



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

PEDRO LUCAS MOREIRA FERNANDES

**ANÁLISE DO IMPACTO DO EFEITO ESCALA EM CORPOS DE PROVA DE
CONCRETO COM TAMANHOS DIFERENTES E MESMA PROPORÇÃO**

PAU DOS FERROS

2026

PEDRO LUCAS MOREIRA FERNANDES

**ANÁLISE DO IMPACTO DO EFEITO ESCALA EM CORPOS DE PROVA DE
CONCRETO COM TAMANHOS DIFERENTES E MESMA PROPORÇÃO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Gustavo Luz Xavier da Costa, Prof. Dr.

Coorientador: Vinicius Navarro Varela Tinoco, Me.

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F363a Fernandes, Pedro Lucas Moreira.
Análise do impacto do efeito escala em corpos
de prova de concreto com tamanhos diferentes e
mesma proporção / Pedro Lucas Moreira Fernandes. -
2026.
50 f. : il.

Orientador: Gustavo Luz Xavier da Costa.
Coorientador: Vinicus Navarro Varela Tinoco.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2026.

1. Concreto. 2. Efeito escala. 3. Ensaio de
compressão. 4. Mecânica da fratura. 5. Dosagem de
concreto. I. Costa, Gustavo Luz Xavier da,
orient. II. Tinoco, Vinicus Navarro Varela, co-
orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PEDRO LUCAS MOREIRA FERNANDES

**ANÁLISE DO IMPACTO DO EFEITO ESCALA EM CORPOS DE PROVA DE
CONCRETO COM TAMANHOS DIFERENTES E MESMA PROPORÇÃO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 03 / 07 / 2026

BANCA EXAMINADORA

Gustavo Luz Xavier da Costa, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Vinicius Navarro Varela Tinoco, Eng. Civil (UFERSA)
Membro Examinador

Matheus Fernandes de Araujo Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Paulo Henrique Araujo Bezerra, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me dar saúde, discernimento e por colocar em meu caminho pessoas que tornaram essa conquista possível.

Necessito agradecer à minha família que, ao longo de toda a minha vida, me apoiou e me mostrou qual caminho eu deveria seguir, tudo o que sou hoje devo a vocês. Deixo um agradecimento especial à minha avó, a qual tenho o privilégio de chamar de mãe, por me educar e por priorizar minha educação em detrimento de suas próprias necessidades.

À minha namorada e futura esposa, por ser meu porto seguro, por compartilhar todos os momentos comigo, por celebrar as minhas conquistas e por alegrar os meus dias. Agradeço por toda a esperança depositada em mim, sendo sempre a primeira a acreditar na minha capacidade e a me incentivar em cada passo.

Ao Prof. Dr. Gustavo Luz Xavier Da Costa, meu orientador, pela confiança, por todo o conhecimento compartilhado e pelas valiosas correções visando contribuir com a qualidade deste trabalho.

Ao meu coorientador e técnico, Me. Vinicius Navarro Varela Tinoco, pelo auxílio no planejamento, na execução e nas posteriores correções das práticas laboratoriais.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e a todo o corpo docente do campus de Pau dos Ferros, pelos ensinamentos de excelência que contribuíram para o meu aprendizado e desenvolvimento pessoal e profissional.

Por fim, aos meus amigos e colegas de turma, por tornarem os dias de graduação mais leves e por todo o companheirismo desde o primeiro dia de aula.

EPÍGRAFE

*A engenharia não é apenas o estudo do
sucesso, é o estudo das falhas.*
(Henry Petroski)

RESUMO

Este trabalho investigou o efeito escala na resistência à compressão do concreto por meio de ensaios laboratoriais e confronto com os modelos teóricos da mecânica da fratura. Foram analisados corpos de prova cilíndricos, geometricamente semelhantes, com diâmetros de 50 mm, 100 mm e 150 mm, submetidos ao ensaio de compressão axial. A metodologia compreendeu a dosagem empírica do concreto pelo método ABCP e a ruptura por ensaio de compressão axial dos espécimes. Os resultados experimentais indicaram uma redução da tensão nominal de ruptura de aproximadamente 18,4% entre os diâmetros de 100 mm (27,65 MPa) e 150 mm (22,56 MPa), comportamento que corrobora a previsão energética postulada por Bažant. Entretanto, a resistência média obtida para o diâmetro de 50 mm (24,72 MPa) foi inferior à do diâmetro de 100 mm, rompendo a tendência monotônica prevista. Essa divergência é atribuída a fatores experimentais, como a elevada relação superfície/volume e o efeito parede nos corpos de prova de menor dimensão, sugerindo a necessidade de ajustes metodológicos para estudos futuros.

Palavras-chave: concreto; efeito escala; ensaio de compressão; mecânica da fratura; dosagem do concreto.

ABSTRACT

This study investigated the size effect on the compressive strength of concrete through laboratory tests and a comparison with theoretical fracture mechanics models. Geometrically similar cylindrical specimens with diameters of 50 mm, 100 mm, and 150 mm were analyzed under axial compression. The methodology involved empirical concrete mix design using the ABCP method and axial compression testing to failure. Experimental results showed a reduction in nominal failure stress of approximately 18.4% between the 100 mm (27.65 MPa) and 150 mm (22.56 MPa) diameters, a behavior that supports the energy-based prediction postulated by Bažant. However, the average strength obtained for the 50 mm diameter (24.72 MPa) was lower than that of the 100 mm diameter, deviating from the predicted monotonic trend. This discrepancy is attributed to experimental factors—such as the high surface-to-volume ratio and the wall effect in the smaller specimens—suggesting a need for methodological adjustments in future studies.

Keywords: concrete; size effect; compression test; fracture mechanics; concrete mix design

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Determinação da relação a/c em função das resistências	26
Figura 2 – Pesagem do cimento.....	30
Figura 3 – Pesagem da areia	30
Figura 4 – Pesagem da água	31
Figura 5 – Esquema representativo do ensaio de abatimento (Slump Test).....	32
Figura 6 – Materiais utilizados para o traço.	33
Figura 7 – Mistura dos materiais utilizados.....	33
Figura 8 – Medida do abatimento.....	34
Figura 9 – Preenchimento dos corpos.....	34
Figura 10 – Corpos de prova desenformados	35
Figura 11 – Corpos de prova em processo de cura por imersão.....	35
Figura 12 – Painel de prensa hidráulica.....	36
Figura 13 – Histograma e curvas de distribuição normal da resistência à compressão dos corpos de prova.....	40
Figura 14 – Relação entre a tensão nominal de ruptura à compressão e o diâmetro dos corpos de prova cilíndricos.	41
Figura 15 – Corpos de prova de 50mm rompidos	45
Figura 16 – Corpos de prova de 100mm rompidos	46
Figura 17 – Corpos de prova de 150mm rompidos	46
Figura 18 – Tipo de ruptura de corpos de prova.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de água aproximado (L/m^3).....	26
Tabela 2 – Volume compactado seco (V_c) de agregado graúdo por m^3 de concreto	27
Tabela 3 – Resultados do ensaio de compressão axial em corpos de prova de 50mm.....	37
Tabela 4 – Resultados do ensaio de compressão axial em corpos de prova de 100mm.....	37
Tabela 5 – Resultados do ensaio de compressão axial em corpos de prova de 150mm.....	38

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores de S_d em função do preparo.....	24
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CAA	Classe de Agressividade Ambiental
CP	Cimento Portland
MF	Módulo de Finura
MFNL	Mecânica da Fratura Não-Linear
ZPF	Zona de Processo de Fratura
ZTI	Zona de Transição Interfacial

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c	Relação água/cimento
B	Constante empírica dependente da geometria do material
C	Consumo de cimento
C_a	Consumo de água
C_b	Consumo de agregado graúdo
C_m	Consumo de agregado miúdo
D	Dimensão característica da estrutura
D_0	Constante dependente da geometria e do tamanho máximo do agregado
d	Altura útil da seção transversal da peça
f_{c28}	Resistência média do concreto à compressão aos 28 dias
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_t	Resistência à tração direta do material
h	Altura do corpo de prova
K_1, K_2	Constantes empíricas do cimento e agregados
k	Fator de efeito de escala (Eurocódigo 2)
M_c	Massa unitária compactada do agregado graúdo
m	Módulo de Weibull
P_f	Probabilidade de falha
r	Raio do corpo de prova
P_f	Desvio padrão da dosagem
V	Volume real da estrutura
V_0	Volume de referência
V_c	Volume compactado de agregado graúdo por metro cúbico
V_m	Volume de agregado miúdo
V_t	Volume total
λ_S	Fator de modificação de tamanho (ACI 318-19)
ρ_a	Massa específica da água
ρ_b	Massa específica do agregado graúdo
ρ_c	Massa específica do cimento
ρ_m	Massa específica do agregado miúdo
σ	Tensão nominal aplicada na estrutura

σ_0	Tensão característica de escala do material
σ_N	Tensão nominal de ruptura da estrutura

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Efeito escala.....	18
2.2 A Teoria estatística (modelo de Weibull)	18
2.3 A teoria energética (lei do efeito de escala de Bažant)	19
2.4 O efeito escala nas normas.....	20
3 OBJETIVOS	22
3.1 Objetivo geral.....	22
3.2 Objetivos específicos.....	22
4. ESTUDO EXPERIMENTAL DO EFEITO ESCALA NO CONCRETO.....	23
4.1 Materiais e equipamentos	23
4.2 Dosagem do concreto.....	24
4.2.1 Determinação da resistência característica e de dosagem	24
4.2.2 Fixação do fator a/c de acordo com o gráfico de Abrams	25
4.2.3 Consumo de água do concreto	26
4.2.4 Consumo de cimento do concreto	26
4.2.5 Consumo de agregados do concreto	27
4.2.5.2 Consumo de agregado miúdo (C_m).....	28
4.2.6 Consumo de cada material.....	28
4.2.7 Apresentação do traço	28
4.2.8 Volume para o experimento	29
4.3 Realização do traço.....	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Tipo de ruptura.....	45
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

O concreto destaca-se por sua resistência a compressão sendo essa a sua principal propriedade mecânica (Neville; Brooks, 2016). Por isso, é o material estrutural mais amplamente utilizado, embora possua um comportamento mecânico não linear e dependente da escala (Mehta; Monteiro, 2008). Sua resistência a compressão pode ser obtida em laboratório por meio de ensaio de compressão axial em corpos de prova representativos. No entanto, existe uma lacuna técnica entre esses modelos de ensaio e a realidade das grandes obras: os resultados para pequenas amostras podem não refletir por completo o resultado para grandes volumes de concreto devido ao comportamento não linear do material (Neville, 2016).

O problema reside no fato de que o concreto, diferentemente do aço, é um material quase frágil, heterogêneo e apresenta defeitos materiais como vazios e microfissuras (Mehta; Monteiro, 2008). A teoria estatística sugere que, quanto maior o volume da peça estrutural, maior a probabilidade de ela conter um "defeito crítico" que desencadeie a ruptura prematura, fazendo com que estruturas reais suportem tensões menores do que as previstas nos ensaios de controle tecnológico (Sanabria et al., 2019).

A estrutura interna do concreto caracteriza-se por sua heterogeneidade inerente, apresentando descontinuidades inerentes ao seu próprio processo de hidratação e cura. Antes mesmo de ser submetido a qualquer carregamento externo, o material já abriga defeitos prévios, tais como a porosidade capilar, microfissuras decorrentes da retração térmica e hidráulica, e pontos de fragilidade na Zona de Transição Interfacial (ZTI) entre a matriz cimentícia e os agregados (Mehta; Monteiro, 2008; Neville, 2016). Devido a essas imperfeições inerentes, a teoria estatística estabelece que a resistência da estrutura é uma variável dependente do volume, quanto maiores as dimensões da peça concretada; maior será a probabilidade de ela conter um defeito crítico de grandes proporções. Consequentemente, peças de maior volume tendem a iniciar o processo de ruptura sob tensões nominais menores, caracterizando a essência do efeito de escala (Bažant; Planas, 1998).

Embora tais modelos teóricos estejam bem estabelecidos, observa-se na prática experimental que corpos de prova de mesmo traço, mesma proporção geométrica e mesmo tempo de cura, mas com diferentes dimensões, não apresentam resposta mecânica equivalente (Coura; Barbosa; Darwish, 2008). Fatores como a distribuição não homogênea dos agregados, o adensamento e a relação superfície/volume podem mascarar ou distorcer a tendência monotônica de queda de resistência prevista puramente pelas teorias.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo quantificar experimentalmente a variação da resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos de concreto, geometricamente semelhantes, com diâmetros de 50 mm, 100 mm e 150 mm, confrontando os dados obtidos com as previsões dos modelos de Weibull e Bažant, de modo a avaliar a aplicabilidade prática dessas teorias e discutir as implicações para a segurança estrutural e as normas vigentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para a compreensão dos fenômenos mecânicos investigados nesta pesquisa. Inicialmente, introduz-se o conceito do efeito de escala, abordando seu histórico e as principais vertentes que buscam explicá-lo. Em seguida, aprofundam-se as bases matemáticas do fenômeno por meio do modelo estatístico de Weibull e da teoria energética proposta por Bažant. Por fim, o texto consolida as abordagens normativas, discutindo como os códigos estruturais lidam com o efeito de escala no dimensionamento das estruturas.

2.1 Efeito escala

O efeito escala ganha notoriedade na área das estruturas com estudos publicados no século XX, como o de (Kaplan 1961 apud Santos, 2015) que o foco não era analisar o efeito em si e sim a mecânica da fratura do concreto. Apesar disso, o efeito já fora estudado mesmo há muitos anos como no estudo experimental de Leonardo da Vinci nos anos de 1500 (da Vinci apud Santos, 2015) com fios de ferro, em que ele percebeu uma diminuição na resistência à tração à medida que aumentava-se o comprimento dos fios.

Para compreender e modelar matematicamente essa perda de resistência atrelada ao tamanho, a literatura científica desenvolveu diferentes abordagens. Destacam-se, historicamente, duas vertentes principais: a teoria estatística, fundamentada na probabilidade de distribuição de defeitos, em que estrutura romperá quando a tensão no elo mais fraco atingir o limite crítico; e a teoria determinística ou energética, baseada nos princípios da Mecânica da Fratura Não-Linear (MFNL) e na dissipação de energia. Ambas as formulações são fundamentais para avaliar a segurança de estruturas reais.

2.2 A Teoria estatística (modelo de Weibull)

Sob a ótica do modelo estatístico, a resistência do concreto deixa de ser uma constante e passa a ser tratada como uma variável probabilística. Conforme demonstram Bažant e Planas (1998), em elementos estruturais de grande porte, amplo volume tridimensional de concreto sob tensão, a probabilidade matemática de existir um defeito crítico severo (como uma macroporosidade) nesse grande volume é drasticamente maior do que em corpos de prova convencionais, o que justifica a ruptura da estrutura sob níveis de tensões nominais inferiores.

Historicamente, Weibull (1939 apud Rios; Riera; Iturrioz, 2002) chegou à conclusão crucial: “a distribuição de valores de resistência extremamente pequena com pequena probabilidade, não pode ser adequadamente descrita por nenhuma das distribuições conhecidas”.

A partir da distribuição estatística proposta por Weibull, a probabilidade de falha de um elemento pode ser expressa pela equação (1), conforme demonstrado por Bažant e Planas (1998), ao igualarmos a probabilidade de colapso para dois elementos com volumes V_1 e V_2 , equação (2), a relação matemática resultante comprova que a tensão nominal de ruptura é inversamente proporcional ao volume.

$$P_f = 1 - \exp \left[-\frac{V}{V_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

Onde P_f representa a probabilidade de falha (varia de 0 a 1, ou seja, 0% a 100% de chance de a peça romper), V o volume real da estrutura, V_0 é o volume de referência, σ é a tensão nominal aplicada na estrutura, σ_0 é a tensão característica de escala do material e m é o módulo de Weibull.

Se, na equação (1), isolar a tensão (σ) para comparar duas estruturas de tamanhos diferentes (V_1 e V_2) que tenham a mesma probabilidade de falha (P_f), o resultado é a relação da equação (2).

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

Embora a dedução estatística comprove a relação inversa entre o volume da estrutura e sua resistência nominal, Bažant e Planas (1998) alertam para as limitações dessa abordagem exclusiva quando aplicada ao concreto. Como o concreto exibe um comportamento quase-frágil, a propagação inicial de um defeito crítico é sucedida pela formação de uma Zona de Processo de Fratura (ZPF), que consome energia e redistribui as tensões. Dessa forma, a formulação puramente estatística cede espaço para a formulação energética, que incorpora não apenas a probabilidade de falha, mas a mecânica da propagação da fissura.

2.3 A teoria energética (lei do efeito de escala de Bažant)

Diferente de um material perfeitamente frágil — em que a ruptura acontece em conjunto com a falha do defeito mais crítico —, o concreto apresenta uma microestrutura heterogênea composta por três fases: o agregado, a matriz de pasta de cimento e a zona de transição na interface, sendo esta última a região mais fraca do material (Mehta; Monteiro,

2008). Devido a essa heterogeneidade, quando um defeito crítico atinge a tensão limite e inicia sua propagação, o perfil da fissura resultante geralmente não é reto. A trinca não avança de forma contínua; ao ir de encontro aos agregados de elevada rigidez, ela é interrompida e obrigada a contorná-los através da zona de transição (Neville, 2016). Esse desvio tortuoso promove uma liberação repentina de energia durante o processo de ruptura e gera uma extensa região de microfissuração no entorno do caminho principal, denominada Zona de Processo de Fratura (ZPF) (Bažant; Planas, 1998).

É a existência dessa ZPF que afasta o comportamento do concreto do modelo estatístico puro. O colapso estrutural não é ditado exclusivamente pela probabilidade de ocorrência da primeira falha, mas sim por um balanço energético. Segundo Bažant (1999) a falha estática da estrutura ocorrerá quando a taxa de liberação de energia de deformação ($U_a + U_b$) se igualar à demanda de energia (W) para a propagação da fissura. O autor destaca ainda que, em materiais quase-frágeis, quase a totalidade dessa energia é dissipada através da formação de microfissuras e atrito interno. Fisicamente, no concreto, essa alta demanda energética se justifica pelas grandes inhomogeneidades de sua matriz: a trinca principal é forçada a contornar os agregados graúdos, gerando a densa região de microfissuração que caracteriza a ZPF.

Como a energia de deformação é proporcional ao volume da estrutura e a energia para ocorrer a fissuração é proporcional à área, à medida de que o tamanho da estrutura aumenta, aumenta o desequilíbrio. Para quantificar esse desequilíbrio Zdeněk P. Bažant formulou a equação do efeito escala (equação (3)).

$$\sigma_N = \frac{B f_t}{\sqrt{1 + \frac{D}{D_0}}} \quad (3)$$

Em que σ_N é a tensão nominal de ruptura da estrutura, f_t é a resistência à tração direta do material, B é uma constante empírica dependente da geometria do material, D é a dimensão característica da estrutura e D_0 é uma constante que depende da geometria da estrutura e do tamanho máximo do agregado.

2.4 O efeito escala nas normas

No cenário internacional, as normas mais modernas já reconhecem e penalizam matematicamente o efeito escala. O Eurocódigo 2 (EN 1992-1-1) na seção 6.2.2 adota um fator de tamanho, conforme demonstrado na equação (4), com limite superior igual a 2. Com isso, à

medida que se aumenta a altura da peça em análise, menor é o valor de K que é multiplicador na fórmula nominal de tensão por cisalhamento. Logo, reduz o este valor para grandes dimensões de altura e limita no valor 2 para pequenas dimensões (European Committee for Standardization, 2004).

$$K = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (4)$$

Onde K é o fator de efeito de escala segundo o Eurocódigo 2 e d é a altura útil da seção transversal da peça, que deve ser inserida em milímetros (mm).

Mais recentemente, no mesmo sentido, o ACI 318-19 introduziu o fator de correção de tamanho, designado por λ_s , na equação (5) de cálculo da resistência ao cisalhamento, sendo obrigatório para elementos que não possuem armadura transversal mínima. Além disso, um comentário técnico referente à equação, no ACI, deixa clara a fundamentação desse coeficiente ao explicitar que "os parâmetros dentro do fator de modificação do efeito de escala, λ_s , são consistentes com a teoria da mecânica da fratura para o concreto armado (Bažant et al. 2007; Frosch et al. 2017)." (American Concrete Institute, 2019). Essa declaração vincula diretamente as equações de dimensionamento prático aos modelos de balanço energético propostos por Bažant.

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{d}{10}}} \leq 1 \quad (5)$$

Onde λ_s : é o fator de modificação de tamanho segundo o ACI 318-19 e d : é a altura útil da seção transversal da peça, que deve ser inserida em polegadas (in).

Diante disso, a norma brasileira que estabelece os requisitos e procedimentos para o projeto de estruturas de concreto armado e protendido, (Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2026), continua sem um fator de correção para o efeito tamanho. Enquanto normatizações internacionais já penalizam matematicamente elementos com maiores dimensões de seção transversal —como o fator de escala K do Eurocódigo 2 (2004) e o fator de modificação λ_s introduzido pelo ACI 318-19 (2019).

Conforme apontam as investigações de (Ribeiro et al., 2023) as formulações do código brasileiro falham ao não contabilizar a queda da resistência ao cisalhamento em peças sem armadura transversal à medida que a altura útil da seção aumenta.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Analisar o impacto do efeito escala no comportamento mecânico do concreto, por meio de ensaio de compressão em corpos de prova de mesmas proporções e diferentes tamanhos.

3.2 Objetivos específicos

- Analisar a variação da resistência à compressão axial e o padrão de ruptura em corpos de prova cilíndricos de concreto com diferentes escalas dimensionais;
- Comparar os dados empíricos obtidos em laboratório com as formulações teóricas de previsão do efeito escala, notadamente os modelos de Weibull e Bažant;
- Determinar a distorção nos parâmetros de resistência causados pela variação dimensional em corpos de prova de mesma proporção;
- Analisar as implicações práticas do efeito escala na normatização das estruturas de concreto.

4. ESTUDO EXPERIMENTAL DO EFEITO ESCALA NO CONCRETO

Este capítulo detalha o programa experimental desenvolvido para investigar o efeito escala no concreto. A seguir, são apresentados os materiais e equipamentos empregados, os procedimentos de cálculo para a dosagem do traço empírico pelo método ABCP e a metodologia adotada para a mistura, moldagem, cura e posterior ruptura à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos de diferentes diâmetros.

Do ponto de vista metodológico, esta pesquisa adota uma abordagem quantitativa. Segundo (Prodanov; Freitas, 2013), esse tipo de pesquisa "considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las", exigindo o emprego de recursos e técnicas estatísticas. No contexto deste trabalho empírico, essa abordagem justifica-se pela coleta dos dados de resistência à compressão axial (em MPa) dos corpos de prova, seguida pelo tratamento estatístico dos resultados — como o cálculo de médias e desvios padrão — para a elaboração de linhas de tendência e validação dos modelos matemáticos do efeito escala.

4.1 Materiais e equipamentos

- Cimento CP II E-32;
- Agregado miúdo;
- Agregado graúdo;
- Água;
- Balança;
- Baldes;
- Betoneira;
- Moldes para confecção dos corpos de prova de 50, 100 e 150mm;
- Cone de Abrams;
- Tanque de cura.

4.2 Dosagem do concreto

O método de dosagem do concreto utilizado foi o da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Nos cálculos a força característica de compressão do concreto (f_{ck}) foi de 25 Mpa, a classe de agressividade ambiental (CAA) foi do tipo II – moderado/urbano, o diâmetro máximo do agregado graúdo de 9,5 mm e o abatimento desejado entre 80 e 100 mm. A relação água/cimento máxima adotada foi de 0,6. Considerando as massas específicas dos materiais (cimento: 3100 kg/m³, areia: 2600 kg/m³, brita: 2650 kg/m³ e água: 1000 kg/m³), e o volume de argamassa foi obtido por meio da equação volumétrica que desconta o espaço ocupado pelos materiais sólidos.

O concreto de cimento Portland possui três principais componentes básicos: cimento, agregados e água. A dosagem do concreto significa fazer o proporcionamento adequado desses de maneira que o material, no estado fresco; possua trabalhabilidade adequada, no estado endurecido; possua as características compatíveis com as requeridas pelo projeto e, finalmente, todas as propriedades exigidas devem ser atingidas com o menor custo possível (Rodrigues, 1988). O processo de dosagem foi realizado seguindo os seguintes etapas:

4.2.1 Determinação da resistência característica e de dosagem

Para a dosagem do concreto pelo método ABCP, definiu-se a resistência característica do concreto (f_{ck}) de 25 MPa. Usando a equação (6) e o desvio padrão (S_d) para condição A de acordo com a Quadro 1, a resistência de dosagem encontra-se 31,6 MPa (ABNT, 2015a)

$$f_{cm28} = f_{ck} + 1,65 \times s_d \quad (6)$$

Logo, a resistência de dosagem é $f_{c28} = 25 + 1,65 \times 4 = 31,6$ MPa

Quadro 1 – Valores de S_d em função do preparo

(continua)

S_d	Condição	Classe	Tipo de Concreto
4,0	A	C10 a C80	Quando todos os materiais forem medidos em peso e houver medidor e água, corrigindo-se as quantidades de agregado miúdo e água em função de determinações frequentes e precisas do teor de umidade dos agregados, e houver garantia de manutenção, no decorrer da obra, da homogeneidade dos materiais a serem empregados.
5,5	B	C10 a C25	Quando o cimento for medido em peso e os agregados em volume, e houver medidor de água, com correção do volume do agregado miúdo e da quantidade de água em função de determinações frequentes e precisas do teor de umidade dos agregados.

Quadro 2– Valores de Sd em função do preparo

(conclusão)

7,0	C	C10 a C15	Quando o cimento for medido em peso e os agregados em volume, e houver medidor de água, corrigindo-se a quantidade de água em função da umidade dos agregados simplesmente estimada.
-----	---	-----------	--

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland ET-67 (1995)

4.2.2 Fixação do fator a/c de acordo com o gráfico de Abrams

Em 1918, empiricamente, Duff Abrams descobriu uma correlação entre o fator água/cimento e a resistência do concreto. Essa relação inversa mostra que quanto mais água, mais poros se formam quando ela evapora, deixando o concreto com menor resistência. Conhecida por lei de Abrams da relação água/cimento, equação (7) (Mehta; Monteiro, 2008). Essa formulação algébrica atua fundamentalmente como alicerce teórico, visto que na prática de dosagem recorre-se ao ábaco de dosagem: correlação entre a relação água/cimento (a/c) e a resistência do concreto aos 28 dias (f_{c28}) para diferentes classes de resistência do cimento.

$$f_{c28} = \frac{K_1}{K_2^{\frac{a}{c}}} \quad (7)$$

Onde f_{c28} é a resistência média do concreto à compressão aos 28 dias, expressa em megapascals (MPa); a/c : é a relação água/cimento em massa; K_1 e K_2 : são constantes empíricas que dependem das características dos agregados, do tipo e da classe do cimento utilizado.

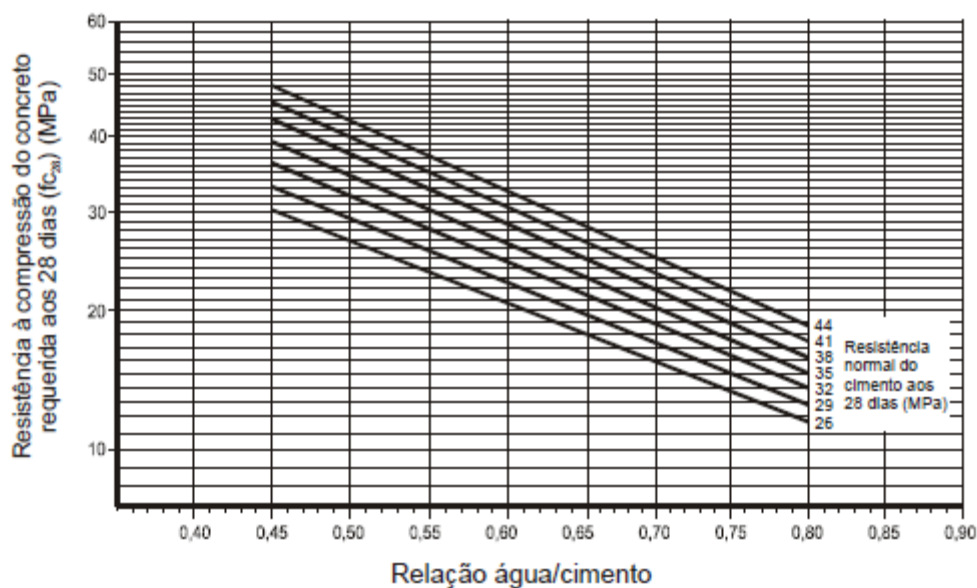
O método ABCP já obteve as constantes para cimentos conhecidos e adensou esses valores no ábaco da Figura 1, a relação a/c é de 0,52.

Figura 1, deixando o eixo da resistência do concreto em escala semi-logarítmica, facilitando o seu uso visual.

Seguindo os parâmetros da (ABNT, 2015a) e considerando uma estrutura submetida às condições para a classe de agressividade ambiental II (moderada/urbana), foi estabelecido o valor máximo para a relação a/c de 0,6 e consumo de cimento não inferior a 280 kg/m³.

Para o cimento utilizado, CP II E-32, e o f_{ck} de 25MPa, de acordo com a Figura 1, a relação a/c é de 0,52.

Figura 1 – Determinação da relação a/c em função das resistências



Fonte: Rodrigues (1988)

4.2.3 Consumo de água do concreto

De acordo com a Tabela 1, para o abatimento de 80 a 100 mm e dimensão máxima do agregado graúdo de 9,5mm, o consumo de água do concreto é de 230L/m³.

Tabela 1 – Consumo de água aproximado (L/m³)

Abatimento do tronco de cone (mm)	Dimensão máxima característica do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Rodrigues (1988)

4.2.4 Consumo de cimento do concreto

O consumo de cimento é calculado a partir da divisão do consumo de água pela relação a/c, conforme a equação (8).

$$C = \left(\frac{C_a}{\frac{a}{c}} \right) \quad (8)$$

Logo, o consumo de cimento será igual a $C = (230/0,52) = 442,3\text{kg/m}^3$

4.2.5 Consumo de agregados do concreto

Os agregados são compostos por miúdo (areia) e gráudo (brita). No método promovido pela ABCP, o proporcionamento de cada um deles é feito determinando o percentual ideal de agregado gráudo no concreto, em função da dimensão máxima característica e do módulo de finura, já a proporção de agregado miúdo estará em função da pasta e agregado gráudo (Rodrigues, 1988).

4.2.5.1 Consumo de agregado gráudo (C_b)

A determinação do consumo de agregado gráudo (C_b) é dada pela equação (9).

$$C_b = V_c \times M_c \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (9)$$

Onde V_c e M_c são, respectivamente, o volume compactado seco por metro cúbico de concreto e a massa unitária compactada do agregado gráudo. Os valores de referência para o V_c são obtidos a partir da Tabela 2, em função do diâmetro máximo do agregado e do Módulo de Finura (MF) da areia miúda.

Tabela 2 – Volume compactado seco (V_c) de agregado gráudo por m³ de concreto

MF	D _{máx} (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Rodrigues (1988)

Para este estudo, o diâmetro máximo da brita utilizada (brita 0) é de 9,5 mm. Relacionando esse valor ao Módulo de Finura da areia estipulado em 2,7, realizou-se uma interpolação linear entre os valores tabelados para os módulos de 2,6 e 2,8. Conclui-se que o V_c correspondente é de 0,555. Considerando a massa unitária (M_c) igual a 1700 kg/m³, obtém-se um consumo de agregado gráudo (C_b) de 943,5 kg/m³.

O diâmetro máximo da brita utilizada (brita 0) é de 9,5mm. Relacionando esse valor ao Módulo de Finura (MF) da areia, que foi de 2,7, realizou-se uma média aritmética entre os valores tabelados para os MF de 2,6 e 2,8 da tabela. Conclui-se que o V_c é de 0,555. Considerando a massa unitária (M_c) igual a 1700kg/m^3 ; tem-se $C_b=943,5\text{kg/m}^3$.

4.2.5.2 Consumo de agregado miúdo (C_m)

O consumo de areia é determinado por diferença, visto que os valores dos outros componentes já são conhecidos e pode-se assumir o volume total do concreto como a soma dos volumes totais de cimento, água e agregados.

$$V_m = 1 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{C_b}{\rho_b} + \frac{C_a}{\rho_a} \right) \quad (10)$$

Onde ρ_c , ρ_b e ρ_a são, respectivamente, as massas específicas do cimento, do agregado graúdo e da água; com isso $V_m = 1 - ((442,3/3100) + (943,5/2650) + (230/1000))$; $V_m = 0,27128\text{m}^3$.

Diante disso,

$$C_m = \rho_m \times V_m \quad (11)$$

$$C_m = 2600 \times 0,27128 = 705,34\text{kg/m}^3.$$

4.2.6 Consumo de cada material

O consumo, para 1m^3 de concreto de:

- Cimento: $442,3 \text{ kg/m}^3$;
- Areia: $705,34 \text{ kg/m}^3$;
- Brita: $943,5 \text{ kg/m}^3$;
- Água: 230 l/m^3 .

4.2.7 Apresentação do traço

Usualmente as proporções dos materiais no concreto são apresentadas pelo seu traço em massa e relacionado a um valor unitário de cimento, que é obtido dividindo o consumo de cada material pelo consumo de cimento, conforme a proporção abaixo:

$$1,0 : \frac{C_m}{C} : \frac{C_b}{C} : (a|c)$$

Dessa forma o traço será:

$$1 : 1,59 : 2,13 : 0,52$$

4.2.8 Volume para o experimento

Para a determinação do volume total de concreto necessário para a moldagem de todos os corpos de prova, utilizou-se o somatório dos volumes cilíndricos individuais de cada grupo, conforme expresso na equação(12):

$$V_t = \sum_{i=1}^n q_i (\pi r_i^2 h_i) \quad (12)$$

Onde V_t é o volume total, q a quantidade de corpos de prova, r o raio do corpo de prova e h a altura do corpo de prova.

Dessa forma, usando a equação (12) para as condições em análise obtém-se a seguinte equação ajustada:

$$V_t = 5(\pi \times 2,5^2 \times 10) + 5(\pi \times 5^2 \times 20) + 4(\pi \times 7,5^2 \times 30) \quad (13)$$

Sendo assim, o volume total de concreto é aproximadamente $0,03m^3$.

Adicionando-se uma margem de segurança de 10% teríamos um volume total de $0,033m^3$. Porém, no dia da concretagem, por uma análise visual, utilizou-se uma margem de 17% chegando a um volume total de $0,035m^3$.

Assim, os volumes de cimento, areia, brita e água são respectivamente de 15,48kg, 24,69kg, 33,03kg e 8,05kg.

Figura 2 – Pesagem do cimento



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 3 – Pesagem da areia



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 4 – Pesagem da água



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

4.3 Realização do traço

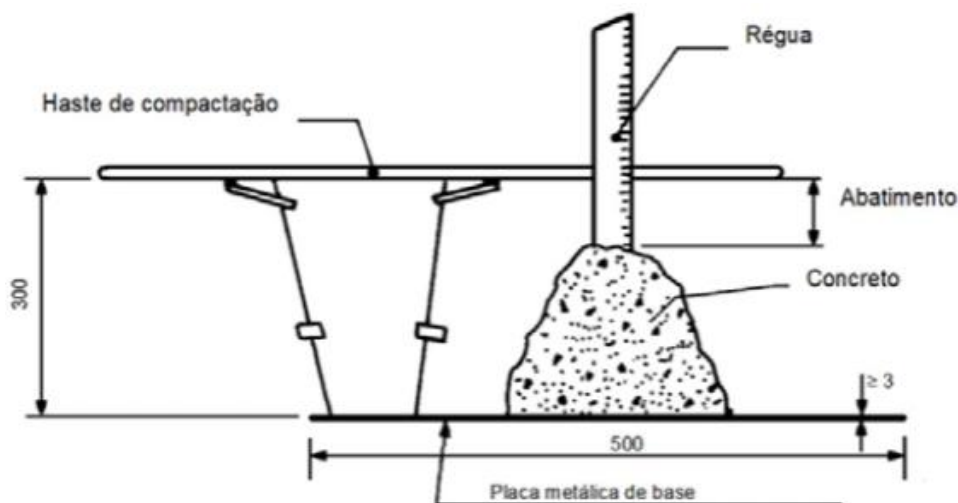
Cada componente foi pesado individualmente. Antes do início da mistura, a betoneira foi previamente umedecida para evitar que suas paredes absorvessem parte da água de amassamento, procedimento essencial para manter a relação a/c constante.

A sequência de mistura adotada visou garantir a perfeita homogeneização do concreto, propriedade vital para a confiabilidade dos resultados mecânicos (Neville, 2016). A ordem de inserção dos materiais foi:

- 1° Agregado graúdo (brita) e metade da água;
- 2° Agregado miúdo (areia);
- 3° Cimento e o restante da água.

O ensaio de abatimento (*slump test*) foi realizado seguindo as prescrições da ABNT NBR 16889(2020). Logo após a mistura foram adensadas 3 camadas, cada uma com 25 golpes cada. O excesso de concreto no cone foi rasado com uma colher de pedreiro. Após limpar a base, o molde de concreto foi retirado verticalmente e a diferença entre altura entre do molde e a altura do eixo do corpo de prova foi de 92 mm, conforme registro da Figura 8. O resultado obtido se manteve dentro do intervalo teórico previsto, confirmando a consistência adequada do concreto para moldagem.

Figura 5 – Esquema representativo do ensaio de abatimento (Slump Test)



Fonte: ABNT NBR 16889 (2020)

Com o traço definido e validado, o concreto foi utilizado para preencher os corpos de prova cilíndricos. De acordo com a (ABNT, 2015b), a altura do corpo de prova deve corresponder ao dobro do diâmetro, sendo aceita uma variação de 1% para a altura e de 2% para o diâmetro. A base e laterais do molde devem ser de aço ou de outro material não absorvente, que não reaja com o cimento Portland; apesar disso, devido às limitações do material disponível, o corpo de prova de maiores proporções foi moldado com tubos de PVC nas laterais e sacolas plásticas envolvidas por fita no fundo. Além disso, como as medidas comerciais diferem das reais, o diâmetro desses maiores corpos de prova apresentou uma variação média de 3,4%, o que extrapola o limite recomendado em norma (ABNT, 2015b).

Nos moldes, que foram pincelados por uma fina camada de óleo lubrificante, foi feita a moldagem dos corpos de prova de acordo com a ABNT NBR 5738 (2015b). No corpo de prova de 50 mm, como não está previsto em norma, seguiram-se os mesmos procedimentos adotados para o de 100 mm: o preenchimento ocorreu em duas camadas, cada uma adensada por 12 golpes uniformemente distribuídos na seção transversal do molde, utilizando-se de batidas na face externa para preencher vazios. Já nos corpos de prova de 150 mm o, procedimento diferiu-se na utilização de 3 camadas, cada uma adensada por 25 golpes. Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram colocados em processo de cura por imersão em tanque com água, onde permaneceram por 31 dias, até o dia do ensaio de compressão axial, garantindo condições ideais de hidratação e desenvolvimento das propriedades mecânicas do material. No dia do ensaio, a preparação da base foi feita por meio de retificação. Com a retífica foi removida uma fina camada do material, de modo a proporcionar uma superfície lisa e livre

de protuberâncias para que em seguida o corpo de prova fosse submetido ao ensaio de compressão axial em prensa hidráulica, obtendo-se o valor da força aplicada, como demonstrado na Figura 12, que dividida pela área resulta do valor de resistência (ABNT, 2018)

Figura 6 – Materiais utilizados para o traço.



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 7 – Mistura dos materiais utilizados.



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 8 – Medida do abatimento



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 9 – Preenchimento dos corpos



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

A Figura 10 ilustra as amostras na bancada dos três grupos dimensionais de corpos de prova confeccionados para a pesquisa após o processo de desforma. Por meio do registro visual é possível perceber as proporções adotadas para o estudo do efeito escala.

Figura 10 – Corpos de prova desenformados



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 11 – Corpos de prova em processo de cura por imersão



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 12 – Painel de prensa hidráulica



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de compressão axial encontram-se apresentados nas tabelas 3, 4 e 5. As resistências médias obtidas foram de 24,72 MPa para os corpos de prova com diâmetro de 50 mm, 27,65 MPa para os de 100 mm e 22,56 MPa para os de 150 mm. Observa-se que o comportamento experimental não seguiu integralmente a tendência prevista pelas teorias do efeito escala.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de compressão axial em corpos de prova de 50mm

	DIÂMETRO (mm)	COMPRIMENTO (mm)	FORÇA APLICADA (KN)	RESISTÊNCIA (MPa)
	50,01	99,54	43,35	22,07
	50,06	98,86	56,99	28,96
	50,08	98,74	50,49	25,63
	49,80	99,72	49,48	25,40
	49,96	98,77	42,18	21,52
MÉDIA:	49,98	99,13	48,50	24,72
Desvio padrão:	0,112	0,467	5,989	3,022
Coefficiente de variação:	0,002	0,005	0,123	0,122

Fonte: Autoria própria (2026)

Tabela 4 – Resultados do ensaio de compressão axial em corpos de prova de 100mm

	DIÂMETRO (mm)	COMPRIMENTO (mm)	FORÇA APLICADA (KN)	RESISTÊNCIA (MPa)
	100,73	199,26	202,80	25,45
	100,00	200,47	220,68	28,10
	100,13	198,02	218,84	27,79
	99,96	199,21	222,97	28,41
	100,35	199,27	225,35	28,49
MÉDIA:	100,23	199,25	218,13	27,65
Desvio padrão:	0,316	0,867	8,91	1,259
Coefficiente de variação:	0,003	0,004	0,041	0,046

Fonte: Autoria própria (2026)

Tabela 5 – Resultados do ensaio de compressão axial em corpos de prova de 150mm

	DIÂMETRO (mm)	COMPRIMENTO (mm)	FORÇA APLICADA (KN)	RESISTÊNCIA (MPa)
	144,57	306,00	366,82	22,35
	144,42	304,00	396,07	24,18
	145,14	307,00	361,68	21,86
	145,42	307,00	362,99	21,86
MÉDIA:	144,89	306,00	371,90	22,56
Desvio padrão:	0,471	1,414	16,267	1,103
Coefficiente de variação:	0,003	0,005	0,044	0,448

Fonte: Autoria própria (2026)

Segundo os modelos de Weibull e de Bazant, apresentados no referencial teórico, espera-se que a resistência nominal diminua gradualmente à medida que o volume do elemento aumenta, em decorrência da maior probabilidade de ocorrência de defeitos críticos e do aumento da energia disponível para propagação das fissuras. Dessa forma, o comportamento esperado seria uma redução contínua da resistência média dos corpos de prova de 50 mm para 100 mm e, posteriormente, para 150 mm.

Entretanto, os resultados experimentais indicaram um aumento inicial da resistência média entre os corpos de prova de 50 mm (24,72 MPa) e 100 mm (27,65 MPa), seguido por uma redução nos corpos de prova de 150 mm (22,56 MPa). Comportamento que pode ser observado nas tabelas (3,4 e 5).

A redução observada entre os corpos de prova de 100 mm e 150 mm está de acordo com o fenômeno do efeito escala, uma vez que o aumento do volume do material favorece a presença de regiões críticas capazes de iniciar o processo de ruptura sob menores níveis de tensão. A diferença entre as resistências médias desses grupos foi de aproximadamente 18,4%, evidenciando a influência do tamanho do corpo de prova no comportamento mecânico do concreto.

Por outro lado, a menor resistência observada nos corpos de prova de 50 mm merece uma análise mais cuidadosa. Uma possível explicação está relacionada à maior dispersão estatística inerente aos corpos de prova de menores dimensões. Nesses elementos, a influência local da distribuição dos agregados graúdos torna-se mais significativa, uma vez que a relação entre o tamanho máximo do agregado e as dimensões do corpo de prova é relativamente elevada. Consequentemente, pequenas variações na posição dos agregados, na quantidade de

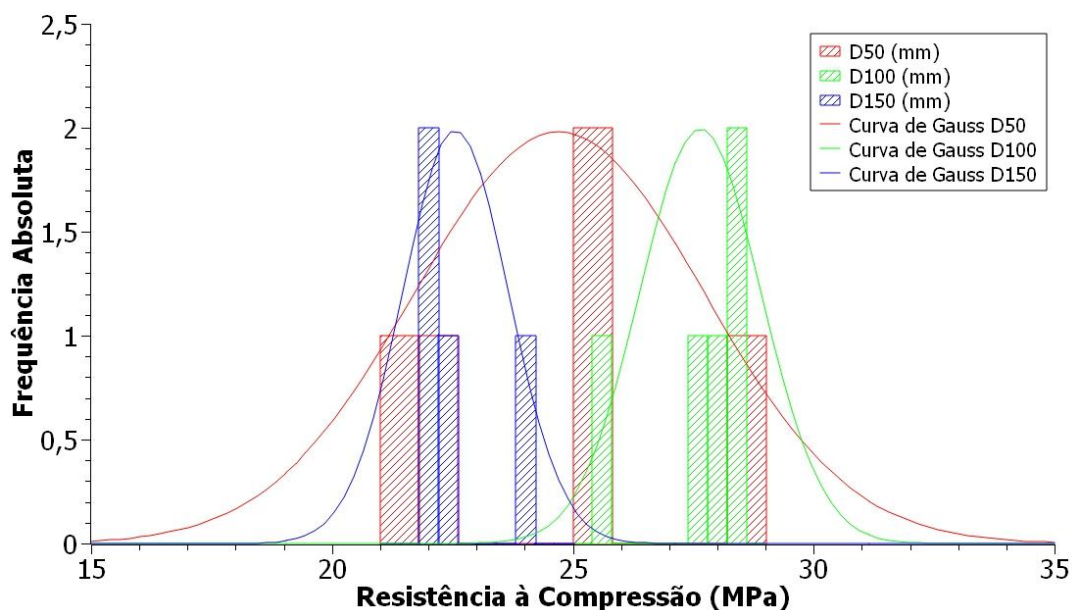
vazios ou na distribuição da pasta cimentícia podem provocar alterações expressivas nos resultados individuais (Neville, 2016).

Além disso, o grupo de corpos de prova de 50 mm foi composto por apenas cinco amostras. Embora esse número seja suficiente para uma avaliação preliminar, ele pode não representar adequadamente a variabilidade natural do material. Observa-se que os resultados desse grupo apresentaram amplitude significativa, variando entre 21,52 MPa e 28,96 MPa, o que evidencia elevada dispersão experimental comprovada pelo Coeficiente de Variação de 12,2% (quase o triplo da dispersão observada nos cilindros de 100 mm). Dessa forma, é possível que a resistência média obtida tenha sido influenciada por efeitos estatísticos associados ao tamanho reduzido da amostra.

Outro aspecto relevante é que corpos de prova com diâmetro de 50 mm não são contemplados pelas normas brasileiras para ensaios de compressão do concreto. A principal justificativa teórica para evitar dimensões tão reduzidas é a severa manifestação do chamado efeito parede. Segundo (Neville, 2016), se o tamanho máximo do agregado for grande em relação ao tamanho do molde, a compactação do concreto e a uniformidade da distribuição das partículas graúdas são diretamente afetadas, o autor também destaca que o efeito parede se torna mais evidente quanto maior for a relação superfície/volume da amostra testada. Para minimizar esse efeito limitante, diversas normas internacionais especificam o tamanho mínimo do corpo de prova em relação ao agregado. A norma ASTM C 192-07, por exemplo, exige que o diâmetro do cilindro de teste seja pelo menos três vezes o tamanho máximo nominal do agregado. Embora o diâmetro de 50 mm atenda aos requisitos geométricos mínimos, o impacto estrutural da forma na amostra menor é consideravelmente superior. Nos cilindros de 50 mm, a relação superfície/volume é significativamente maior do que nos de 100 mm e 150 mm, o que significa que a zona de transição prejudicada pelo contato com o molde ocupa uma fração muito maior do volume total da peça. Essa diferença geométrica amplifica as falhas de empacotamento, justificando a redução e a maior dispersão das resistências observadas neste grupo em relação aos diâmetros maiores.

Portanto, apesar de os resultados não apresentarem uma redução monotônica da resistência com o aumento da escala, o comportamento dos corpos de prova de 100 mm e 150 mm corrobora a tendência prevista pela teoria do efeito escala. A divergência observada nos corpos de prova de 50 mm sugere que fatores experimentais e estatísticos exerceram influência significativa sobre os resultados.

Figura 13 – Histograma e curvas de distribuição normal da resistência à compressão dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria (2026)

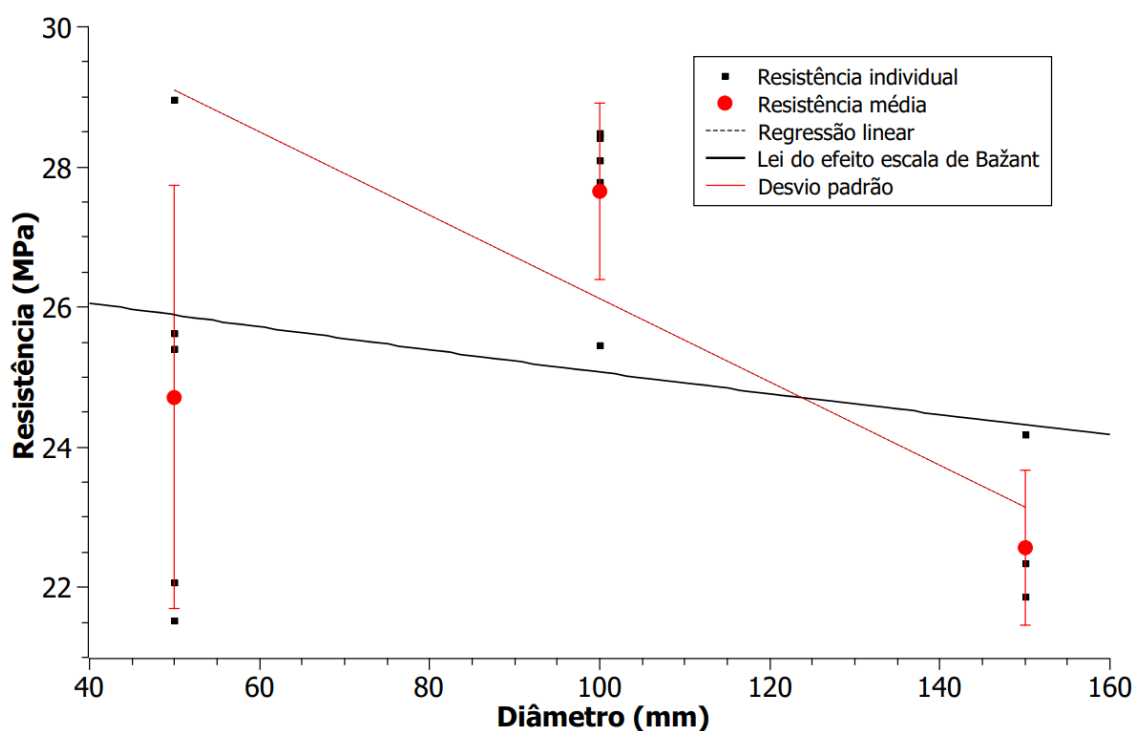
A Figura 13 apresenta os histogramas de frequências absolutas da resistência à compressão para os três diâmetros de corpos de prova avaliados (50, 100 e 150 mm), sobrepostos às suas respectivas Funções Densidade de Probabilidade (FDP) da distribuição normal. A FDP consiste em um modelo estatístico contínuo que projeta o comportamento probabilístico teórico do lote de concreto, sendo parametrizada exclusivamente pela média amostral e pelo desvio padrão de cada grupo (Montgomery; Runger, 2021).

Por definição matemática, a área sob a curva teórica de uma FDP é unitária. O procedimento analítico padrão para sua sobreposição em gráficos de frequência empírica exige a multiplicação da função pelo fator de área do histograma. No entanto, devido ao reduzido tamanho amostral inerente a este ensaio, o agrupamento dos dados em intervalos de classe gerou picos discretos e localizados de frequência absoluta. A aplicação estrita do escalonamento por área resultaria em um achatamento desproporcional das curvas teóricas, prejudicando a análise visual. Para garantir a coerência entre os dados empíricos e o modelo estatístico, adotou-se uma adequação metodológica: o fator multiplicador foi ajustado para alinhar a amplitude máxima teórica (o pico do sino) à frequência empírica máxima registrada nas barras. Esse procedimento preserva a representação da dispersão e mitiga as distorções visuais de frequências empíricas baixas, permitindo projetar corretamente a distribuição populacional de cada diâmetro (Montgomery; Runger, 2021).

Observa-se o deslocamento do pico da curva do diâmetro de 150 mm para a esquerda do eixo das abscissas em relação à curva para o diâmetro de 100 mm, o que quantifica a redução da resistência média associada ao aumento do volume do corpo de prova, concordando com a teoria probabilística de falha para o concreto.

Em contrapartida, os corpos de prova com diâmetro de 50 mm apresentaram comportamento divergente da premissa teórica do efeito escala, registrando resistência média inferior à dos corpos de prova de 100 mm. O gráfico demonstra ainda que as peças com diâmetro de 50mm obtiveram a maior dispersão de dados, caracterizada pelo alargamento e achatamento de sua curva normal em relação às demais. Fenômeno esse atribuído ao efeito parede nos corpos de prova de menor dimensão, justificando a queda na resistência média e a alta variabilidade estatística do grupo.

Figura 14 – Relação entre a tensão nominal de ruptura à compressão e o diâmetro dos corpos de prova cilíndricos.



Fonte: Autoria própria (2026)

A A Figura 13 apresenta os histogramas de frequências absolutas da resistência à compressão para os três diâmetros de corpos de prova avaliados (50, 100 e 150 mm), sobrepostos às suas respectivas Funções Densidade de Probabilidade (FDP) da distribuição normal. A FDP consiste em um modelo estatístico contínuo que projeta o comportamento

probabilístico teórico do lote de concreto, sendo parametrizada exclusivamente pela média amostral e pelo desvio padrão de cada grupo (Montgomery; Runger, 2021).

Por definição matemática, a área sob a curva teórica de uma FDP é unitária. O procedimento analítico padrão para sua sobreposição em gráficos de frequência empírica exige a multiplicação da função pelo fator de área do histograma. No entanto, devido ao reduzido tamanho amostral inerente a este ensaio, o agrupamento dos dados em intervalos de classe gerou picos discretos e localizados de frequência absoluta. A aplicação estrita do escalonamento por área resultaria em um achatamento desproporcional das curvas teóricas, prejudicando a análise visual. Para garantir a coerência entre os dados empíricos e o modelo estatístico, adotou-se uma adequação metodológica: o fator multiplicador foi ajustado para alinhar a amplitude máxima teórica (o pico do sino) à frequência empírica máxima registrada nas barras. Esse procedimento preserva a representação da dispersão e mitiga as distorções visuais de frequências empíricas baixas, permitindo projetar corretamente a distribuição populacional de cada diâmetro (Montgomery; Runger, 2021).

Observa-se o deslocamento do pico da curva do diâmetro de 150 mm para a esquerda do eixo das abscissas em relação à curva para o diâmetro de 100 mm, o que quantifica a redução da resistência média associada ao aumento do volume do corpo de prova, concordando com a teoria probabilística de falha para o concreto.

Em contrapartida, os corpos de prova com diâmetro de 50 mm apresentaram comportamento divergente da premissa teórica do efeito escala, registrando resistência média inferior à dos corpos de prova de 100 mm. O gráfico demonstra ainda que as peças com diâmetro de 50mm obtiveram a maior dispersão de dados, caracterizada pelo alargamento e achatamento de sua curva normal em relação às demais. Fenômeno esse atribuído ao efeito parede nos corpos de prova de menor dimensão, justificando a queda na resistência média e a alta variabilidade estatística do grupo.

Figura 14 ilustra a relação entre a tensão nominal de ruptura (σ_N) e a dimensão característica, representada pelo diâmetro (D) dos corpos de prova cilíndricos. No diagrama, os marcadores em formato de quadrado preto representam os valores individuais de resistência à compressão axial obtidos para cada amostra ensaiada, evidenciando a dispersão natural inerente à heterogeneidade do concreto. Os marcadores em formato de círculo vermelho indicam a tensão resistente média para cada diâmetro específico. A barra de erro associada a cada média representa o desvio padrão do conjunto de amostras de mesmo tamanho, calculado estatisticamente a partir da raiz quadrada da variância dos resultados individuais em relação à média daquele grupo, o que permite quantificar a dispersão do ensaio laboratorial.

Para avaliar uma tendência preliminar de queda de resistência com o aumento da dimensão, realizou-se inicialmente uma regressão linear simples dos dados experimentais. Esse procedimento gerou a equação da linha de tendência linear (14)

$$\sigma_N = -0,0596 \cdot D + 32,0813 \quad (14)$$

No entanto, o coeficiente de determinação obtido ($R^2 = 0,5827$) indica que o comportamento da linha de tendência não é confiável para descrever a queda de resistência à medida que se aumenta o diâmetro.

Desta forma, aplicou-se a Lei do Efeito de Escala (equação (3) fundamentada por (Bažant; Planas, 1998). A formulação teórica de base utiliza a resistência à tração direta do material (f_t), cujo valor adotado foi de 2,56 MPa, estimado analiticamente através das prescrições da NBR 6118 para o concreto de f_{ck} menor ou igual a 50 MPa (equação (15)).

$$f_{ct,m} = 0,3f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (15)$$

Segundo os mesmos autores, os demais parâmetros empíricos da equação não podem ser deduzidos puramente por fórmulas teóricas; eles devem ser descobertos por meio do ajuste ótimo dos mínimos quadrados (least-square fitting) da curva da lei do efeito de escala sobre os pontos de ruptura reais obtidos no ensaio.

Para executar esta calibração metodológica preconizada pela literatura, empregou-se o software de análise de dados SciDAVis. A partir da inserção de estimativas preliminares (valores iniciais) fornecidas ao programa, o algoritmo executou um processo iterativo de regressão não-linear que extraiu a assinatura física do material, convergindo para os valores definitivos da constante adimensional $B = 10,4644$ e da dimensão de transição $D_0 = 705,1304$ mm. A substituição destes coeficientes resulta na equação teórica final ajustada para este trabalho (equação (16))

$$\sigma_N = \frac{10,4644 \cdot 2,56}{\sqrt{1 + \frac{D}{705,1304}}} \quad (16)$$

Um comportamento estatístico relevante a ser destacado é a aderência da linha de tendência em relação aos intervalos de confiança dos diferentes lotes. Verifica-se que a reta de ajuste linear passa de forma representativa dentro da margem de erro (desvio padrão) estabelecida para o lote de 150 mm. Em contrapartida, o mesmo comportamento não é observado para o lote de 50 mm, onde a linha de tendência passa totalmente fora do intervalo da margem de erro, superestimando a resistência média real obtida nos ensaios de menor escala. Esse distanciamento sugere que, embora o ajuste linear simplificado indique a tendência global

de queda da resistência, ele apresenta limitações para capturar o comportamento mecânico exato nos diâmetros menores, sendo mais expressivas nos corpos de prova de 50 mm.

Diante da confirmação da tendência de redução da resistência com o aumento da dimensão, torna-se evidente o risco associado à extrapolação direta dos resultados laboratoriais para elementos estruturais massivos. O projeto de peças de grandes dimensões sem a devida correção geométrica pode superestimar a capacidade de carga do material, comprometendo a segurança da obra.

No contexto do dimensionamento ao esforço cortante em vigas sem armadura transversal, a ABNT NBR 6118:2026 (Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2026) estabelece a parcela de resistência oferecida pelo concreto assumindo um crescimento linear e diretamente proporcional à altura útil, negligenciando a queda de desempenho decorrente do efeito de escala. Essa ausência de um fator de redução tem sido apontada como uma lacuna crítica pela literatura técnica recente, a exemplo das análises de (Ribeiro et al., 2023), que demonstram o viés pouco conservador da norma. A referida norma utiliza como fórmula para vigas sem armadura transversal a equação (17), e para vigas com armadura transversal a soma do concreto com o aço: $V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$, sendo $V_{sw} = (A_{sw}/s)0,9f_{ywd}(\sin \alpha + \cos \alpha)$. Na imensa maioria das vigas, os estribos são colocados na vertical (formando um ângulo $\alpha = 90^\circ$ com o eixo da viga). Como o seno de 90° é 1 e o cosseno de 90° é 0. O trecho $(\sin 90^\circ + \cos 90^\circ)$ se resume a $(1 + 0) = 1$. Dessa forma, a parcela resistida pelo aço se reduz à equação (18). Ao somar esta parcela à contribuição do concreto, obtém-se a capacidade resistente total da viga, formulação esta que foi a base para as análises de (Ribeiro et al., 2023).

$$V_{c0} = 0.6f_{ctd}b_wd \quad (17)$$

Onde, $V_{c0} = V_c$ na flexão simples, V_c é a parcela de força cortante, f_{ctd} a resistência de cálculo à tração direta do concreto, b_w é a largura da seção transversal e d a altura útil da viga.

$$V_{sw} = \frac{A_{sw}}{s} 0,9 d f_{ywd} \quad (18)$$

Onde V_{sw} é a força cortante resistida pela armadura transversal, A_{sw} é a área da seção transversal dos estribos de força cortante e f_{ywd} é a tensão na armadura transversal passiva.

Sendo assim, a partir dos resultados experimentais deste trabalho fica a proposição de revisão da norma brasileira, visando reforçar a incorporação de parâmetros redutores nas equações de projeto vigentes, a exemplo das diretrizes estabelecidas por códigos internacionais como o Eurocode 2. Nesta norma europeia, o cálculo da força cortante resistente em elementos sem armadura transversal (como lajes lisas e sapatas) incorpora um fator de escala (fator k),

responsável por penalizar matematicamente a resistência nominal do concreto à medida que a altura útil da seção transversal aumenta.

De maneira análoga, o atual código norte-americano ACI 318:2019 também reconhece e mitiga esse fenômeno estrutural. Em suas últimas atualizações, o ACI introduziu o fator de modificação de escala (λ_s), que reduz a parcela de resistência ao cisalhamento em vigas sem estribos conforme a dimensão da peça cresce.

A incorporação de formulações análogas ou fatores de minoração específicos pela norma brasileira permitiria uma previsão mais realista do comportamento mecânico em estruturas de grande porte, mitigando os riscos associados ao efeito escala.

5.1 Tipo de ruptura

As Figuras 14,15 e 16 apresentam os modos de ruptura observados após os ensaios de compressão axial.

Figura 15 – Corpos de prova de 50mm rompidos



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 16 – Corpos de prova de 100mm rompidos



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

Figura 17 – Corpos de prova de 150mm rompidos



Fonte: Arquivo pessoal (2026)

De maneira geral, todos os corpos de prova apresentaram fissuração compatível com o comportamento esperado para concretos submetidos à compressão axial. A aplicação da carga promoveu o desenvolvimento de tensões internas que culminaram na formação e propagação de fissuras até a ruptura do material.

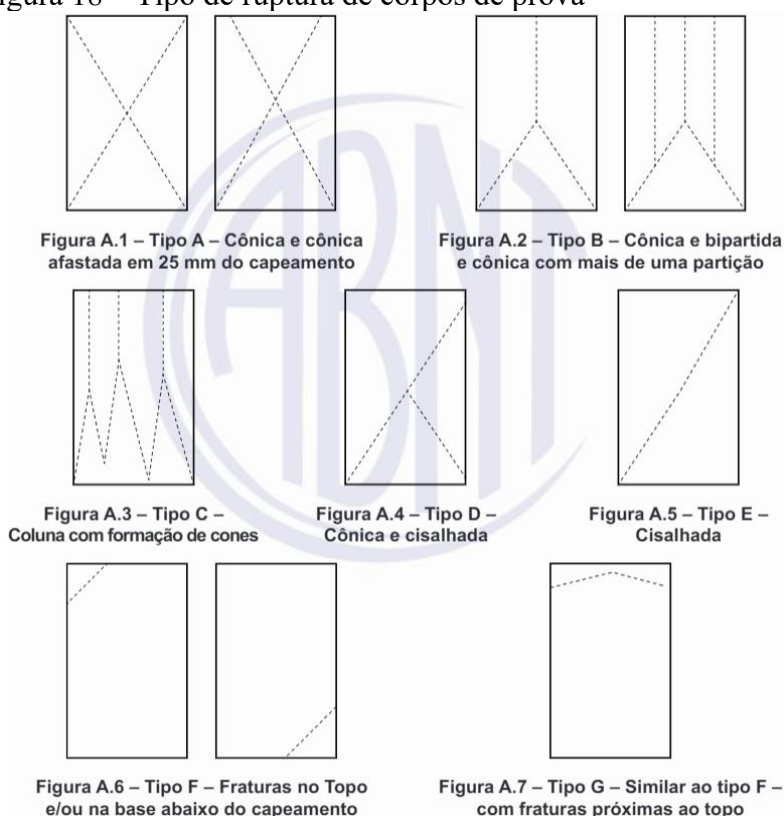
Os corpos de prova de 50 mm apresentaram o padrão de ruptura mais homogêneo entre os grupos analisados. Observou-se predominância de fissuras inclinadas em relação ao eixo longitudinal, caracterizando planos de ruptura associados às regiões de maior tensão de

cisalhamento. A repetição desse padrão entre as amostras sugere um comportamento relativamente uniforme durante o ensaio.

Nos corpos de prova de 100 mm e 150 mm verificou-se maior variabilidade nos mecanismos de ruptura, com diferenças na quantidade, orientação e extensão das fissuras observadas após o ensaio. Essa variabilidade pode estar relacionada à maior heterogeneidade interna dos corpos de prova de maiores dimensões, nos quais a distribuição dos agregados, vazios e microdefeitos tende a influenciar de forma mais significativa a trajetória de propagação das fissuras.

A predominância de planos inclinados de ruptura nos corpos de prova de 50 mm indica que o mecanismo resistente foi fortemente governado pelas tensões de cisalhamento desenvolvidas durante o carregamento, enquanto nos corpos de prova maiores houve maior dispersão dos caminhos de fratura. Assim, embora os resultados de resistência dos corpos de prova de 50 mm tenham apresentado variabilidade estatística, o modo de ruptura observado mostrou-se consistente e repetitivo entre as amostras ensaiadas.

Figura 18 – Tipo de ruptura de corpos de prova



Fonte: ABNT NBR 5739 (2018)

De modo geral, os padrões de ruptura registrados demonstram que os ensaios foram conduzidos adequadamente, não sendo identificados indícios de falhas associadas a

excentricidades significativas de carregamento ou problemas relevantes na preparação dos corpos de prova.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou experimentalmente a influência do efeito escala na resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto com diferentes dimensões e mesma proporção geométrica.

Os resultados mostraram que a resistência média não apresentou uma redução contínua com o aumento das dimensões dos corpos de prova. Enquanto os corpos de prova de 100 mm apresentaram a maior resistência média (27,65 MPa), os corpos de prova de 50 mm e 150 mm apresentaram resistências médias de 24,72 MPa e 22,56 MPa, respectivamente.

Apesar dessa divergência em relação ao comportamento teórico esperado, observou-se uma redução significativa da resistência quando comparados os corpos de prova de 100 mm e 150 mm, resultado compatível com as previsões das teorias estatística de Weibull e energética de Bazant. Esse comportamento confirma que o aumento do volume do concreto tende a favorecer a ocorrência de defeitos críticos e a reduzir a resistência nominal do material.

A menor resistência observada nos corpos de prova de 50 mm provavelmente está associada a limitações experimentais. O reduzido número de amostras pode não ter sido suficiente para representar adequadamente a variabilidade desse grupo, especialmente considerando que a dispersão dos resultados foi superior à observada nos demais tamanhos. Além disso, a elevada relação entre o tamanho máximo do agregado e as dimensões do corpo de prova pode ter intensificado efeitos locais relacionados à distribuição dos agregados, à presença de vazios e ao processo de adensamento.

Adicionalmente, como fundamentado neste estudo, a ABNT NBR 6118 diverge de códigos internacionais— como o norte-americano ACI 318-19 e o europeu Eurocódigo 2 — ao persistir em ignorar a penalização matemática do efeito de escala no cálculo da resistência aos esforços cortantes em elementos sem armadura transversal. A redução de resistência verificada nos corpos de prova de 150 mm alerta para o risco de estimativas não conservadoras no projeto de tais elementos.

Dessa forma, conclui-se que os resultados obtidos indicam a existência do efeito escala no concreto, embora sua manifestação tenha sido parcialmente mascarada por fatores experimentais associados aos corpos de prova de menor dimensão.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se aumentar o número de amostras para os corpos de prova de 50 mm, de modo a reduzir a influência estatística de resultados individuais e obter médias mais representativas. Também se recomenda investigar a influência

da relação entre o tamanho máximo do agregado graúdo e as dimensões do corpo de prova, bem como ampliar a quantidade de escalas analisadas, permitindo uma avaliação mais detalhada da evolução do efeito escala no concreto.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary**. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **ET-67: Parâmetros de dosagem do concreto**. São Paulo: ABNT, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto fresco — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2026.
- BAŽANT, Z. P. Size effect on structural strength: a review. *Archive of Applied Mechanics*, v. 69, p. 703–725, 1999.
- BAŽANT, Zdeněk P.; PLANAS, Jaime. **Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials**. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- COURA, Cláudia V. G.; BARBOSA, Maria Teresa G.; DARWISH, Fathi. Análise Crítica Sobre Efeito Tamanho Em Estruturas de Concreto. *Revista de Engenharia Civil*, 2008.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. [S.l.: S.n.].
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Editora Freevale, 2013.

RIBEIRO, Igor José Santos *et al.* Analysis of size effect in shear transfer mechanisms and size effect suppression by transversal reinforcement - contributions to NBR 6118. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 16, n. 3, 2023.

RIOS, Roberto; RIERA, Jorge D.; ITURRIOZ, Ignacio. Uma Contribuição ao Entendimento do Efeito de Escala em Estruturas de Concreto. **Mecânica Computacional**, v. 21, p. 979–991, 2002.

RODRIGUES, Públio Penna Firme. **Parâmetros da dosagem racional do concreto**: Estudo Técnico. São Paulo: ABCP, 1988.

SANABRIA, R. A. *et al.* Estudo do efeito escala em vigas de concreto armado sem estribos usando análise numérica não linear. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 61, 2019, Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza, 2019.

SANTOS, Ayrton Hugo de Andrade. **Estudo experimental do efeito de escala em estruturas de concreto utilizando correlação de imagem digital**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2015.