadas no Brasil, particularmente em regiões em processo de verticalização acelerada, como Fortaleza, capital do estado do Ceará. O objetivo geral foi propor, com base em revisão bibliográfica e normativa, valores referenciais preliminares que sirvam como base para decisões de projeto. Os objetivos específicos incluíram a identificação dos principais parâmetros de projeto (como índice de esbeltez, tipo de laje, número de pavimentos e resistência do concreto), o levantamento de dados em fontes técnicas nacionais e internacionais, e a organização de uma tabela síntese de consumo. A metodologia adotada foi do tipo qualitativa e exploratória, com abordagem predominantemente bibliográfica e normativa. Dados foram extraídos de artigos científicos, manuais técnicos, dissertações, projetos de edifícios reais e plataformas de cálculo. Foram identificados parâmetros críticos que impactam diretamente o consumo específico por m^2 , sendo observadas variações de até 35% entre diferentes soluções estruturais. A análise permitiu comparar abordagens nacionais e internacionais, destacando diferenças nos critérios de segurança, nas classes de exposição e nas exigências de detalhamento estrutural. Como produto, conclui-se que a consideração desses parâmetros desde as fases iniciais do projeto é essencial para a racionalização do uso de materiais, contribuindo com ganhos técnicos, econômicos e ambientais. O estudo reforça a necessidade de atualização e regionalização de dados normativos, bem como a integração entre projetistas, construtores e arquitetos para viabilizar soluções estruturais mais sustentáveis e eficientes.

Palavras-chave: Edifícios altos. Consumo de materiais. Concreto. Aço. Formas. Projeto estrutural. Normas técnicas.

ABSTRACT

This study presents a critical analysis of structural parameters that influence material consumption in high-rise buildings, with emphasis on the three main components: concrete, steel, and formwork. The research is justified by the technical gap regarding the systematization of consumption indicators based on structural typologies adopted in Brazil, particularly in regions undergoing rapid verticalization, such as Fortaleza, state capital of Ceará. The general objective was to propose, based on a bibliographic and normative review, preliminary reference values to support design decisions. The specific objectives included identifying the main design parameters (such as slenderness ratio, slab type, number of floors, and concrete strength), collecting data from national and international technical sources, and organizing a summary table of material consumption. The adopted methodology was qualitative and exploratory, with a predominantly bibliographic and normative approach. Data were gathered from scientific articles, technical manuals, dissertations, real building projects, and design platforms. Critical parameters were identified that directly affect specific consumption per square meter, with variations of up to 35% observed among different structural solutions. The analysis allowed for a comparison between national and international approaches, highlighting differences in safety criteria, exposure classes, and structural detailing requirements. As a final product, it is concluded that considering these parameters from the early design stages is essential for the rational use of materials, contributing to technical, economic, and environmental benefits. The study reinforces the need for the updating and regionalization of normative data, as well as the integration between designers, builders, and architects to enable more sustainable and efficient structural solutions.

Keywords: High-rise buildings. Material consumption. Concrete. Steel. Formwork. Structural design. Technical standards.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma de concepção de projeto	23
Figura 2 – Categoria de sistemas estruturais	28
Figura 3 – Representação do processo P-Delta (P Δ)	34
Figura 4 – Tipos de lajes	43
Figura 5 – Tipologias estruturais	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Equação para determinar o índice de esbeltez	37
Quadro 2 – Análise comparativa entre as normativas	46
Quadro 3 – Classes de agressividade ambiental (CAA)	47
Quadro 4 – Comparação normativa entre NBR 6118, ACI 318 e Eurocode 2	55
Quadro 5 – Taxa de consumo para estrutura em concreto armado convencional	59
Quadro 6 – Taxa de consumo para estrutura em concreto protendido	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índices de esbeltez das edificações	54
Tabela 2 – Índices médios em relação ao número de pavimentos	55
Tabela 3 – Dados técnicos de empreendimentos reais em Fortaleza-CE	61
Tabela 4 – Indicadores de consumo estrutural	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Possibilidade de intervenção no empreendimento em relação aos custos acumulados ao longo das etapas de produção	25
Gráfico 2 – Comparativo para lajes em concreto armado ou protendido	40
Gráfico 3 – IC AÇO (kg/m ²) x Altura (m)	62
Gráfico 4 – IC CONCRETO(m ³ /m ²) x Altura	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

BIM Building Information Modeling

CTBUH Council on Tall Buildings and Urban Habitat

ISBN International Standard Book Number

LUOS Lei de Uso e Ocupação do Solo

Fck Resistência Característica à Compressão

ELU Estado Limite Último

ELS Estado Limite de Serviço

LISTA DE SÍMBOLOS

% Porcentagem

£ Libra

® Marca registrada

α Alfa

β Beta

γ Gama

δ Delta

λ Lambda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos	19
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	19
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1	Definição de edifício alto	20
2.2	Verticalização urbana e seus impactos na concepção estrutural	20
2.3	Desempenho estrutural e sustentabilidade no setor da construção	22
2.4	Indicadores de consumo estrutural.....	25
2.5	Sistemas estruturais em edifícios altos.....	27
2.6	Ação do vento e sua criticidade em edifícios altos	30
2.7	Parâmetros de instabilidade	32
2.7.1	<i>Processo p-Δ (p-delta)</i>	33
2.8	Solicitações normais em estruturas de concreto	34
2.8.1	<i>Estado Limite Último (ELU)</i>	34
2.8.2	<i>Estado Limite de Serviço (ELS)</i>	36
2.9	Parâmetros estruturais que influenciam o consumo de materiais	36
2.9.1	<i>Índice de esbeltez e altura total da edificação</i>	36
2.9.2	<i>Resistência característica do concreto (fck)</i>	38
2.9.3	<i>Protensão</i>	39
2.9.4	<i>Tipo de laje empregada</i>	41
2.9.5	<i>Número de pavimentos e carga acumulada</i>	44
2.9.6	<i>Tipologia do sistema estrutural</i>	44
2.10	Abordagem normativa: comparação entre NBR 6118, ACI 318 e Eurocode 2	46
2.10.1	<i>Critérios normativos de dimensionamento e impacto no consumo de materiais</i>	46
2.10.2	<i>Classes de exposição e cobrimento do concreto</i>	47
2.10.3	<i>Implicações no consumo e na racionalização</i>	48
2.10.4	<i>Panorama do consumo de materiais segundo a literatura técnica</i>	48
2.10.5	<i>Índices de consumo típicos de materiais</i>	49
2.10.6	<i>Estudos aplicados e práticas de mercado</i>	49
3	METODOLOGIA.....	50

3.1	Tipo de abordagem da pesquisa	50
3.2	Procedimentos metodológicos	50
3.2.1	<i>Levantamento bibliográfico e normativo</i>	50
3.2.2	<i>Identificação dos parâmetros estruturais.....</i>	51
3.2.3	<i>Levantamento de indicadores técnicos de consumo.....</i>	51
3.2.4	<i>Comparação de abordagens normativas</i>	52
3.3	Delimitações do estudo	52
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	53
4.1	Influência do fck no consumo de materiais	53
4.2	Influência do número de pavimentos e esbeltez	53
4.3	Tipologia estrutural e sistemas de lajes	54
4.4	Comparação normativa: NBR 6118, ACI 318 e Eurocode 2	55
4.5	Indicadores estruturais de consumo: definições, cálculo e vantagens	55
4.5.1	<i>Consumo específico de aço por área construída (kg/m²)</i>	56
4.5.2	<i>Consumo específico de concreto por área construída (m³/m²)</i>	56
4.5.3	<i>Consumo de aço normalizado pela altura da edificação (kg/m²/m)</i>	57
4.5.4	<i>Consumo de aço por área útil total (kg/m²/pavimento)</i>	58
4.5.5	<i>Consumo de concreto por área útil total (m³/m²/pavimento)</i>	58
4.6	Proposições de faixas referenciais	59
4.7	Resultados e discussão crítica	60
4.8	Limitações do estudo	64
5	CONCLUSÃO.....	65
5.1	Contribuições da pesquisa	65
5.2	Perspectivas para pesquisas futuras	66
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a verticalização urbana tornou-se uma característica marcante das grandes cidades brasileiras, refletindo a busca por soluções habitacionais mais densas e economicamente viáveis diante da crescente escassez de terrenos bem localizados. Edifícios altos, além de representarem um aproveitamento mais eficiente do solo, concentram uma série de desafios técnicos que exigem soluções estruturais cada vez mais otimizadas.

A elevação no número de pavimentos e a maior esbeltez das edificações resultam em ações horizontais mais relevantes, exigindo atenção redobrada no dimensionamento, na estabilidade global e no desempenho estrutural frente à ação do vento. Nessa escala, decisões tomadas ainda nas etapas iniciais de projeto, como a definição do sistema estrutural, a seleção do tipo de laje e a escolha da classe de resistência do concreto, exercem influência direta sobre o consumo de materiais e, consequentemente, sobre os custos, os prazos e os impactos ambientais da construção.

O avanço das ferramentas computacionais de cálculo estrutural, aliado à disseminação de tecnologias como o Building Information Modeling (BIM), tem permitido maior controle sobre variáveis críticas do projeto estrutural. Ao mesmo tempo, cresce o interesse por estratégias de racionalização construtiva, como o uso de elementos pré-fabricados, sistemas mistos e otimização topológica. No entanto, apesar desses avanços, ainda são escassos os estudos sistematizados que quantifiquem de forma comparativa o consumo de materiais estruturais em edificações verticais, especialmente no contexto brasileiro.

Essa lacuna técnico-científica compromete a previsibilidade dos projetos e limita a adoção de boas práticas. O mercado carece de faixas referenciais confiáveis que orientem decisões de projeto desde a concepção até a execução (Lantelme, 1993). Soma-se ao fato de as edificações não necessariamente seguirem um padrão entre os projetos devido a liberdade criativa e desenvolvimento de identidade única de cada empreendimento, o que dificulta a avaliação de desempenho estrutural com base em critérios objetivos.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise crítica dos principais fatores que influenciam o consumo de concreto, aço e fôrmas em edifícios altos. A partir de uma revisão bibliográfica e normativa, busca-se identificar parâmetros estruturais determinantes, discutir tendências recentes de projeto e propor subsídios que contribuam para uma abordagem mais racional e eficiente no dimensionamento dessas edificações.

Espera-se, com isso, oferecer uma pequena contribuição à engenharia estrutural, promovendo a integração entre teoria, prática e inovação tecnológica no desenvolvimento de soluções mais sustentáveis, econômicas e coerentes com os desafios da verticalização urbana no Brasil.

1.1 Justificativa

A inferência de indicadores de consumo de materiais para edifícios altos apresenta desafios significativos, pois essas edificações frequentemente utilizam uma variedade de métodos construtivos. A diversidade nos sistemas construtivos, como o uso de paredes de concreto, alvenaria estrutural e lajes de diferentes tipos, impacta diretamente nos indicadores de consumo de materiais, como o consumo de concreto. Por exemplo, um edifício com paredes de concreto pode apresentar um consumo de material diferente de um edifício com uma estrutura convencional de concreto armado. Essa variabilidade torna a tarefa de estabelecer parâmetros consistentes para o consumo de materiais um grande desafio.

A construção civil, em sua atuação contemporânea, enfrenta o desafio de equilibrar desempenho técnico, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental. O setor da construção é responsável por um expressivo consumo de cerca de metade dos recursos naturais explorados em todo o mundo (Wit *et al*, 2019) e pela geração de impactos significativos no ciclo de vida das edificações, principalmente no uso de materiais estruturais como concreto, aço e fôrmas. Esse setor também é responsável pela produção de aproximadamente um terço dos resíduos mundiais (Lauritzen, 2020).

Nesse contexto, a racionalização do consumo de materiais estruturais não deve ser vista apenas como uma meta de otimização econômica, mas como uma estratégia essencial para o avanço de práticas construtivas mais sustentáveis. Os edifícios altos, cada vez mais comuns em centros urbanos densos como Fortaleza, impõem demandas estruturais complexas que exigem soluções eficientes do ponto de vista técnico, econômico e ambiental, devido ao desenvolvimento social estar entrelaçado com o desenvolvimento urbano, os impactos ambientais da produção e do consumo de materiais da construção civil não devem ser apenas estudados, mas ativamente mitigados (Uratani; Griffiths, 2023). A verticalização urbana, impulsionada pela escassez de solo e pelo adensamento populacional, intensifica essa realidade e amplia a importância da eficiência material desde as etapas iniciais do projeto.

A escolha do sistema estrutural ideal é influenciada por um conjunto amplo de variáveis interdependentes, como tipologia arquitetônica, ações atuantes, espaçamentos entre apoios,

método construtivo, prazos, fundações e disponibilidade de materiais e mão de obra. A seleção adequada desses elementos define não apenas o desempenho global da estrutura, mas também o consumo específico de recursos ao longo da execução da obra.

Apesar dos avanços tecnológicos observados na engenharia estrutural brasileira, ainda se identifica uma lacuna relevante no que se refere à consolidação de dados quantitativos aplicáveis ao contexto nacional. Muitos estudos permanecem fragmentados e dispersos em bases institucionais, artigos técnicos, dissertações ou registros internos de empresas, o que dificulta a tomada de decisão baseada em evidências.

A definição das soluções estruturais, especialmente em edificações de grande altura, depende de inúmeros fatores e critérios adotados pelos projetistas, tais como concepção arquitetônica, sistema estrutural escolhido, métodos construtivos, restrições econômicas e condicionantes locais. Nesse contexto, a ausência de faixas referenciais consolidadas de consumo de materiais prejudica a formulação de diretrizes práticas para a fase de concepção e anteprojeto, etapa na qual as decisões tomadas possuem elevado impacto técnico e econômico, considerando o grande valor agregado envolvido em cada escolha de projeto.

Justifica-se, portanto, a realização deste estudo pela necessidade de maior descrição de indicadores de consumo em empreendimentos brasileiros, a fim de identificar os principais parâmetros que afetam o consumo em edifícios altos. A proposta é oferecer uma análise crítica com base na literatura de dados extraídos de empreendimentos reais, contribuindo para decisões de projeto mais conscientes e fundamentadas. Espera-se, com isso, apoiar a evolução do setor no sentido de maior sustentabilidade, previsibilidade de custos e racionalidade construtiva.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo geral*

Realizar uma análise crítica, com base em revisão bibliográfica e normativa, dos parâmetros de projeto que influenciam o consumo de materiais estruturais em edifícios altos.

Busca-se, com isso, identificar padrões recorrentes e propor faixas de referência preliminares que subsidiem decisões projetuais mais eficientes, racionais e sustentáveis no contexto da verticalização urbana brasileira.

1.2.2 *Objetivos específicos*

Determinar os indicadores mais representativos para os projetos selecionados e

- a) Identificar os principais parâmetros estruturais: esbeltez global, número de pavimentos, classe do concreto (f_{ck}) e tipologia de lajes;
- b) Levantar dados quantitativos e qualitativos de consumo de concreto, aço e fôrmas a partir de publicações técnicas, artigos científicos, normas, dissertações, teses e manuais de projeto;
- c) Avaliar como diferentes parâmetros de projeto impactam os indicadores de consumo estrutural;
- d) Sistematizar os resultados em uma tabela síntese com valores típicos ou faixas referenciais preliminares de consumo para edifícios altos, de acordo com diferentes combinações de variáveis.

2 REVISÃO DE LITERATURA E REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Definição de edifício alto

De acordo com o Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH), entidade internacional de referência no estudo e classificação de edificações verticais, um prédio é considerado "alto" (tall building) quando sua altura exerce influência significativa nas decisões de projeto, incluindo aspectos estruturais, tecnológicos e funcionais, especialmente relacionados à ação do vento e ao conforto humano. O CTBUH não estabelece um limite fixo universal de altura, mas recomenda que a classificação considere o contexto urbano, a esbeltez relativa da edificação e sua expressividade arquitetônica (CTBUH, 2014).

Para fins de classificação, o Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH) estabelece parâmetros aproximados, definindo como edifícios altos (tall buildings) aqueles com altura superior a cerca de 50 m ou 14 pavimentos; como edifícios muito altos (supertall buildings) aqueles que ultrapassam 300 m de altura; e como megatall buildings as estruturas que excedem 600 m.

Considerando o contexto urbano e normativo de Fortaleza, capital do estado do Ceará, é possível notar que a cidade apresenta, especialmente nas áreas próximas à orla marítima e nos bairros de alto adensamento vertical, um perfil caracterizado pela predominância de edificações residenciais multifamiliares e comerciais com alturas variando entre 12 e 40 pavimentos, muitas vezes superando os 100 metros de altura.

A Lei de Uso e Ocupação do Solo (LUOS) de Fortaleza e os Planos Diretores Municipais estabelecem parâmetros urbanísticos específicos que regulam o gabarito máximo das edificações conforme a zona de uso. Assim, na prática local, considera-se como prédio alto aquele com mais de 10 a 12 pavimentos, aproximadamente 30 a 40 metros, dado que, a partir deste porte, já são exigidas soluções estruturais e arquitetônicas diferenciadas para resistir a ações laterais significativas, sobretudo as provocadas pelo vento, cuja atuação é intensificada pelo regime de ventos alísios predominantes na região (Leite, 2010).

2.2 Verticalização urbana e seus impactos na concepção estrutural

A crescente verticalização dos centros urbanos brasileiros representa uma resposta direta à intensificação da densidade populacional, à valorização do solo urbano e à necessidade de uso mais racional dos espaços construídos. Este fenômeno, particularmente acentuado em

cidades de médio e grande porte como Fortaleza, impulsiona a construção de edifícios com número elevado de pavimentos, transformando o perfil das edificações residenciais e comerciais no país.

A verticalização, portanto, não deve ser entendida apenas como uma tendência arquitetônica ou urbanística, mas sim como um fenômeno que traz importantes desafios técnicos para o projeto estrutural. À medida que as edificações atingem maiores alturas, torna-se indispensável adotar soluções estruturais mais robustas, eficientes e adequadas às demandas específicas dessas construções. O aumento da esbeltez global das estruturas resulta em uma maior sensibilidade às ações horizontais, especialmente aos efeitos do vento, conforme estabelece a NBR 6123:1988 – Forças Devidas ao Vento em Edificações (ABNT, 1988). Esse cenário exige o emprego de sistemas de contraventamento e a utilização de núcleos rígidos capazes de proporcionar a rigidez lateral necessária para garantir a estabilidade global e a segurança das edificações de grande altura.

Outro aspecto determinante é o consumo de materiais estruturais. A altura da edificação afeta diretamente o dimensionamento de pilares, lajes e núcleos verticais, o que se traduz em um maior volume de concreto, maior taxa de armadura por elemento e maior área de formas utilizadas, especialmente nas zonas de maior esforço (base e transições estruturais). De acordo com Carneiro (2018), edificações com mais de 25 pavimentos apresentam incrementos médios de 5% a 10% nos índices de consumo de aço e concreto por metro quadrado, em comparação com edifícios de altura convencional (até 15 pavimentos), evidenciando a influência direta do parâmetro “altura” sobre os indicadores técnicos de consumo.

À medida que a altura das edificações aumenta, a predominância das ações horizontais, tais como o vento e o sismo, torna-se mais significativa e, consequentemente, mais crítica para o dimensionamento estrutural. Em edifícios altos, essas ações geram esforços laterais substanciais, induzindo deslocamentos globais e locais que podem comprometer a estabilidade, a segurança e o conforto dos ocupantes.

De acordo com Simiu (2006), a ação do vento em edifícios altos e flexíveis pode induzir forças variáveis e momentos torcionais, principalmente quando há desajuste entre o centro de massa e o centro elástico da estrutura. Os efeitos da não linearidade geométrica também são intensificados conforme as edificações ficam mais altas, inferindo que os deslocamentos das edificações interferem significativamente no equilíbrio e tornando insuficientes as aproximações da teoria linear para a avaliação adequada do comportamento estrutural (Oliveira, 2009; Silva, 2014).

Além disso, a verticalização amplia a complexidade dos sistemas estruturais adotados. A interação entre fundações profundas, elementos de transição e sistemas de estabilidade exige um nível elevado de coordenação entre arquitetura e engenharia. Isso se reflete na seleção criteriosa dos materiais estruturais, nos métodos construtivos e nos parâmetros de projeto. Tais condicionantes não apenas interferem no desempenho estrutural, mas também impactam os custos diretos da construção, o prazo de execução e a pegada ambiental do empreendimento (Parker, D.; Wood, A., 2013).

No cenário específico de Fortaleza, observa-se uma predominância de edificações residenciais verticais em zonas com alta pressão imobiliária. Segundo dados do Instituto de Planejamento de Fortaleza (IPLANFOR, 2022), o adensamento construtivo em áreas como Meireles, Aldeota e Cocó tem promovido uma reconfiguração tipológica das edificações, com empreendimento ultrapassando 30 pavimentos e adotando sistemas estruturais complexos para atender às demandas arquitetônicas e de mercado. Nesse contexto, torna-se fundamental compreender como os parâmetros estruturais influenciam o consumo de materiais e como a literatura técnica pode contribuir para decisões mais eficientes e sustentáveis.

Dessa forma, a verticalização não deve ser encarada apenas como uma característica do desenvolvimento urbano, mas sim como um fator que impacta diretamente as práticas de projeto estrutural. Com isso, este trabalho busca contribuir para a definição de indicadores de consumo de materiais que sejam coerentes com esse modelo construtivo, a partir de dados coletados de edificações reais que refletem, minimamente, a realidade dos edifícios altos nos contextos urbanos do Brasil.

2.3 Desempenho estrutural e sustentabilidade no setor da construção

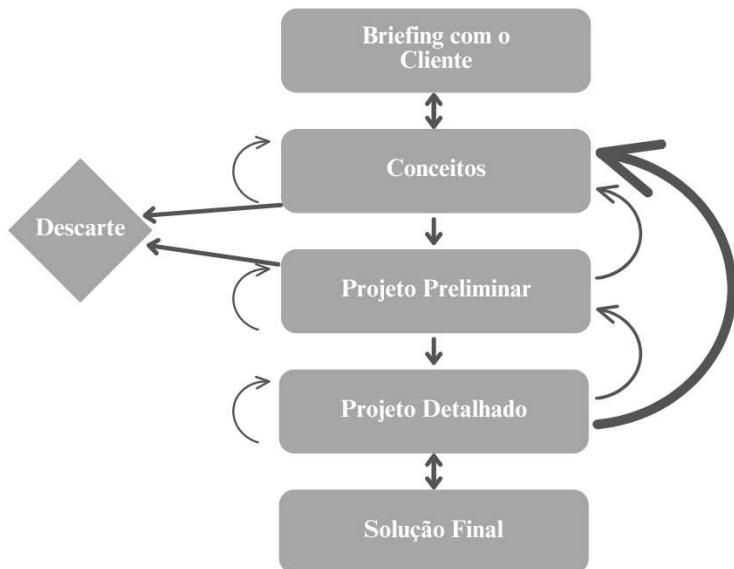
A construção civil é uma das atividades humanas que mais consomem recursos naturais e energia, além de ser responsável por expressiva geração de resíduos sólidos e emissões de gases de efeito estufa (GHG). Segundo o Global Status Report, o setor de edificações e construção foi responsável por aproximadamente 36% do consumo global de energia final e por 37% das emissões de CO₂ relacionadas à energia. Neste contexto, a eficiência no uso de materiais estruturais assume papel central na busca por soluções mais sustentáveis e racionais (Manuel, 2025).

A eficiência estrutural está diretamente ligada ao conceito de racionalização do uso de materiais, o que implica projetar sistemas que garantam segurança, estabilidade e desempenho, com o mínimo uso de recursos. No caso de edifícios altos, esse desafio é intensificado devido

à complexidade estrutural e à necessidade de maior robustez frente às ações verticais (peso próprio, sobrecargas) e horizontais (vento, efeitos de segunda ordem). Elementos como pilares, lajes, vigas e núcleos rígidos devem ser dimensionados de forma otimizada, de modo a garantir um equilíbrio entre segurança e consumo de materiais.

Quando se projeta uma estrutura é bastante improvável um desvio das etapas fundamentais conforme apresentadas na Figura 1. A fase de projeto e execução de um edifício alto é uma tarefa bastante desafiadora, portanto deve ser tratada com muita responsabilidade e planejamento. O projeto estrutural exige do projetista a previsão comportamental precisa das diversas solicitações que a edificação ficará sujeita.

Figura 1 – Fluxograma de concepção de projeto



Fonte: Adaptado de Parker, D. e Wood, A. (2013).

Na construção civil, muitos são os desvios construtivos que acabam aumentando o consumo de materiais, o que pode dificultar a previsibilidade de gastos apesar do uso de indicadores. As imperfeições geométricas iniciais são um exemplo de desvio na fase construtiva que possui grande influência e compromete a instabilidade global da estrutura levando a execução de projetos que exigem soluções mais dispendiosas (Santos, 2018).

O desempenho estrutural, conforme definido na ABNT NBR 15575:2021 – Edificações Habitacionais – Desempenho, deve considerar requisitos de segurança estrutural, funcionalidade, durabilidade e manutenibilidade ao longo da vida útil da edificação. Esses critérios são fundamentais para garantir não apenas a integridade física da estrutura, mas também sua viabilidade econômica e ambiental. Nesse contexto, a solução estrutural adotada

deve ser compatível com as condições de exposição e com o grau de agressividade do meio, de modo a assegurar o desempenho adequado ao longo do tempo e reduzir a incidência de manifestações patológicas e intervenções corretivas.

No tocante à sustentabilidade, a escolha dos materiais, dos métodos construtivos e dos parâmetros de projeto deve visar à minimização do impacto ambiental, o que inclui a redução racional do consumo de aço, concreto e formas, bem como o uso eficiente da mão de obra e dos equipamentos, sem prejuízo da durabilidade e do desempenho estrutural.

A busca por desempenho também envolve a consideração de aspectos normativos relacionados ao meio ambiente, como as diretrizes da ISO 14001, bem como políticas públicas que incentivam a construção sustentável (ex: certificações como LEED, AQUA -HQE, EDGE). Embora tais certificações estejam mais associadas a aspectos de eficiência energética e conforto ambiental, elas frequentemente impõem critérios de racionalização estrutural e uso consciente de materiais, o que reforça a necessidade de decisões embasadas ainda nas etapas iniciais de concepção do projeto estrutural.

Sob a ótica do engenheiro estrutural, a racionalização do consumo de materiais não deve comprometer os critérios de segurança estrutural estabelecidos pelas normas técnicas nacionais e internacionais, mas sim buscar soluções que conciliem desempenho técnico, viabilidade construtiva e impacto ambiental reduzido. Projetos mal otimizados frequentemente resultam em superdimensionamentos desnecessários, aumento dos custos de construção e desperdício de recursos.

Conforme pode ser observado no Gráfico 1, as etapas iniciais do processo construtivo são determinantes para o êxito na concepção de uma estrutura otimizada. Segundo Hammarlund e Josephson (1992), é nessas fases preliminares que se concentram as principais oportunidades de intervenção com menor impacto financeiro, uma vez que, após a conclusão do projeto e o início da construção, eventuais alterações tendem a se tornar significativamente mais onerosas.

Gráfico 1 – Possibilidade de intervenção no empreendimento em relação aos custos acumulados ao longo das etapas de produção.



Fonte: Hammarlund e Josephson (1992).

A literatura técnica aponta que a fase de concepção estrutural é a mais determinante no que se refere à sustentabilidade da estrutura, uma vez que escolhas como o tipo de sistema estrutural, a distribuição dos pilares, a forma da edificação e os materiais adotados impactam diretamente no consumo final. O consumo de concreto e aço pode variar entre projetos com a mesma função e altura, dependendo exclusivamente das decisões tomadas na fase inicial de projeto.

2.4 Indicadores de consumo estrutural

Os Indicadores de Consumo Estruturais constituem parâmetros numéricos que expressam a quantidade de materiais utilizados em sistemas estruturais, em relação a características geométricas e funcionais das edificações. Esses indicadores são fundamentais para promover a racionalização no desenvolvimento de projetos e obras, permitindo análises comparativas entre distintas soluções estruturais, com foco na eficiência, no custo e na sustentabilidade (Xavier, 2008).

Segundo Albuquerque (1999), a estrutura é responsável por aproximadamente 14% a 22% do custo total de uma edificação, o que evidencia a relevância de um estudo criterioso da fase estrutural. O autor destaca ainda que uma economia de 10% no custo da estrutura poderia representar cerca de 2% de redução no custo global da obra, valor equivalente à execução

integral de etapas como pintura ou serviços de movimento de terra, soleiras, rodapés, peitoris e coberta.

Contudo, cabe ressaltar que esses percentuais foram obtidos no final da década de 1990 e refletem o contexto tecnológico, econômico e normativo vigente à época. Desde então, observa-se uma significativa evolução nos sistemas construtivos, nos materiais empregados, nas exigências de desempenho e nas decisões de projeto estrutural, fatores que tendem a alterar de forma relevante a participação da estrutura no custo total das edificações. Assim, torna-se necessária a realização de estudos mais recentes que avaliem o impacto atual da estrutura nos custos globais das obras, considerando os métodos construtivos contemporâneos e as práticas de projeto adotadas atualmente.

No âmbito da engenharia estrutural, destacam-se os indicadores que quantificam o uso de concreto, aço e formas. A mensuração desses insumos é normalmente referenciada à área construída (m^2), ao volume de concreto (m^3) ou ao número de pavimentos da edificação. Entre os principais exemplos, podem ser citados: o índice de consumo de concreto (m^3/m^2), o índice de aço (kg/m^3 de concreto) e o índice de formas (m^2 de forma/ m^2 de área construída), que são frequentemente utilizados como métricas de desempenho estrutural.

A utilização desses indicadores está fortemente vinculada ao conceito de engenharia orientada ao desempenho (*performance-based engineering*), segundo o qual as decisões projetuais e construtivas devem ser norteadas por parâmetros mensuráveis, que assegurem a eficiência técnica e econômica da estrutura. Os requisitos básicos para a determinação de um indicador eficaz é a simplicidade, representatividade, rastreabilidade e seletividade.

Os indicadores de consumo podem ser organizados segundo diferentes critérios, incluindo o material considerado, como concreto, aço, formas e armaduras ativas ou passivas; a unidade de medida adotada, que pode ser expressa por área construída, por volume de concreto ou por pavimento; e a finalidade de uso, que pode envolver previsão orçamentária, otimização do projeto estrutural, análise de sustentabilidade ou avaliação comparativa de desempenho entre edificações.

Além disso, variáveis como o índice de esbeltez da estrutura, o tipo de sistema estrutural (maciça, nervurada, protendida ou pré-moldada) e a classe de resistência do concreto (f_{ck}) exercem influência direta nos valores desses indicadores, sendo, portanto, elementos que devem ser cuidadosamente considerados nas análises.

Segundo Xavier (2008), para realizar o levantamento de materiais com o objetivo de elaborar um orçamento preliminar é possível levantar quantidades e atribuir custos a alguns serviços de modo a proporcionar um melhor grau de confiabilidade através de indicadores úteis

apenas uma estimativa de custos. As informações abaixo sintetizam os indicadores que foram propostos por Xavier (2008) para o levantamento do consumo de concreto, aço e forma.

Para a obtenção do volume de concreto, de uma laje em m^3 , o indicador proposto é a espessura média do concreto ao ser distribuído regularmente pela área do pavimento:

- Estrutura abaixo de 10 pavimentos: entre 12 a 16 cm;
- Estrutura acima de 10 pavimentos: entre 16 a 20 cm.

Volume de concreto = área construída x espessura média

(Obs: cálculo proposto apenas à super estrutura)

No cálculo do peso da armação, Xavier (2008) também propôs as seguintes faixas médias para as construções prediais:

- Estrutura abaixo de 10 pavimentos: entre 83 a 88 kg por m^3 de concreto;
- Estrutura acima de 10 pavimentos: entre 88 a 100 kg por m^3 de concreto.

Peso da armação = volume do concreto x taxa de aço.

Para o cálculo da área de forma para moldagem das peças estruturais (viga, laje e pilar), foi proposto a seguinte faixa:

- Forma: entre 12 e 14 m^2 por m^3 de concreto.

Área de forma = volume de concreto x taxa de forma.

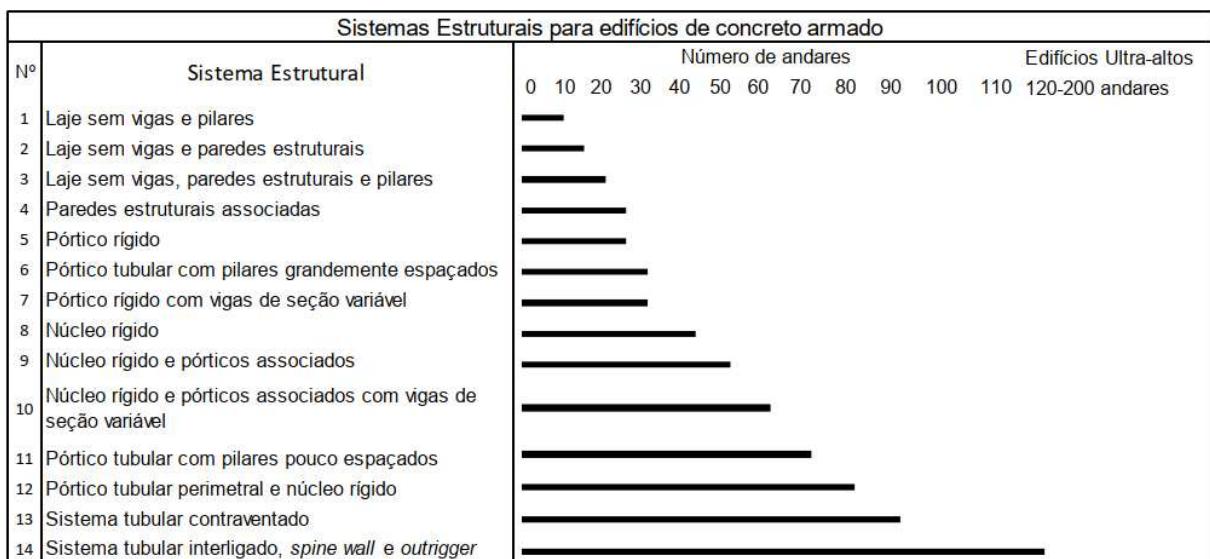
A racionalização proporcionada pelos indicadores fornece um apoio ao processo decisório e contribui com subsídios críticos para escolhas técnicas fundamentadas, com impacto direto na segurança, na viabilidade econômica e na sustentabilidade dos empreendimentos. Contudo, as faixas propostas de consumo de aço podem estar defasadas, sendo, portanto, necessários estudos mais recentes e atualizados que reflitam os métodos construtivos atualmente predominantes no contexto nacional

2.5 Sistemas estruturais em edifícios altos

A seleção do sistema estrutural em edifícios altos constitui uma das etapas mais críticas do projeto, pois influencia diretamente o desempenho global da edificação, a estabilidade frente

às ações horizontais, a eficiência no consumo de materiais e os custos de construção. Os sistemas estruturais utilizados em edificações com grande número de pavimentos precisam atender simultaneamente aos critérios de segurança estrutural, rigidez, viabilidade construtiva e racionalidade econômica.

Figura 2 – Categoria de sistemas estruturais



Fonte: Traduzida de Tanarath (2010) *apud* Guerzoni (2020).

A classificação dos sistemas estruturais para edifícios altos pode ser realizada conforme a predominância dos mecanismos resistentes e de controle da estabilidade global. Segundo Bangash (2011) e Tall Buildings Council (2017), esses sistemas são agrupados, em geral, nos seguintes tipos principais:

- Sistemas com suporte em estrutura de quadros resistentes (*moment-resisting frames*): baseiam-se em pórticos formados por vigas e pilares interligados rigidamente. São mais comuns em edificações de pequeno e médio porte. Apresentam limitação quanto à esbeltez e à rigidez lateral, sendo utilizados em edifícios altos apenas quando associados a outros sistemas complementares.
- Sistemas com núcleo rígido central (*core structures*): amplamente utilizados no Brasil, consistem em núcleos de concreto armado ou pretendido que concentram elementos de circulação vertical (elevadores, escadas), funcionando como contraventamento frente às ações horizontais. O núcleo colabora significativamente na rigidez lateral do edifício,

reduzindo deslocamentos horizontais e esforços de segunda ordem (δ) (NBR 6118: 2023, item 11.3.3).

- Sistemas com paredes de cisalhamento (*shear walls*): semelhantes aos núcleos, consistem em paredes de concreto estrategicamente posicionadas para resistir a esforços laterais. Têm alto desempenho estrutural e são frequentemente combinadas com pórticos ou lajes nervuradas para melhor distribuição de cargas verticais.
- Sistemas mistos (*dual systems*): integram núcleos rígidos, paredes de cisalhamento e pórticos resistentes à flexão. Representam uma solução eficiente para edifícios com mais de 20 pavimentos, combinando boa rigidez, ductilidade e facilidade de execução. A NBR 6118 reconhece esses sistemas como adequados para edificação em zonas sísmicas moderadas (item 13.5).
- Outros sistemas avançados (ex: tubular, megaframe ou *outriggers*): predominam em edifícios com alturas superiores a 100 metros. No contexto brasileiro, ainda são pouco aplicados em virtude das limitações tecnológicas, mas já aparecem em projetos com arquitetura arrojada e maior complexidade.

A escolha do sistema estrutural impacta diretamente o consumo de materiais e a concepção global da edificação. Em edifícios de grande altura, a adoção de lajes lisas tende a ocupar menor espaço vertical entre pavimentos, o que permite a redução da altura entre pisos e, consequentemente, a possibilidade de acréscimo de pavimentos dentro de um mesmo limite de altura total. Embora esse sistema apresente, em geral, maior consumo de concreto e de formas por metro quadrado quando comparado a sistemas com lajes nervuradas, ele proporciona maior flexibilidade arquitetônica e ganhos significativos de eficiência volumétrica.

Por outro lado, sistemas com lajes nervuradas contribuem para a redução do consumo de concreto, porém demandam maiores alturas estruturais e exigem maior compatibilização com os projetos complementares, o que pode limitar sua aplicação em edifícios altos sujeitos a restrições rigorosas de gabarito.

Além disso, a eficiência estrutural depende da configuração geométrica e da regularidade da edificação. Torres com plantas retangulares e núcleos centrais geralmente apresentam melhor desempenho estrutural e menor consumo de materiais do que geometrias complexas e excêntricas. Segundo Lira (2022), a variação no tipo de laje pode resultar em diferenças superiores a 25% no índice de consumo de formas, e até 15% no consumo de concreto, para uma mesma área construída.

Na prática profissional, observa-se que a definição precoce do sistema estrutural, alinhada com a arquitetura e a estratégia construtiva, pode otimizar significativamente os índices de consumo de aço e concreto, além de reduzir desperdícios e retrabalhos. Portanto, conhecer os diferentes sistemas estruturais e suas implicações quantitativas é fundamental para o projetista que busca aliar segurança, economia e sustentabilidade na concepção de edifícios altos.

2.6 Ação do vento e sua criticidade em edifícios altos

A ação do vento em edifícios altos não se limita ao papel de carregamento lateral adicional, mas atua como agente definidor da concepção estrutural. Em estruturas verticais de elevada esbeltez, seu efeito transita de secundário a dominante, regendo critérios de rigidez, estabilidade global e desempenho dinâmico. A quantificação normativa dessa ação, conforme a ABNT NBR 6123:2023, é apenas o ponto de partida. A complexidade reside na forma como sua manifestação, sobretudo em edifícios com mais de 30 pavimentos, impõe condicionantes rígidos à morfologia estrutural e, por consequência, aos índices de consumo estruturais.

Segundo Alves (2024), para mitigar os efeitos das ações horizontais, incluindo a formação de vórtices aos quais edificações esbeltas estão particularmente sujeitas, simples ajustes geométricos que podem ser adotados pela equipe de engenharia e arquitetura nos cantos da fachada, introduzindo reentrâncias destinadas a modificar o escoamento do vento, são suficientes para resultar em uma redução de aproximadamente 30% a 40% da oscilação global da estrutura. Contudo, destaca-se que soluções baseadas exclusivamente no design da fachada não são suficientes para garantir o desempenho da edificação frente a eventos extremos, como tufões, exigindo a adoção de sistemas estruturais e medidas adicionais de segurança.

Em estruturas de grande altura, a magnitude e a variabilidade da ação do vento são determinantes para o comportamento estrutural. As forças horizontais provenientes do vento geram esforços de flexão, corte e torção que, em muitos casos, superam em criticidade as cargas verticais gravitacionais (peso próprio, sobrecargas de uso). Por este motivo, o cálculo preciso da ação do vento é essencial e deve ser conduzido conforme a ABNT NBR 6123:2023 - Forças Devido ao Vento em Edificações, que estabelecem os procedimentos para determinação das pressões de projeto a partir de parâmetros como categoria de rugosidade, altura da edificação, e fator topográfico.

A ação do vento em edifícios altos assume caráter determinante para a definição dos elementos resistentes. Mais do que cargas, o vento impõe requisitos de deslocamento-limite,

aceleração e frequência natural, cuja não observância compromete a integridade funcional e a habitabilidade, gerando desconforto aos usuários da edificação. Conforme mostram Carvalho e Pinheiro (2014), nessa faixa de regime, o projeto desloca-se do domínio resistente para o domínio da rigidez, o regime de projeto em edifícios altos desloca o foco da resistência para a rigidez, fazendo com que os elementos verticais (ex: pilares centrais, paredes longitudinais e núcleos estruturais) passem a ser dimensionados primariamente por critérios de deformação, e não de capacidade resistente.

É nesse contexto que o sistema estrutural deixa de ser uma variável secundária para tornar-se decisivo. A seleção entre pórticos, núcleos rígidos, paredes estruturais ou sistemas dual deve atender não apenas aos esforços, mas ao controle rigoroso de deslocamentos horizontais. A esbeltez global, medida pela razão altura/menor dimensão em planta, é fator agravante, e exige aumento da inércia global efetiva, geralmente via ampliação da seção transversal ou do braço de alavanca entre elementos resistentes. Tais soluções, embora eficazes sob a ótica do desempenho estrutural, reverberam diretamente nos indicadores de consumo.

Esse redirecionamento conceitual impõe repercussões diretas nos indicadores de consumo estrutural. A necessidade de maior rigidez global resulta em aumento das seções transversais, maior índice de armadura longitudinal e transversal, incremento da rigidez das ligações laje-pilar e reforço nas transições estruturais. Contudo, estudos de Guerzoni (2020) indicam que a adoção do sistema contraventado por pórticos e pilares-parede proporcionou uma redução de aproximadamente 15% no volume de concreto, enquanto o emprego de pórticos treliçados resultou em uma economia de cerca de 31%, quando comparados ao sistema tradicional de pórticos rígidos.

Além disso, a escolha por sistemas com paredes moldadas in loco ou núcleos rígidos, frequentemente necessária para controle de deslocamentos, acarreta aumento significativo no uso de formas, especialmente em geometrias complexas ou não padronizadas entre os pavimentos.

A interação solo-estrutura, também ganha relevância à medida que a altura cresce, exigindo maiores rigidezes na base e maior quantidade de armaduras em elementos de fundação para acomodação dos esforços horizontais transferidos. Conforme as edificações ficam mais altas o centro de gravidade e centro de massa vão sendo deslocados para a região inferior de modo a permitir uma maior estabilidade. Esses incrementos de controle de estabilidade através da fundação e morfologia da estrutura aumentam significativamente o consumo de materiais.

Os efeitos da ação do vento devem ser considerados no projeto de edifícios altos para evitar subdimensionamentos e risco de instabilidade, apesar de edificações de até 10

pavimentos raramente ter seus designs afetados pelos efeitos do vento. Superdimensionar, por outro lado, conduz a soluções economicamente inviáveis e ambientalmente onerosas. O uso integrado de indicadores de consumo permite decisões mais fundamentadas e estruturadas sobre qual sistema adotar, considerando não apenas segurança e desempenho, mas também viabilidade construtiva e sustentabilidade.

Com os avanços da tecnologia, novos materiais mais resistentes são desenvolvidos. A combinação de mais inovações no tratamento arquitetônico e avanços nos métodos de análise permitiu que as edificações altas se tornassem mais eficientes e mais leves, o que também significa uma maior suscetibilidade a deflexões e vibrações. A magnitude dos deslocamentos depende da velocidade do vento, distribuição e direção, mas também na massa, rigidez e formato da construção (Hallebrand, 2016).

2.7 Parâmetros de instabilidade

A estabilidade global de estruturas verticais é analisada com base na consideração dos efeitos de segunda ordem, dependentes dos deslocamentos horizontais relativos aos esforços solicitantes. Conforme a NBR 6118:2014, estruturas com deslocamentos laterais desprezíveis e efeitos globais inferiores a 10% dos esforços de primeira ordem podem ser classificadas como de nós fixos; caso contrário, são caracterizadas como de nós móveis, impondo a consideração obrigatória desses efeitos.

A norma estabelece dois parâmetros para essa verificação: o parâmetro α (Alfa), que relaciona os momentos de segunda e primeira ordem, e o coeficiente γ_z (Gama-Z), que expressa a amplificação dos esforços verticais decorrentes dos deslocamentos horizontais. A utilização de parâmetros α e γ_z orienta a definição do modelo de análise adequado e a necessidade de incorporar efeitos de segunda ordem, compatibilizando a modelagem estrutural com o comportamento real das edificações de grande altura. A consideração dos efeitos de segunda ordem torna-se necessária quando $\alpha \geq 0,30$ ou $\gamma_z \geq 1,10$, sendo este último aplicável a estruturas com quatro ou mais pavimentos.

Dessa forma, em edificações de grande altura, a elevada esbeltez e as ações horizontais predominantes, como o vento, frequentemente resultam em parâmetros que superam os limites normativos, requerendo análises não lineares. Em tais edificações, o método P-Delta é usualmente empregado, possibilitando a consideração da interação entre os deslocamentos e os esforços internos de forma eficiente.

2.7.1 Processo p-Δ (p-delta)

O dimensionamento e a análise estrutural de edifícios altos devem obrigatoriamente considerar os efeitos de segunda ordem, conhecidos como efeito P-Δ, que se referem à amplificação dos esforços e deslocamentos decorrentes da interação entre as cargas verticais atuantes e os deslocamentos laterais da estrutura. Esse fenômeno representa uma não linearidade geométrica que pode comprometer significativamente a estabilidade global da edificação, especialmente em estruturas esbeltas e de elevada flexibilidade.

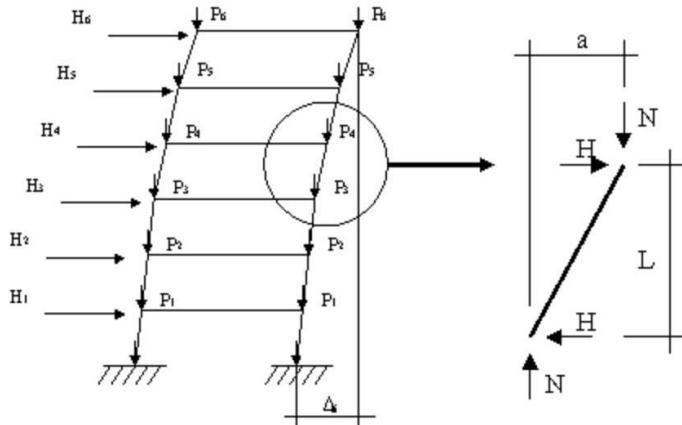
O efeito P-Delta é um fenômeno estrutural associado à interação entre as cargas verticais permanentes e os deslocamentos laterais da estrutura, geralmente provocados por ações horizontais, como o vento ou sismos. Esse efeito resulta na geração de momentos adicionais em função dos deslocamentos, caracterizando uma não linearidade geométrica que pode amplificar os esforços internos e comprometer a estabilidade global da edificação.

Em estruturas mais esbeltas, como edifícios de grande altura, a avaliação do efeito P-Delta deve considerar, de forma complementar, a influência da não linearidade física dos materiais, uma vez que a fissuração do concreto e a redução progressiva da rigidez dos elementos estruturais podem intensificar os deslocamentos e os efeitos de segunda ordem.

De acordo com Pereira (2011), esse fenômeno é mais relevante em estruturas altas e esbeltas, pois nelas os deslocamentos laterais tendem a ser mais expressivos, gerando acréscimos significativos nos momentos fletores. A consideração do efeito P-Delta é, portanto, fundamental para garantir a segurança e a estabilidade estrutural, sendo obrigatória conforme os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014.

O fenômeno ocorre da seguinte maneira: quando uma estrutura sofre deslocamentos horizontais (Δ) sob a ação de cargas laterais, as forças gravitacionais (P) deixam de atuar verticalmente sobre a posição original da estrutura e passam a incidir sobre uma posição deslocada, Figura 3. Esse deslocamento lateral gera um momento adicional proporcional ao produto entre a carga vertical e o deslocamento, ou seja, $M = P \cdot \Delta$.

Figura 3 – Representação do processo P-Delta ($P\Delta$)



Fonte: Longo (2025).

Nas análises estruturais, o efeito P-Delta é considerado por meio da chamada análise de segunda ordem, que incorpora as deformações na configuração da estrutura ao calcular os esforços internos. Essa abordagem contrasta com a análise de primeira ordem, que ignora tais efeitos e considera apenas a geometria inicial da estrutura.

Segundo Chen e Duan (2014), a consideração adequada do efeito P-Delta é essencial para evitar a subestimação dos esforços estruturais e o consequente subdimensionamento dos elementos. Tal consideração se torna ainda mais crítica em projetos de edifícios altos, onde as ações horizontais e os deslocamentos laterais são mais significativos.

A magnitude do efeito P-Delta depende de fatores como a intensidade de cargas gravitacionais aplicadas, amplitude dos deslocamentos horizontais e rigidez lateral da estrutura. Portanto, quanto mais flexíveis ou submetidas a grandes cargas verticais for a estrutura ela será mais suscetibilidade aos efeitos de segunda ordem, o que demanda soluções de projeto que aumentem a rigidez lateral, como o emprego de núcleos rígidos ou paredes de cisalhamento.

2.8 Solicitações normais em estruturas de concreto

2.8.1 Estado Limite Último (ELU)

O ELU refere-se à condição de ruptura ou colapso estrutural, representando as situações em que a segurança da estrutura, de seus elementos ou fundações é comprometida, tornando-a inadequada para o uso. O conceito de ELU constitui um dos pilares fundamentais da abordagem

moderna de dimensionamento estrutural baseada em estados limites, adotada pela norma ABNT NBR 6118:2023 para o projeto de estruturas de concreto armado e protendido.

De acordo com a norma, os ELUs devem ser verificados para todas as combinações de ações que possam, isolada ou simultaneamente, produzir efeitos que levem ao colapso da estrutura. Entre os modos de ruptura considerados típicos estão o rompimento por flexão, cisalhamento, torção, instabilidade global, instabilidade local de peças comprimidas, escoamento do aço, esmagamento do concreto, entre outros mecanismos críticos que caracterizam a perda de capacidade resistente.

O dimensionamento no Estado Limite Último é realizado com base em ações majoradas por fatores parciais de segurança e com resistências de cálculo dos materiais, que são obtidas pela divisão das resistências características pelos coeficientes de ponderação dos materiais.

Os esforços solicitantes majorados são comparados às resistências de cálculo, de modo que a condição de segurança no ELU seja atendida quando o valor de cálculo da solicitação (momento, esforço cortante, normal etc.) for menor ou igual que o valor de cálculo da resistência da seção analisada.

A norma classifica os estados limites últimos (ELUs) em dois grupos principais. O primeiro engloba os estados limites de resistência, que incluem o rompimento de seções por flexão, compressão, tração, cisalhamento ou torção, bem como a instabilidade global da estrutura e a instabilidade local de elementos comprimidos delgados. O segundo grupo corresponde aos estados limites associados à formação de mecanismos, abrangendo fenômenos como fadiga, colapso progressivo e rupturas decorrentes de redistribuições excessivas de esforços internos.

A verificação no ELU é a principal condição de segurança estrutural contra a falha. O seu cumprimento garante que a estrutura seja capaz de suportar, com a devida margem de segurança, as ações máximas previstas em projeto, mesmo nas combinações mais desfavoráveis. Além disso, o ELU permite a utilização mais eficiente dos materiais estruturais, sem comprometer a segurança. Essa abordagem, aliada ao Estado Limite de Serviço (ELS), constitui o método de dimensionamento adotado internacionalmente em normas como o Eurocode 2 e o ACI 318.

2.8.2 Desempenho e conforto humano (ELS)

Além da segurança estrutural, edificações altas devem obrigatoriamente atender aos requisitos de desempenho e conforto humano, em especial quanto às vibrações e deslocamentos excessivos que possam afetar a habitabilidade e a percepção de segurança pelos usuários. Esses requisitos são atualmente disciplinados pela ABNT NBR 6118:2023 — Projeto de estruturas de concreto — Requisitos para desempenho e segurança, que estabelece limites para deslocamentos horizontais, acelerações e deformações, com o objetivo de garantir a funcionalidade da edificação e o conforto dos ocupantes frente às ações dinâmicas.

Adicionalmente, a NBR 6118:2023 reforça a necessidade de avaliações específicas de conforto humano relacionadas a deslocamentos excessivos e vibrações induzidas por ações ambientais, como o vento, devendo tais análises ser conduzidas preferencialmente com base em modelos computacionais sofisticados ou, quando aplicável, mediante ensaios em túnel de vento.

2.9 Parâmetros estruturais que influenciam o consumo de materiais

A concepção e o dimensionamento estrutural de edifícios altos envolvem uma série de parâmetros que, isoladamente ou em conjunto, influenciam significativamente o consumo de materiais estruturais. A compreensão técnica desses parâmetros é essencial para a tomada de decisões racionais nas fases iniciais de projeto.

2.9.1 Índice de esbeltez e altura total da edificação

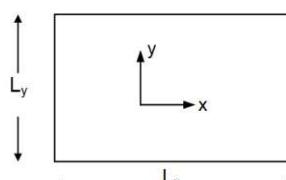
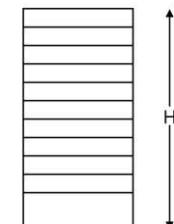
A esbeltez de um edifício, normalmente expressa como a razão entre a altura total e a menor dimensão transversal da planta, é um dos fatores mais relevantes para o desempenho estrutural e para o consumo de materiais. Quanto maior a esbeltez, maior a sensibilidade da estrutura às ações horizontais (como vento), exigindo sistemas de contraventamento mais robustos, seções estruturais aumentadas e maior quantidade de armaduras, especialmente em pilares e núcleos rígidos (ABNT NBR 6118:2023).

O índice de esbeltez, definido como a razão entre a altura total da edificação e a menor dimensão horizontal da base (Quadro 1), é um parâmetro fundamental na avaliação do comportamento estrutural de edifícios altos. A evolução das tecnologias construtivas permitiu o desenvolvimento de estruturas com índices cada vez maiores, atingindo valores típicos de até

9:1 em sistemas atuais de concreto ou mistos, com consequente incremento das exigências quanto à estabilidade global e controle de deslocamentos.

O aumento da esbeltez implica maior sensibilidade às ações horizontais, notadamente o vento, e exige soluções estruturais que combinem rigidez e eficiência. Estruturas perimetrais eram tradicionalmente utilizadas para resistir aos momentos fletores de tombamento; entretanto, a necessidade de maior flexibilidade arquitetônica motivou a adoção de sistemas internos de resistência ao cisalhamento, organizados em torno de núcleos rígidos.

Quadro 1 – Equação para determinar o índice de esbeltez

Equação do Índice de Esbeltez	
$\beta_{x,y} = \frac{H}{l_{x,y}}$	
	
$\beta_{x,y} \leq 4$	Edifício de pequena esbeltez
$4 < \beta_{x,y} \leq 6$	Edifício de média esbeltez
$\beta_{x,y} > 6$	Edifício de alta esbeltez

Fonte: Adaptado de Borges *et al.* (2009).

Em edificações muito esbeltas, o consumo de materiais estruturais tende a crescer exponencialmente, dada a necessidade de conter deslocamentos excessivos e assegurar a estabilidade. Sistemas combinados, como núcleos com ou sem contraventamentos internos associados a *outriggers* (enrijecedores), são amplamente empregados para redistribuir esforços entre núcleo e elementos periféricos, otimizando a resistência global.

A relevância da esbeltez no comportamento estrutural supera, muitas vezes, a própria altura da edificação. Um edifício de 40 pavimentos, porém muito esbelto, pode apresentar desafios mais complexos de estabilidade e controle de deslocamentos do que outro, com o dobro

de pavimentos, mas com base mais robusta. De modo geral, a quantidade de material estrutural por metro quadrado de área útil, seja aço ou concreto, tende a variar com o cubo da relação de esbeltez, especialmente em torres muito delgadas. Edifícios com elevada esbeltez demandam seções mais robustas e armaduras adicionais para controle de deslocamentos laterais e instabilidade global.

Conforme aumenta o índice de esbeltez é possível observar um acréscimo também no consumo de aço por metro quadrado, para proporcionar as mesmas condições de estabilidade e rigidez pra estrutura. O aumento na altura total também gera maior carga gravitacional acumulada, o que exige seções de pilares maiores nos primeiros pavimentos e maior resistência do concreto.

2.9.2 Resistência característica do concreto (fck)

Os avanços na tecnologia e desenvolvimento de materiais mais resistentes foi bastante positivo e tornou possível a execução de concretos de elevada resistência, ultrapassando valores de resistência à compressão muito superiores a 50MPa. Há poucas décadas, os concretos utilizados em estruturas apresentavam, de forma predominante, resistências à compressão variando entre 15 MPa e 20 MPa (Moncayo, 2011). Contudo, para vencer os desafios de uma edificação de grande porte, a engenharia foi se reinventando e os elementos estruturais mais robustos utilizados para suportar as imensas cargas foram, aos poucos, sendo substituídos por peças mais esbeltas.

Os impactos gerados pela mudança de valores de fck (20MPa, 25MPa, 30MPa, 35MPa e 50MPa) no consumo de materiais para uma mesma arquitetura de um edifício de 17 pavimentos, 14.646,84 m² de área construída e 705,88 m² de área de pavimento tipo. Os resultados obtidos ao calcular, para uma mesma arquitetura de um edifício residencial de 17 pavimentos, diferentes resistências características à compressão um impacto direto no consumo de materiais, uma redução de até 8% no consumo global de aço (Bernardo, 2011).

A seleção do fck adequado impacta diretamente no volume de concreto e na quantidade de armaduras necessárias. Valores mais altos de fck permitem a redução das seções dos elementos estruturais, particularmente pilares, o que pode representar economia em área útil ao permitir vencer grandes vãos e reduzir o consumo materiais.

De fato, à medida que a resistência do concreto aumenta, seu módulo de elasticidade também se eleva. Consequentemente, quanto maior o módulo de elasticidade, menor será a deformação do concreto, o que explica as reduções de deformação observadas em concretos

com f_{ck} mais elevado. Entretanto, concretos de alto desempenho possuem custo elevado por metro cúbico e podem demandar cuidados especiais na execução, o que deve ser balanceado com o benefício estrutural obtido.

Segundo dados normativos (NBR 6118:2023, item 8.2), o uso de concreto com $f_{ck} \geq 50$ MPa exige controle tecnológico rigoroso e detalhamento mais cuidadoso das armaduras, o que pode influenciar o consumo de aço. A literatura recomenda seu uso principalmente em pilares de edifícios com mais de 20 pavimentos, onde o ganho estrutural compensa o custo adicional.

2.9.3 Protensão

O engenheiro francês Eugène Freyssinet, ao observar as limitações do concreto quanto à sua baixa resistência à tração, iniciou no início do século XX uma série de experimentações com fios de aço de alta resistência previamente tensionados, com o objetivo de melhorar o desempenho estrutural de elementos de concreto sob solicitações de serviço. Em 1928, Freyssinet patenteou o uso do que hoje é conhecido como concreto protendido, definindo princípios fundamentais como a adoção de elevados níveis de tensão no aço e o controle das perdas por fluência e retração (Billington, 1976).

Os resultados dos seus experimentos permitiram o emprego de concretos com resistência característica da ordem de 35 MPa e aços protensados com resistência à tração de até 1380 MPa, valores bastante avançados para a época. As soluções de Freyssinet estabeleceram as bases para o dimensionamento moderno de estruturas protendidas, sendo por isso reconhecido como o precursor do concreto protendido (Shushkewich, 2012).

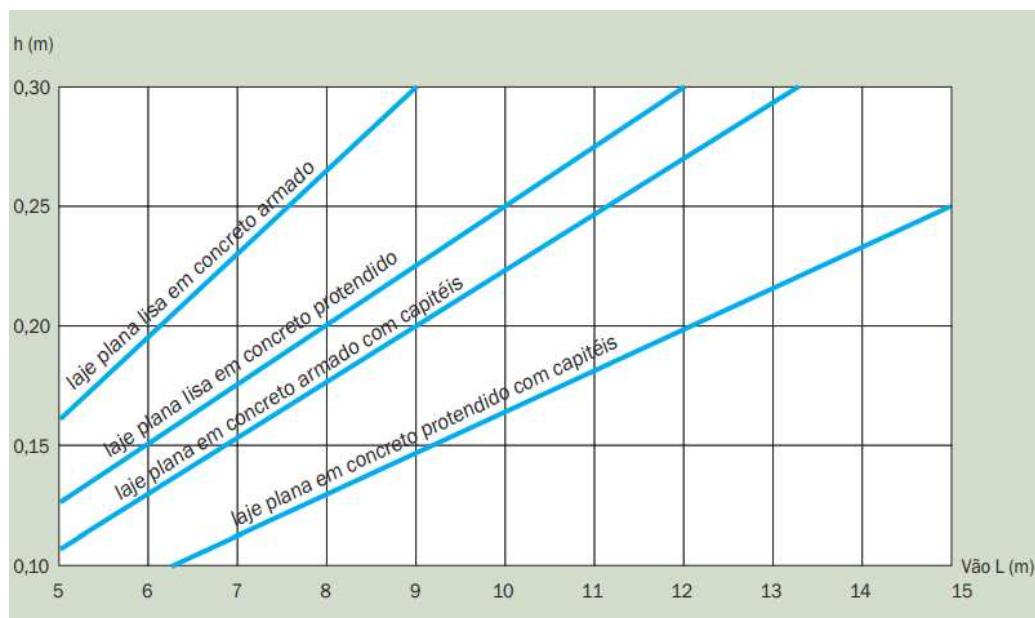
A protensão consiste na aplicação intencional de tensões prévias ao carregamento estrutural, usualmente através do tensionamento de cabos ou cordoalhas antes ou depois da concretagem, de modo a induzir esforços de compressão nas zonas onde se prevê tração em serviço. Esse pré-esforço contrabalança parte dos esforços solicitantes, melhorando o desempenho da estrutura quanto à fissuração, deformações e ao estado limite último.

Em elementos como lajes protendidas, por exemplo, o tensionamento das cordoalhas gera uma distribuição de compressão que melhora significativamente a resposta ao cisalhamento e à flexão, além de permitir a execução de vãos mais extensos com menor espessura e menor quantidade de armaduras passivas. Se analisado em escala microscópica, o tensionamento promove aumento das forças normais de contato entre os grãos da matriz cimentícia e entre a armadura e o concreto, elevando o atrito e, por consequência, a resistência

ao deslizamento relativo. De fato, a protensão é um mecanismo que colabora para o ganho de resistência ao cisalhamento em planos críticos.

A protensão é amplamente utilizada em diversos segmentos da construção civil, com destaque para edifícios residenciais e comerciais de médio e grande porte, pontes, viadutos, estacionamentos e reservatórios, em função de suas vantagens estruturais e construtivas. Estudos como os de Schmid (2009) e Kimura (2007) demonstram que, além de possibilitar redução do consumo de aço de até 12–20%, a técnica minimiza fissuração, melhora a durabilidade e permite sistemas estruturais mais leves e rápidos de executar, com menor consumo de fôrmas e escoramentos. Esse sistema estrutural permite uma economia no aço e concreto ao possibilitar uma redução significativa na espessura da laje em comparação ao concreto armado (Gráfico 1), porém a seu custo ainda é elevado o que muitas vezes o torna uma alternativa inviável.

Gráfico 2 – Comparativo para lajes em concreto armado ou protendido



Fonte: Schmid (2009).

Outro ponto relevante é a possibilidade de atuação "cirúrgica" da protensão em regiões críticas, controlando deformações excessivas, reduzindo momentos fletores e esforços cortantes, ou até mesmo neutralizando-os em determinados trechos. Isso possibilita o uso racional de armaduras passivas, muitas vezes substituídas ou complementadas pela armadura ativa. Contudo, ainda há lacunas na literatura quanto à efetiva viabilidade econômica dessa substituição: embora haja redução da quantidade total de aço, os cabos ou cordoalhas

protendidas possuem custo mais elevado por quilograma, e frequentemente as bitolas das armaduras remanescentes precisam ser aumentadas, compensando parcialmente a economia pretendida.

Portanto, a análise do custo-benefício da protensão deve considerar não apenas a massa de aço consumida, mas também o valor agregado por tipo de aço, os custos com mão de obra especializada, equipamentos e perdas durante a execução, além dos ganhos em desempenho estrutural e construtivo que a técnica oferece.

2.9.4 Tipo de laje empregada

As lajes constituem elementos estruturais de extrema relevância em edificações, tanto pela sua função técnica de suporte às cargas verticais como pelo impacto expressivo que exercem no consumo de materiais. De acordo com Carvalho (2009), os pavimentos de uma edificação, em virtude da sua grande área superficial, correspondem às partes que mais consomem insumos estruturais. De acordo com Pinheiro, Muzardo e Santos (2003), as lajes, isoladamente, representem cerca de 50% do volume total de concreto utilizado em estruturas convencionais de edifícios verticais, razão pela qual sua concepção deve aliar critérios de desempenho, economia e viabilidade construtiva.

O tipo de laje adotado impacta fortemente nos índices de consumo de concreto e fôrmas. Lajes nervuradas geralmente consomem menos concreto e armadura por metro quadrado do que lajes maciças, além de possibilitarem maior espaçamento entre vigas e menor peso próprio. Entretanto, exigem maior coordenação de projeto e planejamento logístico.

A análise tridimensional da estrutura evidencia que o sistema de lajes não é apenas transmissor de cargas verticais, mas componente essencial na rigidez horizontal do edifício. Lajes planas ou protendidas, com menor rigidez em seu plano, exigem maior participação dos elementos verticais no controle do deslocamento global. Adicionalmente, a geometria e posicionamento dos núcleos estruturais influenciam diretamente o comportamento torsional da edificação, agravando ou atenuando os efeitos da ação eólica conforme sua excentricidade.

Comparações realizadas por Lira (2022) e Hollerschmid (2003) indicam que lajes nervuradas reduzem o consumo de concreto em até 25% quando comparadas a lajes maciças, em edificações com mais de 15 pavimentos. Para tornar o processo de cálculo mais prático durante a fase de projeto, é comum representar o sistema estrutural como uma grelha composta por barras dispostas uniformemente. No modelo convencional, essas barras são tratadas como vigas para efeito de dimensionamento. No caso das lajes nervuradas, o espaçamento entre as

nervuras é suficientemente reduzido para que possam ser analisadas como lajes contínuas no dimensionamento.

No entanto, o uso de lajes planas, embora mais onerosas em termos de materiais, é preferido em edifícios de alto padrão devido à flexibilidade arquitetônica e à ausência de vigas. A redução em dimensões nas lajes, mesmo que em pequena magnitude, como um centímetro na espessura, pode resultar em uma economia significativa ao longo da edificação. Segundo Carvalho e Pinheiro (2009), tal percepção é intensificada pela repetição dos pavimentos típicos e pela tendência moderna de adoção de soluções estruturais mais esbeltas, apoiadas em concretos de maior resistência e no aperfeiçoamento dos modelos computacionais de cálculo estrutural, que hoje permitem a consideração da interação entre vigas, lajes e pilares no modelo global da estrutura.

No contexto das tipologias de lajes comumente empregadas em edificações, destacam-se os seguintes sistemas, com suas respectivas médias de consumo de materiais:

- a) Lajes maciças: São placas delgadas amplamente utilizadas em edifícios de pequeno e médio porte, apresentam espessuras típicas que normalmente varia de 8 a 15 cm (Bastos, 2015). Segundo Abreu (2011), esse sistema apresenta maior economia em razão da facilidade de execução e da menor demanda de mão de obra para a montagem das formas, uma vez que as lajes se desenvolvem em um único nível e os tetos permanecem nivelados, sem a presença de vigas aparentes na estrutura.
- b) Lajes nervuradas (moldadas no local ou com formas reutilizáveis): utilizadas especialmente em estruturas com grandes vãos e necessidade de redução de peso próprio. Segundo Lira e Teixeira (2022), o menor volume de concreto utilizado no sistema de lajes nervuradas, reduz o peso transmitido às vigas, pilares e fundações. Essa redução de cargas possibilita a adoção de dimensões menores para todos os elementos estruturais, o que diminui o consumo de materiais e, consequentemente, reduz o custo da estrutura. Além disso, o sistema favorece uma economia significativa de fôrmas, devido à elevada repetitividade de utilização.
- c) Lajes pré-moldadas com EPS ou lajota e treliça metálica: caracterizam-se pela agilidade na execução e pelo baixo consumo de concreto e aço, sendo amplamente utilizadas em edificações residenciais e comerciais padronizadas, especialmente em obras com racionalização de processos;

- d) Lajes protendidas: recomendadas para pavimentos com grandes vãos e menor incidência de pilares, apresentam vantagens em termos de redução de armaduras convencionais e alívio de cargas nas fundações.

Figura 4 - Tipos de lajes



Fonte: Rossi (2017).

Os sistemas construtivos industrializados, a exemplo das lajes alveolares, dos painéis pré-moldados e do *steel deck*, vêm se destacando como alternativas eficientes para obras de maior escala, sobretudo nos setores comercial, logístico e habitacional, onde predominam estratégias de racionalização e padronização construtiva. Tais métodos, caracterizados por um elevado nível tecnológico, promovem expressiva aceleração dos processos executivos, contribuindo para a redução dos prazos e a otimização dos recursos empregados. Contudo, sua adoção implica custos iniciais superiores, em virtude do grau de industrialização envolvido e da necessidade de planejamento detalhado e logísticas específicas.

A escolha do sistema de laje mais adequado deve considerar uma série de fatores inter-relacionados, tais como o número de pavimentos da edificação, as exigências funcionais e formais do projeto arquitetônico, os níveis de carregamento previstos, o regime de execução da obra e a disponibilidade de mão de obra e equipamentos. A compatibilização entre os projetos estrutural, arquitetônico e de instalações prediais é condição indispensável para a adoção de

soluções construtivas integradas, que promovam a racionalização do consumo de materiais, a redução de desperdícios e o cumprimento dos prazos de execução.

A laje, além de sua função primordial de suportar cargas verticais, desempenha um papel essencial na estabilidade estrutural global, ao proporcionar maior rigidez ao sistema e atuar como elemento de ligação horizontal entre os pilares, aspecto particularmente relevante em edificações com múltiplos pavimentos. Por esse motivo, a definição do tipo de laje a ser empregado deve considerar criteriosamente o equilíbrio entre o desempenho estrutural, a viabilidade técnica, os requisitos de segurança e os aspectos econômicos do projeto.

2.9.5 Número de pavimentos e carga acumulada

O número total de pavimentos determina a magnitude das cargas gravitacionais atuantes sobre os elementos inferiores da edificação. À medida que se aumenta o número de andares, observa-se a necessidade de seções transversais maiores para pilares, maior resistência dos materiais e reforço das ligações estruturais. Isso influencia diretamente os consumos unitários por metro quadrado de construção.

Além disso, para edifícios altos, o efeito das ações horizontais (como o vento) se torna preponderante na concepção global, sendo necessário adotar sistemas que garantam rigidez e estabilidade lateral. Isso acarreta acréscimos nos consumos de aço e, em menor escala, de concreto, principalmente em núcleos e paredes de cisalhamento.

2.9.6 Tipologia do sistema estrutural

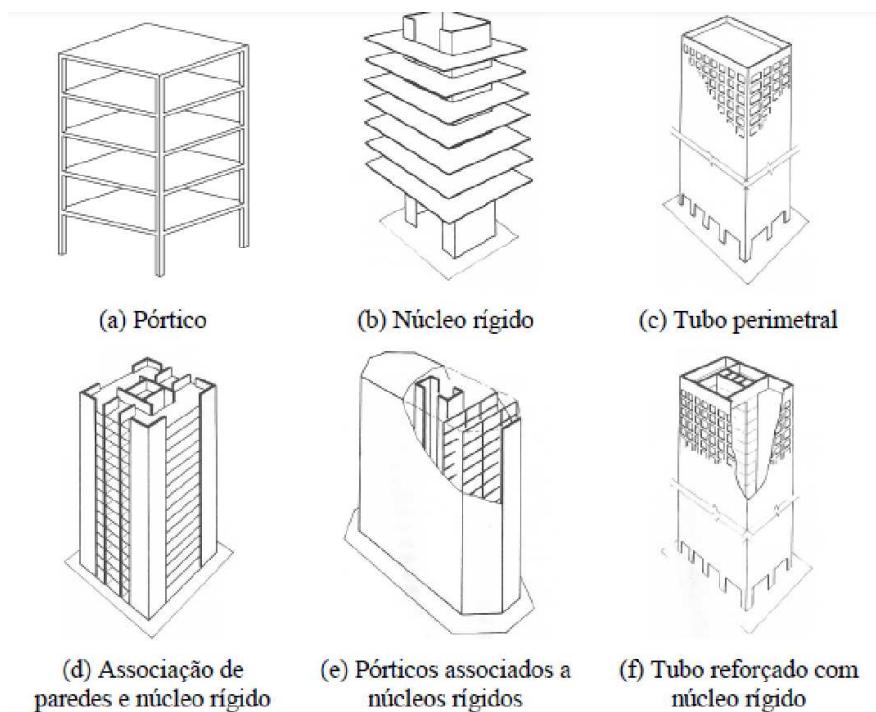
A escolha do sistema estrutural, como pórtico, núcleo rígido, parede de cisalhamento ou sistema dual, influencia diretamente os padrões de distribuição de cargas e os mecanismos de resistência. Sistemas mistos, por exemplo, tendem a distribuir os esforços de forma mais eficiente, reduzindo a necessidade de grandes volumes de concreto ou de seções superdimensionadas.

Conforme a literatura aponta a combinação entre a escolha do tipo de laje que melhor atenda às necessidades da edificação, pilares com f_{ck} elevado e núcleos rígidos bem-posicionados resulta em menor consumo médio de materiais, desde que compatibilizada com os requisitos de funcionalidade, durabilidade e estética.

Sistemas com núcleo rígido (*core*), pórtico rígido, paredes estruturais ou combinação (sistema misto) apresentam diferentes desempenhos frente a cargas verticais e horizontais (Taranath, 2009).

- Fck adotado: Resistências mais elevadas permitem seções menores, com eventual redução de concreto, porém exigem maior controle tecnológico e, por vezes, maior consumo de armadura passiva.
- Processo construtivo: O uso de formas industrializadas e métodos de construção racionalizada impacta diretamente a produtividade e o reaproveitamento de materiais, especialmente fôrmas.

Figura 5 - Tipologias estruturais



Fonte: Smith; Coull (1991) *apud* Silva (2014).

2.10 Abordagem normativa: comparação entre NBR 6118, ACI 318 e Eurocode 2

A análise crítica dos parâmetros de projeto que influenciam o consumo de materiais estruturais em edifícios altos requer, obrigatoriamente, uma abordagem normativa sólida. Normas técnicas têm o papel de estabelecer critérios mínimos de segurança, desempenho e durabilidade das estruturas, além de padronizar práticas de projeto e execução. Neste contexto, as normas são referências fundamentais para a engenharia estrutural brasileira e internacional.

2.10.1 Critérios normativos de dimensionamento e impacto no consumo de materiais

As três normas adotam a filosofia do projeto por estados limites (ELU e ELS), baseando-se em combinações de ações com coeficientes parciais de segurança. Contudo, há diferenças significativas quanto à abordagem no detalhamento de elementos estruturais e nos parâmetros adotados para cálculo de armaduras, cobrimentos, classes de exposição e propriedades dos materiais.

Quadro 2 - Análise comparativa entre as normativas

ANÁLISE	NBR 6118:2023	ACI 318-19	EUROCODE 2 (EM 1992-1-1)
Resistência do concreto	Fck até 90 Mpa	Fck até 100 Mpa	Fck até 105 Mpa
Cobrimento mínimo	Função da classe de agressividade (CA), variando entre 2,0 e 5 cm	Baseado em durabilidade, exposição e diâmetro das barras	Relacionado à classe de exposição (XC, XD, XS etc.) e à durabilidade requerida
Armadura mínima	Percentuais fixos e limites de área mínima	Percentuais com base no tipo de solicitação(flexão, tração etc.)	Valores variáveis segundo rigidez e redistribuição de esforços

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A NBR 6118, diferente da ACI e Eurocode, se baseia em dados empíricos categorizados por influência da agressividade ambiental para a determinação do cobrimento mínimo das peças estruturais, o que pode levar a um aumento nos índices de consumo se não houver otimização criteriosa do projeto. Já o Eurocode favorece detalhamentos mais sofisticados, permitindo reduções de material mediante análises refinadas e controle de fissuração mais rigoroso (Rei, 2015).

2.10.2 Classes de exposição e cobrimento do concreto

O critério de cobrimento é uma das variáveis com maior influência na quantidade de concreto e dimensões de fôrmas. Na NBR 6118, as classes de agressividade ambiental (CA I a IV) definem diretamente os valores de cobrimento, os quais afetam tanto o volume de concreto como a geometria dos elementos (ABNT, 2023, item 7.3.1). Edifícios localizados em regiões costeiras, frequentemente se enquadram nas classes CA III ou CA IV, que exigem cobrimentos de até 5,0 cm, elevando o consumo global.

A definição da classe de agressividade fundamental na concepção do projeto estrutural, devido a sua influência nos valores mínimos tanto de cobrimento de armadura nas peças estruturais quanto na máxima abertura de fissura permitida.

Quadro 3 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a,b}	Pequeno
		Marinha ^a	
III	Forte	Industrial ^{a,b}	Grande
		Industrial ^{a,c}	
IV	Muito forte	Respingos de Maré	Elevado

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: Adaptada da norma ABNT NBR 6118:2014.

No ACI 318, o cobrimento depende da exposição e do tipo de elemento, sendo possível reduções quando adotadas boas práticas de execução ou proteção. Já o Eurocode trabalha com classes de exposição (ex: XC3, XD2, XS1), e permite a redução do cobrimento nominal com

base na vida útil esperada e na qualidade do concreto, introduzindo um conceito mais refinado de durabilidade projetada (EN 1992-1-1, seção 4.4).

As classes de exposição relativas as condições ambientais são divididas nas seguintes categorias principais dentro da Eurocode 2:

1. Sem risco de corrosão ou ataque;
2. Corrosão devido à carbonatação;
3. Corrosão por cloretos;
4. Corrosão causada por cloretos da água do mar;
5. Ataque Congelar/Descongelar;
6. Ataque químico.

Após a definição da classe estrutural aplicável a cada situação específica e considerando a classe de exposição ambiental correspondente, é possível determinar a espessura mínima de cobrimento da armadura consultando a tabela apropriada apresentada no Eurocode 2.

2.10.3 Implicações no consumo e na racionalização

Ao comparar os critérios normativos, observa-se que a ABNT NBR 6118, embora tecnicamente consolidada, apresenta menor flexibilidade na racionalização dos projetos, o que pode dificultar a adoção de soluções de menor consumo de materiais sem comprometer a segurança. Por outro lado, o ACI 318 e o Eurocode 2 permitem maior integração com softwares de modelagem numérica e abordagens baseadas em desempenho, o que favorece a otimização dos projetos, especialmente em edifícios altos, onde pequenos ganhos de eficiência por pavimento se acumulam em economias substanciais.

2.10.4 Panorama do consumo de materiais segundo a literatura técnica

O consumo de materiais estruturais, especialmente concreto, aço e formas, é uma variável crítica na concepção e no dimensionamento de edifícios altos, influenciando diretamente os custos, o prazo de execução, os impactos ambientais e a viabilidade técnica das obras. A literatura técnica recente tem se dedicado à identificação de parâmetros que otimizem o uso desses materiais sem comprometer os requisitos estruturais de segurança e desempenho.

2.10.5 Índices de consumo típicos de materiais

Os índices de consumo, usualmente expressos em unidades por metro quadrado de área construída (kg/m^2 ou m^3/m^2), permitem a avaliação comparativa entre diferentes soluções estruturais. Esses valores variam conforme o número de pavimentos, tipo de sistema de laje (maciça, nervurada, protendida), presença de núcleos rígidos, e características arquitetônicas, como balanços e geometrias complexas. Sistemas mais industrializados, como formas reutilizáveis de alumínio e lajes protendidas, tendem a reduzir o consumo de concreto e forma por otimização geométrica e redução de cargas permanentes (Souza, 2003).

2.10.6 Estudos aplicados e práticas de mercado

Edifícios com lajes lisas protendidas e pilares centrais apresentaram os menores índices de consumo total por metro quadrado, enquanto estruturas com grandes balanços e geometrias arquitetônicas não ortogonais apresentaram os maiores.

Esses dados revelam a necessidade de compilações comparativas e sistematizações que tornem possível a consulta objetiva por parte dos projetistas. Embora alguns manuais de construtoras e empresas de engenharia disponibilizem esses índices, a sua ausência em normas técnicas nacionais dificulta o uso padronizado em fases preliminares de projeto.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada é de natureza qualitativa e documental, com procedimentos de caráter exploratório e analítico. Ademais, assume-se uma vertente comparativa, ao confrontar dados obtidos de edificações altas com aqueles referentes a edificações de altura convencional.

Realizou-se uma revisão da literatura técnica nacional e internacional que teve por objetivo identificar os principais parâmetros que afetam o consumo de materiais em estruturas de concreto armado e compilar dados de referência existentes na literatura.

3.1 Tipo de abordagem da pesquisa

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, por buscar fornecer subsídios teóricos e práticos para a melhoria do processo de concepção estrutural de edifícios altos; qualitativa, ao realizar uma análise crítica e interpretativa de conteúdos técnicos e normativos; documental e bibliográfica, fundamentada em livros, artigos científicos, normas técnicas nacionais e internacionais, manuais de projeto, dissertações e teses; e, simultaneamente, exploratória e analítica, ao identificar, organizar e discutir dados relevantes extraídos da literatura especializada.

3.2 Procedimentos metodológicos

3.2.1 Levantamento bibliográfico e normativo

Foi realizada uma pesquisa nas seguintes bases de dados e fontes técnicas: periódicos, trabalhos acadêmicos, dissertações, teses, manuais de engenharia, normativas e livros da área. A busca foi realizada com termos-chave como: consumo de materiais estruturais, concreto armado, edifícios altos, aço e fôrmas, esbeltez estrutural, normas de projeto, entre outros.

3.2.2 Identificação dos parâmetros estruturais

Com base na literatura, foram identificados os principais parâmetros estruturais que influenciam o consumo de materiais em edifícios altos. Entre os parâmetros considerados estão:

- Número de pavimentos;
- Altura total da edificação;
- Índice de esbeltez (altura base/largura);
- Tipo de sistema estrutural (pórtico, núcleo rígido, parede de cisalhamento, ou sistemas mistos);
- Tipo de laje;
- Resistência característica do concreto (fck);
- Classe de agressividade ambiental (CAA).

3.2.3 Levantamento de indicadores técnicos de consumo

Para cada projeto, foram extraídos os seguintes dados:

- Volume total de concreto consumido (m^3);
- Peso total de armaduras (kg);
- Área total de fôrmas (m^2);
- Área construída (m^2);
- Número de pavimentos;
- Altura total da edificação;
- Tipo de laje;
- Classe de agressividade ambiental (CAA);
- Resistência característica do concreto (fck).

A partir das fontes bibliográficas e normativas, foram extraídos dados secundários representativos para os consumos de concreto (m^3/m^2), de aço (kg/m^2) e fôrmas (m^2/m^2).

Tais indicadores foram organizados segundo a abordagem dos autores, considerando as faixas de altura e características estruturais dos edifícios analisados nas fontes.

3.2.4 Comparação de abordagens normativas

Foi realizada uma análise comparativa entre os projetos quanto aos parâmetros listados, com foco nos seguintes aspectos:

- Relação entre esbeltez global (altura/comprimento) e consumo específico;
- Influência do f_{ck} na otimização de consumo;
- Impacto do tipo de laje no consumo total;
- Efeito do número de pavimentos nos índices;
- Diferenças entre projetos altos e convencionais.

Essa análise comparativa buscou identificar convergências, divergências e possíveis lacunas no tratamento normativo dos parâmetros que afetam o consumo de materiais em estruturas verticais.

Com base no cruzamento dos dados levantados, foi conduzida uma análise crítica de como os diferentes parâmetros estruturais influenciam os consumos relativos de aço, concreto e formas. Essa análise permitiu observar tendências, correlações e implicações para a prática projetual em edifícios altos.

Com base nos resultados obtidos, foram propostas faixas de consumo de materiais estruturais em função de diferentes combinações de parâmetros. Tais faixas foram organizadas em uma tabela síntese, a fim de oferecer suporte técnico para estimativas preliminares e tomada de decisão na fase de concepção de projetos.

Ao final, foram discutidas as limitações metodológicas e bibliográficas da pesquisa, além da indicação de possíveis desdobramentos futuros, como estudos com base em projetos reais ou simulações paramétricas com softwares de análise estrutural.

3.3 Delimitações do estudo

A ênfase foi dada à fase de projeto estrutural, não abrangendo aspectos de execução ou manutenção. A abordagem é exclusivamente documental, com base em dados já publicados e levantamento de dados locais de Fortaleza, capital do estado do Ceará. Adicionalmente, restringe-se ao sistema estrutural em concreto armado e protendido, não considerando sistemas metálicos ou mistos.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise crítica dos dados coletados a partir da literatura técnica e normativa, com ênfase nos parâmetros estruturais que influenciam o consumo de materiais em edifícios altos. Os materiais avaliados compreendem o concreto, o aço e as fôrmas, considerando como principais variáveis os seguintes parâmetros de projeto: resistência característica do concreto (f_{ck}), número de pavimentos, índice de esbeltez, sistema de lajes adotado e a tipologia estrutural.

A organização dos resultados está subdividida conforme as variáveis selecionadas, possibilitando a comparação entre referências nacionais e internacionais e a proposição de faixas referenciais preliminares.

4.1 Influência do f_{ck} no consumo de materiais

A resistência característica do concreto (f_{ck}) é um dos parâmetros estruturais mais relevantes no consumo de materiais. O aumento do f_{ck} permite a adoção de elementos estruturais mais esbeltos, com redução das seções transversais, o que contribui para a diminuição do peso próprio e dos carregamentos transmitidos aos pavimentos inferiores.

Em edificações de grande altura, observa-se a ocorrência de elevadas cargas acumuladas em função do peso próprio da estrutura e da sua grande escala, o que tende a exigir elementos estruturais mais robustos, especialmente os pilares. Contudo, a utilização de concretos com f_{ck} mais elevados possibilita a redução das dimensões desses elementos, mantendo o atendimento aos critérios de resistência, desempenho e segurança estrutural. Essa estratégia resulta não apenas em ganhos de eficiência estrutural, mas também em aumento da área útil comercializável por pavimento, aspecto de elevada relevância econômica em edifícios de alto padrão, nos quais cada metro quadrado representa valores significativos.

4.2 Influência do número de pavimentos e esbeltez

A altura do edifício, expressa pelo número de pavimentos, está diretamente relacionada à demanda por maior rigidez global e resistência a ações horizontais (ex: vento). Edifícios mais altos e esbeltos (razão entre altura total e menor dimensão horizontal) tendem a demandar sistemas estruturais mais robustos, aumentando o consumo de aço e concreto (Oliveira, 1998).

Tabela 1 – Índices de esbeltez das edificações

Edifício	Altura (H)	Menor Dimensão (B)	Eobeltez ($\lambda=H/B$)
Edifício A	72 m	15 m	4,8
Edifício B	80 m	12 m	6,67
Edifício C	95 m	13,8 m	6,88
Edifício D	150 m	15,3 m	9,8
Edifício E	165 m	12,5 m	13,2

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.3 Tipologia estrutural e sistemas de lajes

A tipologia estrutural (pórtico, parede de concreto, núcleo rígido, sistema misto) e o tipo de laje (maciça, nervurada, protendida, pré-moldada) impactam diretamente o consumo de fórmulas, aço e concreto. Estruturas com lajes nervuradas ou protendidas podem reduzir significativamente o volume de concreto e o peso próprio, mas exigem maior precisão executiva e detalhamento (Hollerschmid, 2003).

Carneiro (2018) realizou um estudo sistemático dos indicadores médios de consumo de materiais estruturais em edifícios altos localizados na cidade de Balneário Camboriú, apresentando como resultado uma tabela síntese com valores médios aproximados obtidos a partir da análise de múltiplas edificações. A autora ressalta que a interpretação adequada desses indicadores requer a consideração explícita de que o conjunto de dados analisado abrange edificações com até 45 pavimentos. Destaca-se, ainda, que as estruturas avaliadas apresentam níveis semelhantes de esbeltez e demais características geométricas e tipológicas compatíveis entre si.

Essas condições de homogeneidade entre os casos estudados são essenciais para garantir a coerência estatística do conjunto e minimizar a variabilidade indesejada, assegurando que os indicadores propostos possam ser utilizados com maior confiabilidade como parâmetros de referência em estudos subsequentes relacionados ao consumo de materiais em edifícios de porte equivalente.

Tabela 2 – Índices médios em relação ao número de pavimentos

Número de Pavimentos	[0-25]	[15-45]
Índices de aço (kg/m ²)	15,5 – 24	18,5 - 29
Índices de forma (m ² /m ²)	1,92 - 2,12	1,98 - 2,4
Índices de concreto (m ³ /m ²)	0,21 - 0,275	0,225 - 0,305
Massa de aço/Volume de concreto (kg/m ³)	75 – 91	87 - 98

Fonte: Carneiro (2018).

4.4 Comparação normativa: NBR 6118, ACI 318 e Eurocode 2

As abordagens normativas divergem em critérios de dimensionamento, coeficientes de segurança e limites de deslocamentos, o que afeta diretamente a taxa de armadura mínima e o dimensionamento de seções. O Quadro 4 sintetiza aspectos relevantes.

Quadro 4 – Comparação normativa entre NBR 6118, ACI 318 e Eurocode 2

Critério	NBR 6118:2023	ACI 318-19	Eurocode 2
Cobrimento mínimo	25 – 45 mm	20 – 50 mm	20 – 50 mm
Limites de flechas	L/250 (usual)	L/240 (usual)	L/250
Armadura mínima (flexão)	0,15% a 0,30%	≥ 0,25%	≥ 0,26%
Abordagem de ductilidade	Explícita por classes	Redução de resistência	Classes de ductilidade

Fonte: NBR 6118 (2023), ACI 318-19 (2019), Eurocode 2 (2004).

4.5 Indicadores estruturais de consumo: definições, cálculo e vantagens

A avaliação da eficiência estrutural de edifícios altos pode ser realizada da melhor forma por meio da utilização de indicadores técnicos que quantificam o consumo de materiais estruturais em relação a parâmetros físicos e funcionais da edificação. Esses indicadores, além de permitirem comparações entre diferentes obras, fornecem subsídios para diagnósticos de rationalidade estrutural, dimensionamento eficiente e controle tecnológico.

Diante disso, foram adotados sete indicadores técnicos calculados com base em dados reais de empreendimentos verticais construídos em Fortaleza-CE. A seguir, apresentam-se as

fórmulas utilizadas, as justificativas técnicas de sua adoção e as vantagens associadas à sua aplicação.

4.5.1 Consumo específico de aço por área construída (kg/m²)

Esse indicador representa o consumo médio de aço por metro quadrado construído, sendo amplamente utilizado para comparações de racionalidade estrutural entre edificações de mesma tipologia (Fusco, 1995).

Fórmula:

$$IC_{aço} = \frac{M_{aço}}{A_{constr.}} \quad (1)$$

Onde:

$IC_{aço}$ = indicador específico de consumo de aço por área construída (kg/m²)

$M_{aço}$ = massa total de aço consumido (kg)

$A_{constr.}$ = área total construída da edificação (m²)

Vantagens:

- Permite avaliação comparativa direta entre empreendimentos.
- Auxilia no controle de custos da estrutura.
- Serve como parâmetro de desempenho para projetos futuros.

4.5.2 Consumo específico de concreto por área construída (m³/m²)

Segundo Jablonski (2013), esse índice indica a densidade volumétrica da estrutura e está relacionado à tipologia, esbeltez dos elementos e à complexidade do sistema adotado.

Fórmula:

$$IC_{conc.} = \frac{V_{conc.}}{A_{constr.}} \quad (2)$$

Onde:

$IC_{conc.}$ = indicador específico de consumo de concreto por área construída (m^3/m^2)

$V_{conc.}$ = massa total de aço consumido (m^3)

$A_{constr.}$ = área total construída da edificação (m^2)

Vantagens:

- Diagnóstico de robustez estrutural.
- Correlação com a quantidade de fôrmas e ciclos executivos.
- Base para estimativa de custos com concreto, aditivos e equipamentos.

4.5.3 Consumo de aço normalizado pela altura da edificação ($kg/m^2/m$)

Esse indicador normaliza o consumo de aço por unidade de área e por metro de altura, sendo útil em comparações entre edifícios com diferentes gabaritos verticais (Yamura, 2015).

Fórmula:

$$IC_{aço/alt} = \frac{M_{aço}}{A_{constr.} \times h} \quad (3)$$

Onde:

$IC_{aço/alt}$ = indicador específico de consumo de aço normalizado pela altura da edificação ($kg/m^2/m$)

$M_{aço}$ = massa total de aço consumido (m^3)

$A_{constr.}$ = área total construída da edificação (m^2)

h = altura total da edificação (m)

Vantagens:

- Avaliação da eficiência estrutural vertical.
- Suporte à análise de tipologias mais esbeltas.
- Diagnóstico de irracionais em projetos altos.

4.5.4 Consumo de aço por área útil total (kg/m²/pavimento)

Esse índice considera o consumo de aço distribuído por área funcional da edificação, sendo uma métrica diretamente ligada ao desempenho construtivo por pavimento (Jablonski, 2013).

Fórmula:

$$IC_{aço/pav} = \frac{M_{aço}}{A_{pav} \times N_{pav}} \quad (4)$$

Onde:

$IC_{aço/pav}$ = indicador específico de consumo de aço por área útil total (kg/m²/pavimento)

$M_{aço}$ = massa total de aço consumido (m³)

A_{pav} = área total construída da edificação (m²)

N_{pav} = número de pavimentos

Vantagens:

- Excelente para obras com modulação repetitiva.
- Auxilia em diagnósticos por segmento (residencial, comercial).
- Correlação direta com etapas de execução por pavimento.

4.5.5 Consumo de concreto por área útil total (m³/m²/pavimento)

Permite avaliar a densidade volumétrica da estrutura considerando a área útil efetiva por pavimento, importante especialmente em estudos de produtividade e planejamento executivo.

Fórmula:

$$IC_{conc/pav} = \frac{V_{conc}}{A_{pav} \times N_{pav}} \quad (5)$$

Onde:

$IC_{conc/pav}$ = indicador específico de consumo de concreto por área útil total (m³/m²/pavimento)

V_{conc} = volume total de concreto consumido (m³)

A_{pav} = área total construída da edificação (m²)

N_{pav} = número de pavimentos

Vantagens:

- Análise de soluções construtivas piso a piso.
- Diagnóstico de padrões de concretagem e rendimento.
- Apoio à definição de sistemas de fôrmas e prazos.

4.6 Proposição de faixas referenciais

A partir de dados apresentados em Almeida (2019) *apud* Santos (2019), é possível coletar informações de consumo referentes a um estudo de caso de uma edificação convencional onde se é calculado indicadores de consumo de uma edificação residencial convencional de 7 pavimentos e 3035 m² de área construída. O autor propõe um comparativo de consumo de materiais com dois sistemas estruturais diferentes, concreto armado convencional e concreto protendido. Os resultados levantados estão apresentados no Quadro 5 e Quadro 6, onde propõe-se uma síntese preliminar de valores referenciais de consumo para edificações altas no contexto brasileiro.

Quadro 5 – Taxa de consumo para estrutura em concreto armado convencional

Item	Elemento	Taxa	Unidade	Observações
Concreto	Geral	1.553,76	m ³	Varia conforme esbeltez e cobrimento
Aço	Laje	45,00	kg/m ³	Variação conforme esbeltez e sistema de laje
	Viga	73,00	kg/m ³	Depende da altura e travamento
	Pilar	109,00	kg/m ³	Varia conforme a altura e esbeltez
Formas	Geral	1,50	m ² /m ²	Influenciada pela racionalização (reutilização)

Fonte: Adaptado de Almeida (2019) *apud* Santos (2019).

Quadro 6 – Taxa de consumo para estrutura em concreto protendido

Item	Elemento	Taxa	Unidade	Observações
Concreto	Geral	455,25	m^3	Varia conforme esbeltez e cobrimento
Aço	Laje	37,00	kg/m^3	Variação conforme esbeltez e sistema de laje
	Viga	63,00	kg/m^3	Depende da altura e travamento
	Pilar	120,00	kg/m^3	Varia conforme a altura e esbeltez
Formas	Geral	1,50	m^2/m^2	Influenciada pela racionalização (reutilização)
Cordoalha	Geral	29,00	kg/m^3	Varia conforme esbeltez e sistema de laje

Fonte: Adaptado de Almeida (2019) *apud* Santos (2019).

Essas faixas funcionam como referências para avaliar projetos, comparar sistemas estruturais e apoiar decisões técnicas e de viabilidade, contribuindo para escolhas mais assertivas e econômicas ainda na fase de projeto.

4.7 Resultados e discussão crítica

Os resultados aqui apresentados são embasados em publicações técnicas reconhecidas. No entanto, destaca-se a limitação na disponibilidade de dados organizados por tipologia e adaptados ao contexto urbano específico de Fortaleza. Muitas informações relevantes estão restritas a memórias de cálculo privadas e relatórios não publicados, o que dificulta a consolidação de parâmetros nacionais amplamente validados (Albuquerque; Pinheiro, 2002).

Além disso, a ausência de uma base de dados nacional sobre consumo estrutural dificulta a verificação estatística dos dados. Estudos futuros devem considerar a coleta de dados empíricos em empreendimentos executados e integrar critérios de sustentabilidade como custo energético e emissões de carbono. Contudo, este trabalho também conta com dados gentilmente disponibilizados por uma empresa atuante no setor da construção civil em Fortaleza-CE, sob o compromisso de confidencialidade quanto à identificação dos empreendimentos. A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros físicos e estruturais coletados, que serviram de base para o cálculo dos indicadores técnicos analisados e presentes na Tabela 4.

Tabela 3 – Dados técnicos de empreendimentos reais em Fortaleza-CE

EDIFÍCIOS	Área construída (m ²)	Volume de concreto (m ³)	Consumo de aço (kg)	Nº de pavimentos	Área por pavimento (m ²)	Altura (m)	Área do terreno (m ²)
Edifício A	14.009,93	3.483,83	380.319,95	23	540	72	1.813,80
Edifício B	11.313,42	2.943,57	375.877,73	24	254	80	2.002,00
Edifício C	15.993,44	4.872,55	520.798,75	31	330	95	2.000,00
Edifício D	23.791,29	8.828,19	803.464,61	44	362	150	1.443,28
Edifício E	30.099,78	10.821,29	1.091.246,68	51	400	165	3.600,00

Fonte: Elaborado pelo Autor.

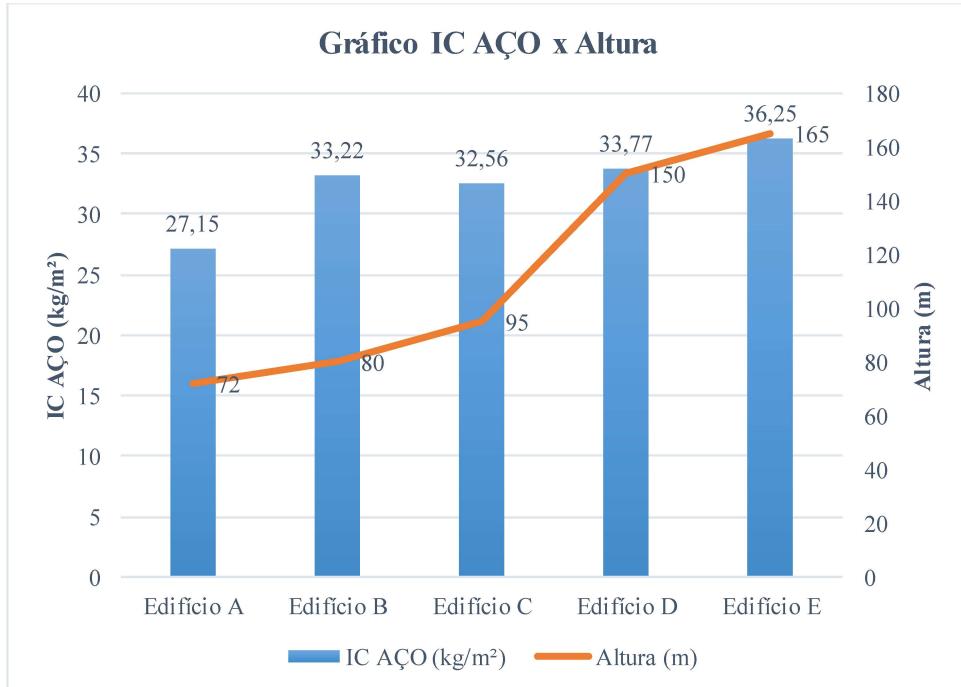
Tabela 4 – Indicadores de consumo estrutural

EDIFÍCIOS	INDICADORES DE CONSUMO ESTRUTURAL					
	IC AÇO (kg/m ²)	IC CONCRETO (m ³ /m ²)	IC AÇO ALTURA (kg/m ² /m)	IC CONCRETO ALTURA (m ³ /m ² /m)	IC AÇO PAVIMENTO (kg/m ² /pav)	IC CONCRETO PAVIMENTO (m ³ /m ² /pav)
Edifício A	27,15	0,25	0,38	0,0035	30,62	0,28
Edifício B	33,22	0,26	0,42	0,0032	61,66	0,48
Edifício C	32,56	0,3	0,34	0,0031	50,91	0,48
Edifício D	33,77	0,37	0,23	0,0025	50,44	0,55
Edifício E	36,25	0,36	0,22	0,0022	53,49	0,53

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Essa abordagem permite visualizar de forma clara como o aumento da altura influencia diretamente as demandas estruturais, evidenciando tendências distintas no consumo dos materiais à medida que as edificações se tornam mais altas. Observa-se que, com o incremento da altura, o consumo de aço por metro quadrado tende à estabilização, enquanto o consumo de concreto por metro quadrado apresenta crescimento. Esse comportamento está associado à adoção de soluções estruturais mais eficientes para os pavimentos, como as lajes lisas protendidas, que permitem grandes vãos com menor taxa de armadura passiva, contribuindo para a estabilização do consumo de aço. Em contrapartida, o aumento das ações horizontais decorrentes da maior altura exige sistemas de contraventamento mais robustos, com núcleos rígidos, pilares e elementos verticais de maiores dimensões, o que resulta em acréscimo do volume de concreto.

A análise gráfica constitui, portanto, uma etapa fundamental para compreender a correlação entre porte estrutural e utilização de materiais, contribuindo para a avaliação da eficiência dos sistemas adotados e para a identificação de padrões relevantes no comportamento estrutural dos empreendimentos estudados, conforme observado nos Gráficos 3 e 4.

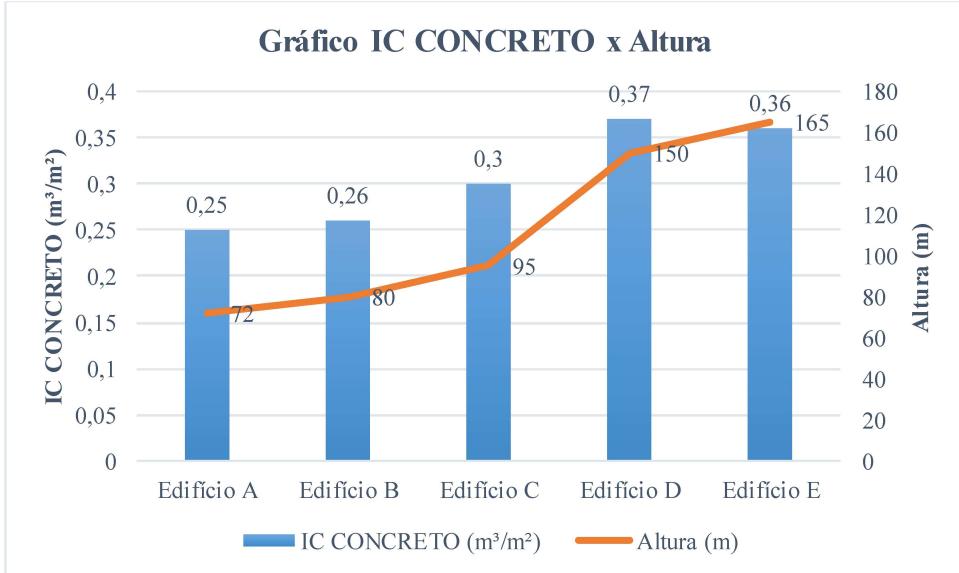
Gráfico 3 – IC AÇO (kg/m²) x Altura (m)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O Gráfico 3 mostra que, embora exista uma tendência de aumento do consumo específico de aço com o crescimento da altura das edificações, essa relação não é linear. O Edifício E, o mais alto da amostra (165 m), apresenta o maior indicador de consumo (36,25 kg/m²), o que é consistente com as maiores exigências de rigidez e controle de deslocamentos em estruturas altas. No entanto, edifícios com alturas semelhantes, como E e D, apresentam consumos distintos, evidenciando que a altura, isoladamente, não explica completamente o comportamento estrutural.

Nos edifícios de altura intermediária, como B e C, observa-se que o consumo de aço pode variar em função da eficiência do sistema estrutural, da configuração arquitetônica e das soluções adotadas para distribuição de cargas. Já o Edifício A, o mais baixo (72 m), apresenta o menor IC AÇO (27,15 kg/m²), valor condizente com menores solicitações provenientes das ações verticais e horizontais.

De modo geral, os resultados indicam que o consumo de aço é influenciado por múltiplos fatores, tais como índice de esbeltez, sistema de contraventamento, tipo de laje e rigidez global do edifício. Assim, a altura exerce papel relevante, mas atua em conjunto com outras variáveis estruturais que condicionam o desempenho e a eficiência do projeto.

Gráfico 4 – IC CONCRETO(m^3/m^2) x Altura

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O Gráfico 4 evidencia que, embora exista uma relação geral entre o aumento da altura das edificações e o acréscimo do consumo específico de concreto, essa relação também não é linear. Observa-se que o Edifício E, o mais alto (165 m), apresenta um dos maiores indicadores de consumo ($0,36 m^3/m^2$), valor compatível com as maiores demandas de rigidez, maior número de elementos estruturais robustos e necessidade de controle dos deslocamentos horizontais em edifícios altos.

O Edifício D, com altura próxima (150 m), apresenta consumo ligeiramente superior ($0,37 m^3/m^2$), sugerindo que além da altura, fatores como configuração dos núcleos estruturais, sistema de contraventamento, espessuras de lajes e dimensões dos pilares podem ter influenciado esse aumento. Já os edifícios de altura intermediária, como B (80 m; $0,26 m^3/m^2$) e C (95 m; $0,30 m^3/m^2$), apresentam consumos coerentes com menores solicitações globais. Esse comportamento pode estar associado, entre outros fatores, à adoção de sistemas estruturais menos exigidos pelas ações horizontais, como o uso de lajes nervuradas, que contribuem para maior rigidez global da estrutura. Em contraste, isso pode se justificar devido a uma possível adoção de lajes lisas, que tende a reduzir a rigidez do pavimento, demandando maior participação dos sistemas de contraventamento vertical, como núcleos rígidos e pilares de maiores dimensões, o que pode resultar em aumento do consumo de concreto.

O Edifício A, o mais baixo (72 m), apresenta o menor IC CONCRETO ($0,25 m^3/m^2$), comportamento esperado devido à menor demanda de rigidez global e ao uso de elementos estruturais de dimensões mais reduzidas. Em síntese, os resultados indicam que o consumo de

concreto depende da altura, mas também é fortemente condicionado por variáveis como esbeltez, sistema de lajes, forma estrutural e estratégia de contraventamento. Dessa forma, a altura se revela um fator importante, porém interdependente de outras características estruturais que influenciam o desempenho e a eficiência do projeto.

Os dados utilizados neste estudo foram classificados conforme o tipo e a origem das fontes, variando em seu nível de confiabilidade. Fontes normativas oficiais foram consideradas de alta confiabilidade, sendo priorizadas na proposição de parâmetros comparativos. Publicações técnicas, livros especializados e literatura acadêmica reconhecida também sustentam os dados, com ponderações quanto à sua aplicabilidade prática. Informações obtidas em trabalhos acadêmicos, relatórios técnicos e literatura cinzenta foram utilizadas de forma complementar e sempre indicadas como tal.

Os indicadores de consumo de formas não foram considerados nesta análise. Historicamente, o consumo de formas constituía uma variável relevante em estudos sobre o emprego de materiais estruturais em edificações de grande porte, uma vez que envolvia o uso de materiais com impacto direto no custo da obra e com menor durabilidade, como a madeira, além de gerar efeitos ambientais significativos. Entretanto, com o avanço das tecnologias e dos métodos construtivos, as formas de madeira vêm sendo gradualmente substituídas por sistemas metálicos e plásticos, que apresentam maior vida útil e podem ser reutilizados em diversos empreendimentos. Dessa forma, as formas passam a ter seu custo diluído ao longo de vários projetos, o que reduz sua relevância como parâmetro de consumo específico por edifício (Souza, 2003).

4.8 Limitações do estudo

O estudo não utilizou modelos computacionais nem simulações estruturais, baseando-se em dados empíricos limitados à literatura e normas disponíveis. Entre as limitações destacam-se a restrição geográfica em Fortaleza-CE e o caráter preliminar das faixas referenciais apresentadas, que devem ser utilizadas com cautela, sem substituir o dimensionamento técnico específico de cada projeto.

5 CONCLUSÃO

A partir da revisão da literatura técnica e normativa, foi possível identificar os principais parâmetros estruturais que influenciam o consumo de materiais em edifícios altos, destacando-se o índice de esbeltez, o número de pavimentos, o tipo e a espessura das lajes, a resistência característica do concreto (f_{ck}), a altura entre pavimentos e o sistema estrutural adotado. Esses fatores exercem influência direta no dimensionamento dos elementos estruturais e, consequentemente, nos indicadores de consumo de aço, concreto e fôrmas.

A análise dos dados evidenciou que o consumo de materiais por metro quadrado tende a aumentar com a altura da edificação, principalmente em função das maiores exigências relacionadas à estabilidade global, ao controle de deslocamentos e à resistência às ações horizontais. Observou-se também que o consumo de fôrmas está fortemente associado ao tipo de sistema de laje e ao método construtivo, sendo que soluções mais racionalizadas, como lajes nervuradas ou protendidas, apresentam melhor desempenho quanto à otimização desse insumo.

A comparação entre diferentes normas técnicas demonstrou convergência nos critérios de segurança e desempenho estrutural, ainda que com abordagens distintas quanto à ductilidade, redistribuição de esforços e tratamento de elementos esbeltos. Nesse contexto, parâmetros de estabilidade global, como os coeficientes α e γ_z , mostraram-se decisivos na definição das seções estruturais e no comportamento global das edificações altas, influenciando diretamente o consumo final de materiais.

Os resultados obtidos devem ser interpretados como referências preliminares, uma vez que se baseiam em dados secundários extraídos da literatura disponível. As faixas referenciais de consumo propostas não substituem o dimensionamento estrutural específico, mas podem servir como subsídio técnico para análises comparativas e estudos de viabilidade nas fases iniciais de concepção estrutural, contribuindo para decisões mais assertivas e economicamente eficientes.

5.1 Contribuições da pesquisa

Como resultado, foi elaborada uma tabela-síntese de faixas referenciais de consumo com base nos dados coletados de estudos de caso, podendo ser utilizada como base preliminar por projetistas e tomadores de decisão em fases iniciais de concepção estrutural.

Além disso, este trabalho contribui para a sistematização de informações dispersas em normas, artigos e manuais, facilitando o acesso a dados comparativos de consumo; para a

valorização da etapa de concepção estrutural como instrumento fundamental na racionalização do uso de materiais; e para o estreitamento da relação entre teoria normativa e prática projetual, evidenciando a importância de decisões tecnicamente embasadas já na fase de estudos preliminares.

5.2 Perspectivas para pesquisas futuras

Como desdobramento deste estudo, recomenda-se a ampliação da base de dados, incorporando levantamentos de consumo provenientes de obras executadas e diferentes tipologias estruturais, de modo a fortalecer a representatividade estatística das análises. A utilização de ferramentas BIM e métodos de análise paramétrica também se apresenta como uma alternativa promissora para avaliar, de forma mais precisa, o impacto das decisões de projeto no consumo de materiais, bem como a extensão das investigações para sistemas estruturais metálicos e mistos.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575:2021 – **Edificações Habitacionais** – Desempenho. Rio de Janeiro, 2021.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2023 – **Projeto de Estruturas de Concreto** – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123:2022 – **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 2022.
- ABREU, Vera Lúcia Moreira de; **Estudo de deformabilidade de Alvenarias de fachada executadas no bordo de zonas em Consola de Lajes Maciças**. 2011. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação Especialização em Construções civis, Universidade do Porto (FEUP), Porto, 2011.
- ALBUQUERQUE, Augusto Teixeira de; PINHEIRO L. M. **Análise de alternativas estruturais para edifícios**. In: 40º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Rio de Janeiro, 1998.
- ALBUQUERQUE, Augusto Teixeira de (1998). **Análise de alternativas estruturais para edifícios em concreto armado**. São Carlos, 1998. 97p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ALENCAR, M.; LIMA, C.; RUI MENDONÇA. **Um contributo do design para a questão dos desperdícios gerados pelo setor da Construção Civil**. Convergências, v. 16, n. 32, p. 15–23, 30 nov. 2023.
- ALVES, G. M. B. E. **Gestão da construção de edifícios altos**. 2024. 84 p. Monografia (Especialidade em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios) Universidade de São Paulo.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete**. Farmington Hills, MI, 2019.
- ASSUMPÇÃO, M.; BARROS, L.; BERROCAL, J.; FRANÇA, G. **Earthquakes in Brazil: A review**. *Annals of Geophysics*, v. 57, n. 3, 2014.
- BANGASH, M. Y. H. **Structural Engineering for Tall Buildings: Theory and Practice**. Springer, 2011.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Lajes de concreto**. Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2015.
- BERNARDO, J. N. D. **Análise da influência da resistência característica à compressão do concreto (fck) no dimensionamento estrutural de um edifício residencial em concreto armado**. UNESC, 2011.
- BILLINGTON, D. P. **Historical perspective on prestressed concrete**. PCI Journal, v. 21, n. 5, p. 66–85, Sept./Oct. 1976.

BORGES, A. C. L., *et al.* **Análise do comportamento estrutural de um edifício esbelto de 42 pavimentos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51., 2009, Recife. Anais. Recife: IBRACON, 2009.

BOTELHO, M. H.C.; MARCHETTI, O. **Concreto Armado Eu te Amo, volume II**, 2004.

CARVALHO, R. C.; PINHEIRO, L. M. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado.** São Paulo: PINI. 2009. Acesso em: 25 nov. 2025.

CARNEIRO, Amanda Cunico. **Indicadores de projeto para estruturas em concreto armado do município de Balneário Camboriú - SC.** 2018. 85 pág. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2018.

CHEN, Wai-Fah; DUAN, Lian. **Bridge Engineering Handbook: Fundamentals.** 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

COELHO, E.L; SOUZA, R.M; GRECO. **Estudo Comparativo entre Sistemas Estruturais com Lajes Maciças, Nervuradas e Lajes Lisas.** In: SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL, 9., 2010, São João Del Rei. Anais... São João Del Rei: Universidade

CTBUH – Council on Tall Buildings and Urban Habitat. **Tall Buildings: Structural Systems Overview.** Chicago, 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-1: Eurocode 2 – Design of Concrete Structures.** Brussels, 2004.

FABRIZZI, M.A. **Contribuição para o projeto e dimensionamento de edifícios de múltiplos andares com elementos estruturais mistos aço-concreto.** 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Federal de São João Del Rei, 2010. 10 p.

FREITAS, A. P. de; PIRES, M. M. **Projeto de edifícios altos: reflexões e considerações para o projeto estrutural.** CONCRETO e Construções, n. 99, p. 39-47, 2020.

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto.** Editora PINI. São Paulo, 1995.

GIONGO, J. S. **Concreto Armado: Projeto Estrutural de Edifícios.** USP. São Paulo. 2007.

GUERZONI, R. G. **Análise do efeito da ação do vento no projeto de edifícios altos de concreto para diferentes sistemas estruturais.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

HALLEBRAND, E; JAKOBSSON, W. **Structural design of high-rise buildings.** 2016. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Division of Structural Mechanics, Lund University, Lund, Sweden, 2016.

HOLLERSCHMID, M. **Utilização de fôrmas na construção de edifícios.** 2003, 49f. TCC, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo.

KIMURA, A. E. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculo de edifícios com o uso de sistemas computacionais.** 1. ed. São Paulo: Pini, 2007. 624 p. ISBN 8572661824

LACERDA, M. M. S. et al. **Avaliação dos critérios para análise da estabilidade global em edifícios de concreto armado: estudo de caso.** Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 9, n. 2, p. 1–11, 2014.

LANTELME, E. M. V. **Proposta de um sistema de Indicadores de Qualidade e produtividade para a construção civil.** 1994. 123 f. Dissertação (mestrado em engenharia civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande Sul, (UFRGS), Porto Alegre, RS, 1994.

LAURITZEN, E. K. (2020). **an Overview of Development and Challenges of Recycling of Concrete.** International Journal of Advance Engineering and Research Development, 1(09). <https://doi.org/10.21090/ijaerd.010922>

LEITE, R.C.V. **Fortaleza, Terra do Vento: a influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido.** 2010. 296 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LIRA, V. A. S.; TEIXEIRA, R. H. G. **Análise comparativa entre lajes maciças e nervuradas: estudo de caso no estacionamento do TCE-MA.** Concreto & Construções, Ed. 106, abr. – Jun, 2022. Doi: 10.4322/1809-7197.2022.106.0007

MANUEL, B. P. **O POSICIONAMENTO DA ENGENHARIA CIVIL FACE AOS DESAFIOS ATUAIS: SUSTENTABILIDADE, INOVAÇÃO E RESPONSABILIDADE SOCIAL.** Revista de Geopolítica, [S. l.], v. 16, n. 4, p. e705, 2025. DOI: [10.56238/revgeov16n4-058](https://doi.org/10.56238/revgeov16n4-058). Disponível em: <https://mail.revistageo.com.br/revista/article/view/705>. Acesso em: 4 dez. 2025.

MONCAYO, W. J. Z. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado.** Dissertação de M. Sc., Universidade de São Paulo, 2011. São Carlos, SP, Brasil.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete.** 5^a ed. London: Pearson Education, 2015.

NÓBREGA, P. G. B.; NÓBREGA, S. H. S. **Perigo sísmico no brasil e a responsabilidade da engenharia de estruturas.** HOLOS, v. 4, p. 162–175, 9 set. 2016.

OLIVEIRA, J. C. A. **Estimativa do índice global de esbeltez de edifícios de concreto armado.** 1998. 149 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, UNB.

PEREIRA, R. D. G. **Edifícios Altos–Problemas associados e análise estrutural de um caso prático.** 2011. Dissertação de Mestrado. Instituto Politecnico do Porto (Portugal).

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D.; SANTOS, S. P. **Lajes maciças.** São Paulo: Departamento de Engenharia de Estruturas – Universidade de São Paulo, 2003. 29 f.

PREFEITURA DE FORTALEZA. *Lei de Uso e Ocupação do Solo de Fortaleza (LUOS)*, Lei Complementar nº 002, de 2009.

PREFEITURA DE FORTALEZA. *Plano Diretor Participativo de Fortaleza*. Lei Complementar nº 236, de 20 de dezembro de 2017.

REI, M. A. C. **Definição de indicadores para estimar custos de projeto e análise paramétrica dos eurocódigos estruturais**. Escola de engenharia – Universidade do Minho, 2015.

ROSSI, F. **Alguns Tipos de Lajes, Passo a Passo!** (F. Rossi, Ed.)*Pedreirão*, 2017. Disponível em: <<https://pedreirao.com.br/alguns-tipos-de-lajes-passo-a-passo/>>. Acesso em: 2 dez. 2025

SANTOS, I. S.; SANTANA, N. R. F.; CRUZ, Sandro Iury Valverde Lima da. **Abordagens de engenharia civil no espaço sergipano**. Livro eletrônico. 154p. Belo Horizonte: Poisson, 2019

SANTOS, T. P. **Comportamento do sistema estrutural em edifícios altos de concreto armado considerando a influência das modelagens do núcleo rígido**. Dissertação de mestrado em engenharia civil. UFAL. Maceió, 2018.

SCHMID, M. T. **Lajes planas protendidas**. 3 ed. Rudloff Industrial Ltda, 2009.

SERVIÇO NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O CIMENTO – SNIC. **Indicadores de consumo de concreto em edificações residenciais**. Brasília: SNIC, 2020.

SHUSHKEWICH, K. W. **Eugène Freyssinet—Invention of Prestressed Concrete and Precast Segmental Construction**. *Structural Engineering International*, v. 22, n. 3, p. 415–420, ago. 2012.

SILVA, Andréia Rodrigues da; **Análise comparativa de custos de sistemas estruturais para pavimentos de concreto armado**. 235f. Dissertação (mestrado em engenharia de estruturas). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais, (UFMG), Belo Horizonte, 2002.

SILVA, C. **Determinação de índices de consumo para diferentes sistemas estruturais em concreto armado para edifícios residenciais na Região de Criciúma**. Criciúma, 2011. 43 p. Monografia (Pós-graduação) - Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC.

SIMIU, E. **Design of buildings for wind: A guide for ASCE 7-10 standard users and designers of special structures**. John Wiley & Sons, 2011.

SMITH, B. S.; COULL, A. **Tall building structures: analysis and design**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

SOUZA, E. **Índices médios para consumo para a elaboração de projetos em concreto armado**. Londrina, 2003. 36p. Monografia (Disciplina TCC) – Universidade Estadual de Londrina – UEL.

SPOHR, V. H. **Análise comparativa: sistemas estruturais convencionais e estruturas de lajes nervuradas.** 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

TARANATH, B. S. **Reinforced concrete design of tall buildings.** CRC Press, 2009.
TQS INFORMÁTICA LTDA. Site institucional da empresa TQS. Disponível em: <https://www.tqs.com.br>. Acesso em: 25 ago. 2025.

TUBINO, R. **Sistema de Indicadores de Projeto.** Goiânia, 2004. 22p. Programa de melhoria da comunidade da construção – Projeto.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **2020 Global Status Report for Buildings and Construction.** Paris, 2020.

URATANI, J. M.; GRIFFITHS, S. **A forward looking perspective on the cement and concrete industry: Implications of growth and development in the Global South.** Energy Research & Social Science, v. 97, p. 102972, mar. 2023.

WIT, M. de, Verstraeten-Jochemsen, J., Hoogzaad, J. & Kubbinga, B. (eds), **The Circularity Gap Report: Closing the Circularity Gap in a 9% World, Platform for Accelerating the Circular Economy (PACE):** The Hague, 2019

XAVIER, I. *et al.* **Orçamento, planejamento e custos de obras.** São Paulo: Fupam, 2008.