



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



DURVAL BERTOLDO MENEZES

**COMPORTAMENTO DA ANCORAGEM DE BARRAS DE AÇO CA70 COM
CABEÇA ACHATADA EM CONCRETO: ESTUDO EXPERIMENTAL COM
MONITORAMENTO POR FIBRA ÓPTICA**

Uberlândia, 2026

DURVAL BERTOLDO MENEZES

**COMPORTAMENTO DA ANCORAGEM DE BARRAS DE AÇO CA70 COM
CABEÇA ACHATADA EM CONCRETO: ESTUDO EXPERIMENTAL COM
MONITORAMENTO POR FIBRA ÓPTICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas, Construção Civil e Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina Vidigal de Lima

Coorientador: Prof. Dr. Pablo Augusto Krah

Uberlândia, 2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M543
2026

Menezes, Durval Bertoldo, 1974-
Comportamento da ancoragem de barras de aço CA70 com
cabeça achatada em concreto: estudo experimental com
monitoramento por fibra óptica [recurso eletrônico] / Durval
Bertoldo Menezes. - 2026.

Orientadora: Maria Cristina Vidigal de Lima.

Coorientador: Pablo Augusto Krahl.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.732>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Lima, Maria Cristina Vidigal de, 1970-,
(Orient.). II. Krahl, Pablo Augusto, 1988-, (Coorient.). III.
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em
Engenharia Civil. IV. Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 338, PPGEC				
Data:	07 de outubro de 2026	Hora de início:	8:00h	Hora de encerramento:	10:40h
Matrícula do Discente:	12412ECV002				
Nome do Discente:	Durval Bertoldo Menezes				
Título do Trabalho:	Comportamento da ancoragem de barras de aço CA70 com cabeça achatada em concreto: estudo experimental com monitoramento por fibra óptica				
Área de concentração:	Estruturas, Construção Civil e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Estruturas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Comportamento estrutural de ancoragens de aços de alta resistência CA70 em elementos pré-moldados de concreto				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Daniel de Lima Araújo - UFG, Alex Micael Dantas de Sousa - UNESP e Maria Cristina Vidigal de Lima, orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Maria Cristina Vidigal de Lima, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Cristina Vidigal de Lima, Professor(a) do Magistério Superior**, em 07/10/2026, às 13:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alex Micael Dantas de Sousa, Usuário Externo**, em 07/10/2026, às 14:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel de Lima Araújo, Usuário Externo**, em 08/10/2026, às 14:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7810495** e o código CRC **DE6B6EEE**.

*Dedico este trabalho a todos aqueles
que direta ou indiretamente
participaram para que esse objetivo
fosse alcançado.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e à Faculdade de Engenharia Civil (FECIV), pela estrutura, pelo suporte institucional e pela disponibilização dos recursos necessários ao desenvolvimento desta pesquisa. Em especial, agradeço aos técnicos de laboratório Cristiane Pires e Wanderly Geraldo da Silva, pelo apoio e pela colaboração durante as atividades experimentais.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM), pelo apoio institucional e pelas condições proporcionadas para o desenvolvimento desta pesquisa e para a continuidade da minha formação acadêmica e profissional.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), pela acolhida e pela disponibilização de sua infraestrutura laboratorial para a realização de parte dos ensaios desta pesquisa. Aos professores Jessé Augusto dos Santos Paixão e Flávio de Andrade Silva, pelo apoio, pela atenção e pelas contribuições para a realização do trabalho experimental. Aos técnicos de laboratório Rogério Ross da Fonseca Daniel, Jhansen Veiga Salles e Euclides Domingues Moura Neto, pela disponibilidade, pelo auxílio técnico e pela colaboração durante a execução dos ensaios.

À ArcelorMittal, pela doação das barras de aço CA50 AR (CA70), que foram a base deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, pelo apoio financeiro, administrativo e acadêmico.

A Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Processo N° 444420/2024-0, pelo apoio financeiro, o qual possibilitou a realização de parte da pesquisa na cidade do Rio de Janeiro.

À minha orientadora, Profa. Dra. Maria Cristina Vidigal de Lima, pela orientação, confiança, disponibilidade e pelas contribuições fundamentais ao desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Pablo Augusto Krah, pelo acompanhamento, pelas discussões técnicas e pelas importantes contribuições ao longo da pesquisa.

A Eurípedes Barsanulfo Marques, pela colaboração e pelas contribuições prestadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro concedido por meio do apoio nº 11417, que contribuiu para a realização desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta etapa da minha formação acadêmica.

RESUMO

A utilização de aços de alta resistência em estruturas de concreto armado possibilita maior aproveitamento da capacidade resistente das armaduras, porém impõe maiores exigências às regiões de ancoragem responsáveis pela transferência de esforços entre o aço e o concreto. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar experimentalmente o comportamento de ancoragem de barras nervuradas de aço CA70, com tensão nominal de escoamento de 700 MPa, providas de cabeça achatada obtida pela conformação da extremidade da própria barra, bem como investigar a transferência de esforços para o concreto por meio de sensores de rede de Bragg em fibra óptica (FBG). O programa experimental compreendeu 12 ensaios de arrancamento em blocos de concreto, utilizando barras com diâmetros nominais de 10,0 e 12,5 mm. Para cada diâmetro foram ensaiadas seis barras com cabeça achatada, com comprimento aderente correspondente a cinco vezes o diâmetro da barra. Foram analisadas as relações força-deslizamento, a capacidade de ancoragem e os modos de ruptura. Nos blocos com barras de 12,5 mm, sensores FBG foram embutidos no concreto e distribuídos ao redor da barra para monitorar as deformações internas durante o carregamento. Em todos os corpos de prova, as barras ultrapassaram o limite de escoamento e a ruptura final ocorreu no aço, sem ocorrência de ruptura dos blocos de concreto, demonstrando que o sistema de ancoragem foi capaz de manter a transferência de esforços durante o regime plástico da armadura. Nesse comportamento, destaca-se também a contribuição da armadura de confinamento dos blocos, que atuou na contenção do fendilhamento do concreto e favoreceu o desenvolvimento de elevados níveis de força antes da ruptura das barras. Em comparação com barras retas sem cabeça previamente ensaiadas pelo grupo, foram observados aumentos da capacidade global de ancoragem de aproximadamente 25% para as barras de 10,0 mm e 29% para as barras de 12,5 mm. Entretanto, para estas últimas, o efeito mais relevante foi a manutenção da transferência de esforços após o escoamento, permitindo que a ruptura final ocorresse na própria barra. As deformações registradas pelas FBGs acompanharam o aumento do carregamento até níveis próximos à ruptura das barras e apresentaram respostas distintas de tração e compressão em diferentes posições ao redor da armadura, evidenciando a natureza não uniforme e assimétrica do campo de deformações desenvolvido no concreto. A análise conjunta das respostas mecânicas e ópticas indicou a mobilização efetiva da cabeça achatada como mecanismo adicional de transferência de esforços, atuando conjuntamente com a aderência ao longo da barra. Conclui-se que, nas condições experimentais avaliadas, a associação entre aderência,

cabeça achatada e confinamento dos blocos foi capaz de mobilizar os elevados níveis da capacidade resistente das barras CA70 e evitar a ocorrência de falha prematura da ancoragem, conduzindo à ruptura final da própria armadura. O monitoramento por FBG mostrou-se uma metodologia de monitoramento capaz de acompanhar internamente a evolução e a não uniformidade das deformações do concreto associadas ao mecanismo de ancoragem.

Palavras-chave: aço CA70; ancoragem; cabeça achatada; ensaio de arrancamento; sensores FBG.

ABSTRACT

The use of high-strength steel in reinforced concrete structures allows better use of the load-carrying capacity of the reinforcement, but it also places greater demands on the anchorage regions responsible for transferring forces between the steel and the concrete. In this context, this study aimed to experimentally evaluate the anchorage behavior of ribbed CA70 steel bars, with a nominal yield strength of 700 MPa, provided with flattened heads formed from the end of the bar itself, as well as to investigate the transfer of forces to the concrete using fiber Bragg grating (FBG) sensors. The experimental program included 12 pull-out tests on concrete blocks using bars with nominal diameters of 10.0 and 12.5 mm. For each diameter, six bars with flattened heads were tested, with a bonded length equal to five times the bar diameter. The force-slip relationships, anchorage capacity, and failure modes were analyzed. In the blocks with 12.5 mm bars, FBG sensors were embedded in the concrete and placed around the bar to monitor internal strains during loading. In all specimens, the bars exceeded the yield strength and final failure occurred by steel bar fracture, with no failure of the concrete blocks. This shows that the anchorage system was able to maintain force transfer after steel yielding. The confining reinforcement in the blocks also contributed to this behavior by limiting concrete splitting and allowing high force levels to develop before bar fracture. Compared with straight bars without heads previously tested by the research group, the overall anchorage capacity increased by approximately 25% for the 10.0 mm bars and 29% for the 12.5 mm bars. However, for the 12.5 mm bars, the most important effect was the ability of the anchorage system to maintain force transfer after yielding, allowing the bars to reach final fracture. The strains recorded by the FBG sensors increased with the applied load up to levels close to bar fracture and showed different tensile and compressive responses at different positions around the reinforcement, indicating a non-uniform and asymmetric strain field in the concrete. The combined analysis of the mechanical and optical responses indicated that the flattened head was effectively mobilized as an additional force-transfer mechanism, acting together with bond along the bar. It is concluded that, under the experimental conditions evaluated, the combined action of bond, the flattened head, and block confinement was able to mobilize high levels of the load-carrying capacity of the CA70 bars and prevent premature anchorage failure, leading to final fracture of the reinforcement itself. FBG monitoring proved to be a suitable method for

monitoring the internal development and non-uniform distribution of concrete strains associated with the anchorage mechanism.

Keywords: CA70 steel; anchorage; flattened head; pull-out test; FBG sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Barras com cabeça achatada.....	1
Figura 2	Configuração simplificada dos ensaios de arrancamento realizados por (Singhal; Chourasia; Parashar, 2020).....	2
Figura 3	Detalhamento simplificado da configuração utilizada por (Abed; Abed; Al-Rawe, 2021).....	3
Figura 4	Uma das configurações simplificadas dos ensaios de arrancamento conduzidos por (Shao <i>et al.</i> , 2016).....	4
Figura 5	Gráfico P_{ideal} em função dos diâmetros de uma distribuição de partículas com diâmetro mínimo de 0,02 μm a diâmetro máximo de 12,5 mm. Em A) com escala normal e em B) com escala logarítmica..	9
Figura 6	Aderência entre uma placa de aço e um bloco de concreto. O esforço Rb_1 é a ligação por aderência entre o concreto e a placa de aço.....	15
Figura 7	Aderência por atrito entre uma barra de aço lisa e um bloco de concreto. O esforço Rb_2 em um estado estático é igual à força gerada por atrito t_b	16
Figura 8	Aderência mecânica entre a barra nervurada e o bloco de concreto. O esforço Rb_3 em um estado estático é igual à aderência mecânica gerada na barra.....	17
Figura 9	Relação entre a força de tração e a força de aderência para a situação em que a força de tração aumenta progressivamente, mobilizando maior comprimento de ancoragem.....	18
Figura 10	Relação entre forças aplicadas na barra e a respectiva força de aderência gerada entre o concreto e a barra de aço.....	19
Figura 11	Barra com cabeça achatada, em destaque o diâmetro da cabeça (D_h) e o diâmetro da barra (d_b), na mesma nomenclatura da normativa (ACI, 2025).....	25
Figura 12	Tipos de fendilhamento: A) longitudinal, B) cônico e C) lateral.....	30
Figura 13	Comparação aço de alta resistência CA50 S/AR (CA-70) com o aço convencional CA-50.....	31
Figura 14	Princípio de funcionamento de uma Rede de Bragg em Fibra Óptica (FBG).....	34
Figura 15	Concreto produzido na UFU e PUC-Rio.....	39
Figura 16	Ensaio de compressão axial realizado na UFU e (B) o bloco após a ruptura realizado na PUC-Rio.....	41
Figura 17	Ensaio de tração direta das barras CA-70.....	43

Figura 18	(A) Processo de aquecimento da extremidade da barra para conformação da cabeça achatada, (B) etapa de conformação por pressão da cabeça e (C) barras de aço após a conformação das cabeças achatadas.....	44
Figura 19	Resultado das medidas das cabeças achatadas para as barras de diâmetro nominal de 10,0 mm.....	46
Figura 20	Resultado das medidas das cabeças achatadas para as barras de diâmetro nominal de 12,5 mm.....	47
Figura 21	Geometria do corpo de prova e configuração da barra de ensaio.....	49
Figura 22	Resultado final das formas: (A) produzidas na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e (B) produzidas na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).....	50
Figura 23	(A) Esquema da armadura de confinamento, (B) resultado final da armadura pronta e (C) armadura disposta dentro da forma juntamente com a barra.....	51
Figura 24	Torres de suporte das fibras ópticas impressas e as fibras já instaladas.....	52
Figura 25	(A) Configuração esquemática do ensaio de arrancamento e posicionamento dos sistemas de instrumentação, (B) posicionamento do bloco na máquina de ensaios UFU e (C) posicionamento do bloco na máquina de ensaios PUC-Rio.....	53
Figura 26	Curvas força-deslizamento das barras de 10,0 mm com cabeça achatada.....	56
Figura 27	Blocos cortados após o ensaio de arrancamento das barras de 10,0 mm.....	59
Figura 28	Tensão média de aderência calculada em função do deslizamento para barras de 10,0 mm com cabeça achatada em comparação com barras sem cabeça.....	61
Figura 29	Tensão média de aderência calculada em função do deslizamento para barras de 12,5 mm com cabeça achatada em comparação com barras sem cabeça.....	61
Figura 30	Barras com cabeça utilizadas em outras pesquisas. (A) Singhal, Chourasia e Parashar (2020), (B) Matsumoto <i>et al.</i> (2008), (C) Abed, Abed e Al-Rawe (2021) e (D) no presente trabalho.....	65
Figura 31	Curvas força-deformação registradas pelas FBGs nos corpos de prova com barras de 12,5 mm: (A) 121; (B) 122; (C) 123; (D) 124; (E) 125; e (F) 126.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Folha de dados de dosagem do CAA.....	13
Tabela 2	Parâmetros de cálculo.	21
Tabela 3	Parâmetros de cálculo.	22
Tabela 4	Traço em massa do concreto produzido.	38
Tabela 5	Detalhamento dos corpos de prova e resultados do ensaio de compressão axial, realizados na UFU.	40
Tabela 6	Detalhamento dos corpos de prova e resultados do ensaio de compressão axial, realizados na PUC-Rio.	41
Tabela 7	Resultados dos ensaios de tração direta nas barras de aço CA-70.....	43
Tabela 8	Detalhamento das medidas das cabeças achatadas.....	45
Tabela 9	Comparação de resultados obtidos por Marques (2025) e o presente estudo para as barras de 10,0 mm.	57
Tabela 10	Comparação de resultados obtidos por Marques (2025) e o presente estudo para as barras de 12,5 mm.	58
Tabela 11	Comparação entre o presente estudo e trabalhos da literatura.....	62
Tabela 12	Canais FBG considerados na análise.	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A_B	Área da seção transversal da barra de aço	mm^2
A_{brg}	Área líquida de apoio da cabeça da barra	mm^2
D_h	Diâmetro da cabeça da barra	mm
ϕ	Diâmetro da barra de aço	mm
E	Módulo de elasticidade	MPa ou GPa
f'_c	Resistência especificada do concreto à compressão	MPa
f_c	Resistência do concreto à compressão	MPa
f_y	Tensão de escoamento do aço	MPa
F	Força aplicada	N ou kN
l_d	Comprimento de desenvolvimento da barra	mm
L	Comprimento	mm
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
ΔT	Variação de temperatura	$^{\circ}\text{C}$
ε	Deformação específica	$\mu\varepsilon$ ou adimensional
λ	Comprimento de onda	nm
λ_B	Comprimento de onda de Bragg	nm
$\Delta\lambda_B$	Variação do comprimento de onda de Bragg	nm
Λ	Período da rede de Bragg	nm
n_{eff}	Índice de refração efetivo da fibra óptica	—
ρ_e	Coefficiente fotoelástico efetivo	—
η	Coefficiente termo-óptico	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
ψ_c	Fator relacionado à resistência do concreto	—
ψ_e	Fator relacionado ao revestimento da armadura	—
ψ_o	Fator relacionado às condições de cobrimento/confinamento	—
ψ_p	Fator relacionado ao espaçamento e à armadura de confinamento	—

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Sigla/abreviatura	Significado
ABECE	Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA-50	Aço para armadura de concreto armado com resistência característica de escoamento de 500 MPa
CA70	Aço para armadura de concreto armado com resistência característica de escoamento de 700 MPa
CAA	Concreto autoadensável
CP	Corpo de prova
CP V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
FBG	Fiber Bragg Grating (Rede de Bragg em fibra óptica)
FECIV	Faculdade de Engenharia Civil
fb	Fédération internationale du béton
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
NBR	Norma Brasileira
PLA	Ácido polilático (Polylactic Acid)
PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
SF	Slump-flow class (classe de espalhamento)
T500	Tempo necessário para o concreto atingir espalhamento de 500 mm
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UH	Barra com cabeça achatada (Upset Head bar)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	6
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	6
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL.....	7
2.2 DOSAGEM DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL: MODELO ANDREASEN & ANDERSEN MODIFICADO.....	8
2.3 ANCORAGEM DE BARRAS DE AÇO EM CONCRETO.....	14
2.4 ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO.....	14
2.5 TIPOS DE ANCORAGENS.....	17
2.5.1 ANCORAGEM RETA.....	18
2.5.2 ANCORAGEM COM DISPOSITIVOS MECÂNICOS.....	22
2.5.3 ANCORAGEM DE BARRAS NERVURADAS COM CABEÇA ACHATADA E PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM SEU COMPORTAMENTO.....	23
2.6 FISSURAÇÃO, ADERÊNCIA E FENDILHAMENTO.....	28
2.7 AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA CA-70.....	30
2.8 MONITORAMENTO DE CONCRETO POR SENSORES DE FIBRA ÓPTICA COM GRADES DE BRAGG.....	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	37
3.2 CONCRETOS E MATERIAIS CONSTITUINTES.....	37
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	38
3.4 MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	39
3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAS DE AÇO POR ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA.....	41
3.6 BARRAS COM CABEÇA ACHATADA.....	42
3.7 CONFIGURAÇÃO DAS BARRAS NOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	47
3.8 FORMAS E GEOMETRIA DOS BLOCOS.....	48
3.9 ARMADURA DE CONFINAMENTO.....	49
3.10 INSTRUMENTAÇÃO COM REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA.....	51
3.11 CONFIGURAÇÃO E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO.	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	

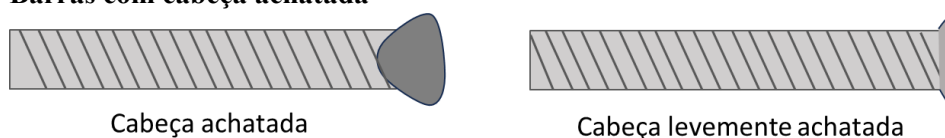
4.1	COMPORTAMENTO GLOBAL E MODO DE RUPTURA.....	55
4.2	TENSÃO MÉDIA DE ADERÊNCIA CALCULADA E EFEITO DA CABEÇA ACHATADA.....	60
4.3	DEFORMAÇÕES DO CONCRETO MEDIDAS PELAS FBGS.....	65
4.4	EVOLUÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS E MOBILIZAÇÃO DA UH.....	69
4.5	EFICIÊNCIA DA UH E CONTRIBUIÇÃO DO MONITORAMENTO ÓPTICO.....	70
4.6	DISCUSSÃO GERAL DO COMPORTAMENTO DE ANCORAGEM E DA RESPOSTA DAS FBGS.....	71
5	CONCLUSÕES.....	74
	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

O advento de aços de alta resistência, como o CA70 (tensão nominal de escoamento de 700 MPa) e a sua utilização em armaduras para elementos estruturais, levará à mobilização de maiores níveis de tensão nas armaduras, representando uma alternativa para aumentar a eficiência do concreto armado, e assim possibilitando a redução da quantidade de aço necessária em determinadas aplicações. Entretanto, o aumento da resistência da armadura também exige que os mecanismos responsáveis por sua ancoragem sejam capazes de desenvolver esses níveis mais elevados de tensão sem que ocorram falhas prematuras no concreto ou na interface aço-concreto. Dessa forma, o aproveitamento da capacidade resistente dessas barras não depende apenas de sua resistência, mas também das condições que permitem a adequada transmissão de esforços da armadura para o concreto que a envolve. Nesse contexto, a compreensão dos mecanismos de transferência de esforços entre o aço e o concreto torna-se fundamental para a avaliação do comportamento das regiões de ancoragem. Por isso, a transferência de esforços entre o aço e o concreto é fundamental ao desempenho de elementos de concreto armado, pois a ancoragem depende da interação entre a barra e o concreto circundante. No que tange barras nervuradas, as tensões são progressivamente transmitidas ao concreto ao longo do comprimento embutido, e muitos fatores influenciam a aderência e o estado de tensão criado nessa interação barra-concreto (Shao *et al.*, 2016). Recursos de ancoragens, como: Ganchos e dobras podem aumentar o congestionamento de aço, principalmente em regiões densamente armadas, dificultando a montagem da armadura e o adensamento do concreto naquele local (Kang; Ha; Choi, 2010).

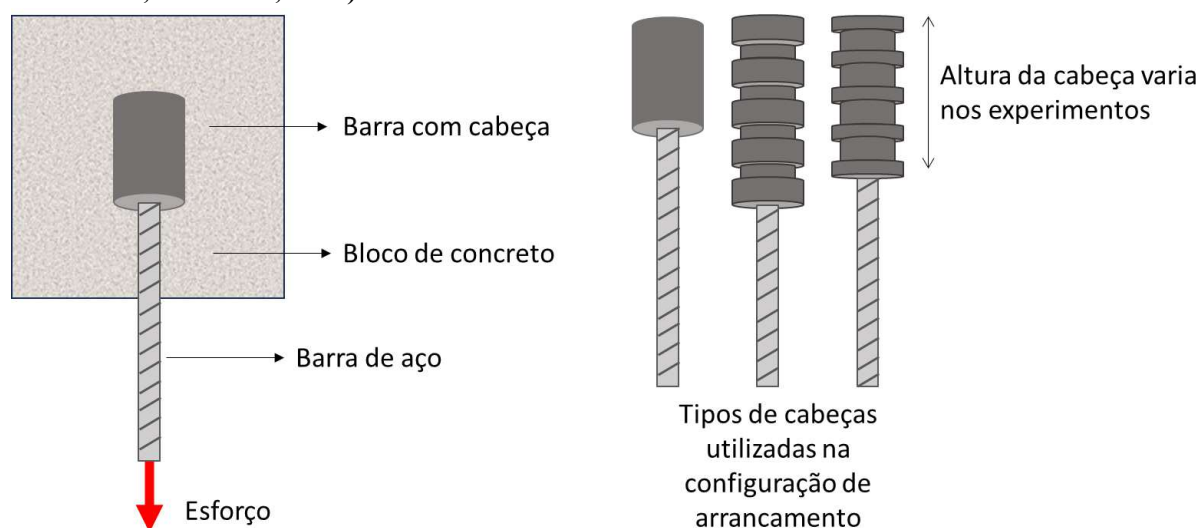
Nesse contexto, barras providas de cabeça achatada (*upset head*) ou aqui denominada UH, constituem uma alternativa aos sistemas tradicionais de ancoragem, como mostrado na **Figura 1**. A cabeça amplia a área de apoio, distribuindo o carregamento no concreto e acrescentando um mecanismo de transferência de esforços que atua conjuntamente com a aderência ao longo da armadura (Shao *et al.*, 2016; Singhal; Chourasia; Parashar, 2020).

Figura 1 - Barras com cabeça achatada



Esse sistema pode simplificar o detalhamento, reduzir o congestionamento de barras e diminuir o comprimento necessário de ancoragem das barras (Kang; Ha; Choi, 2010; Yang *et al.*, 2010). Em 144 ensaios, Singhal, *et al.* (2020) observaram aumentos médios da capacidade de aderência de aproximadamente 63%, 91% e 95% para barras com cabeças lisas, ranhuradas e nervuradas, respectivamente, em comparação com barras sem cabeça de ancoragem, verificando também influência da geometria da cabeça sobre a eficiência da ancoragem. Os pesquisadores realizaram ensaios de arrancamento em blocos de concreto, com barras nervuradas com cabeças soldadas, variando-se o comprimento de embutimento e a geometria da cabeça, utilizando blocos de $300 \times 300 \times 200$ mm, barras de 12 mm e diferentes profundidades de embutimento, conforme mostrado na **Figura 2**, de forma simplificada (para mais detalhes ver figura 1 da publicação) (Singhal; Chourasia; Parashar, 2020).

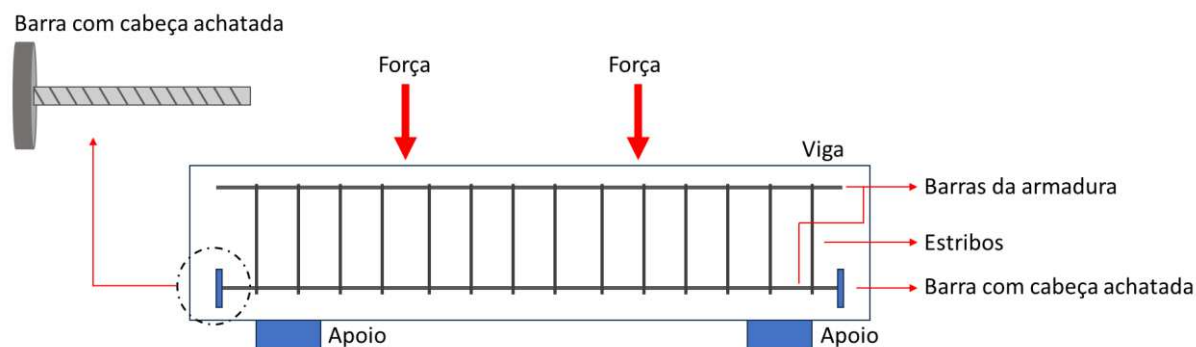
Figura 2 - Configuração simplificada dos ensaios de arrancamento realizados por (Singhal; Chourasia; Parashar, 2020)



Fonte: Autor, reprodução simplificada de (Singhal; Chourasia; Parashar, 2020).

Abed et al. (2021) avaliaram o comportamento de ancoragem de barras com cabeça por meio de ensaios em vigas de concreto armado simplesmente apoiadas, e não por ensaios convencionais de arrancamento, como mostra a **Figura 3**, no detalhamento simplificado da configuração experimental utilizada pelos autores (para mais detalhes ver figura 4 da publicação) (Abed; Abed; Al-Rawe, 2021).

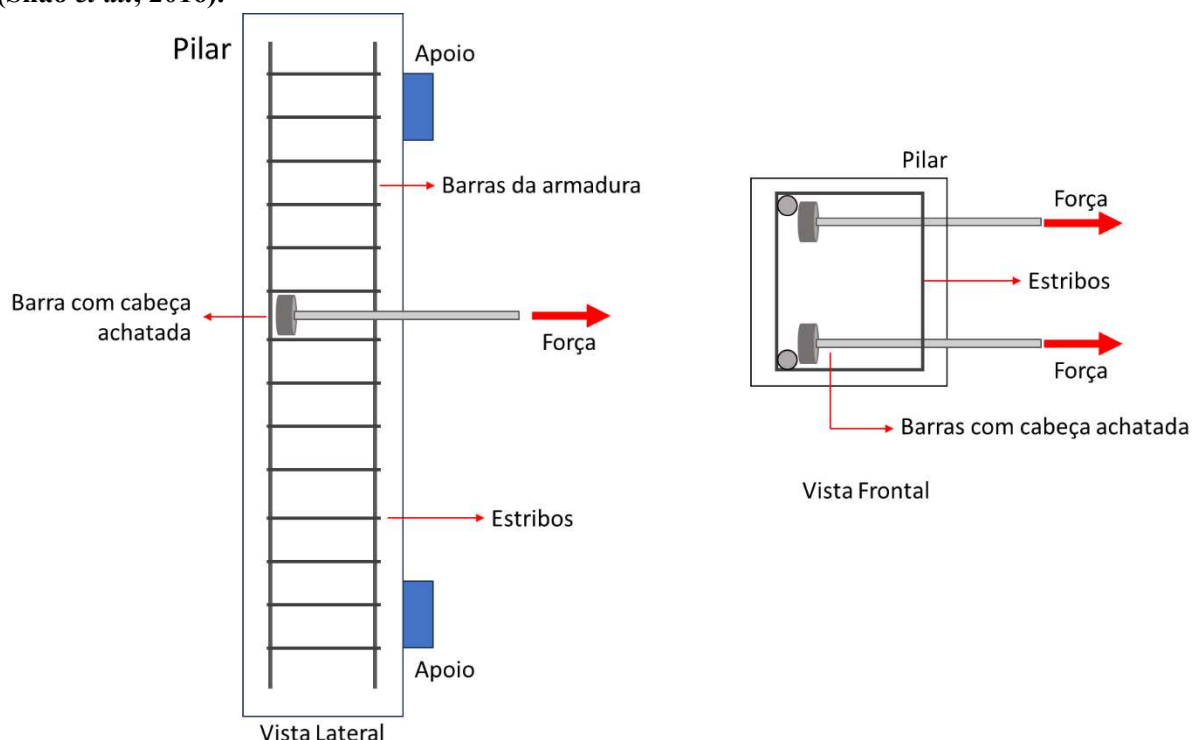
Figura 3 - Detalhamento simplificado da configuração utilizada por (Abed; Abed; Al-Rawe, 2021).



Fonte: Fonte: Autor, reprodução simplificada de (Abed; Abed; Al-Rawe, 2021).

Foram utilizadas vigas com seção transversal de 150×150 mm, comprimento total de 700 mm e vão entre apoios de 600 mm. As barras longitudinais possuíam diâmetro de 16 mm e tensão de escoamento de 413 MPa, sendo ancoradas nas extremidades por placas quadradas soldadas às barras, com dimensões variando entre 28×28 e 38×38 mm e espessura constante de 8 mm. Para avaliar a participação da aderência entre o aço e o concreto no comportamento da ancoragem, os autores criaram trechos sem aderência envolvendo partes da barra com tubos plásticos. Foram adotados comprimentos sem aderência de 0, 300 e 600 mm, correspondendo, respectivamente, à barra totalmente aderida ao concreto e a condições progressivamente maiores de isolamento entre a barra e o concreto. As vigas foram então submetidas a carregamento vertical, aplicado em um ou dois pontos, de modo que a flexão produzisse esforços de tração na armadura longitudinal e, conseqüentemente, solicitasse sua ancoragem nas extremidades. A resposta foi avaliada pela força de ruptura, modo de falha e deslocamento vertical no meio do vão. Em comparação à viga com barra sem cabeça, os autores observaram aumentos da força de ruptura de aproximadamente 48%, 51%, 87% e 98% para as diferentes dimensões de cabeça avaliadas, evidenciando que o aumento da área da cabeça pode elevar significativamente a capacidade resistente do sistema. Os resultados também mostraram que a redução da aderência ao longo da barra aumentou a participação da cabeça na transferência dos esforços para o concreto (Abed; Abed; Al-Rawe, 2021). Já, Shao *et al.* (2016), em programa experimental com 233 espécimes, constituído predominantemente por modelos de ligações viga-pilar, além de vigas com barras ancoradas próximas aos apoios, espécimes com pequenos comprimentos de embutimento e modelos de emendas de barras, com mostra simplificada na **Figura 4** (para mais detalhes ver figura 2.3 da publicação) (Shao *et al.*, 2016).

Figura 4 - Uma das configurações simplificadas dos ensaios de arrancamento conduzidos por (Shao *et al.*, 2016).



Fonte: Fonte: Autor, reprodução simplificada de (Shao *et al.*, 2016).

Foram avaliadas barras com cabeça de diferentes diâmetros e resistências, variando-se parâmetros como resistência do concreto, comprimento de embutimento, área de apoio da cabeça, espaçamento entre barras e confinamento transversal. O estudo contemplou barras de alta resistência, com tensões de escoamento de até aproximadamente 827 MPa, e concretos com diferentes resistências, permitindo avaliar a influência desses parâmetros sobre a capacidade de ancoragem e os modos de ruptura. Além disso os autores concluíram que o confinamento transversal aumenta a resistência de ancoragem em função da quantidade de armadura de confinamento (Shao *et al.*, 2016).

A redução dos comprimentos de ancoragem torna-se especialmente relevante quando associada a aços de elevada resistência, com tensão de escoamento nominal de 700 MPa, cerca de 40% superior aos 500 MPa adotados como referência para aços convencionais. De forma geral, a utilização de aços de alta resistência está associada à maior eficiência do material e à possibilidade de redução do consumo de aço, além de outros fatores importantes, tais como: redução dos impactos na produção, transporte e manuseio (Kanthasamy *et al.*, 2022).

A eficiência da ancoragem, não deve ser avaliada apenas pela carga máxima de arrancamento, uma vez que, a compreensão do mecanismo resistente requer acompanhar a evolução das deformações e tensões ao longo da barra durante o carregamento, permitindo identificar como o esforço é transferido da armadura para o concreto e qual parcela permanece na barra até a região da cabeça. Como a transferência de esforços ocorre por meio da interação entre a barra de aço e o concreto, o monitoramento dessa região é fundamental para a compreensão dos mecanismos envolvidos. Nesse contexto, a instrumentação interna do concreto, nas proximidades da barra, desempenha um papel importante na avaliação das deformações e na compreensão do comportamento da ancoragem.

Sensores de fibra óptica vêm sendo empregados no monitoramento estrutural devido às pequenas dimensões, baixo peso, resistência a ambientes agressivos, imunidade a interferências eletromagnéticas e possibilidade de instalação no interior dos elementos estruturais (Qiao *et al.*, 2023; Yassin *et al.*, 2024). Destacam-se, nesse caso, as redes de Bragg em fibra (Fiber Bragg Grating, aqui denominadas FBG, que permitem múltiplos pontos de medição em um mesmo sistema óptico e podem ser incorporadas ao concreto e às armaduras para obtenção de deformações internas (Macioski; Sanchez; de Medeiros, 2025). Embora existam aplicações no monitoramento de deformações, temperatura e corrosão (Qiao *et al.*, 2023), a associação entre fibras ópticas e ancoragens com UH pode elucidar, em partes, os fenômenos de interação aço-concreto. Enquanto estudos de ancoragem concentram-se na carga máxima, escorregamento, modos de ruptura e parâmetros geométricos, os sensores ópticos permitem acompanhar a transferência de esforços da barra para o concreto, por meio de dados de deformações no concreto, em diferentes posições do corpo de concreto.

Diante desse contexto, o presente trabalho investiga experimentalmente barras de aço nervuradas com tensão de escoamento nominal de 700 MPa, providas de UH, imersas em blocos de concreto e submetidas a ensaios de arrancamento. Sensores de fibra óptica são empregados para acompanhar as deformações em diferentes posições do bloco de concreto durante o carregamento. Busca-se avaliar a transferência de esforços da UH para o concreto, considerando a capacidade resistente global e a evolução da transferência de esforços ao longo da barra, contribuindo para a compreensão de sistemas de ancoragem mecânica associados a aços de elevada resistência e também avaliar o ganho nos níveis de resistência devido a UH quando comparadas com as barras retas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar experimentalmente o comportamento de ancoragem de barras nervuradas de aço CA70 com UH em blocos de concreto, por meio de ensaios de arrancamento, analisando a capacidade resistente do sistema e os mecanismos de transferência de esforços entre a barra e o concreto, bem como o emprego de sensores de rede de FBG no monitoramento das deformações desenvolvidas no concreto durante o carregamento.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- avaliar a capacidade de ancoragem das barras com cabeça achatada e comparar seu desempenho com resultados de barras sem cabeça achatada;
- analisar a influência da cabeça achatada na capacidade resistente do sistema de ancoragem para as barras de 10,0 e 12,5 mm;
- analisar a evolução das deformações registradas pelos sensores FBG em função do aumento do carregamento, buscando compreender a resposta interna do concreto associada à transferência de esforços e à mobilização da cabeça achatada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO AUTO ADENSÁVEL

A produção de um concreto que apresentasse, simultaneamente, elevada trabalhabilidade e coesão constituiu um grande desafio no passado. Com a evolução dos métodos construtivos e a crescente necessidade de executar elementos estruturais mais complexos e densamente armados, surgiu a demanda por um concreto capaz de preencher todos os espaços das formas, mantendo elevada coesão e dispensando o uso de vibração. Nesse contexto, a fluidez do concreto tornou-se uma propriedade fundamental. Entretanto, essa característica não pode ser obtida simplesmente pelo aumento da quantidade de água, pois essa prática pode reduzir a resistência mecânica e favorecer a exsudação e a segregação dos componentes (Mehta; Monteiro, 2008). Com o desenvolvimento dos aditivos superplastificantes e o avanço das pesquisas na área de tecnologia do concreto, tornou-se possível produzir misturas com baixa relação água/cimento (a/c inferior a 0,40) e, simultaneamente, elevada trabalhabilidade e coesão, contribuindo para o desenvolvimento do concreto autoadensável (CAA) (Mehta; Monteiro, 2014).

Para que um concreto seja classificado como autoadensável, deve apresentar simultaneamente três propriedades fundamentais: fluidez, habilidade passante e resistência à segregação. A fluidez corresponde à capacidade do concreto de escoar e preencher as formas apenas sob a ação da gravidade, sem a necessidade de adensamento mecânico. A habilidade passante está relacionada à capacidade de escoar entre as armaduras e outros obstáculos sem obstrução do fluxo. Por sua vez, a resistência à segregação corresponde à capacidade de manter a homogeneidade da mistura durante o escoamento (Neville, 2016; Tutikian; Molin, 2008).

O emprego do CAA apresenta diversas vantagens, entre as quais se destacam a maior rapidez na execução da concretagem, a possibilidade de melhoria da durabilidade dos elementos estruturais e a capacidade de preencher formas com geometrias (Mehta; Monteiro, 2008; Tutikian; Helene, 2011). Entretanto, uma limitação de sua aplicação está relacionada à necessidade de contenção adequada da mistura, especialmente em formas com aberturas não horizontais, devido à elevada fluidez do material e ao risco de transbordamento (Neville, 2016).

2.2 DOSAGEM DO CONCRETO AUTO ADENSÁVEL MODELO ANDREASEN & ANDERSEN MODIFICADO

A dosagem de um concreto autoadensável (CAA) consiste na determinação das proporções dos materiais necessários para produzir uma mistura que concilie fluidez, estabilidade e resistência mecânica. Conforme descrito anteriormente, o CAA dispensa o adensamento mecânico, exigindo proporções adequadas de materiais finos, aditivos e agregados para garantir coesão, resistência à segregação e escoamento apenas sob a ação da gravidade. Nesse contexto, o empacotamento de partículas constitui um método eficiente, pois permite otimizar a distribuição granulométrica dos constituintes, reduzindo o volume de vazios da mistura e contribuindo para a obtenção de um concreto com elevada fluidez.

Nesse sentido, o modelo proposto por Andreasen e Andersen (1930) é amplamente utilizado como referência para a formulação de misturas, incluindo concretos de alto desempenho e autoadensáveis. Esse modelo idealizado considera partículas de diâmetros infinitamente pequenos, condição impossível de ser alcançada na prática. Por essa razão, Funk e Dinger desenvolveram um modelo modificado, que considera um diâmetro mínimo de partícula e estabelece uma função matemática para descrever a distribuição granulométrica ideal dos materiais, conforme apresentado na **Equação 1** (Dos Santos *et al.*, 2021; Funk; Dinger, 1994).

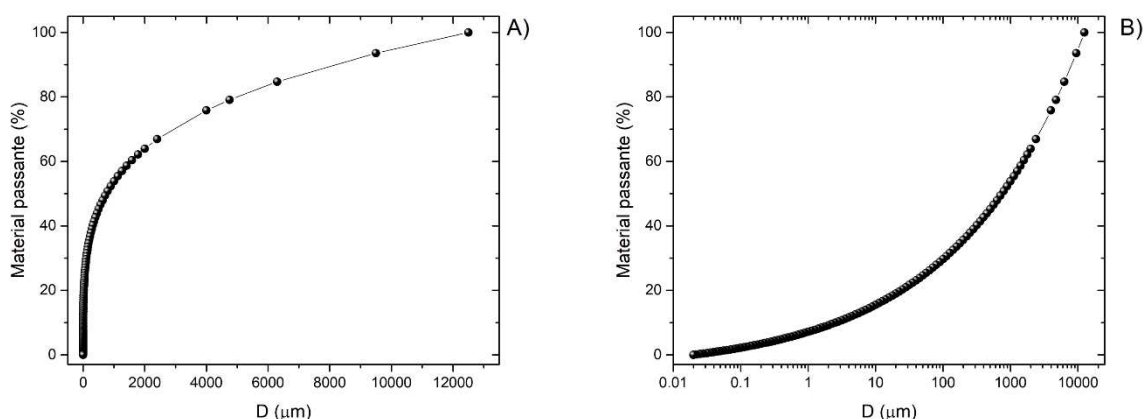
$$P_{(D)ideal} = 100 \frac{(D^q - D_{min}^q)}{(D_{max}^q - D_{min}^q)} \quad \text{Eq. 1}$$

Nessa equação, $P_{(D)ideal}$ representa a porcentagem acumulada de partículas com diâmetro menor ou igual a D ; D_{min} e D_{max} correspondem, respectivamente, aos diâmetros mínimo e máximo das partículas que compõem a mistura (cimento, sílica ativa, areia fina, areia média e brita zero); e q é o expoente de distribuição, parâmetro que controla a proporção relativa entre partículas finas e grossas.

A aplicação prática do modelo consiste em ajustar a curva granulométrica real da mistura de materiais à curva teórica definida pela

Equação 1 (Martos, 2023). Por exemplos, a **Figura 5** apresenta a distribuição granulométrica ideal, $P_{(D)ideal}$, em função do diâmetro das partículas, considerando um diâmetro mínimo de $0,02 \mu\text{m}$ e um diâmetro máximo de $12,5 \text{ mm}$.

Figura 5 - Gráfico P_{ideal} em função dos diâmetros de uma distribuição de partículas com diâmetros de mínimo de $0,02 \mu\text{m}$ a diâmetro máximo de $12,5 \text{ mm}$. Em A) com escala normal e em B) com escala logarítmica



Fonte: Autor

Além de contribuir para o desempenho reológico do concreto, o método de empacotamento de partículas também pode apresentar vantagens econômicas e ambientais, uma vez que a otimização granulométrica permite reduzir o teor de cimento da mistura, contribuindo para a diminuição dos custos e das emissões de CO_2 associadas à produção do clínquer. Além disso, o modelo admite a incorporação de materiais como sílica ativa, cinzas volantes e filer calcário, favorecendo o aproveitamento de adições minerais e a sustentabilidade na construção civil.

Entretanto, a dosagem do CAA pelo modelo de Andreasen & Andersen modificado exige controle experimental rigoroso e ajustes práticos, uma vez que é necessário conhecer com precisão a distribuição granulométrica dos materiais utilizados.

Para ajustar a curva granulométrica dos materiais disponíveis à curva ideal (P_{ideal}), utiliza-se o método dos mínimos quadrados. Esse procedimento consiste em minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores obtidos para a mistura e aqueles previstos pelo modelo teórico, buscando a melhor aproximação possível entre as duas curvas.

A curva granulométrica da mistura de materiais, $P_{mistura}$, é definida pela **Equação 2**.

$$P_{mistura} = PCM.VCM + PSA.VSA + PAF.VAF + PAM.VAM + PBZ.VBZ \quad \text{Eq. 2}$$

Nessa equação, os termos P associados a cada material representam suas contribuições granulométricas, enquanto VCM, VSA, VAF, VAM e VBZ representam, respectivamente, os volumes de cimento, sílica ativa, areia fina, areia média e brita zero utilizados na produção do CAA.

Assim, o ajuste da curva é realizado por meio da alteração das frações volumétricas dos materiais, de modo que a distribuição granulométrica da mistura se aproxime o máximo possível da distribuição teórica ideal, ou seja, $P_{mistura} \rightarrow P_{ideal}$.

Para essa finalidade, foi desenvolvida uma rotina de cálculo no Microsoft Excel, utilizando o recurso Solver. Essa ferramenta permitiu inserir os dados granulométricos dos materiais, estabelecer restrições e definir os parâmetros necessários para determinar a dosagem final do CAA.

As frações volumétricas dos materiais são determinadas pelas **Equações 3 a 7**:

$$PCM = \frac{VCM}{V_{secos}} \quad \text{Eq. 3}$$

$$PSA = \frac{VSA}{V_{secos}} \quad \text{Eq. 4}$$

$$PAF = \frac{VAF}{V_{secos}} \quad \text{Eq. 5}$$

$$PAM = \frac{VAM}{V_{secos}} \quad \text{Eq. 6}$$

$$PBZ = \frac{VBZ}{V_{secos}} \quad \text{Eq. 7}$$

Nessas equações, V_{secos} representa o volume total dos materiais secos que compõem a mistura. A partir da determinação das frações volumétricas, é possível calcular as quantidades necessárias de cada material. Para isso, utiliza-se a **Equação 8**.

$$TAAGL = \frac{d_A V_A + 0,56 d_{sp} V_{sp}}{d_{CM} V_{CM} + d_{SA} V_{SA}} \quad \text{Eq. 8}$$

TAAGL é o teor água aglomerante, d_A e V_A é a densidade e volume da água, d_{sp} e V_{sp} é a densidade e volume do super plastificante, d_{CM} é a densidade do cimento e d_{SA} é a densidade da sílica ativa. O teor de água finos (TAF) é dado pela **Equação 9**.

$$TAF = \frac{V_A + 0,56 V_{SP}}{V_{CM} + V_{SA}} \quad \text{Eq. 9}$$

Volume de secos é dado conforme a **Equação 10**:

$$V_{secos} = V_{CM} + V_{SA} + V_{AF} + V_{AM} + V_{BZ} \quad \text{Eq. 10}$$

Fração areia argamassa (PAAG) é dado pela **Equação 11**.

$$PAAG = \frac{V_{AF} + V_{AM}}{V_{ARG}} \quad \text{Eq. 11}$$

Sendo o volume de argamassa dado por: $V_{ARG} = V_{CM} + V_{SA} + V_{AF} + V_{AM} + V_A + V_{AR}$.

Já o teor água finos (PAF) é dado pela **Equação 12**.

$$PAF = \frac{V_A + 0,56 V_{sp}}{V_{CM} + V_{SA}} \quad \text{Eq. 12}$$

E por fim o volume do concreto V_T é dado pela **Equação 13**.

$$V_T = V_{AR} + V_A + V_{sp} + V_{secos} \quad \text{Eq. 13}$$

A determinação dos volumes de cada componente do CAA será dada pela manipulação algébrica das equações acima apresentadas, com todo desenvolvimento matemático conforme referência (Bertoldo Menezes *et al.*, 2026) é possível obter os termos A, B, C e D, conforme **Equações 14-17**.

$$A = V_{secos} \left(\frac{TAAGL \cdot d_{CM} \cdot PCM}{d_A} + \frac{TAAGL \cdot d_{SA} \cdot PSA}{d_A} \right) \quad \text{Eq. 14}$$

$$B = \frac{0,56 d_{SP} \cdot V_{SP}}{d_A} \quad \text{Eq. 15}$$

$$C = 1 - V_{AR} \quad \text{Eq. 16}$$

$$D = V_{sp} \quad \text{Eq. 17}$$

Permitindo determinar o volume de secos, conforme equação a **Equação 18**.

$$V_{secos} = \frac{C - D + B}{A - 1} \quad \text{Eq. 18}$$

E o volume de água na **Equação 19**.

$$V_A = C - D - \left(\frac{C - D + B}{A + 1} \right) \quad \text{Eq. 19}$$

Com o ajuste de curva, o respectivo cálculo das frações volumétrica e a entrada dos dados conhecidos, é possível calcular o volume de água e o volume de secos e com base nesses dois resultados os demais volumes dos componentes do concreto.

Vale ressaltar que todos esses cálculos são realizados com a entrada das densidades, parâmetros de cálculos (restrições e valores assumidos) e os dados de granulometria dos materiais cimento, sílica ativa, areia fina, areia média e brita zero.

Assim, obtém-se uma folha de dados relacionados a dosagem do CAA, conforme mostra a **Tabela 1**.

Tabela 1 - Folha de dados de dosagem do CAA

Relatório do traço		
Frações Volumétrica		(%)
Cimento	0,200	20,00
Sílica Ativa	0,020	2,00
Areia Fina	0,050	5,00
Areia Média	0,330	33,00
Brita Zero	0,400	40,00
Somatório	1,000	100,00
Volumes do Traço para 1 m³		Unidades
Volume de Secos	0,804	m³
Água	0,154	m³
Cimento	0,161	m³
Sílica Ativa	0,016	m³
Areia Fina	0,040	m³
Areia Média	0,265	m³
Brita Zero	0,321	m³
Super Plastificante	0,002	m³
Ar	0,040	m³
Volume total	1,000	m³
Massas do Traço para 1 m³		Unidades
Água	153,85	kg/m³
Cimento	482,20	kg/m³
Sílica Ativa	35,68	kg/m³
Areia Fina	93,63	kg/m³
Areia Média	596,72	kg/m³
Brita Zero	903,32	kg/m³
Super Plastificante	2,89	kg/m³
A/C	0,32	kg/kg
Detalhes do Traço		
Volume de Argamassa (VARG)	0,676	m³
Teor Água/Finos (PAF)	0,878	
Fração Areia/Argamassa (PAAG)	0,452	
Fração de Graúdos	0,400	

Fonte: Autor

2.3 ANCORAGEM DE BARRAS DE AÇO EM CONCRETO

Um dos elementos mais fundamentais no comportamento de estruturas de concreto armado é a ancoragem das barras de aço no concreto, para que ocorra uma transferência eficiente de esforços entre o concreto e as barras. Essa transferência de esforços, ocorre por meio de mecanismos de aderência, os quais transmitem tensões desenvolvidas no aço para o concreto, assegurando o adequado desempenho dos elementos. A ancoragem baseia-se na ação conjunta de três mecanismos principais: I - Aderência química ou por adesão; II - Aderência por atrito, e III - Aderência mecânica (Castro, 2002; Fusco, 2013; Leonhardt; Monnig, 1977).

Juntos, esses mecanismos produzem a tensão de aderência, a qual deve ser capaz de não permitir o escorregamento da barra, quando submetida a tensões solicitantes de trabalho, ou seja, a tensão de aderência deve ser suficiente para suportar as tensões na barra até o limite de escoamento. Essa capacidade é atingida controlando o comprimento da barra dentro da massa de concreto, denominado comprimento de ancoragem. O qual é calculado conforme critérios normativos que levam em conta o diâmetro da barra, o tipo de aço, a resistência do concreto, o cobrimento e a presença de emendas, dispositivos específicos soldados ou parafusados nas barras ou mesmo de alterações geométricas nas barras ancoradas (Castro, 2002; Fusco, 2013; Leonhardt; Monnig, 1977).

2.4 ADERÊNCIA AÇO-CONCRETO

O advento do concreto armado é sem dúvidas um dos materiais de construção que mais revolucionou a engenharia civil nos últimos cem anos e hoje é um material dominante na construção civil em todo o mundo (WIGHT; MACGREGOR, 2011). Estes dois materiais, completamente distintos, apresentam uma afinidade incrível, o concreto, um material compósito que apresenta alta resistência à compressão e durabilidade (Mehta; Monteiro, 2008), e o aço, um material metálico que oferece excelente resistência à tração e flexibilidade.

A união desses materiais é sinérgica para superar as limitações intrínsecas do concreto, uma vez que, o concreto sozinho é frágil, quando sujeito a forças de tração, muito comuns em elementos estruturais, fissurando e falhando prematuramente. A introdução de barras de aço

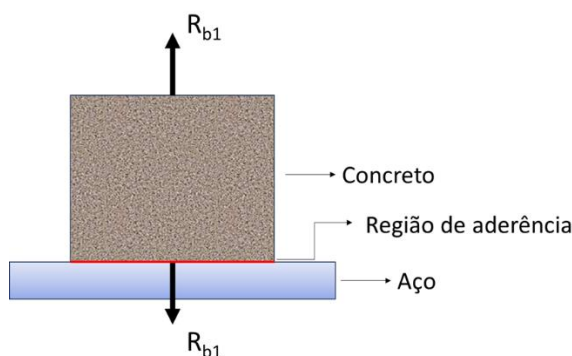
(armadura) em regiões onde essas tensões de tração são críticas permite que o aço absorva esses esforços, protegendo a estrutura da ruptura.

Entretanto, a eficácia do concreto armado é garantida por dois fatores: a aderência entre o concreto e o aço, que assegura que ambos trabalhem como um corpo único sob carregamento (Zulini, 2019), e a semelhança em seus coeficientes de dilatação térmica, o que minimiza as tensões internas induzidas por variações de temperatura (WIGHT; MACGREGOR, 2011).

Portanto, a aderência entre o aço e o concreto é um dos principais fatores que garantem o bom desempenho estrutural dos elementos de concreto armado, assegurando a transferência de tensões entre os dois materiais. A normativa fib Model Code define a aderência como o mecanismo de interação e transferência de forças entre a armadura e o concreto, responsável tanto pelo comportamento em serviço quanto pela resistência das regiões de ancoragem no estado-limite último (fib, 2023) e como mencionado anteriormente, o mecanismo de aderência pode ser dividido, e segundo a literatura, a aderência pode ser classificada em três principais mecanismos, aderência química, aderência por atrito e aderência mecânica.

1. Aderência por adesão: Ocorre devido à ligação físico-química entre o concreto e a superfície do aço, como mostrado na **Figura 6**. Esse mecanismo, entretanto, é limitado, pois a interface tende a ser fragilizada por microfissuras durante a retração do concreto e pela ação de cargas externas. Assim, sua contribuição para o comportamento total a aderência é considerada pequena quando comparada aos outros mecanismos (Castro, 2002; Leonhardt; Monnig, 1977).

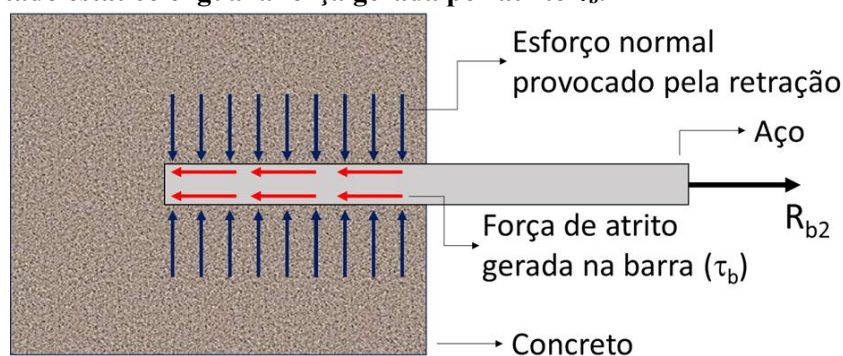
Figura 6 - Aderência entre uma placa de aço e um bloco de concreto. O esforço R_{b1} é a ligação por aderência entre o concreto e a placa de aço



Fonte: Autor

2. Aderência por atrito: Resulta do atrito gerado entre o aço e o concreto, sobretudo após a retração e a contração do concreto, que promovem uma pressão radial na barra, sendo justamente essa força, perpendicular a seção lateral da barra, responsável por produzir o atrito ao longo de todo da barra imerso no concreto, conforme mostrado na **Figura 7**. Esse mecanismo tem maior relevância em barras lisas, onde a ausência de deformações superficiais faz com que o atrito seja o principal responsável pela transferência de tensões (Fusco, 2013; Leonhardt; Monnig, 1977).

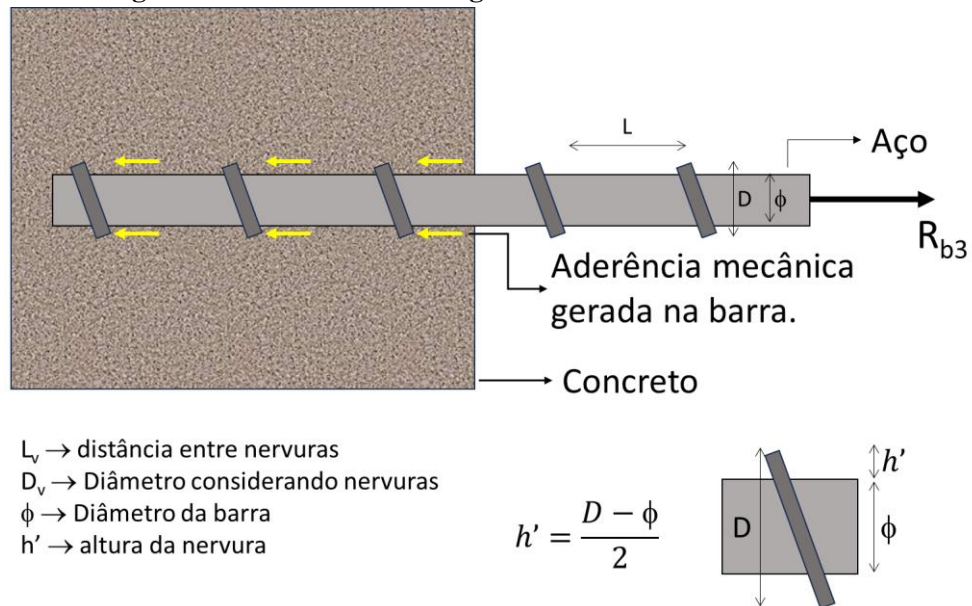
Figura 7 - Aderência por atrito entre uma barra de aço lisa e um bloco de concreto. O esforço R_{b2} em um estado estático é igual a força gerada por atrito τ_b .



Fonte: Autor

3. Aderência mecânica: É o mecanismo de aderência predominante em barras de aço com nervuras, pois as nervuras da barra criam um efeito de engrenamento mecânico com a matriz de concreto, como mostrado na **Figura 8**. Esse mecanismo possibilita maior capacidade de transferência de tensões e, assim, maior resistência de aderência. Por essa razão, as normas modernas de projeto, como a NBR 6118 (ABNT, 2023) prescrevem o uso de barras nervuradas como padrão em estruturas de concreto armado (Fusco, 2013). Além disso, a força de aderência mecânica dependerá da forma e inclinação das nervuras, do diâmetro da barra (ϕ), altura das nervuras (h') e espaçamento entre elas (L_v) (Castro, 2002; Leonhardt; Monnig, 1977).

Figura 8 - Aderência mecânica entre a barra nervurada o bloco de concreto. O esforço R_{b3} em um estado estático é igual a aderência mecânica gerada na barra.



Fonte: Autor

Barras lisas também apresentam aderência mecânica, pois as pequenas rugosidades criadas durante o processo de fabricação funcionam, em menores dimensões, como nervuras.

Portanto, a aderência entre o concreto e o aço é um fenômeno com muitas características, onde cada tipo de aderência, contribui de forma distinta, sendo a aderência mecânica a mais significativa para a segurança e o desempenho das estruturas, seguida pela aderência por atrito e por último e com intensidade bem menor que as demais, a aderência por adesão. Entretanto, não é possível, experimentalmente, medir cada forma de aderência separadamente, ou seja, em um ensaio de arrancamento são determinados os valores médios globais de aderência (Fusco, 2013).

2.5 TIPOS DE ANCORAGENS

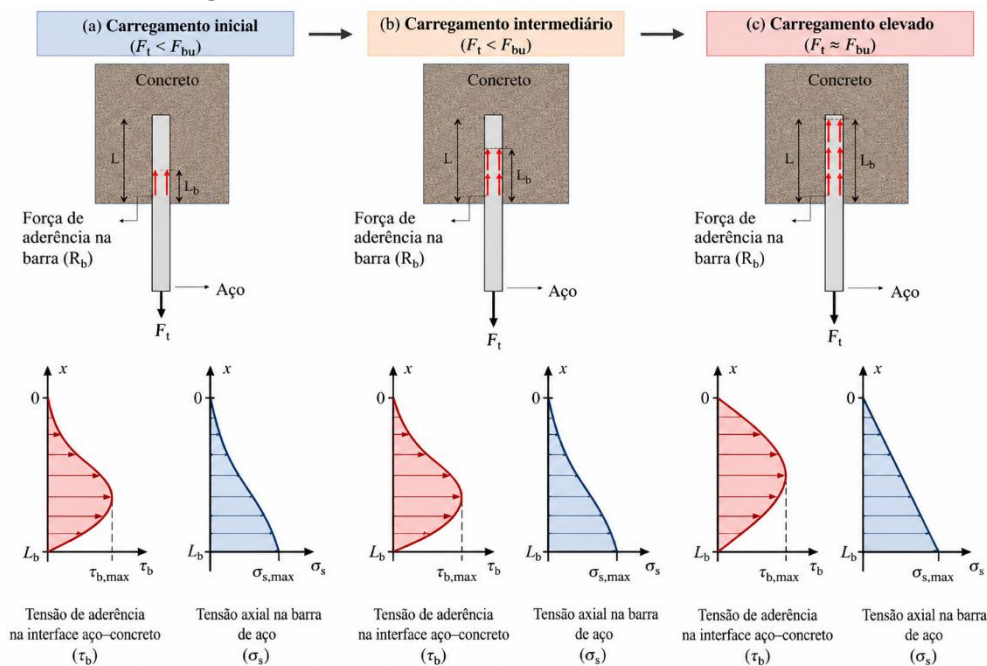
Na literatura e as normas técnicas as ancoragens são classificadas em diferentes tipos e recursos utilizados, dependendo de fatores como: cargas de trabalho dos elementos estruturais, limitações geométricas dos elementos e condições de confinamento, por exemplos. Quando as dimensões do elemento estrutural, são reduzidas, ou quando as tensões de aderência previstas são superiores à capacidade de aderência, é necessário adotar dispositivos mecânicos complementares, como ganchos, UH ou placas de ancoragem soldadas ou parafusadas.

2.5.1 ANCORAGEM RETA

É o tipo de ancoragem mais comum, no qual o esforço é transferido ao concreto ao longo de um trecho retilíneo da barra. O comprimento necessário, denominado comprimento de ancoragem ou de desenvolvimento (L_b) depende das propriedades dos materiais e das condições de ancoragem. Esse tipo de ancoragem é predominante em barras de aço nervuradas, cujas nervuras permitem significativa aderência mecânica.

Quando uma força de tração (F_t) é aplicada em uma barra de aço, imersa ou parcialmente imersa em concreto, será gerada nessa na barra uma força de aderência (R_b) em sentido oposto à força de tração. Entretanto, R_b terá intensidade apenas o suficiente para se opor à F_t , e assim, irá mobilizar apenas parte do comprimento imerso da barra (L), ficando o comprimento de aderência (L_b) limitado à intensidade de F_t . À medida que a intensidade de F_t aumenta progressivamente, a força R_b também aumentará, mobilizando cada vez mais o comprimento de aderência L_b da barra, conforme mostra a **Figura 9**. A força de aderência gerada na superfície de contato entre a o aço e o concreto, produz uma tensão de aderência, $\tau_b = R_b/A_b$, onde o termo $A_b = \pi\phi L_b$ é a área de aderência mobilizada, logo $R_b = \tau_b \pi\phi L_b$ (Fusco, 2013).

Figura 9 - Representação esquemática da mobilização progressiva da aderência e da distribuição das tensões de aderência na interface aço–concreto e das tensões axiais na barra de aço em diferentes níveis de carregamento.

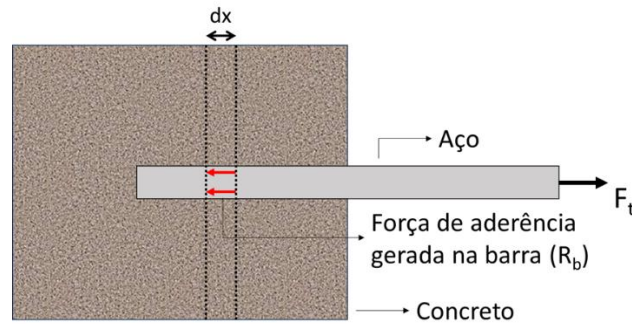


Fonte: Elaborada pelo autor com auxílio de ferramenta de inteligência artificial (Gemini, 2026).

Considerando um elemento infinitesimal dx , da barra imersa no concreto, conforme mostrado na **Figura 10**, e o equilíbrio de forças entre um incremento de força de tração dF_t aplicado na barra de aço e um incremento de força de aderência, entre a barra e o concreto, a **Equação 20**, fica:

$$dF_t = \tau_{b(x)} \pi \phi dx \quad \text{Eq. 20}$$

Figura 10 - Relação entre forças aplicadas na barra e a respectiva força de aderência gerada entre o concreto e a barra de aço



Fonte: Autor

Na **Equação 20**, um dos termos representa a variação da força de tração ao longo da barra de aço, enquanto o outro corresponde à força de aderência mobilizada na interface aço-concreto. Dessa forma, considerando o equilíbrio de forças em um elemento infinitesimal da barra, obtém-se a seguinte relação:

Portanto, pode-se escrever que:

$$\frac{dF_t}{dx} = \pi \phi \tau_{b(x)} \quad \text{Eq. 21}$$

O incremento de força de tração na barra, produzirá nesta, uma tensão normal em função de x , $\sigma_{s(x)} = F_t/A_s$, assim a força de tração na barra é $F_t = \sigma_{s(x)}A_s$. Sendo $A_s = \pi \phi^2/4$, será dada pela **Equação 22**.

$$F_t = \frac{\pi\phi^2}{4} \sigma_s(x) \quad \text{Eq. 22}$$

Derivando ambos os lados da **Equação 22** com respeito a x , tem como resultado a **Equação 23**.

$$\frac{dF_t}{dx} = \frac{\pi\phi^2}{4} \frac{d\sigma_s}{dx} \quad \text{Eq. 23}$$

Igualando a **Equação 21** e **23**, tem-se como resultado a **Equação 24**.

$$\frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{4}{\phi} \tau_{b(x)} \quad \text{Eq. 24}$$

A **Equação 24** mostra a relação entre a tensão de aderência e a tensão de tração aplicada na barra de aço.

Considerando a tensão de aderência $\tau_{b(x)}$ uniforme ao longo da interface concreto-aço e ao mesmo tempo constante, $\tau_{b(x)} = \tau_b$, da integração da **Equação 24**, tem-se a **Equação 25**.

$$\sigma_s = \frac{4}{\phi} \tau_b x \quad \text{Eq. 25}$$

A **Equação 25** é uma reta com inclinação dada por: $4\tau_b/\phi$, iniciando na origem e com máximo de tensão em $x = L_b$, situação na qual todo o comprimento de ancoragem é mobilizado.

Portanto, o equilíbrio diferencial é uma representação matemática do princípio de que a taxa de variação da força de tração em uma barra de aço é equilibrada pela força de aderência entre a barra e o concreto. Sendo essa relação, a base para o dimensionamento do comprimento de ancoragem que garantam a transferência de carga segura e eficiente (Cairns, 2015; Fusco, 2013). Nesse caso, é possível determinar o comprimento de ancoragem necessário para combater a força de tração aplicada na barra de aço, tomando $x = L_b$, na **Equação 25**, terá como resultado a **Equação 26**.

$$L_b = \frac{\phi \sigma_s}{4 \tau_b} \quad \text{Eq. 26}$$

Segundo a normativa NBR 6118, a resistência de aderência de cálculo na interfase concreto-aço pode ser calculada pela **Equação 27** (ABNT, 2023).

$$\tau_b = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad \text{Eq. 27}$$

Onde: f_{ctd} é a resistência de cálculo do concreto à tração direta, η_1 parâmetro relacionado a rugosidade da barra, η_2 parâmetros que considera a posição da barra na peça de concreto, η_3 relacionado ao diâmetro da barra, conforme mostra na **Tabela 2**. A Fib Model Code adiciona o termo η_4 à **Equação 27**, considerando a tensão transversal sobre a barra (Cairns, 2015; fib, 2023).

Tabela 2 - Parâmetros de cálculos

Parâmetro	Valores	Condições	
η_1	1,0	Para aços CA-25 e CA-60	
	2,25	Para aço CA-50	
η_2	1,0	Boa aderência	Com inclinação maior que 45° sobre a horizontal. Horizontais ou com inclinação menor que 45° sobre a horizontal desde que: Para elementos estruturais com $h < 60$ cm, localizados no máximo 30 cm acima da parte inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima; Para elementos estruturais com $h \geq 60$ cm localizados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de ancoragem mais próximas.
	0,7	Má aderência	Demais casos
η_3	1,0	Para $\phi < 32$ mm	
	$\frac{1,31 - \phi}{100}$	Para $\phi \geq 32$ mm	

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023)

O f_{ctd} é calculado pelas **equações 28 e 29**:

$$f_{ctd} = \frac{0,7 \cdot 0,3}{\gamma_c} \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad \text{Para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad \text{Eq. 28}$$

$$f_{ctd} = \frac{0,7 \cdot 2,12}{\gamma_c} \ln [1 + 0,1(f_{ck} + 8)] \quad \text{Para } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad \text{Eq. 29}$$

Sendo γ_c o coeficiente de minoração da resistência do concreto, f_{ck} é a resistência característica do concreto.

Segundo NBR 6118, o comprimento de ancoragem L_b em função da tensão de escoamento do aço e da resistência de aderência, onde $f_{bd} = \tau_b$, é dado pela **Equação 30** (ABNT, 2023).

$$L_b = \frac{\phi f_{yd}}{4 f_{bd}} \geq 25 \phi \quad \text{Eq. 30}$$

Na **Equação 30**, L_b fica condicionado a vinte e cinco vezes maior que o diâmetro da barra. Já o comprimento de ancoragem necessário é dado pela **Equação 31**.

$$L_{b,nec} = \alpha \cdot L_b \cdot \frac{A_{s,cal}}{A_{s,efe}} \geq L_{b,min} \quad \text{Eq. 31}$$

Com os parâmetros α , L_b e $L_{b,min}$, seguindo as restrições dadas na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Parâmetros de cálculos

Parâmetro	Valor	Restrição
α	1	Barras sem gancho
	0,7	Barras tracionadas com gancho, com cobrimento no plano normal ao gancho $\geq 3\phi$
	0,7	Quando houver barra transversal soldada (item 9.4.2.2 NBR 6118
	0,5	Quando houver barra transversal soldada (item 9.4.2.2 NBR 6118 e gancho com cobrimento no plano normal ao gancho $\geq 3\phi$
L_b	é calculado conforme eq. 31	
$L_{b,min}$	É o maior valor entre $0,3l_b$, 10ϕ e 100 mm	

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2023)

2.5.2 ANCORAGEM COM DISPOSITIVOS MECÂNICOS

São considerados dispositivos mecânicos instalados na extremidade das barras, como cabeças roscadas, porcas e ancoragens mecânicas pré-fabricadas. Esses dispositivos introduzem um mecanismo adicional de transferência de esforços por meio da pressão de apoio exercida sobre o concreto. No caso de barras nervuradas com cabeça, essa transferência por apoio atua conjuntamente com os mecanismos de aderência desenvolvidos ao longo do comprimento embutido da barra. Segundo a ACI 318, a área da cabeça de ancoragem deve atender aos requisitos mínimos estabelecidos em função da área transversal da barra (ACI, 2025; Leonhardt; Monnig, 1977). As ancoragens com dispositivos mecânicos são particularmente úteis em regiões com limitação de espaço ou elevada densidade de armaduras, podendo reduzir o comprimento necessário para o desenvolvimento da barra e, conseqüentemente, o congestionamento das armaduras (El Debs, 2017).

2.5.3 ANCORAGEM DE BARRAS NERVURADAS COM CABEÇA ACHATADA E PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM SEU COMPORTAMENTO

A ancoragem das barras de aço é um aspecto fundamental do comportamento das estruturas de concreto armado, uma vez que a transferência de esforços entre a armadura e o concreto deve ser suficiente para permitir o desenvolvimento das tensões previstas solicitantes em projeto. Nas barras nervuradas convencionais, essa transferência ocorre predominantemente ao longo da superfície da barra, por mecanismos de adesão, atrito e interação mecânica entre as nervuras e o concreto, como já discutido anteriormente. Quando uma cabeça é incorporada à extremidade da barra, acrescenta-se a esses mecanismos a transferência de esforços por meio da pressão exercida pela face da cabeça sobre o concreto.

As barras nervuradas com cabeça constituem, portanto, uma alternativa à ancoragem por comprimento reto, ganchos ou dobras. Nesse sistema, parte da força de tração é transferida ao concreto ao longo do comprimento aderente da barra, enquanto a parcela remanescente pode ser transmitida pelo apoio da cabeça. A eficiência do sistema depende da interação entre diversos parâmetros, destacando-se a resistência do concreto e da armadura, o comprimento aderente, as dimensões e a geometria da cabeça, sua área líquida de apoio, o cobrimento, o espaçamento entre barras e o confinamento do concreto (fib, 2023; Shao *et al.*, 2016; Singhal; Chourasia; Parashar, 2020).

Shao *et al.* (2016) a partir de um programa experimental envolvendo 233 corpos de prova, concluíram que a capacidade de ancoragem de barras com cabeça é influenciada principalmente pela resistência à compressão do concreto, pelo comprimento de ancoragem, pelo diâmetro e espaçamento das barras e pela presença de armaduras de confinamento. Os autores verificaram que o aumento do confinamento melhora a resistência da ancoragem, enquanto espaçamentos entre barras inferiores a oito vezes seu diâmetro tendem a reduzir essa capacidade. Também observaram que cabeças com maiores áreas de apoio proporcionam maior resistência, embora esse aumento não seja diretamente proporcional à área. Além disso, identificaram limitações nas prescrições da ACI 318-14 e propuseram alterações nas equações de dimensionamento, considerando o emprego de aços de alta resistência e concretos com resistência à compressão de até aproximadamente 110 MPa (Shao *et al.*, 2016). A NBR 6118 também relaciona a resistência de aderência de cálculo à resistência à tração do concreto, juntamente com fatores associados às características superficiais da barra e às condições de aderência (ABNT, 2023).

Essa questão assume particular importância quando são utilizadas barras de aço de alta resistência. O aumento da tensão que pode ser desenvolvida pela armadura implica maior força a ser transferida ao concreto antes que a capacidade resistente da barra seja integralmente mobilizada. Consequentemente, uma ancoragem inadequada pode conduzir à ruptura do concreto ou ao deslizamento da barra antes que seja atingida a tensão de escoamento do aço. Dessa forma, o emprego de aços de maior resistência exige atenção não apenas às propriedades mecânicas da própria barra, mas também às características da região responsável pela transferência dos esforços.

Nas barras com cabeça, a geometria e a área de apoio constituem parâmetros adicionais de grande relevância. A cabeça recebe a parcela da força que não foi transferida pela aderência ao longo do comprimento ancorado e a transmite ao concreto por tensões de contato. Singhal *et al.* (2020) observaram que as dimensões e o perfil da cabeça influenciam significativamente a capacidade resistente da ancoragem e que o aumento de suas dimensões pode produzir ganhos de resistência até determinado limite, a partir do qual ocorre tendência de estabilização (Singhal; Chourasia; Parashar, 2020).

A norma ACI 318 estabelece requisitos específicos para que a contribuição da cabeça possa ser considerada pelas suas disposições normativas. De acordo com o item 20.2.1.6, as barras nervuradas com cabeça devem atender à ASTM A970/A970M, incluindo os requisitos dimensionais aplicáveis às cabeças Classe HA. A exigência está relacionada, entre outros aspectos, à necessidade de garantir uma superfície de apoio adequada, uma vez que

irregularidades na região da cabeça e interferências das nervuras próximas à face de apoio podem comprometer a transferência de forças ao concreto (ACI, 2025). Assim, enquanto a ACI 318 estabelece principalmente os critérios de dimensionamento e detalhamento estrutural, a ASTM A970/A970M apresenta requisitos relacionados à fabricação, dimensões, tolerâncias, propriedades mecânicas, ensaios e critérios de aceitação do conjunto barra-cabeça.

Para que a cabeça seja considerada como elemento de ancoragem, segundo o item 25.4.4.1 da ACI 318, devem ser atendidas simultaneamente condições relativas à própria barra, à cabeça e à sua disposição no concreto (ACI, 2025). Como o atendimento à ASTM A970/A970M, Classe HA; utilização de barras com diâmetro não superior ao correspondente à barra No. 11, (aproximadamente 35,8 mm), emprego de concreto de densidade normal, cobrimento livre mínimo de $2d_b$, espaçamento entre eixos das barras de pelo menos $3d_b$; e área líquida mínima de apoio especificada pela norma (ACI, 2025).

A área líquida de apoio da cabeça, A_{brg} , corresponde à área efetivamente disponível para transferir as tensões de compressão ao concreto, descontando-se a área ocupada pela seção transversal da própria barra. A ACI 318 estabelece $A_{brg} \geq 4A_b$ para barras Grade 60, com tensão de escoamento de aproximadamente 420 MPa, e $A_{brg} \geq 6A_b$ para barras Grades 80 e 100, correspondentes aproximadamente a tensões de escoamento de 550 e 690 MPa, respectivamente, onde A_b a área nominal da seção transversal da barra.

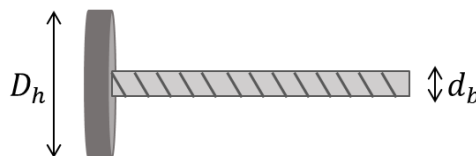
Para uma cabeça circular de diâmetro externo D_h , a área líquida de apoio pode ser expressa pela **Equação 32**.

$$A_{brg} = \frac{\pi}{4}(D_h^2 - d_b^2) \quad \text{Eq. 32}$$

Consequentemente pode ser escrito que:

$$\frac{A_{brg}}{A_b} = \left(\frac{D_h}{d_b}\right)^2 - 1 \quad \text{Eq. 33}$$

Figura 11 - Barra com cabeça achatada, em destaque o diâmetro da cabeça (D_h) e o diâmetro da barra (d_b), na mesma nomenclatura da normativa (ACI, 2025).



Fonte: Autor

A relação dada pela **Equação 33** estabelece que, uma cabeça circular que satisfaça $A_{brg} \geq 4A_b$ necessita de diâmetro equivalente de aproximadamente $2,24d_b$, enquanto o atendimento a $A_{brg} \geq 6A_b$ corresponde a aproximadamente $2,65d_b$. Para cabeças achatadas ou de geometria irregular, entretanto, a avaliação deve considerar a área projetada real da superfície de apoio, descontando-se a área ocupada pela barra. A ACI 318 ressalta que cabeças com áreas inferiores aos limites estabelecidos podem apresentar capacidade de ancoragem, porém seu comportamento não é adequadamente representado pelas equações, tornando necessária a comprovação experimental (ACI, 2025).

O fib Model Code também reconhece a transferência de esforços por meio do apoio da cabeça. Para determinadas condições, a normativa admite tratamento semelhante ao empregado para barras com ganchos ou dobras quando a área líquida de apoio da cabeça é de pelo menos $4A_b$ e a ligação entre a cabeça e a barra apresentando capacidade para desenvolver a tensão de escoamento (fib, 2023). A NBR 6118, por sua vez, admite a utilização de dispositivos mecânicos acoplados às barras como forma de ancoragem, porém não estabelece, nessa abordagem, requisitos geométricos para cabeças equivalentes aos detalhados pela ACI 318 e pelo fib Model Code (ABNT, 2023).

Além da geometria da cabeça, o comprimento disponível para transferência das tensões de aderência influencia diretamente a resposta da ancoragem. Resultados experimentais indicam que maiores comprimentos embutidos tendem a aumentar a capacidade total, enquanto comprimentos reduzidos aumentam a participação da cabeça na transferência da força e podem favorecer modos de ruptura associados ao concreto, incluindo formação de cone e fendilhamento (Shao *et al.*, 2016; Singhal; Chourasia; Parashar, 2020).

Para barras que atendem às condições prescritivas estabelecidas pela ACI 318, o comprimento de desenvolvimento em tração, ℓ_{dt} , é medido entre a seção crítica na qual a força deve ser desenvolvida e a face de apoio da cabeça. Convertida para o Sistema Internacional, a expressão apresentada no item 25.4.4.2 pode ser escrita pela **Equação 34** (ACI, 2025).

$$\ell_{dt} = 0,0266 \frac{f_y \psi_e \psi_p \psi_o \psi_c}{\sqrt{f'_c}} d_b^{1,5} \quad \text{Eq. 34}$$

Em que ℓ_{dt} e d_b são expressos em milímetros e f_y e f'_c em MPa. Os fatores ψ_e , ψ_p , ψ_o e ψ_c consideram, respectivamente, os efeitos do revestimento da barra, espaçamento e

confinamento, localização e cobrimento lateral, e resistência à compressão do concreto. Os coeficientes de modificação são: $\psi_e = 1,0$ para barras sem revestimento epóxi ou galvanizadas e 1,2 para barras revestidas com epóxi ou com revestimento duplo de zinco e epóxi; $\psi_p = 1,0$ quando $s \geq 8d_b$ ou $A_{tt} \geq 0,30A_{hs}$, sendo $\psi_p = 2 - s/8d_b$, limitado a 1,6, nas demais situações, onde, s representa o menor espaçamento entre os eixos das barras de aço com cabeça; A_{tt} corresponde à área total da seção transversal das armaduras de confinamento dispostas paralelamente às barras com cabeça, consideradas efetivas na região de ancoragem; e A_{hs} representa a área total da seção transversal das barras de aço com cabeça consideradas na verificação da ancoragem. As grandezas s , A_{tt} e A_{hs} são expressas, respectivamente, em (mm) e (mm²); $\psi_o = 1,0$ para barras com cabeça terminando no interior do núcleo de pilares, com cobrimento lateral mínimo de 63,5 mm, ou quando o cobrimento lateral é igual ou superior a $6d_b$, e 1,25 nos demais casos; e $\psi_c = 1,0$ para $f'_c \geq 41,37$ MPa, sendo $\psi_c = 0,6 + f'_c/103,42$ para resistências inferiores, com f'_c expresso em MPa, além disso, o comprimento adotado não pode ser inferior a $8d_b$ nem a aproximadamente 152 mm. Além disso, a contribuição da resistência à compressão do concreto na equação é limitada ao correspondente a $f'_c = 68,9$ MPa (ACI, 2025).

O confinamento da região de ancoragem constitui outro parâmetro importante, principalmente por restringir a abertura e a propagação das fissuras longitudinais decorrentes das tensões radiais introduzidas no concreto. O fib Model Code considera cobrimento, armadura transversal, resistência do concreto, posição de concretagem e comprimento de ancoragem entre os principais fatores que afetam a aderência (fib, 2023). A NBR 6118 estabelece, para barras com diâmetro inferior a 32 mm, armadura transversal ao longo da região de ancoragem com capacidade correspondente a 25% da força longitudinal de uma das barras ancoradas, destinada a resistir aos esforços associados ao fendilhamento (ABNT, 2023).

No caso específico das barras com cabeça, a ACI 318 também reconhece a influência do confinamento, destacando que apenas estribos ou laços orientados paralelamente ao comprimento de desenvolvimento demonstraram contribuição consistente para a resistência da ancoragem (ACI, 2025).

A interação entre comprimento aderente, resistência do concreto, capacidade da barra, geometria da cabeça e confinamento demonstra que a eficiência de uma ancoragem com cabeça não pode ser avaliada exclusivamente pela dimensão do dispositivo terminal. Particularmente para barras de alta resistência e cabeças de geometria não convencional, é necessário verificar se o sistema é capaz de transferir ao concreto a força necessária para mobilizar a resistência

pretendida da armadura sem ocorrência prematura de deslizamento, fendilhamento ou ruptura localizada do concreto.

Nesse contexto, o item 25.4.5 da ACI 318 assume especial importância ao admitir dispositivos mecânicos que não atendam integralmente à ASTM A970/A970M ou às condições prescritivas do item 25.4.4, desde que sua capacidade seja demonstrada experimentalmente. Essa possibilidade abrange sistemas com processos de fabricação ou geometrias não padronizadas, incluindo cabeças produzidas pelo achatamento da extremidade da própria barra (como utilizada nessa pesquisa). Nesses casos, por não atender integralmente às condições prescritivas aplicáveis às barras com cabeça padronizada, a eficiência da solução deve ser demonstrada experimentalmente (ACI, 2025).

A avaliação experimental deve considerar não apenas a força máxima suportada pelo conjunto, mas também os deslocamentos desenvolvidos, os mecanismos de transferência de esforços e o modo de ruptura. O escoamento da barra antes da perda de capacidade da ancoragem evidencia que o sistema conseguiu desenvolver a resistência correspondente ao escoamento do aço. Assim, a investigação experimental de barras de alta resistência com extremidades achatadas visa permitir avaliar se sua geometria, considerada não convencional, pode contribuir para a transferência de esforços ao concreto e como a resistência se compara ao de barras ancoradas exclusivamente por aderência.

2.6 FISSURAÇÃO, ADERÊNCIA E FENDILHAMENTO

A interação entre o aço e o concreto em estruturas de concreto armado depende extremamente da aderência entre esses dois materiais, para garantir a transferência de esforços. A aderência permite que as tensões de tração aplicadas ao aço sejam transmitidas ao concreto pela interface entre os materiais. Entretanto, esse mecanismo está fortemente associado à fissuração do concreto, que influencia diretamente o desempenho da ancoragem e a durabilidade estrutural (Fusco, 2013). Durante o esforço aplicado à barra de aço, a transferência de carga entre o aço e o concreto gera tensões de cisalhamento na interface entre os dois materiais. Quando essas tensões superam a capacidade de resistência do concreto, ocorre a formação de microfissuras, que evoluem até se tornarem fissuras longitudinais ou radiais, redistribuindo os esforços para regiões ainda não fissuradas. O padrão de fissuração vai depender da geometria da barra, do cobrimento e do confinamento fornecido pelo concreto ou

por armaduras transversais. Em geral, fissuras longitudinais se desenvolvem paralelamente à barra, enquanto fissuras radiais se propagam em direção à superfície do concreto (Lutz; Gergely, 1967).

O fendilhamento é um fenômeno importante em estruturas de concreto armado, resultante da formação e propagação de fissuras provocadas por tensões de tração superiores à resistência do concreto. O fendilhamento longitudinal ocorre em elementos ancorados, devido às tensões radiais geradas na interface aço-concreto durante a transferência de esforços de aderência. Esse tipo de fissuração pode comprometer a ancoragem e a integridade estrutural do elemento, sendo, portanto, determinante para o comprimento de ancoragem em projetos estruturais (ABNT, 2023). Segundo o *fib Bulletin No. 72* (fib, 2023) o fendilhamento está relacionado à incompatibilidade de deformações entre o aço e o concreto, quando as tensões de tração radiais induzidas pela aderência ultrapassam a resistência à tração do concreto. Essa condição favorece o surgimento de fissuras longitudinais paralelas à armadura, que podem evoluir até a superfície do elemento, e assim, reduzindo significativamente a capacidade da ligação. O documento destaca que o fendilhamento é influenciado por parâmetros como o cobrimento, o diâmetro da barra, o tipo de concreto e a presença de armaduras transversais, que atuam no confinamento e controle da fissuração (fib, 2023).

O fendilhamento pode ser classificado conforme a origem e a direção das fissuras em relação à armadura. Sendo, fendilhamento longitudinal, fendilhamento cônico e o fendilhamento lateral, cada um com mecanismos e implicações estruturais distintas (fib, 2023; Fusco, 2013).

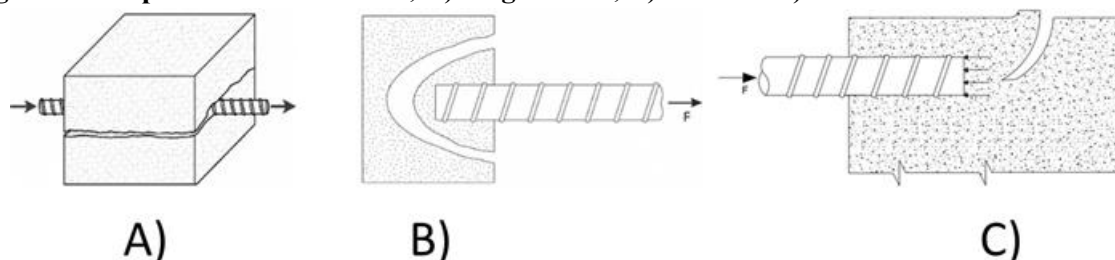
O fendilhamento longitudinal ocorre ao longo da armadura tracionada, sendo provocado pelas tensões radiais que se desenvolvem na interface aço-concreto durante a transmissão dos esforços de aderência, produzindo fissuras paralelas às barras. Esse tipo de fissuração é típico em barras tracionadas com cobrimento insuficiente e em concretos de alta resistência, devido à sua menor ductilidade (Zulini, 2019).

O fendilhamento cônico manifesta-se principalmente nas ancoragens de barras tracionadas com ganchos ou cabeças ancoradas. As tensões de tração atuam de forma a produzir uma ruptura em forma de cone. Esse tipo de fendilhamento ocorre quando o esforço transmitido pela barra é suficientemente elevado para arrancar um volume cônico do concreto adjacente à extremidade da ancoragem (Assis Júnior, 2017).

Por fim, o fendilhamento lateral está associado às barras comprimidas, onde as tensões de aderência geram esforços transversais que podem provocar a separação do concreto em planos aproximadamente paralelos à direção das barras. Esse tipo de fendilhamento pode ser

facilitado pela falta de confinamento adequado. A **Figura 12** mostra esquematicamente os tipos de fendilhamentos.

Figura 12 - Tipos de fendilhamento, A) longitudinal, B) cônico e C) lateral



Fonte: Elaborada pelo autor com auxílio de ferramenta de inteligência artificial (Gemini, 2025).

Portanto, o mecanismo de fendilhamento é importante e os parâmetros mínimos de cobrimento e armaduras transversais, para mitigar a propagação dessas fissuras e garantir a durabilidade das estruturas, são estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023).

2.7 AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA CA-70

O desenvolvimento ou aprimoramento de materiais tem sido determinante para o avanço da engenharia civil, permitindo a construção de estruturas mais leves, duráveis, econômicas e ambientalmente viáveis. Nesse contexto, destaca-se o aço de alta resistência CA-70, recentemente incorporado ao mercado brasileiro e regulamentado pela NBR 7480, que passou a contemplar este material como opção para armaduras em estruturas de concreto armado (ABNT, 2024).

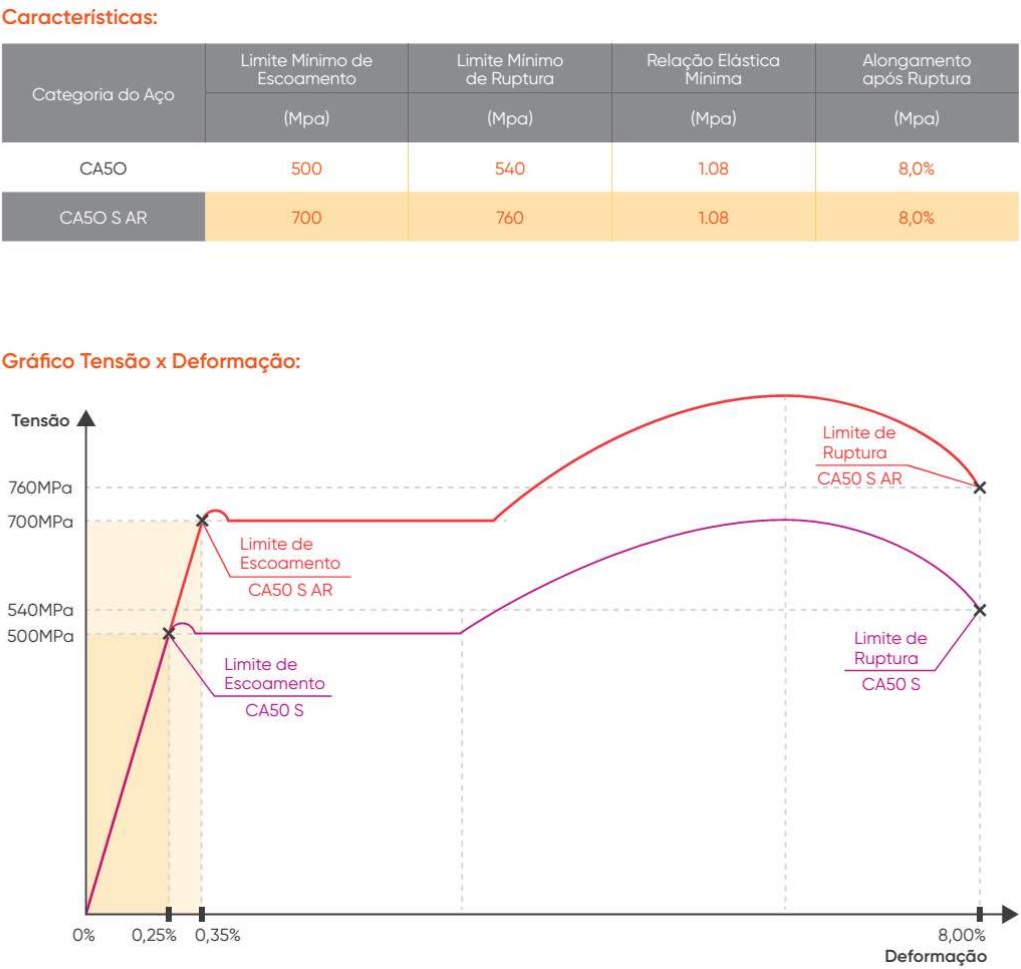
Quando comparado ao aço CA-50, o CA-70 apresenta tensão característica de escoamento de 700 MPa, ou seja, 40% superior ao CA-50, comportamento de aderência compatível com sua utilização estrutural, possibilitando sua utilização sem comprometer a compatibilidade estrutural (Rideiro e Silva; Pupin; Araújo, 2025). A **Figura 13** mostra o gráfico tensão versus deformação para o vergalhão produzido pela ArcelorMittal, comparando este aço de alta resistência com o aço convencional CA-50 (ArcelorMittal, 2023).

A maior resistência do aço CA-70 permite uma redução considerável no consumo de aço, cerca de 25% em blocos de fundação e 18% em pilares pré-moldados, segundo estudos e

aplicações em obras recentes (Rideiro e Silva; Pupin; Araújo, 2025), reduzindo significativamente o peso próprio dos elementos estruturais e por sua vez permitindo a redução de outras partes da estrutura como um todo. Admitindo-se, como hipótese de comparação, que o custo por unidade de massa do CA-70 seja 10% superior ao do CA-50, essa redução corresponderia a uma economia teórica de aproximadamente 21,4% no custo do aço.

Os fabricantes nacionais, como Gerdau e ArcelorMittal, lançaram versões comerciais do CA-70, denominadas GG 70 e CA50 S/AR, respectivamente. Entre as principais vantagens destacam-se: melhor soldabilidade devido ao baixo teor de carbono, redução do congestionamento de barras, maior produtividade na execução e menor impacto ambiental (Silveira, 2023).

Figura 13 - Comparação aço de alta resistência CA50 S/AR (CA-70) com o aço convencional CA-50



Fonte: (ArcelorMittal, 2023)

Embora estudos indiquem comportamento de aderência compatível com a utilização do CA-70 em estruturas de concreto armado, sua maior tensão de escoamento aumenta a força que deve ser transferida pela região de ancoragem para que a capacidade resistente da armadura seja plenamente desenvolvida. Dessa forma, torna-se necessária a avaliação da adequação dos modelos de comprimento de ancoragem originalmente estabelecidos para aços de menor resistência. Nesse sentido, a ABECE, por meio da Recomendação ABECE 008, fornece parâmetros complementares para o emprego do CA-70, enquanto Bertazzolo *et al.* (2025) ao compararem modelos nacionais e internacionais de comprimento de ancoragem, apontam limitações da NBR 6118 para representar adequadamente o comportamento de aços de alta resistência (ABECE, 2024; Bertazzolo; Cecel; Meneghetti, 2025).

Ensaio realizados em laboratórios nacionais e internacionais indicam desempenho satisfatório do CA-70 em condições críticas. Em altas temperaturas, foram observadas reduções do módulo de elasticidade e da tensão de escoamento semelhantes às verificadas para o CA-50, enquanto, sob carregamentos cíclicos, resultados experimentais indicaram desempenho à fadiga superior ao do aço convencional (Almeida *et al.*, 2025; Craveiro; Laím; Santiago, 2025).

Os vergalhões de CA-70 são produzidos pelas fabricantes Gerdau com os diâmetros de 12,5 mm à 32,0 mm e pela ArcelorMittal de 8,0 mm à 32,0 mm. O aço CA-70 foi introduzido no mercado brasileiro como alternativa aos aços já conhecidos CA-50 e CA-60. O Uso deste aço vêm ganhando interesse em pesquisas recentes, principalmente devido à sua alta resistência quando comparado aos demais disponíveis no mercado, o que possibilita a redução das áreas de aço em elementos estruturais. Entretanto, ainda é muito incipiente os estudos e publicações sobre esse tema, há escassez significativa de pesquisas brasileiras publicadas, principalmente sobre aderência, fendilhamento, detalhamento, e comportamento de ancoragens mecânicas.

Por exemplo, Silveira *et al.* (2023) mostram que o uso do aço CA-70 reduz significativamente a área necessária de armadura em vigas submetidas à flexão simples, chegando a economias superiores a 20–30% dependendo da bitola a ser utilizada (Silveira, 2023). O trabalho conclui que o CA-70 proporciona otimização de custos, menor congestão de barras e maior eficiência estrutural, sem comprometer requisitos normativos de serviço.

Em trabalho nessa mesma linha, Moreira *et al.* (2023) realizou estudo sobre a aplicação do aço GG-70 em longarinas e pilares de um viaduto pré-moldado, o estudo verificou reduções expressivas de consumo de aço, melhora no desempenho mecânico e detalhamentos mais simples (Moreira; Fontana; Meo, 2023). Em termos práticos, o estudo mostra a possibilidade de redução de 18 a 25% no peso de armaduras.

Bertazzollo *et al.* (2025) compara em seu artigo (Bertazzolo; Cecel; Meneghetti, 2025) os modelos nacionais e internacionais de comprimento de ancoragem, mostrando que a NBR 6118 permanece baseada em critérios antigos e pouco sensíveis ao uso de aços de alta resistência, como o CA-70 (ABNT, 2023). O estudo conclui ser urgente revisar a NBR 6118 (ABNT, 2023) para contemplar adequadamente os novos aços de alta resistência.

No que diz respeito as propriedades mecânicas, do aço CA-70, em altas temperaturas, Cravieiro *et al.* (2025) Compara o comportamento do aço CA-70 com o CA-50 por meio de ensaios de tração realizados entre 20 °C e 700 °C (Craveiro; Laím; Santiago, 2025). Mostrando que os resultados em ambos os aços apresentam reduções semelhantes do módulo de elasticidade e na tensão de escoamento com o aumento da temperatura, concluindo que o CA-70 não apresenta perda adicional de desempenho em situação de incêndio, comprovando sua adequação para uso estrutural também em altas temperaturas.

Sobre o estudo da fadiga do CA-70, Almeida *et al.* (2025) avaliaram vergalhões CA-70 sob carregamentos cíclicos, visando determinar sua resistência à fadiga e comparando os resultados ao comportamento normativo do CA-50 (Almeida *et al.*, 2025). Os resultados mostraram que o CA-70 apresenta desempenho superior, com resistência cerca de 16% maior em 2 milhões de ciclos, concluindo que o aço CA-70 é adequado e vantajoso para estruturas sujeitas a ações repetitivas, como pontes e aerogeradores.

Por fim, Ribeiro e Silva *et al.* (2025) em seu recente artigo apresenta os avanços ligados ao aço CA-70, destacando seu desenvolvimento, pesquisas de desempenho (aderência, fogo e fadiga) e crescente adoção em obras brasileiras (Rideiro e Silva; Pupin; Araújo, 2025). Destacam que a revisão da NBR 7480 (ABNT, 2024) oficializou sua utilização, enquanto referências internacionais e a recomendação ABECE 008 orientam seu emprego até futura inclusão na NBR 6118 (ABNT, 2023). Os autores relatam que estudos mostraram que aplicações do aço CA-70 em blocos, estacas, pilares e peças pré-moldadas mostram reduções de até 25% no consumo de aço, aumentando eficiência e reduzindo custos em projetos estruturais.

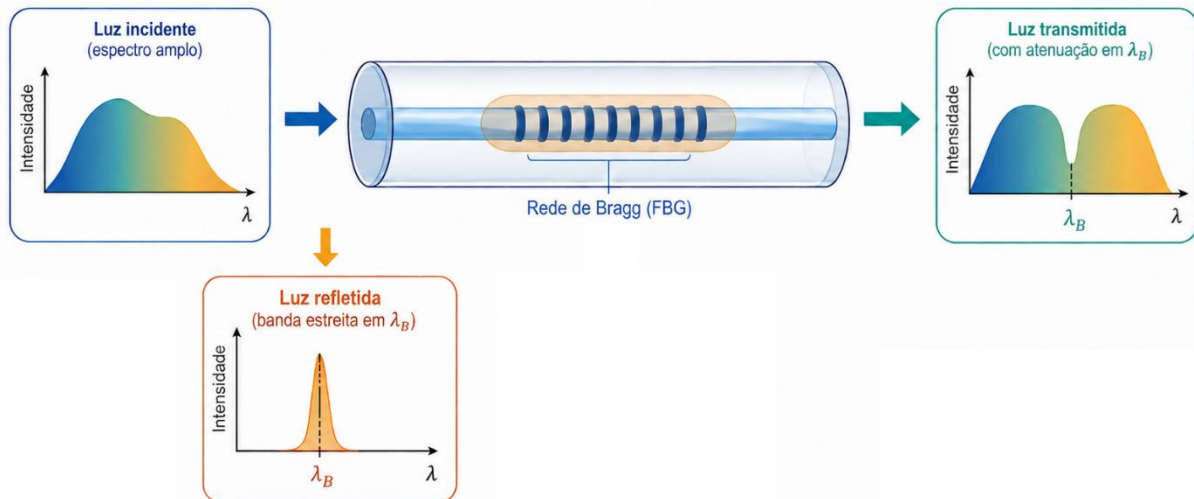
2.8 MONITORAMENTO DE CONCRETO POR SENSORES DE FIBRA ÓPTICA COM GRADES DE BRAGG

Os sensores de fibra óptica vêm sendo empregados no monitoramento de estruturas de concreto devido às suas pequenas dimensões, resistência à corrosão, imunidade a interferências

eletromagnéticas e possibilidade de instalação tanto na superfície quanto no interior dos elementos estruturais. Os sensores baseados em Redes de Bragg em Fibra (Fiber Bragg Grating – FBG), são utilizados principalmente para a medição de deformações e temperatura (Qiao *et al.*, 2023; Tang *et al.*, 2021; Yassin *et al.*, 2024).

Uma FBG consiste em uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra, o interrogador óptico envia luz pela fibra e, ao atingir a região da rede, uma faixa específica do espectro é refletida, enquanto os demais comprimentos de onda continuam se propagando. O sinal refletido, denominado comprimento de onda de Bragg, λ_B , retorna ao interrogador, que identifica a posição espectral do pico de reflexão, conforme mostra a **Figura 14**.

Figura 14 - Princípio de funcionamento de uma Rede de Bragg em Fibra Óptica (FBG)



Fonte: Elaborada pelo autor com auxílio de ferramenta de inteligência artificial (Gemini, 2026).

Essa condição é expressa pela **Equação 35** (Lin *et al.*, 2025; Tang *et al.*, 2021).

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad \text{Eq. 35}$$

Onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo e Λ é o período da rede. Quando a fibra sofre tração ou compressão, ocorrem alterações no período da rede e no índice de refração, provocando o deslocamento do pico refletido. Dessa forma, a deformação pode ser determinada a partir da variação do comprimento de onda, conforme dado pela **Equação 36** (Qiao *et al.*, 2023; Tang *et al.*, 2021).

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{[\lambda_{B_0}(1 - p_e)]} \quad \text{Eq. 36}$$

Onde $\Delta\lambda_B$ é o deslocamento do pico de Bragg em relação à condição inicial, λ_{B_0} é o comprimento de onda inicial, p_e é o coeficiente fotoelástico efetivo da fibra e $\Delta\varepsilon$ é a deformação axial. A deformação é adimensional e, em aplicações de monitoramento estrutural, é frequentemente expressa em microdeformação ($\mu\varepsilon$), sendo $1 \mu\varepsilon = 10^{-6}$.

A temperatura também modifica o comprimento de onda refletido, pois provoca expansão térmica da fibra, alterando do índice de refração do núcleo. Assim, a leitura total contém simultaneamente as contribuições de deformação e temperatura, podendo ser representada pela **Equação 37** (Qiao *et al.*, 2023).

$$\Delta\lambda_B/\lambda_{B_0} = (1 - p_e) \Delta\varepsilon + (\alpha_f + \xi) \Delta T \quad \text{Eq. 37}$$

Onde α_f é o coeficiente de expansão térmica da fibra, ξ é o coeficiente termo-óptico e ΔT é a variação de temperatura em relação à condição de referência. Para determinar apenas a parcela mecânica da deformação, deve-se compensar o efeito térmico, conforme a **Equação 38**.

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{1 - p_e} \left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B_0}} - (\alpha_f + \xi) \Delta T \right] \quad \text{Eq. 38}$$

Na prática, essa compensação pode ser realizada com uma FBG adicional destinada à medição da temperatura, instalada próxima ao sensor de deformação, mas mecanicamente desacoplada (Lin *et al.*, 2025). É importante ressaltar que a **Equação 38** é empregada somente em monitoramento de longos períodos, ou em situações onde a temperatura é realmente um parâmetro associado a verificação, pois em medidas onde a temperatura pode ser considerada constante, ou seja, medidas realizadas em poucos minutos, o termo $\Delta T = 0$, faz a equação voltar a forma original, ou seja, **Equação 36**.

A incorporação da fibra ao concreto permite estimar e monitorar deformações em regiões internas do elemento, inclusive junto às armaduras. Entretanto, a fibra necessita de proteção contra impactos, flexões excessivas e danos durante a concretagem. Além disso, a qualidade da medição depende da adequada transferência de deformação entre o concreto ou a armadura, o sistema de proteção e a própria fibra. Materiais de encapsulamento, adesivos e

condições de interface podem influenciar essa transferência e, conseqüentemente, a resposta medida pelo sensor (Lin *et al.*, 2025; Qiao *et al.*, 2023; Tang *et al.*, 2021).

Assim, o funcionamento do sistema pode ser compreendido como uma sequência: o interrogador envia a luz, a FBG reflete um comprimento de onda específico, o sinal refletido retorna ao interrogador, o equipamento identifica o pico de Bragg e o deslocamento desse pico é convertido em deformação, com correção da influência da temperatura quando necessária. Essa configuração torna os sensores FBG particularmente adequados ao monitoramento de deformações internas em elementos de concreto a longo ou curto prazo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento de ancoragem de barras nervuradas de aço de alta resistência CA70 com extremidade conformada por UH e comparar seu desempenho ao de barras ancoradas sem UH, submetidas às mesmas condições de ensaio. A investigação foi realizada por meio de ensaios de arrancamento em blocos de concreto, buscando caracterizar a resposta força-deslocamento e os mecanismos associados à transferência de esforços entre a barra e o concreto.

Foram estudadas barras com diâmetros nominais de 10,0 mm e 12,5 mm. Para cada diâmetro foram ensaiadas seis barras com UH, totalizando 12 corpos de prova para ensaios de arrancamento. As barras apresentavam comprimento total de 72 cm, sendo o comprimento de aderência entre o aço e o concreto estabelecido em cinco vezes o diâmetro nominal da barra (5ϕ), correspondendo a 50 mm para as barras de 10,0 mm e 62,5 mm para as barras de 12,5 mm de diâmetro.

O programa foi executado em duas campanhas experimentais. A série com barras de 10,0 mm foi produzida e ensaiada na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV/UFU), em Uberlândia, Minas Gerais. A série com barras de 12,5 mm foram ensaiada na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro. Em ambas as séries, os ensaios de arrancamento foram realizados aos 28 dias.

Foi adotado o mesmo traço e as mesmas massas dos constituintes nas duas campanhas. Entretanto, os materiais disponíveis em cada laboratório apresentavam procedências distintas, assim como os equipamentos de mistura e as condições de cura. Por essa razão, os concretos foram caracterizados separadamente no estado fresco e quanto à resistência à compressão.

3.2 CONCRETOS E MATERIAIS CONSTITUINTES

Os concretos foram produzidos com cimento Portland CP V-ARI, sílica ativa, areia fina, areia média, brita zero, água e aditivo superplastificante. Para cada produção de 90 L foram adotadas as massas indicadas na **Tabela 4**. As curvas granulométricas dos materiais utilizados

na composição do traço, bem como os detalhes de sua dosagem, encontram-se disponíveis na publicação de referência (Bertoldo Menezes *et al.*, 2026).

Tabela 4 - Traço em massa do concreto produzido

Material	Quantidade para 90 L
Água inicialmente prevista	13,45 kg
Cimento CP V-ARI	43,28 kg
Sílica ativa	3,20 kg
Areia fina	8,40 kg
Areia média	53,56 kg
Brita zero	81,08 kg
Superplastificante MasterGlenium 51	0,95 kg

Na FECIV/UFU, o concreto foi produzido em betoneira. A mistura iniciou-se com a introdução da brita e das areias, seguida da adição do cimento e da sílica ativa, realizando-se inicialmente a homogeneização dos materiais secos. Em seguida, adicionou-se a água e procedeu-se à mistura dos constituintes; por fim, foi incorporado o aditivo superplastificante. Durante o processo verificou-se a necessidade de duas correções sucessivas de água, cada uma correspondente a 10% da quantidade inicialmente prevista. Assim, a quantidade final de água foi aproximadamente 16,14 kg, correspondente a um acréscimo total de 20% em relação à água inicialmente prevista, e a relação água/cimento efetiva passou de 0,31 para aproximadamente 0,37.

O traço de concreto utilizado nas duas campanhas experimentais foi estabelecido a partir do modelo de empacotamento de partículas de Andreasen & Andersen modificado. A mesma composição nominal foi adotada nas produções realizadas na UFU e na PUC-Rio. Entretanto, os materiais utilizados apresentavam procedências e características próprias de cada laboratório, além de diferenças nos procedimentos de produção e cura. Apesar da manutenção do traço, o concreto produzido na PUC-Rio apresentou resistência média à compressão superior à obtida na UFU. Essa diferença evidencia que a utilização de uma mesma composição nominal não garante propriedades mecânicas idênticas quando os materiais e as condições de produção são distintos.

Na PUC-Rio foram empregados cimento CSN CP V-ARI, sílica ativa Tecnosil, areia fina industrial Jundu, areia natural de rio, brita zero constituída por fragmentos de gnaiss e granito, superplastificante MasterGlenium 51 e água proveniente da rede de abastecimento. A

produção foi realizada em misturador com capacidade de 250 L. Foi mantida a mesma sequência de mistura: brita e areias, seguida de cimento e sílica ativa, homogeneização a seco, adição da água e, ao final, incorporação do superplastificante. Nessa campanha foi necessária uma única correção correspondente a 10% da água inicialmente prevista, resultando em aproximadamente 14,79 kg de água e relação água/cimento efetiva de aproximadamente 0,34.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A avaliação dos concretos no estado fresco foi realizada pelo ensaio de espalhamento com o cone de Abrams (*flow test*), conforme as NBR 15823-1 e NBR 15823-2 (ABNT, 2017, 2019).

O concreto produzido na FECIV/UFU, utilizado na moldagem dos blocos com barras de 10,0 mm de diâmetro, apresentou espalhamento de 430 mm. Como esse valor foi inferior a 500 mm, não foi possível determinar o tempo T500. Além disso, o espalhamento obtido ficou abaixo do limite mínimo estabelecido para a classe SF1, não atendendo, portanto, ao critério de espalhamento para classificação como concreto autoadensável.

Para o concreto produzido na PUC-Rio, utilizado nos blocos com barras de 12,5 mm, foi obtido espalhamento de 670 mm e tempo T500 de 1,73 s. O concreto foi classificado como SF2 quanto ao espalhamento e VS1 quanto à viscosidade plástica aparente. Em razão da elevada fluidez observada, o concreto foi lançado nas formas sem vibração ou outro procedimento de adensamento mecânico. A **Figura 15 (A)** mostra a medição do diâmetro de espalhamento do concreto produzido na UFU e em **(B)** produzido na PUC-Rio.

Figura 15 - Concreto produzido na UFU e PUC Rio.



3.4 MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para caracterizar o concreto efetivamente utilizado nos blocos de arrancamento, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos em cada campanha, com dimensões nominais de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, utilizando-se o mesmo concreto empregado na moldagem dos respectivos blocos. A moldagem e a cura dos corpos de prova foram realizadas tomando como referência a NBR 5738, enquanto os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados aos 28 dias conforme a NBR 5739 (ABNT, 2015, 2018).

Na campanha da FECIV/UFU, os blocos e corpos de prova permaneceram em cura imersa. Os ensaios de compressão foram realizados em máquina universal INSTRON, modelo 1000HDX-C4-G7C. As resistências foram calculadas com base na área da seção transversal correspondente ao diâmetro médio medido de cada corpo de prova.

A resistência média à compressão do concreto produzido na FECIV/UFU foi de 55,48 MPa aos 28 dias, com desvio padrão de 2,65 MPa, conforme mostra o detalhamento na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Detalhamento dos corpos de prova e resultados do ensaio de compressão axial, realizados na UFU

CP	D _M (mm)	h (mm)	F _{máx} (kN)	f _c (MPa)	f _c médio (MPa)	S (MPa)
C1	99,500	202	431,67	55,52	55,48	2,65
C2	99,650	198	414,51	53,15		
C3	99,525	199	471,80	60,65		
C4	99,775	200	424,57	54,30		
C5	100,175	200	429,49	54,49		
C6	99,600	201	426,83	54,78		

Fonte: Autor

Na campanha da PUC-Rio, os blocos e corpos de prova permaneceram em cura ao ar livre. Os ensaios de compressão foram realizados em máquina Controls, modelo 50-C46Z00, com capacidade nominal de 2000 kN.

A resistência média à compressão do concreto produzido na PUC-Rio foi de 73,78 MPa aos 28 dias, com desvio padrão de 3,92 MPa conforme mostrado na **Tabela 6**.

Tabela 6 - Detalhamento dos corpos de prova e resultados do ensaio de compressão axial, realizados na PUC-Rio

CP	D _M (mm)	h (mm)	F _{máx} (kN)	f _c (MPa)	f _c médio (MPa)	S (MPa)
CP-1	101,00	213,0	591,4	73,82	73,78	3,92
CP-2	100,85	202,0	619,7	77,58		
CP-3	100,65	201,0	541,4	68,05		
CP-4	101,20	202,5	620,5	77,14		
CP-5	100,75	199,0	559,0	70,12		
CP-6	100,40	199,5	601,4	75,96		

Fonte: Autor

As diferenças entre as resistências das duas campanhas foram consideradas posteriormente na interpretação dos resultados dos ensaios de arrancamento. A **Figura 16 (A)** mostra a preparação para o ensaio de compressão axial realizado na UFU e em **(B)** o bloco após a ruptura realizado na PUC-Rio.

Figura 16 - Ensaio de compressão axial realizado na UFU e (B) o bloco após a ruptura realizado na PUC-Rio



Fonte: Autor

3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAS DE AÇO POR ENSAIO DE TRAÇÃO DIRETA

Foram utilizadas barras nervuradas de aço de alta resistência, comercialmente identificadas como CA50 AR (CA70), fabricadas pela ArcelorMittal, com resistência característica mínima de escoamento de 700 MPa. A caracterização mecânica das barras foi realizada por meio de ensaios de tração direta, de forma independente dos ensaios de arrancamento, com o objetivo de determinar experimentalmente o limite de escoamento do material e verificar sua compatibilidade com a classe de aço adotada.

Para as barras de diâmetro nominal de 10,0 mm foram ensaiadas três amostras. Os comprimentos medidos foram 411, 406 e 403 mm e as massas 247,94, 246,10 e 243,91 g, respectivamente. As massas lineares obtidas foram 0,603, 0,606 e 0,605 kg/m. A área utilizada na determinação das tensões foi de 68,66 mm², e a altura média das nervuras foi aproximadamente 0,69 mm. A altura das nervuras das barras de aço foi determinada por meio de medições realizadas com paquímetro. Para isso, foram considerados os diâmetros médios de 9,73 mm e 11,70 mm, correspondentes às barras de diâmetro nominal de 10,0 mm e 12,5 mm, respectivamente. Inicialmente, mediu-se o diâmetro externo das barras, incluindo as nervuras. Em seguida, subtraiu-se o diâmetro médio da barra do valor medido, dividindo-se o resultado por dois para determinar a altura das nervuras. Esse procedimento foi realizado em três barras distintas de cada diâmetro nominal, sendo os resultados apresentados correspondentes às médias dos valores obtidos, o mesmo procedimento foi realizado para as barras de 12,5 mm.

Os limites de escoamento determinados para as três amostras de 10,0 mm foram 704,75 MPa, 756,08 MPa e 770,61 MPa, resultando em limite de escoamento médio de 743,81 MPa. Para as barras de 12,5 mm, devido à disponibilidade de amostras, foi ensaiada uma única barra, com comprimento de 487,50 mm, massa de 454,79 g, massa linear de 0,933 kg/m, área de 117,47 mm² e altura das nervuras de 0,69 mm. As alturas médias das nervuras, determinadas experimentalmente, são superiores aos limites mínimos de 0,40 mm e 0,50 mm, respectivamente, estabelecidos pela NBR 7480, portanto, os resultados obtidos atendem ao requisito dimensional mínimo de altura das nervuras previsto na norma (ABNT, 2024).

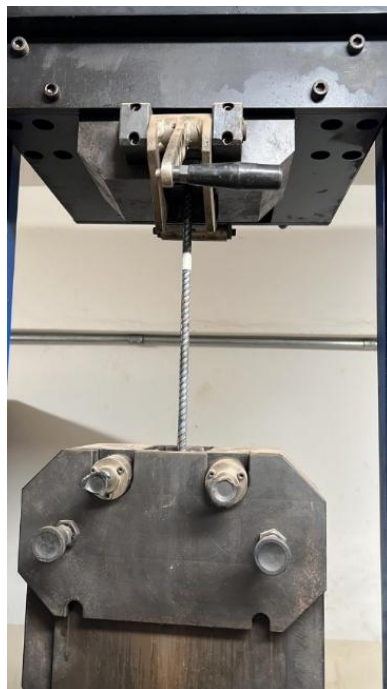
O limite de escoamento obtido foi de 750,61 MPa. Os dados consolidados são apresentados na **Tabela 7**.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de tração direta nas barras de aço AC70.

Característica	Barra 1 10 mm	Barra 2 10 mm	Barra 3 10 mm	Barra 4 12,5 mm
Comprimento (mm)	411	406	403	487,50
Massa (g)	247,94	246,10	243,91	454,79
Massa linear (kg/m)	0,603	0,606	0,605	0,933
Área (mm ²)	68,66	68,66	68,66	117,47
Altura das nervuras (mm)	0,69	0,68	0,69	0,69
Limite de escoamento (MPa)	704,75	756,08	770,61	750,61
f_u (MPa)	905,90	907,29	901,61	900,73
f_u/f_y	1,28	1,20	1,17	1,20

Fonte: Autor

Os valores obtidos confirmaram os limites de escoamento compatíveis com a resistência mínima de 700 MPa considerada para o aço CA70. Esses resultados foram utilizados como referência para a caracterização das barras empregadas no programa experimental, mantendo-se separada essa caracterização mecânica das configurações geométricas adotadas nos ensaios de arrancamento. A **Figura 17** mostra o ensaio de tração direta das barras CA70.

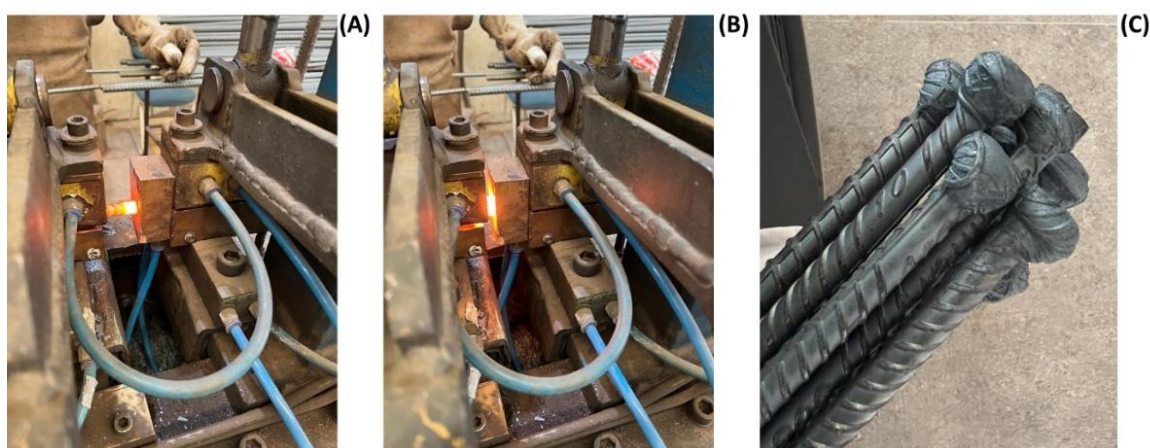
Figura 17 - Ensaio de tração direta das barras CA70

Fonte: Autor

3.6 BARRAS COM CABEÇA ACHATADA

As cabeças achatadas foram produzidas pela empresa Marka Soluções Pré-Fabricadas, localizada em Brodowski, São Paulo. O processo de conformação consistiu no aquecimento rápido da extremidade da barra, por passagem de corrente elétrica, seguido da compressão da região aquecida, promovendo o alargamento localizado da extremidade da barra. A **Figura 18** (A) mostra o processo de aquecimento da barra para a produção da cabeça achatada, a (B) mostra a compressão da extremidade aquecida, enquanto (C) mostra o resultado final com a formação da cabeça achatada.

Figura 18 - (A) Processo de aquecimento da extremidade da barra para conformação da cabeça achatada, (B) etapa de conformação por pressão da cabeça e (C) barras de aço após a conformação das cabeças achatadas.



Fonte: Autor

Em função das características do processo de conformação, foram observadas variações geométricas entre as cabeças produzidas, no diâmetro da cabeça e altura, conforme mostrado na **Tabela 8**. O índice de centralidade é dado pela relação entre o raio maior com a metade do diâmetro. Nas barras de 10,0 mm, os maiores diâmetros medidos das cabeças variaram de 19,81 a 21,94 mm e as espessuras de 15,08 a 17,71 mm. Nas barras de 12,5 mm, os maiores diâmetros variaram de 24,99 a 27,31 mm e as espessuras de 16,07 a 18,57 mm. As dimensões individuais foram registradas para posterior consideração na interpretação dos resultados. Para garantir o posicionamento das barras principais durante a montagem dos corpos de prova, foram utilizadas barras auxiliares soldadas às cabeças achatadas das barras de 10,0 e 12,5 mm. Esses elementos tiveram função exclusivamente construtiva, permitindo centralizar e estabilizar as barras principais no interior das formas durante a concretagem.

Tabela 8 - Detalhamento das medidas das cabeças achatadas.

Barras			Detalhamento das medidas da cabeça achatada					
Diâmetro nominal	Diâmetro médio medido	Barra	Diâmetro	S	Raio maior	Raio menor	Altura	Índice de centralidade
(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm/mm)
10,00	9,73	101	21,94	0,76	15,26	6,68	15,24	1,39
		102	20,56		12,83	7,73	15,29	1,25
		103	21,28		13,56	7,72	16,56	1,27
		104	21,42		13,72	7,70	17,71	1,28
		105	21,36		13,10	8,26	16,05	1,23
		106	19,81		11,55	8,26	15,08	1,17
12,50	11,70	121	24,99	0,81	15,34	9,65	17,09	1,23
		122	27,31		15,93	11,38	18,55	1,17
		123	26,63		14,41	12,22	18,15	1,08
		124	26,08		14,61	11,47	16,07	1,12
		125	25,58		13,16	12,42	18,57	1,03
		126	26,39		14,57	11,82	17,94	1,10

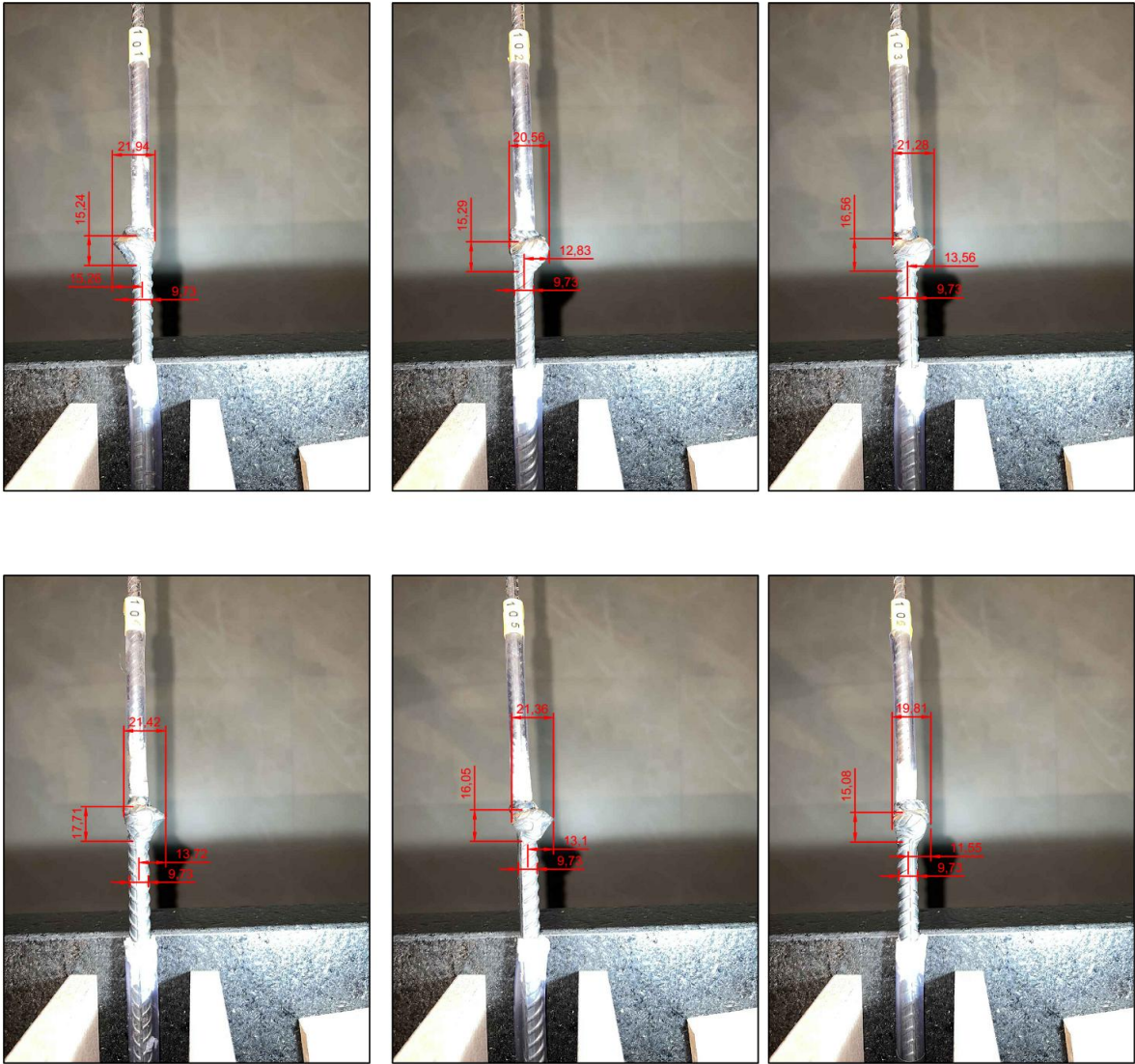
Fonte: Autor

As medidas anteriormente descritas foram determinadas a partir de fotografias individuais das barras obtidas, mantendo-se constante a distância entre a câmera e as barras, de modo a padronizar a aquisição das imagens. Posteriormente, as fotografias foram importadas para o software AutoCAD, no qual as dimensões foram determinadas por meio da ferramenta de cotas.

Inicialmente, foram cotados os diâmetros das barras nas imagens e, em seguida, a escala foi ajustada tomando-se como referência os diâmetros médios previamente determinados, correspondentes a 9,73 mm para as barras nominalmente de 10,0 mm e a 11,71 mm para as barras nominalmente de 12,5 mm. Após essa calibração, foram realizadas as demais medições geométricas, incluindo o diâmetro e a altura da cabeça achatada. O procedimento de medição é ilustrado na **Figura 19** para as barras de 10,0 mm e na **Figura 20** para as barras de

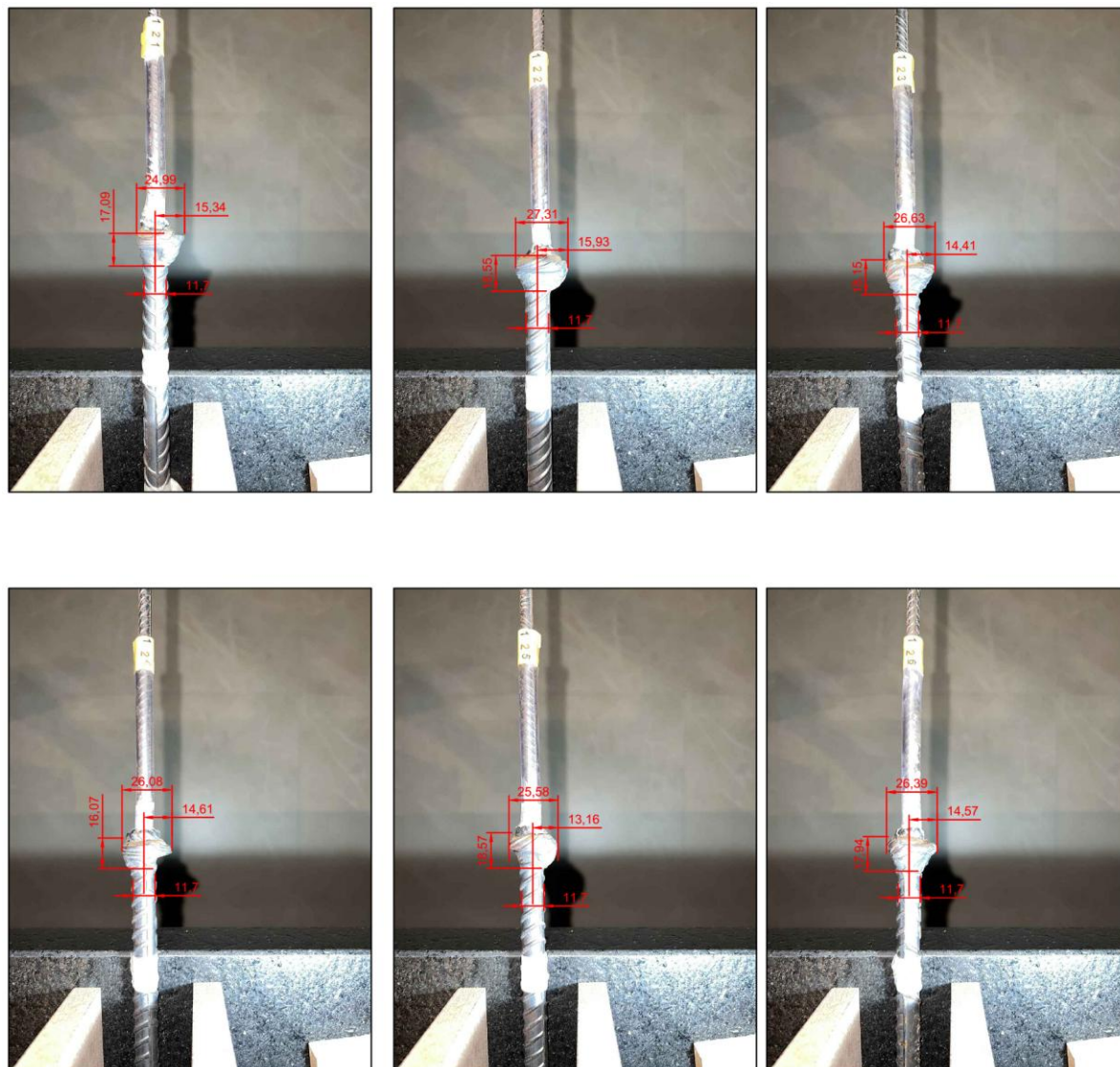
12,5 mm. Nessas figuras, também é possível observar a barra auxiliar de 6,3 mm de diâmetro, soldada à parte superior da cabeça achatada.

Figura 19 - Resultado das medidas das cabeças achatadas para as barras de diâmetro nominal de 10,0 mm



Fonte: Autor

Figura 20 - Resultado das medidas das cabeças achatadas para as barras de diâmetro nominal de 12,5 mm



Fonte: Autor

Todas as barras avaliadas apresentaram área líquida de apoio da cabeça inferior ao valor mínimo estabelecido pelo ACI 318 para barras de alta resistência, correspondente a seis vezes a área da seção transversal da barra ($A_{brg} \geq 6A_b$). Para as barras de 10,0 mm, a razão entre a área líquida de apoio da cabeça e a área da barra variou de 3,14 a 4,08, enquanto, para as barras de 12,5 mm, essa razão variou de 3,56 a 4,44. Dessa forma, nenhuma das cabeças avaliadas atende ao requisito geométrico de área mínima de apoio estabelecido pelo ACI 318 para barras dessa classe de resistência, sendo, portanto, tratadas neste estudo como cabeças não convencionais (ACI, 2025). Já o *fib Model Code* estabelece que a área líquida de apoio da

cabeça deve ser, no mínimo, igual a quatro vezes a área da seção transversal da barra ($A_{brg} \geq 4A_b$), sem estabelecer, para esse requisito, diferenciação em função da tensão de escoamento do aço. Considerando esse critério, apenas as barras 106 e 124 a 126 apresentaram área líquida de apoio suficiente para atender ao requisito, enquanto as demais apresentaram valores inferiores ao mínimo estabelecido (fib, 2023).

3.7 CONFIGURAÇÃO DAS BARRAS NOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

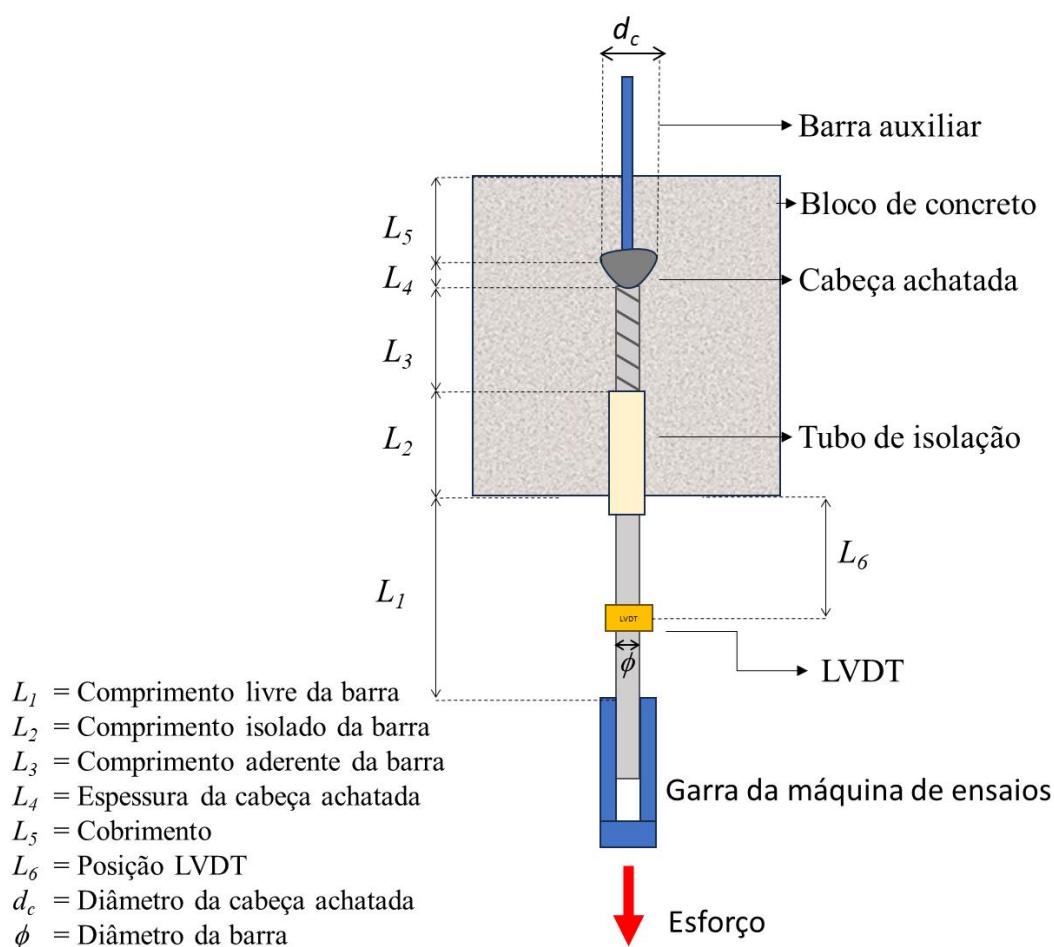
As barras destinadas aos ensaios de arrancamento foram preparadas de modo a definir uma região aderente controlada no interior do bloco. Para ambas as configurações de ancoragem, o comprimento aderente foi estabelecido em 5ϕ . Assim, foram adotados 50 mm para as barras de 10,0 mm e 62,5 mm para as barras de 12,5 mm.

A região da barra sem aderência ao concreto foi isolada por meio de tubo plástico. Foram empregados comprimentos isolados de 80 mm para as barras de 10,0 mm e 67,5 mm para as barras de 12,5 mm. Na interface entre a barra e o tubo foi aplicado silicone para impedir a penetração da pasta de cimento e preservar a extensão efetiva da região aderente.

Nas barras com UH, a cabeça foi posicionada após o trecho aderente, conforme a geometria apresentada na **Figura 21**. Uma barra auxiliar, também isolada, foi soldada no topo da UH, na continuidade do eixo da barra, no lado oposto ao trecho submetido à tração.

Na representação, L_1 corresponde ao comprimento livre da barra; L_2 , ao comprimento isolado; L_3 , ao comprimento aderente; L_4 , à espessura da UH; L_5 , ao cobrimento; e L_6 , à posição do LVDT. A variável d_c representa o diâmetro da UH e ϕ , o diâmetro da barra.

Figura 21 - Geometria do corpo de prova e configuração da barra de ensaio



Fonte: Autor

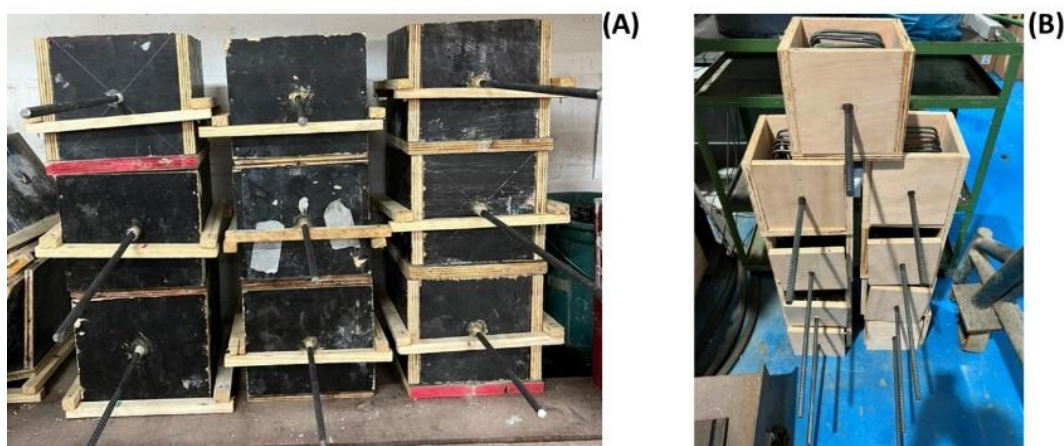
3.8 FORMAS E GEOMETRIA DOS BLOCOS

Os corpos de prova dos ensaios de arrancamento foram constituídos por blocos cúbicos de concreto com dimensões internas de 20 cm. As formas foram confeccionadas em madeira compensada. Para a série com barras de 10,0 mm foram utilizadas chapas de compensado plastificado com 15 mm de espessura, enquanto para a série com barras de 12,5 mm foram empregadas chapas de compensado naval com 20 mm de espessura. A **Figura 22** mostra o resultado final das formas. Não foi utilizado desmoldante.

Em duas faces opostas das formas foram executados furos centralizados para passagem e posicionamento da barra de ensaio. Na série de 10,0 mm foram executados furos de 11 mm e 7 mm; na série de 12,5 mm, furos de 13 mm e 7 mm. A vedação ao redor das barras foi realizada com cera de abelha para evitar a saída de pasta de cimento durante a concretagem. A

concretagem foi executada pela face superior aberta da forma, mantendo-se a barra de ensaio na posição horizontal.

Figura 22 - Resultado final das formas, (A) produzidas na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e (B) produzidas na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)



Fonte: Autor

3.9 ARMADURA DE CONFINAMENTO

A utilização da armadura de confinamento foi definida a partir de observações experimentais anteriores. Marques (2025), ao investigar ancoragens retas de barras com diâmetros de 10,0 e 12,5 mm, identificou a ocorrência de fendilhamento dos blocos de concreto durante os ensaios de arrancamento. Esse comportamento também foi observado nos ensaios-piloto realizados na etapa de qualificação desta pesquisa, especialmente nos blocos com barras de 12,5 mm. Diante desses resultados, optou-se pela utilização de armadura transversal de confinamento em todos os blocos, independentemente do diâmetro da barra, com o objetivo de limitar o fendilhamento e padronizar as condições experimentais.

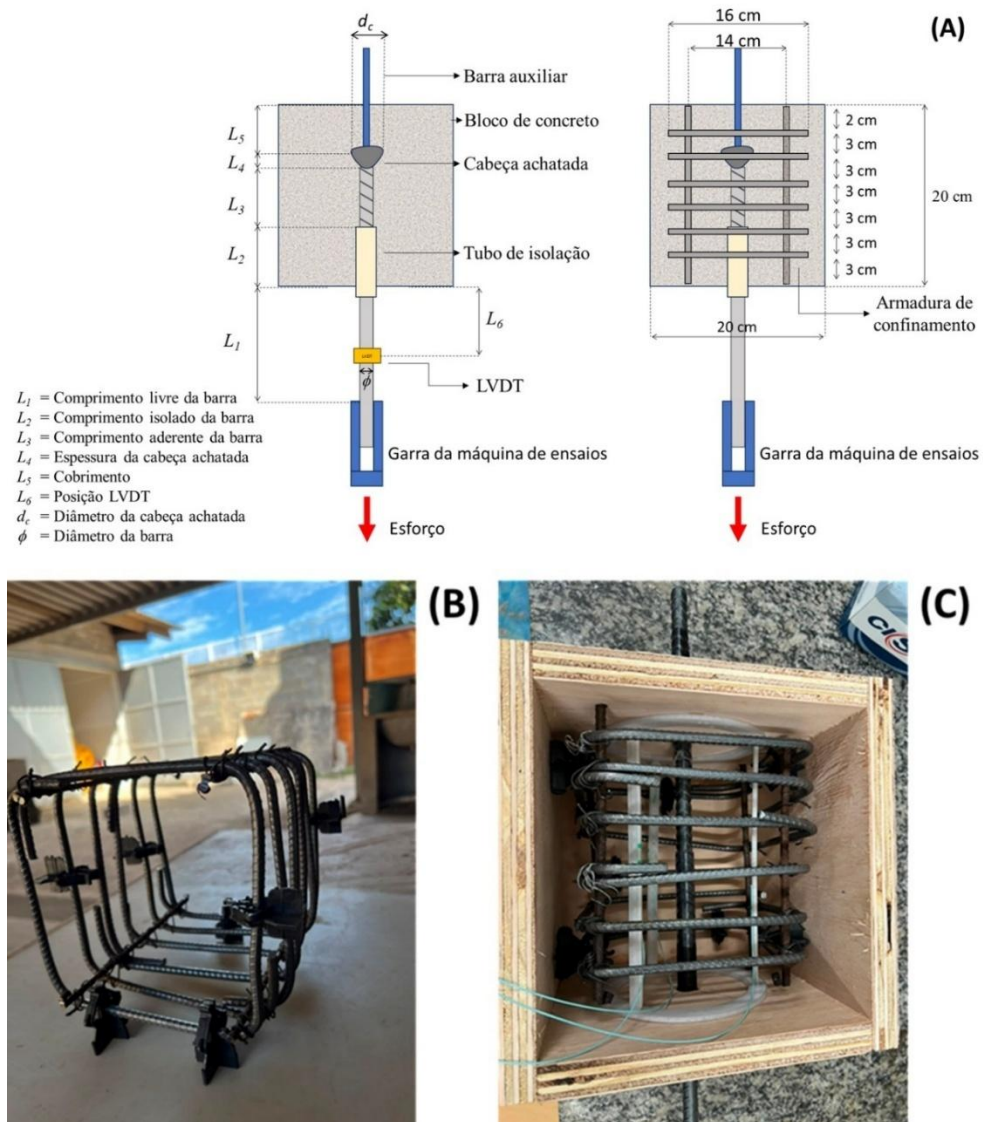
Os blocos receberam armadura transversal de confinamento destinada a limitar o fendilhamento do concreto durante o arrancamento. Para o dimensionamento foi adotada como referência uma tensão correspondente a 25% da tensão de escoamento nominal de 700 MPa das barras CA70, equivalente a 175 MPa, conforme NBR 6118 (ABNT, 2023).

A armadura foi constituída por seis estribos quadrados de aço CA-50, confeccionados com barras de 6,3 mm de diâmetro e dimensões de 16 × 16 cm. O espaçamento entre estribos foi de 3 cm, com o estribo inferior posicionado a 2 cm do fundo da forma e o superior a 3 cm da face superior. Quatro barras longitudinais de 6,3 mm foram empregadas exclusivamente para

montagem e estabilização da armação, não sendo suas resistências consideradas no dimensionamento.

As ligações entre estribos e barras longitudinais foram realizadas com arame recozido. Os estribos foram conformados em máquina de dobra manual BK Parts. O cobrimento de 2 cm foi garantido por espaçadores posicionados entre a armadura e as faces internas das formas. A **Figura 23 (A)** mostra esquematicamente o bloco, a barra com UH, as medidas consideradas e a armadura de confinamento, bem como a posição do LVDT na barra tracionada, já a **Figura 23 (B)** e **(C)**, mostram o resultado da armação de confinamento e o conjunto disposto na forma de madeira.

Figura 23 - (A) Esquema da armadura de confinamento, (B) resultado final da armadura pronta e (C) armadura disposta dentro da forma juntamente com a barra.



Fonte: Autor

3.10 INSTRUMENTAÇÃO COM REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓPTICA

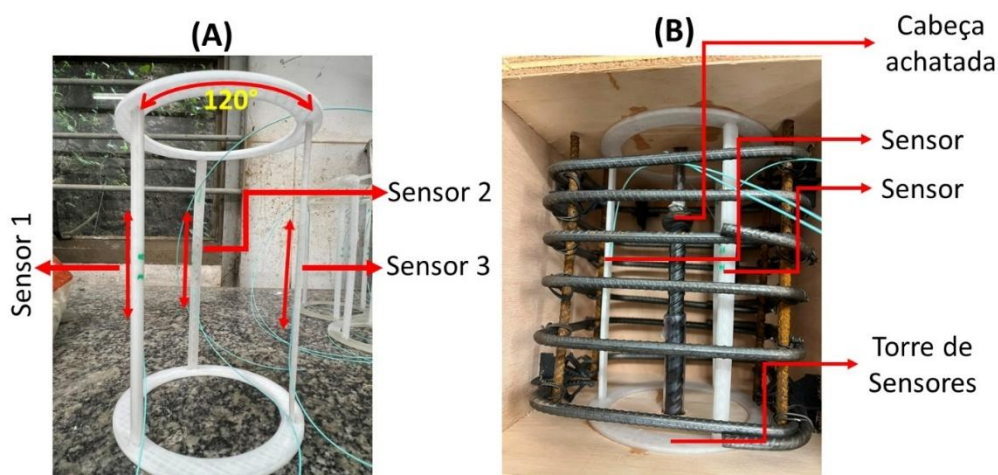
A instrumentação por fibra óptica foi empregada exclusivamente nos blocos com barras de 12,5 mm, produzidos e ensaiados na PUC-Rio. Foram utilizados sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica (FBG), do tipo monomodo, fornecidos pela AtGrating Technologies, com comprimento de onda nominal de 1450 nm.

Para posicionar os sensores no interior dos blocos foi desenvolvido um suporte específico, modelado no SolidWorks e produzido por impressão tridimensional em ácido polilático (PLA), com preparação dos arquivos no PrusaSlicer. Cada suporte apresentava altura total de 20 cm e três colunas laterais. Em cada coluna foi fixada uma rede de Bragg, totalizando três sensores por bloco.

As três redes foram distribuídas ao redor da barra em intervalos angulares de aproximadamente 120° , mantendo distância radial de aproximadamente 6 cm da barra. As fibras foram fixadas às colunas do suporte com adesivo instantâneo multiuso Tec Bond 793, de forma a preservar o posicionamento durante a montagem e a concretagem.

A interrogação das redes foi realizada com interrogador óptico FBG-scan 904, dotado de quatro portas ópticas e conectado a um computador. O software ILLumiSense foi empregado para configuração, monitoramento e armazenamento dos dados. Durante os ensaios foi utilizada frequência de aquisição de 10 Hz. A **Figura 24 (A) e (B)** mostram as torres impressas e as fibras óptica já instaladas, bem como a direção dos sensores, dadas pelas setas próximas as barras.

Figura 24 - Torres de suporte das fibras ópticas impressas e as fibras já instaladas



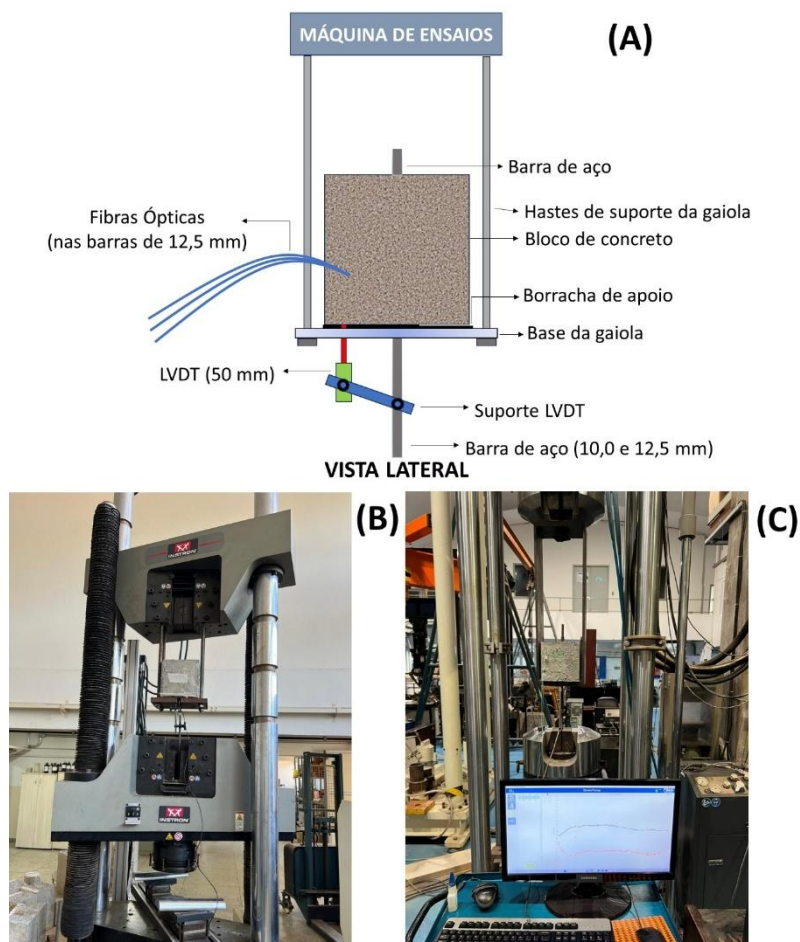
Fonte: Autor

3.11 CONFIGURAÇÃO E EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Os ensaios de arrancamento foram executados aos 28 dias. Para as barras de 10,0 mm, utilizou-se máquina universal de ensaios INSTRON, modelo 1000HDX-C4-G7C, na FECIV/UFU. Para as barras de 12,5 mm, utilizou-se máquina servo-hidráulica de ensaios universais MTS 311, com capacidade de 2000 kN, na PUC-Rio.

Os corpos de prova foram posicionados em uma gaiola metálica, constituída por base e hastes laterais de suporte. Entre o bloco de concreto e a base da gaiola foi disposta uma camada de borracha de apoio. A barra foi alinhada com o sistema de carregamento e solicitada axialmente, de forma a produzir o arrancamento em relação ao bloco, como mostrado de forma esquemática na **Figura 25 (A)** e em **(B)** e **(C)** as imagens do conjunto montado na máquina de ensaios, tanto os ensaios realizados na UFU como na PUC-Rio.

Figura 25 - (A) Configuração esquemática do ensaio de arrancamento e posicionamento dos sistemas de instrumentação, (B) posicionamento do bloco na máquina de ensaios UFU e (C) posicionamento do bloco na máquina de ensaios PUC-Rio



O carregamento foi aplicado sob controle de deslocamento, com velocidade de 2 mm/min, a força de tração foi registrada pelo sistema de aquisição da máquina de ensaios, simultaneamente às leituras do transdutor de deslocamento e, na série de 12,5 mm, às leituras das redes de Bragg.

O deslocamento relativo entre a barra de aço e o bloco de concreto foi monitorado por um transdutor linear de deslocamento (LVDT), fabricante HBM, série WA-T, modelo WA50, com curso nominal de 50 mm e não linearidade padrão de 0,2% da faixa nominal, equivalente a 0,10 mm, com curso de 50 mm, conectado à barra por um suporte específico.

Os registros dos deslocamentos do cursor do LVDT foram capturados com frequência de 5 Hz e posteriormente relacionados às forças aplicadas pela máquina de ensaios, nos blocos instrumentados, às respostas obtidas pelas redes de Bragg. Os deslocamentos registrados pelos LVDTs foram corrigidos para descontar o alongamento da barra de aço provocado pela força de tração aplicada durante o ensaio. Dessa forma, os valores de deslizamento apresentados nas curvas força–deslizamento correspondem ao deslocamento relativo entre a barra e o concreto, após a subtração da parcela associada à deformação longitudinal da barra no trecho considerado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

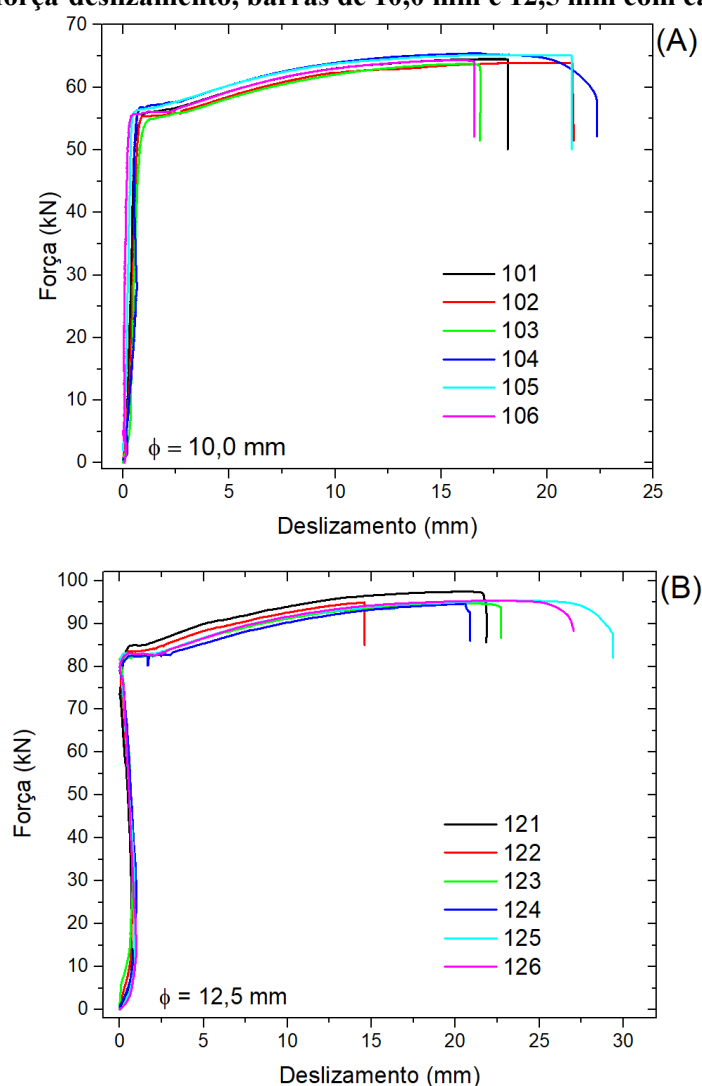
Todas as caracterizações de materiais e ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil e Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio.

A interpretação dos ensaios foi realizada considerando, como parâmetros de referência, as propriedades dos materiais determinadas no programa experimental. Para a série com barras de 10,0 mm, o concreto apresentou resistência média à compressão de 55,48 MPa e as barras apresentaram limite médio de escoamento de 743,81 MPa e para a série com barras de 12,5 mm, os respectivos valores foram 73,78 MPa e 750,61 MPa. Esses valores são retomados neste capítulo apenas como referência para a análise do comportamento de ancoragem, uma vez que sua caracterização foi apresentada no anterior.

4.1 COMPORTAMENTO GLOBAL E MODO DE RUPTURA

A **Figura 26** apresentam as curvas força–deslizamento dos corpos de prova com barras de 10,0 em **(A)** e 12,5 mm em **(B)**, respectivamente. As duas séries de arrancamento apresentaram comportamento global semelhante e baixa dispersão entre os corpos de prova até níveis elevados de força. Inicialmente, observa-se elevada rigidez, seguida por uma mudança acentuada na inclinação das curvas em níveis de força próximos aos associados ao início do escoamento. A partir desse estágio, verifica-se aumento expressivo do deslizamento das barras, enquanto a força continua crescendo de forma mais gradual.

Figura 26 - Curvas força-deslizamento, barras de 10,0 mm e 12,5 mm com cabeça achatada



Fonte: Autor

Para as barras de 10,0 mm, os corpos de prova atingiram forças máximas da ordem de 63 a 65 kN. Para as barras de 12,5 mm, as forças máximas dos ensaios de arrancamento situaram-se aproximadamente entre 94 e 97 kN. As pequenas diferenças entre esses valores são compatíveis com a variabilidade experimental das propriedades mecânicas das barras. Após os ensaios de arrancamento, foi realizada inspeção visual das superfícies externas dos blocos de concreto, não sendo identificadas fissuras visíveis ou manifestações externas de fendilhamento. Essa observação é compatível com a atuação da armadura de confinamento na contenção da fissuração, embora não permita descartar a existência de microfissuras ou danos internos ao concreto.

Esse resultado mostra a eficiência da ancoragem, pois demonstra que o sistema formado pela aderência no trecho reto da barra, cabeça achatada e confinamento do concreto

foi capaz de transferir forças suficientes para que as barras ultrapassassem o início do escoamento até a ruptura do aço.

Comparando resultados de (Marques, 2025) e os obtidos no presente estudo, conforme mostrado na **Tabela 9** para as barras de 10,0 mm.

Tabela 9 - Comparação de resultados obtidos por (Marques, 2025) e o presente estudo para as barras de 10,0 mm

Barras de 10,0 mm			
Parâmetros	Marques (2025)	Presente estudo	Interpretação
Tipo de barras	CA70	CA70	Mesmo com concreto de resistência ligeiramente inferior, as barras com cabeça achatada apresentaram maior capacidade de ancoragem diferentes modos de ruptura. O aumento é da ordem de 26% , na força média máxima não pode ser atribuído exclusivamente à cabeça das barras, pois o presente estudo também possui confinamento transversal.
Tipo de ancoragem	barras retas	barras com cabeça achatada	
Comprimento aderente	5 ϕ	5 ϕ	
Resistência do concreto	62,33 MPa	55,5 MPa	
Força média máxima de tração nas barras	50,5 kN	64,0 kN	
Modo de ruptura	Arrancamento. O limite de escoamento não foi atingido	Ultrapassaram o limite de escoamento, ruptura do aço	

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Marques, 2025) e nos resultados do presente estudo.

Para as barras de 12,5 mm a mesma comparação pode ser feita na **Tabela 10**, destacando as diferenças de resistência do concreto, força máxima, ocorrência de escoamento e modo de ruptura.

Tabela 10 - Comparação de resultados obtidos por (Marques, 2025) e o presente estudo para as barras de 12,5 mm

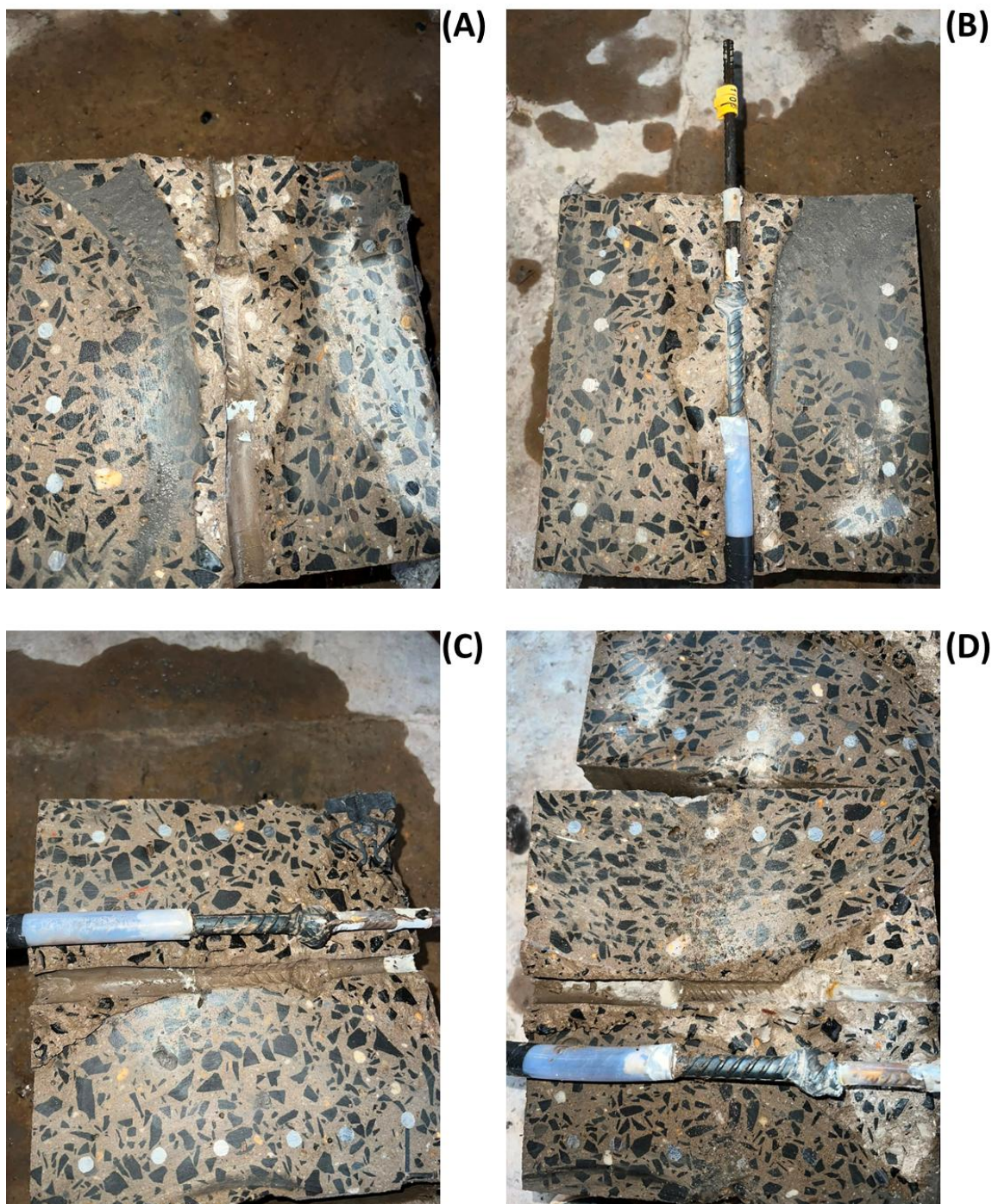
Barras de 12,5 mm			
Parâmetros	Marques (2025)	Presente estudo	Interpretação
Tipo de barras	CA70	CA70	A principal diferença não está no aumento da força máxima, mas na capacidade da ancoragem manter a transferência de esforços após o escoamento e levando a barra até a ruptura.
Tipo de ancoragem	barras retas	barras com cabeça achatada	
Comprimento aderente	5 ϕ	5 ϕ	
Resistência do concreto	78,22 MPa	73,8 MPa	
Força média máxima de tração nas barras	91,0 kN	96,0 kN	
Modo de ruptura	Arrancamento. O limite de escoamento não foi atingido.	As barras ultrapassaram o limite de escoamento. Ruptura do aço	

Fonte: elaborado pelo autor com base em (Marques, 2025) e nos resultados do presente estudo.

Assim conclui-se que efeito do mecanismo de ancoragem foi mais evidente no modo de ruptura e na mobilização da capacidade resistente da barra do que apenas no percentual de aumento da força máxima, ou seja, a eficiência do conjunto cabeça/aderência/confinamento impede a falha prematura da ancoragem e permitir a ruptura da barra, como desejado em condições reais de projeto.

Após os ensaios de arrancamento das barras CA70 de 10,0 mm com cabeça achatada, alguns blocos foram cortados, com o objetivo de permitir a verificação visual da região de ancoragem, como mostrado na **Figura 27** - Blocos cortados após o ensaio de arrancamento das barras de 10,0 mm. As superfícies resultantes do corte possibilitaram observar o estado do concreto ao longo do trecho aderente e nas proximidades da cabeça achatada.

Figura 27 - Blocos cortados após o ensaio de arrancamento das barras de 10,0 mm



Nas imagens analisadas, pode se ver, bem definidas, as nervuras das barras, em diferentes trechos do canal formado no concreto. Esse detalhe indica que houve contato mecânico adequado entre as nervuras e o concreto durante o carregamento. Entretanto, as fotografias não mostram uma falha generalizada das nervuras da barra nem permitem afirmar que ocorreu cisalhamento de mossas de concreto.

Também não se identifica, ruptura do concreto que caracterize a formação de um cone de arrancamento, pois o concreto permanece íntegro fora da vizinhança da barra e da cabeça. As fissuras e perdas de material observadas, sobre as cabeça achatada, são localizadas, sendo compatível com a limitação da propagação de fissuras de fendilhamento devido ao confinamento, o que permitiu que a ancoragem mobilizasse toda a resistência da barra de forma integral.

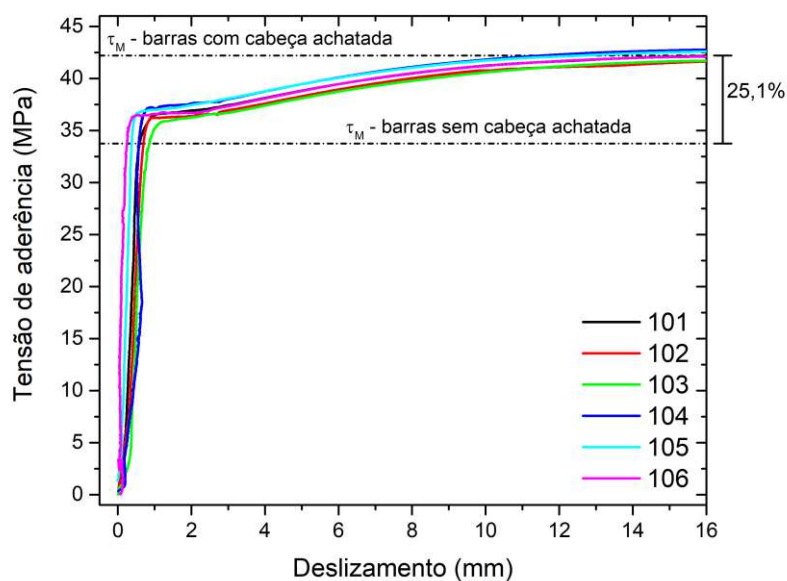
4.2 TENSÃO MÉDIA DE ADERÊNCIA CALCULADA E EFEITO DA CABEÇA ACHATADA

As **Figura 28** e **Figura 29** apresentam as curvas da tensão média de aderência calculada em função do deslizamento. Para comparação, foram incluídos os resultados médios máximos de pesquisas anteriores do grupo para barras sem cabeça, ensaiadas nas mesmas condições e com o mesmo comprimento aderente de cada série, calculadas pela **Equação 39**, onde se obteve os seguintes resultados, 33,74 MPa para barras de 10,0 mm e 32,11 MPa para barras de 12,5 mm (Marques, 2025).

$$\tau = \frac{F}{\pi h_{ed} d_b} \quad \text{Eq. 39}$$

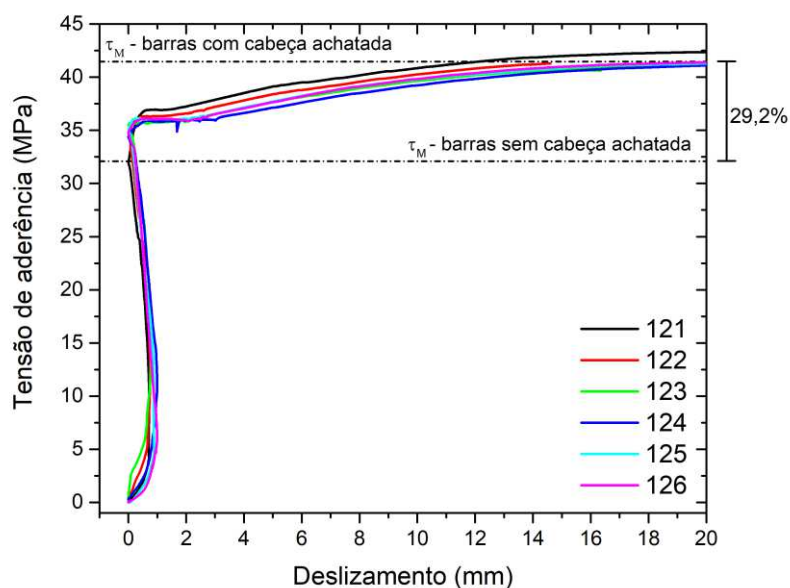
Para as barras com cabeça, a tensão de aderência calculada pela **Equação 39** deve ser entendida como um parâmetro equivalente de capacidade de ancoragem, e não como uma tensão de aderência pura (Singhal; Chourasia; Parashar, 2020). O ACI 318 estabelece que, em barras nervuradas com cabeça, a força é transferida ao concreto pela combinação entre forças de aderência ao longo da barra e força de apoio na cabeça (ACI, 2025). Assim, a comparação direta entre barras com e sem cabeça, mantendo-se diâmetro e comprimento aderente, permite quantificar o ganho global de ancoragem associado à presença da UH.

Figura 28 - Tensão média de aderência calculada em função do deslizamento para barras de 10,0 mm com cabeça achatada em comparação com barras sem cabeça.



Nas barras de 10,0 mm, a tensão média máxima equivalente das barras com cabeça foi aproximadamente 25% superior à referência das barras sem cabeça. Para a série de 12,5 mm, o aumento foi de aproximadamente 29%. Como a área lateral aderente utilizada no cálculo permanece a mesma dentro de cada série, o aumento decorre da maior força total resistida pelo sistema quando a UH está presente.

Figura 29 - Tensão média de aderência calculada em função do deslizamento para barras de 12,5 mm com cabeça achatada em comparação com barras sem cabeça.



A **Tabela 11** evidencia que, embora todos os estudos indiquem contribuição positiva da cabeça para a ancoragem, as condições experimentais diferem de forma significativa quanto à resistência do aço e do concreto, ao diâmetro das barras, ao comprimento aderente, à geometria e ao processo de fabricação da cabeça, às dimensões e configurações dos espécimes e às condições de confinamento. Assim, os percentuais de ganho devem ser interpretados como resultados específicos de cada configuração experimental, e não como valores diretamente equivalentes entre si.

Tabela 11 - Comparação entre o presente estudo e trabalhos da literatura

Parâmetro	Presente estudo	Singhal et al. (2020)	Matsumoto et al. (2008)	Abed et al. (2021)
Tipo de ensaio / elemento	Arrancamento em blocos de concreto	Arrancamento em blocos de concreto	Arrancamento em vigas, com barras ancoradas em cavidades ou dutos preenchidos com graute	Vigas simplesmente apoiadas submetidas a carregamento transversal
Barra (fy)	CA70 nervurada 744 e 751 MPa	Barra nervurada 415 MPa	Barras revestidas com epóxi; predominantemente Grade 60 420 MPa	Barra nervurada 413 MPa
Diâmetro da barra	10,0 e 12,5 mm	12 mm	19, 25 e 36 mm	16 mm
Classe/resistência do concreto (MPa)	55,5 e 73,8	M20*	34–45 MPa conexão com graute cimentício	38,0
Comprimento de ancoragem / aderência	5d _b	6,25d _b 8,33d _b e 10,42d _b	5 a 18d _b	Trechos sem aderência de: 0, 300 e 600 mm
Geometria da cabeça	Cabeça achatada com geometria irregular	Cabeça soldada de 27 mm; perfis liso, ranhurado e nervurado	aproximadamente circular; diâmetro $\approx$ 1,4d _b	Placas quadradas soldadas de: 28, 32, 35 e 38 mm espessura de 8 mm
Confinamento	6 estribos CA50 Ø = 6,3 mm, c/ 30 mm	Não apresentado como variável principal	Variável; espiral e tela soldada em algumas configurações	Não apresentado como variável experimental principal
Ganho de capacidade	25% e 29%	63%, 91% e 95%	20%	48%, 51%, 87% e 98%

*Nota: M20 = classe de concreto com resistência característica à compressão aos 28 dias (f_{ck}) de 20 MPa, segundo a classificação indiana.

Fonte: elaborado pelo autor com base nos estudos citados.

A relação entre a resistência última à tração e a tensão de escoamento (f_u/f_y) das barras CA70 foi de 1,22 para o diâmetro de 10,0 mm e 1,20 para o diâmetro de 12,5 mm, indicando reservas de resistência após o escoamento de aproximadamente 22% e 20%, respectivamente. Nos ensaios realizados, o sistema de ancoragem com cabeça achatada e confinamento transversal foi capaz de transferir os esforços necessários para mobilizar essa resistência adicional, permitindo que a ruptura ocorresse nas próprias barras. Em contrapartida, nos ensaios de referência com barras retas, a ruptura ocorreu por arrancamento antes que o aço atingisse o escoamento. Dessa forma, a principal contribuição observada no sistema estudado foi a manutenção da transferência de esforços durante o regime plástico das barras. Entretanto, a relação f_u/f_y não permite determinar isoladamente a parcela de força transferida pela cabeça achatada, uma vez que a resistência do sistema resulta da atuação conjunta da aderência aço-concreto, do apoio da cabeça e das condições de confinamento.

Cabe destacar que os aumentos de 25% e 29% observados nesta pesquisa podem estar limitados pela resistência última das barras de aço, uma vez que a ruptura ocorreu nas próprias barras, sem que fosse atingida a capacidade última do sistema de ancoragem. Dessa forma, os percentuais obtidos representam os ganhos efetivamente observados nas condições experimentais adotadas, não sendo possível afirmar que correspondam ao aumento máximo proporcionado pela cabeça achatada. Essa limitação também deve ser considerada na comparação com os resultados apresentados na literatura.

Os aumentos de aproximadamente 25% e 29% observados no presente estudo são inferiores a alguns valores relatados na literatura para barras com cabeça. Singhal et al. (2020), por exemplo, encontraram aumentos médios de aproximadamente 63%, 91% e 95%, dependendo do perfil da cabeça, enquanto Abed et al. (2021) relataram aumentos da força de ruptura entre 48% e 98% para diferentes dimensões de cabeça. Matsumoto et al. (2008), por outro lado, observaram aumento de aproximadamente 20% em uma comparação específica. Essas diferenças quantitativas devem, contudo, ser interpretadas considerando as condições particulares de cada programa experimental.

Singhal et al. (2020) utilizaram barras de 12 mm, aço Fe415, concreto M20, blocos de 300×300×200 mm, comprimentos de embutimento entre $6,25d_b$ e $10,42d_b$ e cabeças regulares de 27 mm soldadas às barras. Abed et al. (2021) empregaram barras de 16 mm, com tensão de escoamento de 413 MPa, em vigas de concreto com resistência média de 38 MPa, utilizando placas quadradas soldadas, com dimensões entre 28 e 38 mm, além de diferentes comprimentos sem aderência. Matsumoto et al. (2008), por sua vez, investigaram barras ancoradas em

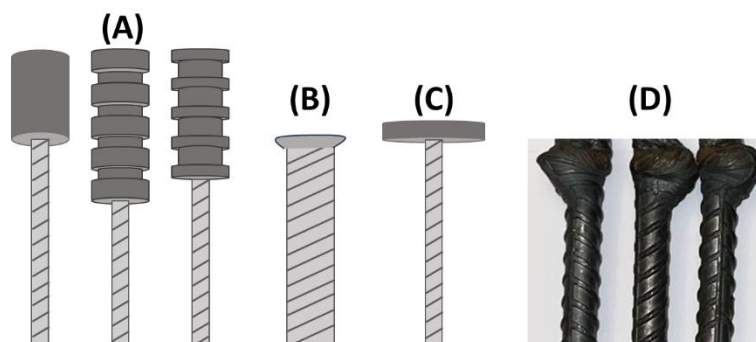
conexões com graute, utilizando diferentes diâmetros e comprimentos de embutimento entre 5d_b e 18d_b, além de diferentes configurações de confinamento.

Além disso, diferentemente das cabeças regulares soldadas empregadas por Singhal et al. (2020), Abed et al. (2021) e Matsumoto et al. (2008), como pode se ver na **Figura 30**, as cabeças avaliadas nesta pesquisa foram produzidas pela conformação da própria extremidade das barras, resultando em geometria achatada e não perfeitamente regular. Outro aspecto relevante é o confinamento dos blocos por seis estribos de 6,3 mm, espaçados a cada 30 mm, destinado a limitar o fendilhamento do concreto (Abed; Abed; Al-Rawe, 2021; Matsumoto *et al.*, 2008; Shao *et al.*, 2016; Singhal; Chourasia; Parashar, 2020).

Dentre os trabalhos apresentados na **Tabela 11**, o estudo de Singhal et al. (2020) apresenta maior proximidade com a configuração experimental adotada nesta pesquisa, principalmente por empregar ensaios de arrancamento de barras com cabeça em blocos de concreto. Entretanto, apesar dessa semelhança quanto ao tipo de ensaio, existem diferenças importantes entre os programas experimentais, incluindo a resistência do aço e do concreto, o comprimento de embutimento, a geometria e o processo de fabricação das cabeças e as condições de confinamento. Dessa forma, os maiores ganhos de capacidade de ancoragem relatados, que atingiram aproximadamente 95% para as cabeças nervuradas, não devem ser comparados diretamente aos percentuais obtidos no presente estudo (Singhal; Chourasia; Parashar, 2020).

Dessa forma, os percentuais de aumento da capacidade de ancoragem encontrados nos diferentes estudos não representam uma comparação direta da eficiência isolada das cabeças, pois variam simultaneamente a resistência do aço e do concreto, o comprimento aderente, a geometria e a forma de fabricação da cabeça, as dimensões e configurações dos espécimes e as condições de confinamento. Ainda assim, os resultados convergem ao demonstrar que a introdução de uma cabeça na extremidade da barra acrescenta um mecanismo de apoio capaz de aumentar a capacidade global de ancoragem. Destaca-se ainda que o presente estudo avaliou barras com resistência de escoamento próxima de 750 MPa e comprimento aderente de apenas 5d_b, condição distinta das principais séries comparativas da literatura considerada.

Figura 30 - Barras com cabeça utilizadas em outras pesquisas. (A)(Singhal; Chourasia; Parashar, 2020) , (B)(Matsumoto *et al.*, 2008) , (C)(Abed; Abed; Al-Rawe, 2021) . e (D) no presente trabalho.



4.3 DEFORMAÇÕES DO CONCRETO MEDIDA PELAS FBG_s

Os sensores FBG foram empregados nos seis corpos de prova da série de 12,5 mm. Dos 18 canais inicialmente previstos, quatro não forneceram dados válidos, conforme mostrado na **Tabela 12**. Permaneceram, portanto, 14 sensores válidos. A identificação adotada associa o número do corpo de prova ao número do sensor.

Tabela 12 - Canais FBG considerados na análise

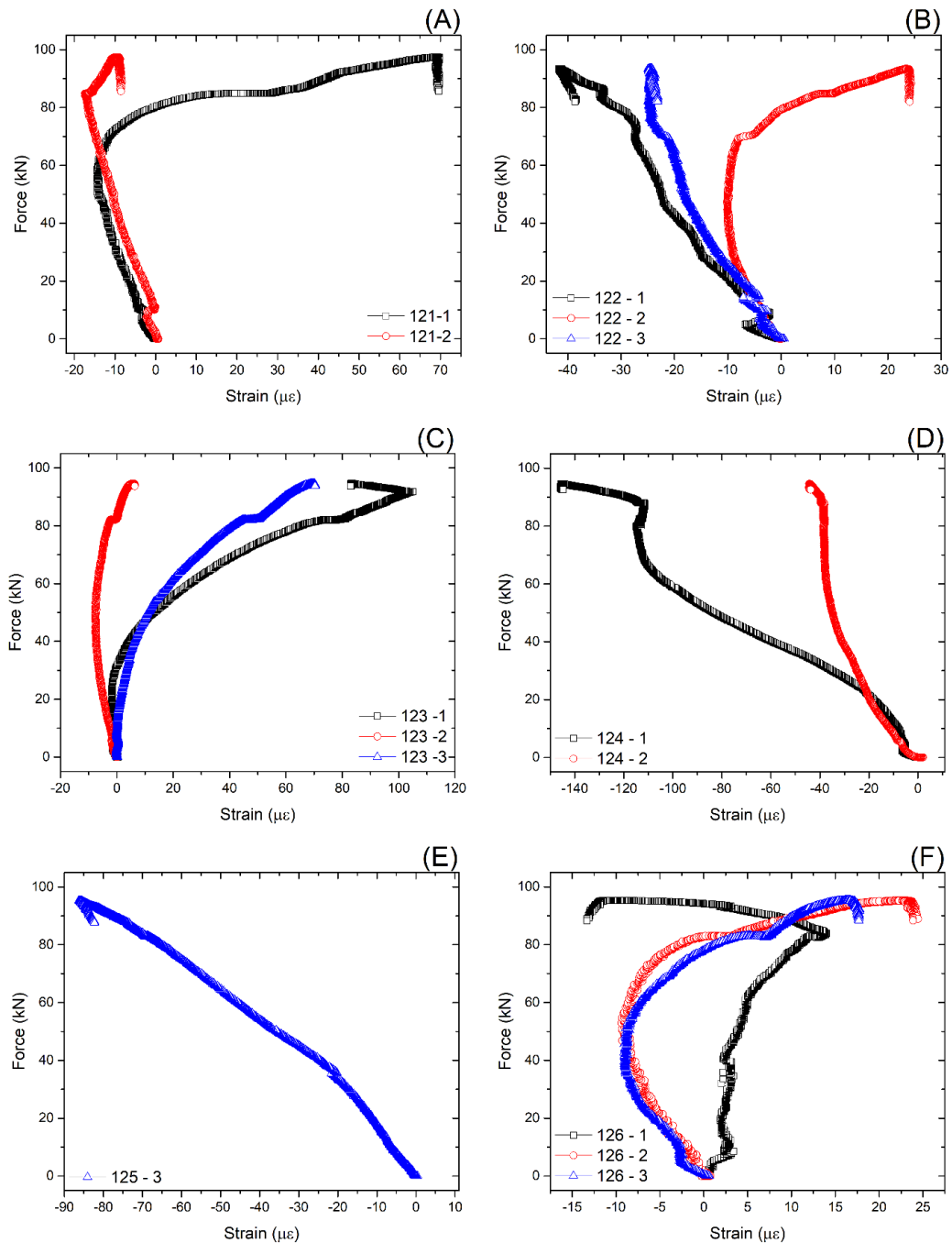
Corpo de prova	Sensores válidos	Sensores excluídos
121	1 e 2	3
122	1, 2 e 3	-
123	1, 2 e 3	-
124	1 e 2	3
125	3	1 e 2
126	1, 2 e 3	-

Fonte: Autor

Tomando-se o valor inicial de cada sensor como zero, os valores positivos representam deformações de tração, enquanto os valores negativos correspondem a deformações de compressão. As curvas força-deformação mostram que os sensores posicionados ao redor de uma mesma barra não registraram respostas idênticas, apesar de terem sido dispostos simetricamente para a realização das medições, conforme apresentado na **Figura 31**. Nos corpos de prova 124 e 125, predominaram deformações de compressão, comportamento compatível com o mecanismo de ancoragem, que promove a formação de campos de tensões compressivas no concreto. No corpo de prova 123, por outro lado, as deformações de tração foram mais evidentes. Esse comportamento pode estar relacionado à geometria assimétrica da cabeça, bem como a possíveis excentricidades do corpo de prova e do sistema de ensaio. Nos

corpos de prova 122 e 126, sensores posicionados em diferentes regiões ao redor da mesma barra registraram deformações com sinais opostos. Em alguns casos, também foram observadas mudanças no sentido da deformação ou na inclinação das curvas durante o carregamento, possivelmente associadas à ocorrência de microfissuração e aos demais aspectos anteriormente mencionados. Essas diferenças indicam que a resposta do concreto ao redor da região de ancoragem não ocorreu de maneira uniforme.

Figura 31 - Curvas força-deformação registradas pelas FBGs nos corpos de prova com barras de 12,5 mm: (A) 121; (B) 122; (C) 123; (D) 124; (E) 125; e (F) 126



Diversos fatores podem contribuir para explicar esse comportamento. Um deles é a possível ocorrência de pequenas excentricidades na aplicação da força ou de flexão local do bloco de concreto durante o ensaio de arrancamento. Mesmo uma pequena excentricidade pode produzir diferentes níveis de deformação em posições distintas ao redor da barra. Como consequência, um sensor pode registrar tração enquanto outro, localizado em posição oposta, registra compressão. Respostas dependentes da posição do sensor também têm sido relatadas em elementos de concreto armado monitorados por sensores ópticos, especialmente quando o carregamento não se encontra perfeitamente centrado (Lin *et al.*, 2025).

Outro fator importante é o campo tridimensional e não simétrico de tensões produzido pela atuação da cabeça. Parte da força desenvolvida na barra é transferida diretamente ao concreto por meio do apoio da cabeça, produzindo tensões de compressão na região à sua frente. Entretanto, o concreto ao redor dessa região também se deforma em outras direções, uma vez que o campo de compressão apresenta distribuição não linear. Dessa forma, componentes de deformação de tração podem se desenvolver nas regiões adjacentes ao campo comprimido. Como os sensores FBG foram posicionados em diferentes posições angulares ao redor da barra, cada sensor pode registrar uma componente distinta dessa resposta tridimensional.

A geometria das cabeças também pode contribuir para a resposta não uniforme observada. As cabeças foram produzidas por aquecimento localizado seguido de compressão da extremidade das barras, tendo sido observadas pequenas diferenças de forma, dimensões e simetria entre os corpos de prova, conforme mostrado na **Figura 19** e **Figura 20**. Como a superfície das cabeças não apresenta geometria perfeitamente regular e simétrica, as condições de contato entre a cabeça e o concreto podem variar ao redor da barra. Consequentemente, os esforços transferidos pela cabeça podem não se distribuir igualmente em todas as direções, contribuindo para as diferenças de amplitude e de sinal das deformações registradas pelos sensores FBG.

A armadura de confinamento também deve ser considerada. Embora tenha sido utilizada a mesma configuração de armadura em todos os corpos de prova, o posicionamento real dos estribos e das barras longitudinais não pode ser perfeitamente idêntico em todas as direções, como observado na **Figura 23**. Pequenas diferenças de posicionamento podem produzir alterações locais de rigidez e influenciar a forma como o concreto se deforma ao redor da região de ancoragem.

A heterogeneidade do concreto constitui outra possível fonte de variações locais. O concreto não é um material homogêneo, e a distribuição local dos agregados graúdos, da

argamassa e dos vazios pode provocar diferenças de rigidez nas proximidades de cada sensor. Assim, dois sensores localizados à mesma distância da barra não necessariamente registram a mesma resposta de deformação. Wang et al. (2024) também observaram distribuições internas não uniformes de deformação no concreto por meio de sensores ópticos, demonstrando que diferentes posições dentro de um mesmo elemento podem apresentar diferentes históricos de deformação (Wang *et al.*, 2024).

Os sensores FBG embutidos no concreto permitem monitorar as deformações desenvolvidas no material durante a aplicação do carregamento. Entretanto, a precisão dessas medidas depende da adequada transferência de deformação entre o concreto e a fibra óptica. Assim, fatores como o posicionamento, o alinhamento e as condições de contato da fibra com o concreto podem influenciar os valores registrados. Nesse sentido, Weisbrich et al. (2026) destacam a importância da transferência de deformação entre o material cimentício, o revestimento da fibra e a própria fibra óptica para a resposta dos sensores embutidos (Weisbrich; Messerer; Holschemacher, 2026).

A ocorrência de pequenas curvaturas locais na fibra óptica também pode contribuir para a resposta medida. Caso a fibra apresente alguma curvatura ou se desloque de sua posição prevista durante a concretagem, parte do sinal registrado pode estar associada à deformação por flexão da própria fibra, e não exclusivamente à componente de deformação esperada para sua posição original. Por esse motivo, as diferenças observadas entre os sensores, especialmente mudanças de sinal ou de inclinação das curvas, não devem ser associadas isoladamente a um único evento mecânico.

De modo geral, os resultados sugerem que as diferentes respostas registradas pelas FBGs decorrem da ação combinada do mecanismo tridimensional de transferência de esforços, de possíveis pequenas excentricidades do carregamento, da geometria não uniforme das cabeças, das condições de confinamento, da heterogeneidade do concreto e das particularidades da instalação da fibra óptica embutida. Os resultados apresentados por Wang et al. (2024), Lin et al. (2025), Jo et al. (2023) e Weisbrich et al. (2026) também mostram que sensores ópticos embutidos no concreto podem registrar diferentes amplitudes e até mesmo sinais distintos de deformação em função da posição do sensor e das condições locais (Jo *et al.*, 2023; Lin *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2024; Weisbrich; Messerer; Holschemacher, 2026).

4.4 EVOLUÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇOS E MOBILIZAÇÃO DA UH

A análise conjunta das curvas força-deslizamento e força-deformação contribui para a compreensão da evolução do mecanismo de ancoragem. O ACI 318 estabelece que, para barras nervuradas com cabeça, a força aplicada é transferida ao concreto pela ação combinada da aderência desenvolvida ao longo da barra e do apoio proporcionado pela cabeça (ACI, 2025). Estudos compilados por Shao et al. (2016) indicam uma resposta progressiva desse mecanismo: inicialmente, a aderência ao longo da barra é responsável pela maior parcela da transferência de esforços. Com o aumento do deslizamento, sua contribuição diminui e uma parcela maior da força passa a ser transferida pela cabeça (Shao *et al.*, 2016).

Nos resultados do presente estudo, as deformações registradas pelos sensores FBG variaram em função do aumento da força aplicada à barra, evidenciando que os esforços transferidos da barra para o concreto produziram deformações mensuráveis no material ao seu redor. Essa resposta permaneceu detectável até níveis de força próximos à ruptura do aço. O fato de diferentes sensores terem registrado deformações tanto de tração quanto de compressão indica a existência de um mecanismo assimétrico e não uniforme de transferência de esforços ao redor da barra. Esse comportamento pode estar parcialmente relacionado à geometria irregular da cabeça achatada, uma vez que diferenças em sua forma e simetria podem produzir condições de apoio não uniformes e, conseqüentemente, diferentes respostas locais de deformação no concreto circundante. A interpretação de uma mobilização progressiva da cabeça é consistente com os mecanismos descritos por Shao et al. (2016) e com as disposições do ACI 318 (ACI, 2025; Shao *et al.*, 2016). Matsumoto et al. (2008), a partir de medições de deformação, demonstraram que uma parcela significativa da força máxima pode ser transferida por meio da cabeça (Matsumoto *et al.*, 2008). Dessa forma, o aumento da capacidade equivalente de ancoragem apresentadas nas **Figura 28** e **Figura 29**, associado ao desenvolvimento das deformações internas registradas pelos sensores FBG, sustentam a interpretação de que a cabeça achatada participa efetivamente da transferência de esforços da barra para o concreto.

Os resultados obtidos devem ser interpretados considerando o comportamento global do sistema de ancoragem. Os sensores FBG, embutidos no concreto, permitiram medir as deformações desenvolvidas ao redor da barra durante a aplicação do carregamento, acompanhando a resposta do concreto aos esforços transferidos pela armadura. Entretanto,

essas medições, isoladamente, não permitem quantificar a parcela da força transferida pela aderência entre o aço e o concreto e aquela transmitida pelo apoio da cabeça achatada. Assim, a principal contribuição dos sensores FBG consiste no monitoramento da evolução das deformações internas do concreto durante a mobilização do sistema de ancoragem.

4.5 EFICIÊNCIA DA UH E CONTRIBUIÇÃO DO MONITORAMENTO ÓPTICO

A análise conjunta dos resultados mecânicos e ópticos evidencia dois aspectos principais. Primeiro, a presença da cabeça achatada proporcionou aumento da capacidade global de ancoragem de aproximadamente 25% para as barras de 10,0 mm e 29% para as barras de 12,5 mm, em comparação com as barras de referência sem cabeça. Segundo, nos corpos de prova instrumentados, os sensores FBG permitiram acompanhar a evolução da resposta interna do concreto à medida que o mecanismo de ancoragem foi mobilizado. Os aumentos de 25% a 29% observados nos ensaios devem ser interpretados considerando o modo de ruptura das barras de aço. As resistências últimas à tração foram de 904,33 MPa para as barras de 10,0 mm e 900,73 MPa para as barras de 12,5 mm de diâmetro. Como a ruptura ocorreu nas barras, sem que fosse atingida a capacidade última do sistema de ancoragem, os resultados demonstram que a ancoragem com cabeça achatada foi capaz de desenvolver a resistência última do aço. Dessa forma, os ganhos percentuais obtidos representam os aumentos efetivamente observados nas condições experimentais, podendo ser inferiores à capacidade potencial do sistema. Para avaliar diretamente a resistência última da ancoragem, seriam necessários ensaios adicionais com configurações que favorecessem a falha da ancoragem antes da ruptura do aço, como a redução do comprimento de aderência.

Enquanto as curvas força-deslizamento fornecem uma medida global do comportamento do sistema, os sensores ópticos mostram que a transferência de esforços produz diferentes respostas locais ao redor da barra. Wang et al. (2024), Lin et al. (2025), Jo et al. (2023) e Weisbrich et al. (2026), utilizando diferentes configurações experimentais, demonstraram que sensores ópticos embutidos podem registrar campos internos de deformação não uniformes, mudanças no sinal das deformações, gradientes de deformação e efeitos locais associados ao campo de tensões desenvolvido no concreto (Jo et al., 2023; Lin et al., 2025; Wang et al., 2024; Weisbrich; Messerer; Holschemacher, 2026). De maneira semelhante, Croppi et al. (2024) utilizaram sensores de fibra óptica aderidos longitudinalmente a barras de

armadura instaladas posteriormente para determinar distribuições contínuas de tensão de aderência, demonstrando a aplicabilidade do monitoramento óptico na caracterização da transferência não uniforme de esforços em regiões de ancoragem. Essa abordagem é compatível com as observações obtidas por meio das FBGs no presente estudo (Croppi *et al.*, 2024). Em abordagem relacionada, Ahmed *et al.* (2024) empregaram sensores FBG embutidos para determinar distribuições de tensão de aderência ao longo de barras de armadura em elementos de concreto armado, reforçando a aplicabilidade do monitoramento baseado em FBG na caracterização dos mecanismos internos de transferência de esforços discutidos nesta pesquisa (Ahmed *et al.*, 2024).

4.6 DISCUSSÃO GERAL DO COMPORTAMENTO DE ANCORAGEM E DA RESPOSTA DAS FBGs

De modo geral, os resultados sugerem que a transferência de esforços da barra para o concreto na região da cabeça ocorre de maneira não uniforme e assimétrica, uma vez que sensores instalados em posições angulares separadas por aproximadamente 120° registraram respostas bastante distintas dentro de um mesmo bloco. Alguns sensores apresentaram predominantemente deformações de compressão, outros registraram deformações de tração e, em determinados casos, ocorreu mudança no sentido da deformação durante o carregamento. Esse comportamento sugere a formação de um campo tridimensional complexo de tensões ao redor da cabeça, do qual podem ser destacados quatro aspectos principais.

i. Em praticamente todos os sensores considerados válidos, a magnitude das deformações aumentou com o incremento da força aplicada. Em outras palavras, os sensores FBG apresentaram respostas coerentes com a evolução do carregamento. Esse comportamento é particularmente evidente nos corpos de prova 123, 124 e 125, nos quais se observa uma relação progressiva entre força e deformação.

ii. A resposta apresentou forte dependência da posição angular do sensor, como observado no corpo de prova 123. Os sensores 1 e 3 atingiram deformações de aproximadamente 100 e 70 $\mu\epsilon$, respectivamente, enquanto o sensor 2 permaneceu próximo de zero e apresentou valores ligeiramente negativos durante grande parte do carregamento. Uma resposta ainda mais complexa foi observada no corpo de prova 122, no qual os sensores 1 e 3 registraram deformações de compressão, enquanto o sensor 2 evoluiu para deformações de

tração. Esses resultados sugerem que a atuação da cabeça não produz simplesmente um campo uniforme de compressão no concreto.

iii. Algumas respostas podem indicar uma possível redistribuição do campo local de tensões durante o carregamento, embora essa interpretação deva ser considerada com cautela, em razão do número limitado de corpos de prova instrumentados (ver também Seção 4.3). O corpo de prova 126 constitui um exemplo desse comportamento, uma vez que as três curvas modificaram significativamente suas trajetórias ao longo do ensaio. Inicialmente, as respostas encontravam-se relativamente próximas e, com o aumento da força, passaram a divergir, com algumas curvas cruzando o valor zero ou apresentando alterações evidentes de inclinação. Esse comportamento pode ser interpretado como um possível indicativo de reorganização gradual da transferência de esforços à medida que a cabeça é mobilizada, sugerindo que o estado local de deformações não evolui de maneira simplesmente proporcional à força aplicada durante todo o ensaio.

iv. A região próxima à cabeça desenvolve um estado combinado de compressão e tração, comportamento mecanicamente compatível com o mecanismo de ancoragem. A cabeça exerce pressão sobre o concreto localizado à sua frente, produzindo uma região predominantemente comprimida. Simultaneamente, esse material comprimido tende a se deformar lateralmente, podendo originar deformações transversais e tensões de tração em outras direções. Como os sensores foram distribuídos ao redor da barra, cada um pode registrar uma componente distinta desse campo tridimensional de tensões. A heterogeneidade do concreto também pode contribuir para essas diferenças locais.

Os valores relativamente reduzidos de deformação registrados também devem ser considerados na interpretação dos resultados. Muitos sensores permaneceram na faixa de algumas dezenas de microdeformações, enquanto alguns atingiram aproximadamente 100 a 140 $\mu\epsilon$. Esses valores não são incompatíveis com os elevados níveis de força aplicados, uma vez que os sensores estavam posicionados a aproximadamente 6 cm da barra e, portanto, não mediam diretamente as deformações na interface entre a barra, a cabeça e o concreto. As medições indicam, assim, que o campo de deformações produzido pelo mecanismo de ancoragem se propaga pelo bloco de concreto e permanece detectável mesmo a essa distância da armadura.

Entretanto, deve-se considerar que a posição dos sensores pode ter influenciado a magnitude das deformações registradas. As FBGs foram instaladas a aproximadamente 6 cm da cabeça da barra e próximas à armadura de confinamento, condição que pode ter alterado localmente o campo de deformações do concreto. Assim, sensores posicionados mais próximos

à cabeça e mais afastados da armadura transversal poderiam, em estudos futuros, fornecer uma leitura mais diretamente associada ao mecanismo de transferência de esforços da ancoragem. Essa condição, entretanto, não invalida os resultados obtidos, devendo ser considerada apenas na interpretação das deformações medidas.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou experimentalmente o comportamento de ancoragem de barras de aço de alta resistência com cabeça achatada, com tensão nominal de escoamento de 700 MPa. Foram analisadas barras com diâmetros nominais de 10,0 e 12,5 mm, ambas com comprimento aderente correspondente a 5ϕ . Os blocos de concreto da série com barras de 12,5 mm também foram monitorados internamente por meio de sensores FBG posicionados no concreto ao redor da barra a uma distância de aproximadamente 6 cm.

Os ensaios de arrancamento mostraram que a configuração de ancoragem adotada foi capaz de desenvolver elevados níveis de força sem ocorrência de ruptura dos blocos de concreto. Em todos os corpos de prova ensaiados, o modo de ruptura ocorreu na barra de aço, indicando que, nas condições avaliadas, o sistema de ancoragem com cabeça permitiu mobilizar a capacidade resistente da armadura com tensão nominal de escoamento de 700 MPa antes da ocorrência de uma falha prematura de ancoragem.

O monitoramento por FBG mostrou que a transferência de esforços para o concreto produz um campo de deformações complexo e assimétrico ao redor da barra, com sensores posicionados em diferentes regiões registrando deformações tanto de tração quanto de compressão. Em alguns corpos de prova, também foram observadas alterações na relação força-deformação, mudanças de tendência e possíveis redistribuições das deformações durante o carregamento. Essa resposta tridimensional e não uniforme pode estar associada à influência conjunta de diversos fatores locais. A geometria irregular e possíveis excentricidades das cabeças achatadas podem produzir condições não uniformes de contato e apoio sobre o concreto, originando diferentes componentes locais de deformação. Pequenas excentricidades do carregamento também podem provocar flexão local durante o ensaio de arrancamento, enquanto pequenas variações nas posições reais dos estribos e das barras longitudinais podem gerar assimetrias no confinamento e variações locais de rigidez. Além disso, a heterogeneidade do concreto, particularmente a distribuição dos agregados graúdos, da argamassa e dos vazios, pode influenciar a magnitude e o sinal das deformações registradas por cada sensor. Dessa forma, as medições realizadas pelas FBGs indicam um mecanismo tridimensional e não uniforme de transferência de esforços ao redor da barra com cabeça, resultante da atuação combinada desses fatores, e não de um único mecanismo isolado.

A análise conjunta dos resultados mecânicos e ópticos indica que a cabeça achatada foi efetivamente mobilizada, contribuindo para o aumento da capacidade de ancoragem das

barras ensaiadas. Nas condições experimentais adotadas, a atuação conjunta da aderência aço-concreto, da cabeça achatada e do confinamento permitiu que a ruptura final ocorresse na própria armadura. Por sua vez, o monitoramento por sensores FBG possibilitou registrar a evolução e a distribuição não uniforme das deformações desenvolvidas no concreto durante a transferência de esforços. Dessa forma, além de evidenciar a eficiência do sistema de ancoragem com cabeça achatada nas condições investigadas, o estudo demonstra o potencial dos sensores FBG como ferramenta experimental para o monitoramento das deformações internas do concreto e para a compreensão do comportamento de sistemas de ancoragem mecânica.

A posição dos sensores em relação à cabeça da barra e à armadura de confinamento deve ser considerada na interpretação dos resultados, uma vez que pode influenciar localmente o campo de deformações. Em trabalhos futuros, recomenda-se avaliar posições mais próximas à cabeça da barra e mais afastadas da armadura transversal.

Como continuidade desta pesquisa, estudos futuros devem avaliar diferentes geometrias e dimensões de cabeça, bem como investigar diferentes posições dos sensores e distâncias em relação à barra. Essas modificações poderão permitir uma descrição mais detalhada da evolução espacial da transferência de esforços e contribuir para uma distinção mais clara entre a parcela associada à aderência desenvolvida ao longo da barra e aquela relacionada ao apoio mecânico proporcionado pela cabeça. Essa linha de investigação é compatível com resultados recentes obtidos para barras com cabeça de grande diâmetro ancoradas em regiões de interrupção de armaduras em vigas, nos quais as disposições atuais do ACI 318 e do *Korean Design Standard* (KDS) apresentaram resultados não conservadores sob determinadas condições de confinamento, reforçando a importância da validação experimental considerando as particularidades geométricas e de confinamento do sistema de ancoragem (Jung, 2026).

REFERÊNCIAS

ABECE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA ESTRUTURAL. **008: Barras de aço com 700 MPa de resistência característica ao escoamento (CA-70): projeto de blocos de fundação**. São Paulo: ABECE, 2024.

ABED, H. S.; ABED, J. M.; AL-RAWI, H. S. Anchorage behavior of headed bars in reinforced concrete beams. *Structures*, v. 29, p. 1954–1959, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.066>.

AHMED, M. et al. Accurate measurement of the bond stress between rebar and concrete in reinforced concrete using FBG sensing technology. *Scientific Reports*, v. 14, art. 2119, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52555-w>.

ALMEIDA, P. et al. Estudo da fadiga do vergalhão CA-70. *Revista Estrutura*, n. 16, p. 77–78, 2025.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI CODE-318-25: Building Code for Structural Concrete – Code Requirements and Commentary**. Farmington Hills, MI: ACI, 2025.

ARCELORMITTAL. **ArcelorMittal 50 Soldável de Alta Resistência CA 50 S AR**. [S. l.]: ArcelorMittal, 2023.

ASSIS JÚNIOR, E. C. de. **Análise numérica da ancoragem em ligações do tipo viga-pilar de extremidade**. 2017. 133 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-1: Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15823-2: Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BERTAZZOLO, B. B.; CECIL, R. T.; MENEGHETTI, L. C. O comprimento de ancoragem na NBR 6118-23: uma comparação entre modelos. *Revista Estrutura*, n. 16, p. 70–74, 2025.

BERTOLDO MENEZES, D. et al. Dosagem de concreto autoadensável com otimização do empacotamento de partículas em planilha eletrônica integrada. *Revista Científica Semana Acadêmica*, v. 14, n. 272, p. 1–23, 2026. DOI: <https://doi.org/10.35265/2236-6717-272-13335>.

- CAIRNS, J. Bond and anchorage of embedded steel reinforcement in fib Model Code 2010. **Structural Concrete**, v. 16, n. 1, p. 45–55, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201400043>.
- CASTRO, C. M. de. **Concreto de alto desempenho: estudo da aderência com a armadura sob ações repetidas**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- CRAVEIRO, H.; LAÍM, L.; SANTIAGO, A. CA-70: comportamento em altas temperaturas. **Revista Estrutura**, n. 16, p. 75–76, 2025.
- CROPPI, J. I.; AHRENS, M. A.; GENESIO, G.; PICCININ, R.; CASUCCI, D.; MARK, P. Bond stresses in post-installed reinforcing bars derived via fiber optic sensors. **Structural Concrete**, v. 25, n. 3, p. 1884–1899, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.202300877>.
- DOS SANTOS, R. A. et al. Use of numerical method for optimization of granulometric curves in eco-efficient concrete. **Matéria**, v. 26, n. 4, e13115, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1315>.
- EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **fib Model Code for Concrete Structures (2020)**. Lausanne: fib, 2023.
- FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions**. New York: Springer, 1994.
- FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2013.
- JO, H. J. et al. Real-time monitoring of concrete curing using fiber Bragg grating sensors: strain and temperature measurement. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 362, art. 114650, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114650>.
- JUNG, H.-S. Anchorage strength model for large-diameter headed bars anchored at the cutoff point. **Applied Sciences**, v. 16, n. 5, art. 2599, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/app16052599>.
- KANG, T. H. K.; HA, S. S.; CHOI, D. U. Bar pullout tests and seismic tests of small-headed bars in beam-column joints. **ACI Structural Journal**, v. 107, n. 1, p. 32–42, 2010. DOI: <https://doi.org/10.14359/51663386>.
- KANTHASAMY, E. et al. Web crippling behaviour of cold-formed high-strength steel unlipped channel beams under End-One-Flange load case. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, e01022, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01022>.
- LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Rio de Janeiro: Interciência, 1977.
- LIN, H. et al. Long-Gauge Fiber Optic Sensors: Strain Measurement Comparison for Reinforced Concrete Columns. **Sensors**, v. 25, n. 1, art. 220, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25010220>.
- LUTZ, L. A.; GERGELY, P. Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete. **ACI Journal Proceedings**, v. 64, n. 11, p. 711–721, 1967. DOI: <https://doi.org/10.14359/7600>.

- MACIOSKI, G.; SANCHEZ, L. F. M.; MEDEIROS, M. H. F. de. Multiscale monitoring of alkali-silica reaction in concrete with embedded fiber Bragg grating sensors. **Construction and Building Materials**, v. 495, art. 143718, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143718>.
- MARQUES, E. B. **Estudo da aderência entre concreto e aço de alta resistência**. 2025. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.
- MARTOS, L. G. C. **Modelagem de empacotamento de partículas multifatorial utilizando redes neurais**. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2023.
- MATSUMOTO, E. E. et al. Development of a precast concrete bent-cap system. **PCI Journal**, v. 53, n. 3, p. 74–99, 2008. DOI: <https://doi.org/10.15554/pcij.05012008.74.99>.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008.
- MOREIRA, A. R.; FONTANA, P.; MEO, B. M. Estudo sobre a eficiência e aplicação do aço GG 70 (Gerdau) em obras de arte especiais: um estudo de caso. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 14.**, 2023. Anais [...], 2023.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- QIAO, H. et al. Fiber Optic-Based Durability Monitoring in Smart Concrete: A State-of-Art Review. **Sensors**, v. 23, n. 18, art. 7810, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23187810>.
- RIDEIRO E SILVA, M.; PUPIN, L. A.; ARAÚJO, L. F. CA-70: avanços em normas e nas aplicações. **Revista Estrutura**, n. 16, p. 69–70, 2025.
- SHAO, Y.; DARWIN, D.; O'REILLY, M.; LEQUESNE, R. D.; GHIMIRE, K.; HANO, M. **Anchorage of conventional and high-strength headed reinforcing bars**. Lawrence, KS: University of Kansas Center for Research, 2016. SM Report No. 117.
- SINGHAL, S.; CHOURASIA, A.; PARASHAR, J. Anchorage behaviour of headed bars as connection system for precast reinforced concrete structural components. **Structures**, v. 27, p. 1405–1418, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.043>.
- TANG, F. et al. A review on fiber optic sensors for rebar corrosion monitoring in RC structures. **Construction and Building Materials**, v. 313, art. 125578, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125578>.
- TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. In: **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011.
- TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2008.
- WANG, S. et al. Distributed fiber optic sensing for internal strain monitoring in full life cycle of concrete slabs with BOFDA technology. **Engineering Structures**, v. 305, art. 117798, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117798>.
- WEISBRICH, M.; MESSERER, D.; HOLSCHEMACHER, K. Measurement of early age deformations in cement-based materials using distributed fiber optic sensors. **Cement and**

Concrete Composites, v. 165, art. 106353, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106353>.

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced Concrete: Mechanics and Design**. Boston: Pearson, 2011.

YANG, J. M.; MIN, K. H.; SHIN, H. O.; YOON, Y. S. The use of T-headed bars in high-strength concrete members. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES – FRAMCOS-7**, 7., 2010. **Proceedings [...]**. 2010.

YASSIN, M. H. et al. Fiber Bragg grating (FBG)-based sensors: a review of technology and recent applications in structural health monitoring (SHM) of civil engineering structures. **Discover Civil Engineering**, v. 1, art. 151, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00141-4>.

ZULINI, I. **Efeito do confinamento na aderência entre barras de aço e concreto de alta resistência à compressão**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.