



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE BELÉM
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

Rafaela Novaes Silva
Lucas Pereira Benjamin Ferreira

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DO
CONE DE CONCRETO DE CONECTORES PRÉ-INSTALADOS COM CABEÇA COM
ARMADURAS SUPLEMENTARES.

BELÉM
2025

Rafaela Novaes Silva
Lucas Pereira Benjamin Ferreira

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DO
CONE DE CONCRETO DE CONECTORES PRÉ-INSTALADOS COM CABEÇA COM
ARMADURAS SUPLEMENTARES.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de engenharia civil,
do Campus Universitário de Belém, da
Universidade Federal do Pará, como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em engenharia civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Maurício de Pina
Ferreira.

BELÉM
2025

Rafaela Novaes Silva
Lucas Pereira Benjamin Ferreira

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DO
CONE DE CONCRETO DE CONECTORES PRÉ-INSTALADOS COM CABEÇA COM
ARMADURAS SUPLEMENTARES.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de engenharia civil, do Campus
Universitário de Belém, da Universidade Federal do
Pará, como requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em engenharia civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira.

Data de aprovação: ____/____/____

Conceito:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Manoel José Mangabeira Pereira Filho
Membro Interno (UFPA)

Profa..Dra. Karoline Dantas dos Santos
Membro Externo (CESUPA)

*Aos que, com sua paixão pela ciência,
nos inspiram a acreditar no progresso.*

Agradecimentos

Aos meus pais, que foram meus primeiros e maiores professores, transmitindo ensinamentos que moldaram minha visão profissional e pessoal. Com vocês aprendi, antes mesmo de pisar em uma sala de aula, que o conhecimento verdadeiro não está apenas nos livros, mas na vivência, na observação e, principalmente, na coragem de enfrentar desafios. Agradeço por todo o apoio, desde os dias em que as dúvidas pesavam sobre mim até aqueles em que a alegria das conquistas preenchia o caminho.

Mãe, obrigada por ser minha bússola. Quantas vezes, em meio à incerteza, recorri a você com uma simples mensagem, buscando o seu olhar sábio? Mesmo distante, você sempre esteve perto, me guiando com palavras certeiras e um amor que atravessa qualquer distância.

Paí, sem saber, você me ensinou muito mais do que imagina. Com você aprendi que inovar é ter coragem para enxergar além do óbvio e que arriscar-se, quando necessário, é a única forma de ir além.

Às minhas irmãs, minhas referências absolutas. Em vocês vejo a definição de garra, inteligência e determinação. Se hoje sou quem sou, é porque tive o privilégio de crescer ao lado de pessoas tão determinadas, que me ensinaram, com o exemplo, a enfrentar os desafios com persistência. Muito do que sou hoje é reflexo da sabedoria e do apoio que sempre recebi de vocês, me mostrando a importância de agir com foco e equilíbrio diante das dificuldades.

Ao meu orientador, Maurício Pina, que, além da orientação acadêmica, contribuiu com ensinamentos práticos e conselhos que marcaram minha trajetória. Também esteve presente nos momentos de incerteza, sempre com palavras de apoio que fizeram diferença. Agradeço pela paciência e por todas as vezes em que precisei de orientação muito além do TCC.

Agradeço imensamente à Karoline Dantas, que com dedicação e carinho nos acompanhou desde o primeiro dia dessa caminhada. Sempre foi para mim uma inspiração, tanto na vida acadêmica quanto profissional, e a ela devo grande parte do meu aprendizado. Se alcançamos nossos objetivos, muito se deve ao olhar atento e engrandecedor que sempre nos ofereceu.

A todos os amigos do NUMEA que contribuíram de forma significativa para a nossa formação desde os primórdios, seja com uma palavra amiga, uma crítica construtiva ou até mesmo como fonte de inspiração por suas conquistas. Meu sincero obrigado a Mayara Gonçalves, Layse Furtado, Rodrigo Moraes, Arlene Alves, Erick Rocha, Jedson Abrantes e Thayna Bittencourt. Em especial, ao Victor Gonçalves, pelo grande auxílio e dedicação nos longos dias dos ensaios experimentais.

Rafaela Novaes Silva

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço profundamente à minha família, que foi o meu alicerce durante toda essa caminhada. Aos meus pais, Dione Benjamin e Cecílio Ferreira, por todo amor, paciência e apoio incondicional. Ao meu irmão, Luis Benjamin, pelo incentivo constante, pelas palavras de motivação nos momentos mais difíceis e pela presença que sempre me fortaleceu. À minha vó, Ruth Pereira, minhas tias, tio e primos: Djane Benjamin, Dayse Benjamin e Daniel Benjamin, Eduardo Benjamin e Davi Benjamin, por estar ao meu lado nos momentos de incerteza e por celebrar comigo cada pequena conquista. À minha parceira Cintia Kerian, por todo apoio e compreensão durante esse processo. A cada um de vocês, meu carinho eterno e minha mais sincera gratidão. Sem o suporte familiar, esse trabalho não seria possível.

Agradeço com especial consideração ao meu orientador, Maurício Pina, por toda dedicação, profissionalismo e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho. Suas contribuições foram essenciais para o amadurecimento do projeto, assim como para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Um agradecimento mais que especial para Karoline Dantas, fundamental no meu desenvolvimento acadêmico e profissional, sou grato pela confiança depositada em mim e por sempre estarem disponíveis para me guiar nos momentos de dúvida.

Estendo meus agradecimentos aos colegas do laboratório, em especial a Joel Martins e Vander Melo, que estiveram diretamente envolvidos na execução dos ensaios. A colaboração, o trabalho em equipe e o comprometimento de vocês foram fundamentais para a realização prática desta pesquisa.

Por fim, agradeço a toda a equipe do Numea: Mayara Gonçalves, Manoel Mangabeira, Layse Furtado, Rodrigo Moraes, Arlene Alves, Erick Rocha, Jedson Abrantes, Victor Gonçalves e Thayna Bittencourt pelo suporte técnico, pela disponibilidade e pela receptividade ao longo do percurso. A infraestrutura e o auxílio oferecido por vocês foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade, meu muito obrigado.

Lucas Pereira Benjamin Ferreira

Resumo

O presente trabalho apresentou um estudo aprofundado que explora o comportamento de conectores metálicos de cabeça submetidos a esforços de arrancamento. O projeto se baseia em uma extensa pesquisa bibliográfica e em ensaios experimentais para determinar como a armadura de suspensão e a resistência do concreto afetam a capacidade de carga desses elementos estruturais. Com o objetivo de alcançar o modo de ruptura por cone de concreto, a pesquisa realizou testes em 15 espécimes de concreto armado. A metodologia experimental foi cuidadosamente planejada, variando os principais parâmetros de estudo, como a taxa e o espaçamento da armadura de suspensão, além de utilizar três classes de resistência do concreto: 30 MPa, 40 MPa e 50 MPa. Os resultados obtidos confirmaram que o aumento da resistência do concreto está diretamente ligado a um aumento na carga de ruptura dos conectores. Além disso, os ensaios demonstraram a eficácia da armadura de suspensão, mostrando que sua proximidade ao conector eleva significativamente a capacidade de arrancamento. Uma parte crucial do trabalho foi a análise comparativa entre os resultados experimentais e os modelos de cálculo normativos. Os autores avaliaram a precisão das recomendações do ACI 318 (2019) e INFASO (2012). A análise revelou que o modelo do INFASO se mostrou mais eficiente e preciso para prever a capacidade de arrancamento, especialmente em concretos de maior resistência (40 e 50 MPa). Para os exemplares de 50 MPa, os resultados experimentais superaram consistentemente 200 kN, reforçando a tese de que uma maior resistência do material impacta diretamente a capacidade de arrancamento dos conectores.

Palavras-chave: Arrancamento; Conector metálico; conector com cabeça; Armadura de suspensão; concreto armado.

Abstract

This study presented an in-depth analysis of the behavior of headed steel connectors subjected to pullout forces. The project is based on extensive literature review and experimental tests to determine how suspension reinforcement and concrete strength affect the load capacity of these structural elements. The main objective was to achieve failure by concrete cone breakout, and tests were conducted on 15 reinforced concrete specimens. The experimental methodology was carefully planned, varying key parameters such as the rate and spacing of the suspension reinforcement, and using three concrete strength classes: 30 MPa, 40 MPa, and 50 MPa. The results confirmed that an increase in concrete strength is directly linked to an increase in the ultimate load of the connectors. The tests also demonstrated the effectiveness of the suspension reinforcement, showing that its proximity to the connector significantly increases the pullout capacity. A crucial part of the work was the comparative analysis between the experimental results and normative calculation models. The authors evaluated the precision of the recommendations from ACI 318 (2019) and INFASO (2012). The analysis revealed that the INFASO model was more efficient and accurate in predicting the pullout capacity, especially in higher strength concretes (40 and 50 MPa). For the 50 MPa specimens, the experimental results consistently exceeded 200 kN, reinforcing the thesis that a higher material strength directly impacts the pullout capacity of the connectors.

Keywords: Pullout; Metal connector; Headed stud connector; Suspension reinforcement; Reinforced concrete.

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 1 - Sistema de transferência de carga entre elementos de concreto e aço por meio de conectores metálicos com cabeça pré-instalados.	16
Figura 2 - Embutimento de ancoragem efetivo, Costa (2016).	17
Figura 3 - Ruptura pela formação do cone de concreto.	18
Figura 4 - Configuração de armadura de suspensão, Costa (2016).	18
Figura 5 - Modos de ruptura de conectores submetidos à tração, ACI 318 (2019): a) Ruptura por escoamento da haste; b) Ruptura por Deslizamento do conector; c) Ruptura por destacamento lateral; d) Ruptura por fendilhamento do concreto; e) Ruptura do cone de concreto	20
Figura 6 - Classificação dos critérios de COLLINS (2021), Costa (2016).	23
Figura 7 - Projeto executivo da série 1: (a) Planta Baixa; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC.	32
Figura 8 - Projeto executivo da série 2: (a) Planta Baixa; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC.	33
Figura 9 - Projeto executivo da série 3: (a) Planta Baixa; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC.	34
Figura 10 - Projeto executivo da série 4: (a) Planta Baixa; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC.	35
Figura 11 - Projeto executivo da série 5: (a) Planta Baixa; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC.	36
Figura 12 - Projeto executivo do conector metálico.	37
Figura 13 – Detalhamento do conector.	37
Figura 14 - Disposição dos LVDT's para leitura de deslocamento: a) Vista lateral do sistema de ensaio; b) Vista frontal do sistema de ensaio.	38
Figura 15 - Posição dos extensômetros.	39
Figura 16 - Posição dos extensômetros na armadura de suspensão.	39
Figura 17 - Detalhamento do Sistema de Ensaio de arrancamento: (a) Planta baixa do sistema de ensaio; (b) Corte AA (c) 3D do sistema de ensaio.	40
Figura 18 - Sistema de ensaio executado.	41
Figura 19 - Ensaio de caracterização dos materiais: a) Compressão axial; b) Tração por compressão diametral; c) Módulo de elasticidade.	41
Figura 20 - Deslocamento vertical dos espécimes.	44
Figura 21 - Deslocamento vertical dos espécimes por série.	44
Figura 22 - Deslizamento do conector.	46
Figura 23 - Deslocamento vertical dos espécimes.	47
Figura 24 - Deformação na armadura de flexão.	48
Figura 25 - Deslocamento vertical dos espécimes.	49
Figura 26 - Deformações na haste do conector.	50
Figura 27 - Deformações na haste do conector.	50
Figura 28 - Deformações na haste do conector ensaiado.	52
Figura 29 - Deformação nas armaduras suspensão.	56

Figura 30 - Deformação nas armaduras de suspensão de todas as séries.	56
Figura 31 - Deformação nas armaduras de suspensão com variação de classe de resistência do concreto.	58
Figura 32 - Comparação da carga última pela resistência do concreto.	59
Figura 33 - Resistência ao arrancamento de espécimes com armadura de suspensão.	61
Figura 34 – Avaliação dos resultados quanto à precisão para as normas ACI e INFASO.	62
Figura 35 - Resistência ao arrancamento em função do espaçamento e taxa de armadura de suspensão.	63
Figura 36 - Avaliação dos métodos de cálculo.	64

Lista de Tabelas

Tabela	Página
Tabela 1 – Caracterização do agregado graúdo.	28
Tabela 2 - Caracterização do agregado miúdo.	29
Tabela 3 - Caracterização do cimento CP-V-ARI-RS.	29
Tabela 4 - Traço para concreto.	30
Tabela 5 – Características dos espécimes.	31
Tabela 6 - Resultados médios de caracterização do concreto.	42
Tabela 7 – Propriedades mecânicas do aço.	42
Tabela 8 – Resultado das cargas de ruptura experimental.	55
Tabela 9 – Resultado das cargas de ruptura experimental e teórica.	60

Lista de Símbolos

Neste item são apresentados alguns dos símbolos utilizados nesta qualificação. Aqueles que não estão aqui apresentados têm seu significado explicado assim que mencionados no texto.

Símbolo	Significado
$a\%$	teor de argamassa
$H\%$	teor de umidade
a/c	relação água cimento
bw	largura do espécime
h	altura do espécime
L	comprimento do espécime
$\rho_f\%$	taxa de armadura de flexão
f_c	resistência à compressão do concreto
γ_{cim}	massa específica cimento
γ_{areia}	massa específica da areia
γ_{AGN}	massa específica do agregado graúdo
α	ângulo de ruptura do cone de concreto
d	deslocamento do conector
d_h	diâmetro da cabeça do conector
$d_{máx}$	diâmetro máximo do agregado
d_s	diâmetro da haste do conector
w	variação da abertura da fissura
ϵ	deformação do concreto
E_c	módulo de elasticidade do concreto
f_c	resistência à compressão do concreto em corpo de prova cilíndrico
f_{ct}	resistência à tração do concreto
f_y	tensão de escoamento do aço
G_f	energia da fratura do concreto
G_{fr}	energia da fratura do concreto de referência
h_0	constante empírica, sendo o h_{ef} que que não possui influência de efeito de escala
h_{ef}	embutimento de ancoragem efetivo do conector
h_n	embutimento de ancoragem nominal do conector

k_1	fator que considera o estado de fissuração do concreto
k_1, k_2, k_3	fatores de calibração do modelo teórico
$k_{c,de}$	rigidez do cone de concreto
k_{IC}	rigidez da fratura do cone de concreto
l	fator que considera a relação entre N_u e $N_{u,teo}$
l_1	comprimento de ancoragem da armadura de ancoragem no cone de concreto
l_b	comprimento máximo da fissura do cone de concreto
N	carga de tração solicitante do conector
N_u	carga de ruptura do conector
$N_{u,exp}$	carga de ruptura experimental do cone de concreto
$N_{u,ncr}$	carga de ruptura do cone de concreto de conector em concreto fissurado
$N_{u,uncr}$	carga de ruptura do cone de concreto de conector em concreto não fissurado
N_u^o	carga de ruptura do cone de concreto sem efeito de espaçamento e de borda
s	espaçamento entre conectores
s_1	espaçamento entre conectores na direção x
s_2	espaçamento entre conectores na direção y
s_N	tensão nominal na ruptura do cone de concreto
s_r	espaçamento entre barras longitudinais do elemento de concreto
w	abertura da fissura
x	comprimento da fissura do cone de concreto

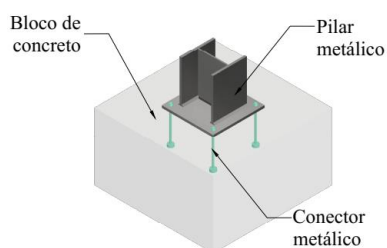
Lista de Figuras	9
Lista de Tabelas	11
Lista de Símbolos	12
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. MOTIVAÇÃO	18
1.2. OBJETIVO	19
1.2.1. Objetivo Geral	19
1.2.2. Objetivos específicos	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. COMPORTAMENTO DOS CONECTORES COM CABEÇA EMBUTIDOS EM CONCRETO ARMADO	19
2.1.1. Modos de Ruptura	19
2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE CONECTORES EMBUTIDOS EM CONCRETO	21
2.2.1. Embutimento de Ancoragem Efetivo (h_{ef})	21
2.2.2. Efeito das propriedades do concreto	21
2.2.3. Diâmetro da cabeça do conector	22
2.2.4. Abertura de fissuras	22
2.2.5. Armadura de Suspensão	22
2.3. MODELO TEÓRICO	23
2.3.1. INFASO (2012)	23
2.4. RECOMENDAÇÃO NORMATIVA	26
2.4.1. ACI 318 (2019)	26
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	27
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	27
3.1.1. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAUDO NATURAL	27
3.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO	28
3.1.3. CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	29
3.2. ESTUDO DA DOSAGEM	29
3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS ESPÉCIMES	30
3.4. CONFECÇÃO DOS ESPÉCIMES	37
3.4.1. Características dos conectores	37
3.5. INSTRUMENTAÇÃO	38
3.5.1. Deslocamento vertical	38

3.5.2.	Deformação das armaduras	38
3.6.	SISTEMA DE ENSAIO	39
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	41
4.1.	Propriedades mecânicas dos materiais	41
4.2.	Resultados das séries	42
4.2.1.	Deslocamento vertical	43
4.2.2.	Deslizamento do conector	45
4.2.3.	Deformações na armadura de flexão	47
4.2.4.	Deformações na haste do conector	49
4.2.1.	Modos de ruptura	51
4.2.2.	Cargas de ruptura experimentais	53
4.3.	Influência da armadura de suspensão no valor de N	55
4.3.1.	Deformação nas armaduras de suspensão	55
4.4.	Influência da resistência do concreto no valor de N	57
4.4.1.	Deformação nas armaduras de suspensão	57
4.4.2.	Análise do N em função da resistência do concreto	58
4.5.	Avaliação Normativa	59
4.5.1.	Análise da resistência ao arrancamento experimental e teórica em função da taxa e espaçamento da armadura de suspensão	62
4.5.2.	Análise da resistência ao arrancamento experimental e teórica em função da resistência do concreto	63
5.	CONCLUSÕES	64
6.	REFERÊNCIAS	65

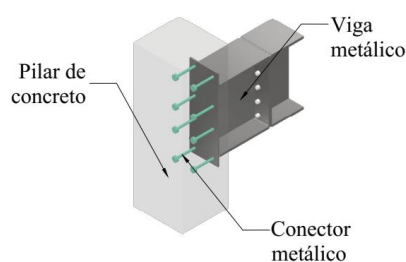
1. INTRODUÇÃO

Na engenharia civil, a análise de estruturas mistas que combinam concreto e aço, como em sistemas pré-moldados ou de reforço estrutural, ressalta a importância de uma integração eficiente entre esses materiais. Segundo Delhomme e Debicki (2010), essa conexão é viabilizada por conectores de aço, cuja principal função é garantir a transferência eficaz de esforços entre o concreto e o aço, por meio de mecanismos de aderência ou ancoragem mecânica. A ligação entre elementos metálicos e blocos de concreto é essencial para assegurar a estabilidade e a durabilidade de uma construção.

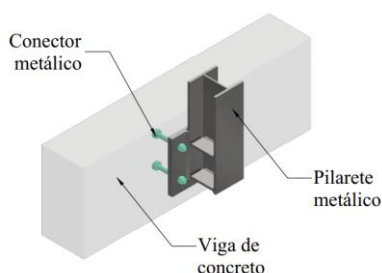
Os conectores com cabeça são aplicados em diversas situações, como em ligações semirrígidas de pórticos reticulados de concreto pré-moldado, em conexões entre painéis estruturais ou ainda em sistemas mistos, como a união entre pilares metálicos e blocos de concreto como mostra a Figura 1.



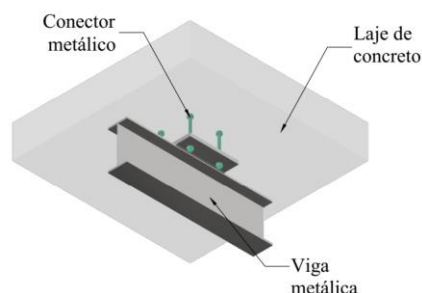
(a) Ligação bloco de concreto e pilar metálico



(b) Ligação pilar de concreto e viga metálica



(c) Ligação viga de concreto com pilarete metálico



(d) Ligação laje de concreto com viga metálica

Figura 1 - Sistema de transferência de carga entre elementos de concreto e aço por meio de conectores metálicos com cabeça pré-instalados.

O desempenho dessas ligações está diretamente relacionado a fatores como o comprimento de embutimento efetivo do conector (h_{ef}), a resistência do concreto e as condições de fissuração da peça onde o conector está ancorado.

De acordo com o ACI 318 (2019), o principal fator que contribui para a resistência ao arrancamento do conector é o embutimento de ancoragem efetivo (h_{ef}). Esse parâmetro refere-se à extensão na qual o conector transfere os esforços externos ao concreto. A medida é realizada desde a face superior da cabeça do conector até a superfície do concreto, como ilustrado na Figura 2.

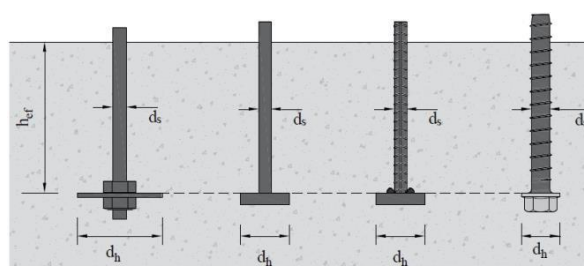


Figura 2 - Embutimento de ancoragem efetivo, Costa (2016).

Além disso, a resistência ao arrancamento está relacionada com a eficiência mecânica da haste. Para barras com cabeça, a resistência à ancoragem depende principalmente da ação mecânica proporcionada pela cabeça na extremidade da barra, que evita o deslizamento no concreto, mas também pela aderência da barra ao concreto.

Eligehausen (2006) destaca que, para compreender adequadamente o comportamento dos conectores, é essencial analisar a curva carga–deslocamento e os diferentes modos de ruptura associados. A eficiência desses elementos estruturais está diretamente vinculada à interação entre o aço e o concreto, aspecto determinante tanto no projeto quanto na execução. Essa interação condiciona a capacidade resistente às tensões e, por consequência, a estabilidade global da edificação, podendo configurar-se como um ponto crítico no desempenho do sistema estrutural.

No estado limite último, a conexão entre o conector de aço e o concreto pode falhar de cinco formas principais: ruptura do aço, ruptura do cone de concreto, destacamento lateral, deslizamento ou fendilhamento ACI 318 (2019). O objetivo experimental deste estudo é sempre alcançar o modo de ruptura por cone de concreto, que é o modo de ruptura de projeto, como mostra a Figura 3.

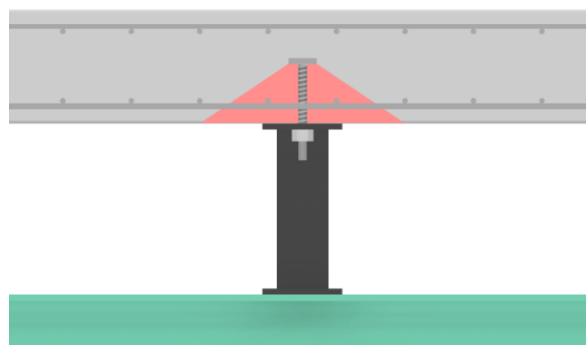


Figura 3 - Ruptura pela formação do cone de concreto.

Em situações em que o embutimento de ancoragem efetivo do conector é limitado, seja por restrições no tamanho da área de concreto, BUJNAK et al. (2014) propõe uma alternativa para aumentar a resistência sem a necessidade de ampliar o comprimento de embutimento. Essa solução consiste em utilizar armadura de suspensão próxima ao conector, para prevenir a formação do cone de concreto, como mostra a Figura 4.

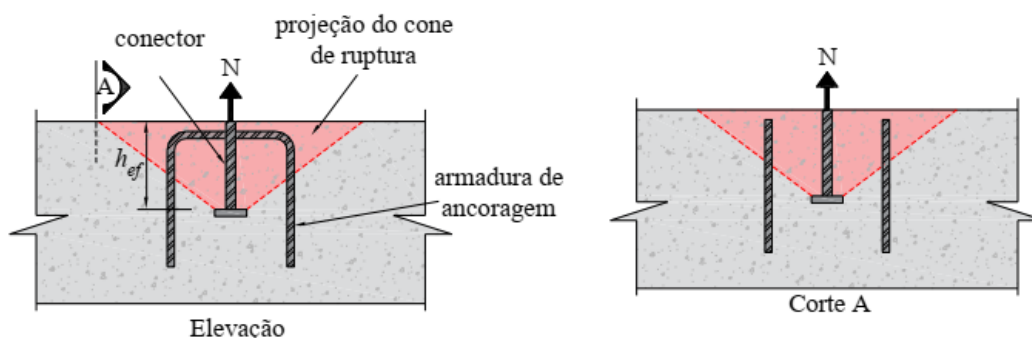


Figura 4 - Configuração de armadura de suspensão, Costa (2016).

Dessa forma, torna-se essencial uma análise experimental mais aprofundada sobre a influência da armadura de suspensão na capacidade resistente de conectores com cabeça. Este trabalho, portanto, tem como objetivo investigar e avaliar experimentalmente o comportamento e a resistência à tração de conectores com cabeça embutidos em elementos de concreto armado com armadura de suspensão.

1.1. MOTIVAÇÃO

A motivação desta pesquisa está em entender como a armadura de suspensão influencia na resistência ao arrancamento de pinos de aço embutidos em concreto. Esses pinos são essenciais em diversas aplicações estruturais, e sua interação com o concreto pode ser afetada pela presença de armaduras adicionais, sobretudo em estruturas pré-moldadas. O presente trabalho visa aprimorar o conhecimento sobre esse comportamento, oferecendo informações

que podem melhorar a segurança, o desempenho e o dimensionamento de estruturas de concreto armado, além de contribuir para o desenvolvimento de normas mais precisas e eficientes.

1.2. OBJETIVO

1.2.1. Objetivo Geral

Investigar e avaliar, por meio de análises experimentais, o comportamento e a capacidade resistente à tração de conectores com cabeça embutidos em elementos de concreto armado com armadura de suspensão.

1.2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a contribuição da parcela resistente do concreto para a resistência ao arrancamento;
- Analisar a influência de armaduras suplementares na capacidade resistente à tração e no comportamento dos conectores com cabeça;
- Avaliar a influência do espaçamento e da taxa de armadura de suspensão na capacidade resistente à tração dos conectores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. COMPORTAMENTO DOS CONECTORES COM CABEÇA EMBUTIDOS EM CONCRETO ARMADO

2.1.1. Modos de Ruptura

A compreensão do mecanismo de transferência de esforços associado à ligação é essencial para o estudo do comportamento de conectores metálicos. Em termos de estado limite último, esses conectores podem apresentar cinco modos distintos de ruptura: escoamento da barra do conector, formação do cone de concreto, destacamento lateral, deslizamento e fendilhamento. A Figura 5 apresenta a representação esquemática desses modos de falha.

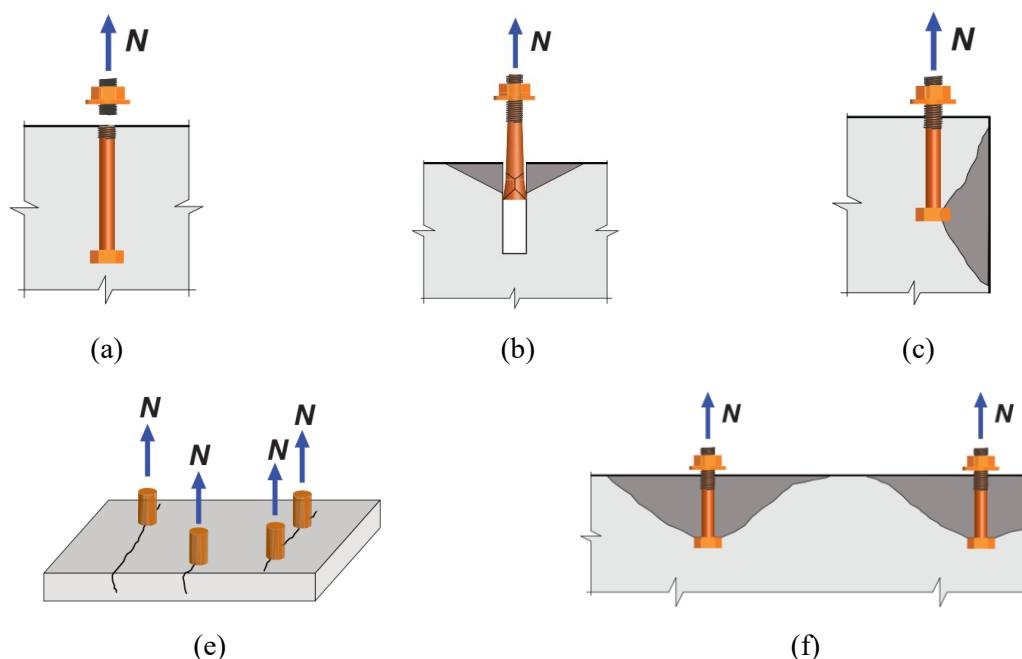


Figura 5 - Modos de ruptura de conectores submetidos à tração, ACI 318 (2019): a) Ruptura por escoamento da haste; b) Ruptura por Deslizamento do conector; c) Ruptura por destacamento lateral; d) Ruptura por fendilhamento do concreto; e) Ruptura do cone de concreto

A ruptura por escorregamento, também denominada falha de ancoragem, caracteriza-se pelo deslizamento relativo entre o conector e o concreto. Esse mecanismo é mais recorrente em conectores do tipo pós-instalado, cuja resistência está diretamente associada à aderência química e ao atrito lateral desenvolvido na interface conector/concreto ELIGEHAUSEN et al. (2006).

A ruptura por destacamento lateral ocorre quando a distância entre o conector e a borda do elemento de concreto é inferior a $1,5 \cdot h_{ef}$. Nessa condição, as tensões provenientes da área de transferência de carga, localizada na cabeça do conector, geram componentes transversais à força de arrancamento, induzindo o destacamento do concreto na face lateral do elemento ELIGEHAUSEN et al. (2006).

O fendilhamento apresenta comportamento semelhante ao destacamento lateral, sendo igualmente provocado por tensões transversais ao esforço de arrancamento. Diferencia-se, entretanto, pela formação de fissuras paralelas ao eixo do conector, que tendem a dividir o elemento de concreto. Esse tipo de falha é mais frequente em peças de pequena espessura ou em situações nas quais os conectores se encontram próximos às bordas do elemento estrutural ELIGEHAUSEN et al. (2006).

A ruptura em cone de concreto é caracterizada pela formação de uma fissura circunferencial ao redor da cabeça do conector, propagando-se até a superfície do concreto. Esse mecanismo ocorre quando as tensões de tração no material excedem sua resistência,

dando origem a uma superfície de fratura com inclinação aproximada de 35° em relação ao eixo do conector ELIGEHAUSEN et al. (2006).

2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE CONECTORES EMBUTIDOS EM CONCRETO

2.2.1. Embutimento de Ancoragem Efetivo (h_{ef})

Quando se trata da carga de ruptura pelo cone de concreto, o fator de maior influência na resistência é o embutimento de ancoragem efetivo. Ao analisar a carga de ruptura de estruturas geometricamente similares, porém com tamanhos diferentes, observa-se que o aumento do tamanho da peça, e consequentemente do embutimento, leva a uma carga de ruptura última mais elevada. No entanto, esse efeito não é linear, pois é influenciado pelo chamado “efeito de escala”. Segundo Eligehausen e Sawade (1989) e Ashour e Alqedra (2005), a carga de ruptura do cone de concreto é proporcional a $h_{ef}^{1,5}$. Essa relação indica que o aumento da carga de ruptura não ocorre na mesma proporção do aumento do embutimento, ou seja, o ganho de resistência é proporcionalmente menor à medida que o tamanho cresce, evidenciando o efeito de escala.

Dessa forma, mesmo duplicando o embutimento, o aumento da carga de ruptura é menor que o aumento da área teórica, isso ocorre porque segundo Bazant et al. (1984) o efeito escala é dependente da tensão nominal S_n que diminui à medida que o tamanho do cone aumenta, já que a distribuição das tensões e os mecanismos de fratura no concreto não escalam de forma linear. Assim, mesmo que um conector com maior embutimento apresente um cone de ruptura maior, suportando uma carga mais elevada, o ganho não é proporcional ao aumento de área de ruptura.

2.2.2. Efeito das propriedades do concreto

Durante a ruptura do cone de concreto, deve-se levar em consideração não apenas as parcelas resistentes à tração e compressão do concreto, segundo Ozbolt e Eligehausen (1993), as parcelas da energia de fratura (G_f) e do módulo de elasticidade (E_c) também devem ser levados em consideração, levando a um aumento da carga de ruptura proporcional a $E_c^{2/3}$ e a uma carga de ruptura proporcional a raiz quadrada da energia de fratura do concreto ($\sqrt{G_f}$). Eligehausen et al. (2006) observaram que $\sqrt{E_c \cdot G_f}$ pode ser substituído por $\sqrt{f_c}$, uma vez que tanto E_c quanto G_f apresentam proporcionalidade com $\sqrt{f_c}$.

2.2.3. Diâmetro da cabeça do conector

Para investigar o impacto do diâmetro da cabeça do conector na sua performance, Ozbolt et al. (1999) e Ozbolt et al. (2007) realizaram duas séries de análises mantendo constantes as propriedades dos materiais e o comprimento de embutimento, fixado em 150 mm. Nessas análises, variaram-se os tamanhos da cabeça do conector, utilizando relações d_h/h_{ef} de 0,25, 0,30 e 0,56. Os resultados demonstraram que conectores com cabeças de maior diâmetro apresentaram maior rigidez e resistência, o que foi atribuído ao aumento da área de ruptura proporcionado pela cabeça de ancoragem mais robusta. As curvas carga-deslocamento mostraram que, à medida que o diâmetro da cabeça aumentava, a resposta estrutural se tornava mais rígida e a capacidade de carga final também crescia.

2.2.4. Abertura de fissuras

Segundo Eligenhausen e Baloch (1995), a influência da presença de fissuras no concreto deve ser considerada nos estudos do comportamento de conectores com cabeça, uma vez que as estruturas de concreto armado são projetadas para que as fissuras ocorram no estado de serviço. Essas fissuras têm grande impacto na capacidade de carga da ancoragem e, conforme Eligenhause et al (1988), essa influência está relacionada à criação de uma zona de distúrbio no estado de tensões, reduzindo a área de superfície disponível para a transmissão dos esforços de tração e, conseqüentemente, prejudicando a transferência de carga.

Dessa forma, os mesmos autores apresentaram uma análise sobre a abertura de fissuras (w) e concluíram que, para $w = 0,3$ mm, a resistência do cone de concreto apresenta uma redução de aproximadamente 25% em relação ao valor esperado para conectores em concreto não fissurado, diminuindo gradualmente à medida que a abertura da fissura aumenta.

2.2.5. Armadura de Suspensão

Em determinadas situações, pode não ser possível garantir um comprimento de embutimento suficiente para resistir aos esforços de tração atuantes sobre os conectores. Nesses casos, uma solução eficiente para aumentar a resistência da ancoragem é a introdução de armaduras de suspensão.

A norma americana ACI 318 (2019) recomenda que a distância entre a armadura de suspensão e o conector não exceda 0,5 vezes o comprimento efetivo de embutimento ($0,5 \cdot h_{ef}$), e que o diâmetro da armadura não ultrapasse 16 mm.

A presença da armadura de suspensão contribui para o aumento da resistência total da ancoragem, combinando duas fontes de capacidade resistente: uma oriunda do concreto e outra da própria armadura. De acordo com o FIB Bulletin 58 (2011), a armadura passa a colaborar com a resistência somente após a completa formação do cone de ruptura no concreto.

Contudo, os modelos normativos normalmente consideram apenas a contribuição da armadura de suspensão, resultando em estimativas teóricas mais conservadoras, como demonstrado nos estudos de Costa (2016) na Figura 6.

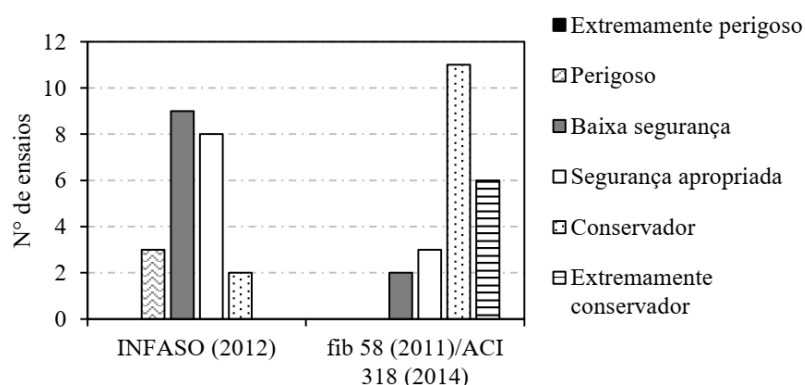


Figura 6 - Classificação dos critérios de COLLINS (2021), Costa (2016).

Além disso, conforme descrito por Bujnak et al. (2013), a utilização dessa armadura pode introduzir dois novos modos potenciais de ruptura: a primeira, ruptura da própria armadura de suspensão, quando a força aplicada excede sua capacidade resistente; e a segunda, a falha por deslizamento, ocasionada pela perda de aderência no comprimento de ancoragem da armadura (l_1), quando os esforços superam a capacidade de fixação da barra ao concreto.

2.3. MODELO TEÓRICO

2.3.1. INFASO (2012)

Neste modelo teórico, os conectores com armadura de suspensão, possuem duas parcelas resistentes, a da armadura e a do concreto, que atuam em conjunto na resistência última de conectores. O componente da armadura foi baseado em estudos empíricos.

Como mencionado anteriormente, o modo de ruptura dos conectores com armadura de suspensão submetidos à tração, pode ocorrer de dois modos. O primeiro é a ruptura do cone de concreto juntamente com o escoamento da armadura, a sua resistência será obtida pela Equação 1.

$$N_u = N_u^0 + N_{u,aa} + \delta_{y,aa} \cdot k_{c,de} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- N_u^0 é a resistência à tração de um conector isolado (N), sem armadura de suspensão, conforme a Equação 2;
- $N_{u,aa}$ a resistência da armadura de suspensão, admitindo o escoamento das barras (N), conforme a Equação 3;
- $\delta_{y,aa}$ é o deslocamento que ocorre em função da carga de escoamento da armadura de suspensão $N_{u,aa}$ (mm), conforme a Equação 4;
- $k_{c,de}$ é a rigidez do cone de concreto (N/mm), conforme a Equação 5.

$$N_u^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

- k_1 é igual a 8,9 e 12,7 para concreto fissurado e não fissurado, respectivamente;
- f_c é a resistência à compressão do concreto (N/mm²);
- h_{ef} é o embutimento de ancoragem (mm).

$$N_{u,aa} = n_{aa} \cdot A_{s,aa} \cdot f_{y,aa} \quad \text{Equação 3}$$

- n_{aa} é o número de pernas de armadura de suspensão;
- $A_{s,aa}$ é a área de seção transversal da armadura de suspensão (mm²);
- $f_{y,aa}$ é a tensão de escoamento da armadura de suspensão (N/mm²).

$$\delta_{y,aa} = \frac{2 \cdot N_{u,aa}^2}{\alpha_s \cdot f_c \cdot d_s^4 \cdot n_{aa}^2} \quad \text{Equação 4}$$

- α_s é o fator da componente do escoamento da armadura de suspensão, sendo igual a 12100;
- d_s é o diâmetro da barra do conector (mm).

$k_{c,de}$ é a rigidez do cone de concreto, calculada pela Equação a seguir.

$$k_{c,de} = \alpha_c \cdot \sqrt{h_{ef} \cdot f_c} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

α_c é o fator da componente de ruptura do cone de concreto, igual a -537.

A resistência última à tração considerando a ruptura do cone de concreto juntamente com a falha de ancoragem da armadura de suspensão dentro do cone de concreto, deverá ser obtido a partir da Equação 6.

$$N_u = N_u^0 + N_{u,aa,b} + \delta_{y,aa,b} \cdot k_c \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

N_u^0 é a resistência à tração de um conector isolado (N), sem armadura de suspensão, conforme a Equação 2;

$N_{u,aa,b}$ é a carga de ruptura no caso da falha de ancoragem da armadura de suspensão (N), conforme a Equação 7;

$\delta_{y,aa,b}$ é o deslocamento correspondente à carga em que ocorre a falha de ancoragem da armadura de suspensão (mm) e pode ser obtido pela Equação 9;

k_c é a rigidez do cone de concreto (N/mm), conforme a Equação 5.

$$N_{u,aa,b} = n_{aa} \cdot l_1 \cdot \pi \cdot d_s \cdot f_{bu} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

n_{aa} é o número de pernas da armadura de suspensão;

l_1 é o comprimento de ancoragem da armadura de suspensão no cone de concreto (mm);

d_s é o diâmetro da armadura de suspensão (mm);

f_{bu} é a resistência de aderência entre a armadura de suspensão e o concreto (N/mm²), de acordo com valor a Equação 8 .

$$f_{bu} = 2,25 \cdot f_{ct} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo f_{ct} a resistência à tração do concreto (N/mm²).

$$\delta_{y,aa,b} = \frac{2 \cdot N_{u,aa,b}^2}{\alpha_s \cdot f_c \cdot d_s^4 \cdot n_{aa}^2} \quad \text{Equação 9}$$

α_s é o fator da componente do escoamento da armadura de suspensão, sendo igual a 12100;

d_s é o diâmetro da barra do conector (mm).

n_{aa} é o número de pernas de armadura de suspensão;

2.4. RECOMENDAÇÃO NORMATIVA

2.4.1. ACI 318 (2019)

O modelo apresentado pela norma ACI 318 (2019) para conectores que não utilizam armadura de suspensão considera um prisma de ruptura no concreto com um ângulo aproximado de 35°, com base nos princípios da mecânica da fratura. A resistência à tração na ancoragem, assumindo a falha por ruptura em forma de cone de concreto de um conector único pré-instalado, sem a interferência de bordas ou de conectores próximos.

De acordo com a norma, na presença de armadura de suspensão, a resistência última da ancoragem será determinada pelo mecanismo que apresentar maior capacidade resistente à tração, seja pela ruptura do cone de concreto ou pela armadura de suspensão. Dessa forma, caso a resistência à ruptura do cone de concreto seja superior, a armadura de suspensão não contribui para o aumento da carga última. No entanto, se a resistência do cone for inferior, a ancoragem será integralmente resistida pela armadura de suspensão.

Para a determinação da resistência à tração da armadura de suspensão, devem ser realizadas duas verificações: o escoamento das barras de armadura e a falha de ancoragem das barras no interior do cone de concreto. O menor valor entre os dois deve ser adotado para efeito de comparação com a resistência à tração do cone de concreto. A verificação do escoamento é conduzida conforme estabelecido na Equação 10.

$$N_{u,aa} = n_{aa} \cdot A_{s,aa} \cdot f_{y,aa} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

$N_{u,aa}$ a resistência da armadura de suspensão, admitindo o escoamento das barras;

n_{aa} é o número de pernas de armadura de suspensão;

$A_{s,aa}$ é a área de seção transversal da armadura de suspensão;

$f_{y,aa}$ é a tensão de escoamento da armadura de suspensão.

A segunda verificação, relacionada à falha de ancoragem da armadura no cone de concreto, é definida pela Equação 11. Esse modelo pressupõe que a armadura de suspensão esteja adequadamente ancorada, porém admite a possibilidade de deslizamento das barras no interior do cone de concreto.

$$N_{u,aa,b} = \sum_n \left(\frac{l_1 \cdot u \cdot f_{bd}}{\alpha_{aa}} \right) \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

- l_1 é comprimento de ancoragem da armadura de suspensão no cone de concreto;
- u é a perímetro de uma barra da armadura de suspensão;
- f_{bd} é igual $k_6 \cdot k_7 \cdot f_{bd}^0$;
- f_{bd}^0 é a resistência de aderência de projeto de acordo com o CEB-FIB Model Code 1990 (1993);
- k_6 é um fator que considera a posição da barra durante a concretagem, sendo igual a 1 para boas condições de aderência e igual a 0,7 para todos os outros casos;
- k_7 é um fator que considera o efeito de confinamento do concreto na resistência de aderência, com valor igual a 1,0 para cobrimento da armadura de suspensão $\leq 10 d_s$ e 1,5 para cobrimento $> 10 d_s$;
- α_{aa} é um fator que considera a dobra ou laço da armadura de suspensão, sendo igual a 0,7.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste estudo, foram conduzidos procedimentos fundamentais para a avaliação do desempenho do concreto. Inicialmente, realizou-se a caracterização dos materiais constituintes, como: agregados miúdos e graúdos, cimento e aditivos, com o objetivo de verificar suas propriedades físico-químicas e garantir sua conformidade com as normas técnicas. Na sequência, foram executados os processos de dosagem e mistura dos materiais, seguindo metodologias padronizadas para assegurar a homogeneidade e a qualidade do concreto produzido. Posteriormente, foram realizadas análises das propriedades do concreto tanto no estado fresco, como trabalhabilidade e consistência, quanto no estado endurecido, com foco no parâmetro de resistência mecânica.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAUDO NATURAL

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa é a brita 1, de origem granítica, proveniente do município de Tracuateua, no estado do Pará. O material foi peneirado de modo a reter partículas entre as peneiras de 25 mm (passante) e 4,8 mm (retida), assegurando uma distribuição granulométrica equivalente entre os dois materiais.

A caracterização física da brita foi realizada com base em normas técnicas atualizadas. A determinação da massa específica e da absorção de água seguiu os procedimentos da ABNT NBR 16917 (2021), que trata dos métodos aplicáveis a agregados graúdos. Já a massa unitária e o índice de vazios foram obtidos de acordo com a ABNT NBR 16918 (2021), como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização do agregado graúdo.

Peneiras (mm)	Massa retida (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)	Prescrição normativa
76	0	0	0	ABNT NBR NM 248(2003)
50	0	0	0	
38	0	0	0	
25	0	0	0	
19	1400	14	14	
12,5	7500	75	89	
9,5	1000	10	99	
4,8	100	1	100	
2,4	0	0	100	
1,2	0	0	100	
0,6	0	0	100	
0,3	0	0	100	
0,15	0	0	100	
Total	1000g			
Módulo de Finura	6,96 mm			
Dimensão máxima	25 mm			
Massa unitária	1,34 Kg/dm³			ABNT NBR 16918 (2021)
Massa específica	2,66 g/cm³			ABNT NBR 16917 (2021)

3.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

A areia empregada neste estudo foi extraída de depósitos naturais localizados nos leitos dos rios da região próxima à cidade de Belém. Os resultados foram obtidos por meio de ensaios laboratoriais e estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização do agregado miúdo.

Peneiras (mm)	Massa retida (g)	Retida (%)	Retida acumulada (%)	Prescrição normativa
4,8	4,12	0,4	0	ABNT NBR NM 248(2003)
2,4	8,32	0,8	1	
1,2	34,44	3,4	5	
0,6	173,95	17,4	22	
0,3	535,69	53,6	76	
0,15	221,53	22,2	98	
<0,15	21,95	2,2	100	
Total	1000	100		
Módulo de Finura	2,02 mm			
Dimensão máxima	1,20 mm			
Massa unitária	1,44 g/cm³			ABNT NBR 16918 (2021)
Índice de vazios	45,25			
Massa específica	2,63 g/cm³			ABNT NBR 16604 (2018)

3.1.3. CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

O cimento empregado nesta pesquisa foi o tipo CP-V-ARI-RS, fornecido pela concreteira Supermix. As propriedades gerais do aglomerante estão apresentadas na Tabela 3. Com base nas características normatizadas, verifica-se que este cimento atende aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16697 (2018), estando dentro dos limites especificados para seu tipo e aplicação.

Tabela 3 - Caracterização do cimento CP-V-ARI-RS.

Característica	Fabricante	ABNT NBR 16697 (2018)
Massa Específica (g/cm ³)	3,09	-
Finura Blaine (cm ² /g)	4970	≥ 3500
Resíduo peneira 200 µm (%)	0,16	≤ 6,0
Resíduo peneira 350 µm (%)	1,44	-
Tempo de Pega (h:m) Início	02:55	≥ 1,0
Tempo de Pega (h:m) Fim	04:35	≤ 8,0
Resistência à Compressão (MPa) 1 dia	28,2	≥ 14,0
Resistência à Compressão (MPa) 3 dias	42	≥ 24,0
Resistência à Compressão (MPa) 7 dias	46,2	≥ 34,0
Resistência à Compressão (MPa) 28 dias	51,5	≥ 42,0

3.2. ESTUDO DA DOSAGEM

Para a realização do presente trabalho, os concretos utilizados na moldagem dos corpos de prova foram produzidos no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (UFPA), em conformidade com os procedimentos técnicos recomendados para a preparação de amostras em ambiente controlado.

A dosagem dos concretos foi elaborada com base no método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de São Paulo (IPT/EPUSP), o qual é amplamente utilizado no Brasil por permitir uma abordagem racional e sistemática para a obtenção de traços otimizados. Esse método considera as propriedades dos materiais disponíveis localmente e visa atender aos requisitos de resistência, trabalhabilidade, durabilidade e economia.

Inicialmente, foi realizada a caracterização dos materiais constituintes (cimento, agregados miúdo e graúdo, e água), de forma a subsidiar a elaboração das curvas de dosagem. A partir dessas curvas, foram definidos três traços distintos, selecionados com o objetivo de atingir a resistência característica do concreto aos 28 dias, com 30, 40 e 50 MPa, conforme definido no programa experimental.

As dosagens escolhidas são apresentadas na Tabela 4, na qual constam informações referentes à classe do concreto, resistência característica à compressão (f_c), relação água/cimento (a/c) e consumo de cimento (C_c). Esses parâmetros foram definidos com base em critérios técnicos e normativos, buscando garantir a qualidade e a repetibilidade dos ensaios laboratoriais.

Além disso, todos os traços foram elaborados com um teor de argamassa de 51%, valor este que influencia diretamente a trabalhabilidade do concreto, sendo especialmente relevante na moldagem e adensamento dos corpos de prova. A escolha desse percentual visou manter uma boa consistência sem comprometer a resistência mecânica do material.

Tabela 4 - Traço para concreto.

Classe	f_c (Mpa)	a/c	C_c (kg/m ³)
C30	30	0,55	355
C40	40	0,45	433
C50	50	0,25	650

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS ESPÉCIMES

O presente trabalho avaliou o comportamento de cinco séries de espécimes, variando a taxa de armadura de suspensão e sua disposição dentro da projeção do cone de concreto formado a partir da solicitação do pino de aço à tração.

Dessa forma, os corpos de prova foram moldados com dimensões de 900x500x200mm, mantendo-se constante a taxa de armadura de flexão, uma vez que a comparação entre os espécimes exige a preservação de características estruturais equivalentes.

Na primeira série, três espécimes foram confeccionados sem armadura de suspensão para servirem de referência para as demais séries. Na segunda e na terceira séries, foram

ensaiados seis espécimes, três em cada série, que possuíam apenas uma camada de armadura de suspensão, ou seja, apenas quatro pernas da armadura de suspensão estavam dispostas na área de projeção do cone de concreto. Esses espécimes diferiram entre si na distância entre a primeira camada de armadura de suspensão e o conector, mantendo o diâmetro dessa armadura de suspensão. Além disso, havia seis espécimes, três na quarta série e três na quinta série, que tinham duas camadas de armadura de suspensão, ou seja, com oito pernas dentro da projeção do cone de concreto, e que diferiram entre si pelo espaçamento dessas armaduras, mantendo a taxa de armadura de suspensão.

Tabela 5 – Características dos espécimes.

Espécimes		Geometria				Armadura de Suspensão					Concreto
		b_w	h	d	L	Nº de barras	f_{ys}	ϕ_{sa}	S_0	S_r	f_c
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(Mpa)	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)
SÉRIE-1	REF-30	500	200	175	900	-	500	-	-	-	30
	REF-40					-		-	-	-	40
	REF-50					-		-	-	-	50
SÉRIE-2	A2-4-8-50-30					4		8	70	-	30
	A2-4-8-50-40					4		8	70	-	40
	A2-4-8-50-50					4		8	70	-	50
SÉRIE-3	A3-4-8-70-30					4		8	50	-	30
	A3-4-8-70-40					4		8	50	-	40
	A3-4-8-70-40					4		8	50	-	50
SÉRIE-4	A4-8-5-35-105-30					8		5	35	105	30
	A4-8-5-35-105-40					8		5	35	105	40
	A4-8-5-35-105-50					8		5	35	105	50
SÉRIE-5	A5-8-5-25-75-30					8		5	25	75	30
	A5-8-5-25-75-40					8		5	25	75	40
	A5-8-5-25-75-50					8		5	25	75	50

$An - n - \phi - S_0 - S_r - f_c$

└ Série do tipo A e n é a série dos espécimes.

└ Número de ramos de armadura de suspensão dentro da área de projeção do cone de concreto.

└ Diâmetro da barra das armaduras de suspensão.

└ Espaçamento da primeira camada de armadura de suspensão em relação ao conector.

└ Espaçamento da segunda camada de armadura de suspensão em relação ao conector.

└ Resistência do concreto.

Na Figura 7 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** podemos ver o detalhamento dos espécimes de referência a série 1, que foram utilizados como uma série de referência.

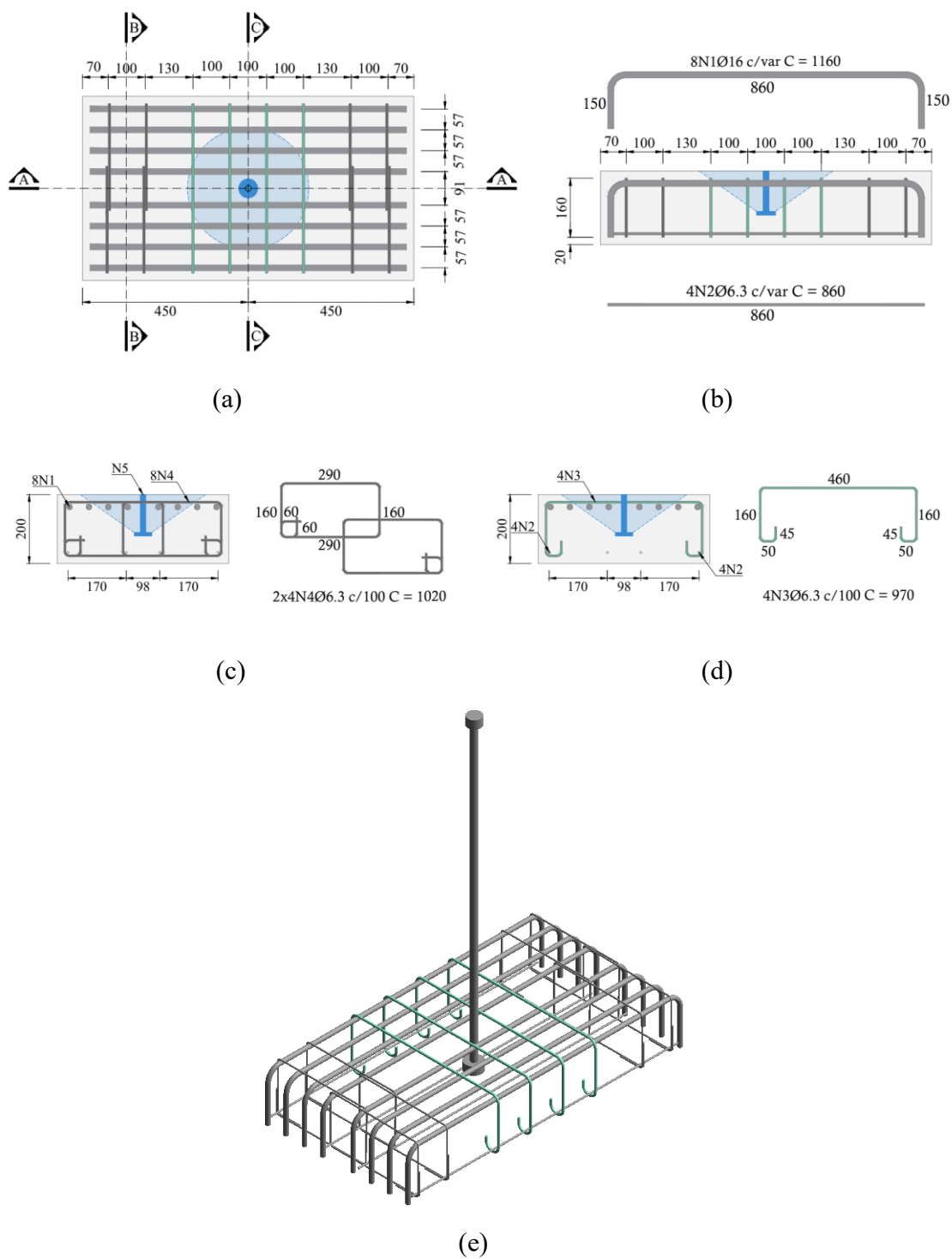


Figura 7 - Projeto executivo da série 1: (a) Planta Baixa; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC.

Na Figura 8, refere-se ao detalhamento dos espécimes da segunda séries que possuem uma camada de armadura de suspensão com distancia de 50 mm do conector.

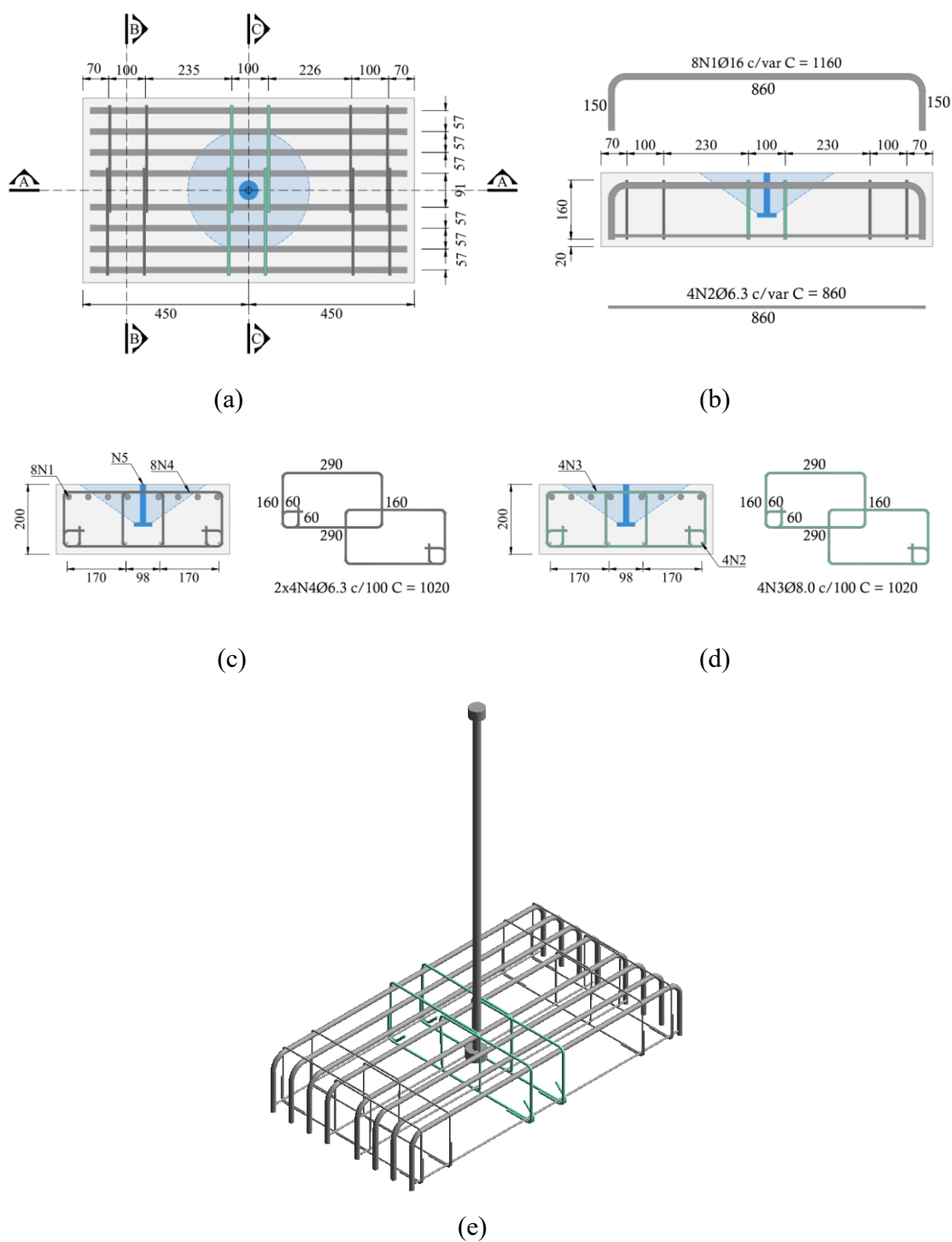


Figura 8 - Projeto executivo da série 2: (a) Planta Baixa; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC.

Na série 3, o detalhamento dos espécimes continua com apenas uma camada de armadura de suspensão, porém espaçadas de 70 mm do conector, como mostra da Figura 9.

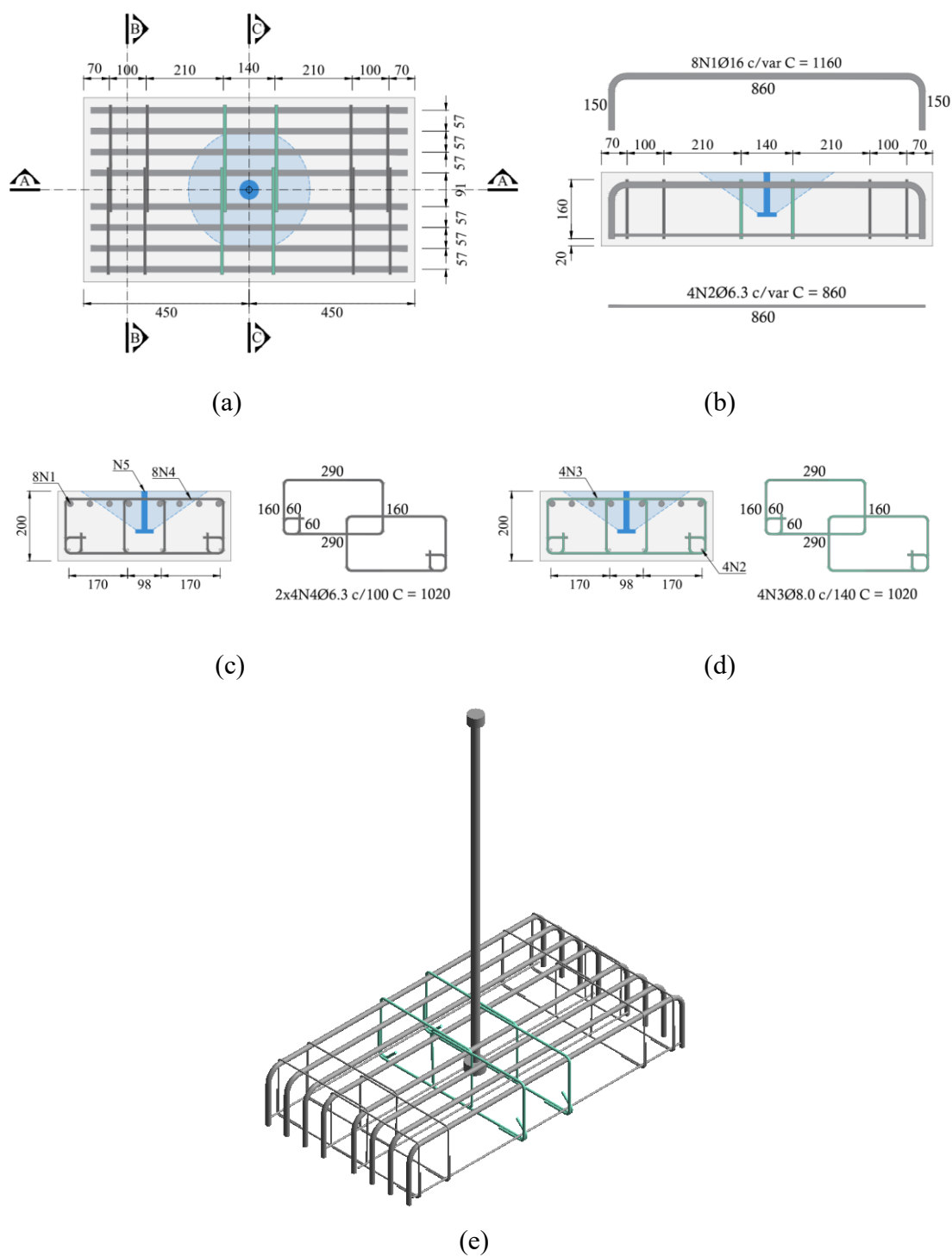


Figura 9 - Projeto executivo da série 3: (a) Planta Baixa; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC.

No detalhamento da série 4, os espécimes apresentam duas camadas de armadura de suspensão, com a primeira camada espaçada de 35 mm e a segunda camada a 105 mm em relação ao eixo do conector, como mostra a Figura 10.

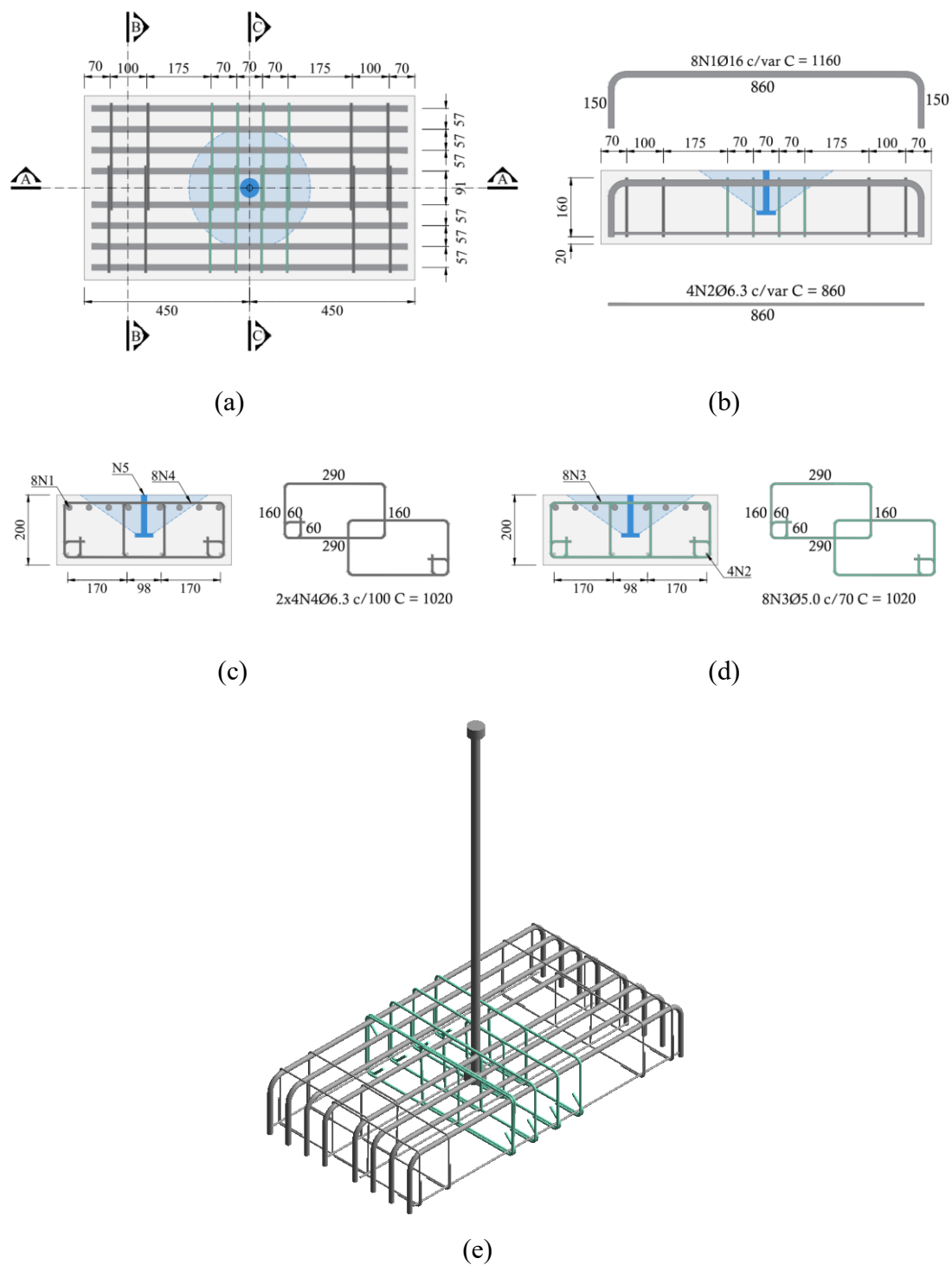


Figura 10 - Projeto executivo da série 4: (a) Planta Baixa; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC.

Já a série 5, repete-se as duas camadas, porém apresentam maior proximidade em relação ao conector metálico, com a primeira camada a 25 mm e a segunda camada a 75 mm, como mostra a Figura 11.

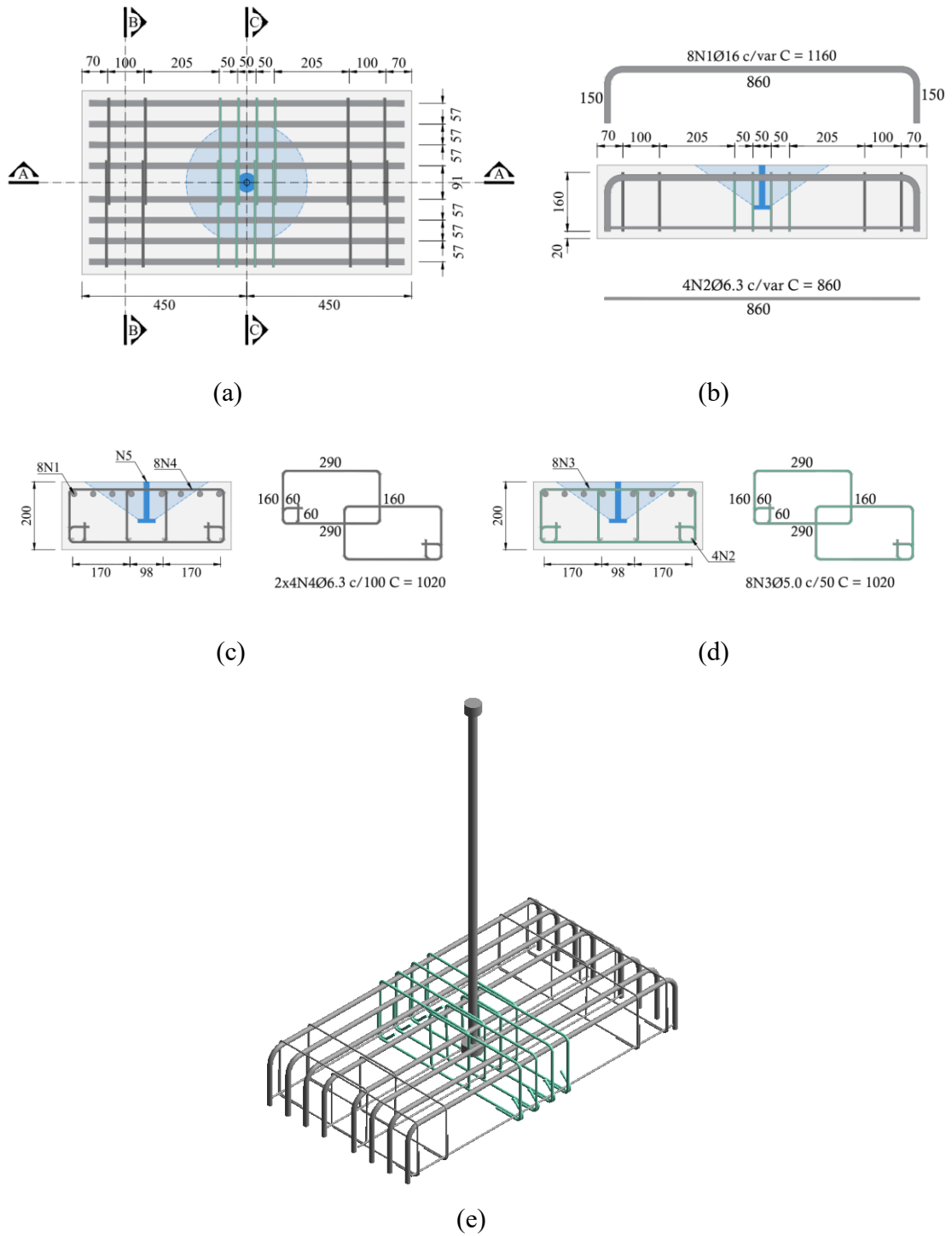


Figura 11 - Projeto executivo da série 5: (a) Planta Baixa; (b) Corte AA; (c) Corte BB; (d) Corte CC.

3.4. CONFEÇÃO DOS ESPÉCIMES

3.4.1. Características dos conectores

Os conectores utilizados neste estudo são compostos por duas partes distintas: a haste e a cabeça. As hastes foram confeccionadas em aço CA-50, com diâmetro de 20 mm, enquanto as cabeças foram produzidas em aço CA-25, apresentando diâmetro de 60 mm.

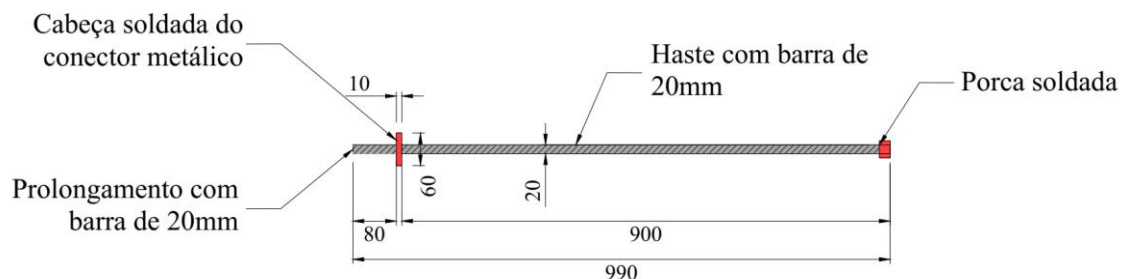


Figura 12 - Projeto executivo do conector metálico.

Para assegurar um elevado controle tecnológico dos conectores, sua eficiência será avaliada por meio de ensaios de tração, conforme as recomendações da norma ASTM A370 (2015). Serão realizados dois ensaios, nos quais a cabeça do conector será fixada e a haste tracionada, com o objetivo de verificar sua resistência à tração.

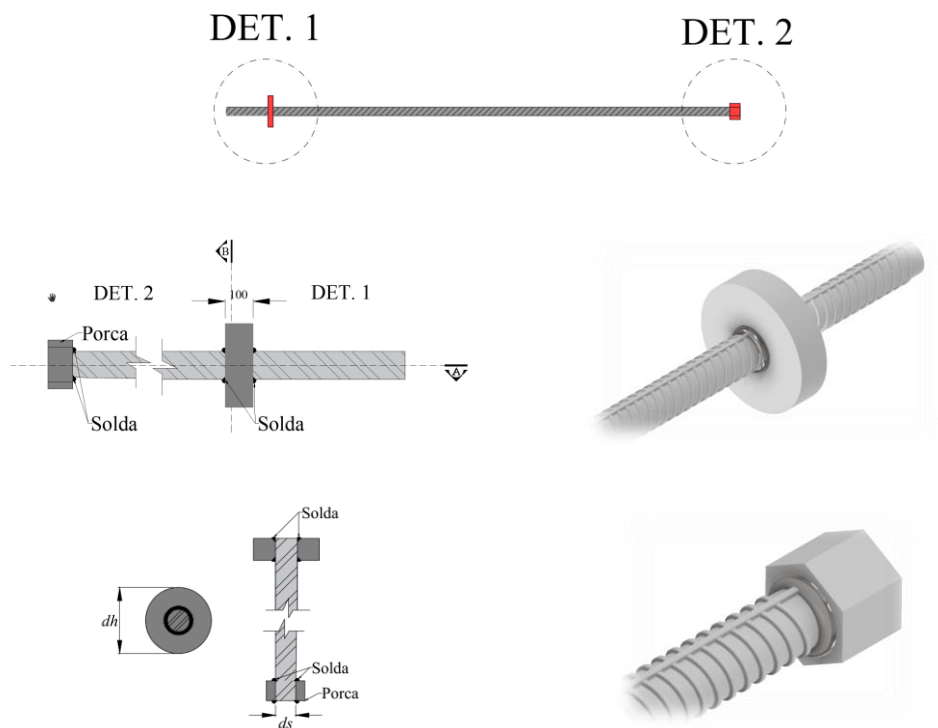


Figura 13 – Detalhamento do conector.

3.5. INSTRUMENTAÇÃO

3.5.1. Deslocamento vertical

Os deslocamentos verticais foram obtidos por meio de transdutores do tipo transformador diferencial variável linear (LVDT). Para o ensaio, foram utilizados três dispositivos para medição dos deslocamentos verticais, conforme ilustrado na Figura 14. O LVDT 1 foi instalado na lateral do prisma, com a finalidade de registrar os deslocamentos verticais associados à flexão da peça durante o carregamento. O LVDT 2 foi posicionado na parte inferior do sistema de ensaio, em contato direto com a cabeça do conector, possibilitando o monitoramento do movimento local desse elemento. Já o LVDT 3 foi fixado na face superior do espécime, dentro da região correspondente ao cone de concreto, próximo à haste do conector.

Essa configuração de posicionamento permitiu determinar o deslizamento relativo do conector em relação ao concreto, obtido pela diferença entre as leituras registradas pelos transdutores.

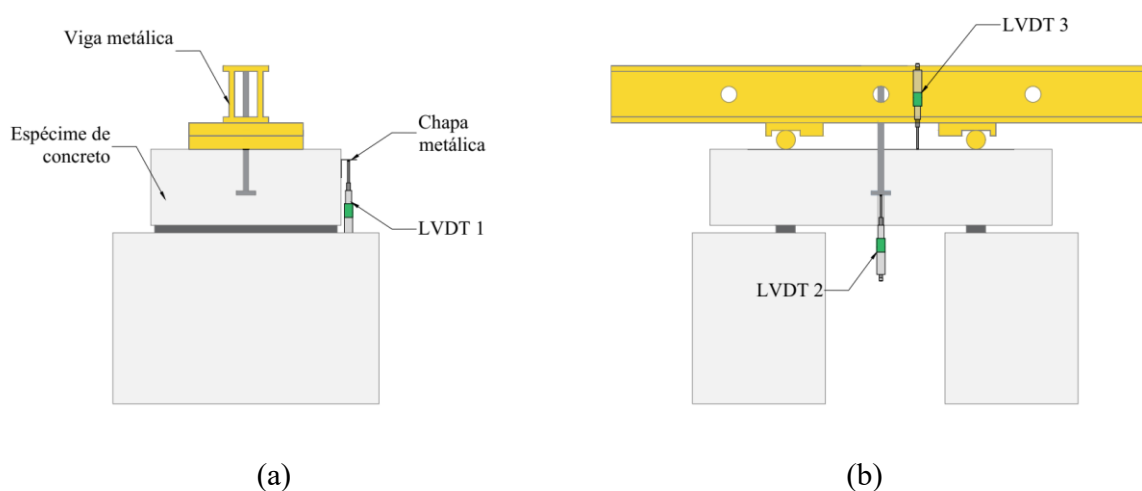


Figura 14 - Disposição dos LVDT's para leitura de deslocamento: a) Vista lateral do sistema de ensaio; b) Vista frontal do sistema de ensaio.

3.5.2. Deformação das armaduras

A medição das deformações nos conectores, nas armaduras de flexão e de suspensão foi realizada por meio de extensômetros elétricos, conforme ilustrado na Figura 15. No conector metálico, instalou-se um extensômetro na haste, posicionado imediatamente fora da região

correspondente ao comprimento de embutimento (E_s), permitindo monitorar as deformações induzidas pelos esforços de tração atuantes.

As armaduras de flexão foram instrumentadas com o extensômetro identificado como (E_f). Esse dispositivo foi fixado no sentido longitudinal da barra, localizado aproximadamente na região média do seu comprimento, especificamente na armadura de flexão mais próxima à cabeça do conector, de modo a registrar as deformações desenvolvidas durante o ensaio.

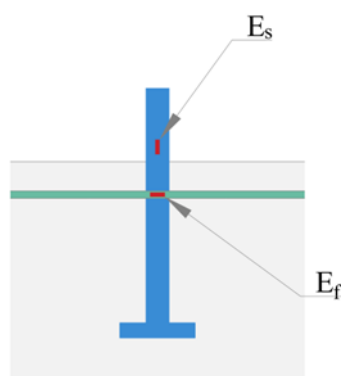


Figura 15 - Posição dos extensômetros.

De acordo com a norma ACI 318 (2019), o ângulo de abertura do cone de ruptura no concreto é de aproximadamente 35° . Considerando essa condição, os extensômetros elétricos de resistência foram posicionados nos pontos em que a trajetória teórica da fissura interceptaria a armadura de suspensão. Essa escolha de instrumentação teve como objetivo registrar os valores máximos de deformação, conforme ilustrado na Figura 16.

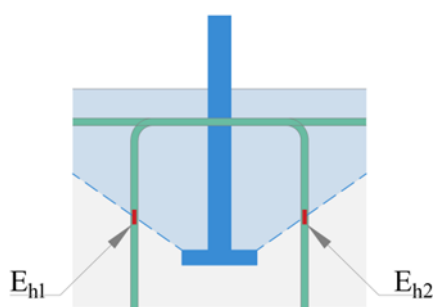


Figura 16 - Posição dos extensômetros na armadura de suspensão.

3.6. SISTEMA DE ENSAIO

A montagem utilizada nos ensaios de arrancamento contou com dois blocos de concreto, dois roletes metálicos para sustentar os corpos de prova e uma viga metálica de reação vazada, que permitiu a passagem da haste do conector. Para garantir um sistema isostático, a viga recebeu duas chapas de aço com diferentes condições de restrição, representando apoios de 1º

e 2º gêneros. A conexão entre a estrutura e os corpos de prova foi realizada por ripas de madeira.

O carregamento foi aplicado por meio de um cilindro hidráulico vazado, acionado por uma bomba hidráulica. A força gerada foi medida por uma célula de carga conectada a um sistema de aquisição de dados. Tanto o cilindro quanto a célula de carga foram posicionados sobre a viga de reação e fixados à haste do conector metálico por um sistema de encunhamento.

O ensaio iniciou-se com o travamento dos prismas, etapa precedida pela aplicação de um pré-carregamento nos corpos de prova, cujo objetivo foi garantir a estabilidade e evitar deslocamentos que gerassem excentricidades. Em seguida, a carga de arrancamento foi aplicada através do tracionamento da haste metálica do conector. O incremento adotado foi de 5 kN e, a cada passo, foram registradas as deformações no conector, na armadura de flexão, na região comprimida e no cone de concreto. O sistema proposto de ensaio é mostrado na Figura 17, enquanto a execução prática pode ser observada na Figura 18.

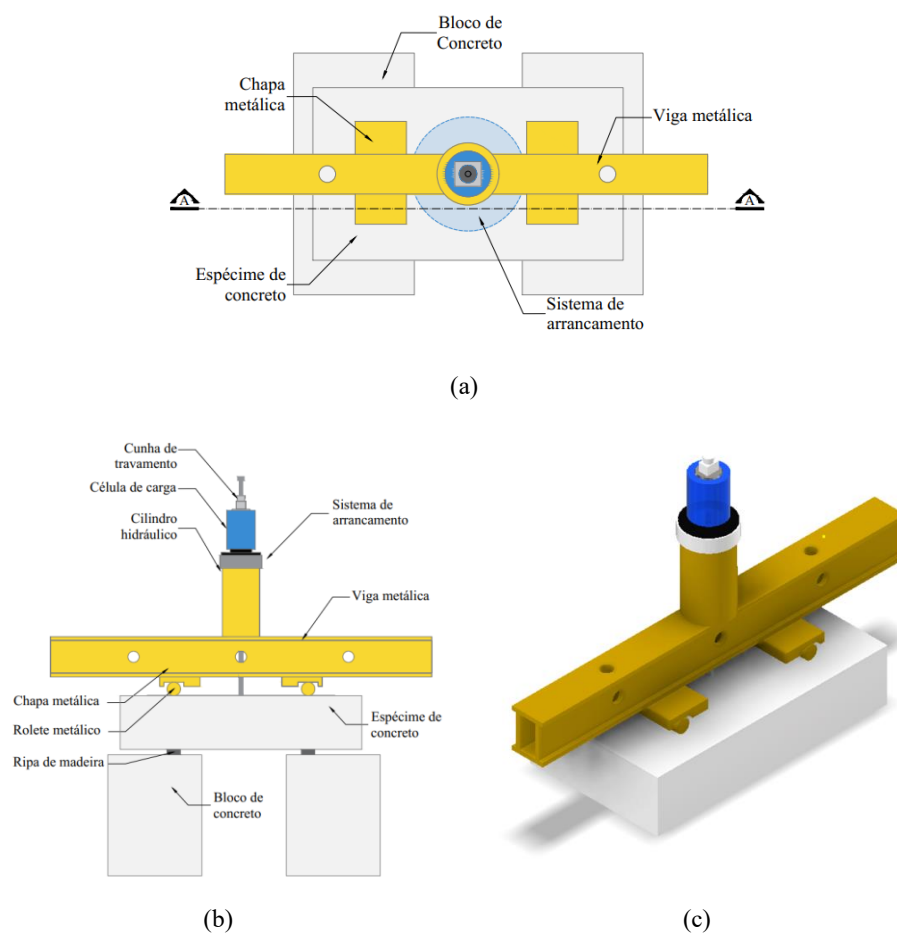


Figura 17 - Detalhamento do Sistema de Ensaio de arrancamento: (a) Planta baixa do sistema de ensaio; (b) Corte AA (c) 3D do sistema de ensaio.



Figura 18 - Sistema de ensaio executado.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1. Propriedades mecânicas dos materiais

A caracterização do concreto foi de fundamental importância para a análise dos resultados experimentais de resistência ao arrancamento dos corpos de prova, sendo a resistência à compressão um dos principais parâmetros avaliados. Os dados obtidos nesses ensaios permitiram ajustar as estimativas de resistência dos espécimes utilizados. Para essa caracterização, foram realizados ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e determinação do módulo de elasticidade, conforme apresentado na Figura 19.

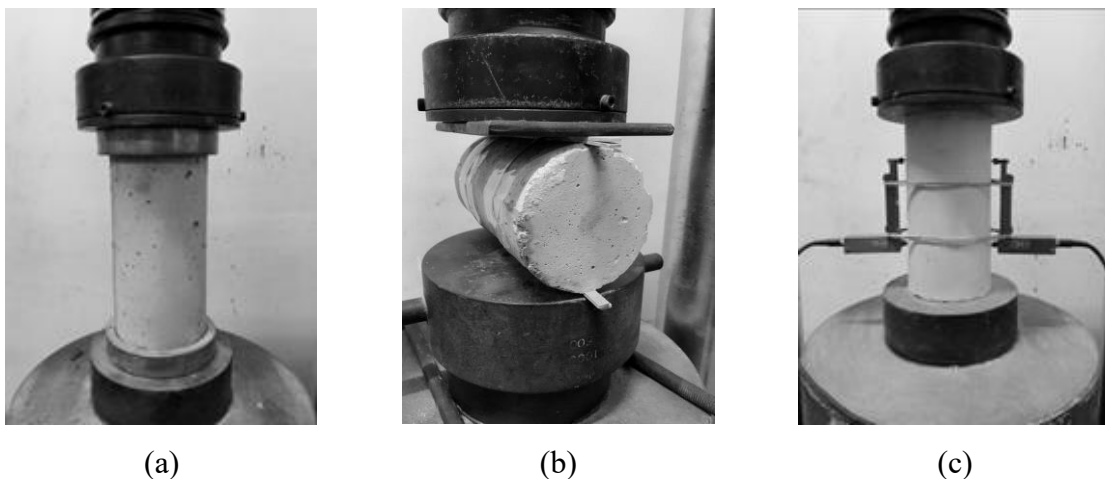


Figura 19 - Ensaio de caracterização dos materiais: a) Compressão axial; b) Tração por compressão

diametral; c) Módulo de elasticidade.

A Tabela 6 apresenta os resultados médios obtidos nos ensaios dos materiais, organizando de forma sistemática as propriedades do concreto para cada classe de resistência analisada. O mapeamento foi conduzido com o intuito de identificar, com maior precisão, eventuais variações nos parâmetros de resistência mecânica e no comportamento dos espécimes durante o processo de concretagem, sem considerar alterações nas propriedades intrínsecas do material.

Tabela 6 - Resultados médios de caracterização do concreto.

Classe	f_{cm} (MPa)	f_{ct} (MPa)	E_{ci} (GPa)
C30	29,8	2,87	30,6
C40	41,2	3,42	36,0
C50	53,2	3,90	40,8

Os ensaios de caracterização foram conduzidos para determinar as propriedades mecânicas do aço utilizado na confecção da armadura de flexão, cisalhamento e dos conectores metálicos. Os resultados obtidos a partir desses ensaios são apresentados de forma consolidada na Tabela 7. As informações incluem a tensão de escoamento (f_{ys}), a deformação de escoamento (ϵ_{ys}) e o módulo de elasticidade do aço (E_s).

Tabela 7 – Propriedades mecânicas do aço.

Propriedades do aço			
Ø (mm)	f_{ys} (MPa)	ϵ_{ys} (‰)	E_s (GPa)
5,0	550	2,70	195
6,3	544	2,75	198
8,0	580	2,97	196
16	545	2,87	190
20	546	2,80	194

4.2. Resultados das séries

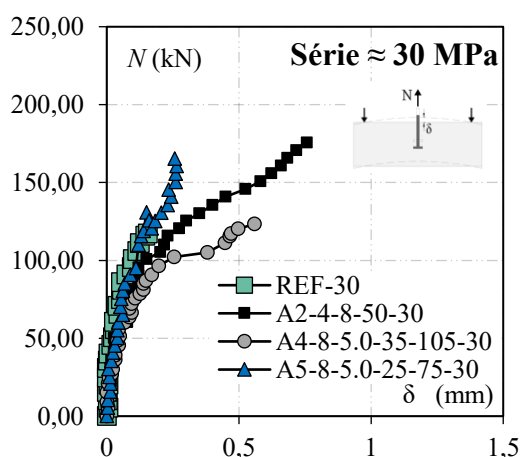
Nesta seção apresentam-se os resultados experimentais referentes ao comportamento de elementos de concreto armado com de armadura de suspensão. A análise foi conduzida com o propósito de caracterizar o estado de fissuração e os deslocamentos dos espécimes ao longo da aplicação de carga, constituindo uma etapa essencial para a compreensão das condições do concreto antes da execução dos ensaios de arrancamento dos conectores metálicos com cabeça e o comportamento dos mesmos durante o ensaio.

A interpretação da resposta experimental foi estruturada em duas etapas complementares. Na primeira, os espécimes foram organizados segundo a resistência à compressão do concreto, de modo a permitir que a avaliação se concentrasse nos efeitos da taxa de armadura de suspensão e do espaçamento desta em relação ao conector, evitando a influência direta da resistência do concreto sobre a comparação. Na segunda etapa, as respostas experimentais foram analisadas considerando apenas a variação do espaçamento entre a armadura de suspensão e o conector. Para isso, realizaram-se comparações entre séries com a mesma taxa de armadura, de modo a isolar e avaliar de forma mais precisa a influência desse parâmetro específico.

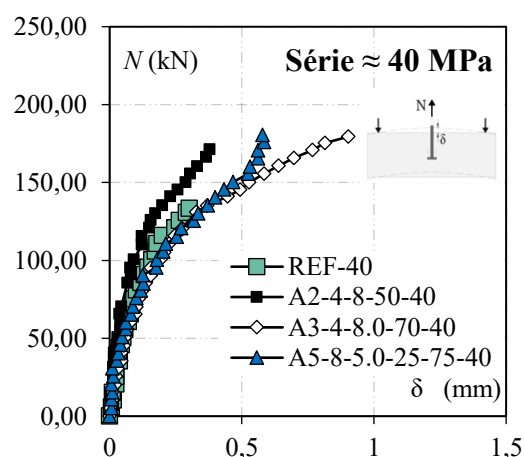
4.2.1. Deslocamento vertical

A Figura 20 apresenta a relação entre a deflexão dos espécimes (δ) e o carregamento à tração do conector, permitindo identificar padrões dentro de cada classe de resistência do concreto. Observou-se que os espécimes moldados com concretos de 30, 40 e 50 MPa apresentaram comportamento semelhante até níveis de carregamento próximos de 50, 60 e 75 kN, respectivamente, valores que correspondem à carga de fissuração por flexão. Após esse estágio, as diferenças tornaram-se mais evidentes: na série de 30 MPa, a maioria dos espécimes manteve comportamento similar, com exceção dos espécimes A2-4-8-50-30 e A4-8-5.0-35-105-30, que apresentaram deformações mais acentuadas.

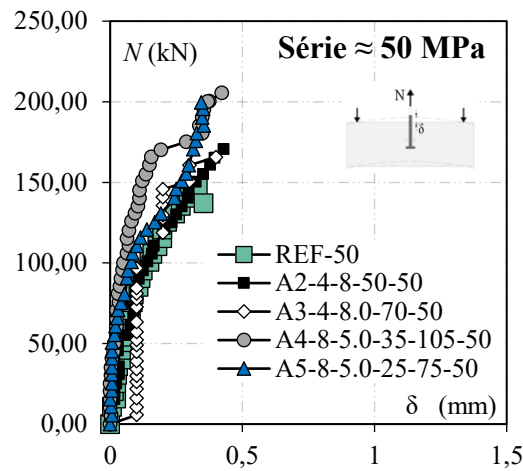
Na série de 40 MPa, os resultados mostraram uniformidade, exceto para o espécime A3-4-8.0-70-40, que registrou maior deformação. Já na série de 50 MPa, constatou-se um desempenho mais homogêneo entre os diferentes espécimes, evidenciando menor dispersão nos resultados.



(a) Classe de 30 MPa.



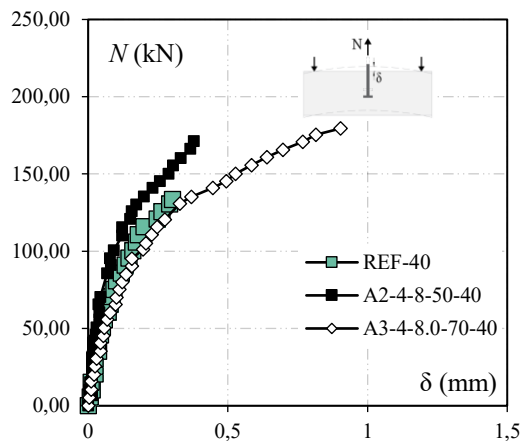
(b) Classe de 40 MPa.



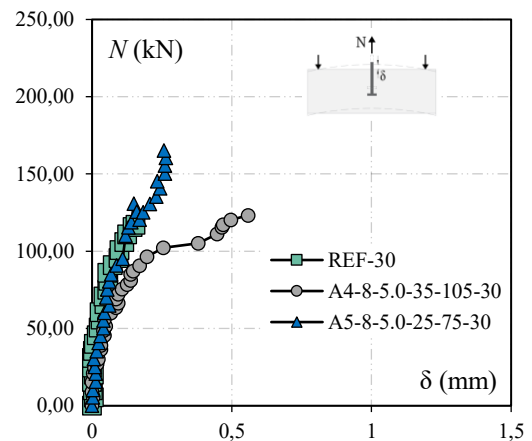
(c) Classe de 50 MPa.

Figura 20 - Deslocamento vertical dos espécimes.

Dando continuidade à investigação, foi conduzida uma análise considerando agora apenas o espaçamento entre a armadura de suspensão e o conector. Os resultados mostrados na Figura 21 demonstraram que os espécimes apresentaram comportamento semelhante até aproximadamente 50 kN para as séries 2 e 3, e em torno de 55 kN para as séries 4 e 5. A partir desse ponto, diferenças mais significativas foram observadas: a série A3-4-8.0-70 apresentou deformações mais elevadas em comparação com a série A2-4-8-50, enquanto a série A4-8-5.0-35-105 apresentou maiores deformações em relação à série A5-8-5.0-2.



(a) Série 2 e 3



(b) Série 2 e 3

Figura 21 - Deslocamento vertical dos espécimes por série.

A verificação dos deslocamentos garante que as condições de carregamento aplicadas aos espécimes sejam consistentes e tecnicamente válidas. Dessa forma, assegura-se que as comparações entre os diferentes conectores sejam realizadas em um regime de carga-deslocamento equivalente, e dentro do planejado.

4.2.2. Deslizamento do conector

A Figura 22 apresenta a relação entre o deslizamento do conector (ξ) e a carga aplicada, obtida por meio de medições realizadas com transdutores de deslocamento linear (LVDTs), posicionados especificamente para capturar os deslocamentos relativos durante o ensaio. Essa instrumentação permitiu acompanhar, com precisão, o deslocamento relativo entre o conector metálico e o concreto ao longo dos ensaios de arrancamento. A avaliação desse parâmetro é fundamental para diagnosticar a integridade da ligação e prevenir modos de falha indesejados, como o deslizamento excessivo antes do destacamento do cone de concreto. As Figura 22.a e Figura 22.b apresentadas evidenciam uma rigidez inicial acentuada, seguida de um estágio de deslocamento progressivo próximo à ruptura, da maioria dos espécimes, compatível com o destacamento do cone de concreto.

Ao comparar os espécimes A2-4-8.0-50-40 e A3-4-8.0-70-40, presente na Figura 22.a, nos quais a única variável modificada foi o espaçamento da armadura de suspensão em relação ao conector (50 mm e 70 mm, respectivamente), observa-se que o aumento dessa distância resulta em maiores valores de deslizamento (ξ) para um mesmo nível de carregamento. Enquanto o espécime A2 apresenta deslocamentos mais contidos ao longo da aplicação da carga, indicando maior restrição ao movimento relativo do conector, o espécime A3 registra deformações mais elevadas, refletindo menor eficiência da armadura na contenção do deslocamento.

Esse comportamento evidencia que a proximidade da armadura de suspensão ao conector contribui para reduzir as deformações relativas durante o ensaio, uma vez que promove maior interação entre o conector, o concreto e a armadura, enquanto espaçamentos maiores diminuem essa capacidade de controle, resultando em curvas de deslizamento mais acentuadas.

Da mesma forma, ao analisar a curva da série A5, a mesma apresenta-se mais “vertical”, indicando maior restrição ao movimento relativo do conector e controle mais eficiente das deformações após a fissuração. Em contraste, o A4 registra deslizamentos superiores para cargas equivalentes, com trajetória de deslizamento mais pronunciada, evidenciando menor capacidade da armadura em conter o deslocamento quando posicionada mais distante. Esses resultados reforçam que a proximidade das camadas de suspensão ao eixo do conector aumenta a interação mecânica, reduzindo o deslizamento observado durante o ensaio.

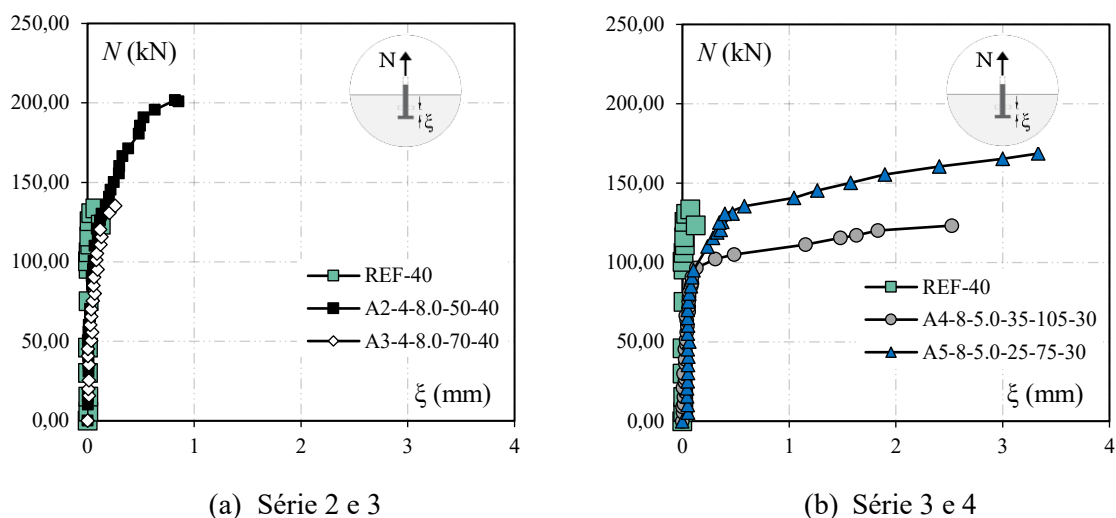


Figura 22 - Deslizamento do conector.

Ao analisar os gráficos da Figura 23 das séries de classe de resistência do concreto de aproximadamente 30, 40 e 50 MPa, observa-se que tanto o espaçamento da armadura de suspensão em relação ao conector quanto a bitola adotada exercem influência direta sobre o deslizamento (ξ).

Nos espécimes de 30 MPa, esses efeitos se mostram mais evidentes: armaduras mais próximas e de maior diâmetro resultaram em curvas mais verticais, com menores deslocamentos para o mesmo nível de carga, enquanto maiores espaçamentos e bitolas reduzidas estiveram associados a deformações significativamente superior.

Para a classe de 40 MPa, verifica-se uma resposta aparentemente mais uniforme, o que pode estar relacionado à maior resistência do concreto. Ainda assim, a tendência persiste, uma vez que espécimes com armaduras mais afastadas ou menos robustas tendem a apresentar maiores deslocamentos relativos.

Já nas séries de 50 MPa, as curvas tornam-se ainda mais próximas, o que sugere que o aumento da resistência do concreto pode atuar como fator de contenção das deformações. Contudo, mesmo nesse nível, o afastamento da armadura e a utilização de bitolas menores parecem continuar associados a maiores valores de deslizamento. De forma geral, os resultados indicam que a resistência do concreto tende a contribuir para a redução da dispersão, embora a combinação entre taxa geométrica e posicionamento da armadura de suspensão se mostre de maneira mais clara como um fator determinante no controle do deslizamento dos conectores.

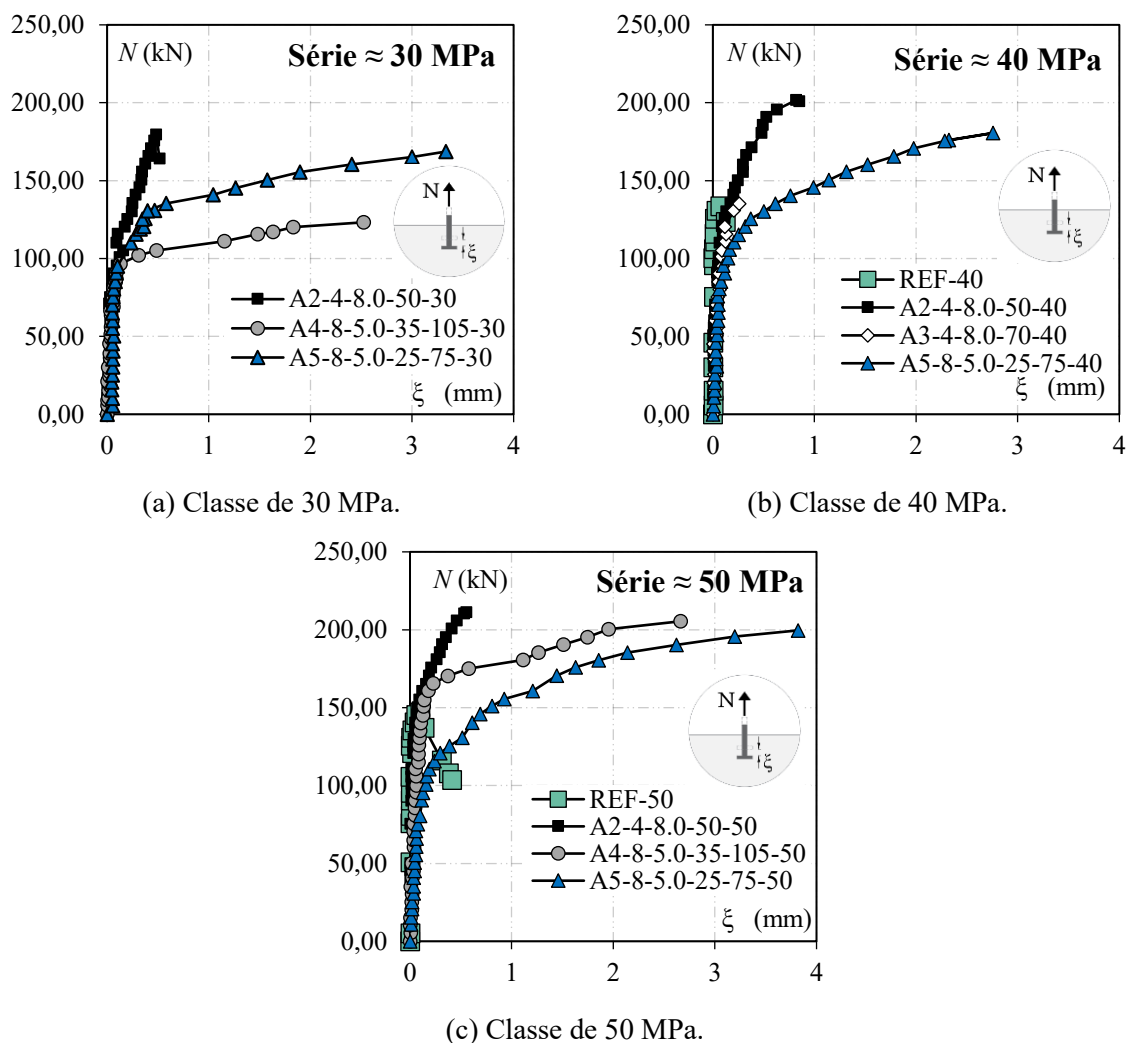


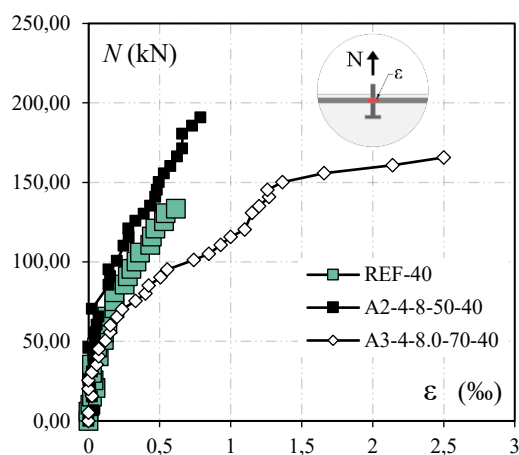
Figura 23 - Deslocamento vertical dos espécimes.

Destaca-se que os dados referentes aos espécimes REF-30, A3-4-8.0-70-30, A3-4-8.0-70-50 e A4-8-5.0-35-105-40 não foram incluídos na figura, em razão de falhas de aquisição de dados pelos deflectômetros digitais durante a realização dos ensaios.

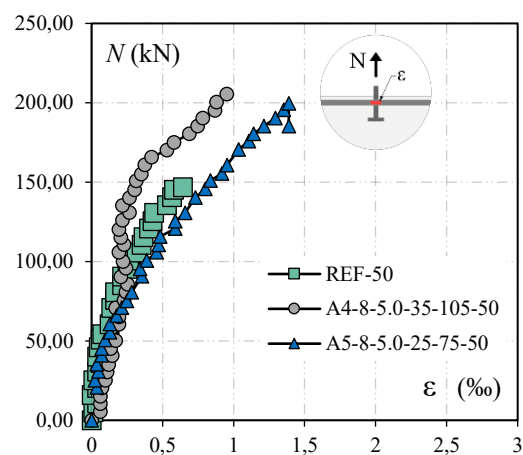
4.2.3. Deformações na armadura de flexão

Esta seção apresenta os resultados de deformação obtidos por extensômetros fixados diretamente nas armaduras de flexão. O monitoramento foi realizado nas regiões de embutimento dos conectores, com o objetivo de acompanhar a ativação da armadura ao longo do vão e relacionar sua deformação à posição do carregamento.

A Figura 22.a apresenta os resultados das séries A2 e A3, em que a maior deformação registrada na armadura longitudinal atingiu 2,5‰, observada no espécime A3-4-8.0-70-40, correspondente a um nível de solicitação de $N_u = 179$ kN. Na Figura 22.b referente às séries 4 e 5, o valor máximo de deformação foi de 1,4‰, registrado no espécime A5-8-5.0-25-75-50, para uma solicitação de $N_u = 199$ kN.



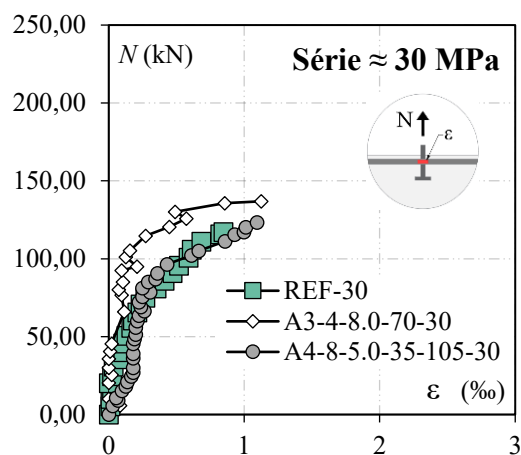
(a) Série 2 e 3



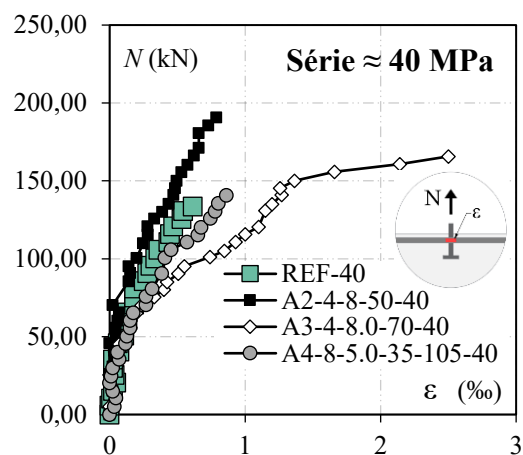
(b) Série 4 e 5

Figura 24 - Deformação na armadura de flexão.

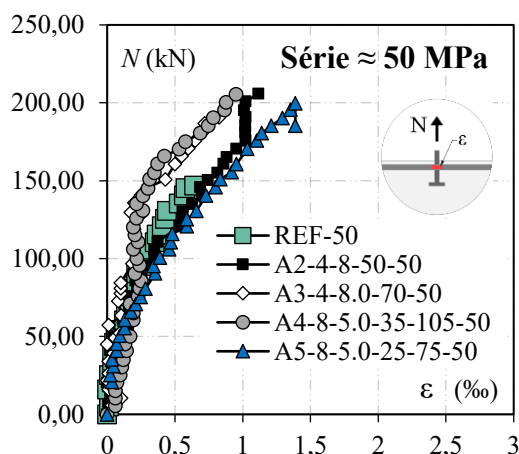
De acordo com a Figura 25, no grupo de espécimes moldados com concreto de 30 MPa, a maior deformação na armadura longitudinal foi de 1,13‰, verificada no espécime A3-4-8.0-70-30, correspondente a uma solicitação de $N_u = 137$ kN. Para o grupo de 40 MPa, o valor máximo alcançou 2,5‰, registrado no espécime A3-4-8.0-70-40, submetido a uma solicitação de $N_u = 179$ kN. Por fim, no grupo de 50 MPa, a maior deformação obtida foi de 1,39‰, associada ao espécime A5-8-5.0-25-75-50, para uma solicitação de $N_u = 199$ kN.



(a) Classe de 30 MPa



(b) Classe de 40 MPa



(c) Classe de 30 MPa

Figura 25 - Deslocamento vertical dos espécimes.

Considerando que a deformação de escoamento do aço CA-50, com diâmetro nominal de 16 mm, utilizado na confecção das armaduras, é da ordem de 3,18%, verifica-se que todos os valores medidos permaneceram abaixo desse limite. Assim, confirma-se que não ocorreu ruptura por escoamento da armadura longitudinal em flexão em nenhum dos espécimes ensaiados. Cabe destacar, entretanto, que as leituras de deformação nos espécimes A2-4-8.0-50-C, A5-8-5.0-25-75-B e A5-8-5.0-25-75-C foram interrompidas em função de falhas na aquisição de dados durante o ensaio experimental.

4.2.4. Deformações na haste do conector

A avaliação das deformações na haste dos conectores metálicos, fora da região de embutimento no concreto, constitui etapa importante para compreender o comportamento da ligação ao longo dos ensaios de arrancamento. Para esse monitoramento, foram utilizados extensômetros instalados imediatamente acima da superfície do concreto na haste dos conectores, possibilitando registrar de forma contínua as deformações correspondentes ao carregamento aplicado. A Figura 26 e Figura 27 apresentam a relação entre a deformação do conector e a carga de tração, leitura realizada com o objetivo de verificar se os conectores atingiriam a condição de escoamento do aço antes da ocorrência da ruptura do cone de concreto dos espécimes.

De maneira geral, os resultados evidenciaram que as hastes permaneceram em regime linear elástico durante todo o carregamento, sem indícios de plastificação. Esse comportamento foi consistente para todos os espécimes ensaiados, demonstrando que a ruptura não esteve associada ao escoamento da haste, mas sim aos mecanismos de falha no concreto. Essa constatação reforça a importância do monitoramento da deformação da haste,

uma vez que permite confirmar que a capacidade resistente global da ligação foi governada pelo concreto e não pela limitação do aço, assegurando maior confiabilidade na interpretação dos resultados obtidos.

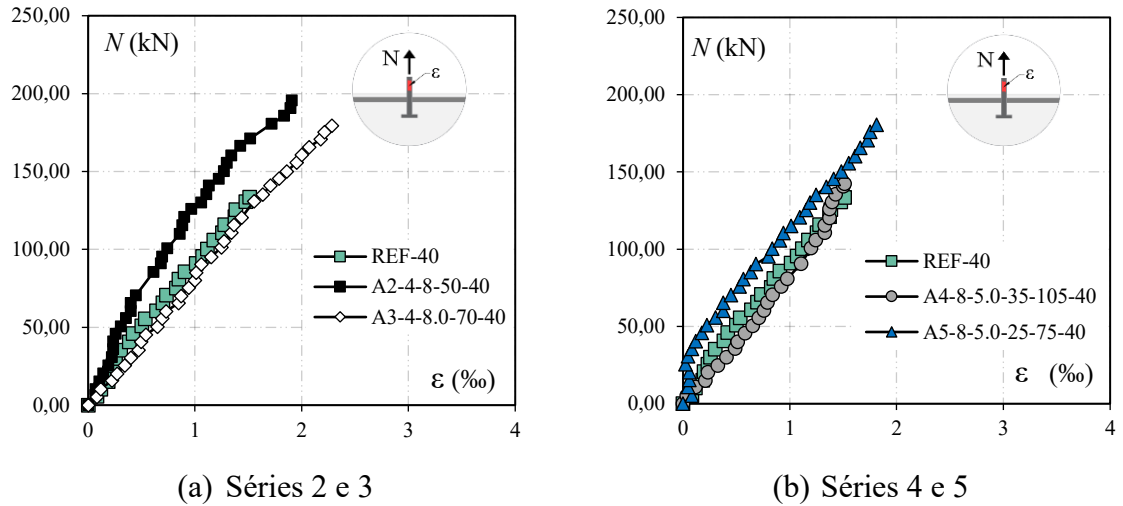


Figura 26 - Deformações na haste do conector.

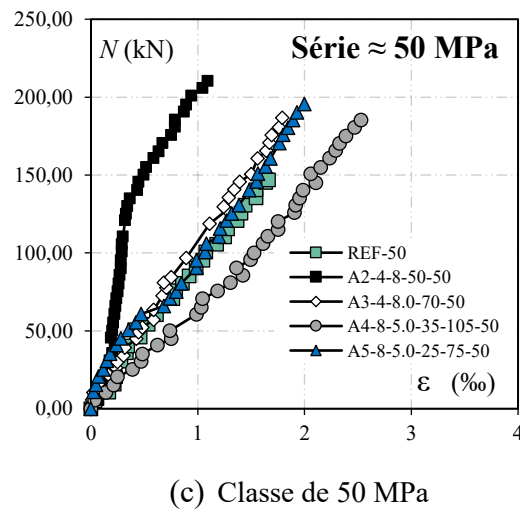
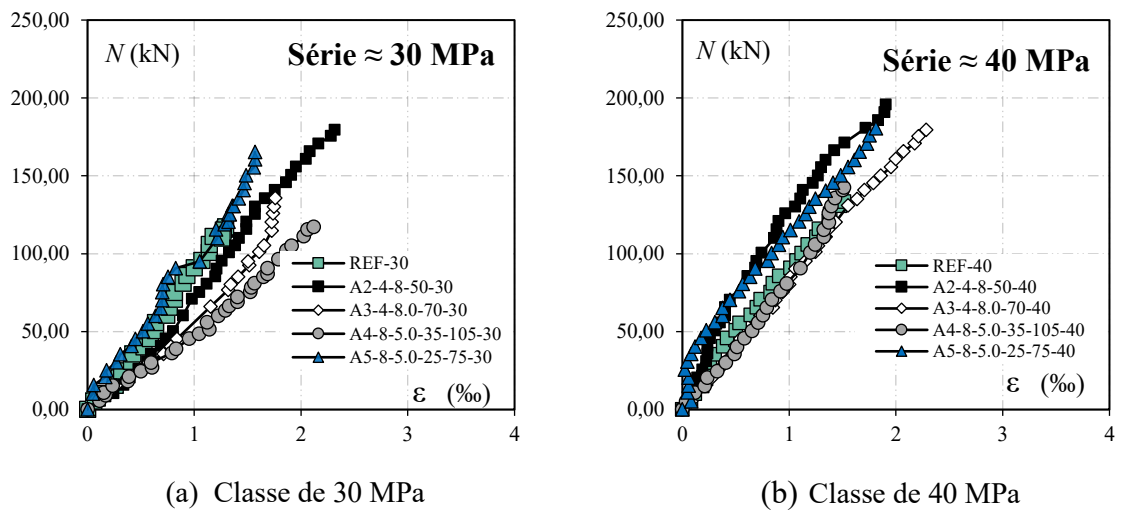


Figura 27 - Deformações na haste do conector.

4.2.1. Modos de ruptura

A observação dos espécimes após os ensaios de arrancamento possibilitou identificar com clareza os modos de ruptura predominantes em cada série. A Figura 28 apresenta a vista superior dos espécimes das séries REF, 2, 3, 4 e 5, evidenciando que todos os casos resultaram em ruptura pelo cone de concreto, com falhas delimitadas por contornos circulares ao redor da haste metálica e destacamento da camada superficial. A morfologia observada, incluindo a fragmentação parcial dos cones, mostra-se compatível com os mecanismos de falha usualmente descritos na literatura para esse tipo de solicitação.



a) REF-30



b) REF-50



c) REF-40



d) A2-4-8.0-50-40



e) A2-4-8.0-50-50



f) A2-4-8.0-50-30



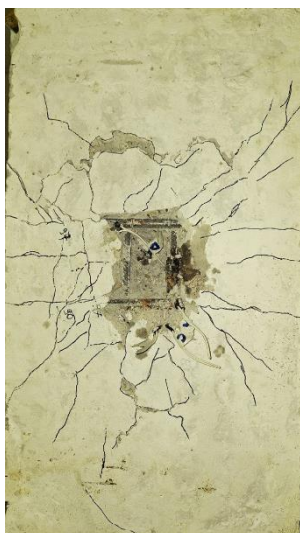
g) A3-4-8.0-70-30



h) A3-4-8.0-70-50



i) A3-4-8.0-70-40



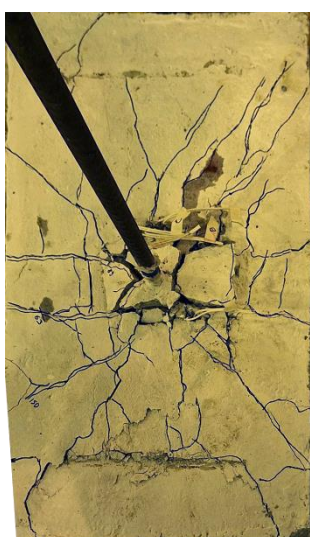
j) A4-8-5.0-35-105-30



k) A4-8-5.0-35-105-50



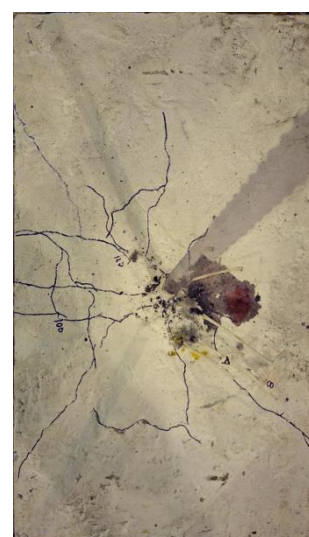
l) A4-8-5.0-35-105-40



m) A5-8-5.0-25-75-50



n) A5-8-5.0-25-75-30



o) A5-8-5.0-25-75-40

Figura 28 - Deformações na haste do conector ensaiado.

4.2.2. Cargas de ruptura experimentais

Na Tabela 8 pode ser observada a avaliação do incremento de resistência proporcionado pela armadura complementar, observou-se que duas características exercem influência direta sobre a capacidade de arrancamento: o diâmetro das barras e a distância da armadura em relação ao conector. Além desses fatores, identificou-se ainda uma possível terceira variável de relevância, a resistência do concreto, cuja influência será analisada de forma específica ao longo deste estudo.

O efeito do diâmetro da armadura complementar pode ser avaliado a partir da comparação entre os espécimes A2-4-8.0-50, A3-4-8.0-70 e A4-8-5.0-35-105, A5-8-5.0-25-75, nos quais essa é a principal variável de diferenciação. Considerando a classe de resistência de 30 MPa, observou-se ganhos de resistência ao arrancamento de aproximadamente 53%, 17%, 5% e 44%, respectivamente, em relação à série de referência. A escolha por avaliar uma classe de resistência separadamente teve como finalidade eliminar a influência do concreto como fator de variação neste cenário. É importante destacar que o cálculo do acréscimo de resistência foi realizado de forma individualizada para cada classe de resistência, de modo que os valores apresentados correspondem sempre ao incremento obtido em relação à série de referência de sua respectiva classe de concreto.

Para a análise da influência da distância entre o conector e a armadura complementar, expressa pela razão s_0/h_{ef} , foram realizadas comparações entre os espécimes A2-4-8.0-50 e A3-4-8.0-70, bem como entre os espécimes A4-8-5.0-35-105 e A5-8-5.0-25-75. Nessas comparações, obtiveram-se razões s_0/h_{ef} de 0,64 e 0,45 para as séries 2 e 3, respectivamente, e de 0,32 e 0,23 para as séries 4 e 5. Em termos de desempenho, observaram-se incrementos de resistência de aproximadamente 50% e 27% para 2 e 3, e de 17% e 38% para 4 e 5. Esses resultados indicam que o posicionamento da armadura complementar mais próxima ao conector se mostra mais eficiente para o incremento da resistência ao arrancamento.

Outro aspecto observado é que, os maiores acréscimos de resistência ocorreram na série A2-4-8.0-50, composta por apenas uma camada de armadura de suspensão, porém com bitola de 8,0 mm, a qual apresentou desempenho superior à série A5-8-5.0-25-75, que possuía duas camadas de armadura de suspensão com bitola de 5,0 mm e menor espaçamento entre as camadas. Esse comportamento sugere que a adoção de uma única camada com barras de maior diâmetro pode ser mais eficiente do que o emprego de múltiplas camadas de menor taxa de armadura. Além disso, os resultados reforçam a relevância do posicionamento da armadura complementar em distâncias inferiores a $0,5 \cdot h_{ef}$ do conector, condição que se mostrou mais eficaz para o incremento da resistência ao arrancamento.

De forma adicional, ao se analisar as diferenças entre as classes de concreto e a resistência última ao arrancamento, torna-se perceptível a possibilidade de correlação entre o aumento da resistência do concreto e a carga máxima atingida pelos espécimes. Em cada série, observa-se uma variação aproximadamente proporcional entre esses dois parâmetros, de modo que o incremento da resistência à compressão do concreto tende a refletir em maiores valores de resistência ao arrancamento. Esse comportamento é consistente em todas as séries avaliadas, desde os espécimes de referência até a série 5, sugerindo que a resistência do concreto atua como fator de contenção das deformações e contribui para ampliar a capacidade resistente da ligação.

Ainda assim, é importante ressaltar que, embora o concreto apresente influência significativa, a eficiência do arrancamento resulta da interação entre resistência do material, diâmetro da armadura e posicionamento relativo ao conector, o que explica eventuais dispersões observadas em determinados grupos de ensaio.

Em síntese, a análise demonstrou que o diâmetro das barras e o posicionamento da armadura complementar em relação ao conector são fatores decisivos para o incremento de resistência ao arrancamento. Os resultados indicaram que barras de maior bitola, mesmo em menor número de camadas, podem ser mais eficazes do que múltiplas camadas de menor diâmetro, sobretudo quando posicionadas a distâncias reduzidas do conector. Adicionalmente, observou-se que a resistência do concreto possivelmente tende a contribuir para o aumento da capacidade resistente, embora sua influência dependa da interação com os parâmetros geométricos da armadura.

Dessa forma, confirma-se que o desempenho da ligação resulta de um efeito combinado entre resistência do concreto, diâmetro e distância da armadura, sendo essa interação determinante para explicar as variações registradas entre os diferentes espécimes.

Tabela 8 – Resultado das cargas de ruptura experimental.

Espécime	h_{ef} (mm)	S_0/h_{ef}	$N_{fiss,flex}$ (kN)	f_c (N/mm ²)	$N_{u,exp}$ (kN)	Acréscimo de Resistência
REF-30	110	-	120	33	117	0%
REF-40	110	-	120	43	133	0%
REF-50	110	-	120	51	146	0%
A2-4-8.0-50-30	110	0,64	100	38	179	53%
A2-4-8.0-50-40	110	0,64	100	48	201	51%
A2-4-8.0-50-50	110	0,64	100	54	211	45%
A3-4-8.0-70-30	110	0,45	100	26	137	17%
A3-4-8.0-70-40	110	0,45	110	45	179	35%
A3-4-8.0-70-50	110	0,45	100	51	190	30%
A4-8-5.0-35-105-30	110	0,32	100	23	123	5%
A4-8-5.0-35-105-40	110	0,32	85	32	142	7%
A4-8-5.0-35-105-50	110	0,32	140	63	205	40%
A5-8-5.0-25-75-30	110	0,23	100	29	168	44%
A5-8-5.0-25-75-40	110	0,23	100	39	180	35%
A5-8-5.0-25-75-50	110	0,23	100	47	199	36%

4.3. Influência da armadura de suspensão no valor de N

4.3.1. Deformação nas armaduras de suspensão

A Figura 29 apresenta a deformação da armadura de suspensão para as séries A2, A3, A4 e A5, agrupadas em pares de mesma taxa de armadura. As séries 2 e 3 são representadas, respectivamente, pelos espécimes A2-4-8.0-50-40 e A3-4-8.0-70-40, enquanto as séries 4 e 5 correspondem aos espécimes A4-8-5.0-35-105-40 e A5-8-5.0-25-75-50.

Nas séries 2 e 3, compostas por quatro ramos de 8,0 mm de armadura de suspensão inseridos na região do cone de concreto, observou-se comportamento semelhante até cerca de 50 kN. A partir desse ponto, o espécime A2-4-8.0-50-40 apresentou maior eficiência em relação ao A3-4-8.0-70-40, o que se refletiu em menores deformações para o mesmo nível de carga e em uma carga última superior. Esse resultado destaca a importância do menor espaçamento entre o conector e a armadura de suspensão no controle das deformações.

Na análise das séries 4 e 5, compostas por oito ramos de 5,0 mm dispostos em duas camadas, o comportamento foi semelhante até aproximadamente 125 kN. Após esse ponto, as curvas passaram a divergir: o espécime da série A5 apresentou menores deformações e atingiu carga de ruptura mais elevada que o da série A4. Esse desempenho pode ser explicado pelo

posicionamento das armaduras de suspensão, uma vez que a segunda camada da série A4 se encontra a uma distância superior a $0,50 \cdot h_{ef}$, limite estabelecido pelas prescrições normativas como a máxima distância efetiva para contribuição significativa da armadura no arrancamento.

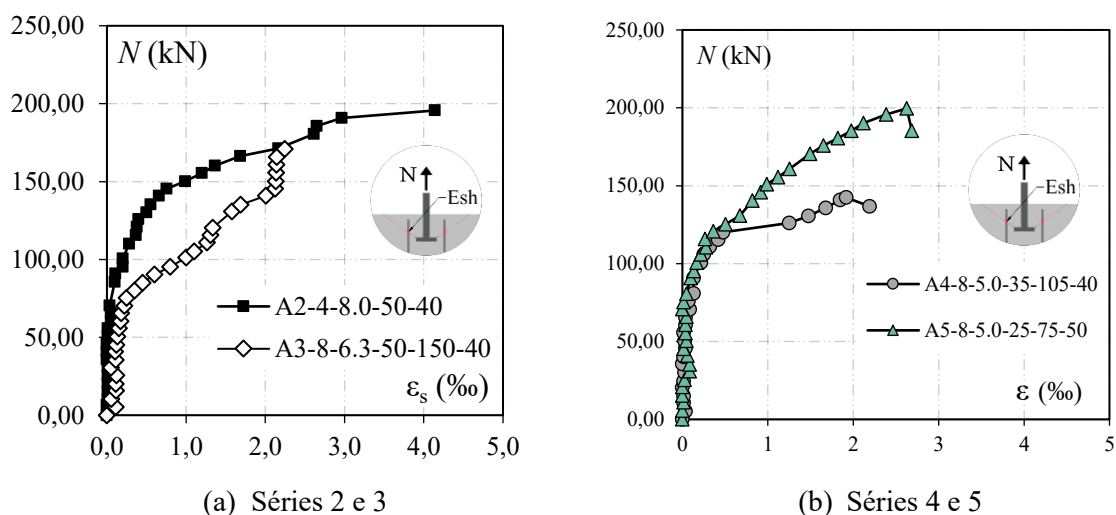


Figura 29 - Deformação nas armaduras suspensão.

Na análise das séries 4 e 5, com 8 ramos de 5.0 mm de armadura de suspensão, são dispostas em duas camadas em relação ao conector. Ambos os espécimes tiveram comportamentos semelhantes até a carga de aproximadamente 125 kN, após esse ponto os espécimes tiveram comportamentos distintos. O espécime da série A5 obteve deformações menores e uma carga de ruptura mais elevada em relação a série A4, tal comportamento pode ser justificado pelo distanciamento das armaduras de suspensão na segunda camada, onde apresenta distância maior que a limite de $0,50 \cdot h_{ef}$, determinado como a distância máxima em que a armadura tem influência na resistência ao arrancamento do cone.

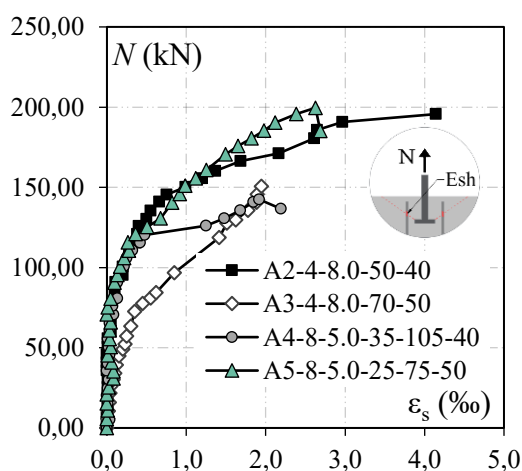


Figura 30 - Deformação nas armaduras de suspensão de todas as séries.

A Figura 30 sintetiza a comparação entre as séries 2, 3, 4 e 5, evidenciando os efeitos da taxa de armadura de suspensão, número de camadas e espaçamento relativo ao conector. De forma geral, verificou-se que menores distâncias da armadura em relação ao conector resultaram em maiores cargas de ruptura, como observado nas séries 2 e 5, que alcançaram os melhores desempenhos. Por outro lado, o maior distanciamento das camadas reduziu a eficiência, mesmo quando a taxa de armadura era equivalente, como ocorreu na comparação entre as séries 2 e 3 e entre as séries 5 e 4. Esses resultados confirmam que a proximidade da armadura de suspensão ao conector exerce influência mais decisiva sobre a resistência ao arrancamento do que apenas o número de camadas ou a taxa de armadura utilizada.

4.4. Influência da resistência do concreto no valor de N

4.4.1. Deformação nas armaduras de suspensão

Nesta seção foram analisadas a influência da variação da resistência do concreto nas classes de 30, 40 e 50 MPa na resistência última das barras com cabeça, utilizando a deformação das armaduras de suspensão. As análises foram divididas separando as séries em duplas a fim de fixar a taxa de armadura de suspensão e variar a resistência do concreto. Dessa forma, as séries 2 e 3 e as séries 4 e 5 foram analisadas separadamente.

Ao analisar a Figura 31, observa-se que, em determinados espécimes, a força máxima de arrancamento apresentou valores superiores quando o concreto possuía maior resistência à compressão, mesmo quando mantidas constantes a taxa e o espaçamento da armadura complementar. Esse comportamento pode ser exemplificado pela comparação entre os espécimes A2-4-8.0-50-30 e A2-4-8.0-50-40. O primeiro, associado a uma classe de resistência inferior, apresentou menor resistência última e menores deformações, enquanto o segundo, confeccionado com concreto de classe mais elevada, apresentou desempenho superior. Tendência semelhante é verificada para os espécimes A3-4-8.0-70-30, A3-4-8.0-70-40 e A3-4-8.0-70-50, confirmando a influência direta da resistência do concreto sobre a capacidade de arrancamento dos conectores.

De modo análogo, ao examinar a série de espécimes com dupla camada de armadura de suspensão, verifica-se o mesmo padrão de comportamento. Na série A4-8-5.0-35-105, em que apenas a resistência do concreto foi variada, constatou-se um incremento expressivo na resistência ao arrancamento à medida que se aumentava a classe de resistência do material. Destaca-se, por exemplo, o espécime A4-8-5.0-35-105-50, que apresentou resultados comparáveis ao espécime A5-8-5.0-25-75. Esse último, apesar de possuir camadas de armadura de suspensão posicionadas mais próximas do conector, o que teoricamente deveria

proporcionar maior resistência ao arrancamento, alcançou valores próximos àqueles obtidos pelo espécime da série A4-8-5.0-35-105 produzido com concreto de 50 MPa.

Esse comportamento evidencia que a resistência à compressão do concreto desempenha papel determinante na resposta ao arrancamento dos conectores, podendo, em alguns casos, compensar configurações geométricas menos favoráveis da armadura de suspensão.

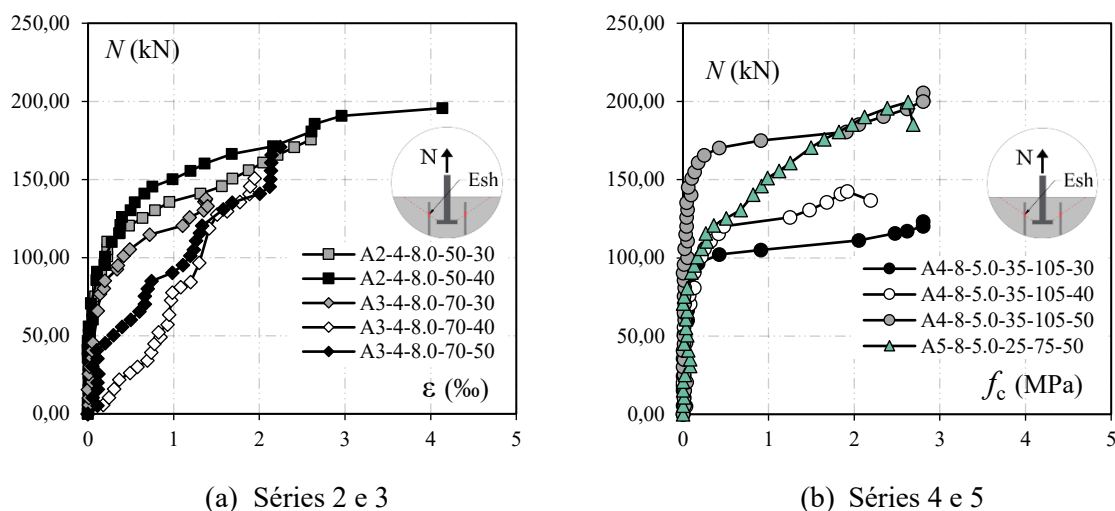


Figura 31 - Deformação nas armaduras de suspensão com variação de classe de resistência do concreto.

4.4.2. Análise do N em função da resistência do concreto

Ao analisar o comparativo entre a carga última de arrancamento (N) e a resistência à compressão do concreto (f_c), apresentada na Figura 32, em cada série de espécimes, observa-se uma correlação consistente entre as variáveis, modulada também pela taxa e pelo espaçamento da armadura de suspensão. Inicialmente, nota-se que os espécimes de referência se posicionam em níveis inferiores, formando uma progressão crescente à medida que a resistência do concreto é incrementada. Para as demais séries, verifica-se que o aumento da taxa de armadura e a redução da distância entre a armadura de suspensão e o eixo do conector resultam em acréscimos adicionais na resistência ao arrancamento.

Entretanto, destaca-se ainda a influência significativa da resistência do concreto, capaz de provocar oscilações nos resultados e, em alguns casos, aproximar os valores últimos de séries distintas. Tal fenômeno pode ser observado, por exemplo, na comparação entre as séries A2-4-8.0-50 e A5-8-5.0-25, em que, apesar das diferenças na taxa de armadura e nos espaçamentos adotados, os valores últimos de resistência ao arrancamento tornam-se bastante próximos, efeito atribuído ao maior ganho de resistência do concreto em determinados espécimes.

Outro ponto relevante pode ser identificado na série A4-8-5.0-35-105, em que se observa um aumento expressivo entre o segundo e o terceiro ponto representado no gráfico. Esse comportamento se deve ao fato de um dos espécimes ter ultrapassado a resistência média projetada inicialmente, alcançando 63 MPa, o que resultou em um incremento substancial na resistência última ao arrancamento. Apesar desse aumento, os resultados não superaram os valores obtidos para a última classe da série A2-4-8.0-50, mesmo está apresentando uma resistência do concreto de apenas 54 MPa.

Esse resultado reforça que, embora a resistência à compressão do concreto exerça forte influência sobre a capacidade de arrancamento, a configuração da armadura complementar (taxa e espaçamento das camadas de suspensão) permanece como fator determinante. Assim, a interação entre a resistência do concreto e o detalhamento da armadura de suspensão deve ser considerada de forma conjunta e, posteriormente, melhor evidenciada, a fim de possibilitar uma compreensão mais completa e precisa do comportamento estrutural dos conectores.

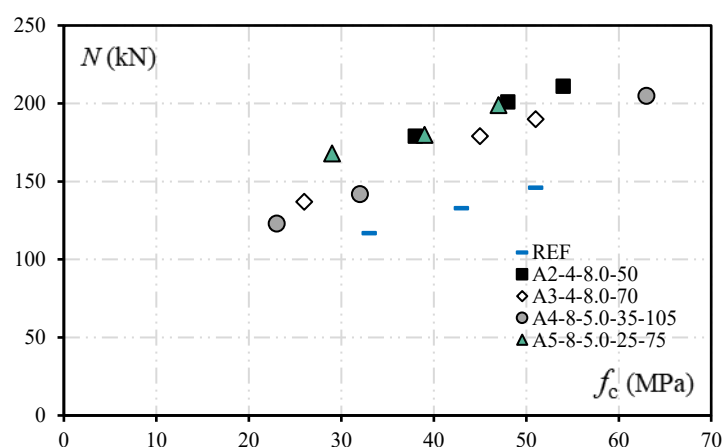


Figura 32 - Comparação da carga última pela resistência do concreto.

4.5. Avaliação Normativa

Neste capítulo, apresenta-se a análise do desempenho dos modelos de cálculo utilizados para a previsão da resistência à tração de barras com cabeça pré-instaladas em elementos de concreto armado, aplicadas como conectores. Os modelos considerados neste estudo foram o ACI 318 (2019) e a INFASO (2012), a síntese dos resultados dos mesmos pode ser observada na Tabela 9. Ressalta-se que as estimativas de resistência apresentadas foram obtidas adotando-se o valor de k correspondente ao concreto fissurado. Tal escolha fundamenta-se no fato de que os códigos normativos recomendam considerar o concreto nessa condição sempre que os conectores se encontram em regiões não comprimidas. No caso dos ensaios realizados neste trabalho, os conectores estavam posicionados em regiões tracionadas, em decorrência

do momento gerado pela própria ação do conector, justificando, portanto, a adoção desse critério de cálculo.

Tabela 9 – Resultado das cargas de ruptura experimental e teórica.

Espécime	h_{ef} (mm)	S_0/h_{ef}	$N_{fiss,flex}$ (kN)	f_c (N/mm ²)	$N_{u,exp}$ (kN)	Acréscimo de Resistência	$N_{u,ACI}$ (kN)	$N_{u,exp}/N_{u,ACI}$ (kN)	$N_{u,INFASO}$ (kN)	$N_{u,exp}/N_{u,INFASO}$ (kN)
REF-30	110	-	120	33	117	0%	66,3	1,8	66,3	1,8
REF-40	110	-	120	43	133	0%	75,7	1,8	75,7	1,8
REF-50	110	-	120	51	146	0%	82,4	1,8	82,4	1,8
A2-4-8.0-50-30	110	0,64	100	38	179	53%	71,1	2,5	127,4	1,4
A2-4-8.0-50-40	110	0,64	100	48	201	51%	79,9	2,5	141,4	1,4
A2-4-8.0-50-50	110	0,64	100	54	211	45%	84,8	2,5	148,4	1,4
A3-4-8.0-70-30	110	0,45	100	26	137	17%	58,8	2,3	96,8	1,4
A3-4-8.0-70-40	110	0,45	110	45	179	35%	77,4	2,3	117,5	1,5
A3-4-8.0-70-50	110	0,45	100	51	190	30%	82,4	2,3	125,0	1,5
A4-8-5.0-35-105-30	110	0,32	100	23	123	5%	118,0	1,0	109,4	1,1
A4-8-5.0-35-105-40	110	0,32	85	32	142	7%	118,0	1,2	129,0	1,1
A4-8-5.0-35-105-50	110	0,32	140	63	205	40%	118,0	1,7	76,9	2,7
A5-8-5.0-25-75-30	110	0,23	100	29	168	44%	105,0	1,6	126,5	1,3
A5-8-5.0-25-75-40	110	0,23	100	39	180	35%	105,0	1,7	131,2	1,4
A5-8-5.0-25-75-50	110	0,23	100	47	199	36%	105,0	1,9	128,0	1,6

Como pode ser visto na Figura 33.a a análise segundo o ACI 318 (2019), constatou que os valores experimentais de resistência ao arrancamento (N_u) foram significativamente superiores às resistências previstas pelo modelo normativo ($N_{u,ACI}$). A razão média entre os valores experimentais e normativos foi de 1,97, indicando que os ensaios registraram, em média, quase o dobro da resistência prevista pela norma. Observa-se, entretanto, uma dispersão considerável dos resultados, com coeficiente de variação de 26,19%, o que demonstra variabilidade relevante no comportamento entre os diferentes espécimes. Tais dados sugerem que, mesmo considerando a presença de armaduras de suspensão, o modelo proposto pelo ACI apresenta caráter excessivamente conservador, subestimando de forma significativa a real contribuição dessa armadura complementar na resistência ao arrancamento.

No caso da INFASO (2012), também aplicado a espécimes com armaduras de suspensão, observa-se que as previsões apresentaram maior proximidade em relação aos resultados experimentais quando comparadas ao modelo do ACI 318 (2019). A razão média entre resistência experimental e normativa foi de 1,49, indicando que o modelo europeu ainda

mantém caráter conservador, porém em menor intensidade. A variabilidade dos resultados mostrou-se semelhante à verificada no ACI, com coeficiente de variação de 26,72%, o que indica que a contribuição das armaduras de suspensão ainda é subestimada pelos modelos normativos, uma vez que estes não contemplam de forma integral as diferentes variáveis que influenciam a capacidade resistente ao arrancamento.

Nesse contexto, o modelo do INFASO demonstrou maior adequação na estimativa da resistência ao arrancamento, por refletir de forma mais coerente o efeito adicional proporcionado pelas armaduras de suspensão. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de o ACI 318 considerar apenas a contribuição da armadura complementar na determinação da carga de ruptura do conector, desconsiderando a parcela resistente atribuída ao concreto. Em contraste, o modelo do INFASO incorpora ambas as parcelas resistentes, o que conduz a estimativas teóricas mais próximas dos valores experimentais.

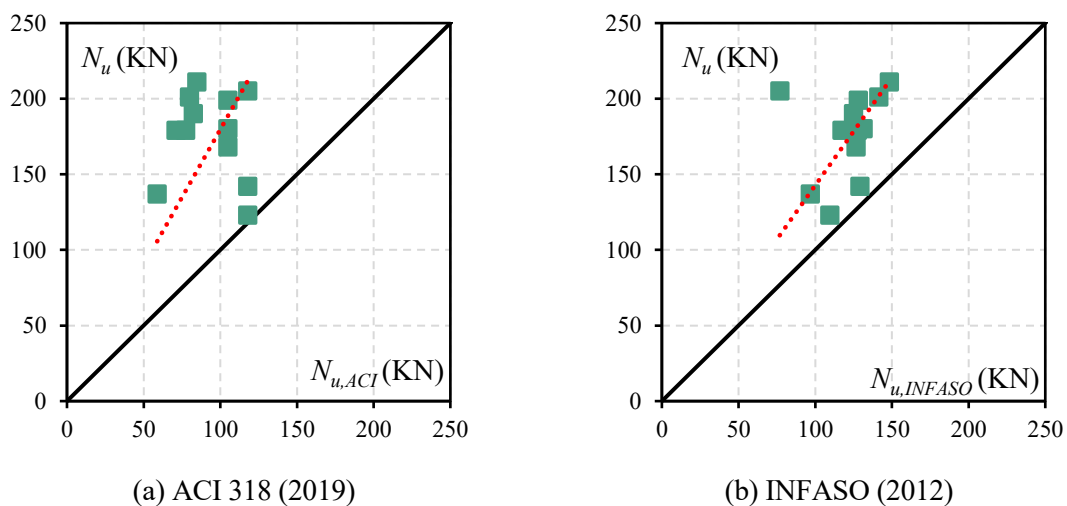


Figura 33 - Resistência ao arrancamento de espécimes com armadura de suspensão.

A Figura 34 apresenta a avaliação comparativa da precisão dos resultados experimentais frente às estimativas normativas. Observa-se que o modelo do INFASO apresentou valores mais concentrados, com mediana de 1,5 e amplitude reduzida, indicando maior consistência entre os resultados experimentais e as previsões teóricas.

Já o modelo do ACI 318 mostrou maior dispersão, com valores variando de aproximadamente 1,0 a 3,0 e mediana próxima de 2,0, revelando uma tendência ao conservadorismo em relação ao INFASO. Em síntese, o gráfico evidencia que o INFASO fornece resultados mais estáveis e próximos dos valores experimentais, enquanto o ACI, embora mais conservador, apresenta maior variabilidade e menor precisão.

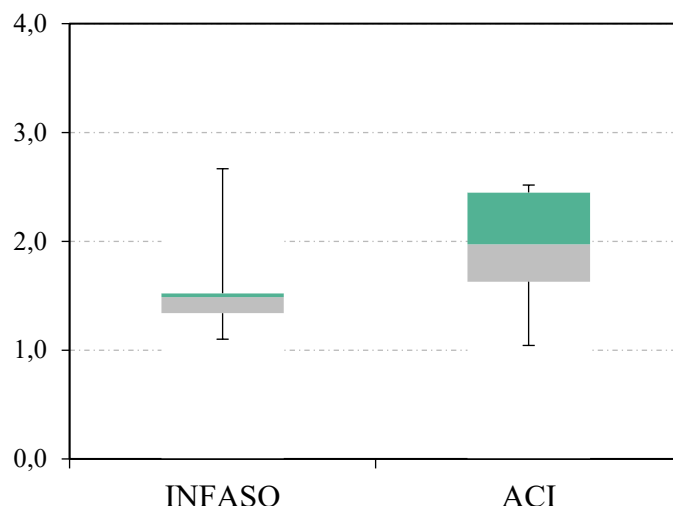


Figura 34 – Avaliação dos resultados quanto à precisão para as normas ACI e INFASO.

4.5.1. Análise da resistência ao arrancamento experimental e teórica em função da taxa e espaçamento da armadura de suspensão

Na Figura 35, referente ao modelo do ACI 318 (2019), observa-se que a proximidade da armadura de suspensão em relação ao conector constitui o fator mais determinante para o aumento da carga última, superando o efeito do simples acréscimo no número de camadas. Esse comportamento pode ser verificado ao comparar a série 2 (uma camada a 50 mm), que apresentou valores entre os mais elevados de resistência, com a série 3 (uma camada a 70 mm), cujos resultados foram claramente inferiores.

Entre as séries com duas camadas, a série 5 (25 e 75 mm) evidenciou desempenho elevado e consistente, indicando que a presença de ao menos uma camada muito próxima ao conector (25 mm) exerce influência significativa na capacidade resistente. Em contrapartida, a série 4 (35 e 105 mm) apresentou maior dispersão, com alguns espécimes atingindo cargas elevadas, mas outros permanecendo em níveis mais baixos, sugerindo que uma segunda camada mais afastada (105 mm) possui contribuição limitada. Dessa forma, os resultados reforçam que reduzir o espaçamento da armadura de suspensão em relação ao conector é mais eficaz para elevar a resistência última (N_u) do que apenas acrescentar camadas adicionais a maiores distâncias.

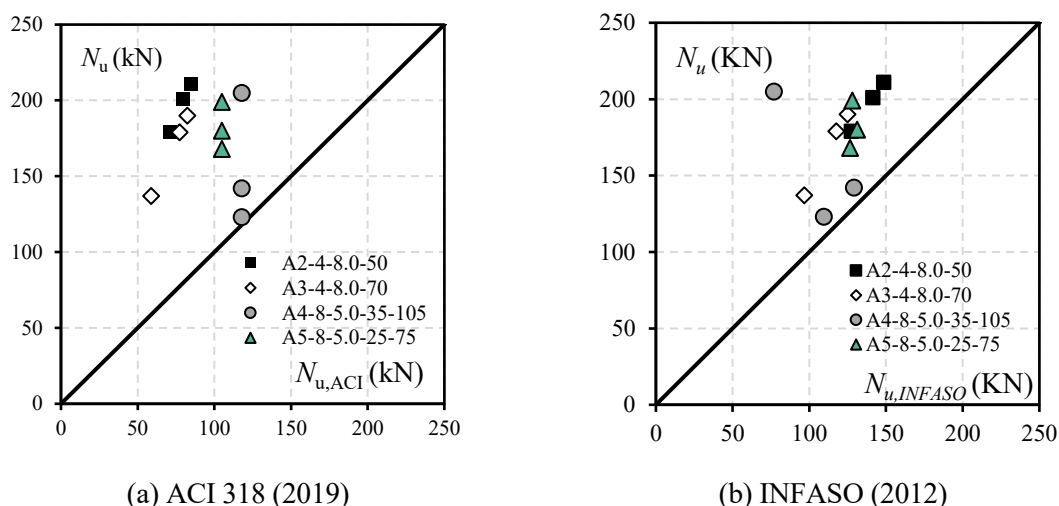


Figura 35 - Resistência ao arrancamento em função do espaçamento e taxa de armadura de suspensão.

No modelo do INFASO (2012), confirma-se a mesma tendência observada no ACI 318 (2019). A série 2 (50 mm) apresenta cargas últimas entre as mais elevadas, enquanto a série 3 (70 mm) resulta em valores inferiores. A série 5 (duas camadas a 25 e 75 mm) demonstra desempenho superior, evidenciando o benefício de posicionar pelo menos uma camada de armadura muito próxima ao conector. Em contrapartida, a série 4 (35 e 105 mm) apresenta comportamento mais disperso, com alguns resultados elevados, mas outros consideravelmente mais baixos, o que indica contribuição limitada da camada mais afastada (105 mm).

Em síntese, sob o critério INFASO, o espaçamento reduzido em torno do conector se confirma como o fator mais determinante para o aumento da carga última. O acréscimo de uma segunda camada apenas proporciona ganhos significativos quando essa camada adicional também se encontra a distâncias inferiores ou iguais a aproximadamente $0,50 \cdot h_{ef}$, garantindo maior eficiência no mecanismo de ancoragem.

4.5.2. Análise da resistência ao arrancamento experimental e teórica em função da resistência do concreto

Nos tratamentos pelo ACI 318 (2019), observa-se uma influência direta da resistência do concreto sobre os valores experimentais da carga última (N_u). Como pode ser observado na Figura 36, para a classe de 30 MPa, os resultados concentraram-se nos menores níveis, variando aproximadamente entre 117 e 178 kN. Já para os concretos de 40 MPa, constatou-se um aumento significativo da resistência, com valores distribuídos entre 133 e 201 kN. Por fim, nos espécimes de 50 MPa, registraram-se os maiores valores, atingindo até 210 kN. Essa tendência sugere que o aumento da resistência do concreto ocasiona em maior uma maior resistência ao arrancamento. Contudo, nota-se que o modelo do ACI continua a subestimar os

resultados experimentais, mantendo discrepância relevante entre os valores teóricos e os medidos em ensaio.

No modelo do INFASO (2012), verifica-se a mesma tendência de crescimento da carga última em função da resistência do concreto, mas com previsões mais ajustadas aos resultados experimentais quando comparadas às do ACI 318 (2019). Nas séries de 30 MPa, os valores continuam sendo os mais baixos; entretanto, a aproximação entre cálculo normativo e ensaios experimentais é mais evidente nas classes de 40 e 50 MPa.

Para concretos de 50 MPa, os resultados experimentais ultrapassaram de forma consistente os 200 kN, sugerindo que o aumento da resistência do material pode exercer efeito direto sobre a capacidade de arrancamento dos conectores. Assim, o modelo do INFASO (2013) mostra-se mais eficiente na representação da influência da resistência do concreto, atenuando a discrepância observada no ACI.

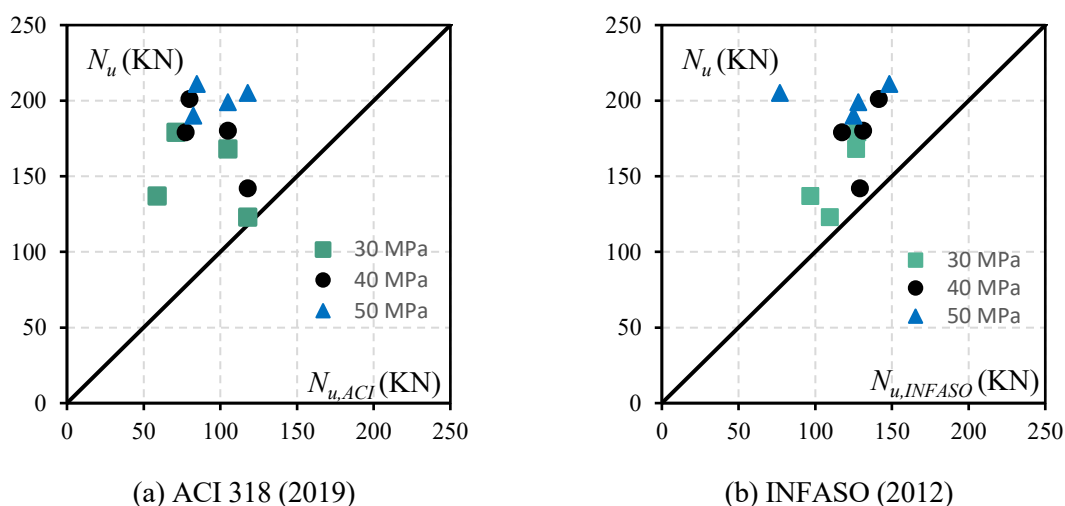


Figura 36 - Avaliação dos métodos de cálculo.

5. CONCLUSÕES

A partir do programa experimental desenvolvido, foi possível avaliar o comportamento de conectores metálicos com cabeça submetidos a esforços de arrancamento em elementos de concreto armado. Os resultados evidenciam que o desempenho estrutural está diretamente associado ao detalhamento da armadura complementar, em especial ao seu diâmetro e ao posicionamento em relação ao conector, aspectos que se mostraram determinantes para o incremento da capacidade resistente. Observou-se ainda que a utilização de barras de maior bitola em única camada tende a ser mais eficaz do que a adoção de múltiplas camadas com diâmetros reduzidos, sobretudo quando posicionadas em distâncias inferiores a $0,5 \cdot h_{ef}$.

Adicionalmente, os resultados sugerem que a resistência do concreto pode exercer influência relevante na resposta ao arrancamento, contribuindo para a redução da dispersão e para ganhos de resistência, embora sua ação deva ser interpretada em conjunto com os parâmetros geométricos da armadura.

Na comparação com modelos normativos, verificou-se que o ACI 318 (2019) apresentou caráter excessivamente conservador e elevada dispersão em relação aos resultados experimentais. O modelo do INFASO (2012), por sua vez, demonstrou maior adequação ao incorporar a contribuição conjunta do concreto e da armadura, resultando em previsões mais compatíveis com os valores obtidos.

De forma geral, conclui-se que a interação entre detalhamento da armadura complementar e propriedades do concreto deve ser considerada de maneira conjunta para a compreensão mais precisa do mecanismo de arrancamento. Esses resultados fornecem subsídios relevantes para o aperfeiçoamento de critérios de projeto e para o avanço de modelos normativos que busquem representar com maior fidelidade o comportamento estrutural observado em ensaios experimentais.

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318 – BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE (ACI 318M-19) AND COMMENTARY**. Farmington Hills, EUA, 2019.

ASHOUR, A. F.; ALQEDRA, M. A. **Concrete breakout strength of single anchors in tension using neural networks**. Advances in Engineering Software, v. 36, p. 87–97, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248:2003 – **AGREGADOS – DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BAZANT, Z. P. **Size effect in blunt fracture: Concrete, Rock, Metal**. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, v. 110, n. 4, p. 518-535, 1984.

BUJNAK, J.; BAHLEDA, M.; FARBAK, M. **Headed fastenings acting in cooperation with supplementary steel reinforcement**. Procedia Engineering, v. 91, p. 250-255, 2014.

COSTA, H. D. **RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE CONECTORES DE AÇO EMBUTIDOS EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO**. 2016. 105 p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

DELHOMME, F.; DEBICKI, G. **Numerical modelling of anchor bolts under pullout and relaxation tests**. *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 1232–1238, 2010.

ELIGEHAUSEN, R.; BALOGH, T. **Behavior of fasteners loaded in tension in cracked reinforced concrete**. *ACI Structural Journal*, v. 92, n. 3, p. 365–379, jun. 1995.

ELIGEHAUSEN, R.; FUCHS, W. **Load bearing behavior of anchor fastenings under shear, combined tension and shear or flexural loadings**. *Betonwerk + Fertigteiltechnik*, p. 48-56, 1988.

ELIGEHAUSEN, R.; MALLÉE, R.; SILVA, J. F. **ANCHORAGE IN CONCRETE CONSTRUCTION**. 1. ed. Ernst & Sohn GmbH and Co. KG, 2006.

ELIGEHAUSEN, R.; SAWADE, G. **A fracture mechanics based description of the pull-out behavior of headed studs embedded in concrete**. In: ELFGEN, L. (Ed.). *Fracture Mechanics of Concrete Structures: From Theory to Applications*. London; New York: Chapman and Hall, 1989. p. 281-299.

FIB – FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **FIB BULLETIN 58 – DESIGN OF ANCHORAGES IN CONCRETE**. Lausanne, Suíça, 2011.

INFASO. **NEW MARKET CHANCES FOR STEEL STRUCTURES BY INNOVATIVE FASTENING SOLUTIONS**. Stuttgart University, Final report of the RFCS project N° RFS-PR-05062, 2012.

OZBOLT, J.; ELIGEHAUSEN, R.; PERISKIC, G.; MAYER, U. **3D FE analysis of anchor bolts with large embedment depths**. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 74, p. 168–178, 2007.

OZBOLT, J.; ELIGEHAUSEN, R.; REINHARDT, H. W. **Size effect on the concrete cone pull-out load**. *International Journal of Fracture*, v. 95, p. 391-404, 1999.

ZBOLT, J.; ELIGEHAUSEN, R. **Fastening elements in concrete structures – numerical simulations**. In: ROSSMANITH, H. P. (Ed.). *Fracture and Damage of Concrete and Rock – FDCR-2*. p. 527-547, 1993.