

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
MOBILIDADE

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE PILARETES SUBMETIDOS À
FLEXO-COMPRESSÃO RETA COM VARIAÇÃO DA
EXCENRICIDADE

LEONARDO CARLOS PINTO

ORIENTADOR: PROF. DR. DIEGO BORJA FERREIRA

ANÁPOLIS, 2026.

LEONARDO CARLOS PINTO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE PILARETES SUBMETIDOS À
FLEXO-COMPRESSÃO RETA COM VARIAÇÃO DA
EXCENTRICIDADE**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Anápolis, como requisito parcial para conclusão do curso.

Orientador: Prof. Dr. Diego Borja Ferreira.

ANÁPOLIS, 2026.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P659a Pinto, Leonardo Carlos.

Avaliação experimental de pilaretes submetidos à flexo-compressão reta com variação da excentricidade. / Leonardo Carlos Pinto. – Anápolis: IFG, 2026.

72 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Diego Borja Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Anápolis – Bacharelado em Ciência da Computação, 2026.

1. Flexo-compressão. 2. Excentricidade. 3. Pilaretes. Concreto armado.

I. Ferreira, Diego Borja (orient.).

II. Título.

CDD 624.177

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Avaliação experimental de pilaretes submetidos à flexo-compressão reta com variação da excentricidade**, sob orientação de Diego Borja Ferreira, apresentado pelo aluno **Leonardo Carlos Pinto (20221060130029)** do Curso **Bacharelado em Engenharia Civil da Mobilidade (Câmpus Anápolis)**. Os trabalhos foram iniciados às **15:00** do dia **02/07/2026** pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Diego Borja Ferreira** (Presidente)
- **Frederico de Souza Aleixo** (Examinador Interno)
- **Fabício Henrique Vieira Guimarães** (Examinador Externo)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota : 10,0

Observação / Apreciações:

A banca considerou que o aluno cumpriu com excelência todas as etapas e atribuições relacionadas ao desenvolvimento das atividades do trabalho de conclusão de curso, sendo aprovado com nota máxima.

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Diego Borja Ferreira** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Diego Borja Ferreira**, em 02/07/2026 16:36:58 com chave 641a34aa764d11f18c6b005056a537a4.
- **Frederico de Souza Aleixo**, em 03/07/2026 15:40:27 com chave a922c5fa770e11f1ab18005056a537a4.
- **Fabício Henrique Vieira Guimarães**, em 06/07/2026 09:37:50 com chave 7fe8876c793711f1bb8c005056a537a4.

Este documento foi emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.ifg.edu.br/comum/autenticar_documento/ e informe os dados a seguir.

Tipo de Documento: Ata de Projeto Final

Data da Emissão: 06/07/2026

Código de Autenticação: 255ac3





INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Leonardo Carlos Pinto

Matrícula: 20221060130029

Título do Trabalho: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE PILARETES SUBMETIDOS À FLEXO-COMPRESSÃO RETA COM VARIAÇÃO DA EXCENTRICIDADE

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito)

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Anápolis, 09 de julho de 2026.



Documento assinado digitalmente
LEONARDO CARLOS PINTO
Data: 09/07/2026 11:25:00-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Dedico este trabalho à minha família,
pelo apoio diário, pela paciência com as
minhas ausências e pela confiança em
cada etapa desta caminhada. A conclusão
deste ciclo só é completa porque tenho
vocês ao meu lado.

RESUMO

A excentricidade da carga aplicada altera diretamente o comportamento de pilares de concreto armado, influenciando sua capacidade resistente, seus deslocamentos laterais e o desenvolvimento das fissuras. Este trabalho analisou experimentalmente pilaretes de concreto armado submetidos à flexo-compressão reta, com diferentes níveis de excentricidade. Foram moldados e ensaiados cinco pilaretes, identificados como P0, P25, P50, P75 e P100, correspondentes às excentricidades de 0 mm, 25 mm, 50 mm, 75 mm e 100 mm, respectivamente. Todos os modelos foram produzidos com seção transversal de 10 cm $\times$ 15 cm, altura total de 55 cm, traço de concreto 1:1:3, resistência à compressão de projeto de aproximadamente 40 MPa e mesma configuração de armadura, permitindo avaliar a influência da excentricidade na carga de ruptura, no surgimento da primeira fissura, nos deslocamentos laterais e no padrão de fissuração. Os resultados mostraram redução da capacidade resistente com o aumento da excentricidade, com cargas de ruptura de 415 kN para o P0, 397 kN para o P25, 372 kN para o P50, 153 kN para o P75 e 77 kN para o P100. Também se observou antecipação do surgimento das fissuras e aumento dos deslocamentos laterais nos modelos com maiores excentricidades. A ruptura ocorreu predominantemente na região próxima ao consolo superior, porém com alterações no padrão de fissuração conforme o aumento da excentricidade. Conclui-se que a excentricidade influenciou diretamente o comportamento estrutural dos pilaretes, provocando redução não linear da capacidade resistente, com perdas mais acentuadas a partir da excentricidade de 75 mm. Também se observou aumento dos deslocamentos laterais e mudança no modo de ruptura, passando de danos mais concentrados por esmagamento do concreto nos menores níveis de excentricidade para fissuras de flexão mais evidentes nos modelos com maiores excentricidades.

Palavras-chave: Flexo-compressão. Excentricidade. Pilaretes. Concreto armado.

ABSTRACT

The eccentricity of the applied load directly affects the behavior of reinforced concrete columns, influencing their load-bearing capacity, lateral displacements, and crack development. This study experimentally analyzed reinforced concrete column specimens subjected to uniaxial combined bending and compression, with different levels of eccentricity. Five specimens were cast and tested, identified as P0, P25, P50, P75, and P100, corresponding to eccentricities of 0 mm, 25 mm, 50 mm, 75 mm, and 100 mm, respectively. All specimens were produced with a cross section of 10 cm $\times$ 15 cm, total height of 55 cm, concrete mix ratio of 1:1:3, design compressive strength of approximately 40 MPa, and the same reinforcement configuration, allowing the evaluation of the influence of eccentricity on the failure load, the onset of the first crack, lateral displacements, and cracking pattern. The results showed a reduction in load-bearing capacity with increasing eccentricity, with failure loads of 415 kN for P0, 397 kN for P25, 372 kN for P50, 153 kN for P75, and 77 kN for P100. The earlier onset of cracking and the increase in lateral displacements were also observed in the specimens with greater eccentricities. Failure occurred predominantly near the upper corbel region, although changes in the cracking pattern were observed as eccentricity increased. It is concluded that eccentricity directly influenced the structural behavior of the specimens, causing a nonlinear reduction in load-bearing capacity, with more significant losses from the eccentricity of 75 mm onward. An increase in lateral displacements and a change in the failure mode were also observed, from more concentrated damage due to concrete crushing at lower eccentricity levels to more evident flexural cracks in the specimens with greater eccentricities.

Keywords: Combined bending and compression. Eccentricity. Column specimens. Reinforced concrete.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM American Society for Testing and Materials

CA-50 Aço para concreto armado com resistência característica de escoamento de 500 MPa

CP II-F 32 Cimento Portland composto com filler, classe resistente 32 MPa

DMC Dimensão máxima característica

EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio

EPUSP Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas

MF Módulo de finura

NBR Norma Brasileira

NM Norma Mercosul

P0 Pilarete com excentricidade de 0 mm

P25 Pilarete com excentricidade de 25 mm

P50 Pilarete com excentricidade de 50 mm

P75 Pilarete com excentricidade de 75 mm

P100 Pilarete com excentricidade de 100 mm

R1 Relógio comparador 1

R2 Relógio comparador 2

R3 Relógio comparador 3

SiO₂ Dióxido de silício

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Domínios de deformações.....	16
Figura 2 – Flexão composta normal.	17
Figura 3 – Flexão composta oblíqua.....	19
Figura 4 – Coluna armada de aço com armadura transversal.	27
Figura 5 – Cimento Portland CP II-F 32.	32
Figura 6 – Aditivo plastificante Sika Concreto Forte.....	33
Figura 7 – Sílica ativa Elkem Microsilica® 920D.	34
Figura 8 – Adensamento dos pilaretes em mesa vibratória.	35
Figura 9 – Cura úmida dos corpos de prova e dos pilaretes em tanque com água.	36
Figura 10 – Ensaio de abatimento do concreto pelo método do tronco de cone.	37
Figura 11 – Corpos de prova para ensaios de caracterização do concreto endurecido.	38
Figura 12 – Geometria e principais dimensões dos pilaretes utilizados no estudo.	38
Figura 13 – Conjunto de forma, armadura e pilarete.....	39
Figura 14 – Armadura original utilizada nos pilaretes.	40
Figura 15 – Detalhamento das armaduras dos pilaretes.	41
Figura 16 – Ruptura observada no ensaio preliminar do pilarete teste.	42
Figura 17 – Comparação entre a armadura original e a armadura reforçada.	42
Figura 18 – Etapas da moldagem dos pilaretes.	43
Figura 19 – Prensa hidráulica EMIC DL20000 utilizada nos ensaios.....	44
Figura 20 – Esquema de posicionamento dos relógios comparadores no pilarete.	45
Figura 21 – Configuração experimental utilizada nos ensaios dos pilaretes.	46
Figura 22 – Evolução da resistência à compressão do concreto.....	47
Figura 23 – Evolução da resistência à tração do concreto.....	48
Figura 24 – Relação carga × deslocamento do pilarete P0 com excentricidade de 0 mm.....	49
Figura 25 – Relação carga × deslocamento do pilarete P25 com excentricidade de 25 mm. ..	50
Figura 26 – Relação carga × deslocamento do pilarete P50 com excentricidade de 50 mm..	50
Figura 27 – Relação carga × deslocamento do pilarete P75 com excentricidade de 75 mm. ..	50
Figura 28 – Relação carga × deslocamento do pilarete P100 com excentricidade de 100 mm	51
Figura 29 – Resultados experimentais dos pilaretes submetidos a diferentes excentricidades.	51
Figura 30 – Carga × deslocamento obtidas a partir do maior deslocamento em cada pilarete.	54
Figura 31 – Deslocamentos medidos no relógio R2 para a carga de 70 kN.....	56
Figura 32 – Aspectos da fissuração e do modo de ruptura do pilarete P0.....	57
Figura 33 – Aspectos da fissuração e do modo de ruptura do pilarete P25.....	58
Figura 34 – Aspectos da fissuração e do modo de ruptura do pilarete P50.....	59
Figura 35 – Aspectos da fissuração e do modo de ruptura do pilarete P75.....	60
Figura 36 – Aspectos da fissuração e do modo de ruptura do pilarete P100.....	61
Figura 37 – Mapa de fissuração da face tracionada dos pilaretes após os ensaios.....	62
Figura 38 – Distribuição dos deslocamentos ao longo da altura do pilarete P0.....	63
Figura 39 – Distribuição dos deslocamentos ao longo da altura do pilarete P25.....	64
Figura 40 – Distribuição dos deslocamentos ao longo da altura do pilarete P50.....	65

Figura 41 – Distribuição dos deslocamentos ao longo da altura do pilarete P75.	66
Figura 42 – Distribuição dos deslocamentos ao longo da altura do pilarete P100.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características da areia (agregado miúdo).....	30
Tabela 2 – Características da brita (agregado graúdo).	31
Tabela 3 – Propriedades e características do cimento CP II-F 32.	32
Tabela 4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade do concreto.	47
Tabela 5 – Valores de carga de ruptura, carga de última leitura e carga correspondente à primeira fissura dos pilaretes.	49
Tabela 6 – Perda da carga de ruptura dos pilaretes em relação ao modelo P0.	53
Tabela 7 – Relação entre a carga da primeira fissura e a carga de ruptura dos pilaretes.	53

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Comportamento de pilares sob flexão composta normal.....	17
3.2	Flexão composta oblíqua em pilares de concreto armado	19
3.3	Critérios de dimensionamento e normatização.....	20
3.4	Efeitos de segunda ordem e estabilidade	21
3.5	Síntese do comportamento mecânico em pilares.....	22
3.6	Evolução histórica dos modelos de interação força normal-momento fletor (n-m)	23
3.7	Influência da excentricidade no comportamento estrutural e no modo de ruptura	24
3.8	Classificação dos pilares quanto à esbeltez	25
3.8.1	Pilares curtos	26
3.8.2	Pilares esbeltos e efeitos de instabilidade.....	26
3.9	Confinamento do concreto e papel da armadura transversal	27
3.10	Ensaio experimentais em modelos reduzidos de pilares	28
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	Caracterização dos Materiais	29
4.1.1	Agregado miúdo - areia	29
4.1.2	Agregado graúdo - brita.....	30
4.1.3	Cimento	32
4.1.4	Aditivo	33
4.1.5	Sílica	34
4.2	Definição do traço de concreto	34
4.3	Procedimento de produção do concreto.....	35
4.4	Caracterização do concreto.....	36
4.4.1	Concreto fresco.....	36
4.4.2	Concreto endurecido.....	37
4.5	Características dos pilaretes.....	38
4.6	Armadura dos pilaretes	39
4.7	Moldagem e cura dos pilaretes	43
4.8	Procedimento de ensaio	44
4.8.1	Aparato experimental	44
4.8.2	Aplicação da carga.....	44
4.8.3	Instrumentação.....	45
4.8.4	Monitoramento e ruptura	46
5.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	46
5.1	Propriedades Mecânicas do Concreto	46
5.2	Carga de ruptura e aparecimento de fissuras	49
5.3	Relação Carga x Deslocamento	49

6.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
6.1	Influência da excentricidade na resistência dos pilaretes	51
6.2	Comportamento carga × deslocamento	54
6.3	Fissuração e modo de ruptura.....	56
6.4	Síntese dos padrões de fissuração e ruptura	61
6.5	Simetria dos deslocamentos ao longo da altura dos pilaretes.....	63
7.	CONCLUSÃO.....	68
	REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

Compreender o comportamento dos pilares de concreto armado sob diferentes condições de carregamento ajuda a avaliar a segurança e o desempenho das estruturas. Em sistemas reais, variações na posição da carga aplicada, imperfeições geométricas e deslocamentos progressivos fazem com que esses elementos raramente trabalhem sob compressão centrada (axial). Nessas situações, surgem estados de flexo-compressão, nos quais o esforço normal e momento fletor atuam de forma conjunta. A relevância deste trabalho está na necessidade de compreender, com base em dados experimentais, como a excentricidade influencia a capacidade resistente e o comportamento deformacional desses elementos (ABNT NBR 6118, 2026; CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Pequenas alterações na excentricidade podem modificar significativamente a distribuição das tensões no concreto e nas armaduras, alterando a rigidez e o modo de ruptura dos pilares. Esses aspectos impactam o dimensionamento estrutural, uma vez que modelos adotados pelas normas técnicas, como a ABNT NBR 6118 (2026), baseiam-se em hipóteses que podem não refletir integralmente o comportamento de elementos em escala reduzida. Estudos experimentais ajudam a verificar esses modelos e aproximam a análise teórica do comportamento físico observado nos ensaios (CURADO; GOMES, 2006; MUNIZ et al., 2019).

Pilares submetidos à flexo-compressão representam uma condição comum em edificações, principalmente quando há variações construtivas, carregamentos assimétricos e redistribuições internas de esforços. Por esse motivo, os resultados experimentais permitem discutir o comportamento desses elementos com base em dados observados em ensaio (ABNT NBR 6118, 2026; MUNIZ *et al.*, 2019).

Segundo a ABNT NBR 6118 (2026), os pilares de concreto armado devem ser sempre verificados considerando a presença de excentricidades mínimas, mesmo quando o carregamento é teoricamente centrado. Essa exigência normativa reconhece que imperfeições geométricas, desvios construtivos e redistribuições internas de esforços fazem parte do comportamento real das estruturas, tornando a flexão composta uma condição inerente ao funcionamento dos pilares. A norma, portanto, exige que o dimensionamento considere simultaneamente o esforço normal e o momento fletor nesses elementos.

Carvalho e Figueiredo Filho (2014) destacam que a excentricidade da carga aplicada exerce influência direta na posição da linha neutra e no domínio de deformação em que o pilar passa a trabalhar. À medida que a excentricidade aumenta, ocorre redução da área comprimida

de concreto e maior solicitação da armadura longitudinal tracionada, alterando o equilíbrio interno da seção. Esse comportamento pode conduzir a diferentes modos de ruptura, desde falhas mais frágeis, associadas ao esmagamento do concreto, até respostas mais dúcteis, quando o escoamento do aço antecede a ruptura. Esse entendimento ajuda a interpretar o comportamento estrutural de pilares submetidos à flexo-compressão.

Estudos experimentais reforçam essas observações teóricas. Curado e Gomes (2006) e Muniz *et al.* (2019) verificaram que o aumento da excentricidade resulta em redução da capacidade resistente dos pilares, porém acompanhado de maior ductilidade e de evolução gradual da fissuração. Esses resultados indicam que pilares submetidos a maiores excentricidades tendem a apresentar sinais mais evidentes antes da ruptura, como maiores deformações e fissuras mais visíveis, aspecto relevante do ponto de vista da segurança estrutural.

Este trabalho analisa experimentalmente pilaretes de concreto armado submetidos a diferentes níveis de excentricidade, para avaliar como essa variável interfere na capacidade resistente, nos deslocamentos laterais e no padrão de fissuração. A partir dos ensaios, pretende-se obter dados experimentais que permitam discutir de forma clara até que ponto a excentricidade afeta a segurança de um elemento estrutural, especialmente no que se refere aos limites de resistência e ao desenvolvimento de fissuras nesses elementos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar experimentalmente o comportamento de pilaretes de concreto armado submetidos à flexo-compressão reta, com diferentes níveis de excentricidade da carga aplicada, para compreender a influência dessa variável na capacidade resistente, nos deslocamentos laterais e no padrão de fissuração dos elementos estruturais.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Ensaiar pilaretes de concreto armado com excentricidades variadas, incluindo um com carga axial centrada e outros com excentricidades crescentes.

- Medir e registrar a carga de ruptura, os deslocamentos laterais (flechas) e a evolução visual do padrão de fissuração durante os ensaios.
- Avaliar a relação entre o aumento da excentricidade e a capacidade resistente dos pilaretes.
- Analisar a influência da excentricidade no comportamento deformacional dos pilaretes, por meio das flechas observadas ao longo do carregamento.
- Identificar e comparar os padrões de fissuração resultantes das diferentes condições de carregamento.
- Fornecer dados experimentais que subsidiem a compreensão prática dos efeitos da flexo-compressão reta em pilaretes de concreto armado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os pilares de concreto armado funcionam como elementos de transmissão de carga, conduzindo aos elementos de fundação as ações provenientes das lajes, vigas e demais componentes estruturais (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). Por serem elementos lineares e predominantemente verticais, sua função está diretamente ligada à estabilidade global da estrutura.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6118 (2026) aponta que os pilares são usualmente solicitados por esforços normais de compressão, podendo, entretanto, estar submetidos simultaneamente a momentos fletores em uma ou mais direções, em função das excentricidades da carga e dos deslocamentos globais da estrutura, chamados de efeitos de segunda ordem.

A compreensão dos mecanismos físicos associados ao comportamento dos pilares contribui para o seu correto dimensionamento, pois esses elementos trabalham sob a interação entre força normal e flexão. Essa interação exerce influência significativa tanto na capacidade resistente quanto nos modos de ruptura. Conforme destacado por Carvalho e Figueiredo Filho (2014), o comportamento de um pilar depende não apenas da magnitude da carga aplicada, mas também da excentricidade, da posição da linha neutra e da distribuição das tensões na seção, fatores que determinam o domínio de deformação e o nível de ductilidade do elemento.

Historicamente, a verificação de pilares utilizou ábacos que relacionam esforço normal, momento fletor e taxa de armadura. Esses diagramas foram desenvolvidos a partir de estudos experimentais e análises teóricas e permitem visualizar a interação entre Força Normal (N) e

Momento fletor (M). Além da aplicação prática, os ábacos auxiliam na compreensão do comportamento estrutural dos pilares.

Entre os principais ábacos utilizados na literatura destacam-se aqueles propostos por Venturini e Rodrigues (1987), empregados na análise da flexo-compressão normal, e por Pinheiro, Baraldi e Porem (1994), associados aos estudos da flexo-compressão oblíqua. Embora sejam anteriores aos softwares atuais de cálculo estrutural, esses métodos gráficos ainda são utilizados no meio acadêmico por permitirem visualizar os efeitos da flexão combinada no comportamento dos pilares.

O dimensionamento de pilares é uma das etapas mais complexas do projeto estrutural. Segundo Casagrande (2016), essa complexidade decorre das múltiplas solicitações envolvidas, especialmente quando ocorrem excentricidades significativas que induzem flexão composta de grande intensidade. Além disso, pilares esbeltos estão sujeitos aos efeitos de instabilidade, como flambagem e deformações progressivas, que exigem maior rigor na determinação dos esforços atuantes.

A ABNT NBR 6118 (2026) prevê a consideração de efeitos de segunda ordem e da fluência do concreto em estruturas de maior esbeltez. Esses fenômenos alteram a rigidez efetiva do elemento e aumentam as excentricidades ao longo do tempo.

Ferreira (2014), aponta que diferentes tipos de excentricidade podem influenciar o comportamento estrutural dos pilares:

- Excentricidade inicial, proveniente do monolitismo das ligações entre pilares e vigas, resultando em momentos fletores de primeira ordem;
- Excentricidade accidental, decorrente de imperfeições geométricas e variações construtivas no eixo do elemento;
- Excentricidade de segunda ordem, consequência dos deslocamentos e deformações da estrutura sob carregamento, os quais geram momentos fletores adicionais.

Esses desvios alteram o diagrama de tensões, reduzem a capacidade resistente e podem antecipar uma ruptura frágil, o que justifica sua consideração no dimensionamento.

Muniz *et al.* (2019) analisaram pilares reduzidos submetidos a diferentes excentricidades e observaram que o aumento dessa variável reduz a resistência, mas pode levar a um comportamento mais dúctil. Os autores destacam, entretanto, que excentricidades muito elevadas aproximam o comportamento do elemento ao de uma viga, não sendo adequadas como referência direta para dimensionamento.

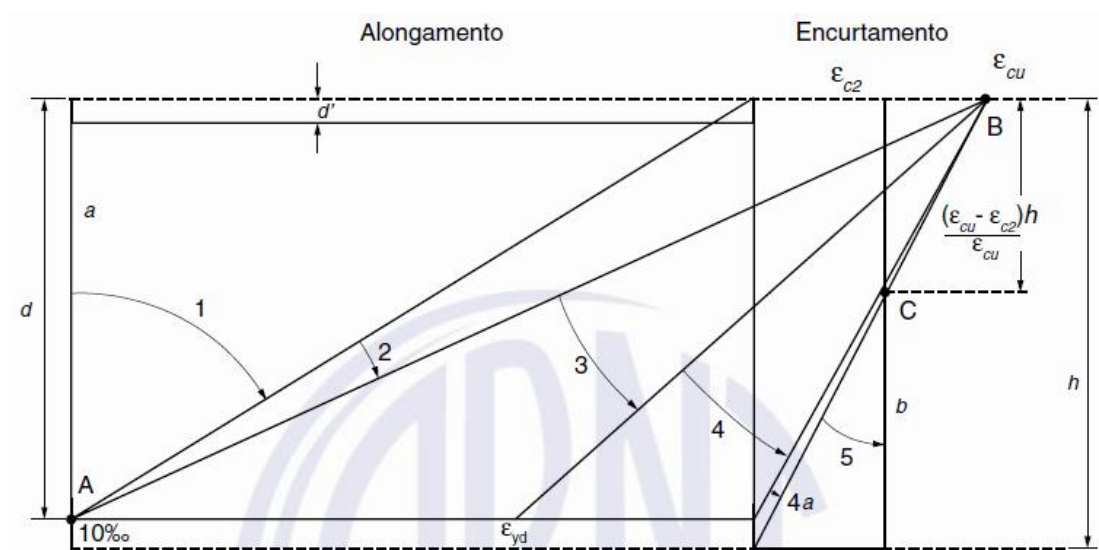
Curado e Gomes (2006) investigaram pilares submetidos à flexo-compressão reta com diferentes excentricidades de carga e verificaram que maiores excentricidades aumentam os deslocamentos laterais e as deformações no concreto e no aço, reforçando a interação entre esforços normais e fletores. Esses resultados se relacionam aos domínios de deformação apresentados por Carvalho e Figueiredo Filho (2014), nos quais a posição da linha neutra e a relação entre deformação do concreto e escoamento da armadura influenciam o modo de ruptura.

Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), pilares submetidos à flexo-compressão podem atuar em diferentes domínios de deformação:

- Domínio 2 – comportamento voltado para a flexão, comum em casos de elevada excentricidade;
- Domínio 3 – comportamento ideal para o projeto, pois o aço escoava antes do concreto, promovendo ductilidade;
- Domínios 4 e 4a – associados à ruptura frágil por esmagamento do concreto, condição que deve ser evitada em pilares.

A Figura 1 apresenta os domínios de deformação no estado-limite último de seções de concreto armado, conforme a ABNT NBR 6118 (2026), evidenciando a relação entre as deformações do concreto e do aço e os diferentes modos de comportamento estrutural dos pilares submetidos à flexo-compressão.

Figura 1 – Domínios de deformações.



Fonte: ABNT NBR 6118:2026.

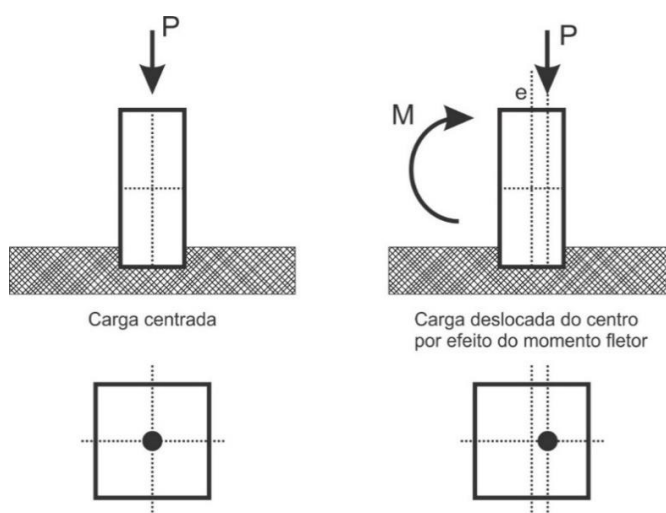
A interação entre compressão e flexão define o comportamento dos pilares de concreto armado. Embora a compressão centrada seja considerada em situações idealizadas, imperfeições e deslocamentos fazem com que os pilares trabalhem, na prática, sob flexão composta. Por isso, compreender a flexo-compressão normal ajuda a avaliar a rigidez e a segurança desses elementos.

3.1 Comportamento de pilares sob flexão composta normal

A flexão composta normal corresponde a um caso particular da flexão composta, no qual o pilar está submetido simultaneamente a um esforço normal e a um momento fletor atuando em apenas uma direção principal da seção transversal. Quando o esforço normal é de compressão, essa condição é usualmente denominada flexo-compressão normal. Portanto, os termos, flexão composta normal e flexo-compressão normal referem-se ao mesmo fenômeno estrutural, diferenciando-se apenas pela ênfase dada ao tipo de esforço normal atuante (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

A flexão composta normal (FIGURA 2) ocorre quando a linha de ação da carga aplicada não coincide com o centroide da seção transversal do pilar, de modo que o elemento é simultaneamente solicitado por um esforço normal e por um momento fletor. Na prática, essa é a situação mais comum nas estruturas, uma vez que imperfeições geométricas, deslocamentos horizontais e redistribuições internas de esforços impedem a compressão completamente centrada (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014; ABNT NBR 6118, 2026).

Figura 2 – Flexão composta normal.



Fonte: Autor (2026).

A ABNT NBR 6118 (2026) reconhece esse comportamento ao determinar que toda verificação de pilares considere excentricidades mínimas, mesmo quando o carregamento é projetado como perfeitamente centrado. Essas excentricidades representam imperfeições inevitáveis de construção e de análise, mostrando que a flexão composta faz parte do comportamento real dos pilares.

O comportamento dos pilares sob flexo-compressão está diretamente relacionado ao diagrama tensão-deformação do concreto. Carvalho e Figueiredo Filho (2014) mostram que o concreto apresenta uma fase inicial quase linear, seguida de um trecho não linear até atingir a deformação última, fixada pela ABNT NBR 6118 (2026) em 3,5‰ para concretos convencionais até a classe C50. Essa resposta mecânica influencia a rigidez do pilar, a distribuição das tensões e a evolução das deformações ao longo do carregamento. Com o aumento da excentricidade, a armadura tracionada passa a ser mais solicitada, modificando o equilíbrio interno entre tração e compressão, alterando a forma como os esforços atuam na seção.

Estudos experimentais demonstram que o aumento da excentricidade reduz a capacidade resistente global, pois diminui a área comprimida e aumenta a solicitação da armadura longitudinal. Essa redução pode ser acompanhada de maior deformabilidade e de fissuração mais progressiva, como observado em ensaios de pilares submetidos à flexo-compressão reta com diferentes níveis de excentricidade (CURADO; GOMES, 2006; MUNIZ et al., 2019).

A rigidez do pilar é outro fator determinante para a sua resposta estrutural. Carvalho e Figueiredo Filho (2014) destacam que o módulo de elasticidade do concreto, que para concretos usuais varia entre 25 e 35 GPa, influencia diretamente os deslocamentos laterais e a sensibilidade aos efeitos de segunda ordem. Pilares esbeltos, especialmente quando submetidos à flexão composta, podem apresentar amplificação significativa dos momentos fletores devido ao fenômeno $P-\Delta$, onde a carga vertical (P) gera um momento extra ao atuar sobre o deslocamento lateral (Δ).

Na análise dos resultados experimentais, esses efeitos serão relacionados aos deslocamentos laterais observados nos pilares ensaiados. Mesmo pequenas deformações laterais podem ampliar os momentos atuantes, especialmente os elementos mais esbeltos. Por isso, a NBR 6118 (2026) exige a verificação desses efeitos de segunda ordem, admitindo desde análises simplificadas até métodos mais rigorosos, conforme a precisão exigida pelo projeto.

A transição entre um comportamento predominantemente comprimido e um comportamento dominado pela flexão depende da relação entre a excentricidade aplicada e as dimensões da seção transversal. Para excentricidades reduzidas, o comportamento aproxima-se da compressão simples; para excentricidades elevadas, o pilar passa a atuar com maior participação da flexão e da armadura tracionada (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014; ABNT NBR 6118, 2026).

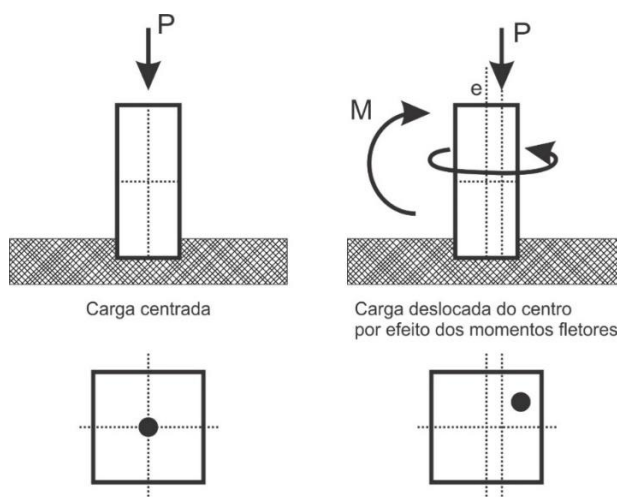
A excentricidade interfere na rigidez, na capacidade resistente e no mecanismo de ruptura do pilar. Mesmo com características geométricas e mecânicas semelhantes, pequenas variações na posição da carga podem alterar a resposta do elemento.

A flexão composta normal representa melhor o comportamento real dos pilares de concreto armado, pois a compressão centrada é uma situação idealizada em projeto. A análise da excentricidade, da rigidez, do comportamento tensão–deformação do concreto e dos efeitos de segunda ordem ajuda no dimensionamento e na avaliação do desempenho estrutural.

3.2 Flexão composta oblíqua em pilares de concreto armado

A flexão composta oblíqua ocorre quando o pilar é submetido simultaneamente a um esforço normal e a momentos fletores atuando em duas direções principais da seção transversal. Diferentemente da flexão composta normal, na qual o momento atua em apenas uma direção, na flexão composta oblíqua o carregamento excêntrico gera flexão simultânea nos eixos principais, resultando em um estado de tensões mais complexo (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). Uma ilustração da flexão composta oblíqua pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3 – Flexão composta oblíqua.



Fonte: Autor (2026).

Segundo Pinheiro, Baraldi e Porem (1994), esse tipo de solicitação é comum em pilares de canto e em situações nas quais há assimetria geométrica, irregularidades na distribuição de cargas ou ações horizontais combinadas. Nesses casos, a posição da linha neutra não permanece alinhada a um único eixo, exigindo a consideração simultânea dos momentos fletores nas duas direções para a correta avaliação da capacidade resistente da seção.

Embora a flexão composta oblíqua não seja objeto deste trabalho, sua apresentação ajuda a diferenciar essa condição da flexão composta normal. Com isso, delimita-se o estudo à flexo-compressão reta sem desconsiderar que os pilares podem estar sujeitos a estados de solicitação mais complexos em estruturas reais.

3.3 Critérios de dimensionamento e normatização

O projeto de pilares de concreto armado no Brasil é regido pela ABNT NBR 6118 (2026), que estabelece critérios rigorosos para garantir a segurança e a estabilidade das estruturas. Conforme destacado por Carvalho e Figueiredo Filho (2014), a norma brasileira segue uma tendência consolidada em códigos internacionais, como o Eurocode e o ACI, ao exigir que todo pilar seja verificado considerando excentricidades mínimas e efeitos de segunda ordem.

Essa abordagem considera que, mesmo em situações de carga aparentemente centrada, podem ocorrer imperfeições construtivas e deslocamentos laterais. Com isso, os critérios normativos buscam manter o elemento dentro de domínios de deformação seguros, reduzindo o risco de rupturas frágeis e garantindo a durabilidade da edificação.

Além dessas exigências gerais, a ABNT NBR 6118 (2026) define procedimentos específicos para o dimensionamento de pilares submetidos à compressão simples e à flexo-compressão. Entre os principais aspectos normativos, destaca-se a obrigatoriedade de consideração de excentricidades mínimas, mesmo quando o carregamento é teoricamente centrado, reconhecendo que imperfeições geométricas, desvios construtivos e deslocamentos inevitáveis fazem com que os pilares estejam, na prática, submetidos a estados de flexo-compressão.

A norma também estabelece critérios relacionados à esbeltez dos pilares, definindo limites a partir dos quais os efeitos de segunda ordem devem ser considerados de forma mais rigorosa. Em pilares pouco esbeltos, esses efeitos podem ser tratados por meio de procedimentos simplificados, enquanto pilares mais esbeltos exigem a adoção de métodos de

análise mais rigorosos, capazes de representar adequadamente a interação entre esforços solicitantes e deslocamentos laterais, garantindo a estabilidade estrutural do elemento.

Outro ponto importante está relacionado aos domínios de deformação, utilizados para a verificação da segurança da seção transversal. O dimensionamento deve assegurar que a combinação entre esforço normal, momento fletor e armaduras conduza a um comportamento adequado do pilar, preferencialmente associado a domínios que proporcionem maior ductilidade e aviso prévio de ruptura. Os diagramas de interação força normal–momento fletor (N–M), conforme discutido por Carvalho e Figueiredo Filho (2014), auxiliam na avaliação da capacidade resistente da seção.

A ABNT NBR 6118 (2026) também estabelece requisitos mínimos para o detalhamento das armaduras, incluindo limites de espaçamento e diâmetro dos estribos, para garantir o confinamento do concreto e o controle da fissuração. Esses critérios reforçam o papel da armadura transversal no desempenho estrutural dos pilares, especialmente em situações de flexo-compressão e presença de efeitos de segunda ordem.

3.4 Efeitos de segunda ordem e estabilidade

A estabilidade de um pilar depende diretamente dos efeitos de segunda ordem ($P-\Delta$). Na prática, mesmo um deslocamento lateral pequeno pode aumentar significativamente o momento fletor e comprometer a resistência de peças esbeltas. Esses efeitos ocorrem quando a presença de deslocamentos laterais modifica a posição de aplicação da força normal, gerando momentos adicionais que não são considerados na análise de primeira ordem.

Carvalho e Figueiredo Filho (2014) ressaltam que essa amplificação está diretamente relacionada à rigidez secante do elemento, a qual é inferior à rigidez elástica inicial em razão da fissuração, da fluência e das deformações diferidas. À medida que a rigidez diminui, os deslocamentos laterais aumentam, aproximando o elemento de um comportamento instável. Em elementos pouco esbeltos, esses deslocamentos tendem a ser reduzidos, de modo que os efeitos de segunda ordem apresentam impacto limitado no comportamento global; por outro lado, em pilares mais esbeltos, pequenas deformações laterais podem resultar em acréscimos significativos dos momentos fletores.

Para lidar com esses efeitos, a ABNT NBR 6118 (2026) permite a utilização de procedimentos como o método do coeficiente γ_z ou o método da curvatura nominal, desde que a esbeltez do elemento se encontre dentro de limites estabelecidos. Em situações envolvendo

pilares mais esbeltos ou quando se busca maior precisão, a norma recomenda a adoção de métodos de análise mais rigorosos, capazes de representar adequadamente a interação entre esforços e deslocamentos e a redução progressiva da rigidez sob carregamento.

Casagrande (2016) demonstra que a fluência é um fator decisivo para a intensificação dos efeitos de segunda ordem, uma vez que a perda de rigidez ao longo do tempo aumenta os deslocamentos laterais e reduz a capacidade resistente global, sobretudo em pilares comprimidos submetidos a elevadas cargas permanentes. A literatura técnica e as normas de projeto indicam que os efeitos de segunda ordem devem ser considerados no dimensionamento de pilares, principalmente em elementos mais esbeltos.

3.5 Síntese do comportamento mecânico em pilares

A resposta de um pilar sob flexo-compressão é ditada, antes de tudo, pelas propriedades mecânicas do próprio concreto. O diagrama tensão–deformação do material revela uma transição importante: de uma fase inicial linear para um comportamento não linear até que se atinja a ruptura. Para as classes usuais de concreto, o limite de deformação específica é fixado em 3,5%, um valor que serve de base para os modelos de cálculo da ABNT NBR 6118 (2026) e que define o ponto de esmagamento do material (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Essa relação entre tensão e deformação é o que determina a posição da linha neutra na seção transversal. Nos domínios de deformação apresentados por Carvalho e Figueiredo Filho (2014), o equilíbrio entre concreto e aço depende da posição da linha neutra e das deformações na seção. No caso de seções super armadas, o concreto pode atingir seu limite de compressão antes que a armadura tracionada comece a escoar, resultando em ruptura frágil e sem aviso prévio, condição que deve ser evitada no projeto estrutural.

A estabilidade da peça também depende da rigidez, associada ao módulo de elasticidade do concreto. Para concretos entre C20 e C50, esse valor costuma variar entre 25 GPa e 35 GPa, dependendo do tipo de agregado utilizado. Em pilares mais esbeltos, a redução da rigidez favorece o aumento dos deslocamentos laterais, o que intensifica os efeitos de segunda ordem e a amplificação dos momentos fletores associada ao efeito $P-\Delta$.

Além das propriedades do material, o dimensionamento deve considerar as imperfeições inevitáveis do processo executivo. Por esse motivo, a ABNT NBR 6118 (2026) impõe o uso de excentricidades mínimas e momentos mínimos. Como reforçado por Carvalho e Figueiredo

Filho (2014), o pilar real trabalha quase sempre sob flexão composta, em função de imperfeições geométricas e desvios construtivos inerentes às estruturas reais.

Para garantir que a ruptura ocorra de forma dúctil, o foco do dimensionamento recai sobre o Domínio 3, no qual a armadura tracionada escoar antes do colapso do concreto, proporcionando aviso prévio da falha. O confinamento do núcleo de concreto pela armadura transversal aumenta a ductilidade e melhora o desempenho estrutural do pilar. Estudos como os de Queiroga e Giongo (2003) indicam que o detalhamento adequado da armadura transversal favorece o confinamento do concreto, ajuda no controle da fissuração e reduz a possibilidade de ruptura frágil.

A revisão sobre excentricidade, propriedades mecânicas, rigidez e estabilidade fundamenta os procedimentos experimentais adotados nesta pesquisa.

3.6 Evolução histórica dos modelos de interação força normal-momento fletor (n-m)

A compreensão do comportamento de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão levou ao desenvolvimento de modelos que representam a interação entre a força normal e o momento fletor atuantes na seção transversal. Carvalho e Figueiredo Filho (2014) destacam que a resistência desses elementos não deve ser avaliada com os esforços isolados, mas pela análise conjunta da compressão e da flexão.

Os diagramas de interação força normal–momento fletor (N–M) passaram a ser utilizados como ferramenta de dimensionamento e de interpretação do comportamento dos pilares. Esses diagramas relacionam a capacidade resistente da seção às diferentes combinações de esforço normal e momento fletor, permitindo identificar os domínios de deformação e os limites associados à ruptura por esmagamento do concreto ou por escoamento da armadura. Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2014), essas representações auxiliam o entendimento dos mecanismos de equilíbrio interno da seção sob flexo-compressão.

Com a evolução das normas técnicas, especialmente a ABNT NBR 6118 (2026), os modelos de interação passaram a incorporar critérios mais rigorosos de segurança, incluindo a consideração de excentricidades mínimas, efeitos de segunda ordem e limitações associadas à ductilidade. Embora atualmente o dimensionamento possa ser realizado por meio de métodos computacionais mais avançados, os diagramas N–M permanecem relevantes como instrumento didático e conceitual, auxiliando na compreensão do comportamento mecânico dos pilares, sobretudo em situações de flexão composta normal e em pilares curtos.

Apesar da ampla utilização, os diagramas clássicos de interação força normal–momento fletor apresentam limitações, pois não representam diretamente os efeitos de segunda ordem, a não linearidade física dos materiais e as imperfeições geométricas das estruturas reais. Conforme discutido por Carvalho e Figueiredo Filho (2014) e incorporado pela ABNT NBR 6118 (2026), essas limitações motivaram a adoção de modelos de cálculo mais refinados. Ainda assim, os ábacos N–M mantêm grande relevância didática e experimental, pois auxiliam na compreensão dos mecanismos de interação entre esforço normal e momento fletor e na interpretação de resultados de ensaios em pilares curtos submetidos à flexo-compressão.

3.7 Influência da excentricidade no comportamento estrutural e no modo de ruptura

A excentricidade da carga aplicada exerce influência direta no comportamento estrutural dos pilares de concreto armado, uma vez que modifica a distribuição de tensões na seção transversal e altera a forma como o elemento resiste às solicitações. No caso ideal de compressão centrada, o pilar apresenta um estado de tensões predominantemente uniforme, com comportamento mais rígido e ruptura geralmente associada ao esmagamento do concreto.

Quando pequenas excentricidades estão presentes, passam a atuar simultaneamente o esforço normal de compressão e momentos fletores, caracterizando a flexo-compressão. Nessa situação, ocorre redução parcial da área comprimida de concreto e aumento gradual da solicitação da armadura tracionada.

À medida que a excentricidade aumenta, a redistribuição interna de esforços na seção transversal torna-se mais acentuada, com redução da parcela resistente associada à compressão e aumento da contribuição do momento fletor. Nessa condição, embora o elemento continue classificado como pilar, seu comportamento estrutural passa a ser fortemente influenciado pela flexão, caracterizando um estado típico de viga-pilar, no qual a flexão assume papel relevante no equilíbrio da seção (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Essa evolução do estado de tensões está diretamente associada ao modo de ruptura do elemento. Para excentricidades reduzidas, os pilares tendem a apresentar comportamento mais frágil, com ruptura abrupta do concreto comprimido. Por outro lado, excentricidades mais elevadas favorecem respostas mais dúcteis, nas quais o escoamento da armadura longitudinal precede o esmagamento do concreto, proporcionando maior capacidade de redistribuição de esforços e aviso prévio de colapso. Essa transição entre ruptura frágil e dúctil está relacionada aos domínios de deformação definidos nos modelos de cálculo, sendo o Domínio 3 considerado o mais desejável do ponto de vista da segurança estrutural.

A literatura internacional também ajuda a compreender o papel do confinamento e da interação entre concreto e armadura no modo de ruptura dos pilares. Sheikh e Uzumeri (1982), ao analisarem pilares de concreto armado submetidos predominantemente à compressão, observaram que a distribuição das deformações e a interação entre concreto e armadura influenciam de forma decisiva o modo de ruptura do elemento. Embora esse estudo esteja associado principalmente ao efeito do confinamento, seus resultados ajudam a compreender por que configurações que favorecem a atuação da armadura podem apresentar fissuração e deformações mais progressivas antes da ruptura.

Estudos experimentais nacionais reforçam essas observações. Curado e Gomes (2006) investigaram pilares submetidos à flexo-compressão reta com variação da excentricidade da carga e verificaram que o aumento dessa variável resulta em maiores deslocamentos laterais, alterações no padrão de fissuração e redução da capacidade resistente. De forma semelhante, Muniz *et al.* (2019) observaram que pilares com excentricidades mais elevadas apresentam menor resistência última, porém comportamento mais dúctil, com evolução gradual das fissuras e maior aviso prévio de ruptura.

A importância da excentricidade no comportamento estrutural dos pilares é reconhecida pela ABNT NBR 6118 (2026), que exige a consideração de excentricidades mínimas no dimensionamento, mesmo quando o carregamento é teoricamente centrado. Essa exigência normativa reflete o entendimento de que a excentricidade é um fator determinante tanto para a capacidade resistente quanto para o modo de ruptura dos pilares de concreto armado, reforçando a necessidade de sua adequada consideração no projeto estrutural e na interpretação de resultados experimentais.

3.8 Classificação dos pilares quanto à esbeltez

A esbeltez está diretamente relacionada à estabilidade do pilar e a influência dos efeitos de segunda ordem no dimensionamento.

De acordo com a ABNT NBR 6118 (2026), esse parâmetro permite avaliar a influência dos efeitos de instabilidade e a necessidade de considerar os acréscimos de deslocamentos no dimensionamento estrutural. Na literatura técnica, os pilares costumam ser classificados como curtos ou esbeltos, conforme a relação entre suas dimensões geométricas, as condições de vinculação e o comprimento efetivo do elemento (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

Essa distinção define o modelo de análise adequado, pois pilares mais esbeltos apresentam maior sensibilidade aos deslocamentos laterais e aos efeitos de segunda ordem, enquanto pilares curtos tendem a ter comportamento dominado pela resistência dos materiais (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

3.8.1 Pilares curtos

Os pilares curtos são aqueles cuja esbeltez é suficientemente reduzida de modo que os efeitos de instabilidade global possam ser desprezados ou considerados de forma simplificada. Nesses elementos, o comportamento estrutural é determinado principalmente pela capacidade resistente da seção transversal, sendo a influência dos deslocamentos laterais pouco significativa. Conforme a ABNT NBR 6118 (2026), quando a esbeltez do pilar se encontra abaixo dos limites estabelecidos pela norma, os efeitos de segunda ordem podem ser dispensados ou tratados por meio de critérios simplificados.

Em pilares curtos submetidos à flexo-compressão, a ruptura está fortemente associada ao estado de tensões na seção, podendo ocorrer por esmagamento do concreto comprimido ou por escoamento da armadura, dependendo do nível de excentricidade e do domínio de deformação atuante. Por essa razão, os diagramas de interação força normal–momento fletor (N–M) são amplamente utilizados na análise desses elementos, pois representam adequadamente o equilíbrio interno da seção e os limites resistentes envolvidos (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

No contexto experimental, os pilares curtos são frequentemente adotados em estudos laboratoriais por permitirem a análise direta dos efeitos da excentricidade e do comportamento tensão–deformação dos materiais, minimizando a influência de fenômenos de instabilidade global.

3.8.2 Pilares esbeltos e efeitos de instabilidade

Os pilares esbeltos apresentam maiores relações entre comprimento efetivo e dimensões da seção transversal, o que os torna mais suscetíveis aos efeitos de instabilidade e aos deslocamentos laterais. Nesses casos, a ação combinada da força normal com os deslocamentos transversais gera momentos adicionais, caracterizando os chamados efeitos de segunda ordem ou efeito P– Δ . Conforme discutido por Carvalho e Figueiredo Filho (2014), mesmo

deslocamentos relativamente pequenos podem provocar amplificação significativa dos momentos fletores, reduzindo a capacidade resistente global do elemento.

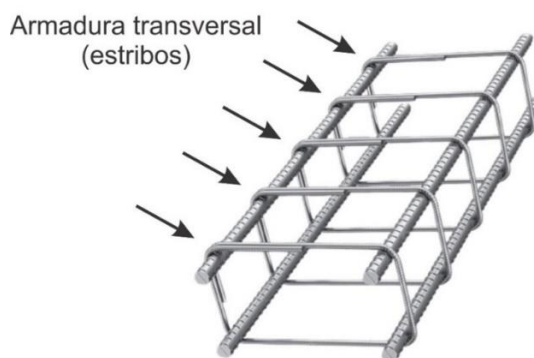
A ABNT NBR 6118 (2026) reconhece essa condição e estabelece critérios específicos para a verificação de pilares esbeltos, exigindo a consideração explícita dos efeitos de segunda ordem no dimensionamento. A norma permite diferentes níveis de análise, que variam desde métodos simplificados até procedimentos mais rigorosos, dependendo da esbeltez do elemento e da precisão requerida no projeto estrutural.

Em pilares esbeltos submetidos à flexo-compressão, o comportamento estrutural passa a ser fortemente influenciado pela interação entre resistência e estabilidade. A perda progressiva de rigidez, associada à fissuração do concreto e à não linearidade dos materiais, intensifica os deslocamentos laterais e pode conduzir a mecanismos de ruptura por instabilidade antes que a resistência última da seção seja plenamente atingida. Por esse motivo, a classificação quanto à esbeltez ajuda a definir a análise estrutural e a interpretar corretamente os resultados experimentais e analíticos.

3.9 Confinamento do concreto e papel da armadura transversal

O confinamento do concreto interfere no comportamento de pilares de concreto armado, especialmente em situações em que o elemento é submetido à flexo-compressão. A armadura transversal, usualmente composta por estribos (FIGURA 4), restringe as deformações laterais do concreto comprimido, promove o efeito de confinamento e melhora o comportamento resistente e dúctil do pilar. De acordo com Carvalho e Figueiredo Filho (2014), o confinamento contribui para a melhoria do comportamento mecânico do pilar, sobretudo após o início da fissuração, quando a rigidez do concreto passa a ser reduzida.

Figura 4 – Coluna armada de aço com armadura transversal.



Fonte: Adaptado de Hiperferro (2026).

A presença de armadura transversal adequadamente detalhada exerce influência direta no aumento da ductilidade do elemento estrutural. Em pilares confinados, a restrição das deformações transversais permite maior mobilização da armadura longitudinal antes da ruptura, favorecendo comportamentos mais dúcteis e com maior capacidade de redistribuição de esforços. Esse efeito é particularmente relevante em pilares submetidos à flexo-compressão, nos quais a interação entre concreto e aço define o modo de ruptura e a segurança global do elemento (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014).

O espaçamento dos estribos interfere na eficiência do confinamento. Estribos mais próximos restringem melhor as deformações laterais do concreto, ajudam no controle da fissuração e reduzem a possibilidade de rupturas frágeis por esmagamento do concreto comprimido. Queiroga e Giongo (2003) destacam que a disposição da armadura transversal está relacionada ao modo de ruptura dos pilares, especialmente pela contribuição dos estribos no confinamento do concreto e no controle da fissuração.

A importância do confinamento do concreto é reconhecida pela ABNT NBR 6118 (2026), que estabelece limites máximos para o espaçamento dos estribos e critérios mínimos de detalhamento da armadura transversal. Essas exigências normativas buscam garantir ductilidade e segurança estrutural, especialmente em pilares sujeitos à flexo-compressão e a efeitos de segunda ordem.

3.10 Ensaios experimentais em modelos reduzidos de pilares

Os ensaios experimentais em modelos reduzidos ajudam a compreender o comportamento estrutural de pilares submetidos à compressão e à flexo-compressão. A utilização de modelos em escala permite controlar as variáveis envolvidas, repetir os ensaios e analisar fenômenos como fissuração, deslocamentos laterais e modos de ruptura.

De acordo com Curado e Gomes (2006), os ensaios em pilaretes permitem avaliar a influência da excentricidade da carga no comportamento resistente e deformacional dos pilares. Mesmo em elementos de dimensões reduzidas, é possível reproduzir, de forma controlada, estados de tensões compatíveis com aqueles observados em estruturas reais, desde que sejam respeitadas as condições de semelhança geométrica, de carregamento e de detalhamento das armaduras. Esses estudos experimentais evidenciam a redução da capacidade resistente com o aumento da excentricidade, bem como alterações significativas no padrão de fissuração e nos deslocamentos laterais.

Estudos experimentais, como os apresentados por Muniz *et al.* (2019), reforçam a relevância dos modelos reduzidos na investigação do comportamento de pilares de concreto armado. Esses autores destacam que ensaios em pilaretes permitem observar a transição entre comportamentos mais frágeis e mais dúcteis, associada ao nível de excentricidade e à interação entre concreto e armadura. Os resultados experimentais também ajudam a interpretar os domínios de deformação e a influência das armaduras longitudinal e transversal no desempenho estrutural.

Os ensaios em modelos reduzidos também apresentam vantagens práticas, como menores custos, facilidade de instrumentação e acompanhamento visual da fissuração e da ruptura. Por outro lado, esse tipo de abordagem possui algumas limitações, uma vez que os resultados obtidos em escala reduzida nem sempre representam de forma completa o comportamento de pilares em escala real, principalmente em relação aos efeitos de escala, às imperfeições construtivas e às condições de contorno. Por isso, os resultados experimentais devem ser interpretados como indicativos do comportamento estrutural, sem a pretensão de reproduzir integralmente o comportamento de pilares em escala real.

Os ensaios em pilaretes complementam a análise teórica e normativa e ajudam a interpretar os efeitos da excentricidade no comportamento mecânico de pilares de concreto armado.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais empregados, o traço adotado, o processo de preparo e a moldagem dos pilaretes, além dos ensaios realizados e os parâmetros considerados para a análise do comportamento dos elementos.

4.1 Caracterização dos Materiais

Os materiais foram caracterizados conforme as normas técnicas vigentes e os procedimentos de cada ensaio, além das informações fornecidas pelos fabricantes.

4.1.1 Agregado miúdo - areia

O agregado miúdo utilizado foi areia lavada de rio da região, caracterizada através dos ensaios descritos a seguir.

Análise granulométrica conforme a ABNT NBR 7217:2023 — Agregados — Determinação da composição granulométrica.

Massa específica conforme a ABNT NBR NM 52:2009 — Agregado miúdo — Determinação da massa específica e massa específica aparente.

Massa unitária conforme a ABNT NBR NM 45:2006 — Agregados — Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

Material fino passante na peneira 75 μm conforme a ABNT NBR 7219:2014 — Agregados — Determinação do teor de materiais pulverulentos.

Inchamento da areia conforme a ABNT NBR 6467:2006 — Agregados — Determinação do inchamento de agregado miúdo.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Características da areia (agregado miúdo).

PARÂMETRO	SÍMBOLO / UNIDADE	VALOR
Massa unitária	γ (g/cm ³)	1,41
Massa específica	ρ (g/cm ³)	2,63
Material fino	%	10,25
Coefficiente de inchamento crítico	CI_crítico (—)	1,46
Coefficiente de inchamento médio	CI_médio (—)	1,45
Umidade crítica	w_crítica (%)	3,9
Dimensão máxima característica	DMC (mm)	2,4
Módulo de finura	MF (—)	1,96
Classificação	—	Areia média

Fonte: Autor (2026).

4.1.2 Agregado graúdo - brita

O agregado graúdo utilizado foi uma brita granítica fornecida por pedreira da região. O material passou pelos seguintes ensaios de caracterização física:

Análise granulométrica conforme a ABNT NBR 7217:2023 — Agregados — Determinação da composição granulométrica.

Massa específica seca, massa específica saturada e índice de absorção conforme a ABNT NBR NM 53:2009 — Agregado graúdo — Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.

Massa unitária e volume de vazios conforme a ABNT NBR NM 45:2006 — Agregados — Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

Material fino passante na peneira 75 μm conforme a ABNT NBR 7219:2014 — Agregados — Determinação do teor de materiais pulverulentos.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Características da brita (agregado graúdo).

PARÂMETRO	SÍMBOLO / UNIDADE	VALOR
Massa unitária	γ (g/cm ³)	1,51
Massa unitária – estado compactado	γ_{comp} (g/cm ³)	1,65
Massa específica seca	ρ_{seca} (g/cm ³)	2,68
Massa específica saturada	ρ_{sat} (g/cm ³)	2,7
Índice de absorção	A (%)	0,8
Material fino	%	1,09
Dimensão máxima característica	DMC (mm)	12,5
Módulo de finura	MF (—)	5,38
Classificação	—	Sem classificação comercial

Fonte: Autor (2026).

4.1.3 Cimento

Na produção do concreto, utilizou-se cimento Portland CP II-F 32, da marca Tocantins, pertencente ao Grupo Votorantim. As propriedades atendem aos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas aplicáveis, como a ABNT NBR 11578:1991 e ABNT NBR 16697:2018.

A Figura 5 apresenta o cimento utilizado na produção do concreto.

Figura 5 – Cimento Portland CP II-F 32.



Fonte: Votorantim Cimentos (2026).

A caracterização do cimento considerou as informações fornecidas pelo fabricante e os ensaios realizados em laboratório.

A determinação da massa específica do cimento seguiu a ABNT NBR 16605:2017. Os tempos de início e fim de pega seguiram a ABNT NBR 16607:2018.

Os dados referentes ao cimento utilizado estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades e características do cimento CP II-F 32.

Produto	Cimento Portland Composto – CP II-F 32
Marca	Tocantins
Fabricante	Votorantim Cimentos
Norma	ABNT NBR 16697:2018
Tipo de Aditivo	Fíler calcário (material carbonático)
Classe resistente	32 MPa
Cor	Cinza

Armazenamento	Local seco, coberto e ventilado
Validade	Conforme condições de armazenamento do fabricante
Teor de Água	29,8%
Massa Específica (ρ) *	3 g/cm ³
Início de Pega *	1h 38min
Fim de pega *	5h 03min

(*) Ensaios realizados em laboratório pelo autor.
Fonte: Votorantim Cimentos (2026).

4.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado foi o plastificante da marca Sika, denominado Sika Concreto Forte, à base de lignossulfonato, empregado para melhorar a trabalhabilidade da mistura e reduzir a quantidade de água.

Suas características gerais foram consideradas conforme as informações fornecidas pelo fabricante, sendo compatíveis com a aplicação em concretos convencionais.

A Figura 6 apresenta o aditivo plastificante utilizado na produção do concreto.

Figura 6 – Aditivo plastificante Sika Concreto Forte.



Fonte: Sika (2026).

4.1.5 Sílica

A sílica utilizada foi a Elkem Microsilica® 920D, adicionada à mistura para melhorar as propriedades do concreto, principalmente no estado endurecido. O material é composto predominantemente por dióxido de silício (SiO_2), que contribui para a redução da porosidade e para o aumento da resistência do concreto.

As características do material foram consideradas com base nas informações fornecidas pelo fabricante, não sendo realizada caracterização experimental específica. Segundo o fabricante, o produto apresenta teor de SiO_2 superior a 85% e atende aos requisitos da ASTM C1240, norma internacional que estabelece especificações para utilização de sílica ativa em materiais cimentícios.

A Figura 7 apresenta a sílica ativa utilizada na produção do concreto.

Figura 7 – Sílica ativa Elkem Microsilica® 920D.



Fonte: Elkem (2026)

4.2 Definição do traço de concreto

Para a dosagem do concreto, adotou-se um traço em massa dimensionado para garantir a trabalhabilidade necessária para moldar os pilaretes.

A composição adotada foi na proporção de 1:1:3 (cimento : areia : brita), com relação água/cimento aproximada de 0,47. Também foi utilizado aditivo plastificante correspondente a 4% da massa de cimento, bem como adição de sílica equivalente a aproximadamente 10% da massa de cimento.

O traço foi definido em laboratório, a partir de ajustes experimentais e dos princípios do método IPT/EPUSP de dosagem de concreto, conforme apresentado por Helene e Terzian (1993). Para validar a mistura, moldaram-se corpos de prova e realizaram-se ensaios, buscando resistência de aproximadamente 40 MPa.

4.3 Procedimento de produção do concreto

O concreto foi produzido em betoneira de eixo inclinado, seguindo uma sequência de adição dos materiais para garantir uma mistura homogênea.

Inicialmente, adicionou-se a brita e cerca de metade da água de amassamento. Em seguida, foram incorporados o cimento, o restante da água e o aditivo plastificante previamente dosado. Depois, adicionou-se a sílica de forma gradual e, por fim, a areia, finalizando o processo de mistura.

O tempo de mistura foi monitorado para homogeneizar os materiais e para evitar a formação de aglomerados.

Após a mistura, o concreto foi lançado nas formas dos pilaretes e nos moldes dos corpos de prova. O adensamento foi realizado em mesa vibratória, conforme apresentado na Figura 8, para reduzir vazios e melhorar compactação do material.

Figura 8 – Adensamento dos pilaretes em mesa vibratória.



Fonte: Autor (2026)

Os elementos moldados permaneceram nas formas por aproximadamente 72 horas. Após esse período, os pilaretes e corpos de prova foram desformados e encaminhados para cura úmida em tanque com água, onde permaneceram até a realização dos ensaios.

A Figura 9 apresenta os corpos de prova e os pilaretes durante o processo de cura úmida em tanque com água.

Figura 9 – Cura úmida dos corpos de prova e dos pilaretes em tanque com água.



Fonte: Autor (2026)

4.4 Caracterização do concreto

A caracterização do concreto foi realizada por meio de ensaios laboratoriais no estado fresco e no estado endurecido. Os procedimentos adotados seguiram as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

4.4.1 Concreto fresco

O ensaio de abatimento do concreto serviu para avaliar a consistência e a trabalhabilidade da mistura no estado fresco. O procedimento seguiu a ABNT NBR 16889:2022, com o uso do tronco de cone padrão.

Após o preenchimento do molde em camadas e o adensamento, retirou-se o tronco de cone verticalmente para medir o abatimento do concreto.

O valor de abatimento foi de aproximadamente 30 mm, indicando um concreto mais coeso e com menor fluidez. Esse comportamento decorre do traço adotado, cujo menor teor de argamassa e a adição de sílica, reduziram a trabalhabilidade da mistura.

A Figura 10 apresenta o ensaio de abatimento do concreto realizado pelo método do tronco de cone.

Figura 10 – Ensaio de abatimento do concreto pelo método do tronco de cone.



Fonte: Autor (2026)

4.4.2 Concreto endurecido

Para avaliar as propriedades mecânicas do concreto endurecido, realizaram-se ensaios de resistência à compressão, à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, em corpos de prova moldados com o mesmo lote de concreto dos pilaretes.

Os procedimentos de moldagem e cura dos corpos de prova seguiram as recomendações da ABNT NBR 5738:2016 — *Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados conforme a ABNT NBR 5739:2018 — *Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*.

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral seguiram as recomendações da ABNT NBR 7222:2011 — *Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*.

Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados conforme a ABNT NBR 8522-1:2021 — *Concreto endurecido — Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação — Parte 1: Módulos estáticos à compressão*.

Os ensaios utilizaram corpos de prova cilíndricos de 10 cm por 20 cm nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias, conforme apresentado na Figura 11. Para cada idade foram rompidos 3 corpos de prova à compressão, 2 à tração por compressão diametral e aos 28 dias, 1 corpo de prova para módulo de elasticidade.

Figura 11 – Corpos de prova para ensaios de caracterização do concreto endurecido.



Fonte: Autor (2026).

4.5 Características dos pilaretes

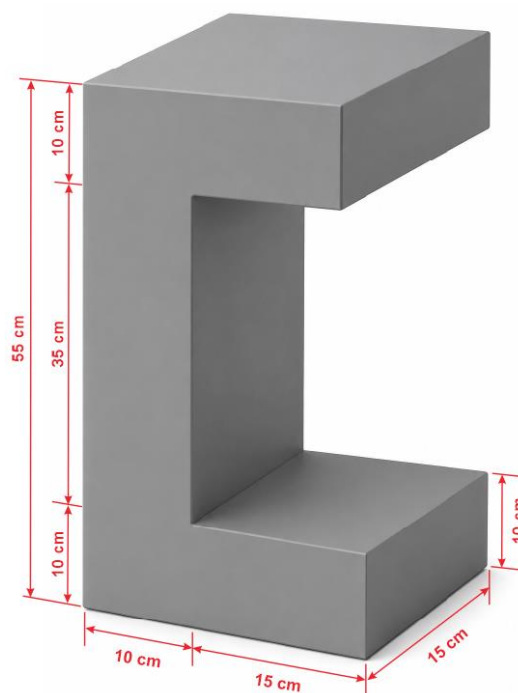
Os pilaretes analisados neste estudo representam elementos estruturais em escala reduzida para a avaliação do seu comportamento sob carregamento.

Os elementos apresentam geometria em formato semelhante à letra “C”, com dois consolos nas extremidades, configuração que favorece a aplicação de carga excêntrica e reduz a ocorrência de ruptura localizada.

As dimensões dos pilaretes foram definidas de modo a permitir a execução em laboratório, garantindo ao mesmo tempo condições adequadas para moldagem, adensamento e ensaio. A seção transversal foi mantida constante ao longo da região central do elemento. Adotou-se o cobrimento do concreto com 10 mm, compatível com as dimensões reduzidas dos elementos e as condições de moldagem e ensaio em laboratório.

A Figura 12 apresenta a geometria e as principais dimensões dos pilaretes utilizados no estudo.

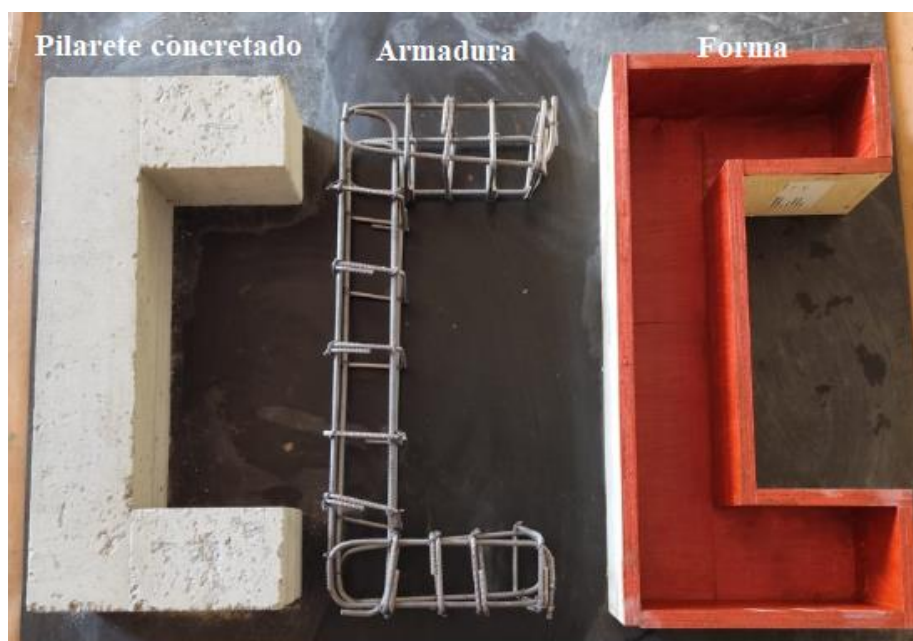
Figura 12 – Geometria e principais dimensões dos pilaretes utilizados no estudo.



Fonte: Autor (2026).

Além da geometria dos elementos, foram utilizadas formas de madeira e armaduras previamente montadas para a moldagem dos pilaretes, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Conjunto de forma, armadura e pilarete.



Fonte: Autor (2026).

4.6 Armadura dos pilaretes

As armaduras dos pilaretes foram confeccionadas com barras de aço CA-50, material usual em elementos de concreto armado devido à sua boa resistência mecânica e aderência ao concreto.

A disposição das armaduras acompanhou a geometria dos elementos, garantindo continuidade nas regiões verticais e horizontais do pilarete. Foram utilizadas barras longitudinais para resistir aos esforços principais, e estribos distribuídos ao longo do elemento para confinar o concreto e posicionar as armaduras.

Os estribos foram distribuídos regularmente ao longo dos pilaretes, contribuindo para a estabilidade da armadura durante a concretagem e para o comportamento estrutural do elemento.

As armaduras foram montadas antes da moldagem, conforme apresentado na Figura 14, e depois posicionadas no interior das formas, garantindo alinhamento, espaçamento e cobrimento adequados.

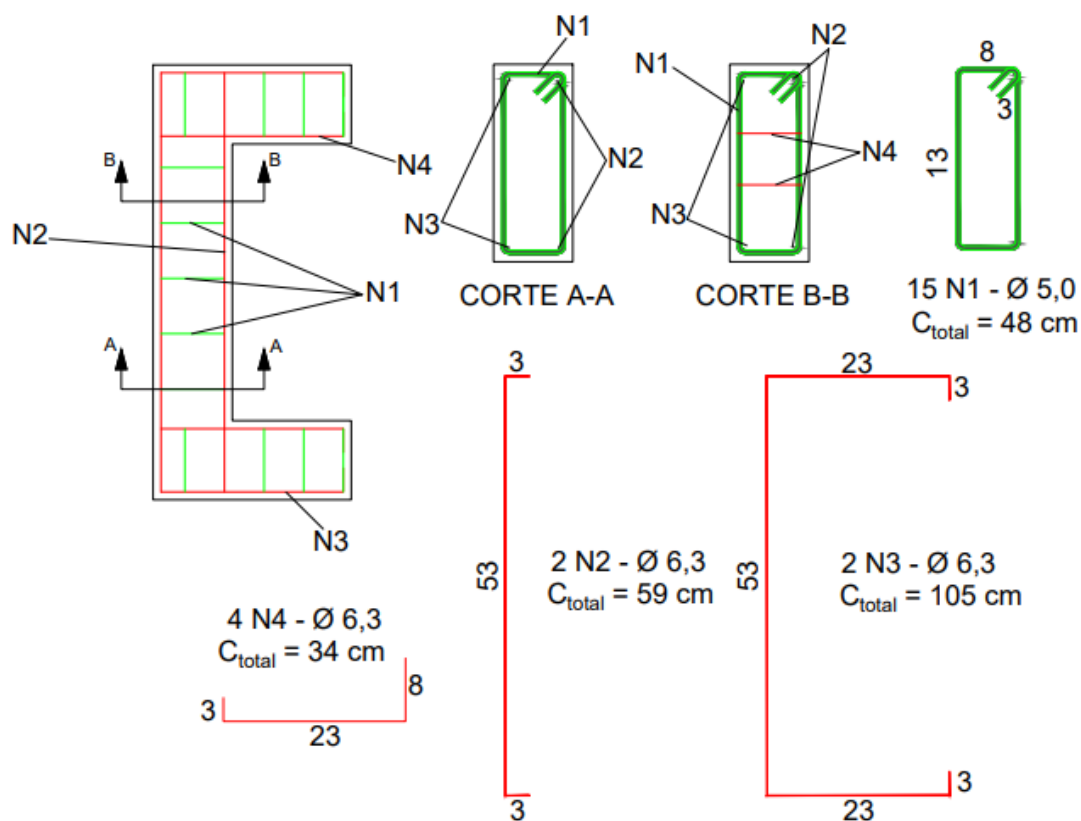
Figura 14 – Armadura original utilizada nos pilaretes.



Fonte: Autor (2026)

A Figura 15 apresenta o detalhamento das armaduras dos pilaretes, incluindo a disposição das barras longitudinais e dos estribos ao longo do elemento.

Figura 15 – Detalhamento das armaduras dos pilaretes.



Fonte: Autor (2026).

Antes dos ensaios definitivos, executou-se um ensaio preliminar para avaliar o comportamento inicial do pilarete, verificar o funcionamento do aparato experimental e analisar o posicionamento dos relógios comparadores.

Durante o ensaio inicial, o pilarete rompeu por cisalhamento, com formação de fissuras e ruptura localizada na região de transição entre o trecho vertical e o consolo do pilarete, conforme apresentado na Figura 16. Esse comportamento indicou concentração de tensões nessa região, associada à geometria do elemento e à configuração inicial da armadura.

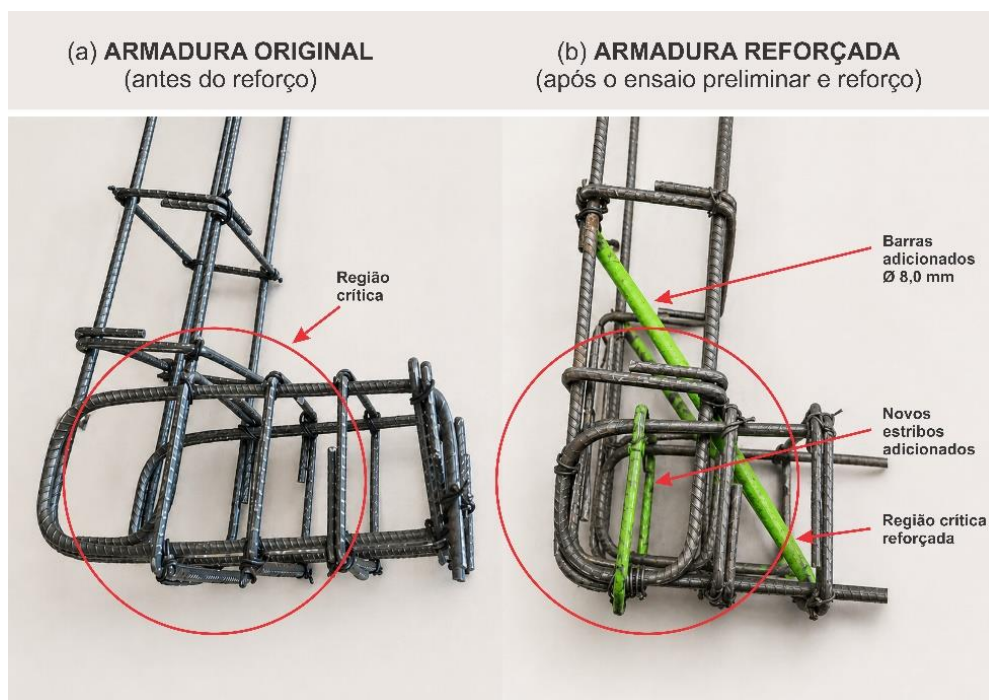
Figura 16 – Ruptura observada no ensaio preliminar do pilarete teste.



Fonte: Autor (2026)

Com base nesse resultado, adotou-se um reforço local na armadura dos pilaretes, com a adição de barras de 8,0 mm e estribos na região crítica, para aumentar o confinamento do concreto e melhorar a redistribuição dos esforços conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Comparação entre a armadura original e a armadura reforçada.



Fonte: Autor (2026).

Após a execução do reforço, os ensaios foram retomados, mantendo-se as demais características dos modelos e do procedimento experimental. O ensaio preliminar serviu para avaliar o comportamento estrutural inicial do elemento e não foi considerado na análise comparativa final dos resultados.

4.7 Moldagem e cura dos pilaretes

Os pilaretes foram moldados em formas de madeira confeccionadas para reproduzir a geometria dos elementos em formato semelhante à letra “C”.

Antes da concretagem, aplicou-se desmoldante à base de óleo mineral nas superfícies internas das formas, para facilitar a retirada dos elementos e preservar o acabamento dos pilaretes. Em seguida, as armaduras foram posicionadas no interior das formas, conforme apresentado na Figura 18, garantindo alinhamento, espaçamento e cobrimento adequados.

Figura 18 – Etapas da moldagem dos pilaretes.



Fonte: Autor (2026).

Após a produção do concreto, conforme procedimento descrito no item 4.3, o material foi lançado nas formas dos pilaretes e nos moldes dos corpos de prova. Ao todo, foram moldados cinco pilaretes e dezoito corpos de prova. Após a desforma, os pilaretes e os corpos de prova foram submetidos à cura submersa em tanque com água até a realização dos ensaios.

4.8 Procedimento de ensaio

Os ensaios avaliaram o comportamento dos pilaretes submetidos à flexo-compressão reta com diferentes níveis de excentricidade da carga aplicada. Durante os ensaios, analisaram-se os deslocamentos, o comportamento estrutural e os modos de ruptura dos pilaretes.

4.8.1 Aparato experimental

Os ensaios foram realizados em máquina universal da marca EMIC, modelo DL20000, com capacidade máxima de 2000 kN, equipada com sistema hidráulico de aplicação de carga e controle eletrônico de leitura.

Os pilaretes foram posicionados entre as placas da prensa respeitando a excentricidade prevista para cada modelo.

O aparato experimental apresentado na Figura 19 permitiu a aplicação controlada do carregamento excêntrico e o monitoramento das cargas durante a realização dos ensaios.

Figura 19 – Prensa hidráulica EMIC DL20000 utilizada nos ensaios.



Fonte: Autor (2026).

4.8.2 Aplicação da carga

Foram adotadas excentricidades de 0 mm, 25 mm, 50 mm, 75 mm e 100 mm, para avaliar a influência da flexo-compressão reta no comportamento dos pilaretes.

Os pilaretes foram identificados conforme a excentricidade aplicada, sendo denominados P0, P25, P50, P75 e P100.

O carregamento foi aplicado de forma gradual, permitindo acompanhar o comportamento dos pilaretes ao longo do ensaio.

Durante a aplicação das cargas, foram observados os deslocamentos laterais, o surgimento das fissuras e o comportamento estrutural dos elementos até a ruptura.

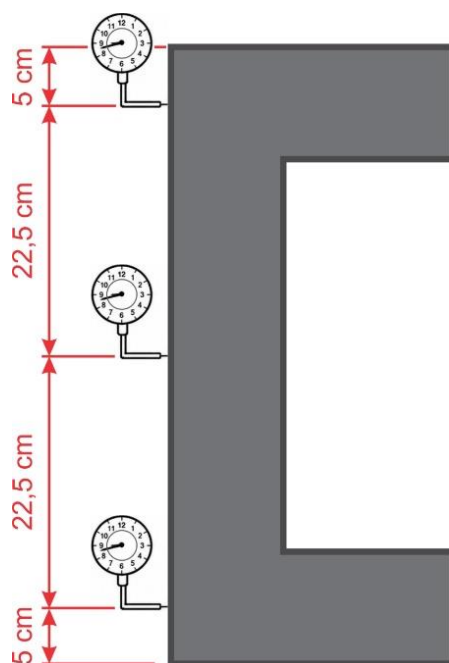
4.8.3 Instrumentação

Para monitorar os deslocamentos, foram utilizados três relógios comparadores instalados em diferentes posições da região tracionada dos pilaretes.

Essa instrumentação permitiu acompanhar os deslocamentos em diferentes regiões do pilarete ao longo do carregamento.

A Figura 20 apresenta o esquema de posicionamento dos relógios comparadores utilizados nos ensaios.

Figura 20 – Esquema de posicionamento dos relógios comparadores no pilarete.



Fonte: Autor (2026).

4.8.4 Monitoramento e ruptura

O acompanhamento dos ensaios ocorreu por meio do registro da carga aplicada e dos deslocamentos durante o carregamento.

Além da carga máxima suportada pelos pilaretes, também foram analisados os modos de ruptura e a evolução da fissuração dos elementos.

Os resultados obtidos permitiram comparar o comportamento estrutural dos pilaretes em função das diferentes excentricidades aplicadas, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Configuração experimental utilizada nos ensaios dos pilaretes.



Fonte: Autor (2026).

5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1 Propriedades Mecânicas do Concreto

A Tabela 4 apresenta os resultados médios dos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade do concreto.

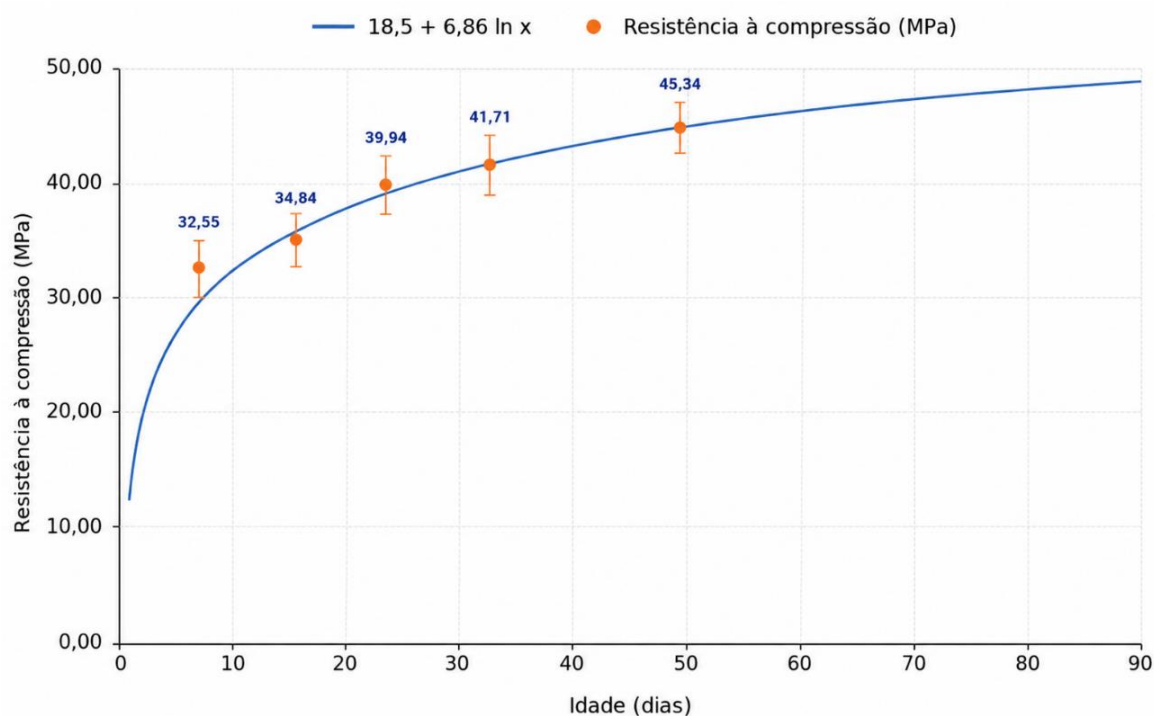
Tabela 4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade do concreto.

Idade	Compressão (MPa)	Tração (MPa)	Mod. Elasticidade (GPa)
7	32,55	3,25	---
14	34,84	3,37	---
21	39,94	3,49	---
28	41,71	3,74	21,80

Fonte: Autor (2026).

A Figura 22 apresenta a evolução da resistência à compressão do concreto ao longo da idade de cura.

Figura 22 – Evolução da resistência à compressão do concreto.



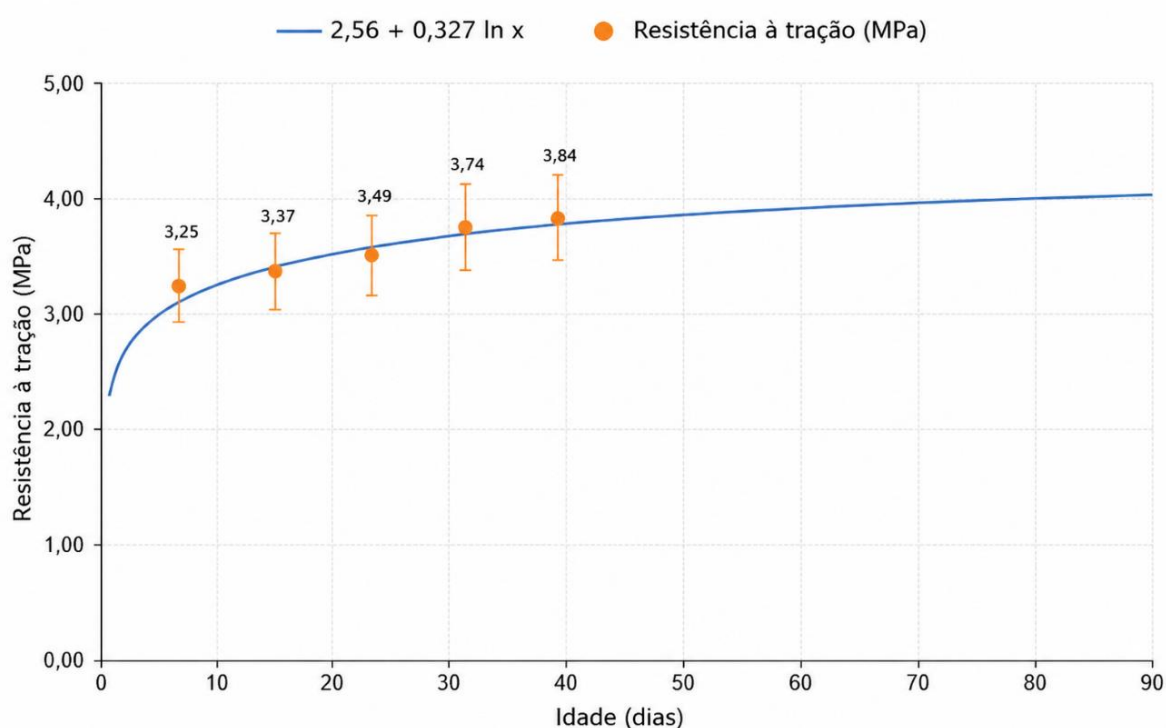
Fonte: Autor (2026).

Considerando a idade de 50 dias do concreto no ensaio dos pilaretes, a resistência estimada à compressão foi de 45,34 MPa, calculada pela equação da linha de tendência do gráfico.

$$f_c = 18,5 + 6,86 \cdot \ln(50)$$

A Figura 23 apresenta a evolução da resistência à tração por compressão diametral do concreto ao longo da idade de cura.

Figura 23 – Evolução da resistência à tração do concreto.



Fonte: Autor (2026).

Para a mesma idade do concreto, a resistência estimada à tração por compressão diametral foi de 3,84 MPa, também calculada pela equação da linha de tendência do gráfico.

$$f_t = 2,56 + 0,327 \cdot \ln(50).$$

5.2 Carga de ruptura e aparecimento de fissuras

A Tabela 5 apresenta os valores de carga de ruptura, carga de última leitura e da carga correspondente ao aparecimento da primeira fissura dos pilaretes ensaiados.

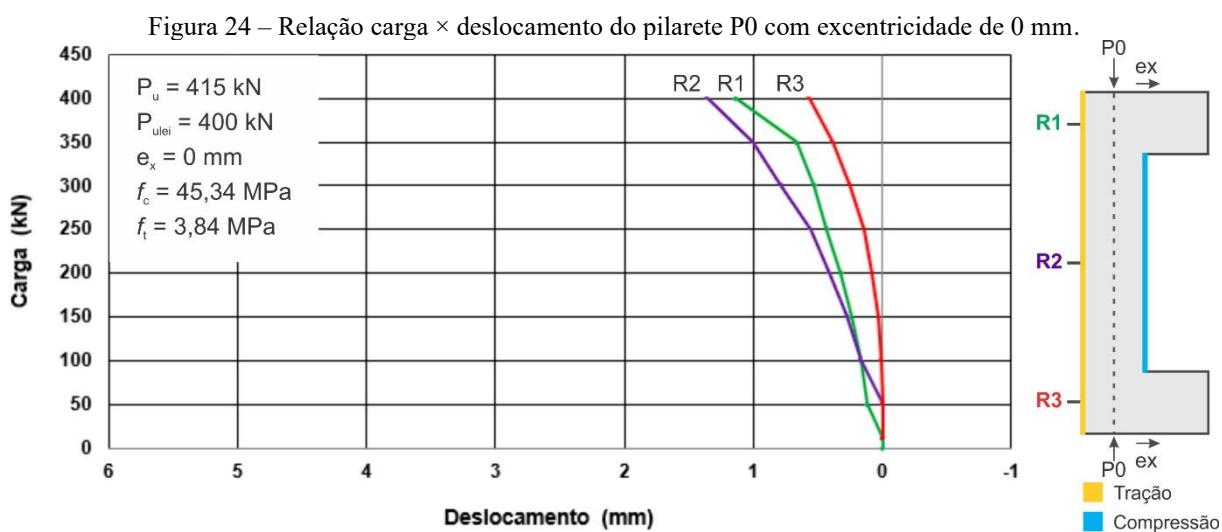
Tabela 5 – Valores de carga de ruptura, carga de última leitura e carga correspondente à primeira fissura dos pilaretes.

Pilarete	Carga de Ruptura (Pu)	Carga de Última Leitura (Pu/Lei)	Carga da 1ª Fissura (P1ºfis)
P0	415	400	250
P25	397	370	150
P50	372	370	90
P75	153	150	60
P100	77	70	30

Fonte: Autor (2026).

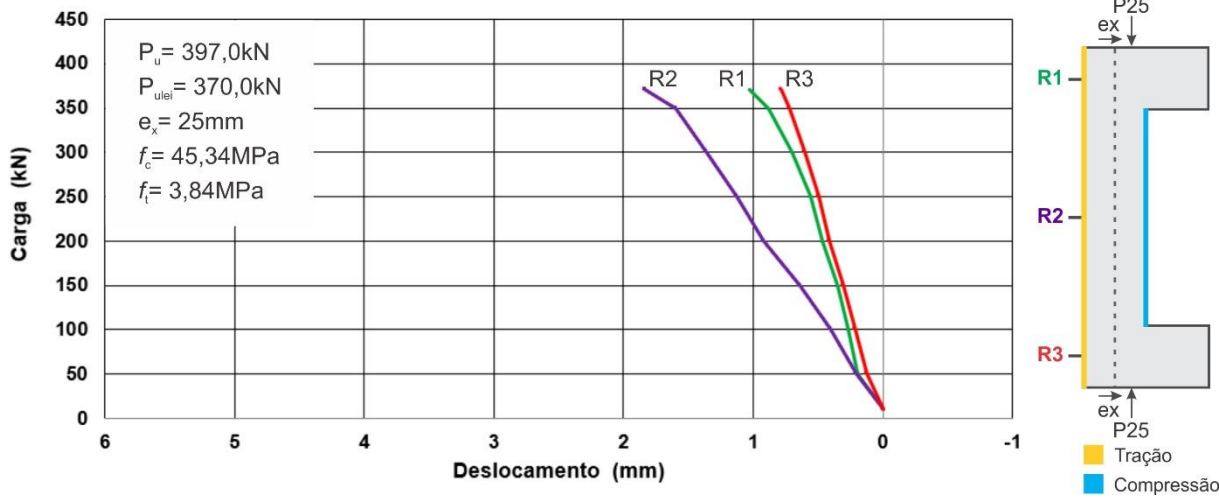
5.3 Relação carga x deslocamento

As Figuras 24 a 28 apresentam as relações carga x deslocamento dos pilaretes P0, P25, P50, P75 e P100, submetidos aos diferentes níveis de excentricidade adotados nos ensaios.



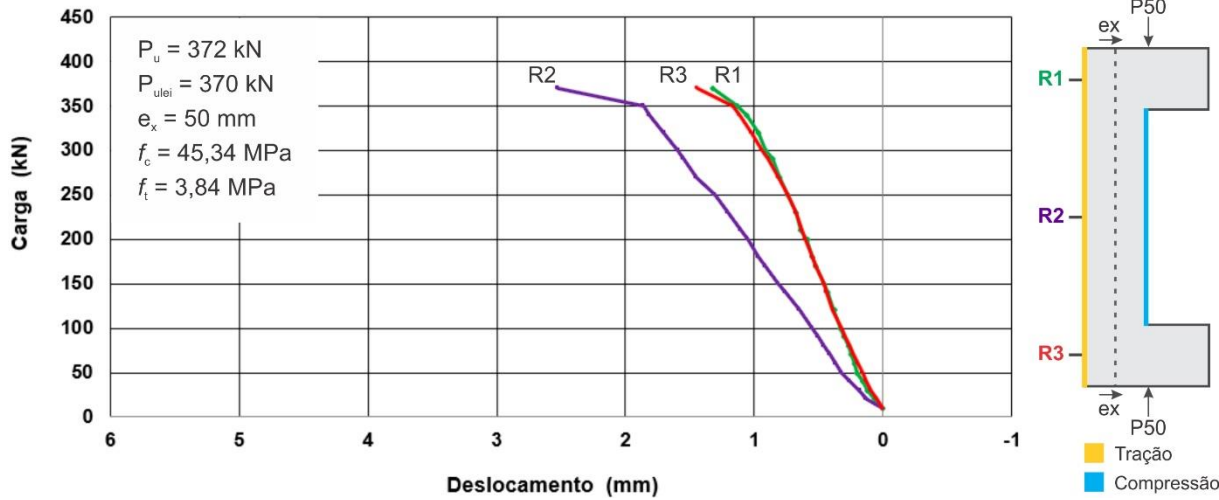
Fonte: Autor (2026).

Figura 25 – Relação carga × deslocamento do pilarete P25 com excentricidade de 25 mm.



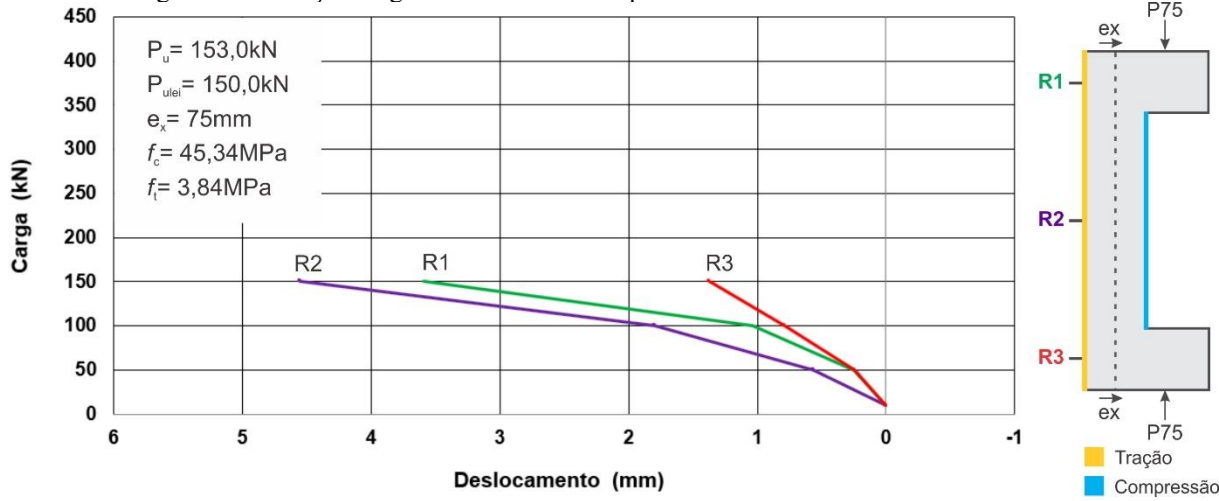
Fonte: Autor (2026).

Figura 26 – Relação carga × deslocamento do pilarete P50 com excentricidade de 50 mm.

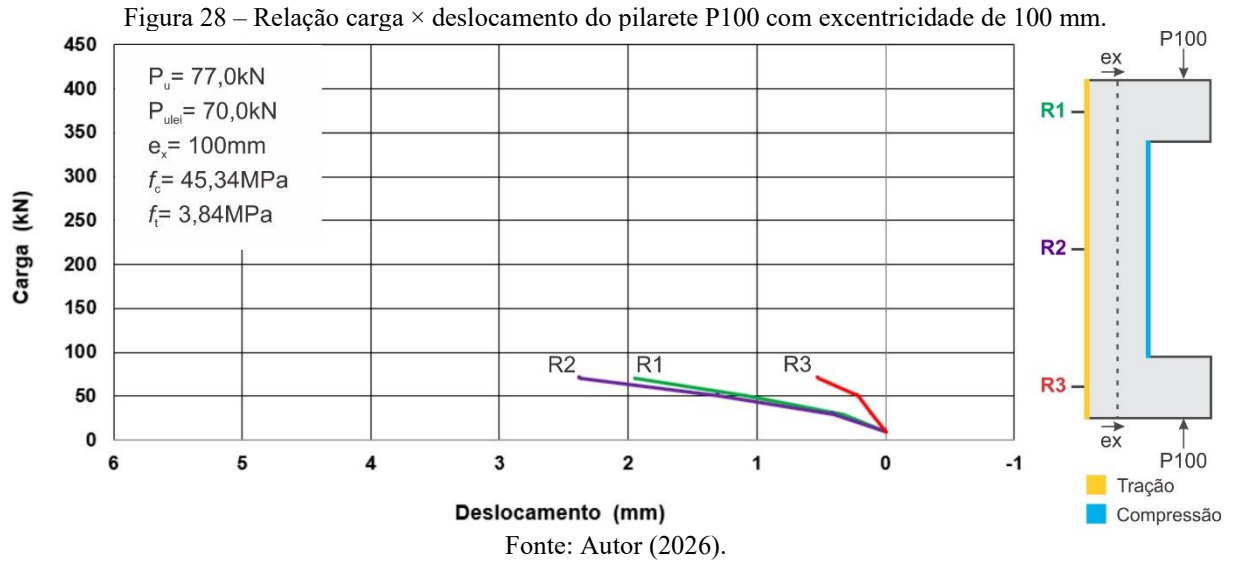


Fonte: Autor (2026).

Figura 27 – Relação carga × deslocamento do pilarete P75 com excentricidade de 75 mm.



Fonte: Autor (2026).

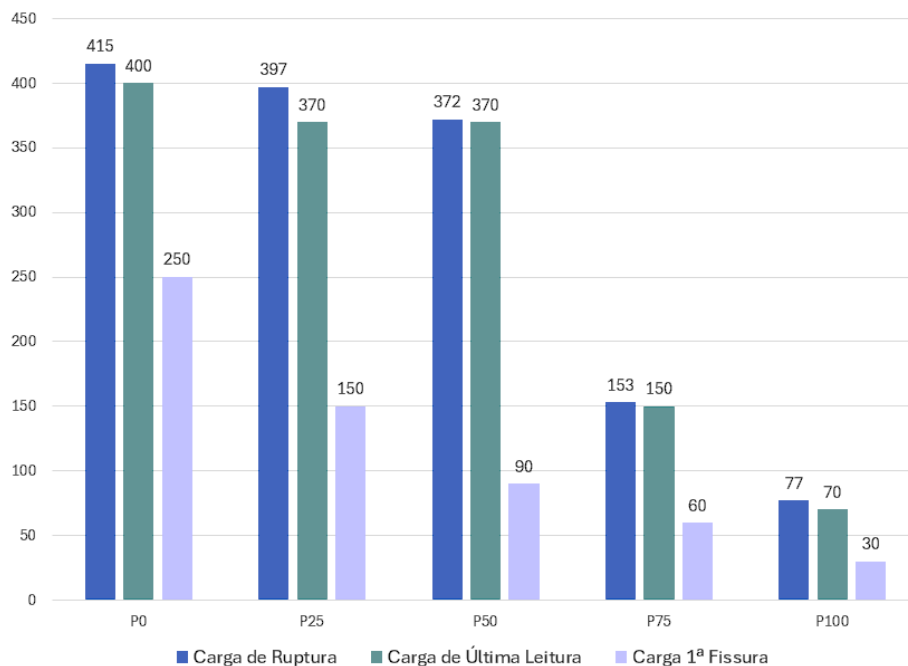


6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Influência da excentricidade na resistência dos pilaretes

Os ensaios mostraram o efeito da excentricidade da carga sobre o comportamento dos pilaretes. A Figura 29 apresenta os resultados obtidos nos ensaios, incluindo a carga de ruptura, a carga de última leitura e a carga correspondente ao surgimento da primeira fissura para cada pilarete analisado.

Figura 29 – Resultados experimentais dos pilaretes submetidos a diferentes excentricidades.



Fonte: Autor (2026).

O pilarete P0 apresentou a maior carga de ruptura entre os modelos ensaiados, atingindo 415 kN. Com o aumento da excentricidade, houve redução da resistência dos pilaretes. Nos modelos P25 e P50, essa redução ainda foi discreta, com cargas de ruptura de 397 kN e 372 kN, respectivamente. Já nos pilaretes P75 e P100, a queda foi mais acentuada, com rupturas em 153 kN e 77 kN.

Adotando P0 como referência, as perdas foram de 4,3% para o P25 e 10,4% para o P50. Nos modelos P75 e P100, as perdas aumentaram para 63,1% e 81,4%, respectivamente. Esses valores indicam que a perda de resistência não foi linear em relação ao aumento da excentricidade. Embora a excentricidade tenha aumentado em intervalos de 25 mm, as perdas se tornaram mais acentuadas a partir de 75 mm.

A redução da carga de ruptura foi mais discreta até a excentricidade de 50 mm. O pilarete P50 ainda manteve uma carga próxima à dos modelos P0 e P25, indicando que, nessa faixa, o elemento ainda apresentou boa capacidade resistente. A partir do pilarete P75, a queda acentuada de carga confirmou que o aumento da excentricidade comprometeu de forma mais intensa o desempenho resistente do pilarete.

Em relação à primeira fissura, também houve redução das cargas com o aumento da excentricidade. No P0, a fissura inicial ocorreu com 250 kN. Nos modelos P25, P50, P75 e P100, esse valor caiu para 150 kN, 90 kN, 60 kN e 30 kN, respectivamente. Isso mostra que a carga excêntrica antecipou as fissuras nos pilaretes.

Os resultados mostram que o aumento da excentricidade reduziu tanto a carga de ruptura quanto a carga de primeira fissura, demonstrada o impacto da excentricidade no Estado Limite Último e no Estado Limite de Serviço. Essa redução foi mais evidente nos modelos P75 e P100. A Figura 29 mostra que a excentricidade reduziu a resistência dos elementos e antecipou o início da fissuração.

Para quantificar essa redução, a Tabela 6 apresenta as perdas percentuais de carga de ruptura dos pilaretes em comparação ao P0.

Tabela 6 – Perda da carga de ruptura dos pilaretes em relação ao modelo P0.

Pilarete	Ruptura (kN)	Perda em relação ao P0 (%)
P0	415	0
P25	397	4,3
P50	372	10,4
P75	153	63,1
P100	77	81,4

Fonte: Autor (2026).

A Tabela 6 confirma que a perda de resistência foi pequena até a excentricidade de 50 mm. A mudança mais expressiva ocorreu entre os modelos P50 e P75, quando a redução passou de 10,4% para 63,1%. Esse resultado mostra que, nas condições deste ensaio, a perda de resistência não foi linear e se tornou mais acentuada nos maiores níveis de excentricidade.

Para complementar a análise da fissuração, a Tabela 7 apresenta a relação entre a carga de primeira fissura e a carga de ruptura dos pilaretes.

Tabela 7 – Relação entre a carga da primeira fissura e a carga de ruptura dos pilaretes.

PILARETE	PRIMEIRA FISSURA (kN)	RUPTURA (kN)	RELAÇÃO (%)
P0	250	415	60,2
P25	150	397	37,8
P50	90	372	24,2
P75	60	153	39,2
P100	30	77	39

Fonte: Autor (2026).

A Tabela 7 relaciona a carga de primeira fissura com a carga de ruptura dos pilaretes. O P0 apresentou o maior percentual, com a primeira fissura em aproximadamente 60% da carga de ruptura. Nos modelos submetidos à carga excêntrica, esse percentual foi menor, indicando

fissuração em etapas mais iniciais do carregamento. Esse comportamento mostra que a excentricidade aumentou a influência da flexão nos pilaretes, favorecendo o surgimento de fissuras na região tracionada.

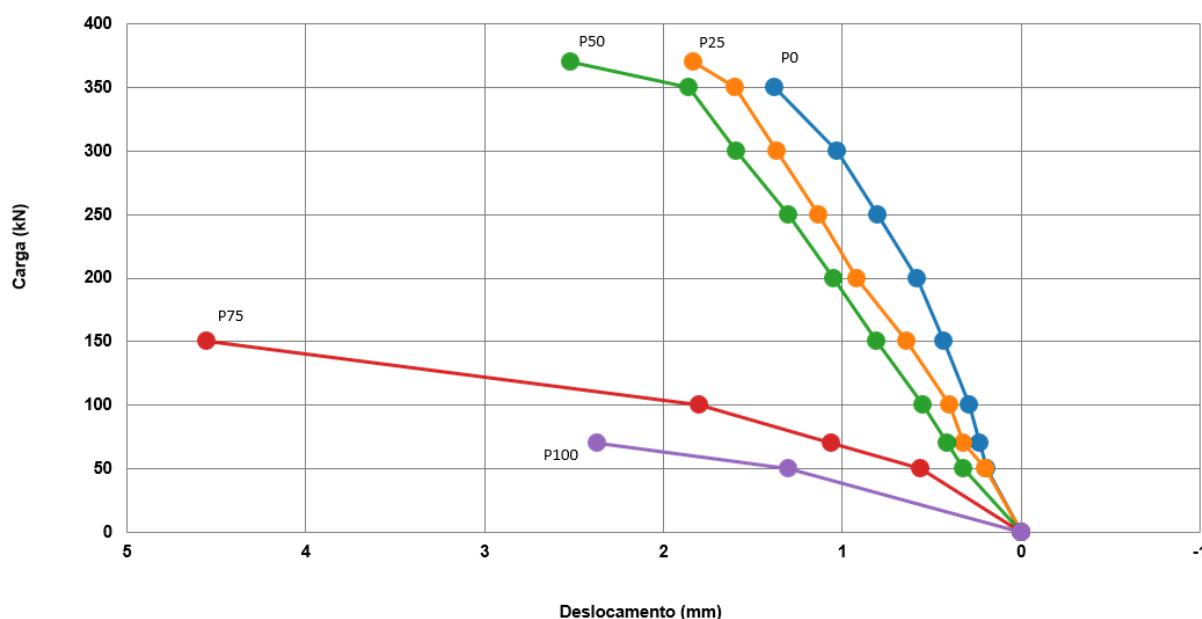
Os resultados apresentados na Tabela 7 também mostram que a primeira fissura ocorreu em níveis proporcionalmente menores da carga de ruptura. O menor valor foi observado no pilarete P50, onde a primeira fissura ocorreu com aproximadamente 24% da carga de ruptura. Na prática, esse resultado ajuda a compreender que, quando a carga atua fora do eixo do pilar, a flexão passa a ter maior influência e as fissuras podem surgir mais cedo.

Esse comportamento é importante para a análise de patologias em estruturas de concreto armado, pois o aparecimento de fissuras pode indicar mudança na distribuição dos esforços e redução da rigidez do elemento. Quando analisados em conjunto, os resultados da Figura 29, da Tabela 6 e da Tabela 7 mostram que o aumento da excentricidade reduziu a resistência dos pilaretes, antecipou o início da fissuração e evidenciou a relação entre carregamento excêntrico, deformações e manifestações patológicas.

6.2 Comportamento carga × deslocamento

A Figura 30 apresenta as curvas de carga x deslocamento, considerando o maior deslocamento registrado em cada pilarete durante os ensaios. A comparação dessas curvas permite avaliar o comportamento dos elementos ao longo do carregamento e verificar a influência da excentricidade nos deslocamentos.

Figura 30 – Carga × deslocamento obtidas a partir do maior deslocamento em cada pilarete.



Fonte: Autor (2026).

Os pilaretes P0, P25 e P50 apresentaram comportamento semelhante ao longo do carregamento, atingindo cargas elevadas antes da ruptura. Entretanto, os deslocamentos aumentaram à medida que a excentricidade foi elevada. O pilarete P0 apresentou deslocamento máximo de aproximadamente 1,38 mm, enquanto os pilaretes P25 e P50 atingiram deslocamentos de 1,83 mm e 2,52 mm, respectivamente.

Nos modelos com maiores excentricidades, os deslocamentos aumentaram. O pilarete P75 apresentou o maior deslocamento observado nos ensaios, atingindo aproximadamente 4,55 mm para uma carga de 150 kN. Já o pilarete P100 alcançou deslocamento de aproximadamente 2,37 mm para uma carga de 70 kN. Esses resultados mostram que o aumento da excentricidade elevou os deslocamentos mesmo sob cargas menores, indicando menor rigidez e maior participação dos esforços de flexão.

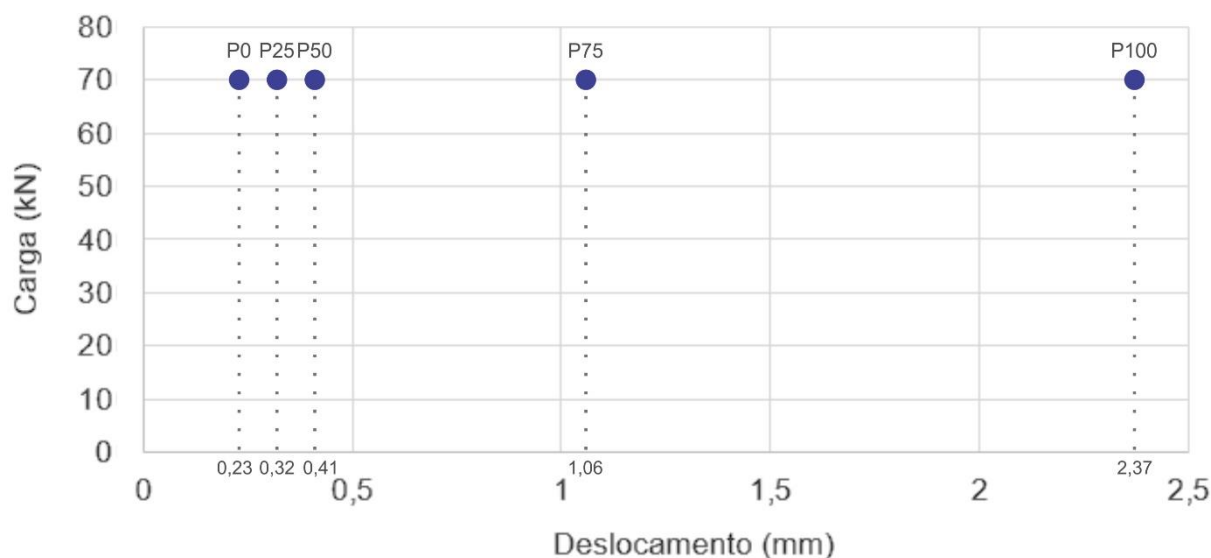
Em síntese, o aumento da excentricidade resultou em maiores deslocamentos e menor capacidade resistente. As curvas dos modelos P0, P25 e P50 permaneceram mais próximas do eixo vertical, indicando maior rigidez. Já os pilaretes P75 e P100 apresentam curvas mais inclinadas, evidenciando maior deformabilidade durante o carregamento.

Esse comportamento também indica a manifestação dos efeitos de segunda ordem durante o carregamento. Nos pilaretes submetidos à carga excêntrica, o momento fletor inicial é produzido pela própria excentricidade. Com o aumento da carga, os deslocamentos laterais ampliaram a excentricidade efetiva, gerando momentos adicionais pelo efeito P-Delta. Esse efeito foi mais expressivo nos modelos P75 e P100, que apresentaram maiores deslocamentos mesmo sob níveis baixos de carga. Com isso, a perda de rigidez observada na Figura 30 decorre tanto da excentricidade inicial quanto do aumento progressivo dos deslocamentos laterais durante o ensaio.

Nota-se a formação de dois conjuntos de curvas. O primeiro é formado pelos modelos P0, P25 e P50 e o segundo por P75 e P100. Esse comportamento está relacionado à mudança nos domínios de deformação. No primeiro grupo, a seção transversal dos pilaretes permaneceu submetida predominantemente à compressão, com maior participação do concreto na resistência. No segundo grupo, o mesmo comportamento não ocorreu, sendo alterado pelo aumento da excentricidade. Com o aumento da carga, a linha neutra tende a se deslocar, modificando a região comprimida e exigindo maior desempenho do aço no segundo grupo, composto pelos modelos P75 e P100, o que altera a rigidez e a capacidade resistente desses elementos estruturais.

Para avaliar a rigidez dos pilaretes, elaborou-se o gráfico da Figura 31 sob um mesmo nível de carregamento, considerando a carga de 70 kN, valor comum a todos os pilaretes ensaiados.

Figura 31 – Deslocamentos medidos no relógio R2 para a carga de 70 kN.



Fonte: Autor (2026).

Para a carga de 70 kN, os pilaretes P0, P25 e P50 apresentaram deslocamentos reduzidos e próximos entre si. Em contrapartida, os pilaretes P75 e P100 apresentaram deslocamentos mais elevados, atingindo 1,06 mm e 2,37 mm, respectivamente.

Na comparação entre os extremos, o P100 apresentou deslocamento superior ao P0 para a mesma carga aplicada. Esse comportamento indica menor rigidez nos modelos com maiores excentricidades. No P75, o maior deslocamento antes da ruptura mostra que o pilarete apresentou maior deformação durante o ensaio, o que pode indicar um comportamento mais dúctil. No P100, apesar do deslocamento elevado, a ruptura ocorreu com carga muito baixa. Por isso, nesse caso, o resultado deve ser interpretado com cuidado, pois o deslocamento está mais relacionado à perda de rigidez do que a um aumento da ductilidade.

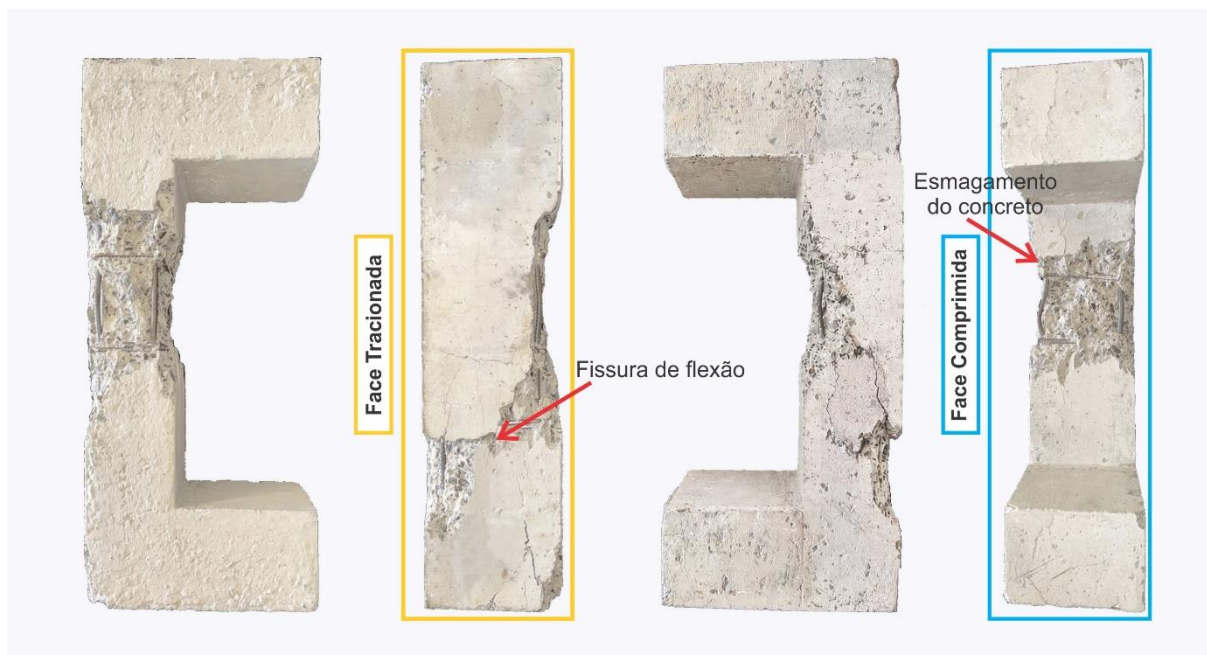
Esses resultados acompanham a tendência da Figura 30, em que os maiores níveis de excentricidade apresentaram maiores deslocamentos e menor rigidez. A análise par a carga de 70 kN reforça o comportamento observado ao longo dos ensaios

6.3 Fissuração e modo de ruptura

A análise visual dos pilaretes após os ensaios identificou os padrões de fissuração e os modos de ruptura de cada modelo. As Figuras 32 a 36 apresentam os pilaretes após o carregamento, permitindo comparar a distribuição das fissuras e os danos observados em cada caso.

Em todos os modelos, a ruptura ocorreu na região próxima ao consolo superior entre a posição dos relógios comparadores R1 e R2, indicando que essa foi mais solicitada durante os ensaios. Com a aplicação da carga excêntrica, a flexão passa a atuar em conjunto com a compressão, intensificando as solicitações nessa região. No entanto, foram observadas diferenças na quantidade e na distribuição das fissuras, bem como na intensidade dos danos, em função da excentricidade aplicada.

Figura 32 – Aspectos da fissuração e do modo de ruptura do pilarete P0.



Fonte: Autor (2026).

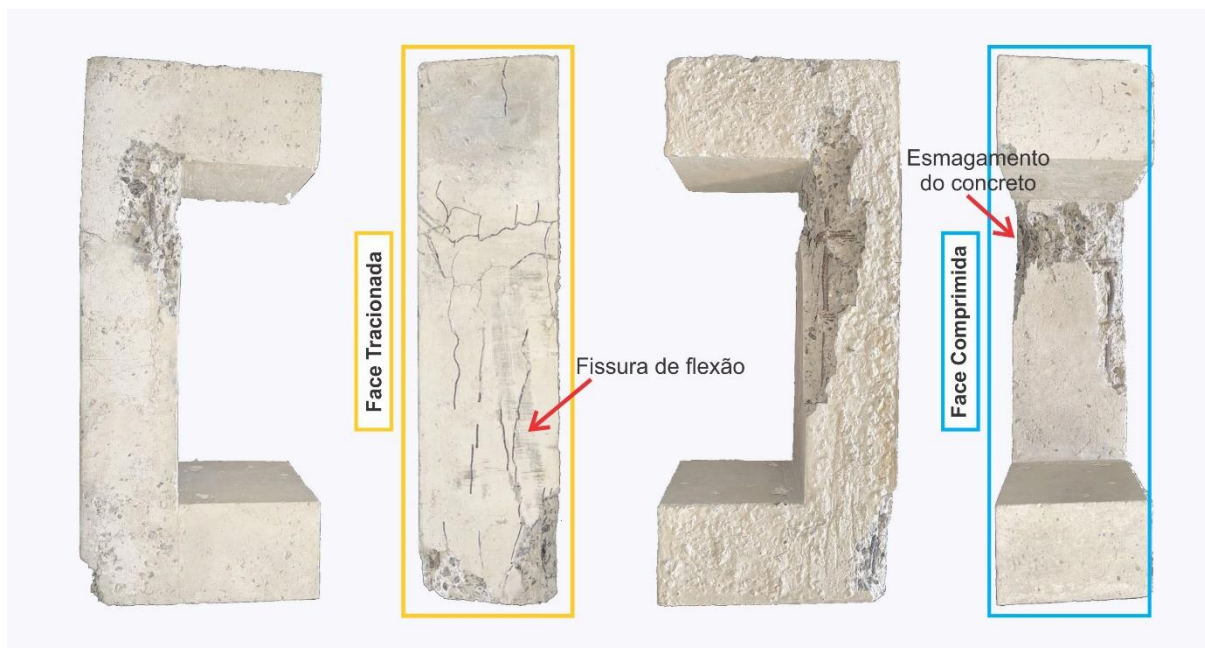
No P0, os danos ficaram concentrados na região central-superior do pilarete, onde ocorreu o deslocamento do concreto e a exposição das armaduras. As fissuras permaneceram restritas ao entorno da região de ruptura, sem propagação significativa ao longo da altura do elemento.

Os danos observados indicam predominância do esmagamento localizado do concreto, acompanhado da perda de cobertura na região mais solicitada. Esse comportamento indica

que o pilarete manteve sua integridade durante boa parte do carregamento, com danos concentrados apenas na região de ruptura.

A ruptura localizada observada no pilarete P0 é compatível com sua elevada capacidade resistente e com a ausência de excentricidade na aplicação de carga.

Figura 33 – Aspectos da fissuração e do modo de ruptura do pilarete P25.



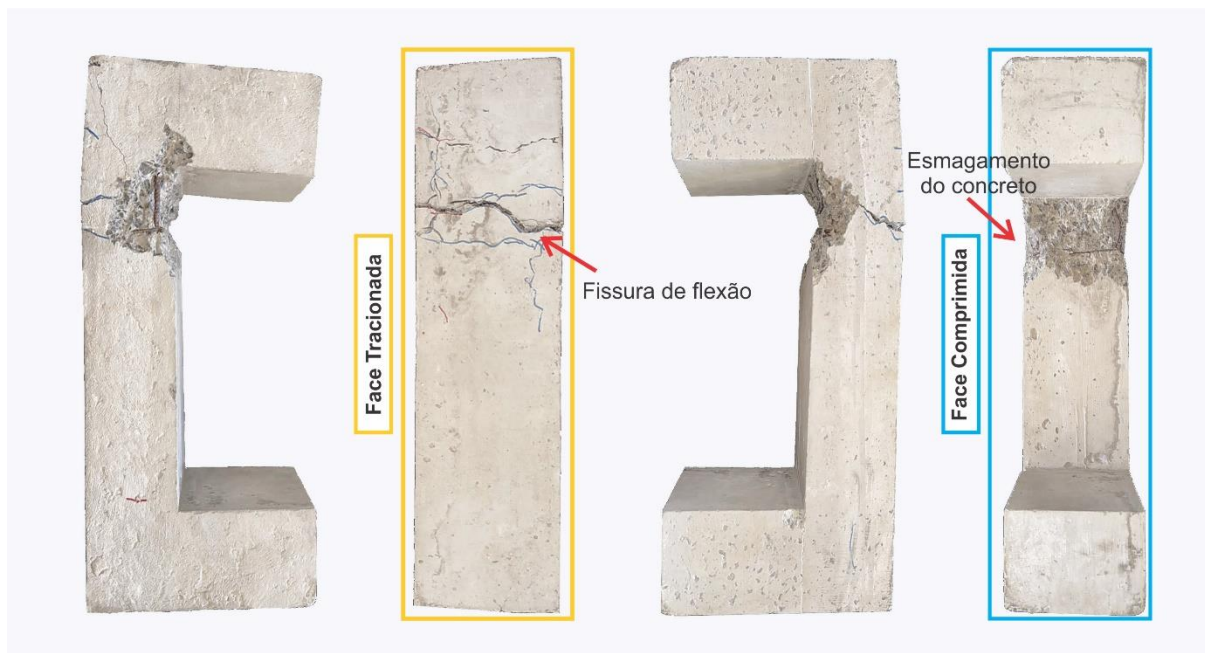
Fonte: Autor (2026).

No pilarete P25, a ruptura ocorreu na região próxima ao consolo superior, com deslocamento do concreto e exposição das armaduras. Em comparação ao P0, o P25 apresentou maior quantidade de fissuras distribuídas pela face tracionada, indicando maior propagação da fissuração durante o carregamento.

Apesar da maior extensão da fissuração, os danos mais severos permaneceram concentrados na região de ruptura, onde ocorreu o esmagamento localizado do concreto e a perda do cobrimento. Esse comportamento indica que o aumento da excentricidade favoreceu a formação e a propagação das fissuras, sem alterar a região predominante de ruptura.

Embora tenha apresentado carga de ruptura próxima à do pilarete P0, o modelo P25 desenvolveu um padrão de fissuração mais distribuído ao longo da face tracionada, evidenciando a influência da excentricidade no comportamento do elemento.

Figura 34 – Aspectos da fissuração e do modo de ruptura do pilarete P50.



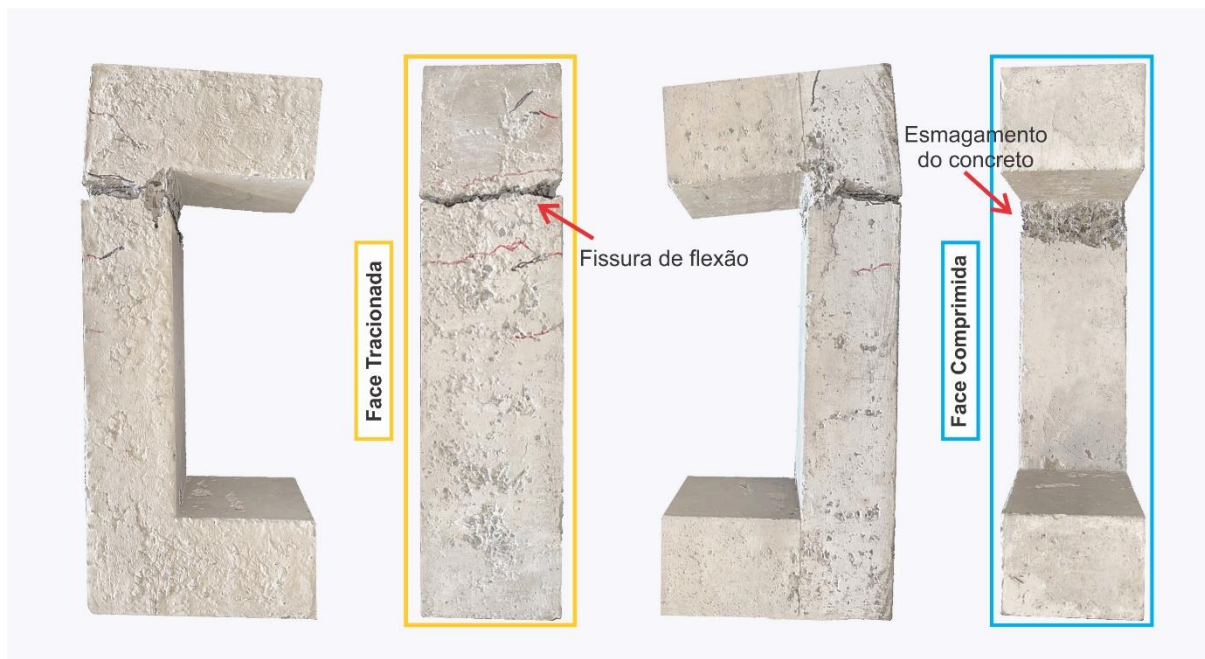
Fonte: Autor (2026).

No pilarete P50, a ruptura ocorreu na região próxima ao consolo superior, com deslocamento do concreto e exposição das armaduras. Na face tracionada, destaca-se a presença de uma fissura principal bem definida na região de ruptura, acompanhada por fissuras secundárias de menor extensão.

Em comparação aos modelos P0 e P25, o P50 apresentou uma fissura principal mais evidente na região de ruptura, indicando maior participação dos esforços de flexão.

Embora tenha atingido carga de ruptura próxima à dos modelos P0 e P25, o P50 apresentou abertura de fissura mais expressiva na região de ruptura, evidenciando a influência do aumento da excentricidade sobre o comportamento do elemento.

Figura 35 – Aspectos da fissuração e do modo de ruptura do pilarete P75.



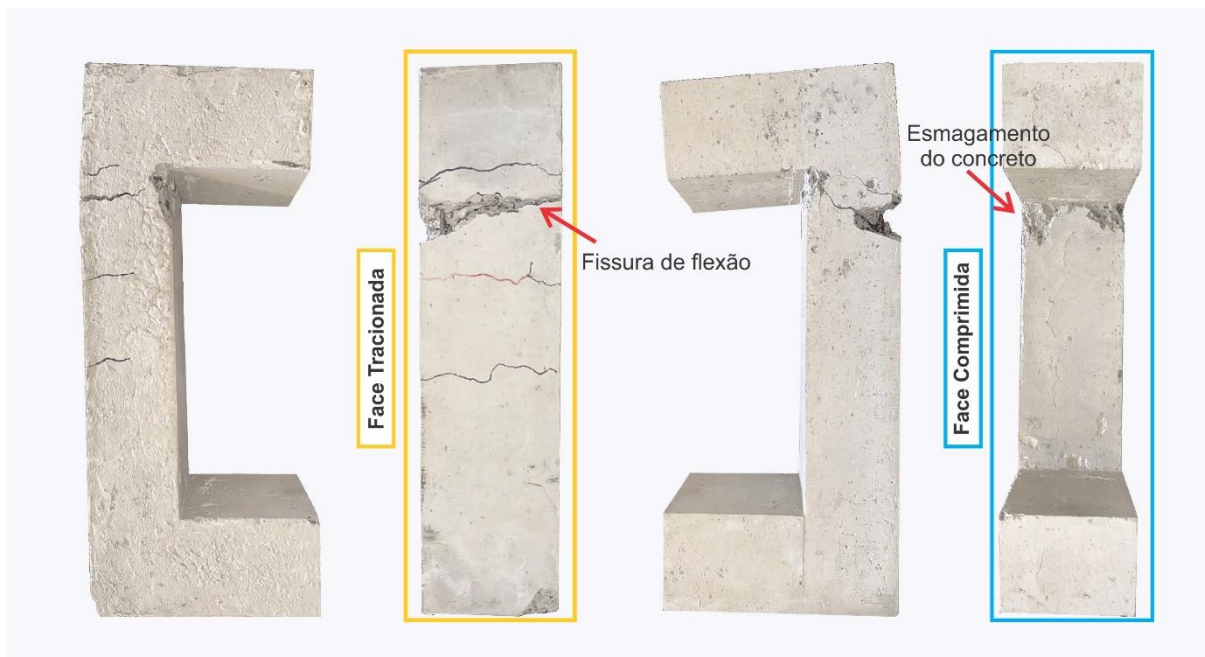
Fonte: Autor (2026).

No pilarete P75, a fissura principal ficou bem definida e apresentou maior abertura na região próxima ao consolo superior, indicando maior participação dos esforços de flexão em relação aos modelos P0, P25 e P50. Na face tracionada, também apareceram fissuras secundárias ao redor da fissura principal, indicando a evolução do processo de fissuração durante o carregamento.

Diferentemente dos modelos anteriores, o modelo P75 apresentou menor deslocamento do concreto e menor concentração de danos na região rompida. Enquanto nos pilaretes P0, P25 e P50 a ruptura foi marcada principalmente pela perda de cobertura e pela exposição das armaduras, no P75 a abertura da fissura principal tornou-se o aspecto mais característico da ruptura.

Esse padrão mostra uma mudança visual da ruptura. Embora o esmagamento do concreto ainda apareça na região mais solicitada, a fissura principal passou a ter maior destaque.

Figura 36 – Aspectos da fissuração e do modo de ruptura do pilarete P100.



Fonte: Autor (2026).

No pilarete P100, a ruptura permaneceu concentrada na região próxima ao consolo superior. A região apresentou uma fissura principal bem definida, acompanhada por fissuras secundárias na face tracionada. Também foi identificado deslocamento localizado do concreto e exposição das armaduras na região da ruptura.

Em comparação aos modelos anteriores, a fissura principal apresentou maior abertura e se destacou na região de ruptura. Além disso, as fissuras secundárias distribuídas na face tracionada indicam a maior participação dos esforços de flexão no comportamento do elemento.

Embora a região de ruptura tenha permanecido semelhante à observada nos demais pilaretes, o P100 apresentou um quadro de fissuração mais evidente, compatível com a elevada excentricidade aplicada e com a redução da capacidade resistente observada durante o ensaio.

6.4 Síntese dos padrões de fissuração e ruptura

A análise das Figuras 32 a 36 mostra que todos os pilaretes apresentaram ruptura na região próxima ao consolo superior, indicando que essa foi a região mais solicitada durante os ensaios. Entretanto, a forma como os danos se manifestaram variou em função da excentricidade aplicada. Nos modelos P0 e P25, observou-se maior concentração de danos associados ao esmagamento localizado do concreto, perda de cobertura e exposição das

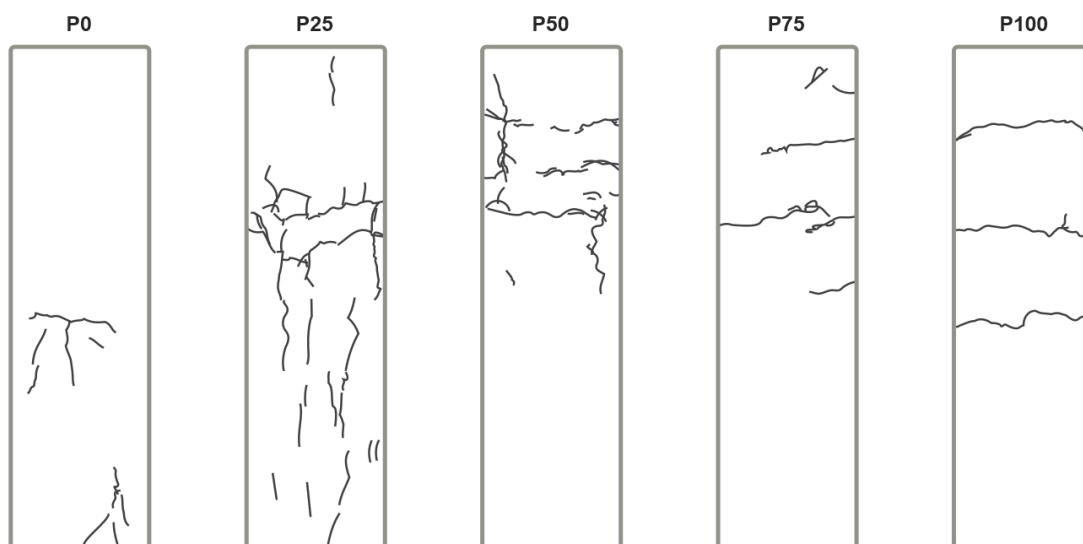
armaduras. Já nos modelos P50, P75 e P100, a fissuração passou a assumir maior destaque no processo de ruptura.

Também foram observadas diferenças na distribuição das fissuras entre os modelos analisados. O pilarete P25 apresentou o quadro de fissuração mais distribuído ao longo da face tracionada, enquanto os modelos P50, P75 e P100 passaram a apresentar fissuras principais mais evidentes na região de ruptura. Nos modelos com maiores excentricidades, especialmente P75 e P100, a abertura dessas fissuras tornou-se uma das características mais marcantes do comportamento observado após os ensaios.

As alterações nos modos de ruptura acompanham os resultados de carga de ruptura, primeira fissura e deslocamentos. À medida que a excentricidade aumentou, verificou-se redução da capacidade resistente dos pilaretes e maior influência dos esforços de flexão sobre o comportamento dos elementos.

A Figura 37 reúne os principais padrões de fissuração observados na face tracionada dos pilaretes após os ensaios. A comparação mostra com maior clareza a distribuição das fissuras e as alterações associadas ao aumento da excentricidade.

Figura 37 – Mapa de fissuração da face tracionada dos pilaretes após os ensaios.



Fonte: Autor (2026).

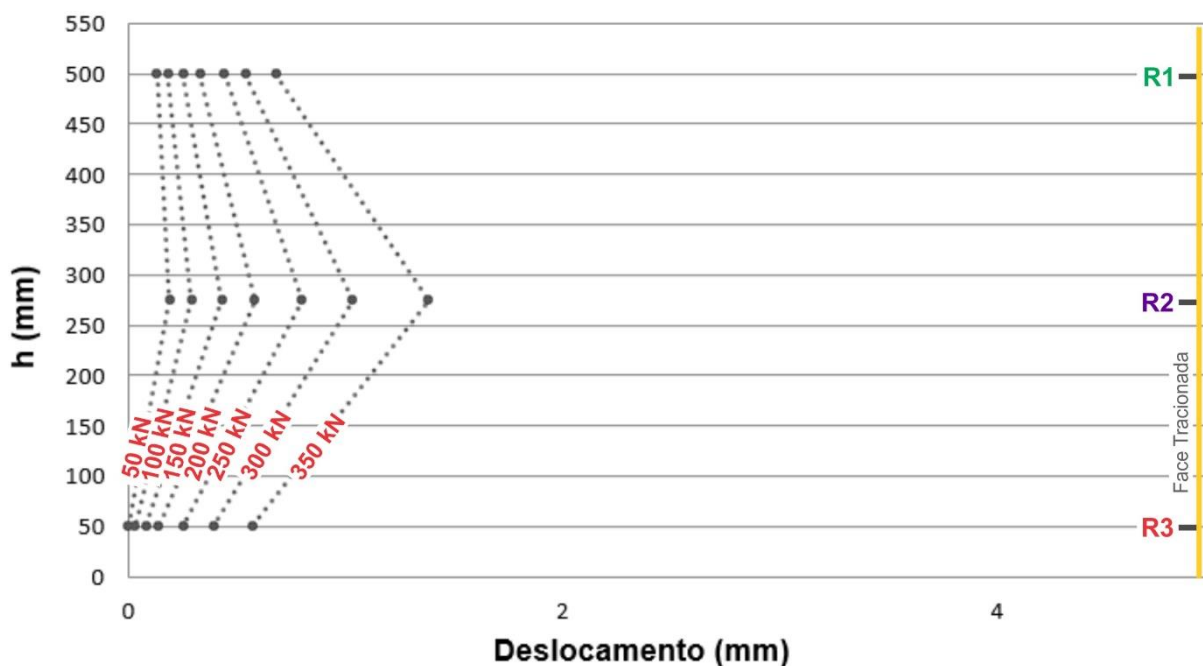
No pilarete P0, as fissuras permaneceram concentradas em uma área reduzida da face tracionada. No modelo P25, observou-se maior quantidade de fissuras distribuídas ao longo do elemento. Já nos modelos P50, P75 e P100 verifica-se predominância de fissuras horizontais na região próxima ao consolo superior, indicando mudanças na orientação e na distribuição das fissuras em relação aos modelos com menores excentricidades.

O mapa de fissuração reforça a mudança observada entre os modelos. No P0, as fissuras ficaram mais concentradas; no P25, apareceram de forma mais distribuída; e, nos modelos P50, P75 e P100, passaram a se destacar na região próxima ao consolo superior.

6.5 Simetria dos deslocamentos ao longo da altura dos pilaretes

As Figuras 38 a 42 apresentam os deslocamentos medidos pelos relógios comparadores R1, R2 e R3 ao longo da altura dos pilaretes ensaiados. Os relógios foram posicionados na face tracionada a 500 mm, 275 mm e 50 mm da base, correspondendo às regiões superior, central e inferior dos elementos, que possuem altura total de 550 mm. A análise desses resultados permite identificar como os deslocamentos se distribuíram ao longo da altura dos pilaretes durante o carregamento.

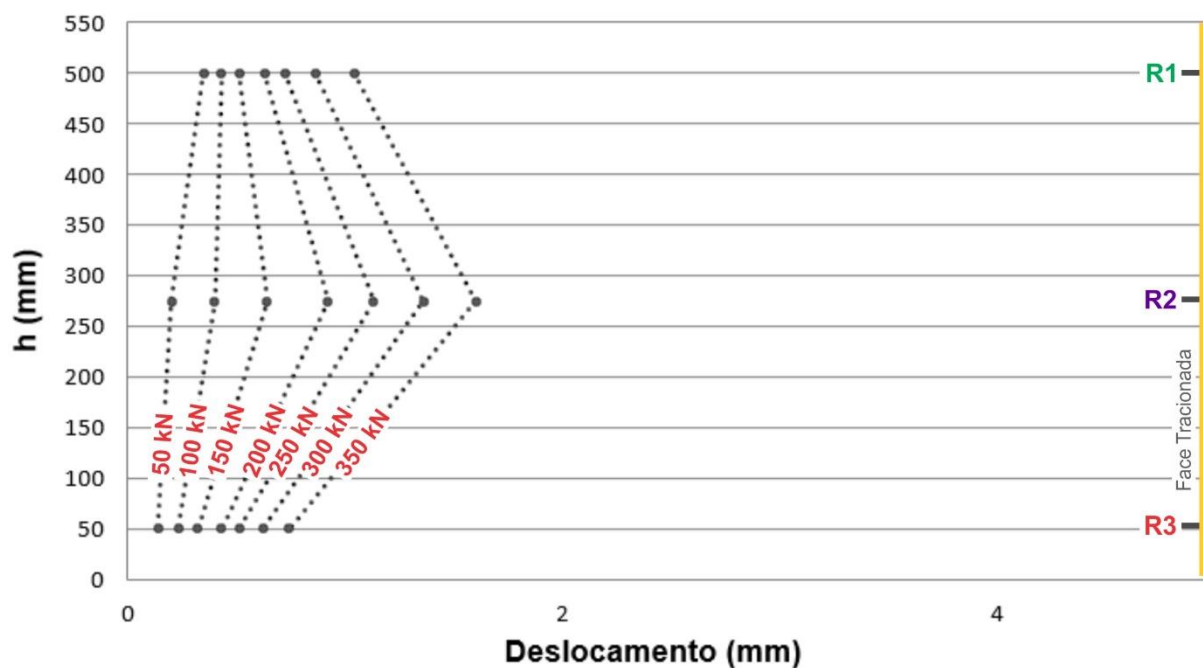
Figura 38 – Distribuição dos deslocamentos ao longo da altura do pilarete P0.



Fonte: Autor (2026).

No P0, a distribuição de deslocamentos foi praticamente simétrica ao longo da altura. Em todos os níveis de carregamento, o maior deslocamento foi registrado pelo relógio R2, localizado na região central do elemento, enquanto os relógios R1 e R3 apresentaram valores menores e próximos entre si. Os maiores deslocamentos ocorreram na região central do pilarete, com redução em direção às extremidades. Com o aumento da carga, os deslocamentos cresceram progressivamente, mantendo o padrão geral de distribuição durante o ensaio.

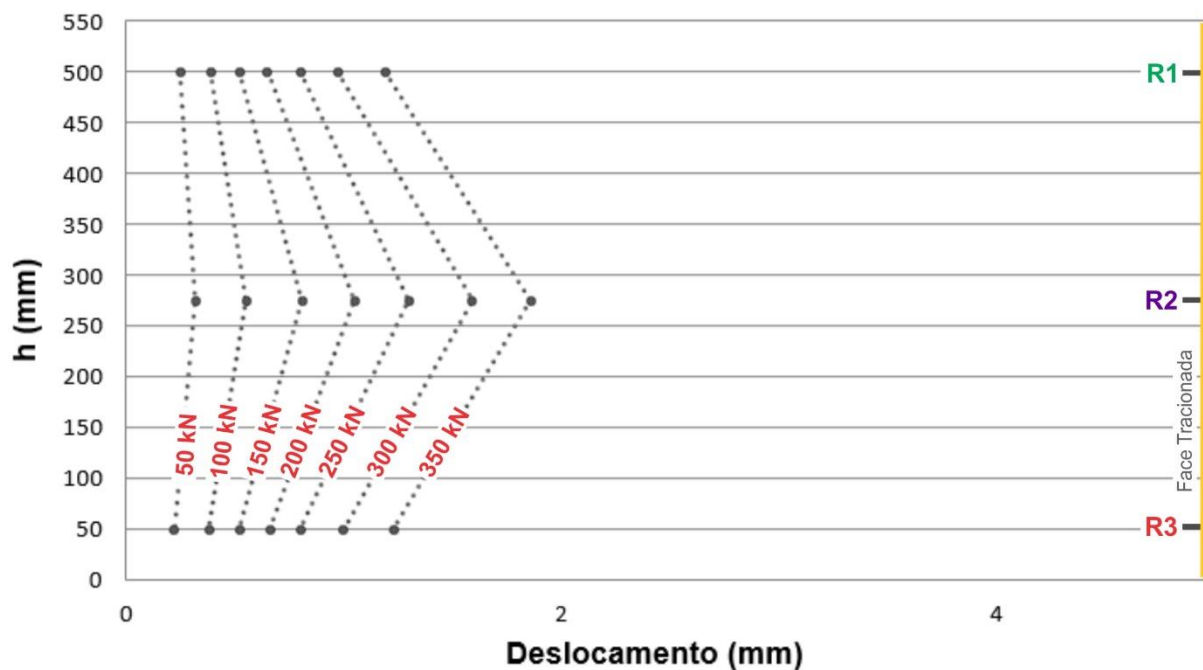
Figura 39 – Distribuição dos deslocamentos ao longo da altura do pilarete P25.



Fonte: Autor (2026).

O pilarete P25 apresentou comportamento semelhante ao P0, com os maiores deslocamentos concentrados na região central, monitorada pelo relógio R2. Os relógios R1 e R3 registraram deslocamentos menores ao longo do ensaio, resultando em uma distribuição aproximadamente simétrica dos deslocamentos ao longo da altura. Em comparação ao modelo P0, foram registrados deslocamentos mais elevados para níveis de carga equivalentes, evidenciando o efeito da excentricidade aplicada.

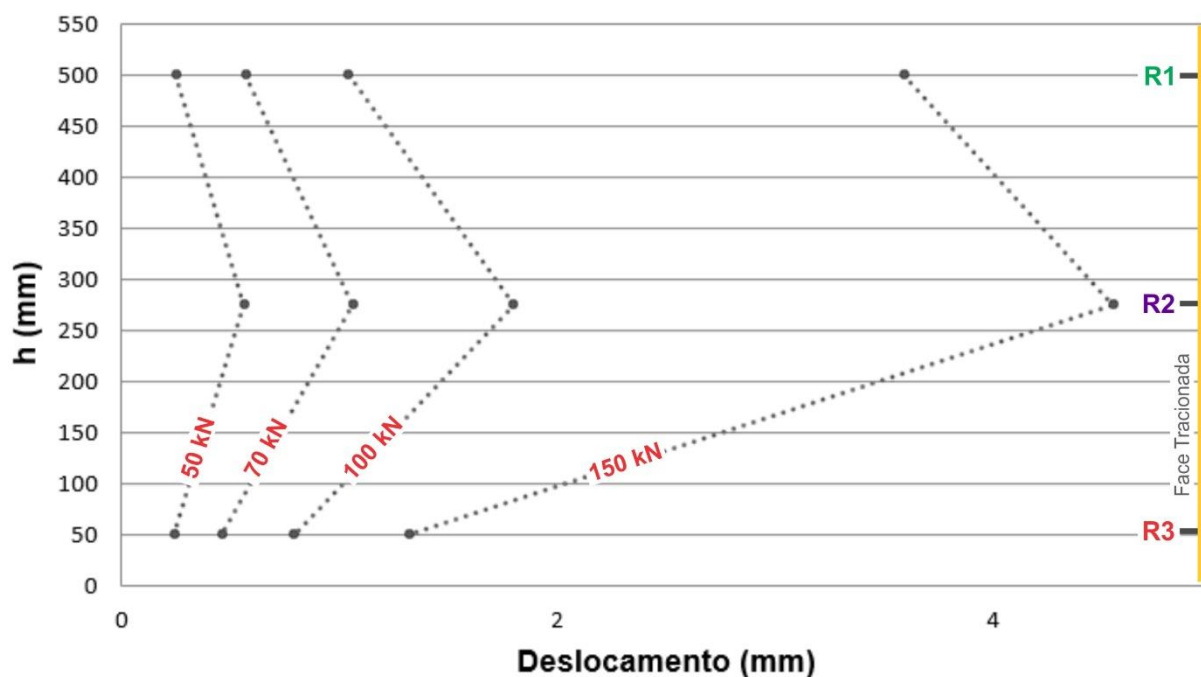
Figura 40 – Distribuição dos deslocamentos ao longo da altura do pilarete P50.



Fonte: Autor (2026).

No P50, o maior deslocamento também ocorreu na região central, registrada pelo relógio R2. Os relógios R1 e R3 apresentaram valores inferiores, mantendo um padrão geral semelhante ao dos modelos P0 e P25. Entretanto, os deslocamentos foram mais elevados, indicando maior movimentação lateral do pilarete com o aumento da excentricidade. Mesmo com o aumento dos deslocamentos, os maiores valores permaneceram na região central, com menores registros nas extremidades.

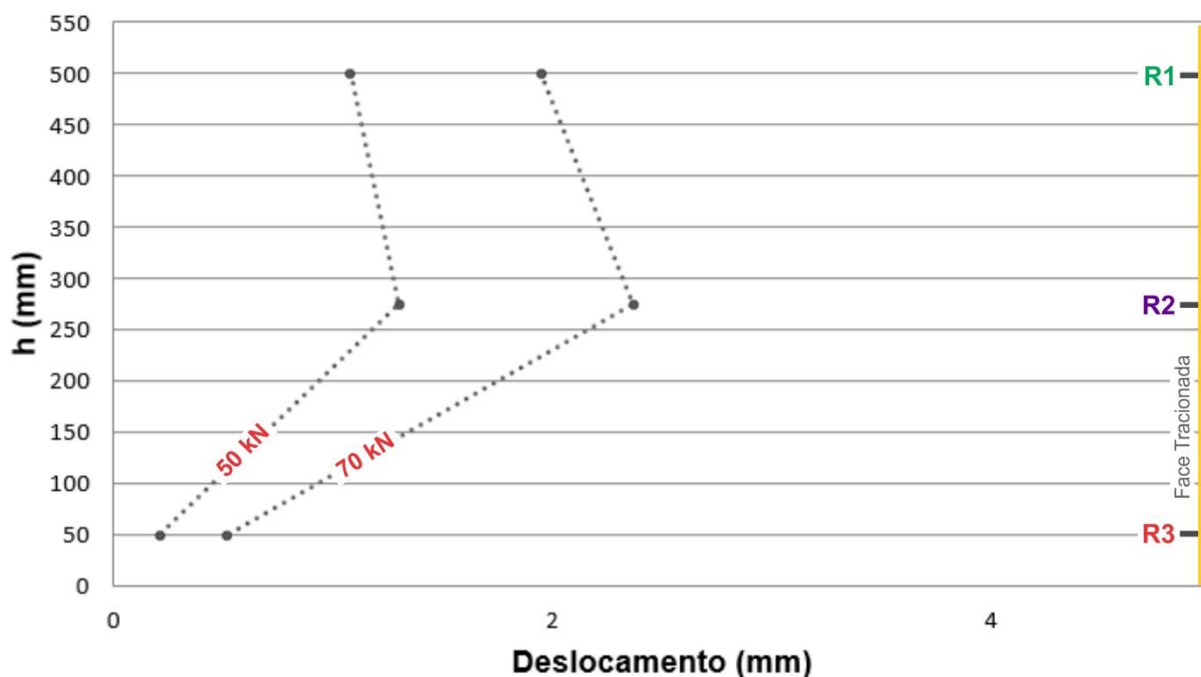
Figura 41 – Distribuição dos deslocamentos ao longo da altura do pilarete P75.



Fonte: Autor (2026).

No P75, as diferenças entre os relógios comparadores foram mais acentuadas. O maior deslocamento foi registrado pelo relógio R2, localizado na região central do elemento, enquanto R1 e R3 apresentaram valores inferiores. Os deslocamentos se concentraram de forma mais evidente na região central, principalmente no carregamento de 150 kN. Em comparação aos modelos P0, P25 e P50, observa-se que o P75 apresentou aumento expressivo dos deslocamentos, indicando maior influência da excentricidade aplicada.

Figura 42 – Distribuição dos deslocamentos ao longo da altura do pilarete P100.



Fonte: Autor (2026).

O P100 apresentou distribuição menos uniforme dos deslocamentos ao longo da altura do elemento. O maior deslocamento foi registrado pelo relógio R2, localizado na região central, enquanto R1 apresentou valores intermediários e R3 registrou os menores deslocamentos. A região central concentrou os maiores deslocamentos durante o carregamento. Mesmo sob cargas reduzidas, o P100 apresentou deslocamentos elevados, mostrando maior sensibilidade à excentricidade aplicada.

As Figuras 38 a 42 mostram que os maiores deslocamentos ocorreram na região central, monitorada pelo relógio R2. Nos modelos P0, P25 e P50, a distribuição dos deslocamentos apresentou comportamento mais regular ao longo da altura, com menores diferenças entre as regiões inferior, central e superior. Já nos modelos P75 e P100, essas diferenças se tornaram mais evidentes, indicando maior concentração dos deslocamentos na região central. Esses resultados mostram que o aumento da excentricidade não alterou a região de maior deslocamento, mas aumentou os deslocamentos e sua concentração na região central dos pilaretes.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou experimentalmente o comportamento de pilaretes de concreto armado submetidos à flexo-compressão reta, com diferentes níveis de excentricidade da carga. Os ensaios permitiram avaliar a capacidade resistente, os deslocamentos laterais, o surgimento das fissuras e o modo de ruptura dos elementos.

Os resultados mostraram que o aumento da excentricidade reduziu a carga de ruptura dos pilaretes. O modelo P0, submetido à carga centrada, apresentou a maior resistência, atingindo 415 kN. Já os modelos P25 e P50 apresentaram reduções discretas, com cargas de ruptura de 397 kN e 372 kN, respectivamente.

A partir do modelo P75, a perda de resistência tornou-se mais evidente em relação ao P0. O pilarete P75 rompeu com 153 kN, enquanto o P100 apresentou ruptura com 77 kN. Em comparação ao modelo de referência, as perdas foram de 63,1% e 81,4%, respectivamente. Esses valores indicam que a redução da resistência não ocorreu de forma proporcional ao aumento da excentricidade, sendo mais intensa nos maiores afastamentos da carga em relação ao eixo do elemento.

Esse comportamento indica uma transição no comportamento resistente dos pilaretes. Nos modelos P0 e P25, a resposta estrutural permaneceu mais próxima de uma condição predominantemente comprimida, com maior participação do concreto na resistência. O P50 ainda manteve carga de ruptura elevada, porém já apresentou fissuração mais evidente, indicando comportamento intermediário. Já nos modelos P75 e P100, o aumento da excentricidade intensificou os efeitos de flexão, alterando a distribuição interna dos esforços e aumentando a sollicitação da região tracionada.

O aumento da excentricidade também antecipou o surgimento das fissuras. Enquanto no pilarete P0 a primeira fissura ocorreu com 250 kN, nos modelos P25, P50, P75 e P100 ela surgiu com 150 kN, 90 kN, 60 kN e 30 kN, respectivamente. Com isso, os pilaretes submetidos à carga excêntrica passaram a fissurar em etapas mais iniciais do carregamento.

Nos deslocamentos, os modelos com maiores excentricidades apresentaram maior movimentação lateral. Os pilaretes P0, P25 e P50 mantiveram comportamento mais próximo entre si, com deslocamentos menores e maior rigidez. Já os modelos P75 e P100 apresentaram deslocamentos mais elevados mesmo sob cargas menores, indicando maior influência dos esforços de flexão no comportamento dos elementos.

A análise ao longo do eixo longitudinal mostrou que os maiores deslocamentos ocorreram na região central, monitorada pelo relógio R2. Nos modelos P0, P25 e P50, essa distribuição foi mais regular. Nos modelos P75 e P100, os deslocamentos concentraram-se na região central, o que reforça o efeito da excentricidade sobre o comportamento dos pilaretes.

Quanto à fissuração e ao modo de ruptura, todos os modelos romperam na região próxima ao consolo superior. No entanto, a forma como os danos se manifestaram variou entre os pilaretes. Nos modelos P0 e P25, houve maior concentração de danos associados ao esmagamento localizado do concreto e à perda de cobrimento. No P50, a fissura principal passou a ser mais evidente, indicando comportamento intermediário. Nos modelos P75 e P100, as fissuras de flexão se tornaram mais marcantes, principalmente na região próxima à ruptura.

O mapa de fissuração confirmou essa tendência. No P0, as fissuras ficaram concentradas, enquanto no P25 a fissuração apareceu de forma mais distribuída o longo da face tracionada. Nos modelos P50, P75 e P100, as fissuras principais concentraram-se próximo do consolo superior, acompanhando o aumento dos esforços de flexão.

Assim, os resultados indicam que a excentricidade não apenas reduziu a resistência dos pilaretes, mas também modificou a forma como os danos se desenvolveram até a ruptura. Com o aumento da excentricidade, observou-se queda não linear da capacidade resistente, antecipação da fissuração, aumento dos deslocamentos laterais e mudança progressiva no padrão de ruptura.

Esses resultados reforçam a importância da consideração das excentricidades no dimensionamento de pilares de concreto armado, conforme previsto pelas normas técnicas. Os ensaios mostraram que a variação da posição da carga alterou a resistência, os deslocamentos e o padrão de fissuração dos pilaretes, confirmando a influência da excentricidade na segurança e no comportamento em serviço desses elementos.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a quantidade de pilaretes ensaiados para cada nível de excentricidade, utilizar extensômetros no concreto e nas armaduras e instalar maior número de relógios comparadores na face tracionada. Também sugere-se avaliar diferentes resistências do concreto, permitindo aprofundar a análise dos pilaretes submetidos à flexo-compressão reta.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6467: Agregados — Determinação do inchamento de agregado miúdo — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7217: Agregados — Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7219: Agregados — Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522-1: Concreto endurecido — Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação — Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11578: Cimento Portland composto — Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16607: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 45: Agregados — Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 52: Agregado miúdo — Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 53: Agregado graúdo — Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. de. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.

CASAGRANDE, A. F. Consideração da fluência no cálculo dos efeitos de segunda ordem em pilares de concreto armado. 2016. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

CURADO, Marina Craveiro; GOMES, Ronaldo Barros. Influência da resistência do concreto em pilares de concreto armado sob flexo-compressão reta. In: CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO DA UFG – CONPEEX, 3., 2006, Goiânia. Anais eletrônicos do XIV Seminário de Iniciação Científica [CD-ROM]. Goiânia: UFG, 2006. n. p.

ELKEM. Products. Disponível em: <https://www.elkem.com/products/>. Acesso em: 13 abr. 2026.

FERREIRA, D. B. Análise experimental de pilares de concreto armado, reforçados com concreto auto adensável e conectores. 2014. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. São Paulo: Pini, 1993. 349 p.

HIPERFERRO. Coluna armada. Disponível em: <https://hiperferro.com.br/construcao-civil-html/ampliados-para-construcao/colunas-armada.html>. Acesso em: 13 abr. 2026.

MUNIZ, Mara Bruna Silveira; SILVA JÚNIOR, Francisco Eudázio Suriano da; SIQUEIRA, Gladstone Araújo; SILVA, Ricardo José Carvalho. Estudo teórico-experimental da resistência de pilares sob flexão composta normal. In: SIMPÓSIO PARANAENSE DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., 2019. Anais [...]. 2019. p. 234-242. DOI: 10.4322/2526-7248.045.

PINHEIRO, L. M.; BARALDI, L. T.; POREM, M. E. Concreto armado: ábacos para flexão oblíqua. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.

QUEIROGA, Marcos Vinícios Mendonça de; GIONGO, José Samuel. Análise experimental de pilares de concreto de alto desempenho submetidos à compressão simples. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 21, p. 107-130, 2003.

SHEIKH, S. A.; UZUMERI, S. M. Analytical model for concrete confinement in tied columns. Journal of the Structural Division, New York, v. 108, n. ST12, p. 2703-2722, 1982. DOI: 10.1061/JSDEAG.0006100.

SIKA. Sika® Concreto Forte. Disponível em: <https://bra.sika.com/pt/construcao/tecnologia-do-concreto/aditivos-para-concreto-e-argamassa/sika-concreto-forte.html>. Acesso em: 13 abr. 2026.

VENTURINI, W. S.; RODRIGUES, R. O. Dimensionamento de peças retangulares de concreto armado solicitadas à flexão reta. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1987. 133 p.

VOTORANTIM CIMENTOS. Todas as obras. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos/todas-as-obras/>. Acesso em: 13 abr. 2026.