



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**



**Implicações do Aumento da Resistência do Concreto no  
Cálculo da Dosagem nas Estruturas de Concreto Armado:  
Estudo de Caso com Dados de 10 Anos de uma Concreteira**

**Elber Jorge Amorim Souza  
Marcelo Vasconcelos de Oliveira**

**Belém - PA  
Setembro/2024**

**Elber Jorge Amorim Souza  
Marcelo Vasconcelos de Oliveira**

**Implicações do Aumento da Resistência do Concreto no  
Cálculo da Dosagem nas Estruturas de Concreto Armado:  
Estudo de Caso com Dados de 10 Anos de uma Concreteira**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado a Faculdade de Engenharia Civil  
do Instituto de Tecnologia da Universidade  
Federal do Pará, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil

Orientadora: Nívea Gabriela B. de  
Albuquerque

**Belém - PA  
Setembro/2024**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Elber Jorge Amorim Souza**  
**Marcelo Vasconcelos de Oliveira**

**Implicações do Aumento da Resistência do Concreto no  
Cálculo da Dosagem nas Estruturas de Concreto Armado:  
Estudo de Caso com Dados de 10 Anos de uma Concreteira**

Belém, 23 / 10 / 2024

Examinadores

*Nívea Gabriela B. de Albuquerque*

Professora Dra. Nívea Gabriela B. de Albuquerque  
Universidade Federal do Pará | UFPA  
Orientador(a)

*Luciana de Nazare Pinheiro Cordeiro.*

Professora Dra. Luciana De Nazare Pinheiro Cordeiro  
Universidade Federal do Pará | UFPA  
Membro da banca

*Rifermayer Monteiro Teixeira*

Professor Dr. Rifermayer Monteiro Teixeira  
Universidade Federal do Pará | UFPA  
Membro da banca

## **(DEDICATÓRIA)**

Dedicamos este trabalho às nossas famílias, aos nossos amigos, aos professores e à instituição de ensino que nos acompanharam e apoiaram ao longo desta caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

A conclusão deste trabalho é fruto do esforço e apoio de muitas pessoas, às quais somos profundamente gratos.

Em especial, queremos expressar nossa sincera gratidão a nosso professor orientador, Professora Dr(a). Nívea Gabriela B. de Albuquerque. Sua paciência, dedicação e orientação foram fundamentais para a realização deste projeto. Agradecemos por cada conselho, por acreditar em nosso potencial e por nos guiar com sabedoria em todas as etapas deste trabalho. Seu comprometimento e incentivo foram indispensáveis para que superássemos os desafios ao longo desta jornada.

Aos nossos familiares, agradecemos por todo o amor, compreensão e apoio incondicional. Vocês foram nosso porto seguro, nos motivando em cada momento difícil e celebrando cada pequena conquista ao nosso lado.

Aos amigos, que nos acompanharam nessa caminhada, agradecemos a amizade, pelas palavras de incentivo e pelos momentos de descontração que tornaram essa jornada mais leve.

Agradecemos também à nossa instituição de ensino e aos professores, que nos proporcionaram um ambiente de aprendizado e crescimento, contribuindo para nossa formação acadêmica e profissional.

Por fim, nosso muito obrigado a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

SOUZA, E. J. A; OLIVEIRA, M. V. **Implicações do Aumento da Resistência do Concreto no Cálculo da Dosagem nas Estruturas de Concreto Armado: Estudo de Caso com Dados de 10 Anos de uma Concreteira** . 2024. 74 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém.

Este trabalho investiga as implicações do aumento da resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ) no processo no cálculo da dosagem ( $f_{cj}$ ), simulando a variação desse valor em modelos computacionais baseado em uma estrutura real, tendo como base os dados coletados ao longo de 10 anos das resistências a compressão dos corpos de prova de concreto com 28 dias de idade, produzido por uma central produtora de concreto. Fazendo uma breve análise dos dados coletados observou-se que, para cada classe de resistência, as resistências médias obtidas nos ensaios são compatíveis com os valores do  $f_{ck}$  e em alguns casos superiores, porém estas são, em sua maioria, maiores que as resistência solicitada no dimensionamento estrutural em concreto armado. Esta discrepância entre a resistência real e a resistência projetada tem implicações significativas no dimensionamento dos elementos estruturais, que por sua vez impacta no consumo de materiais, que pode em alguns casos ocasionar um sobreconsumo de materiais como aço e cimento, considerados como vilões nos custos desse método construtivo. O estudo analisa o impacto dessa variação na resistência do concreto em uma estrutura real, destacando os riscos associados à superestimação da resistência no cálculo de dosagem. Além disso, são explorados os potenciais impactos financeiros dessa disparidade, considerando os custos adicionais. Os resultados destacam os impactos ocasionados por elementos mais rígidos que o solicitado. Além disso, enfatiza-se a necessidade de uma abordagem proativa para mitigar os riscos associados à variação na resistência do concreto, incluindo uma avaliação rigorosa da qualidade dos materiais, monitoramento contínuo durante a construção e adoção de práticas de controle de qualidade robustas.

*Palavras-chave: concreto usinado; resistência à compressão; estrutura; modelagem computacional; dimensionamento estrutural.*

## ABSTRACT

SOUZA, E. J. A; OLIVEIRA, M. V. **Implications of Increased Concrete Strength on Mix Design Calculation in Reinforced Concrete Structures: Case Study with 10 Years of Data from a Concrete Plant. 2024.** 74 p. Graduation Thesis (Civil Engineering) – Faculty of Civil Engineering, Federal University of Pará, Belém.

This work investigates the implications of increased concrete strength ( $f_{ck}$ ) on the mix design calculation process ( $f_{cj}$ ), simulating the variation of this value in computational models based on a real structure. The analysis is based on data collected over 10 years of compression strength tests of 28-day-old concrete specimens produced by a concrete batching plant. It was observed that, for each strength class, the average strengths obtained from the tests are compatible with the  $f_{cj}$  values and, in some cases, even exceed them; however, these strengths are significantly greater than the strength required for structural design in reinforced concrete. This discrepancy between actual strength and designed strength has significant implications for the dimensioning of structural elements, which in turn impacts material consumption, potentially leading to overconsumption of materials such as steel and cement, which are considered cost drivers in this construction method. The study analyzes the impact of this variation in concrete strength on a real structure, highlighting the risks associated with overestimating strength in mix design calculations. Additionally, the potential financial impacts of this disparity are explored, considering the additional costs. The results underscore the impacts caused by elements that are stiffer than necessary. Furthermore, there is an emphasis on the need for a proactive approach to mitigate the risks associated with variations in concrete strength, including rigorous material quality assessments, continuous monitoring during construction, and the adoption of robust quality control practices.

**keywords:** ready-mix concrete; compressive strength; structure; computational modeling; structural design.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Concreto Fresco: Aspectos Visuais e Propriedades .....	19
Figura 2: Determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade .....	22
Figura 3: Histograma de rompimento de corpos de prova de concreto .....	23
Figura 4: Moldagem de corpos-de-prova de concreto .....	25
Figura 5: Cura dos corpos-de-prova de concreto .....	25
Figura 6: Ensaio de resistência à compressão simples em corpos-de-prova de concreto .....	26
Figura 7: Compressão simples em pilares .....	26
Figura 8: Flexão composta normal (a) e Flexão composta oblíqua (b) em pilares .....	27
Figura 9: Deformação nos pilares .....	28
Figura 10: Medidas de dispersão em estatística .....	31
Figura 11: Histogramas ajustados: (a) unimodal simétrico; (b) bimodal; (c) desvio positivo; (d) desvio negativo .....	33
Figura 12: Representação parcial dos dados brutos .....	37
Figura 13: Representação parcial dos dados tratados .....	38
Figura 14: Entrada de dados para cálculo dos esforços devido ao vento .....	40
Figura 15: Volumetria da Estrutura do Edifício .....	42
Figura 16: Planta Baixa Pavimento Térreo .....	42
Figura 17: Layout do 1º Pavimento .....	43
Figura 18: Layout do Pavimento-Tipo .....	43
Figura 19: Planta de Forma do Pavimento Térreo .....	44
Figura 20: Planta de Forma do Pavimento Tipo .....	44
Figura 21: Gráfico de dispersão de dados de rompimentos de 2022 .....	46
Figura 22: Métrica de avaliação do teste de Shapiro-Wilk .....	47
Figura 23: Histograma de rompimentos de concretos classe C30 de 2022 .....	48
Figura 24: Histograma de rompimentos de concretos classe C30 .....	48
Figura 25: Métrica avaliativa de $\rho$ de Spearman .....	49
Figura 26: Gráfico de comparativo do consumo de aço em pilares .....	50
Figura 27: Comparativo de Área de Seção Transversal e Área de aço dos pilares .....	53
Figura 28: Gráfico de Comparativo de As dos pilares $As > \text{Mínimo}$ .....	54
Figura 29: Gráfico de Deslocamento Horizontal dos Pilares (Imperfeições Globais) .....	56
Figura 30: Deslocamento Horizontal dos Pilares (Não linearidade geométrica) .....	58
Figura 31: Momento de Segunda Ordem dos Pilares (Não linearidade geométrica) .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa) .....	18
Tabela 2: Requisitos físicos e mecânicos .....	18
Tabela 3: Classes de Resistência e Características de Concretos Estruturais .....	20
Tabela 4: Tabela de Propriedades Mecânicas dos Aços em Tração .....	21
Tabela 5: Desvio padrão para cálculo de dosagem (concreto com desvio-padrão desconhecido).....	24
Tabela 6: Combinações de cargas para ELS e ELU .....	40
Tabela 7: Seções de Pilares do Pavimento Tipo .....	41
Tabela 8: Elementos estruturais de concreto por pavimento .....	44
Tabela 9: Média Geral de Resistência a Compressão e Resistência de Dosagem .....	46
Tabela 10: Teste de Normalidade .....	47
Tabela 11: Coeficientes de correlação de Spearman .....	49
Tabela 12: Comparativo pilares dimensionados com concreto de resistência de 30 e 37 MPa .....	52
Tabela 13: Deslocamento Horizontal dos Pilares - Imperfeições Globais.....	56
Tabela 14: Deslocamento Horizontal dos Pilares - Não linearidade Geométrica .....	57
Tabela 15: Dosagem dos concretos de 30 MPa e 37 MPa .....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ACI – American Concrete Institute

a/c – Relação água/cimento

BIM – Building Information Modeling (Modelagem da Informação da Construção)

CA – Concreto Armado

CG – Centro de gravidade

CP – Carga permanente

Elu – Esforço Limite Último

Els – Esforço Limite Serviço

$f_{ck}$  – Resistência característica à compressão do concreto (MPa)

$f_{cd}$  – Resistência de cálculo à compressão do concreto (MPa)

$f_{cj}$  – Resistência à compressão do concreto na idade "j" (MPa)

NBR – Norma Brasileira

NLG – Não linearidade geométrica

Nd – Força normal

PP – Peso próprio

Q – Carga acidental

S<sub>d</sub> – Desvio padrão

V – Carga de vento

et al. – e outros

# SUMÁRIO

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 PROBLEMÁTICA .....	13
1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 HIPÓTESE.....	14
1.4 OBJETIVOS .....	15
1.4.1 Objetivo Geral.....	15
1.4.2 Objetivos Específicos.....	15
1.5 LIMITAÇÕES .....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1 CONCRETO ARMADO .....	16
2.2 CIMENTO PORTLAND .....	17
2.3 CONCRETO .....	19
2.4 AÇO .....	21
2.5 DOSAGEM DO CONCRETO.....	21
2.5.1 MÉTODO DE DOSAGEM ABCP/ACI .....	22
2.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO .....	24
2.7 DIMENSIONAMENTO DE PILARES.....	26
2.7.1 Compressão Simples.....	26
2.7.2 Flexão composta .....	27
2.7.3 Não-linearidade Geométrica .....	27
2.7.4 Determinação dos efeitos locais de segunda ordem.....	28
2.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICOS.....	30
2.8.1 População, amostras e processos .....	30
2.8.2 Medidas de Tendência Central.....	31
2.8.3 Medidas de Dispersão .....	31
2.8.4 Boxplot .....	32
2.8.5 Método IQR .....	32
2.8.6 Histograma.....	33
2.8.7 Teste de normalidade (Shapiro-Wilk).....	33
2.8.8 Matriz de Correlação de Sperman.....	34
3. METODOLOGIA .....	36
3.1 COLETA E ORGANIZAÇÃO DE DADOS .....	37
3.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO:.....	38
3.3 MODELAGEM E SIMULAÇÕES .....	38
3.3.1 Propriedades dos Materiais .....	39
3.3.1.1 Concreto com Resistência de Projeto .....	39
3.3.1.2 Concreto com Resistência Estimada ( $f_{ck}=f_{ck,est}$ ).....	39
3.3.2 Combinações de carregamento e Cargas.....	39

3.3.3	Seções dos elementos estruturais .....	41
3.3.4	Caracterização da edificação.....	41
3.3.5	Dosagem do Concreto:.....	45
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	45
4.1	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS .....	46
4.2	DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....	50
4.3	QUANTITATIVO DE MATERIAL.....	50
4.4	DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DE AÇO (AS) DOS PILARES .....	51
4.5	DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS .....	55
4.6	DOSAGEM DO CONCRETO.....	60
5.	CONCLUSÕES.....	60
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	62

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMÁTICA

O concreto é um componente essencial na construção civil, composto por cimento, água e agregados como pedra e areia, podendo conter aditivos adicionais. Utilizado para execução das mais diversas estruturas ao redor do mundo, desde estruturas mais simples como edifícios térreos até grandes usinas hidrelétricas. Além disto, o concreto é o segundo material mais consumido no mundo, atrás apenas da água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Logo nota-se a importância de compreender e estudar cada variação deste material tão amplamente difundido ou longo da história e do globo terrestre.

Esses elementos são misturados em diferentes proporções, formando uma mistura conhecida como dosagem, que pode ser moldada em várias formas e tem diversas aplicações. A preparação do concreto pode ser feita manualmente no local da obra ou em betoneiras, sendo chamada de concreto "in loco", ou pode ser produzida em centrais dosadoras, conhecidas como usinas de concreto. Nesse caso, o concreto é denominado concreto usinado ou pré-misturado, cada um com suas vantagens e desvantagens. (COUTO et al., 2013)

Uma característica muito relevante do concreto para a construção civil é a resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ) é um parâmetro crítico no projeto e construção de estruturas, pois impacta diretamente em sua segurança e durabilidade. Variações na resistência do concreto, seja devido à qualidade do material, procedimentos de mistura ou outros fatores, podem ter implicações significativas no desempenho de estruturas (seja a favor ou contra a segurança).

Nos métodos de dosagem do concreto é usual a geração de resistências superiores à resistência solicitada, visando ter uma margem de segurança devido as incertezas relacionadas a não homogeneidade nas propriedades físicas e químicas dos materiais, pequenas alterações nos métodos de produção, etc. Com a evolução do controle de qualidade na produção, deve se analisar os valores dos ponderadores de resistência nos métodos de dosagem com maior vigor, com valores compatíveis sem prejudicar a segurança das edificações. Já

nos métodos de dimensionamentos dos elementos estruturais de CA, utilizamos não o valor do  $f_{ck}$ , mas o valor do  $f_{cd}$ , no qual é minorado por um coeficiente de segurança  $\gamma_c=1.4$  que também leva em consideração uma série de incertezas. Para ilustrarmos a situação imaginaremos um concreto de 30Mpa, onde sua resistência na dosagem deve atingir 36,6 Mpa com 28 dias, já o valor do  $f_{cd}$  é 21,3 MPa, ou seja, uma diferença de 15,3 MPa entre os dois valores. Tendo em mente que a resistência do concreto é minorada para o dimensionamento de elementos estruturais de concreto armado, e também possui sua resistência majorada no cálculo de dosagem, surgiu a necessidade de verificar as implicações destes coeficientes em uma estrutura real de concreto armado.

## 1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Por questões ambientais, a indústria da construção civil tem feito grandes esforços para gerir os resíduos oriundos do canteiro de obras a fim de reduzir desperdícios, embora não seja incomum, por exemplo, que clientes de concreteira encomendem além das suas necessidades para compensar possíveis faltas. De fato, se para o leigo é justificável imprecisões convenientes, o engenheiro deve evitar a todo custo diferenças exacerbadas, buscando otimizar suas soluções e ainda sim assegurar a segurança da estrutura. Assim, possíveis conflitos sobre a qualidade e quantidade do concreto podem ser evitados. Além de garantir que o concreto seja dosado de forma a satisfazer os critérios de projeto, alcançando os valores mínimos de resistência característica, este por sua vez, não é o ideal que ultrapassá-lo demais, para que não haja um consumo desnecessário de material, tanto para a concreteira, quanto para a construtora.

## 1.3 HIPÓTESE

Partindo destes pressupostos, notou-se a importância de investigar o impacto da variação de resistência do concreto (em específico, o concreto usinado) em uma estrutura real, simulando a extrapolação da resistência de projeto e suas consequências.

Para o resultado do presente estudo, espera-se que ao tratar os dados coletados de rompimentos de corpos de prova possa-se estabelecer um valor de resistência característica aproximado ao “real” ( $f_{ck,est}$ ), influenciada pelos ponderadores de resistência no cálculo da dosagem, para cada classe de resistência e em seguida utilizá-lo para substituir o valor de resistência característica de projeto do concreto em um projeto real. Em hipótese, caso o valor da resistência encontrado seja superior ao valor utilizado nas , espera-se obter uma diminuição na área de aço utilizado em elementos estruturais que trabalham majoritariamente a compressão, como os pilares, além disso espera-se redução dos deslocamentos horizontais da edificação, que estão diretamente ligados aos efeitos de 2ª ordem. Todavia, deduz-se que concretos mais resistentes demandem de mais consumo de cimento, insumo mais caro além de uma quantidade de aço menor.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo analisar possíveis majorações de resistências característica do concreto usinado no cálculo de dosagem, a partir dos dados coletados ao longo de 10 anos de ensaios de rompimentos de corpos de prova de concreto utilizados nas edificações com moldagem “in loco” fornecidos por uma central de concreto.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos tem-se:

- Analisar as variações de resistência à compressão dos concretos usinados nos últimos 10 anos por meio de uma análise estatística.
- Analisar as implicações no dimensionamento de elementos estruturais ocasionadas pela variabilidade de resistências do concreto usinado.
- Analisar as implicações financeiras variabilidade da resistência característica do concreto para a concreteira, construtora e consumidor final.

## 1.5 LIMITAÇÕES

Para este estudo foi utilizado resistências de corpos de prova seguindo as recomendações de moldagem e cura, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), o que pode gerar diferenças das resistências encontradas caso fosse utilizado os métodos de extração dos testemunhos das edificações reais, o que poderia nos possibilitar uma redução do  $\gamma_c$ , conforme o item 12.4.1 da NBR 6118 (ABNT, 2024).

O método de dosagem do concreto escolhido para a análise foi o da ABCP, com uma dosagem única para representar cada classes de resistência, já que não se tornaria inviável o tratamento de cada traço durante o período da amostragem, além de que esta informação não foi cedida.

Os parâmetros para o cálculo das forças causadas pelo vento são estabelecidos pela NBR 6123 (ABNT, 2023), levando em consideração fatores como a velocidade básica do vento, a topografia, o tipo de terreno, a altura da edificação e os coeficientes aerodinâmicos. Esses parâmetros variam conforme as características específicas de cada edificação, o que pode resultar em variações significativas nos valores obtidos durante a análise estrutural.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para coerência deste trabalho, serão introduzidas as ideias mais gerais e diretas a respeito do concreto e ensaio de resistência, para enfim serem introduzidos os materiais e metodologias.

### 2.1 CONCRETO ARMADO

O concreto, como as pedras naturais, apresenta alta resistência à compressão, o que faz dele um excelente material para ser empregado em elementos estruturais primariamente submetidos à compressão, como por exemplo os pilares, mas, por outro lado, suas características de fragilidade e baixa resistência à tração restringem seu uso isolado em elementos submetidos totalmente ou parcialmente à tração, como tirantes, vigas, lajes e outros elementos fletidos (NILSON, et al., 2010).

Para contornar essas limitações, o aço é empregado em conjunto com o concreto, e convenientemente posicionado na peça de modo a resistir às tensões de tração. O aço também trabalha muito bem na resistência às tensões de compressão, e nos pilares auxilia o concreto. Um conjunto de barras de aço forma a armadura, que envolvida pelo concreto origina o Concreto Armado, um excelente material para ser aplicado na estrutura de uma obra (BASTOS, 2023).

## 2.2 CIMENTO PORTLAND

O cimento portland é de fundamental importância para fabricação de concretos e argamassas, o mesmo é responsável por diversas características do concreto, entre elas estão a função de aglutinação entre os agregados, conferir resistência mecânica e entre outros. (NEVILLE, 1997).

A norma que rege a composição, classes de resistência, propriedades físicas e químicas, requisitos de desempenho e controle de qualidade do cimento no Brasil é a NBR 16697 (ABNT, 2018). A Tabela 1 e Tabela 2 definem os limites de composições em porcentagem de massa para cada classe de cimento e requisitos físicos e mecânicos, respectivamente:

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E			51 – 94	6 - 34	0	0 - 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z			71 – 94	0	6 - 14	0 - 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75 – 89	0	0	11 - 25
Cimento Portland de alto forno	CP III			25 – 65	35 - 75	0	0 - 10
Cimento Portland pozolânico	CP IV			45 – 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V a	ARI		90 – 100	0	0	0 - 10

Designação normalizada		Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40		75 – 100	-	-	0 - 25
	Não estrutural		-	-	50 – 74	-	-	26 - 50

a No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Tabela 1: Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

Tabela 2: Requisitos físicos e mecânicos

Sigla a	Classe	Finura	Tempo de início de pega min	Expansibilidade a quente mm	Resistência à compressão MPa				Índice de brancura
		Resíduo na peneira 75 µm %			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP I CP I-S CP II-E CP II-F CP II-Z	25	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 10,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP III CP IV	25	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
	40	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	-
CP V	ARI	≤ 6,0	≥ 60	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	-
CPB Estrutural	25	≤ 12 b	≥ 60	≤ 5		≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 78
	32	≤ 12 b	≥ 60	≤ 5		≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 12 b	≥ 60	≤ 5		≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CPB Não estrutural	-	≤ 12,0b	≥ 60	≤ 5	-	≥ 5,0	≥ 7,0	≥ 10,0	≥ 82

a Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.  
b Resíduo na peneira 45 µm.

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

## 2.3 CONCRETO

O concreto é uma composição que consiste em cimento, agregados graúdos e miúdos, além de água, podendo ser modificado com aditivos para aprimorar suas características. A qualidade e as propriedades do concreto endurecido são determinadas pela seleção desses materiais, suas proporções e os procedimentos de preparação utilizados. Diversas propriedades do concreto, como porosidade, impermeabilidade, elasticidade e contração térmica, são consideradas no projeto estrutural. No entanto, a resistência à compressão tornou-se um parâmetro fundamental devido à sua facilidade de medição e à capacidade de inferir outras propriedades do concreto (CABRAL; SILVA, 2019).

Figura 1: Concreto Fresco: Aspectos Visuais e Propriedades



Fonte: (Autores, 2024)

A NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica a resistência do concreto com base em sua capacidade de suportar compressão, medida pela resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) em um ensaio mecânico realizado após 28 dias de cura. Ela estabelece classes de resistência para o concreto estrutural, divididas em dois grupos: o grupo I, compreendendo classes de C20 a C50, e o grupo II, que abrange classes de C55 a C100, também conhecido como concreto de alta resistência. A resistência mínima à compressão exigida em projetos é determinada pela norma NBR 6118 (ABNT, 2023), variando de acordo com a classe de agressividade ambiental da estrutura. As classes de resistência dos concretos estruturais foram descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Classes de Resistência e Características de Concretos Estruturais

<b>CLASSE DE RESISTÊNCIA A GRUPO I</b>	<b>RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO (MPa)</b>	<b>CLASSE DE RESISTÊNCIA A GRUPO II</b>	<b>RESISTÊNCIA CARACTERÍSTICA À COMPRESSÃO (MPa)</b>
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: NBR 8953:2015

O controle tecnológico do concreto é fundamental para garantir que as resistências especificadas sejam alcançadas, ao mesmo tempo em que se promove um consumo eficiente dos insumos. Nesse contexto, diversas estratégias foram desenvolvidas para otimizar a produção de concreto, englobando práticas que visam não apenas a qualidade do material, mas também a sustentabilidade do processo produtivo. Segundo O'Brien e McNulty (2012), a implementação de um controle rigoroso nas etapas de produção é essencial para evitar desperdícios e garantir a conformidade com as normas técnicas, ressaltando que "um controle tecnológico bem estruturado não apenas assegura a qualidade do concreto, mas também maximiza a eficiência no uso dos insumos" (O'BRIEN E MCNULTY, 2012). Além disso, conforme destacado por Lothenbach et al. (2011), um controle tecnológico efetivo contribui para a durabilidade e o desempenho do concreto ao longo do tempo. Assim, o conjunto de ações que compõe o controle tecnológico se mostra imprescindível para a produção de concreto de alta qualidade e eficiente em termos de recursos.

Segundo Mendes (2021), o controle tecnológico do concreto corresponde ao controle de suas propriedades, por meio de ensaios, bem como o controle das propriedades de seus materiais componentes (cimento, agregados, água e aditivos) conforme os procedimentos orientados pela NBR 12655 (ABNT, 2015). Através do controle tecnológico procura-se maior segurança no resultado do concreto, além de ser possível verificar a adequação das dosagens, controle de preparo, transporte, lançamento, adensamento, acabamento e cura.

## 2.4 AÇO

O aço é um material metálico produzido em usinas siderúrgicas, constituído de ferro com adição de até 2 % de carbono. A adição de outros materiais, como manganês, níquel, enxofre, silício et al., proporciona a obtenção de características específicas diferentes em função do tipo de aplicação. Os aços para Concreto Armado são fabricados com teores de carbono entre 0,4 e 0,6 % (MORAIS E REGO, 2005).

De acordo com a NBR 7480 (ABNT, 2024) os vergalhões devem atender as características mostradas na Tabela 4, onde  $f_{yk}$  é a resistência ao escoamento,  $f_{stk}$  é a resistência à tração,  $\epsilon_{uk}$  é a deformação na ruptura e  $\phi$  é o diâmetro da barra ou fio.

Tabela 4:Tabela de Propriedades Mecânicas dos Aços em Tração

<b>Categoria</b>	<b><math>f_{stk}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{yk}</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon_{uk}</math> em 10 <math>\phi</math> (%)</b>
CA-25	250	1,20 $f_y$	18
CA-50	500	1,10 $f_y$	8
CA-60	600	1,05 $f_y$	5

Fonte: NBR 7480 (ABNT,2024)

## 2.5 DOSAGEM DO CONCRETO

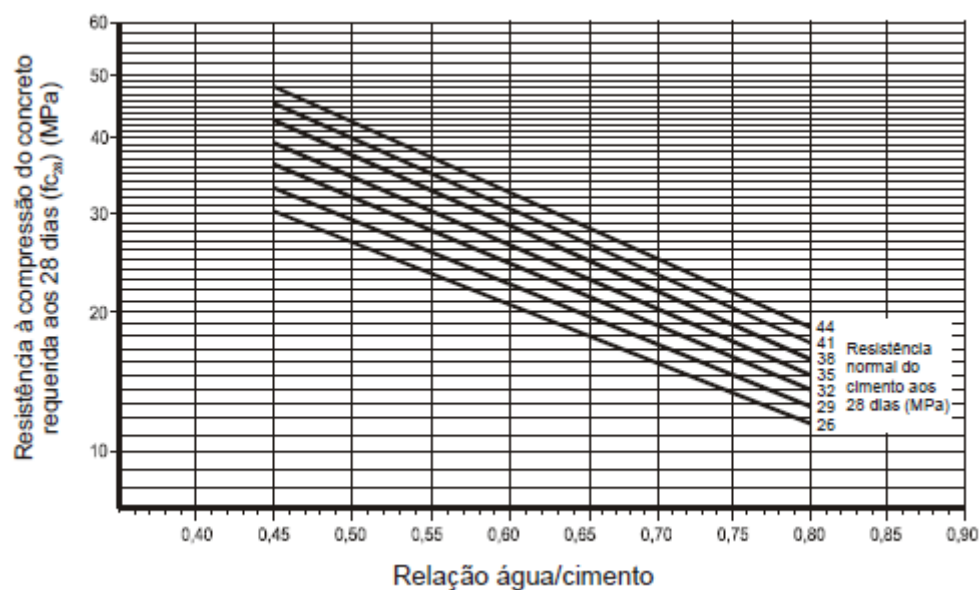
Segundo Helene e Terzian (1992) a dosagem do concreto pode então ser entendida como sendo o proporcionalmente adequado dos materiais constituintes – cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e aditivos, visando atender as exigências de projetos, condições de exposição e operação, tipo de agregado disponível, técnica de execução e o por fim, o custo, buscando atender as demandas de projeto com o mínimo de consumo de cimento, uma vez que, em geral o cimento tem custo várias vezes superior aos demais insumos. Os autores destacam que tem se deixado de lado esse último critério, no qual encontram-se engenheiros que se orgulham em produzir ou empregar em suas obras concretos com características, e custo, muito acima do solicitado.

## 2.5.1 MÉTODO DE DOSAGEM ABCP/ACI

A Associação Brasileira de Cimento Portland publicou o método ABCP como um Estudo Técnico chamado "Parâmetros de Dosagem do Concreto" texto da Norma ACI 211 (1985)

O método de dosagem da ABCP/ACI considera a trabalhabilidade por meio de uma variedade de fatores, incluindo materiais, condições de operação e adensamento e dimensões das peças. Um conceito fundamental abordado pelo método é a associação de um volume máximo de agregado compactado seco por metro cúbico de concreto para cada granulometria da areia e tamanho de agregado graúdo. Este método de dosagem também é projetado para concretos de consistência plástica e produz traços com baixos teores de areia com o objetivo de obter misturas mais baratas (BOGGIO, 2000). O método consta com auxílio de ábacos para a definição das variáveis, como vemos na Figura 2:

Figura 2: Determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade

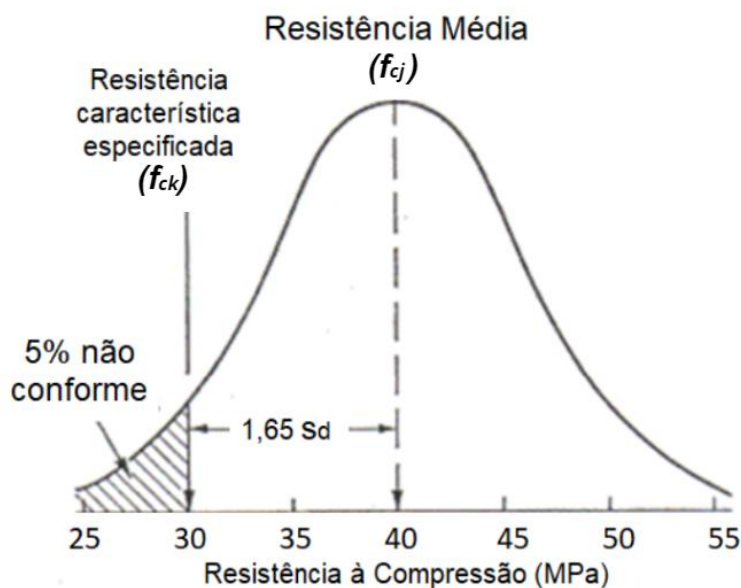


Fonte: BUCHER, 1989

Os valores dos eixos das ordenadas da Figura 2, referem se a resistência à compressão do concreto requerida aos 28 dias, ou seja, o  $f_{cj}$ . A resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ) aos 28 dias de idade é um parâmetro fundamental para o controle em projetos estruturais. Se o concreto fosse preparado com base diretamente no  $f_{ck}$ , devido à distribuição probabilística,

50% dos resultados estariam abaixo do valor especificado e 50% acima, o que seria inaceitável, considerando a relevância desse parâmetro para a segurança estrutural. Assim, adotou-se o critério de dosar o concreto de forma que apenas 5% dos valores de resistência alcançados fiquem abaixo do  $f_{ck}$ , conforme ilustra o gráfico de distribuição representativo de distribuição de resistência a compressão característica do concreto (SILVA FILHO; HELENE, 2011).

Figura 3: Histograma de rompimento de corpos de prova de concreto



Fonte: RAFAEL GEHRKE, 2018 (adaptado)

Os valores do  $f_{cj}$  é calculado conforme recomendações da NBR 12655 (ABNT, 2015), expresso pela equação 1:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \cdot S_d \quad (1)$$

Onde,  $S_d$  é o desvio padrão e está relacionado ao controle produtivo do concreto. O desvio padrão pode ser calculado com obtenção de no mínimo 20 dados de rompimentos consecutivos obtidos no intervalo de 30 dias, além disto, as condições de preparo do concreto devem ser semelhantes para todo o conjunto de dados, materiais, equipamentos e condições. Em nenhum caso o valor de  $S_d$  deve ser inferior que 2 MPa. Se por alguma circunstância o desvio padrão for desconhecido, adotar os valores da Tabela 5 disponibilizada na norma.

Tabela 5: Desvio padrão para cálculo de dosagem (concreto com desvio-padrão desconhecido)

$S_d$	Descrição
4,0 MPa	Produção do <b>concreto em massa</b> com controle rigoroso da umidade dos agregados e com equipe bem treinada
5,5 MPa	Produção do <b>concreto em volume</b> , com controle rigoroso da umidade dos agregados e com equipe bem treinada
7,0 MPa	Produção do <b>concreto em volume</b> , não houver controle da umidade dos agregados e com equipe nova em fase de adaptação

Fonte: BUCHER, 1989

## 2.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO

O ensaio de compressão do concreto é executado seguindo rigorosamente os procedimentos estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 2018), que padroniza o método de ensaio para corpos de prova cilíndricos. De acordo com a norma, o processo envolve a preparação de corpos de prova cilíndricos moldados em laboratório ou extraídos de estruturas, com dimensões padrão de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Esses corpos de prova devem ser mantidos em condições controladas de temperatura e umidade até o momento do teste, geralmente aos 28 dias de idade.

O ensaio é realizado em uma máquina de compressão que aplica carga axial crescente até o rompimento do corpo de prova. O equipamento precisa ser calibrado e ajustado conforme as especificações técnicas, garantindo que a aplicação da carga ocorra de maneira uniforme. A taxa de carregamento também é normatizada, devendo ser constante e não exceder 0,50 MPa/s para garantir resultados precisos.

Conforme descrito por Mehta e Monteiro (2014), os valores obtidos no ensaio de compressão são fundamentais para a verificação da resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ), ou seja, a resistência mínima exigida para o projeto. É a partir desses valores que se verifica se o concreto atende às especificações de projeto e se será capaz de suportar as cargas estruturais para as quais foi dimensionado.

O ensaio segue as seguintes etapas:

- I. Preparação dos Corpos de Prova: O concreto fresco é lançado em moldes cilíndricos e compactado para evitar bolhas de ar.

Figura 4: Moldagem de corpos-de-prova de concreto



Fonte: (Autores, 2024)

- II. Cura dos Corpos de Prova: Após a moldagem, os corpos de prova devem ser mantidos em ambiente úmido a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , até o momento do ensaio.

Figura 5: Cura dos corpos-de-prova de concreto



Fonte: (Autores, 2024)

- III. Execução do Ensaio: O corpo de prova é posicionado na prensa de compressão, onde a carga é aplicada até ocorrer o rompimento. A resistência à compressão é determinada dividindo a carga máxima suportada pela área da seção transversal do corpo de prova.

Figura 6: Ensaio de resistência à compressão simples em corpos-de-prova de concreto



Fonte: (Autores, 2024)

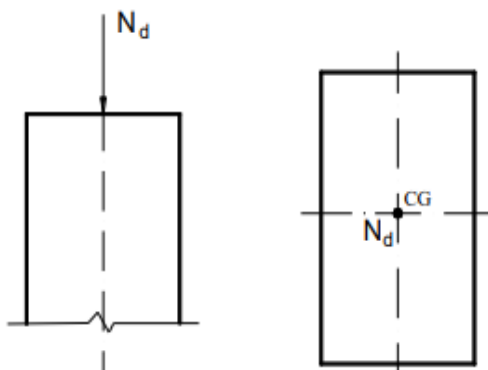
## 2.7 DIMENSIONAMENTO DE PILARES

Os pilares são elementos dimensionados para suportar forças normais e momentos fletores, quando houver. A contribuição da resistência do concreto é de suma importância para combater os esforços resultantes dessas forças, além de influenciar no cálculo das armaduras desses elementos. Para o dimensionamento deve se considerar os esforços solicitantes dos elementos, podendo ser dimensionado para compressão simples e flexão composta.

### 2.7.1 Compressão Simples

A aplicação da força normal ( $N_d$ ) é no centro geométrico (CG) da seção transversal do pilar, cujas tensões na seção transversal são uniformes, conforme a Figura 7.

Figura 7: Compressão simples em pilares



Fonte: BASTOS, 2023

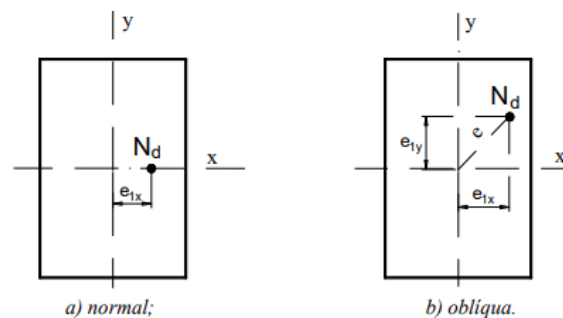
### 2.7.2 Flexão composta

Na flexão composta, o pilar é afetado tanto pela força normal quanto pelo momento fletor.

- **Flexão Composta Normal:** Ocorre quando atua uma força normal e um momento fletor em uma direção, havendo um deslocamento do ponto de aplicação da força, podendo ser no eixo x ou no eixo y em relação ao CG, conforme a Figura 8

- **Flexão Composta Oblíqua:** Ocorre quando atuam uma força normal e dois momentos, fletores, relativos às duas direções principais do pilar, havendo um deslocamento do ponto de aplicação da força, tanto no eixo x quanto no eixo y em relação ao CG, conforme a Figura 8.

Figura 8: Flexão composta normal (a) e Flexão composta oblíqua (b) em pilares

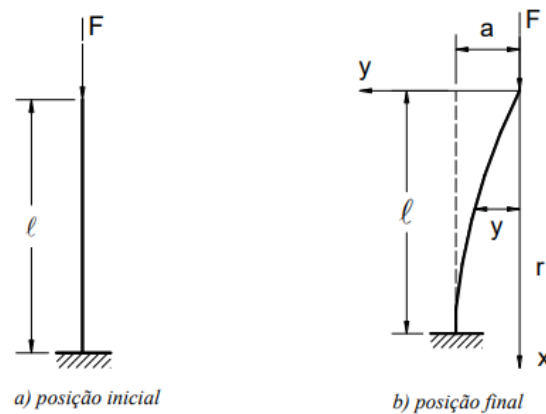


Fonte: BASTOS, 2023

### 2.7.3 Não-linearidade Geométrica

Segundo Pinto (1997), a não-linearidade geométrica (NLG) são aqueles oriundos da mudança de posição da estrutura no espaço, devido ao carregamento simultâneo de esforços verticais e horizontais. Uma estrutura com carregamentos verticais agindo sobre uma estrutura deslocada pode gerar acréscimos de esforços, principalmente em pilares, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Deformação nos pilares



Fonte: BASTOS, 2023

### 2.7.4 Determinação dos efeitos locais de segunda ordem

Como afirmado por Ceccon (2008), quando a análise de equilíbrio é realizada considerando a configuração deformada da estrutura, os efeitos de segunda ordem se somam aos resultados da análise de primeira ordem. Na determinação desses efeitos, o comportamento não linear dos materiais deve ser levado em consideração.

O cálculo do efeito de segunda ordem segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023) pode ser feito utilizando o método do pilar-padrão com rigidez aproximada, conforme item (15.8.3.3.3).

O momento total máximo no pilar deve ser calculado a partir da majoração do momento de 1ª ordem pela Equação 2:

$$M_{d,tot} = \frac{\alpha_b \cdot M_{1d,A}}{1 - \frac{\lambda^2}{120\kappa/v}} \geq \{M_{1d,A}, M_{1d,min}\} \quad (2)$$

onde :

$M_{d,tot}$ = Momento total máximo de cálculo no pilar.

$\alpha_b$ = Coeficiente de majoração dos efeitos de segunda ordem.

$M_{1d,A}$ = Momento de primeira ordem de cálculo na seção considerada (A).

$\lambda$ = Esbeltez do pilar.

$\kappa$ = Fator de correção para o comprimento efetivo do pilar.

$v$ = Coeficiente relacionado ao material e à seção transversal do pilar.

$M_{1d,min}$ = Momento mínimo de primeira ordem.

Para o valor da rigidez adimensional  $\kappa$  pode ser utilizada a Equação 3:

$$\kappa_{aprox} = 32 \left( 1 + 5 \frac{M_{Rd,tot}}{h \cdot N_d} \right) \cdot v, \text{ onde } v = \frac{N_d}{(A_c \cdot f_{cd})} \quad (3)$$

onde:

$K_{aprox}$  = Fator de correção aproximado para o comprimento efetivo do pilar.

$M_{Rd,tot}$  = Momento total resistente de cálculo.

$h$  = Altura da seção transversal do pilar.

$N_d$  = Força normal de cálculo no pilar.

$A_c$  = Área da seção transversal de concreto do pilar.

$f_{cd}$  = Tensão de cálculo de compressão do concreto.

O processo aproximado acima, em um caso de dimensionamento, recai na formulação direta dada abaixo:

$$A \cdot M_{Sd,tot}^2 + B \cdot M_{Sd,tot} + C = 0, \text{ onde } \begin{cases} B = h^2 \cdot N_d - \frac{N_d \cdot \ell e^2}{320} - 5 \cdot h \cdot \alpha_b \cdot M_{1d,A} \\ C = -N_d \cdot h^2 \cdot \alpha_b \cdot M_{1d,A} \end{cases} \quad (4)$$

onde:

$A$  = Coeficiente relacionado ao termo quadrático do momento de cálculo.

$h$  = Altura da seção transversal do pilar

$M_{Sd,tot}$  = Momento total de cálculo de segunda ordem no pilar

$B$  = Coeficiente do termo linear do momento, que incorpora efeitos de carregamento e esbeltez

$N_d$  = Força normal de cálculo aplicada no pilar

$\ell e$  = Comprimento efetivo do pilar, usado para considerar a esbeltez.

$\alpha_b$ : Coeficiente de majoração dos efeitos de segunda ordem

$M_{1d,A}$ : Momento de primeira ordem de cálculo na seção considerada (A).

$C$ : Termo independente na equação, relacionado ao momento e à força normal.

A solução para  $M_{Sd,tot}$  é:

$$M_{Sd,tot} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad (5)$$

Esse método é empregado pelo AltoQi Eberick para calcular os momentos de segunda ordem em pilares de esbeltez moderada ( $\lambda \leq 90$ ). Ele considera a rigidez aproximada  $\kappa$  do pilar, que é influenciada pela geometria e propriedades materiais da seção transversal. A partir dessa rigidez, o programa calcula os

momentos solicitantes, levando em conta os efeitos de não linearidade física, através de processos iterativos descritos na norma (ALTOQI, 2021).

## 2.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICOS

Indubitavelmente a estatística é indispensável para uma melhor compreensão dos fenômenos e acontecimentos do mundo ao nosso redor, pois fornecem meios de obtenções de novas percepções em seu campo de especialização (DEVORE, 2006).

Partindo deste pressuposto, é de suma importância utilizar e aplicar os métodos estatísticos que melhor auxiliem na interpretação do fenômeno estudado.

### 2.8.1 População, amostras e processos

Constantemente, no ramo da engenharia, faz-se necessário organizar, interpretar e resumir conjuntos de dados com características distintas ou semelhantes, para isto, parte inicial do tratamento estatístico consiste em caracterizar a conjunto de dados, podendo ser esta uma população ou amostra. Por definição, população é o conjunto completo de todos os elementos ou indivíduos que compartilham uma característica em comum e que são objeto de estudo ou investigação. A população pode ser composta por pessoas, objetos, eventos ou dados. O tamanho de uma população pode variar, podendo ser finita ou infinita. Enquanto amostra, corresponde a um subconjunto da população. (DEVORE, 2006)

Geralmente um conjunto de dados corresponde a uma variável. Uma variável estatística é um elemento de estudo que pode assumir diferentes valores em uma população ou amostra. As variáveis podem ser classificadas em qualitativas, que descrevem atributos ou categorias (como sexo ou cor), e quantitativas, que mensuram quantidades (como idade ou altura). As variáveis quantitativas podem ser discretas ou contínuas, dependendo de assumirem valores inteiros ou infinitos dentro de um intervalo. Além disso, as variáveis são medidas em escalas nominais, ordinais, intervalares ou de razão, conforme a natureza dos dados. Essas características são fundamentais para a análise estatística e a interpretação dos resultados (DEVORE, 2006).

## 2.8.2 Medidas de Tendência Central

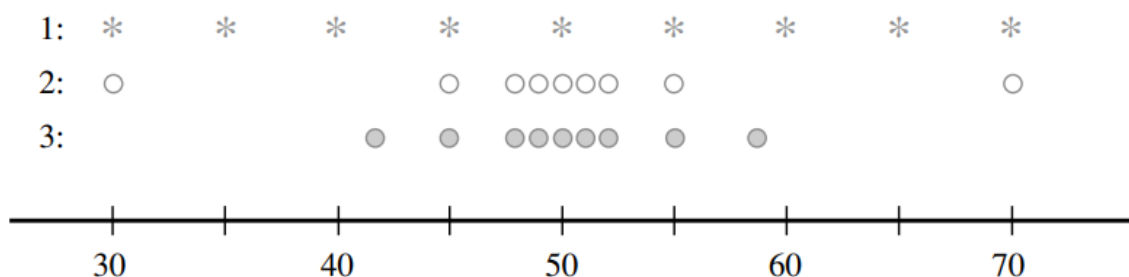
Uma análise mais rigorosa de dados geralmente requer o cálculo e a interpretação de medidas numéricas resumidas. Em outras palavras, buscamos obter a partir dos dados alguns números simples que ajudam a descrever o conjunto de dados e destacar informações relevantes (DEVORE, 2006). As medidas de tendência central são estatísticas que descrevem o valor típico ou central de um conjunto de dados. As principais incluem:

- a) Média: A soma de todos os valores dividida pelo número de observações, representando o valor médio.
- b) Mediana: O valor central de um conjunto de dados ordenados, menos influenciado por valores extremos.
- c) Moda: O valor mais frequente nos dados.

## 2.8.3 Medidas de Dispersão

As medidas de dispersão em estatística indicam o grau de variação ou espalhamento dos dados em relação à tendência central (como a média). Elas são essenciais para compreender a distribuição dos valores em um conjunto de dados, complementando as medidas de tendência central, pois, por exemplo, 3 conjuntos de dados podem apresentar as mesmas medidas de tendência central, porém com dispersões diferentes, como ilustra a Figura 10:

Figura 10: Medidas de dispersão em estatística



Fonte: (DEVORE, 2006)

Entre as medidas de dispersão mais comuns, tem-se:

- a) Variância: mede o grau de dispersão dos dados em torno da média, calculada pela média dos quadrados das diferenças entre cada valor e a média.
- b) Desvio Padrão: a raiz quadrada da variância, expressando a dispersão dos dados na mesma unidade da variável, facilitando a interpretação.

Essas medidas são essenciais para entender tanto a tendência central quanto a dispersão dos dados.

### 2.8.4 Boxplot

Nos últimos anos, o boxplot tem sido amplamente utilizado como uma ferramenta esquemática para descrever as principais características de conjuntos de dados. Essas características incluem: (1) o valor central, (2) a dispersão dos dados, (3) a extensão e o padrão de assimetria, e (4) a identificação de outliers, que são valores distantes da maioria dos dados. Como um único outlier pode alterar significativamente a média e o desvio padrão, o boxplot utiliza medidas "resistentes" a esses valores extremos, como a mediana e a dispersão entre quartis, para garantir uma análise mais robusta.

### 2.8.5 Método IQR

O método IQR (intervalo interquartil) para identificação de outliers baseia-se na análise da dispersão dos dados em torno da média. O IQR é calculado como a diferença entre o terceiro quartil (Q3) e o primeiro quartil (Q1) dos dados. Outliers são identificados como valores que estão abaixo da média menos 1,5 o valor do IQR ou acima da média mais 1,5 o valor do IQR. Esse método ajuda a detectar valores extremos de maneira robusta, minimizando a influência de outliers sobre as medidas de tendência central e dispersão.

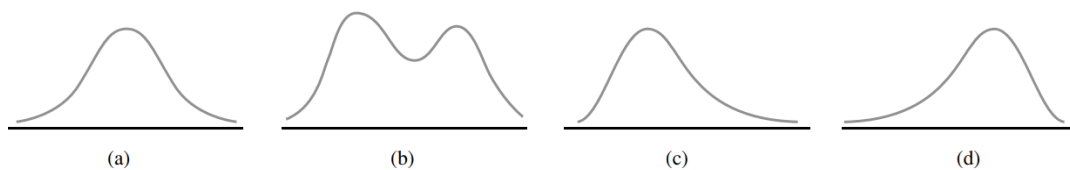
$$IQR = Q3 - Q1 \quad (6)$$

$$L_{sup, inf} = M \pm 1,5 \cdot IQR \quad (7)$$

## 2.8.6 Histograma

Um histograma é uma representação gráfica utilizada para visualizar a distribuição de um conjunto de dados quantitativos. Ele organiza os dados em intervalos (ou "bins") e, para cada intervalo, uma barra é desenhada cuja altura representa a frequência ou a quantidade de observações que caem dentro daquele intervalo. O histograma é útil para identificar padrões como a forma da distribuição (simétrica, assimétrica, unimodal, multimodal), a dispersão dos dados, e a presença de outliers, facilitando a interpretação visual de grandes volumes de dados e auxiliando na análise estatística.

Figura 11: Histogramas ajustados: (a) unimodal simétrico; (b) bimodal; (c) desvio positivo; (d) desvio negativo



Fonte: (DEVORE, 2006)

## 2.8.7 Teste de normalidade (Shapiro-Wilk)

O teste de Shapiro-Wilk é uma ferramenta estatística utilizada para avaliar se um conjunto de dados segue uma distribuição normal. É particularmente útil em análises onde a normalidade dos dados é um pré-requisito para a aplicação de certos testes paramétricos. (FIELD, 2017).

Cálculo do Teste calcula uma estatística  $W$  que mede a concordância entre a distribuição dos dados e a distribuição normal esperada. Após isto, a estatística  $W$  é comparada com um valor crítico derivado de tabelas de referência para determinar se a distribuição dos dados é significativamente diferente da normalidade. Para sua interpretação, podemos resumir que valores de  $W$  próximo de 1, mais forte será a evidência de que os dados seguem uma distribuição normal. A recíproca é verdadeira.

Quanto a sua interpretação, o valor-p resultante indica a probabilidade de observar os dados se a hipótese de normalidade for verdadeira. Enquanto o valor de P é considerado baixo, geralmente, quando menor que 0,05 que indica que os dados significativamente se desviam da normalidade, sugerindo que não seguem uma distribuição normal. O oposto é verdadeiro, portanto, o valor-p alto sugere que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese de normalidade, ou seja, os dados podem seguir uma distribuição normal.

Este teste é amplamente utilizado para validar a suposição de normalidade antes de aplicar testes estatísticos que requerem essa premissa.

### 2.8.8 Matriz de Correlação de Spearman

A Matriz de Correlação de Spearman é uma ferramenta estatística utilizada para avaliar a relação entre variáveis ordinais ou para medir associações monotônicas entre variáveis contínuas. Diferentemente da correlação de Pearson, que assume que as variáveis seguem uma distribuição normal e mede a relação linear, a correlação de Spearman baseia-se nos postos (rankings) das observações, tornando-a robusta a distribuições não normais e a relações não lineares.

O coeficiente de correlação de Spearman, denotado por  $\rho$  (rho), é calculado a partir dos postos das variáveis em vez de seus valores absolutos. Para calcular  $\rho$ , seguem-se os seguintes passos:

- a) Classificação: as variáveis são classificadas em ordem crescente, atribuindo-se postos a cada valor.
- b) Diferença de Postos: calcula-se a diferença entre os postos de cada par de variáveis.
- c) Quadrado das Diferenças: eleva-se ao quadrado as diferenças obtidas no passo anterior.

Cálculo do Coeficiente: Usa-se a expressão a seguir:

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d^2}{n(n^2 - 1)} \quad (8)$$

onde “d” é a diferença entre os postos das variáveis e “n” é o número de observações.

Para uma análise mais consistente da correlação entre variáveis, faz-se necessário calcular o valor de “p” para verificar a significância dos resultados obtidos, para isto, realiza-se primeiramente o cálculo estatístico do teste “t”, na qual pode ser calculado após a obtenção do valor de “p” do teste de Spearman conforme a Equação 8:

$$t = \frac{\rho\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\rho^2}} \quad (9)$$

Onde:

t é a estatística-t;  $\rho$  corresponde a correlação de Spearman; n é o número de observações.

Em seguida, fixa-se o grau de liberdade em  $n-2$ , onde n é o número de pares de dados. E por fim, utiliza-se a distribuição-t para encontrar o valor de “p” correspondente à estatística “t” com  $n-2$  graus de liberdade.

Quanto a sua interpretação, Valor-p pequeno ( $p < 0,05$ ): Há uma correlação estatisticamente significativa entre as variáveis, ou seja, rejeitamos a hipótese nula de que não há correlação.

Para Valor-p grande ( $p > 0,05$ ): Não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula, ou seja, a correlação observada pode ter ocorrido por acaso.

Para a interpretação do valor do coeficiente de correlação “ $\rho$ ”, tem-se que quanto mais próximo de zero, mais fraca será a relação, sendo que o intervalo de variação para este coeficiente é de -1 a 1. Para relações onde “ $\rho$ ” assume valores negativos, conclui-se que há uma relação inversamente proporcional entre as variáveis, enquanto que para valores positivos a relação é diretamente proporcional.

### 3. METODOLOGIA

A seção de metodologia é estruturada em quatro etapas principais: coleta de dados de rompimento de corpos de prova, tratamento e análise estatística do material, modelagem da estrutura em concreto armado para as resistências estudadas.

**Tratamento estatístico dos dados:** O tratamento estatístico dos dados constitui uma etapa essencial na validação e interpretação dos resultados a serem obtidos. Neste trabalho, foram aplicados métodos estatísticos para avaliar a precisão e a consistência das medições de resistência e outras propriedades do concreto. A análise envolveu o cálculo de estatísticas descritivas, como médias e desvios padrão, além da realização de testes de hipóteses para verificar a significância dos resultados. Este tratamento permite identificar tendências, variações e possíveis erros experimentais, fornecendo uma base sólida para a interpretação dos dados e a tomada de decisões informadas sobre a qualidade do concreto.

**Dimensionamento dos elementos estruturais:** O dimensionamento dos elementos estruturais foi realizado com base nas propriedades do concreto e nas exigências normativas, com foco específico na análise dos pilares. A análise teve como objetivo principal avaliar a variação da área de aço e as deformações dos pilares. Os resultados foram obtidos a partir de relatórios de cálculo gerados pelo software Eberick, utilizado para determinar as áreas de aço dos elementos a partir de dimensões adequadas dos pilares da estrutura previamente definidos. A análise incluiu a verificação das variações na área de aço necessária para garantir a resistência e a segurança dos pilares, bem como a avaliação das deformações para assegurar que estas se mantivessem dentro dos limites permitidos pelas normas técnicas. Esta abordagem detalhada é essencial para garantir que os pilares atendam aos critérios de desempenho e estabilidade, mantendo a integridade estrutural ao longo da vida útil da edificação.

**Dosagem do concreto:** Para a dosagem do concreto, foi escolhido o método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), que foi aplicado para dois concretos de classes diferentes. Este método permite a formulação adequada

das misturas para atender às especificações de resistência e durabilidade requeridas para cada classe de concreto. A dosagem foi ajustada com base nas propriedades desejadas para os concretos, garantindo que cada mistura apresentasse a resistência e a trabalhabilidade necessárias para o desempenho ideal das estruturas. O método da ABCP foi selecionado por sua robustez e confiabilidade, proporcionando uma base sólida para a formulação do concreto e contribuindo para a qualidade e a segurança das estruturas analisadas.

### 3.1 COLETA E ORGANIZAÇÃO DE DADOS

Para a realização deste estudo, foi escolhida a filial de uma central dosadora de concreto de uma empresa multinacional em Belém do Pará, que atua no setor há mais de quatro décadas, proporcionando uma estrutura relevante no mercado da construção civil. Os dados solicitados incluíram resultados de ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto produzidos entre 2013 e 2023, abrangendo informações como: nota fiscal, código de barras, resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ), especificações do cimento, idade de rompimento (7 e 28 dias), carga de ruptura, tensão de ruptura e data do ensaio.

Figura 12: Representação parcial dos dados brutos

30	CPV ARI RS MIZU MARE		B	28D	7	23,7
40	CPV ARI RS MIZU MARE		B	28D	7	27,4
30	CPV ARI RS MIZU MARE		B	28D	7	26,9
25	CPV ARI RS MIZU MARE		B	28D	7	12,2
30	CPV ARI RS MIZU MARE		B	28D	7	24,9
25	CPV ARI RS MIZU MARE		B	28D	7	13,6
25	CPV ARI RS MIZU MARE		B	28D	7	12,5
30	CPV ARI RS MIZU MARE		B	28D	7	23,6
30	CPV ARI RS MIZU MARE		B	28D	7	23,7
30	CPV ARI RS MIZU MARE		B	28D	7	22,9
o - 2023	Julho - 2023	Tratado Julho - 2023	Tratado Agosto - 2023	Planilha Geral	Planilha Geral DA	

Fonte: (Autores, 2024)

Após a coleta, os dados foram organizados em uma única aba, removendo informações desnecessárias. Foram descartados os corpos de prova de 7 dias e os que apresentaram a menor resistência dentre os pares de 28 dias, conforme a NBR 12655 (ABNT, 2015), item 6.2.2, que diz: “Toma-se como resistência do exemplar o maior dos dois valores obtidos no ensaio de resistência à compressão”. Além disto adotou-se o regime de controle de concreto por amostragem total, em que o  $f_{ck,est}$  é igual ao  $f_{c,betonada}$ , uma vez que se obteve todos os dados de rompimentos ao longo dos anos. Ao final, a planilha continha 47.425 linhas, representando os dados tratados, formando assim um banco de

dados organizado para análise estatística. A seguir está ilustrado os dados brutos, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13: Representação parcial dos dados tratados

Codigo de Barra	Fck	Cimento	Idade	Tonelad€	Fck real	Data
AAE28937399	25	CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA	28	26,42	33,63	jul/13
AAE28937401	25	CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA	28	24,94	31,75	jul/13
AAE28937402	25	CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA	28	27,81	35,40	jul/13
AAE28937407	25	CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA	28	24,88	31,67	jul/13
AAE28937419	25	CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA	28	22,69	28,88	jul/13
AAE28937423	25	CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA	28	23,52	29,94	jul/13
AAE28937629	25	CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA	28	21,22	27,01	jul/13
AAE28937632	25	CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA	28	24,84	31,62	jul/13
AAE28937642	25	CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA	28	21,33	27,15	jul/13
AAE28937810	25	CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA	28	24,56	31,26	jul/13
AAE28937857	25	CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA	28	21,25	27,05	jul/13

Fonte: (Autores, 2024)

### 3.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO:

Com os dados organizados, iniciou-se o tratamento estatístico, começando com uma análise descritiva dividida por ano e mês de produção, além das classes de resistência. Foram verificadas medidas de tendência central, como a média das resistências, assim como medidas de dispersão, isto é, desvio padrão e variância, utilizados na verificação dos outliers, eles foram removidos do banco de dados pois os mesmos, geralmente, são provenientes de imprevistos inerentes a construção civil que, por sua vez, acarretam processos de redosagem do concreto. Observou-se que a resistência à compressão dos concretos com 28 dias conseguia alcançar o valor calculado do  $f_{cj}$  e em muitos casos chegaram a ultrapassá-lo. Para este presente trabalho, o enfoque foi para o concreto correspondente ao  $f_{ck}$  de 30MPa. As médias de resistência para cada classe foram apresentadas em uma tabela. A normalidade da distribuição foi verificada pelo método de Shapiro-Wilk, e a matriz de correlação de variáveis foi elaborada utilizando o teste de Spearman, a fim de compreender as variáveis que impactam a resistência do concreto. A tabela completa pode ser conferida no “APÊNDICE A – Resumo Expandido dos Resultados Estatísticos”.

### 3.3 MODELAGEM E SIMULAÇÕES

Após o tratamento estatístico, foram verificadas as implicações práticas do uso da resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ) próximo ao valor do  $f_{cj}$  nos modelos computacionais, adotando duas resistências distintas para ambos. O edifício modelado foi extraído de um projeto real em Santarém/Pará, e as características

estruturais foram detalhadas igualmente. O software utilizado para modelagem foi o Eberick, que possibilita o dimensionamento e análise de estruturas em conformidade com normas técnicas. As propriedades dos materiais para as duas resistências característica do concreto foram de  $f_{ck} = 30$  MPa para o modelo que irá simular a edificação original, fazendo-se  $f_{ck} = f_{ck,est}$ , que neste estudo será de 37MPa para uma aproximação ao estado real da edificação. As combinações e carregamentos foram elaboradas de acordo com as normas pertinentes.

### 3.3.1 Propriedades dos Materiais

#### 3.3.1.1 Concreto com Resistência de Projeto

Concreto com resistência característica ( $f_{ck}$ ) de 30 MPa (para simular uma realidade onde o concreto solicitado a concreteira apresenta resistência igual a de projeto) com agregado graúdo do tipo basalto, o que resulta em, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), nos seguintes módulos de elasticidade:

- $E_{ci} = 27$  GPa (tangente inicial);  $E_{cs} = 24$  GPa (módulo secante);
- Peso/volume (concreto armado) = 2500 kgf/m<sup>3</sup>;
- $F_{cd} = 21,42$  MPa

#### 3.3.1.2 Concreto com Resistência Estimada ( $f_{ck} = f_{ck,est}$ )

Concreto com resistência característica ( $f_{ck} = f_{ck,est}$ ) de 37 MPa (para simular uma realidade do concreto entregue pela concreteira abordada neste trabalho) com agregado graúdo do tipo basalto, o que resulta em, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), nos seguintes módulos de elasticidade:

- $E_{ci} = 30$  GPa (tangente inicial);  $E_{cs} = 27$  GPa (módulo secante);
- Peso/volume (concreto armado) = 2500 kgf/m<sup>3</sup>;
- $F_{cd} = 26,43$  MPa

### 3.3.2 Combinações de carregamento e Cargas

Os carregamentos considerados nesta modelagem foram: Peso próprio (PP); Carga Acidental(Q), Cargas Permanentes (CP); Carga de Vento (V). Com insto

foram realizadas as devidas combinações estado limite último (ELU) e estado limite de serviço (ELS):

Tabela 6: Combinações de cargas para ELS e ELU

<b>ESTADO LIMITE ÚLTIMO</b>	
$ELU 1 = 1,4. (PP + CP) + 1,4. Q + 1,4.0,6. V_0$	
$ELU 2 = 1,4. (PP + CP) + 1,4. Q + 1,4.0,6. V_{90}$	
$ELU 3 = 1,4. (PP + CP) + 1,4. V_0 + 1,4.0,5. Q$	
$ELU 4 = 1,4 \times (PP + CP) + 1,4. V_{90} + 1,4.0,5. Q$	
$ELU 5 = ENVELOPE (ELU 1, ELU 2, ELU 3, ELU 4)$	
<b>ESTADO LIMITE DE SERVIÇO</b>	
$ELS 1 = (PP + CP) + 0,3 \times Q$	
$ELS 2 = (PP + CP) + 0,4 \times Q + 0,3 \times V_0$	
$ELS 3 = (PP + CP) + 0,4 \times Q + 0,3 \times V_{90}$	
$ELS 4 = (PP + CP) + 0,3 \times V_0 + 0,3 \times Q$	
$ELS 5 = (PP + CP) + 0,3 \times V_{90} + 0,3 \times Q$	
$ELS 6 = ENVELOPE(ELS 2, ELS 3, ELS 4, ELS 5)$	

Fonte: (Autores, 2024)

As cargas aplicadas na estrutura seguiram as recomendações da NBR 6120 (ABNT, 2023).

Figura 14: Entrada de dados para cálculo dos esforços devido ao vento

Fonte: (Autores, 2024)

### 3.3.3 Seções dos elementos estruturais

Para esta modelagem, as seções e espessuras dos elementos estruturais foram reproduzidas conforme o edifício anteriormente apresentado, que estão apresentadas a seguir:

Tabela 7: Seções de Pilares do Pavimento Tipo

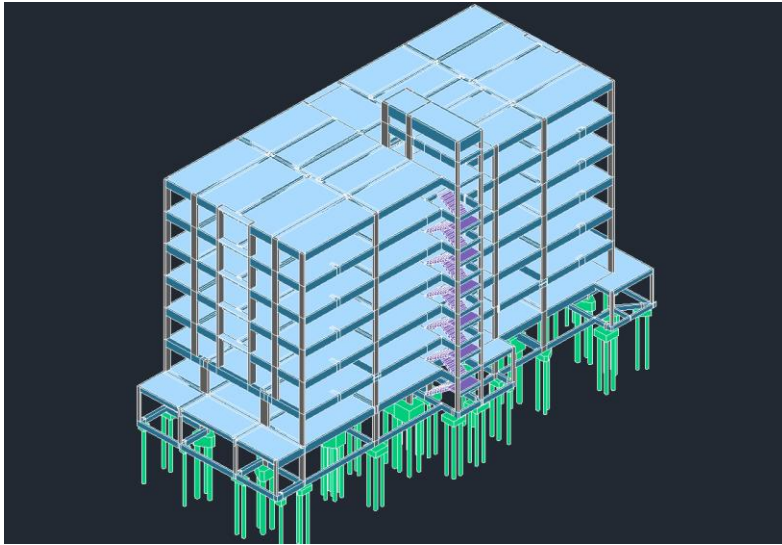
<b>ELEMENTOS</b>	<b>SEÇÃO (cm)</b>
P1=P2	20x30
PN3	20x40
P3=P4=P5=P6=P7=PN8=PN9=PN11=PN12=P25=P26=P29=P30	20x50
PN6	20x52
PN2=PN4=PN15	20x55
PN1=P8=P11=P12=PN5=PN14=PN16	20x60
PN7=PN13	20x65
PN17=PN18=P27	20x70

Fonte: (Autores, 2024)

### 3.3.4 Caracterização da edificação

O edifício modelado foi extraído de um edifício real projetado para a região de Santarém/Pará. O edifício em questão possui um terreno de 15,58 m x 39,71 m totalizando uma área de 618,68 m<sup>2</sup>, com destinação para o uso residencial, contendo 5 (sete) pavimentos Tipo, ou seja, arquitetonicamente iguais, contendo também mais 3 pavimentos com destinações diferentes. Quanto à altura, o edifício possui um total de 20,90 m, pé-direito de 3,20m para o pavimento térreo e de 2,95 m para os demais pavimentos. O edifício possui também uma área destinada a escadaria e um poço destinado ao elevador.

Figura 15: Volumetria da Estrutura do Edifício



Fonte: (Autores, 2024)

Em seu pavimento térreo, destinado principalmente a garagem, há 19 vagas destinadas a carros, além disso, há também a presença de três partições que abrigarão o estoque e abastecimento de gás do prédio, a guarita de entrada do prédio e um ponto comercial.

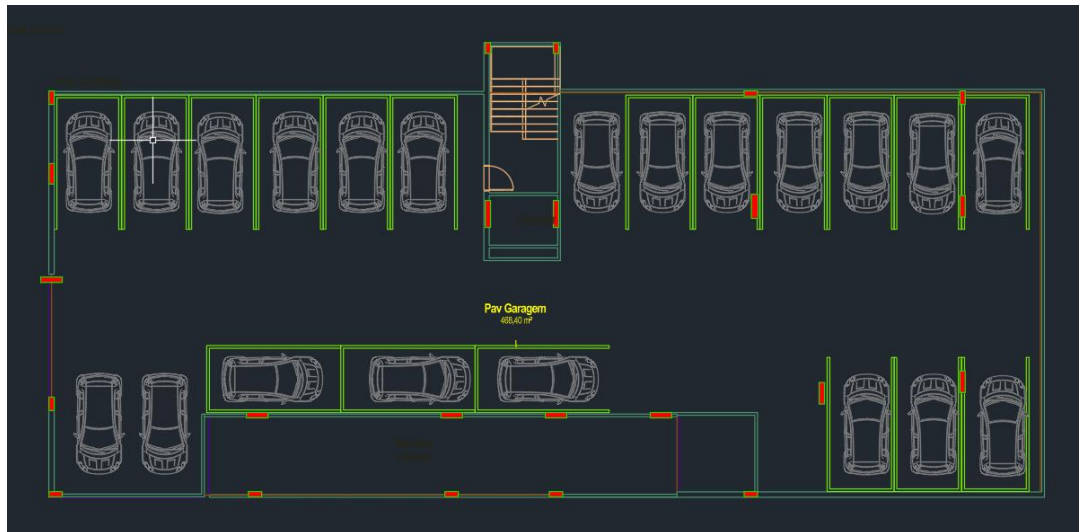
Figura 16: Planta Baixa Pavimento Térreo



Fonte: (Autores, 2024)

Em seguida, tem-se o 1º pavimento destinado também a garagem, porém, neste pavimento o número de vagas aumentou para 21.

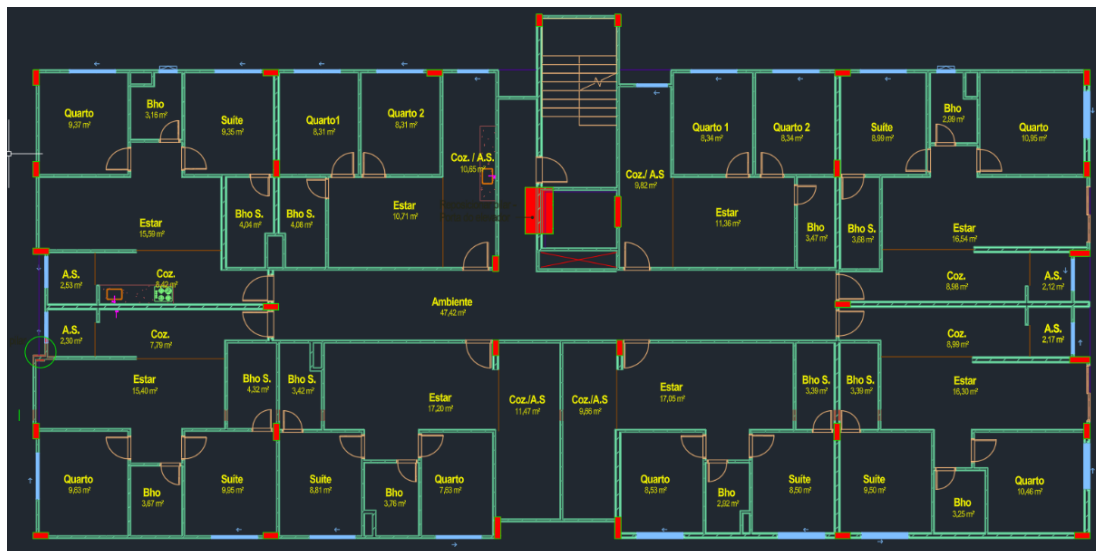
Figura 17: Layout do 1º Pavimento



Fonte: (Autores, 2024)

Para os pavimentos Tipo, o layout resume-se em 8 apartamentos por pavimento, sendo a disposição de ambientes semelhante a todos, contando com: cozinha, área de serviço, sala de estar, banheiro social, dois quartos. Cada apartamento possui em média 55m<sup>2</sup>.

Figura 18: Layout do Pavimento-Tipo



Fonte: (Autores, 2024)

Quanto à parte estrutural do edifício, o mesmo conta com as seguintes quantidades de elementos estruturais descritos na tabela a seguir:

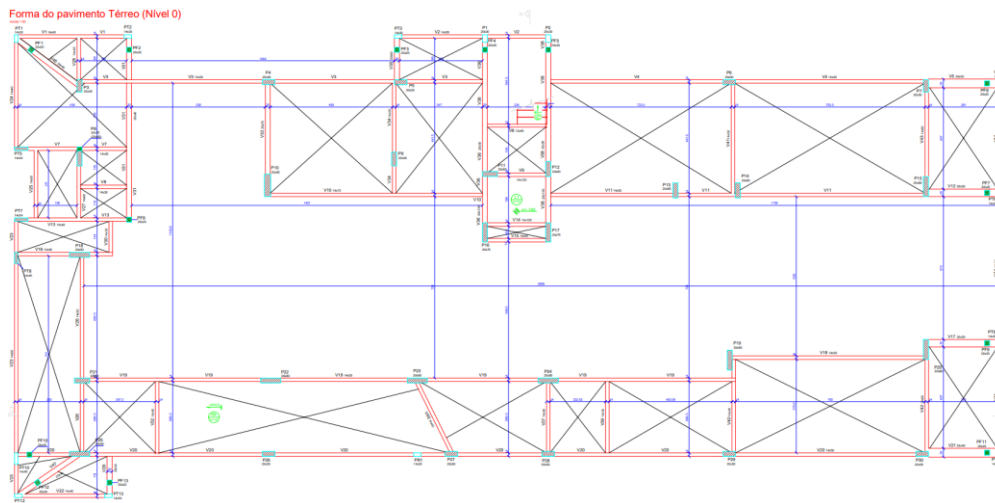
Tabela 8: Elementos estruturais de concreto por pavimento

PAVIMENTO	ELEMENTO			
	VIGA	LAJE	PILARES	ESCADAS
<b>TÉRREO</b>	47	1	44	0
<b>PAV 1 - GARAGEM</b>	37	28	44	1
<b>PAV 2 - APTO</b>	36	18	30	1
<b>PAV TIPO - APTO (4x)</b>	30	23	34	1
<b>PAV 7 - COBERTURA</b>	27	23	34	0
<b>FUNDO RESERVATÓRIO</b>	5	2	6	0
<b>PAV RESERVATÓRIO</b>	5	2	6	0

Fonte: (Autores, 2024)

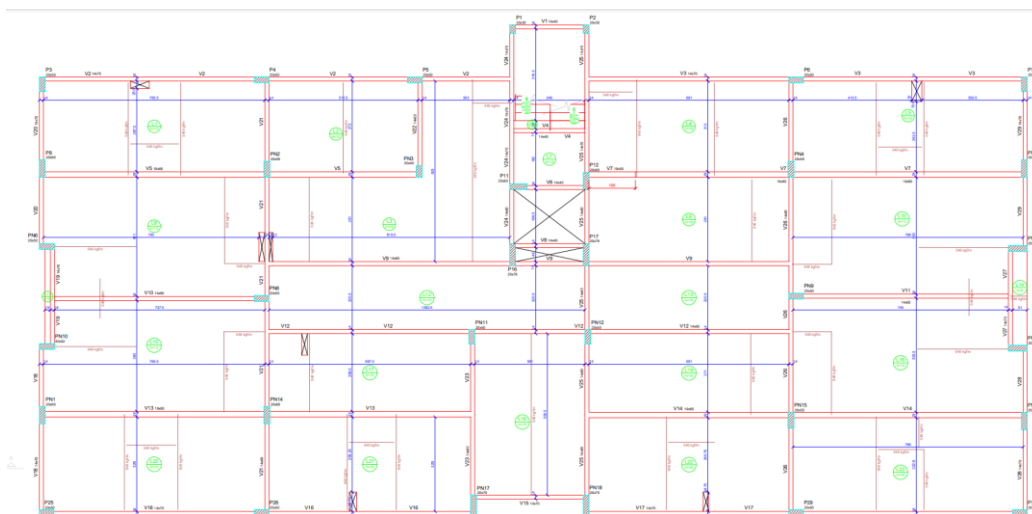
A seguir estão representadas as plantas de formas do projeto estrutural.

Figura 19: Planta de Forma do Pavimento Térreo



Fonte: (Autores, 2024)

Figura 20: Planta de Forma do Pavimento Tipo



Fonte: (Autores, 2024)

Tendo introduzido todas as especificações iniciais da estrutura a ser analisada, então, iniciasse a modelagem dentro do software. O software a ser utilizado para modelagem da estrutura será o Eberick. Sendo um software de cálculo estrutural amplamente utilizado na engenharia civil, desenvolvido pela AltoQi. Ele oferece uma solução completa para o dimensionamento e análise de estruturas de concreto armado, metálicas, de madeira, e de alvenaria estrutural, com foco em edificações. O software integra diversas etapas do processo de projeto, desde a concepção e modelagem da estrutura até a verificação de normas técnicas, permitindo a geração automática de relatórios detalhados e desenhos técnicos. Suas funcionalidades avançadas incluem a análise de estabilidade global, cálculo de esforços e deformações, dimensionamento automático de armaduras e otimização de materiais, proporcionando maior precisão, eficiência e segurança no desenvolvimento de projetos estruturais. Além disso, o Eberick facilita a integração com outros softwares e plataformas de BIM, permitindo uma maior interoperabilidade e colaboração em projetos de engenharia.

### 3.3.5 Dosagem do Concreto:

Foi utilizada uma planilha em formato nativo do Excel para calcular os quantitativos dos componentes necessários para a fabricação de um metro cúbico de concreto, considerando as duas resistências finais em 28 dias (30 Mpa e 37 Mpa). Os critérios de dosagem foram determinados igualmente, ou seja, utilizando os mesmos insumos, variando apenas o  $f_{cj}$  e a relação água/cimento, com a finalidade de se obter as diferenças relacionadas ao consumo de cimento.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em síntese, a análise e discussão dos resultados fornecem insights críticos sobre o desempenho das estruturas de concreto e a eficácia das práticas de dimensionamento e dosagem. Através do tratamento estatístico dos dados, da análise detalhada dos pilares com foco na variação da área de aço e deformações utilizando o software Eberick e da dosagem precisa do concreto utilizando o método da ABCP, é possível comparar os consumos de insumos da estrutura.

## 4.1 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

No tratamento inicial notou-se que majoritariamente a resistência a compressão dos concretos produzidos na central dosadora em questão, apresentaram em sua maioria valores superiores ou iguais a resistência de dosagem ( $f_{cj}$ ). Nos quesitos gerais pôde-se definir as seguintes médias de resistência para cada classe de resistência, conforme Tabela 9.

Tabela 9: Média Geral de Resistência a Compressão e Resistência de Dosagem

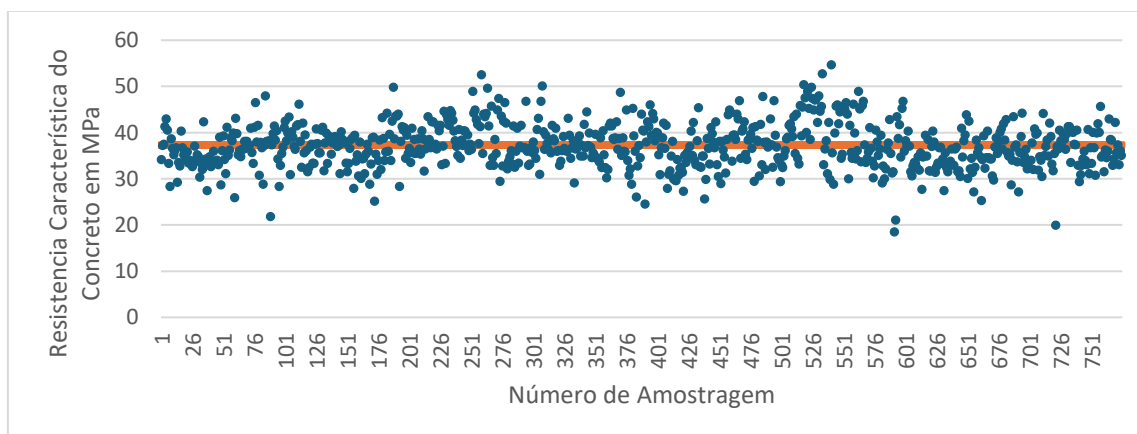
CLASSE DE RESISTÊNCIA	$f_{cj}$ 28 dias (MPa) para $S_d = 4$	MÉDIA GERAL (MPa) $f_{ck,est} = 28$ dias
C-20	26,6	27,92
C-25	31,6	31,33
C-30	36,6	37,27
C-35	41,6	42,78
C-40	46,6	48,38
C-45	51,6	52,50
C-50	56,6	61,10

Fonte: (Autores, 2024)

Para este trabalho em específico, afim de simular condições reais de uma obra, optou-se por adotar um ano em que a média da resistência se aproximasse da média geral dos 10 anos de dados, uma vez que o período de concretagem de uma obra do porte adotado dura em média de 6 meses a 1 ano, além disso a classe de resistência adotada foi a C-30. Dada estas condições, aferiu-se que a média de resistência no ano de 2022 seria a mais adequada a se trabalhar. Na

Figura 21 está representado a dispersão dos dados de rompimento do ano de 2022 em torno da média.

Figura 21: Gráfico de dispersão de dados de rompimentos de 2022



Fonte: (Autores, 2024)

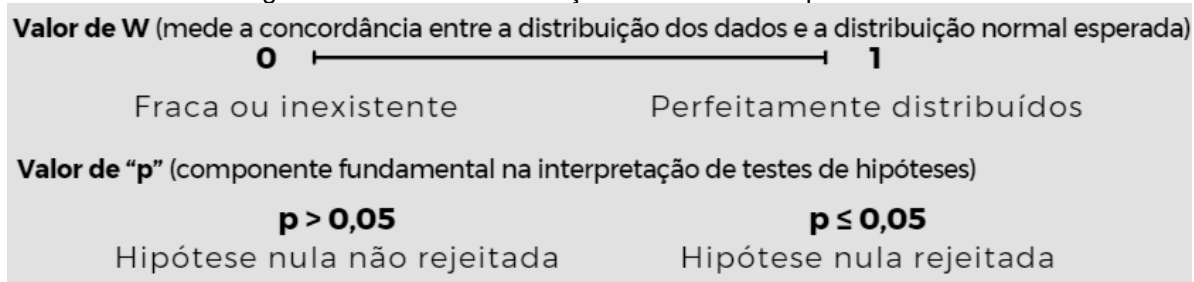
Para critérios de conhecimento foi verificado a normalidade da distribuição utilizando o método de Shapiro-Wilk, para execução correta do método as amostras foram divididas em idade e classe de resistência. Após isto o método foi aplicado a conjuntos de dados aglomerados em um montante maior que 30 e menor que 2000. Na qual pode-se aferir que os resultados de teste resistência de cada classe de resistência apresenta uma distribuição normal, uma vez que o valor de “W” é consideravelmente próximo de 1 e o valor de “P” superior a 0,05, conforme Tabela 10. Relembrando as métricas na Tabela 10.

Tabela 10: Teste de Normalidade

<b>TESTE DE NORMALIDADE</b>			
<b>Parâmetros</b>	$f_{ck,est} = 25 / 2019$ (5 anos)	$f_{ck,est} = 30 / 2019$ (5 anos)	$f_{ck,est} = 30 / 2022$ (2 anos)
<b>N</b>	381	319	283
<b>Média</b>	34,4	38,3	38,1
<b>Desvio-Padrão</b>	5,24	4,74	4,81
<b>W de Shapiro-Wilk</b>	0,996	0,993	0,992
<b>p Shapiro-Wilk</b>	0,42	0,112	0,139

Fonte: (Autores, 2024)

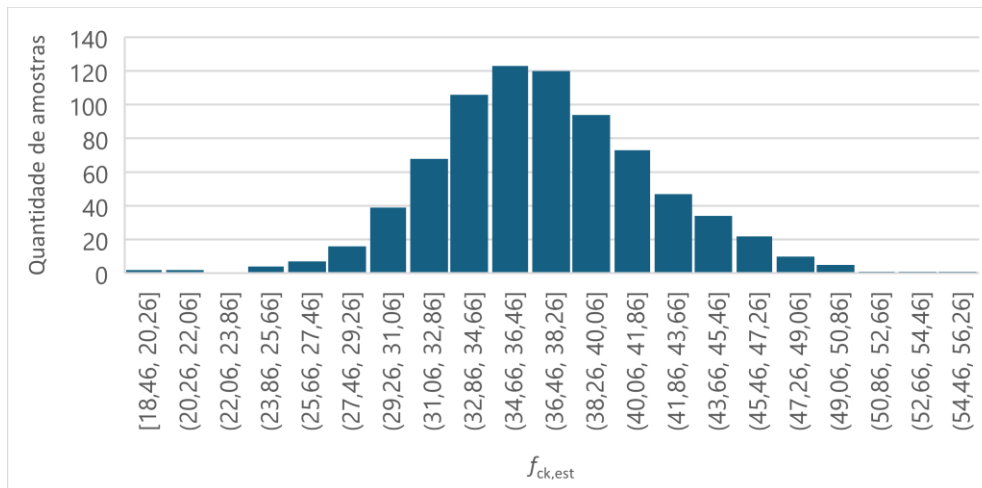
Figura 22: Métrica de avaliação do teste de Shapiro-Wilk



Fonte: (Autores, 2024)

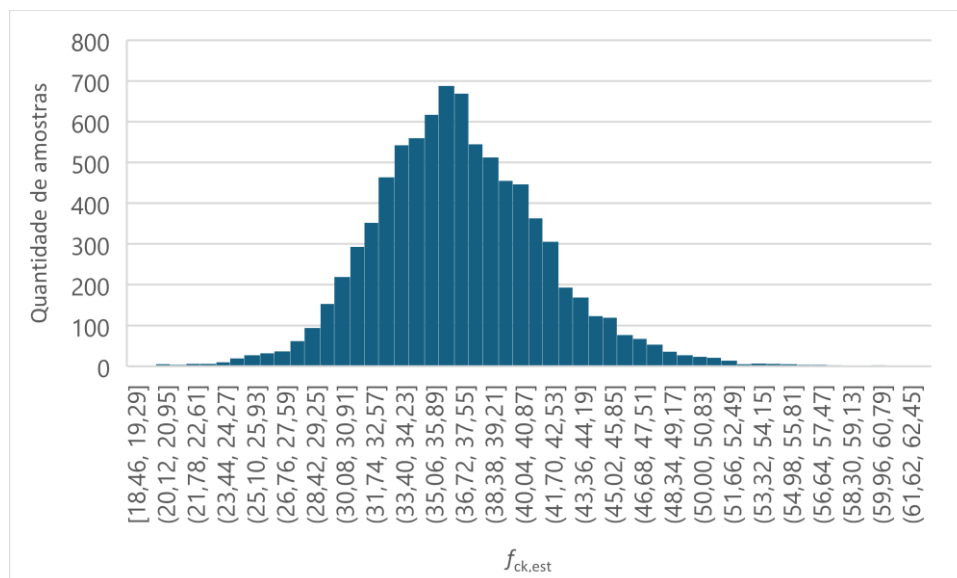
Como confirmado na análise estatística os resultados de rompimento de corpo de prova manifestam uma distribuição normal, como pode ser conferida visualmente nos histogramas da Figura 23 e Figura 24, ambos representam o histograma da classe de concreto C30, porém o primeiro diz respeito apenas aos rompimentos de 2022:

Figura 23: Histograma de rompimentos de concretos classe C30 de 2022



Fonte:(Autores, 2024)

Figura 24: Histograma de rompimentos de concretos classe C30



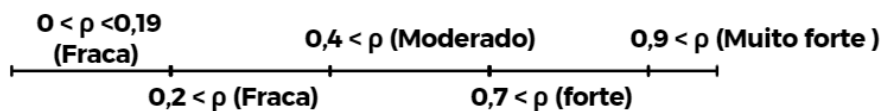
Fonte:(Autores, 2024)

Após aferir o comportamento de distribuição dos dados, foi elaborada a matriz de correlação de variáveis utilizando o teste de Sperman visando compreender quais variáveis da pesquisa impactam mais no resultado da resistência real do concreto. As variáveis atreladas aos dados levantados são;  $f_{ck}$ ; Idade em anos; Tipo de cimento;  $f_{ck,est}$ . Para a variável “Tipo de cimento”, foram registrados os seguintes tipos de cimento: CPI 32 NASSAU CAPANEMA; CPII E 40 VOTORANTIM XAMBIOA; CPII F 40 BRENNAND PITIMBU; CPII F 40 VOTORANTIM PRIMAVERA; CPIV RS 32 NASSAU CAPANEMA; CPV ARI RS MIZU MARE.

Tabela 11: Coeficientes de correlação de Spearman

Coeficientes de correlação de Spearman ( $\rho$ )	
Parâmetros	$f_{ck,est}$
$f_{ck,est}$	-
Idade (anos)	-0,194***
Tipo de cimento	-0,022***
$f_{ck}$	0,717***

Fonte: (Autores, 2024)

Figura 25: Métrica avaliativa de  $\rho$  de Spearman

Fonte: (Autores, 2024)

Como esperado, os valores de  $\rho$  de Spearman das correlações de “idade” e “tipo de cimento”, neste caso, possuem uma relação fraca estatisticamente com a resistência final do concreto, uma vez que seus valores estão próximo de 0. Porém na relação entre  $f_{ck}$  e  $f_{ck,est}$  é forte e diretamente proporcional.

Com isso pode-se concluir que o tipo de cimento utilizado na produção dos concretos, não interfere estatisticamente com grande significância na resistência final do concreto, uma vez que a concreteira utiliza o mesmo tipo de cimento para as diversas classes de resistência de seu portfólio, logo a diferenciação é realizada na dosagem de cada classe de resistência. Pode-se presumir também, que o ano em que o concreto foi fabricado não possui uma relação estatística aparente, isto é, não se pode afirmar que a modernização do método de dosagem tenha sido um fator que atuou na mudança no padrão de resultados obtidos no decorrer dos anos.

Por fim, como esperado, a relação entre a resistência solicitada e a resistência real de cada concreto possui uma relação forte uma vez que a concreteira em questão busca sempre garantir que o valor do  $f_{cj}$  seja atendido, ocasionando valores maiores de resistência ao solicitado por seus clientes.

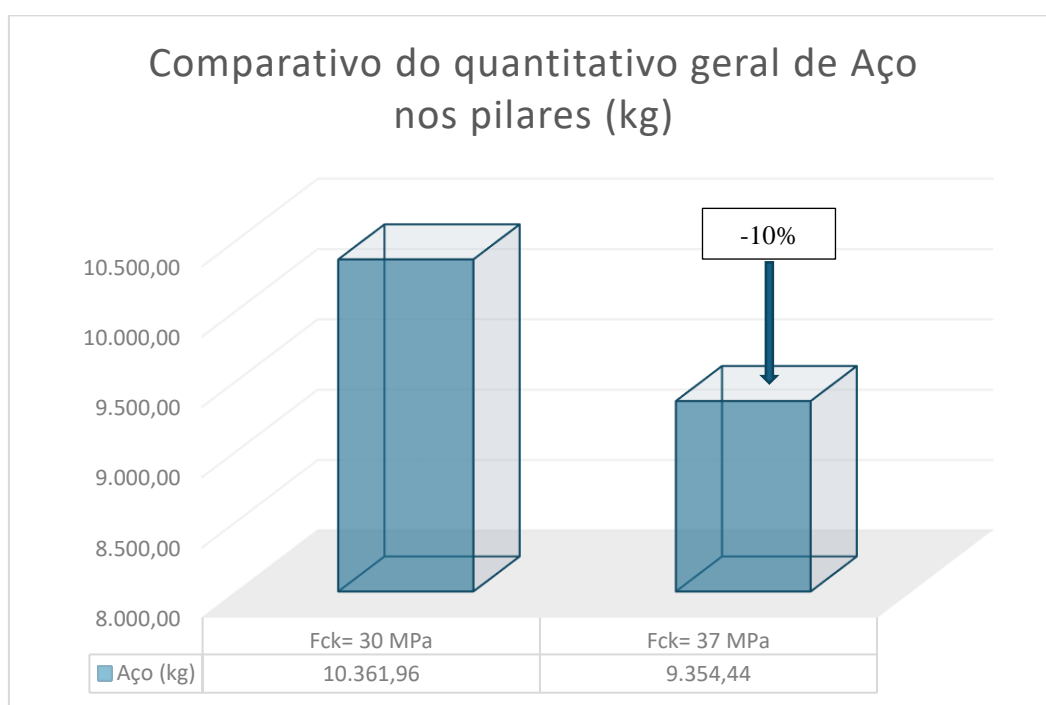
## 4.2 DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Após inserir todos os dados de entrada (seções, materiais, geometrias e carregamentos), foi executada as simulações no software, que faz a análise e dimensionamento dos elementos estruturais segundo a norma NBR 6118 para o Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS). Foi analisado o dimensionamento visando que todos os elementos estruturais em ambos os modelos estivessem corretamente dimensionados, para prevenir erros nos quantitativos de material, visto que elementos em não conformidade com a norma não são quantificados.

## 4.3 QUANTITATIVO DE MATERIAL

Dos resultados apresentados pelo programa, obteve-se os quantitativos de materiais relacionados ao volume de concreto e massa de aço para os pilares da edificação, representado no Figura 26.

Figura 26: Gráfico de comparativo do consumo de aço em pilares



Fonte: (Autores, 2024)

No modelo com resistência característica à compressão do concreto  $f_{ck}$ , de 30 MPa, a massa total de aço nos pilares foi de aproximadamente 10.000 kg. Em

comparação, o modelo com  $f_{ck,est}$ , de 37 MPa, apresentou uma massa de aproximadamente 9.000 kg de aço, resultando em uma redução de aproximadamente 10% na quantidade de aço necessário.

Essa diferença pode ser atribuída à influência significativa da resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ) nos cálculos de dimensionamento dos pilares. Analisando as equações de dimensionamento pelo método da rigidez aproximada, observa-se que um aumento no valor de  $f_{ck}$  contribui de maneira substancial para a redução do momento fletor máximo total, especialmente quando consideramos os efeitos de segunda ordem. A maior resistência característica do concreto permite uma redução no dimensionamento dos pilares, otimizando a quantidade de aço necessária e, conseqüentemente, contribuindo para uma estrutura depende majoritariamente da parcela de concreto.

Essa análise demonstra que a  $f_{ck}$  é crucial para o desempenho e a economia estrutural, evidenciando a importância de se utilizar concretos com resistências mais aproximadas as estipuladas pelo calculista da estrutura, a fim de otimizar o uso dos materiais e sem criar folgas desnecessárias, como a de aproximadamente 1000 kg de aço como no exemplo acima. Portanto faz-se necessário aprimorar e aprofundar os estudos nas áreas referentes a controle tecnológico de concreto, uma vez que mesmo ao longo de 10 anos a variabilidade na produção do concreto ainda se mantém praticamente igual, fato evidenciado pelos desvios padrões praticamente inalterados ao longo deste período.

#### 4.4 DIMENSIONAMENTO DA ÁREA DE AÇO (AS) DOS PILARES

A Tabela 12 apresenta os dados do dimensionamento dos pilares pavimento Tipo, tanto para  $f_{ck}$  30 MPa quanto para o de 37 MPa.

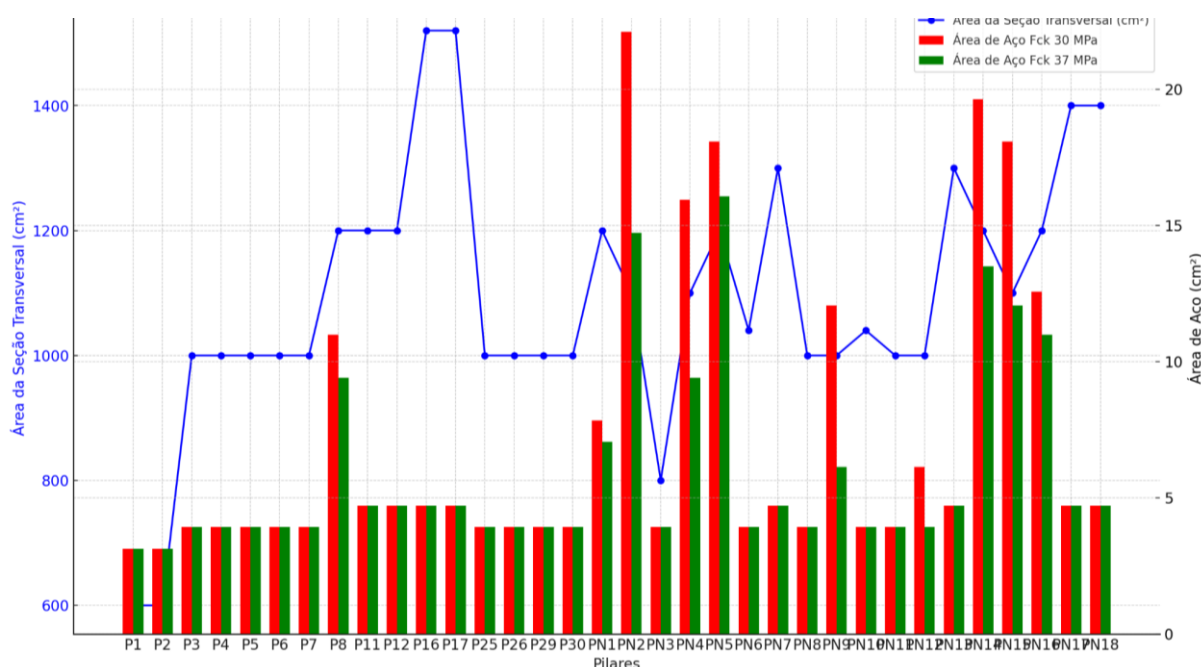
Tabela 12: Comparativo pilares dimensionados com concreto de resistência de 30 e 37 MPA

Pilar	Seção do Pilar		$f_{ck} = 30 \text{ Mpa}$				$f_{ck,est} = 37 \text{ Mpa}$				Diferença As
	Comprimento (cm)	Largura (cm)	As b	As h	As total	Taxa de Armadura	As b	As h	As total	Taxa de Armadura	
P1	20	30	1,57	1,57	3,14	0,52%	1,57	1,57	3,14	0,52%	0,00
P2	20	30	1,57	1,57	3,14	0,52%	1,57	1,57	3,14	0,52%	0,00
P3	20	50	1,57	2,36	3,93	0,39%	1,57	2,36	3,93	0,39%	0,00
P4	20	50	1,57	2,36	3,93	0,39%	1,57	2,36	3,93	0,39%	0,00
P5	20	50	1,57	2,36	3,93	0,39%	1,57	2,36	3,93	0,39%	0,00
P6	20	50	1,57	2,36	3,93	0,39%	1,57	2,36	3,93	0,39%	0,00
P7	20	50	1,57	2,36	3,93	0,39%	1,57	2,36	3,93	0,39%	0,00
P8	20	60	1,57	9,42	10,99	0,92%	1,57	7,85	9,42	0,79%	1,57
P11	20	60	1,57	3,14	4,71	0,39%	1,57	3,14	4,71	0,39%	0,00
P12	20	60	1,57	3,14	4,71	0,39%	1,57	3,14	4,71	0,39%	0,00
P16	20	76	1,57	3,14	4,71	0,31%	1,57	3,14	4,71	0,31%	0,00
P17	20	76	1,57	3,14	4,71	0,31%	1,57	3,14	4,71	0,31%	0,00
P25	20	50	1,57	2,36	3,93	0,39%	1,57	2,36	3,93	0,39%	0,00
P26	20	50	1,57	2,36	3,93	0,39%	1,57	2,36	3,93	0,39%	0,00
P29	20	50	1,57	2,36	3,93	0,39%	1,57	2,36	3,93	0,39%	0,00
P30	20	50	1,57	2,36	3,93	0,39%	1,57	2,36	3,93	0,39%	0,00
PN1	20	60	1,57	6,28	7,85	0,65%	1,57	5,5	7,07	0,59%	0,78
PN2	20	55	8,04	14,07	22,11	2,01%	4,91	9,82	14,73	1,34%	7,38
PN3	20	40	1,57	2,36	3,93	0,49%	1,57	2,36	3,93	0,49%	0,00
PN4	20	55	3,68	12,27	15,95	1,45%	1,57	7,85	9,42	0,86%	6,53
PN5	20	60	4,02	14,07	18,09	1,51%	4,02	12,06	16,08	1,34%	2,01
PN6	20	52	1,57	2,36	3,93	0,38%	1,57	2,36	3,93	0,38%	0,00
PN7	20	65	1,57	3,14	4,71	0,36%	1,57	3,14	4,71	0,36%	0,00
PN8	20	50	1,57	2,36	3,93	0,39%	1,57	2,36	3,93	0,39%	0,00
PN9	20	50	6,03	6,03	12,06	1,21%	2,45	3,68	6,13	0,61%	5,93
PN10	20	52	1,57	2,36	3,93	0,38%	1,57	2,36	3,93	0,38%	0,00
PN11	20	50	1,57	2,36	3,93	0,39%	1,57	2,36	3,93	0,39%	0,00
PN12	20	50	2,45	3,68	6,13	0,61%	1,57	2,36	3,93	0,39%	2,20
PN13	20	65	1,57	3,14	4,71	0,36%	1,57	3,14	4,71	0,36%	0,00
PN14	20	60	4,91	14,73	19,64	1,64%	3,68	9,82	13,5	1,13%	6,14
PN15	20	55	6,03	12,06	18,09	1,64%	4,02	8,04	12,06	1,10%	6,03
PN16	20	60	1,57	11	12,57	1,05%	1,57	9,42	10,99	0,92%	1,58
PN17	20	70	1,57	3,14	4,71	0,34%	1,57	3,14	4,71	0,34%	0,00
PN18	20	70	1,57	3,14	4,71	0,34%	1,57	3,14	4,71	0,34%	0,00
<b>Totais:</b>					<b>242,46</b>				<b>202,31</b>		<b>40,15</b>

Fonte: (Autores, 2024)

O gráfico da Figura 27 compara a área da seção transversal dos pilares com as áreas de aço para dois valores de resistência característica do concreto ( $f_{ck} = 30$  MPa e  $f_{ck,est} = 37$  MPa). A linha azul indica a área da seção transversal de cada pilar, enquanto as barras vermelhas e verdes representam as áreas de aço correspondentes aos pilares com  $f_{ck}$  de 30 MPa e  $f_{ck,est}$  de 37 MPa, respectivamente. Em muitos casos, a área de aço permanece a mesma para ambos os valores de resistência, o que sugere que o aumento da resistência do concreto não exigiu ajustes na armadura. No entanto, em alguns pilares (por exemplo, PN2, PN4 e PN5), há diferenças notáveis entre as áreas de aço para  $f_{ck} = 30$  MPa e  $f_{ck,est} = 37$  MPa, indicando que o concreto de maior resistência

Figura 27: Comparativo de Área de Seção Transversal e Área de aço dos pilares



permitiu uma redução significativa na área de aço necessária.

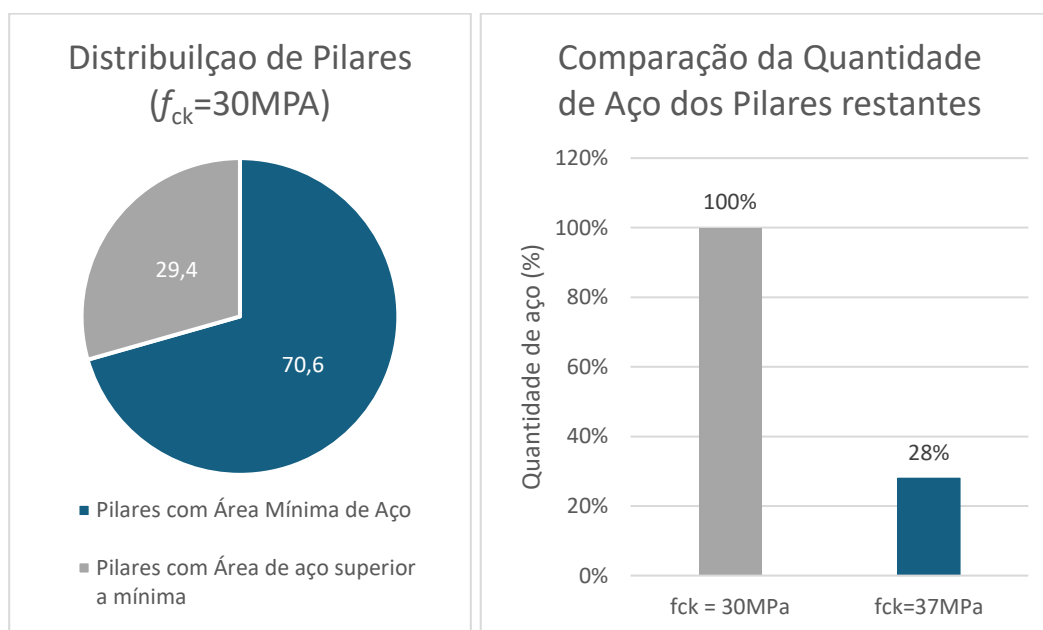
Fonte: (Autores, 2024)

A porcentagem de área de aço em um pilar é definida pela relação entre a área efetiva de aço e a área da seção transversal de concreto do pilar correspondente. No modelo com  $f_{ck}$  de menor resistência, observou-se que 24 dos 34 pilares já atendiam à porcentagem mínima de aço estabelecida pela norma, representando 71% dos pilares do pavimento. Isso significa que esses pilares já estavam utilizando a área de aço mínima exigida por norma. Dessa forma, a

possibilidade de reduzir a quantidade de aço concentra-se apenas nos pilares restantes, que estavam acima da área mínimo de aço no modelo com  $f_{ck}=30\text{MPa}$ .

A análise foi focada nos 29% dos pilares que ainda poderiam ter a área de aço reduzida, já que o uso do  $f_{ck,est}$  não teria impacto na quantidade de aço dos demais pilares, que já atendiam ao limite mínimo exigido pela norma. Assim, a análise considerou apenas 10 pilares.

Figura 28: Gráfico de Comparativo de As dos pilares As > Mínimo



Fonte: (Autores, 2024)

Os resultados mostraram que, para o modelo com  $f_{ck}$  de 37 MPa, seria necessário utilizar apenas 28% da quantidade de aço empregada no modelo com  $f_{ck}$  de 30 MPa. Essa redução significativa no consumo de aço demonstra o impacto direto que o aumento da resistência característica do concreto pode ter na economia de material e na eficiência do projeto.

Embora essa redução já seja substancial, o valor seria ainda mais expressivo se todos os pilares tivessem margem para a diminuição da área de aço. Isso reforça a importância de avanços na área de controle tecnológico da produção de concreto, uma vez que diminuindo a variabilidade do material, torna-se possível otimizar o uso de insumos fundamentais para construção civil.

## 4.5 DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS

Foram obtidos os valores correspondentes aos deslocamentos horizontais da estrutura, tanto devido às **imperfeições globais** quanto à **não linearidade geométrica**. Esses deslocamentos refletem o comportamento da estrutura sob diferentes influências, sendo fundamental entender a distinção entre ambos os efeitos.

As imperfeições globais referem-se às pequenas irregularidades ou desvios na geometria da estrutura em relação ao projeto idealizado. Esses desvios podem ocorrer devido a erros de execução, tolerâncias construtivas ou pequenas inclinações iniciais dos elementos. Como resultado, essas imperfeições geram deslocamentos adicionais na estrutura quando ela é carregada, influenciando principalmente a estabilidade global.

Por outro lado, a não linearidade geométrica ocorre quando as deformações da estrutura são grandes o suficiente para que as equações de equilíbrio precisem ser reavaliadas na configuração deformada. Ou seja, as forças internas e os esforços precisam ser recalculados levando em conta a geometria deformada da estrutura, o que pode amplificar os deslocamentos e os efeitos de segunda ordem. Este fenômeno é particularmente relevante em estruturas esbeltas ou quando submetidas a cargas próximas de sua capacidade de carga crítica.

Assim, enquanto os deslocamentos decorrentes das imperfeições globais estão relacionados a desvios iniciais na forma da estrutura, os deslocamentos causados pela não linearidade geométrica resultam da interação entre a deformação da estrutura e os esforços internos. Ambos os fatores devem ser considerados para uma análise precisa e realista do comportamento estrutural, especialmente em projetos de estruturas de grande porte ou de alta esbeltez.

Como observado nos resultados da tabela abaixo, obtivemos reduções nos deslocamentos horizontais devido ao imperfeições globais para os modelos com concreto de maior resistência, conforme a Tabela 13.

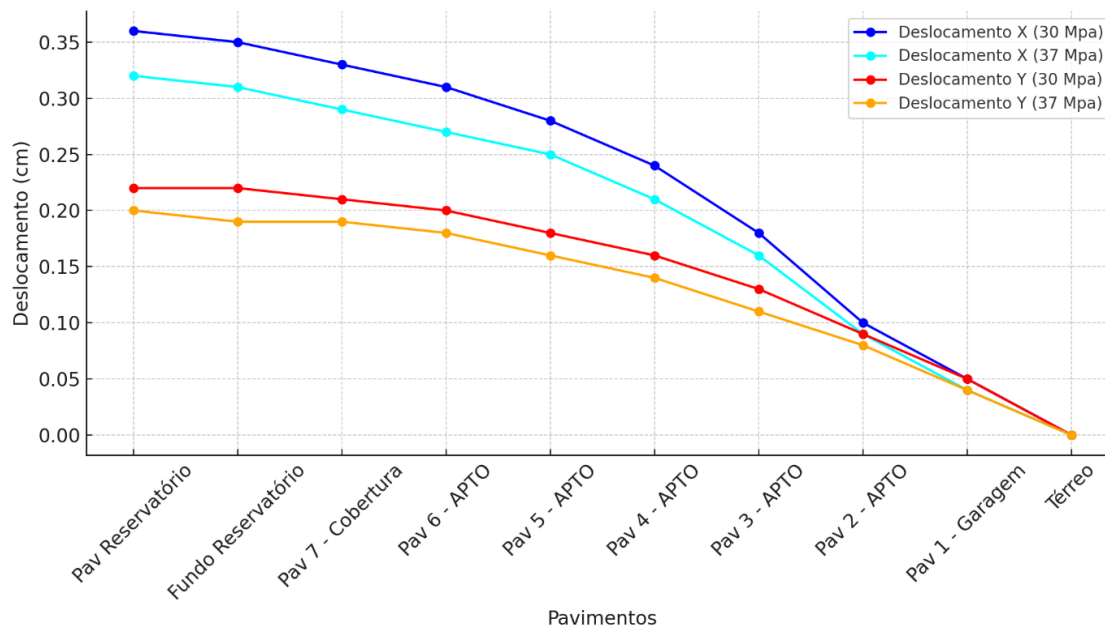
Tabela 13: Deslocamento Horizontal dos Pilares - Imperfeições Globais

Pavimentos	Deslocamento (cm)		Redução	Deslocamento (cm)		Redução
	X			Y		
	30 Mpa	37 Mpa		30 Mpa	37 Mpa	
Pav Reservatório	0,36	0,32	11,11%	0,22	0,20	9,09%
Fundo Reservatório	0,35	0,31	11,43%	0,22	0,19	13,64%
Pav 7 - Cobertura	0,33	0,29	12,12%	0,21	0,19	9,52%
Pav 6 - APTO	0,31	0,27	12,90%	0,20	0,18	10,00%
Pav 5 - APTO	0,28	0,25	10,71%	0,18	0,16	11,11%
Pav 4 - APTO	0,24	0,21	12,50%	0,16	0,14	12,50%
Pav 3 - APTO	0,18	0,16	11,11%	0,13	0,11	15,38%
Pav 2 - APTO	0,10	0,09	10,00%	0,09	0,08	11,11%
Pav 1 - Garagem	0,05	0,04	20,00%	0,05	0,04	20,00%
Térreo	0	0	0,00%	0	0	0,00%

Fonte: (Autores, 2024)

O gráfico abaixo compara os deslocamentos horizontais dos pilares em diferentes pavimentos, considerando duas resistências de concreto (30 MPa e 37 MPa), nos eixos X e Y. É possível observar que os deslocamentos tendem a ser maiores nos pavimentos superiores e vão reduzindo à medida que descem até o térreo, onde não há deslocamento.

Figura 29: Gráfico de Deslocamento Horizontal dos Pilares (Imperfeições Globais)



Fonte: (Autores, 2024)

A linha azul e ciano representam os deslocamentos no eixo X para os concretos de 30 MPa e 37 MPa, respectivamente, enquanto a linha vermelha e laranja representa o eixo Y para as mesmas resistências.

Como observado nos resultados na tabela abaixo, obtivemos também reduções nos deslocamentos horizontais devido a não linearidade geométrica para os modelos com concreto de maior resistência.

Tabela 14: Deslocamento Horizontal dos Pilares - Não linearidade Geométrica

Dados				Classe de Resistência - Fck = 30 Mpa			Classe de Resistência - Fck = 37 Mpa		
				Combinação: 1.4G1+1.4G2+0.9P+1.4Q+0.84V2+0.48D2			Combinação: 1.4G1+1.4G2+0.9P+1.4Q+0.84V2+0.48D2		
Pavimento	Altura	Carga	Carga	Deslocamento	Momento	$\gamma_z$	Deslocamento	Momento	$\gamma_z$
	relativa	vertical	horizontal	horizontal	2a. ordem		horizontal	2a. ordem	
	(cm)	(tf)	(tf)	(cm)	(kgf.m)		(cm)	(kgf.m)	
Pav Reservatório	2814.00	33.31	0.45	0.88	293.39	1.16	0.78	259.47	1.14
Fundo Reservatório	2634.00	106.10	0.99	0.84	895.37		0.75	792.20	
Pav 7 - Cobertura	2414.00	536.70	1.20	0.79	4236.16		0.70	3751.96	
Pav 6 - APTO	2119.00	777.41	1.69	0.73	5649.39		0.64	5001.67	
Pav 5 - APTO	1824.00	782.96	1.61	0.65	5064.31		0.57	4482.31	
Pav 4 - APTO	1529.00	783.89	1.53	0.55	4348.02		0.49	3847.06	
Pav 3 - APTO	1234.00	783.10	1.42	0.44	3443.68		0.39	3045.34	
Pav 2 - APTO	939.00	933.81	1.28	0.21	1917.07		0.18	1692.33	
Pav 1 - Garagem	644.00	844.99	1.13	0.04	366.08		0.04	323.04	
Térreo	324.00	238.02	0.13	0.01	32.65		0.01	28.94	
<b>TOTAL</b>					<b>26246.12</b>			<b>23224.34</b>	

Fonte: (Autores, 2024)

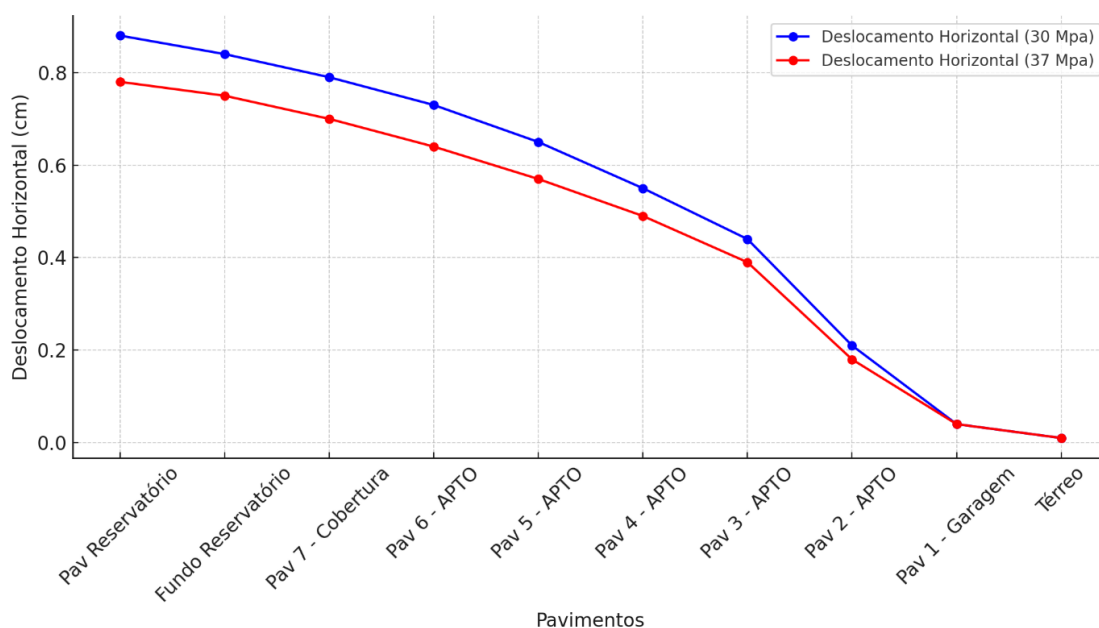
A redução dos deslocamentos horizontais devido a não linearidade geométrica está diretamente relacionada ao parâmetro  $\gamma_z$ , que é um dos principais indicadores da estabilidade global de uma estrutura. O coeficiente  $\gamma_z$  representa a relação entre os efeitos de 2ª ordem (gerados por deslocamentos laterais) e os esforços de 1ª ordem. Sua utilização é essencial para verificar a estabilidade das

edificações, principalmente em situações em que há deslocamentos laterais significativos, como em prédios altos ou estruturas esbeltas.

Quando o valor de  $\gamma_z$  se aproxima de 1, isso indica que os efeitos de 2ª ordem são muito pequenos ou desprezíveis. No entanto, conforme  $\gamma_z$  aumenta, os efeitos de 2ª ordem se tornam mais significativos, o que exige ajustes no dimensionamento dos elementos estruturais, principalmente dos pilares. Um valor elevado de  $\gamma_z$  exige que os esforços de 2ª ordem sejam levados em consideração, resultando em uma maior necessidade de reforço dos pilares para resistirem aos esforços adicionais.

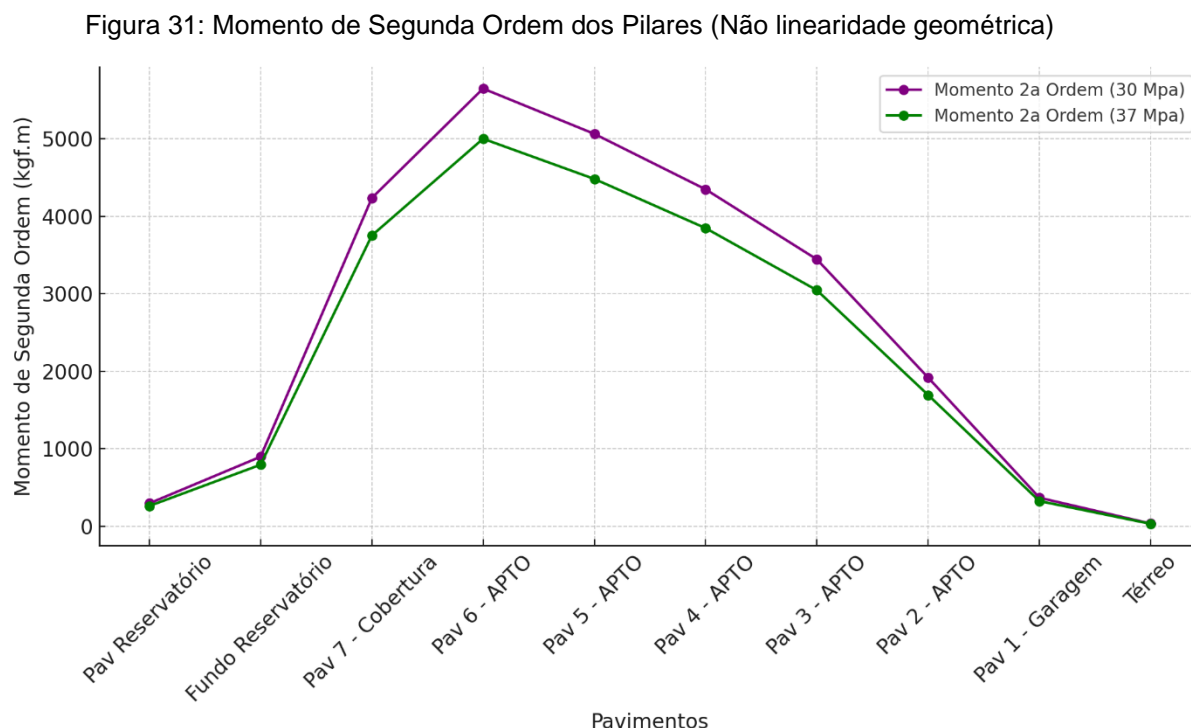
Portanto, ao se reduzir os deslocamentos horizontais com o uso de materiais de maior resistência, o valor de  $\gamma_z$  tende a diminuir, indicando uma menor contribuição dos efeitos de 2ª ordem. Isso influencia diretamente o dimensionamento dos pilares, pois, com um  $\gamma_z$  mais baixo, os esforços adicionais que eles precisam suportar são reduzidos, permitindo um dimensionamento mais econômico e racional. Em contrapartida, em situações em que o  $\gamma_z$  é alto, é necessário recalculer os esforços de momento considerando os efeitos de segunda ordem, o que pode levar a pilares mais robustos e armaduras mais densas para garantir a segurança da estrutura.

Figura 30: Deslocamento Horizontal dos Pilares (Não linearidade geométrica)



Fonte: (Autores, 2024)

Como mostrado na Figura 30, observou-se uma redução nas três principais variáveis em função do aumento da resistência dos materiais. O coeficiente  $\gamma_z$  passou de 1,16 para 1,14, aproximando-se de um comportamento típico de uma estrutura com nós fixos. Além disso, os esforços de momento de 2ª ordem e os deslocamentos horizontais também apresentaram redução, conforme já destacado, influenciando diretamente o dimensionamento dos pilares.



Fonte: (Autores, 2024)

O gráfico acima mostra os deslocamentos horizontais dos pilares com base na não linearidade geométrica, considerando diferentes resistências de concreto (30 MPa e 37 MPa). Observa-se que os deslocamentos são maiores nos pavimentos superiores, diminuindo progressivamente à medida que se aproximam do térreo, onde o deslocamento é quase nulo. Observa-se que os momentos aumentam à medida que se desce pelos pavimentos, refletindo o aumento de carga sobre os pilares.

Essa situação apresenta tanto vantagens quanto desvantagens para a estrutura estudada. Estruturas menos deformáveis tendem a ser menos suscetíveis a patologias relacionadas à deformação excessiva, como fissuras e trincas, que podem comprometer a durabilidade e aumentar a necessidade de manutenção

ao longo do tempo, conforme apontado por Ghavami e El Debs (2009). Porém esbarramos na discussão sobre o consumo de sobressalente de material, já que a estrutura já estava seguindo as normativas no modelo de 30 MPa.

#### 4.6 DOSAGEM DO CONCRETO

Para concretos do estudo obtivemos as seguintes dosagens representadas na Tabela 15.

Tabela 15: Dosagem dos concretos de 30 MPa e 37 MPa

DOSAGEM PELO MÉTODO ABCP		Resistência de dosagem	
Materiais	Especificação	30 MPa	37 MPa
Tipo de Cimento	CP V-ARI	397 kg	443 kg
Agregado Graúdo	Brita 1	0,542 m <sup>3</sup>	0,515 m <sup>3</sup>
Agregado Miúdo	Areia Média (MF2.6)	0,701 m <sup>3</sup>	0,701 m <sup>3</sup>
Slump	121 a 150mm		

Fonte: (Autores, 2024)

Para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto com resistência característica de 28 dias ( $f_{ck} = 30$  MPa), foi utilizado um consumo de 397 kg de cimento. Já para um concreto com  $f_{ck,est} = 37$  MPa, o consumo aumentou para 443 kg, representando uma diferença de 46 kg de cimento entre os dois traços. Considerando o volume total de concreto dos pilares, que é de 84,1 m<sup>3</sup>, isso resulta em uma quantidade sobressalente de 3.868,6 kg de cimento somente nos pilares.

### 5. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou que o aumento da resistência do concreto tem um impacto direto no consumo de materiais em pilares de concreto armado em edifícios de múltiplos pavimentos. Elevar a resistência do concreto usado na dosagem resulta em um material com propriedades superiores às previstas no projeto, o que, por sua vez, aumenta o consumo de cimento e reduz a necessidade de aço. Essa discrepância pode levar a uma utilização ineficiente dos recursos, com excesso de cimento e armaduras subutilizadas na estrutura.

Esses resultados ressaltam a importância da necessidade de avanços tecnológicos na área de controle e produção de concreto, afim de mitigar a

variabilidade presente no mesmo, pois ao longo de 10 anos ainda se utiliza o mesmo desvio padrão para o cálculo de dosagem do concreto.

Uma vez mitigadas as variabilidades na produção e aplicação do concreto, torna-se possível reavaliar os coeficientes de ponderações no cálculo de dosagem do concreto.

## 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cálculo de  $f_{ck}$  para dosagem de concreto é uma variável de processo chave. Se definido de forma inadequada, pode levar ao consumo excessivo e desperdício de recursos. Portanto, o desvio padrão (DP) deve ser ajustado com a variabilidade nos resultados de  $f_{ck,est}$  levada em consideração para que a dosagem de concreto seja ajustada com precisão, reduzindo o consumo de cimento, mantendo a segurança estrutural. Um desvio padrão menor pode permitir uma aplicação ótima para eficiência de material, o que geraria menos desperdício, bem como os custos que todas as partes relacionadas (empresas de concreto, construtoras, consumidores finais).

Não apenas em termos de economia, mas essa abordagem ajuda a oferecer um produto de baixo custo. No entanto, é importante considerar que estruturas com maior rigidez estrutural são menos deformáveis, apesar de exigirem um custo maior, oferecem vantagens significativas, como maior durabilidade e menor suscetibilidade aos agentes agressivos. Esses benefícios podem compensar os custos adicionais, proporcionando uma estrutura mais robusta e preparada para possíveis futuras ampliações.

Portanto, encontrar um equilíbrio entre a resistência do concreto, o consumo de materiais e a eficiência econômica é fundamental. Ajustar o  $S_d$  no cálculo do  $f_{ck}$  pode levar a soluções mais econômicas, beneficiando todos os envolvidos no processo de construção e promovendo uma prática mais consciente e eficiente. Essa abordagem não apenas otimiza o uso dos recursos, mas também contribui para a construção de estruturas mais duráveis e eficientes, alinhadas com as necessidades e desafios do setor.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aprofundar o entendimento e aprimorar a prática relacionada ao impacto da resistência do concreto no consumo de materiais, várias abordagens podem ser exploradas em trabalhos futuros:

- **Análise de Variações Regionais e Econômicas:** Investigar como as variações nos preços de cimento e aço em diferentes regiões afetam o equilíbrio entre resistência do concreto e consumo de materiais. Estudos regionais podem fornecer insights valiosos sobre como ajustar as práticas de dosagem para otimizar os custos e recursos em diferentes contextos econômicos.
- **Avaliação de Métodos Alternativos de Dosagem:** Explorar e comparar diferentes métodos de dosagem de concreto que considerem a resistência, o desvio padrão ( $S_d$ ) e outras variáveis. Investigar a eficácia de métodos menos conservadores e alternativas que possam melhorar a eficiência na utilização de cimento e aço, sem comprometer a segurança estrutural.
- **Impacto Ambiental de Diferentes Traços de Concreto:** Realizar uma análise detalhada dos impactos ambientais associados aos diferentes níveis de resistência do concreto. Avaliar como ajustes na dosagem podem reduzir as emissões de carbono e outros impactos ambientais, contribuindo para práticas de construção mais sustentáveis.
- **Estudos de Caso em Edificações de Diferentes Escalas:** Conduzir estudos de caso em edifícios de diferentes escalas e tipos para entender melhor como as alterações na resistência do concreto influenciam o consumo de materiais em contextos variados. Isso pode ajudar a validar e ajustar as recomendações para diferentes tipos de construção.

Essas sugestões podem proporcionar uma compreensão mais profunda dos desafios e oportunidades na dosagem de concreto e contribuir para o desenvolvimento de práticas de construção mais eficientes e sustentáveis.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** ABNT NBR 7480: Barra de aço para concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 2024.

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

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** ABNT NBR 6120:2023 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2023.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** ABNT NBR 6123:2023 – Procedimento para cálculo do efeito do vento em edificações. Rio de Janeiro, 2023.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 16697: Placas cerâmicas: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** ABNT NBR 12655: Concreto – Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2015.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** ABNT NBR 8953: Concreto para fins estruturais — Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 2015.

**BASTOS, Paulo.** Fundamentos do Concreto Armado. Universidade Estadual Paulista, 2023.

**NEVILLE, A. M.** Propriedades do concreto. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

**DEVORE, J. L.** Estatística para Engenharia, Probabilidade e Ciências. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

**MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.** Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2014.

**O'BRIEN, E. J.; MCNULTY, P. J.** Concrete Quality Control: A Handbook for the Concrete Producer. New York: Wiley, 2012.

**GHAVAMI, K.; EL DEBS, M. K.** Patologias em estruturas de concreto armado e protendido. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

**HELENE, Paulo R. L.; TERZIAN, P.** Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo: Pini, 1993.

**BUCHER, H. R. E.** Estimativa da resistência à compressão de concretos executados com cimento nacional em função da relação a/c. São Paulo: ABCP, 1989.

**MENDES, Johnny Gonçalves.** Controle tecnológico do concreto. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, ano 06, ed. 07, vol. 07, p. 49-61, jul. 2021.

**KAZAZ, A.; ULUBEYLI, S.; ARSLAN, A.** Quantification of fresh ready-mix concrete waste: order and truck-mixer based planning coefficients. International Journal of Construction Management, v. 20, n. 1, p. 53–64, 2018.

**CABRAL, B. L. P.; SILVA, W. Q.** Influência da Resistência Característica à Compressão do Concreto (fck) na Análise de Deformação da Estrutura. ITEGAM-JETIA, v. 5, n. 18, 2019.

**CECCON, Jorge Luiz.** Análise dos efeitos de segunda ordem em pilares solicitados a flexão oblíqua composta. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. DOI: 10.11606/T.3.2008.tde-07112008-105053. Acesso em: 16 set. 2024.

**FERREIRA, A. M.** Testes de Normalidade: Ajustamento à Função de Distribuição Normal. Lisboa: Edições Sílabo, 2018.

**PINTO, R. D.** Não-linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado. São Carlos, SP, 1997. Disponível em: [http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/1997ME\\_RivellidaSilvaPinto.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/1997ME_RivellidaSilvaPinto.pdf). Acesso em: 24 set. 2024.

**SILVA FILHO, L. C. P; HELENE, P.** Análise de Estruturas de Concreto com problemas de resistência e fissuração. In: ISAIA, G. C. (Ed). Concreto: ciência e tecnologia. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1129-1174.

**COUTO, J. A. S.; CARMINATTI, R. L.; NUNES, R. R. A.; MOURA, R. C. A.** O concreto como material de construção. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - Sergipe, v. 1, n. 3, p. 49–58, 2013.

**BOGGIO, A.; ALEGRE, P.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/12575/000628682.pdf?sequence=1>. Acesso em: 16 set. 2024.

**LOTHENBACH, B., et al.** Cement and Concrete Research, 41(7), 671-678, 2011.

**INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON).** A influência do cimento na resistência e no custo do concreto. São Paulo: IBRACON, 2020.

**ALTOQI.** Dimensionamento de pilares pelo método do pilar-padrão com curvatura aproximada. Suporte AltoQi, 2021. Disponível em: <https://suporte.altoqi.com.br/hc/pt-br/articles/115002028554>. Acesso em: 5 out. 2024.

APENDICE A – Resumo expandido de resultados.

<b>Resumo expandido de resultados</b>							
	<b>Fck20(real)</b>	<b>Fck25(real)</b>	<b>Fck30(real)</b>	<b>Fck35(real)</b>	<b>Fck40(real)</b>	<b>Fck45(real)</b>	<b>Fck50(real)</b>
<b>2013</b>							
mai/13	-	24,22	-	-	-	-	-
jun/13	25,51	27,76	-	-	-	-	-
jul/13	24,64	31,78	-	-	-	-	-
ago/13	32,20	39,24	39,76	46,09	-	-	-
set/13	34,04	36,01	39,72	47,74	54,57	-	-
out/13	24,99	30,91	37,15	39,10	-	-	-
nov/13	25,15	32,79	39,27	41,77	45,86	-	-
dez/13	24,27	32,52	36,03	42,91	45,11	-	-
<b>MÉDIA</b>	<b>27,26</b>	<b>31,90</b>	<b>38,39</b>	<b>43,52</b>	<b>48,51</b>	-	-
<b>2014</b>							
jan/14	26,54	30,27	35,87	42,12	46,00	-	-
fev/14	23,97	30,15	35,00	42,51	-	-	-
mar/14	25,23	30,51	36,23	41,94	-	-	-
abr/14	24,67	30,58	34,79	41,18	42,81	-	-
mai/14	25,58	30,98	36,31	40,92	43,93	-	-
jun/14	26,57	33,02	36,56	41,45	44,70	-	-
jul/14	26,03	32,97	35,56	41,30	44,06	-	-
ago/14	21,44	25,27	31,39	35,63	51,02	-	-
set/14	21,94	27,42	33,73	35,48	41,99	-	-
<b>MÉDIA</b>	<b>24,66</b>	<b>30,13</b>	<b>35,05</b>	<b>40,28</b>	<b>44,93</b>		
<b>2015</b>							
jan/15	25,12	27,47	36,79	37,30	36,79	-	-
fev/15	26,07	35,27	39,32	39,80	45,15	-	-
mar/15	25,03	33,60	42,03	43,63	52,60	-	-
abr/15	24,05	33,01	37,16	43,58	47,40	-	-
mai/15	26,60	33,30	39,16	44,57	49,46	-	-
jun/15	25,78	29,83	36,91	42,02	45,04	-	-
jul/15	27,68	30,28	34,69	38,51	43,93	-	-
ago/15	24,24	31,15	37,14	39,11	45,84	-	-
set/15	24,51	26,92	35,72	40,68	43,47	-	-
out/15	25,52	27,61	36,28	41,60	43,32	-	-
nov/15	27,38	26,74	37,00	41,76	46,42	-	-
dez/15	25,77	28,36	36,61	42,51	46,44	-	-
<b>MÉDIA</b>	<b>25,65</b>	<b>30,29</b>	<b>37,40</b>	<b>41,26</b>	<b>45,49</b>		

<b>2016</b>							
jan/16	27,01	28,82	37,36	44,10	52,58	-	-
fev/16	25,91	33,63	37,84	44,08	-	-	-
mar/16	27,18	32,17	37,30	43,99	-	-	-
abr/16	22,80	29,57	35,49	40,12	-	-	-
mai/16	22,82	30,66	34,72	42,57	-	-	-
jun/16	22,93	30,04	33,75	40,70	-	-	-
jul/16	28,83	31,50	39,55	46,77	-	-	-
ago/16	30,71	34,45	40,52	50,52	-	-	-
set/16	32,38	28,35	36,53	46,70	-	-	-
out/16	36,55	31,32	37,24	47,47	-	-	-
nov/16	33,90	31,81	34,73	47,43	-	-	-
dez/16	33,20	26,17	33,96	42,88	-	-	-
<b>MÉDIA</b>	<b>28,68</b>	<b>30,71</b>	<b>36,58</b>	<b>44,78</b>	<b>52,58</b>		
<b>2017</b>							
jan/17	37,14	33,89	40,99	55,30	-	-	-
fev/17	28,99	31,78	42,16	50,86	-	-	-
mar/17	27,11	29,56	37,00	45,44	-	-	-
abr/17	28,60	32,42	38,22	46,23	53,89	52,5	-
mai/17	30,19	38,51	45,03	52,38	-	-	-
jun/17	31,01	33,43	41,71	46,04	-	-	-
jul/17	41,71	34,26	38,82	44,32	-	-	-
ago/17	40,67	-	-	-	-	-	-
set/17	40,97	34,25	35,62	48,21	49,08	-	-
out/17	35,07	41,32	42,32	46,78	53,70	-	-
nov/17	44,15	35,56	38,06	48,13	48,32	-	-
dez/17	43,16	32,06	37,58	42,35	-	-	-
<b>MÉDIA</b>	<b>35,73</b>	<b>34,28</b>	<b>39,77</b>	<b>47,82</b>	<b>51,25</b>	<b>52,5</b>	
<b>2018</b>							
jan/18	38,16	35,93	39,05	42,58	-	-	-
fev/18	32,64	29,50	34,36	43,61	-	-	-
mar/18	31,03	32,27	38,25	44,00	-	-	-
abr/18	28,88	28,62	36,43	45,40	44,77	-	-
mai/18	24,59	28,51	32,73	38,96	-	-	-
jun/18	26,00	34,38	33,28	43,99	45,69	-	-
jul/18	26,96	36,36	37,61	48,32	-	-	-
ago/18	26,84	28,54	36,55	42,91	-	-	-
set/18	24,48	31,95	33,92	42,14	50,34	-	-
out/18	25,50	30,15	33,49	35,83	-	-	-
nov/18	27,01	32,33	34,90	40,41	54,40	-	-
dez/18	26,52	32,50	38,06	42,10	-	-	-
<b>MÉDIA</b>	<b>28,22</b>	<b>31,75</b>	<b>35,72</b>	<b>42,52</b>	<b>48,80</b>		
<b>2019</b>							
jan/19	28,12	33,29	39,77	44,90	-	-	-
fev/19	22,03	28,73	34,17	40,28	-	-	-
mar/19	34,75	33,08	38,69	41,95	48,04	-	-
abr/19	31,52	30,55	38,62	42,88	47,66	-	-
mai/19	21,30	33,62	39,93	42,00	-	-	-
jun/19	24,19	33,52	35,26	42,53	-	-	-
jul/19	28,58	38,10	42,04	43,95	53,15	-	-
ago/19	33,75	36,55	44,00	46,26	-	-	-
set/19	37,70	32,86	41,10	44,75	-	-	-
out/19	32,46	35,85	38,33	42,15	50,03	-	-
nov/19	37,14	33,51	34,33	44,62	48,27	-	-
dez/19	41,42	36,77	39,27	45,45	49,69	-	-
<b>MÉDIA</b>	<b>31,08</b>	<b>33,87</b>	<b>38,79</b>	<b>43,48</b>	<b>49,47</b>		
<b>2020</b>							
jan/20	23,15	28,96	37,78	40,19	48,17	-	-
fev/20	26,71	28,21	39,14	39,45	48,18	-	-
mar/20	-	27,54	34,16	38,48	41,94	-	-
abr/20	-	30,13	37,12	42,70	50,30	-	-
mai/20	-	26,85	33,90	38,77	43,76	-	-
jun/20	30,58	30,23	35,10	43,94	51,52	-	-
jul/20	21,67	30,54	38,33	39,69	48,20	-	-

ago/20	30,23	32,58	34,56	39,27	44,60	-	-
set/20	31,04	32,98	33,89	41,90	48,85	-	-
out/20	29,51	34,26	36,36	42,40	46,11	-	-
nov/20	35,96	30,05	35,46	41,22	43,91	-	-
dez/20	37,11	35,56	40,30	46,83	52,14	-	-
<b>MÉDIA</b>	<b>29,55</b>	<b>30,66</b>	<b>36,34</b>	<b>41,24</b>	<b>47,31</b>		
<b>2021</b>							
jan/21	25,40	34,07	40,60	42,99	46,22	-	-
fev/21	22,62	31,12	30,74	37,52	44,71	-	-
mar/21	28,76	28,56	34,64	41,34	47,91	-	-
abr/21	28,22	-	49,10	50,06	59,59	-	-
mai/21	-	31,83	40,45	44,55	53,87	-	-
jun/21	23,18	28,98	33,51	37,79	44,38	-	-
jul/21	22,63	30,23	32,83	40,24	48,03	-	-
ago/21	32,39	33,57	38,82	45,53	55,09	-	-
set/21	-	35,79	42,45	42,61	49,00	-	-
out/21	26,10	28,88	38,39	43,53	49,58	-	-
nov/21	20,37	24,95	35,59	41,03	49,23	-	-
dez/21	-	32,59	37,89	40,78	49,71	-	-
<b>MÉDIA</b>	<b>25,52</b>	<b>30,96</b>	<b>37,92</b>	<b>42,33</b>	<b>49,78</b>		
<b>2022</b>							
jan/22	20,75	32,30	35,86	41,18	49,15	-	-
fev/22	27,75	29,83	36,54	42,78	50,30	-	-
mar/22	28,01	31,48	38,74	46,53	51,15	-	-
abr/22	29,62	27,47	37,38	43,13	48,20	-	-
mai/22	27,16	30,56	36,76	43,63	46,24	-	-
jun/22	-	28,33	35,91	42,73	46,69	-	61,1
jul/22	-	28,23	37,45	38,65	44,12	-	-
ago/22	-	29,40	38,93	42,14	47,92	-	-
set/22	25,21	28,56	35,03	41,31	45,03	-	-
out/22	-	-	-	-	-	-	-
nov/22	-	31,04	36,36	40,47	46,81	-	-
dez/22	23,36	30,38	36,29	41,52	50,47	-	-
<b>MÉDIA</b>	<b>25,98</b>	<b>29,78</b>	<b>36,84</b>	<b>42,19</b>	<b>47,82</b>		<b>61,1</b>
<b>2023</b>							
jan/23	20,98	27,00	34,85	41,60	43,66	-	-
fev/23	29,31	27,94	37,18	42,32	47,06	-	-
mar/23	18,33	28,68	33,89	40,31	50,45	-	-
abr/23	21,97	29,00	36,24	41,36	45,19	-	-
mai/23	-	32,20	37,61	41,35	47,30	-	-
jun/23	-	29,44	38,67	38,63	44,95	-	-
jul/23	24,54	30,63	39,39	38,53	37,30	-	-
ago/23	33,64	37,65	39,34	44,95	54,33	-	-
<b>MÉDIA</b>	<b>24,80</b>	<b>30,32</b>	<b>37,15</b>	<b>41,13</b>	<b>46,28</b>		

## APENDICE B – Resumo dos Resultados Estatísticos

Resumo	Fck 20(real)	Variância	D.P	Fck 25(real)	Variância	D.P	Fck 30(real)	Variância	D.P
2013	27,26	16,49	4,06	31,90	21,30	4,62	38,39	2,88	1,70
2014	24,66	3,56	1,89	30,13	6,06	2,46	35,05	2,68	1,64
2015	25,65	1,34	1,16	30,29	8,73	2,95	37,40	3,74	1,93
2016	28,68	22,01	4,69	30,71	5,32	2,31	36,58	4,59	2,14
2017	35,73	39,97	6,32	34,28	10,69	3,27	39,77	8,11	2,85
2018	28,22	15,83	3,98	31,75	7,73	2,78	35,72	4,85	2,20
2019	31,08	40,94	6,40	33,87	7,02	2,65	38,79	9,05	3,01
2020	29,55	26,65	5,16	30,66	7,28	2,70	36,34	4,75	2,18
2021	25,52	14,27	3,78	30,96	9,38	3,06	37,92	24,84	4,98
2022	25,98	9,45	3,07	29,78	2,33	1,53	36,84	1,44	1,20
2023	24,80	32,60	5,71	30,32	11,32	3,36	37,15	4,15	2,04
<b>Média</b>	<b>27,92</b>	<b>20,28</b>	<b>4,20</b>	<b>31,33</b>	<b>8,83</b>	<b>2,88</b>	<b>37,27</b>	<b>6,46</b>	<b>2,35</b>

Resumo	Fck 35(real)	Variância	D.P	Fck 40(real)	Variância	D.P	Fck 45(real)	Fck 50(real)
2013	43,52	11,85	3,44	48,51	27,69	5,26	-	-
2014	40,28	7,41	2,72	44,93	8,86	2,98	-	0,00
2015	41,26	4,99	2,23	45,49	14,47	3,80	-	0,00
2016	44,78	9,38	3,06	52,58	0,00	-	-	0,00
2017	47,82	14,09	3,75	51,25	8,75	2,96	52,50	0,00
2018	42,52	9,99	3,16	48,80	19,88	4,46	-	0,00
2019	43,48	3,14	1,77	49,47	4,13	2,03	-	0,00
2020	41,24	6,07	2,46	47,31	10,59	3,25	-	0,00
2021	42,33	11,83	3,44	49,78	19,66	4,43	-	0,00
2022	42,19	4,02	2,00	47,82	5,24	2,29	-	61,10
2023	41,13	4,28	2,07	46,28	24,89	4,99	-	0,00
<b>Média</b>	<b>42,78</b>	<b>7,91</b>	<b>2,74</b>	<b>48,38</b>	<b>13,10</b>	<b>3,65</b>	<b>52,50</b>	<b>6,11</b>

Fonte: (Autores, 2024)