

# **UFPA**

**PPGEC**

# **Universidade Federal do Pará**

---



Maria Tamires Eufrásio de Alcântara

## **VIGAS DE CRFA COM AGREGADO SINTÉTICO AO CISALHAMENTO**

### **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Dênio Ramam Carvalho  
de Oliveira

Belém – Pará – Brasil

2024

**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Tecnologia**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**



**Maria Tamires Eufrásio de Alcântara**

**Vigas de CRFA com agregado sintético ao cisalhamento**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal do Pará como requisito parcial para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Civil.

Orientação: Professor Dênio Ramam Carvalho de Oliveira

Belém  
2024

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Maria Tamires Eufrásio de Alcântara

TÍTULO: Vigas de CRFA com agregado sintético ao cisalhamento

GRAU: Mestre ANO: 2024

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

### **Maria Tamires Eufrásio de Alcântara**

Rua Antônio Barreto, nº 1722, Apartamento 1103. Fátima.

66.060-021 Belém – PA – Brasil.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

A347v Alcântara, Maria Tamires Eufrásio de.  
Vigas de CRFA com agregado sintético ao cisalhamento /  
Maria Tamires Eufrásio de Alcântara. — 2024.  
XXVII, 137 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, Belém, 2024.

1. Vigas. 2. Cisalhamento. 3. Resíduo de bauxita. 4.  
Agregado sintético. 5. Fibra de aço. I. Título.

CDD 624.1834

---

## VIGAS DE CRFA COM AGREGADO SINTÉTICO AO CISALHAMENTO

AUTORA:

**MARIA TAMIRES EUFRÁSIO DE ALCÂNTARA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 11 / 06 / 2024.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira  
Orientador (UFPA)

Documento assinado digitalmente



MATEUS ANTONIO NOGUEIRA OLIVEIRA

Data: 27/06/2024 10:02:17-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira  
Membro Externo (UFMG)



Documento assinado digitalmente

BERNARDO NUNES DE MORAES NETO

Data: 01/07/2024 10:17:42-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Bernardo Nunes de Moraes Neto  
Membro Externo (UFPA)



Documento assinado digitalmente

JOAO CARLOS LISBOA DE LIMA

Data: 28/06/2024 08:38:36-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. João Carlos Lisboa de Lima  
Membro Externo



Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo  
Membro Interno (UFPA)

Visto:



Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Tecnologia**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**



**Maria Tamires Eufrásio de Alcântara**

**Vigas de CRFA com agregado sintético ao cisalhamento.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira**

Orientador  
Universidade Federal do Pará – UFPA

**Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo**

Membro Interno  
Universidade Federal do Pará - UFPA

**Prof. Dr. Bernardo Nunes de Moraes Neto**

Membro Externo  
Universidade Federal do Pará - UFPA

**Eng. Civil Dr. João Carlos Lisboa de Lima**

Membro Externo  
Universidade Federal do Pará – UFPA

**Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira**

Membro Externo  
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Belém, 2024.

*A Deus, autor da vida, cujo terno amor edifica e sustenta  
o meu espírito.*

## **Agradecimentos**

Primeiramente a Deus, cuja destra me segurou diante dos desafios, e cuja sabedoria infinita, alimentou meu foco e disciplina na produção deste trabalho.

A toda a minha família, e em especial, aos meus pais Luiz e Antônia que me ajudam mesmo com a distância a me manter firme diante das adversidades da vida, agradeço todo apoio, paciência e compreensão. A minha irmã, Iris, por todo cuidado e amor que tem por mim. A meu irmão, Samuel, agradeço pelo companheirismo e amor fraternal. À vocês, minha família, sou grata por tudo o que sou.

Ao meu orientador Dênio Ramam Carvalho de Oliveira, por todo estímulo na elaboração deste trabalho, por ter acreditado e depositado sua confiança em mim. Aos doutores que tive a honra de conhecer no decorrer da pós graduação, agradeço pelos ensinamentos enriquecedores que a mim foram transmitidos.

Aos amigos do Laboratório de Estruturas da UFPA, em especial Marcelo Maia, Eloísa Azevedo, Fred Maurício, Andrieli Lima pelo esforço e companheirismo. Ao Seu Elson, pela amizade e prontidão, ao Joel Martins, Vander Melo e a equipe do Laboratório de Engenharia Civil, que também sempre estiveram presentes e dispostos a contribuir em todas as fases da pesquisa. A todos, a minha gratidão. A todos que diretamente ou indiretamente fizeram parte desta pesquisa, muito obrigada.

Ao CNPq pelo apoio financeiro para a concretização desta pesquisa e de tantas outras.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá.



## **Resumo**

**ALCÂNTARA, M. T. E. Vigas de CRFA com agregado sintético ao cisalhamento.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil. 2024.

O estudo avalia o comportamento ao cisalhamento em vigas de concreto armado convencional (CC) e de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) com a aplicação do agregado sintético (AS) de resíduo de bauxita (RB). Para esse fim, foram realizados testes experimentais e análises que discutiram a performance de alguns códigos de projeto. No tocante ao estudo experimental foram realizadas seis vigas, sendo três de CC e três de CRFA, ensaiadas até a ruptura. Dessas três vigas, a primeira foi produzida sem o agregado graúdo, ou seja, uma viga de argamassa, a segunda, foi produzida com agregado graúdo do tipo brita, e a terceira foi produzida com o agregado sintético de resíduo de bauxita. Para o CRFA, a fração volumétrica de fibras foi igual a 1,0%. A dimensão das vigas foi de (120 x 250 x 1700) mm e para reduzir as influências do efeito de arco na absorção do esforço cortante e induzir a ruptura por cisalhamento na seção foram realizados frisos, que são entalhes pré definidos com inclinação de 35° e relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil ( $a/d$ ) igual a 1,4. As vigas possuem a mesma taxa de armadura longitudinal ( $\rho_l=1,36\%$ ) e, quanto a armadura transversal, o trecho representado pelo vão de cisalhamento não foi armado, já os demais trechos foram armados transversalmente com taxa de armadura transversal ( $\rho_w$ ) igual a 0,3%, com a finalidade de garantir que a ruptura ocorra na região monitorada, sem estribos e com os frisos. Quanto a resistência à compressão estimada para os concretos foi de 30 MPa para os 28 dias. Os resultados foram analisados em termos de ganhos de resistência e precisão dos modelos teóricos de previsão de resistência ao cisalhamento e mostraram que a adição de fibra de aço aumentou significativamente a resistência ao cisalhamento, com taxas de 108%, 79% e 89%, respectivamente, para vigas de argamassa, agregado natural e agregado sintético, indicando que a fibra atuou como mecanismo de reforço. Ressalta-se que o padrão de fissuração das vigas com adição de fibras apresentou maior número de fissuras diagonais e de flexão, o que é mais favorável à segurança. A comparação dos resultados com a resistência ao cisalhamento estimada mostrou que as normas de projeto analisadas foram conservadoras.

## **Palavras-chave**

Resíduo de bauxita, Agregado sintético, Fibras de aço, Concreto, Vigas, Cisalhamento.

## Abstract

ALCÂNTARA, M. T. E. **SFRC beams with synthetic shear aggregate**. Master's Dissertation, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, Pará, Brazil. 2024.

The study evaluates the shear behavior of conventional reinforced concrete (CC) and steel fiber reinforced concrete (SFRC) beams with the application of synthetic aggregate (SA) made from bauxite waste (BR). To this end, experimental tests and analyzes were carried out that discussed the performance of some project codes. Regarding the experimental study, six beams were made, three of which were CC and three were SFRC, tested until failure. Of these three beams, the first was produced without coarse aggregate, that is, a mortar beam, the second was produced with coarse aggregate of the crushed stone type, and the third was produced with synthetic bauxite waste aggregate. For SFRC, the fiber volume fraction was equal to 1.0%. The size of the beams was (120 x 250 x 1700) mm and to reduce the influence of the arch effect on the absorption of shear force and induce shear failure in the section, friezes were made, which are pre-defined notches with an inclination of 35°. and ratio between the shear span and the useful height ( $a/d$ ) equal to 1.4. The beams have the same longitudinal reinforcement rate ( $\rho_l=1,36\%$ ) and, as for transverse reinforcement, the section represented by the shear span was not reinforced, while the other sections were transversely reinforced with a transverse reinforcement rate ( $\rho_w$ ) equal to 0.3%, in order to ensure that the rupture occurs in the monitored region, without stirrups and with the friezes. The estimated compressive strength for the concrete was 30 MPa for 28 days. The results were analyzed in terms of strength gains and accuracy of theoretical shear strength prediction models and showed that the addition of steel fiber significantly increased shear strength, with rates of 108%, 79% and 89%, respectively for mortar beams, natural aggregate and synthetic aggregate, indicating that the fiber acted as a reinforcing mechanism. It is noteworthy that the cracking pattern of beams with fiber addition showed a greater number of diagonal and flexural cracks, which is more favorable to safety. Comparison of the results with the estimated shear strength showed that the analyzed design standards were conservative.

## Keywords

Bauxite residue, Synthetic aggregate, Steel fibers, Concrete, Beams, Shear.

## Lista de Tabelas

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 1 – Composição química do resíduo da bauxita em diferentes locais de extração com % em peso. ....	28
Tabela 2 – Faixa de composição química do resíduo de bauxita em porcentagem. ....	29
Tabela 3 – Propriedades das vigas ensaiadas. ....	41
Tabela 4 – Resultados obtidos das vigas ensaiadas. ....	42
Tabela 5 – Propriedades e resultados das vigas ensaiadas. ....	43
Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio das vigas. ....	46
Tabela 7 – Proporção da mistura para produção do agregado graúdo com RB. ....	46
Tabela 8 – Propriedades físicas dos agregados graúdos. ....	48
Tabela 9 – Densidade do concreto e propriedades mecânicas. ....	48
Tabela 10 – Traço (em massa), teor de argamassa, relação a/c, consistência e teor de agregado graúdo dos concretos produzidos. ....	50
Tabela 11 – Resultados obtidos. ....	51
Tabela 12 – Propriedades do agregado graúdo sintético (70%, 80% e 90% de RB). ....	54
Tabela 13 – Resultados obtidos no ensaio das vigas. ....	54
Tabela 14 – Resumo das características das vigas. ....	70
Tabela 15 – Propriedades do agregado graúdo sintético (80% de RB) ....	79
Tabela 16 – Composição química do resíduo de bauxita. ....	81
Tabela 17 – Composição química AS-80. ....	81
Tabela 18 – Consumo dos materiais por metro cúbico, em peso. ....	82
Tabela 19 – Ensaio de tração uniaxial em barras de aço. ....	83
Tabela 20 – Resumo do número de corpos de prova para os ensaios de caracterização do concreto. ....	86
Tabela 21 – Resumo dos resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone. ....	89

Tabela 22 – Resumo do ensaio de compressão de compressão axial.....	91
Tabela 23 – Resumo do ensaio de módulo de elasticidade. ....	93
Tabela 24 – Resumo das tensões (Valores médios). ....	96
Tabela 25 – Resultados carga x deslocamento. ....	99
Tabela 26 – Caracterização da relação $P_u \times \epsilon_s$ .....	103
Tabela 27 – Caracterização da relação $P_u \times \epsilon_t$ . ....	106
Tabela 28 – Caracterização da relação $P_u \times \epsilon_c$ .....	109
Tabela 29 – Dados das vigas. ....	115
Tabela 30 – Resistência ao cisalhamento das vigas em CC para o lado monitorado (Sem estribos). ....	116
Tabela 31 – Relação entre a resistência ao cisalhamento experimental e teórica das vigas em CC.....	116
Tabela 32 – Classificação segundo critério de penalidade adaptado por Collins (2001). ....	118
Tabela 33 – Classificação segundo o critério de Collins (2001) para as vigas de CC ensaiadas. ....	119
Tabela 34 – Momento resistente característico para as vigas em CC. ....	120
Tabela 35 – Carga teórica de ruptura à flexão ( $P_{flex}$ ) e capacidade resistente ( $V_{flex}$ ) para vigas em CC.....	121
Tabela 36 – Razão entre as resistências teóricas à flexão e ao cisalhamento para as vigas em CC.....	121
Tabela 37 – Dados das vigas. ....	121
Tabela 38 – Resistência ao cisalhamento das vigas em CRFA para o lado monitorado (Sem estribos). ....	122
Tabela 39 – Relação entre a resistência ao cisalhamento experimental e teórica das vigas em CRFA.....	122
Tabela 40 – Classificação segundo o critério de Collins (2001) para as vigas de CRFA ensaiadas.....	124
Tabela 41 – Momento resistente característico das vigas em CRFA. ....	125

Tabela 42 – Carga teórica de ruptura à flexão ( $P_{flex}$ ) e capacidade resistente ( $V_{flex}$ ) para vigas em CRFA.....	126
Tabela 43 – Razão entre as resistências teóricas à flexão e ao cisalhamento para as vigas em CRFA.....	126

## Lista de Figuras

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1 – Resíduo de bauxita produzido acumulado e projeção do crescimento .....	1
Figura 2 – Produção de tijolos utilizando a palha como fibra. ....	6
Figura 3 – Torre CN em Toronto-Canadá. ....	7
Figura 4 – Distribuição das tensões em concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço. ....	8
Figura 5 – Transferência de esforços. ....	9
Figura 6 – Zonas de uma fissura no concreto reforçado com fibras. ....	10
Figura 7 – Tipo de ancoragem da fibra de aço. ....	12
Figura 8 – Aglomeração de fibras ou ouriço. ....	13
Figura 9 – Influência da compatibilidade dimensional entre agregado e fibras. ....	14
Figura 10 – Perfis tensão-posição para um compósito reforçado com fibras que está submetido a uma tensão de tração igual ao limite de resistência à tração da fibra. ....	15
Figura 11 – Comportamento frágil e dúctil das fibras. ....	16
Figura 12 – Ensaio do teste Vebe. ....	19
Figura 13 – Ensaio do tempo de queda do cone invertido. ....	19
Figura 14 – Curva tensão x deformação do concreto comprimido. ....	20
Figura 15 – Comportamento do CRFA no ensaio de tração direta. ....	21
Figura 16 – Sistema de ensaio. ....	22
Figura 17 – Curva carga x CMOD típica de um teste de flexão sugerido pelo RILEM TC 162-TDF. ....	23
Figura 18 – Depósito de resíduos sólidos em Barcarena, Pará. ....	26
Figura 19 – Processo Bayer atualmente. ....	28
Figura 20 – Modo de seccionamento do agregado. ....	33

Figura 21 – Ação de arco.....	35
Figura 22 – Comportamento ao esforço cortante de uma viga fissurada com reforço transversal. .....	37
Figura 23 – Componentes principais de uma viga fissurada sem reforço transversal com fibras de aço. ....	38
Figura 24 – Modos de ruptura na ausência de armaduras transversais eficazes.....	38
Figura 25 – Alteração do padrão de fissuração com o aumento do teor de fibras nas vigas S40. .....	44
Figura 26 – Armadura das vigas - unidades em mm. ....	45
Figura 27 – Agregados utilizados nas misturas de concreto. ....	47
Figura 28 – Preparação dos corpos de prova de concreto. ....	47
Figura 29 – Amostras dos agregados graúdos sintéticos utilizados. ....	50
Figura 30 – Média da ascensão da água, após o ensaio de absorção por capilaridade.....	51
Figura 31 – Sistema de teste em quatro pontos. ....	52
Figura 32 – Vigas com frisos inclinados a 30°.....	53
Figura 33 – Vigas com frisos inclinados a 45°.....	53
Figura 34 – Organograma das vigas de concreto convencional. ....	68
Figura 35 – Organograma das vigas de concreto reforçado com fibras de aço.....	68
Figura 36 – Características geométricas das vigas (unidades em mm). ....	70
Figura 37 – Forma das vigas com entalhe pré definido.....	71
Figura 38 – Armadura longitudinal e transversal das vigas (unidades em mm). ....	72
Figura 39 – Produção da armadura longitudinal e transversal das vigas finalizada.....	72
Figura 40 – Esquema estático.....	73
Figura 41 – Sistema de ensaio. ....	74
Figura 42 – Vista transversal e longitudinal do sistema de ensaio.....	74
Figura 43 – Sistema de ensaio para as vigas do programa experimental. ....	75
Figura 44 – Localização dos potenciômetros.....	76

Figura 45 – Extensometria da barra de aço longitudinal (12,5 mm). .....	77
Figura 46 – Extensometria da barra de aço transversal (5,0 mm). .....	77
Figura 47 – Posicionamento dos EERs, EERt e EERc. ....	78
Figura 48 – Amostra do agregado gráúdo natural e sintético. ....	79
Figura 49 – Curva granulométrica do agregado gráúdo natural do tipo brita. ....	80
Figura 50 – Curva granulométrica do agregado gráúdo sintético de resíduo de bauxita. ....	80
Figura 51 – Fibras de aço 3D Dramix 80/60 BG coladas em pente. ....	84
Figura 52 – Materiais para mistura de argamassa com e sem fibra de aço. ....	84
Figura 53 – Materiais para mistura de concreto convencional com agregado do tipo brita com e sem fibra de aço. ....	85
Figura 54 – Materiais para mistura de concreto convencional com agregado sintético de resíduo de bauxita com e sem fibra de aço. ....	85
Figura 55 – Adensamento com auxílio do vibrador nas vigas e prismas e finalização da concretagem. ....	87
Figura 56 – Ensaio de abatimento de tronco da argamassa (BM) e da argamassa com fibras (BSFRCM). ....	88
Figura 57 – Ensaio de abatimento de tronco do concreto convencional (BCCG) e do concreto reforçado com fibra de aço (BSFRCG). ....	88
Figura 58 – Ensaio de abatimento de tronco do concreto convencional com agregado sintético (BCCSA) e do concreto com agregado sintético reforçado com fibra de aço (BSFRCSA). ...	89
Figura 59 – Ensaio de compressão axial. ....	90
Figura 60 – Ensaio de módulo de elasticidade. ....	92
Figura 61 – Ensaio de flexão em três pontos no prisma. ....	94
Figura 62 – Mapeamento das fissuras. ....	110
Figura 63 – Esquema estático da viga. ....	112
Figura 64 – Esquema para calcular a carga teórica de ruptura à flexão. ....	120



## Lista de Gráficos

Gráfico	Página
Gráfico 1 – Relação tensão x deformação do valor médio das barras de aço. ....	83
Gráfico 2 – Relação tensão-deslocamento (valor médio).....	95
Gráfico 3 – Deslocamento vertical das vigas. ....	97
Gráfico 4 – Deformação da armadura longitudinal. ....	101
Gráfico 5 – Deformação da armadura transversal. ....	104
Gráfico 6 – Deformação do concreto. ....	107
Gráfico 7 – Carga última aplicada às vigas ( $P_u$ ).....	113
Gráfico 8 – Capacidade resistente ao cisalhamento das vigas ( $V_u$ ). ....	113
Gráfico 9 – Relação entre as resistências estimadas para as vigas de CC e as resistências experimentais.....	117
Gráfico 10 – Análise quanto à dispersão das vigas de concreto convencional. ....	118
Gráfico 11 – Relação entre as resistências estimadas para as vigas de CRFA e as resistências experimentais.....	123
Gráfico 12 – Análise quanto à dispersão das vigas de concreto reforçado com fibras de aço. ....	124

## Lista de Quadros

<b>Quadro</b>	<b>Página</b>
Quadro 1 – Modos de ruptura na presença de armaduras transversais eficazes.....	40
Quadro 2 – Nomenclatura das vigas.....	69

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

Neste item são apresentados algumas abreviaturas e siglas utilizadas nesta dissertação.

<b>Abreviatura/Sigla</b>	<b>Significado</b>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Instituto Americano de Concreto
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
CA, CC	Concreto Armado Convencional
CRFA	Concreto Reforçado com Fibras de Aço
CV	Coefficiente de Variação
CMOD	Medida da abertura do entalhe
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DPC	Classificação de Pontos por Demérito
DP	Desvio Padrão
EER	Extensômetros elétricos de resistência
EER <sub>c</sub>	Extensômetros elétricos de resistência para o concreto
EER <sub>s</sub>	Extensômetros elétricos de resistência para o aço
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
EPA	Agência de Proteção Ambiental
JSCE	Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis
LVDT	Transdutor de Deslocamento Variável Linear
MCFT	Teoria do Campo de Compressão Modificados
NBR	Norma Técnica
RB	Resíduo de Bauxita

## Lista de Símbolos

Neste item são apresentados alguns dos símbolos utilizados nesta dissertação.

Símbolo	Significado
$a$	Vão de cisalhamento
$A_{sw}$	Área de aço referente ao cisalhamento
$b_w$	Largura da seção transversal
$C$	Comprimento total da viga
$d$	Altura útil da seção transversal
$d_f$	Diâmetro da fibra
$E_s$	Módulo de Elasticidade do aço da armadura
$f_c = f_{ck}$	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{ctd}$	Resistência de cálculo do concreto à tração direta
$f_{ctk}$	Resistência característica do concreto à tração direta;
$f_{eq,j}$	Resistência equivalente
$f_{FtuK}$	Resistência característica à tração direta do CRF
$f_{Ri}$	Resistência residual
$F_{R,i}$	Carga corresponde para cada valor de CMOD
$f_{yd}$	Tensão de escoamento de cálculo do aço
$f_{tyd}$	Resistência ao escoamento de cálculo do concreto tracionado
$h_{sp}$	Altura do entalhe no prisma
$k$	Coeficiente que considera a não uniformidade das tensões internas no concreto reforçado com fibras e armadura convencional

$k_c$	Fator de redução da resistência à compressão do concreto fissurado
$k_{dg}$	Medida de rugosidade das fissuras
$k_v$	Coefficiente de contribuição do concreto na transmissão dos esforços de tração nas fissuras
$L$	Vão livre
$l_c$	Comprimento crítico da fibra
$l_f$	Comprimento da fibra
$l_f/d_f$	Fator de forma
$M_{Ed}$	Momento solicitante de cálculo
$N_{Ed}$	Força axial solicitante de cálculo
$P_u$	Carga última
$S$	Espaçamento entre os estribos
$V$	Carga máxima medida por a célula de carga
$V_a$	Esforço cortante devido ao engrenamento dos agregados
$V_c = V_{Rd,c}$	Parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares da treliça – concreto comprimido
$V_{crit}$	Força de cisalhamento que ocorre a abertura da fissura
$V_d$	Esforço cortante referente ao efeito de pino
$v_f$	Volume de fibras
$V_F$	Esforço cortante referente ao arrancamento das fibras ao longo da fissura inclinada
$V_{Rd,F} = V_{Rd,f}$	Parcela de resistência do CRFA ao cisalhamento
$V_{Rd2}$	Força cortante resistente de cálculo (relativa à ruína das diagonais comprimidas de cálculo: modelo I ou modelo II)
$V_{Rd3}$	Força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal

$V_{sd} = V_{Rd} = V_{Ed}$	Força cortante solicitante de cálculo
$V_s = V_{sw} = V_{Rd,s}$	Parcela resistida pela armadura transversal
$V_u$	Resistência ao cisalhamento
$z$	Braço de alavanca para elementos de altura constante
$\%$	Porcentagem
$^\circ$	Grau

## Letras gregas

Símbolo	Significado
$\alpha = \beta_u$	Ângulo da biela comprimida
$\beta_d$	Coefficiente que considera o efeito da profundidade efetiva na capacidade ao cisalhamento
$\beta_n$	Coefficiente que considera o efeito da força axial na capacidade de cisalhamento
$\beta_p$	Coefficiente que considera o efeito do reforço longitudinal ao cisalhamento
$\gamma_c$	Coefficiente de segurança do concreto
$\delta$	Flecha
$\delta_{lim}$	Flecha limite
$\emptyset$	Diâmetro
$\emptyset_{inicial}$	Diâmetro inicial
$\emptyset_{final}$	Diâmetro final
$\varepsilon = \varepsilon_x$	Deformação longitudinal
$\theta$	Ângulo da armadura de cisalhamento
$\mu_a$	Massa específica do agregado
$\rho = \rho_l$	Taxa de armadura longitudinal

$\rho_w$	Taxa de armadura transversal
$\sigma = \sigma_{cp}$	Tensão média na seção transversal
$\gamma_a$	Densidade do agregado
$\gamma_c$	Coeficiente de ponderação do concreto
$\gamma_s$	Coeficiente de ponderação do aço
$\omega$	Abertura da fissura
$\omega_{max}$	Abertura máxima da fissura

## SUMÁRIO

Capítulo	Página
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	3
1.2.2 Objetivo específico .....	4
<b>1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....</b>	<b>4</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 CONCRETO COM FIBRAS: UM COMPÓSITO ESTRUTURAL.....</b>	<b>6</b>
2.1.1 Concreto reforçado com fibras de aço – CRFA.....	8
2.1.1.1 Fibras de aço .....	11
2.1.2 Fatores que influenciam as propriedades do CRFA .....	12
2.1.3 Propriedades do concreto reforçado com fibras de aço no estado fresco .....	17
2.1.4 Propriedades do concreto reforçado com fibras de aço no estado endurecido .....	19
2.1.4.1 Resistência à compressão .....	19
2.1.4.2 Resistência à tração direta.....	21
2.1.4.3 Resistência à tração na flexão .....	22
2.1.4.4 Resistência ao cisalhamento .....	23
<b>2.2 AGREGADO.....</b>	<b>24</b>
2.2.1 Classificação dos agregados .....	25
2.2.2 Bauxita, alumina e resíduo de bauxita .....	25
2.2.2.1 Processo Bayer.....	27
2.2.2.2 Composição do resíduo de bauxita .....	28
2.2.3 Principais características do agregado graúdo .....	30



2.2.4	Aplicações do resíduo de bauxita .....	31
<b>2.3</b>	<b>CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO .....</b>	<b>32</b>
2.3.1	Fatores preponderantes para transferência de esforços de cisalhamento em vigas .....	33
2.3.2	Vigas sem armadura de cisalhamento.....	34
2.3.3	Vigas com armadura de cisalhamento .....	36
2.3.4	Vigas reforçadas com fibras .....	37
2.3.5	Modos de falha no cisalhamento .....	38
2.3.5.1	Ruptura na ausência de armaduras transversais eficazes.....	38
2.3.5.2	Ruptura na presença de armaduras transversais eficazes.....	39
2.3.5.3	Ruptura por deficiência das ancoragens .....	41
<b>2.4</b>	<b>TRABALHOS REALIZADOS SOBRE O COMPORTAMENTO DE VIGAS AO CISALHAMENTO COM REFORÇO DE FIBRA DE AÇO.....</b>	<b>41</b>
2.4.1	ARAÚJO <i>et al.</i> (2014).....	41
2.4.2	VITOR <i>et al.</i> (2017) .....	42
2.4.3	DEBELLA <i>et al.</i> (2023) .....	44
<b>2.5</b>	<b>TRABALHOS REALIZADOS SOBRE O CONCRETO COM AGREGADO SINTÉTICO DE RESÍDUO DE BAUXITA .....</b>	<b>46</b>
2.5.1	OLIVEIRA & ROSSI (2012) .....	46
2.5.2	MACHADO (2022) .....	49
2.5.3	AMARAL & OLIVEIRA (2023) .....	52
<b>2.6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS .....</b>	<b>55</b>
2.6.1	Estruturas de concreto armado convencional .....	55
2.6.1.1	NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2023).....	55
2.6.1.2	Model Code 10 (CEB-FIP, 2010) .....	58
2.6.1.3	ACI 318 (ACI, 2019) .....	61
2.6.1.4	JSCE (2008).....	62
2.6.2	Estruturas de CRFA .....	63

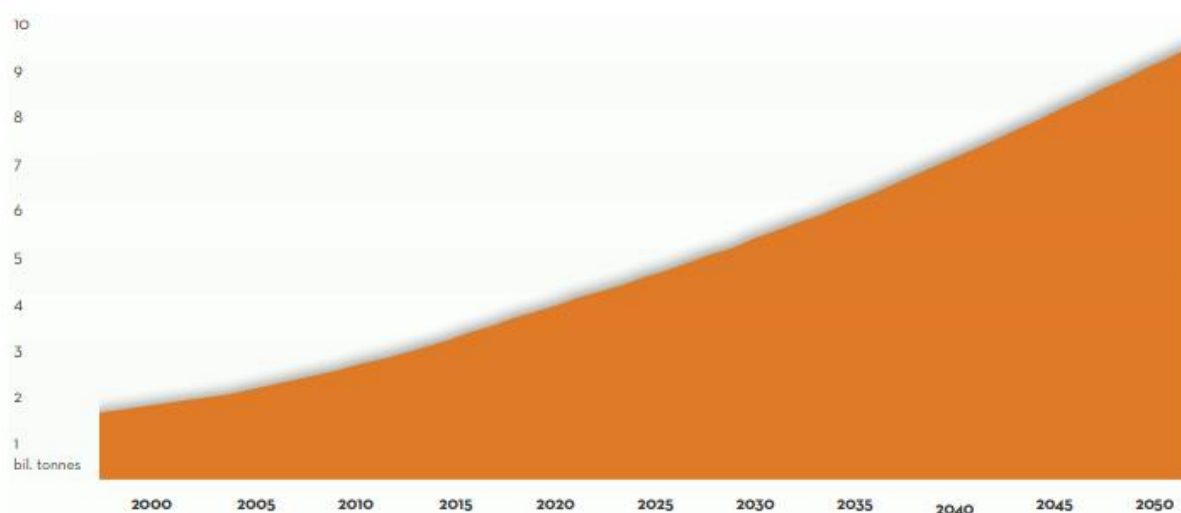
2.6.2.1 NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras - Procedimento (ABNT, 2021).....	63
2.6.2.2 Model Code 10 (CEB-FIP, 2010).....	64
2.6.2.3 RILEM TC162-TDF (2002) .....	65
2.6.2.4 JSCE (2008).....	66
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>68</b>
<b>3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>68</b>
<b>3.2 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS .....</b>	<b>69</b>
<b>3.3 SISTEMA DE ENSAIO .....</b>	<b>73</b>
<b>3.4 INSTRUMENTAÇÃO .....</b>	<b>75</b>
3.4.1 Deslocamento vertical .....	75
3.4.2 Deformações .....	76
3.4.2.1 Armadura longitudinal.....	76
3.4.2.2 Armadura transversal.....	77
3.4.2.3 Concreto.....	78
<b>3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....</b>	<b>78</b>
3.5.1 Concreto.....	78
3.5.2 Aço.....	82
3.5.3 Fibra de aço.....	83
<b>3.6 PREPARO DO CONCRETO .....</b>	<b>84</b>
<b>3.7 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....</b>	<b>88</b>
3.7.1 Ensaio de abatimento do tronco de cone .....	88
<b>3.8 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>90</b>
3.8.1 Resistência à compressão .....	90
3.8.2 Módulo de elasticidade .....	92
3.8.3 Resistência residual à tração na flexão em três pontos do concreto .....	94

<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>97</b>
<b>4.1</b>	<b>DESLOCAMENTO VERTICAL DAS VIGAS .....</b>	<b>97</b>
<b>4.2</b>	<b>DEFORMAÇÕES.....</b>	<b>100</b>
4.2.1	Armadura longitudinal.....	100
4.2.2	Armadura transversal.....	103
4.2.3	Concreto.....	106
<b>4.3</b>	<b>MAPEAMENTO DAS FISSURAS E MODO DE RUPTURA.....</b>	<b>109</b>
<b>4.4</b>	<b>CARGAS ÚLTIMAS E CAPACIDADE RESISTENTE AO CISALHAMENTO... .....</b>	<b>112</b>
<b>5</b>	<b>ESTIMATIVAS DE RESISTÊNCIA.....</b>	<b>115</b>
<b>5.1</b>	<b>RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS VIGAS EM CC .....</b>	<b>115</b>
<b>5.2</b>	<b>RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS EM CC.....</b>	<b>119</b>
<b>5.3</b>	<b>RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS VIGAS EM CRFA.....</b>	<b>121</b>
<b>5.4</b>	<b>RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS EM CRFA .....</b>	<b>125</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>127</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>130</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Desde 1890, com a fabricação da alumina em larga escala utilizando o processo Bayer, a indústria tem buscado maneiras sustentáveis de utilizar o resíduo de bauxita (RB). Segundo o Instituto Internacional do Alumínio (2022), uma tonelada de alumina produzida gera cerca de 1,2 toneladas de resíduo. Ademais, de acordo com as projeções apresentadas pelo instituto, a produção de RB cresceu com a produção da alumina, com uma taxa de mais de 150 milhões de toneladas em 2020 e ressalta que os estoques globais de resíduo podem chegar a uma produção total acumulada de 10 bilhões de toneladas até 2050 (Figura 1).

Figura 1 – Resíduo de bauxita produzido acumulado e projeção do crescimento



Fonte: Instituto Internacional do Alumínio (2022).

O Anuário Mineral Brasileiro do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), em 2021, destaca que o alumínio (bauxita) apresenta a quarta posição na produção anual de minério bruto no Brasil, e é o metal não ferroso com as maiores quantidades produzidas anualmente nas usinas de tratamento, sendo o estado do Pará o responsável pela maior quantidade produzida (Departamento Nacional de Produção Mineral, 2022).

O descarte inadequado do resíduo pode acarretar em graves problemas ambientais como a contaminação de solos, rios, lençóis freáticos, destruição da fauna e da flora. Portanto, pesquisas têm sido desenvolvidas sobre a aplicação de resíduo de bauxita na construção civil com a finalidade de se obter um gerenciamento adequado do resíduo e também reutilizá-lo em nível industrial. Algumas pesquisas já apontam a utilização do resíduo na produção de revestimentos cerâmicos, de cimento, de agregados sintéticos para aplicação na construção

civil. Este último surge também pela busca de uma alternativa que reduza a dependência dos agregados naturais na produção do concreto.

Sabe-se que no campo da construção civil, o material mais utilizado a nível mundial é o concreto convencional, que é constituído por aglomerante, agregados, água e aditivos. Segundo Mehta & Monteiro (2006), o concreto é o produto mais consumido pela humanidade, depois da água. Isso se deve a capacidade do concreto de ser moldado, durabilidade, processo de fabricação relativamente simples e questões econômicas. No que se refere à sustentabilidade, Pedroso (2009) relata que a fabricação do cimento, que é o principal componente do concreto, consome menos energia do que o alumínio e o aço, além de emitir menos gases poluentes ao meio ambiente, e agregando a questão ecológica, Moraes Neto (2013) ressalta que o concreto é um material que pode reciclar grande quantidade de rejeitos industriais.

Apesar das vantagens, o concreto é caracterizado como um material frágil, com baixa capacidade de deformação e apresenta uma reduzida resistência à tração quando comparada à sua resistência à compressão. Com a finalidade de melhorar estas propriedades, pesquisas foram desenvolvidas ao longo dos anos, como é o caso do concreto armado, que tem como mecanismo de reforço a inserção de armaduras nas regiões tracionadas do elemento, e os chamados concretos especiais, que são concretos melhorados devido ao aprimoramento da tecnologia, reduzindo assim as suas deficiências e/ou incorporando novas propriedades ao material, como exemplo, o concreto com fibras (FIGUEIREDO, 2011).

O ACI 544.1R-96 (2002) relata que a introdução das fibras ao concreto pode prevenir a ocorrência de grandes fissuras que são esteticamente desagradáveis e que permitam a entrada de contaminantes ou água que podem ocasionar a corrosão do aço e deterioração do concreto. Além disso, estruturalmente, o documento afirma que as fibras de aço melhoram a ductilidade do concreto para todos os modos de carregamento, ou seja, compressão, tração, cisalhamento, torção e flexão, mas destaca que o acréscimo de resistência difere para cada carregamento.

O documento referido salienta que a adição de fibras tem potencial para substituir parcialmente os estribos das vigas, sendo este melhor desempenho do CRFA quanto aos esforços cortantes resultantes da capacidade das fibras em conter as fissuras, aumentar a capacidade portante do concreto, aumentar a adesão friccional com a matriz de concreto. Ademais, o aumento da resistência ao cisalhamento também pode alterar o modo de ruína frágil para dúctil dependendo do tipo, da geometria, e da quantidade de fibras adicionadas ao concreto (ACI 544.1R-96, 2002).

Para Gomes (2016), apesar do progresso, a aplicação do concreto reforçado com fibra ainda é limitada. A autora relata que tal limitação se dá pela falta de familiaridade com o material, pela resistência cultural. A partir da necessidade de se ter uma normativa brasileira que estabelecesse diretrizes, critérios e procedimentos na elaboração de projetos de CRFA que garantisse qualidade, eficiência e durabilidade, a Associação Brasileira de Normas Técnicas lançou, em 2021, as primeiras edições referentes ao projeto de estruturas de CRFA (ABNT NBR 16935, 2021) e ao método de ensaio para avaliação do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras na flexão, com a determinação das resistências à tração na flexão (ABNT NBR 16940, 2021). Neste contexto, o presente trabalho visa avaliar o comportamento ao cisalhamento de vigas de CC e CRFA com a utilização de agregado sintético de RB a fim de contribuir com o conhecimento no assunto.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A aplicação do RB como agregado sintético contribui para reduzir a demanda do uso de agregados naturais e proporcionar uma aplicação do resíduo em larga escala, reduzindo assim os custos com sua manutenção e disposição, e, conseqüentemente, minimizando o seu impacto no meio ambiente. Com a finalidade de melhorar as propriedades mecânicas do concreto com agregado sintético, este trabalho avalia também o efeito da aplicação da fibra de aço no reforço ao cisalhamento, já que o CRFA tem sido visto como um material promissor na área da engenharia de estruturas devido às suas características de pós-fissuração, em que as fibras atuam como pontes de transferências de esforços. No que se refere o comportamento ao cisalhamento, estudos relatam que a adição da fibra apresenta potencial para substituir o reforço convencional, ou seja, os estribos das vigas, apresentando como vantagem a possibilidade de suprimir parte da armadura transversal das vigas, reduzindo assim os custos com corte, dobra e montagem, que é uma das etapas mais onerosas para execução de uma estrutura em concreto armado.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O estudo tem como objetivo avaliar através de um estudo experimental o comportamento ao cisalhamento em vigas de concreto armado convencional e de concreto reforçado com fibras de aço variando o tipo de agregado graúdo, sendo realizadas vigas sem o agregado graúdo, vigas com o agregado natural do tipo brita, e vigas com o agregado sintético de resíduo de bauxita, ambas com uma fração volumétrica de fibras igual a 1,0%.

### **1.2.2 Objetivo específico**

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Realizar testes experimentais em seis vigas, sendo três de CC e três de CRFA, em que destas três vigas uma é produzida sem agregado graúdo, outra com agregado natural do tipo brita e outra com agregado sintético de resíduo de bauxita;
- b) Analisar o deslocamento vertical das vigas de CC e de CRFA, verificando a diferença do deslocamento com a adição de fibras e com a utilização do agregado sintético de resíduo de bauxita;
- c) Analisar a deformação da armadura longitudinal, da armadura transversal e do concreto das vigas de CC e de CRFA, verificando a diferença das deformações com a adição de fibras e com a utilização do agregado sintético de resíduo de bauxita;
- d) Verificar o padrão de fissuração através do mapeamento de fissuras das vigas ensaiadas e o modo de ruptura;
- e) Avaliar a capacidade resistente ao cisalhamento das vigas de CC e de CRFA, verificando a diferença da capacidade resistente com a adição de fibras e com a utilização do agregado sintético de resíduo de bauxita;
- f) Avaliar a capacidade resistente ao cisalhamento das vigas de CC em relação as estimativas teóricas propostas por NBR 6118 (ABNT, 2023), Model Code 10 (CEB-FIP, 2010), ACI 318 (ACI, 2019) e JSCE (2008), avaliando a dispersão e nível de conservadorismo;
- g) Avaliar a capacidade resistente ao cisalhamento das vigas de CRFA em relação as estimativas teóricas propostas por NBR 16935 (ABNT, 2021), Model Code 10 (CEB-FIP, 2010), RILEM TC162-TDF (2002) e JSCE (2008), avaliando a dispersão e nível de conservadorismo.

### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, os quais serão apresentados a seguir:

No Capítulo 1, tem-se a introdução ao trabalho apresentando o objetivo e a justificativa.

No Capítulo 2, tem-se a revisão bibliográfica, na qual serão apresentados conceitos sobre as fibras de aço, características do concreto reforçado com fibras de aço no estado fresco e no estado endurecido, além da utilização do agregado graúdo sintético de resíduo de bauxita na produção de concretos. Também será apresentado conceitos sobre o cisalhamento em vigas

e as recomendações normativas que abordam os cálculos para capacidade resistente de vigas de concreto armado sem e com fibras. Ademais, trabalhos que contribuíram para o estudo sobre o comportamento do concreto reforçado com fibra de aço no cisalhamento, assim como a contribuição da utilização do agregado sintético de resíduo da bauxita serão explanados.

No Capítulo 3 é apresentado o programa experimental com as características das vigas, as armaduras utilizadas, a instrumentação proposta e o sistema de ensaio. Assim como, a caracterização dos materiais e suas propriedades.

No Capítulo 4 é apresentado os resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios de vigas, em que serão analisados os deslocamentos verticais das vigas, as deformações referentes a armadura longitudinal, a armadura transversal e ao concreto, o mapeamento das fissuras e a capacidade resistente ao cisalhamento.

No Capítulo 5 tem-se a análise dos resultados referentes as estimativas de resistências ao cisalhamento em vigas de concreto convencional e de concreto reforçado com fibras de aço.

No Capítulo 6 tem-se as conclusões do presente estudo, bem como sugestões para pesquisas futuras. Em sequência tem-se as referências bibliográficas utilizadas no presente trabalho.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCRETO COM FIBRAS: UM COMPÓSITO ESTRUTURAL

Levy Neto & Pardini (2006, p.1) relatam que uma característica do compósito estrutural é a combinação de duas fases distintas, em nível macroscópico, denominadas de matriz e reforço. Sendo que, a matriz, normalmente, é apresentada de forma aglutinante, permitindo assim, que os reforços transfiram os esforços mecânicos entre si, de forma integrada. Segundo Figueiredo (2000) e Mehta & Monteiro (2006, p. 502), a aplicação dos materiais compósitos no campo da construção civil remete à origem da civilização humana, destacando que no Antigo Egito, por exemplo, a palha era utilizada como reforço na fabricação de tijolos como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Produção de tijolos utilizando a palha como fibra.



Fonte: Carvalho *et al.* (2010).

Callister & Rethwisch (2016, p.582) apresentam a definição de material compósito como a combinação de pelo menos dois componentes que possuem propriedades físicas e químicas diferentes, e, que, após a sua combinação apresente um comportamento diferenciado quando comparados aos materiais de origem. Esta combinação de propriedades é denominada como o princípio da ação combinada.

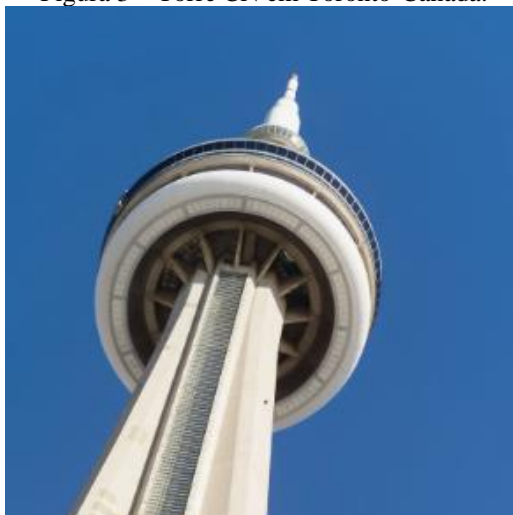
Sendo assim, o concreto com fibras pode ser definido como compósito, pois é constituído de, pelo menos, duas fases distintas principais, ou seja, a matriz de concreto e as fibras que podem ser classificadas, segundo Naaman (2003) de acordo com o tipo de material em metálicas (aço), minerais (vidro), sintéticas (polipropileno) e naturais (sisal). Vale destacar

que, no contexto atual, o concreto armado também pode ser definido como um material compósito, em que o concreto corresponde à matriz, e as armaduras assumem um papel de reforço proporcionando ductilidade ao concreto.

De acordo com o ACI 544.1R-96 (2002, p.2), datam de 1910 os primeiros ensaios experimentais e patentes utilizando elementos discretos de aço na melhoria das propriedades do concreto. O documento destaca que no início da década de 1960, nos Estados Unidos, foi realizada a primeira grande investigação para avaliar o potencial das fibras de aço como reforço para o concreto e, desde então, pesquisas, desenvolvimento, experimentação e aplicação do concreto reforçado com fibras foi intensificado.

Corroborando com o documento, os autores Lopes (2005), Lobão (2005), Oliveira (2010) e Figueiredo (2011) relatam que a utilização do CRFA foi intensificada entre os anos 50 e 60, em que houve as principais pesquisas teóricas e experimentais a fim de melhor compreender as propriedades da fibra e sua utilização como reforço no concreto. Segundo Santos (2009), o primeiro prédio com concreto reforçado com fibras de aço foi construído em 1970, a torre CN em Toronto-Canadá com 555 metros (Figura 3).

Figura 3 – Torre CN em Toronto-Canadá.



Fonte: Britannica (2022).

Velasco (2008) explana que com o desenvolvimento dos estudos relacionados ao concreto reforçado com fibras, os resultados iniciais apresentaram um aumento na tenacidade pós-fissuração, porém, também começaram a surgir os problemas relacionados a trabalhabilidade do material, verificando a tendência à aglomeração de fibras, principalmente ao utilizar fibras longas.

A partir disso, novos estudos surgiram a fim de solucionar tais problemas, dentre eles, Velasco (2008) destaca a descoberta de que ao utilizar um teor inferior de fibras com gancho

seria possível produzir os mesmos resultados referentes à tenacidade do concreto quando comparadas com a utilização de fibras retas. O conhecimento adquirido sobre o CRFA no decorrer dos anos, concedeu a este material um importante papel na construção civil, com grande aplicabilidade e com muitos benefícios.

Dentre suas aplicações, Barros (1995), Bentur & Mindess (1990), Figueiredo (2000), Buratti *et al.* (2011) ressaltam a utilização do concreto reforçado com fibras em pavimentos (rodoviários, aeroportuários, portuários), concreto para túneis, pré moldados, tubos de concreto e blocos de ancoragem de cabos de protensão, cascas, elementos de contenção, elementos sujeitos a sismos e/ou impactos, dormentes, reforço de elementos estruturais.

### 2.1.1 Concreto reforçado com fibras de aço – CRFA

Os concretos reforçados com fibras de aço, de acordo com o ACI 544.1R-96 (2002, p.7), são compostos por cimento hidráulico, agregados miúdos, ou agregados miúdos e graúdos, e fibras discretas e descontínuas de aço, devendo apresentar dimensões adequadas para serem inseridas ao concreto, ou seja, as fibras devem ser suficientemente curtas para aderir à massa de concreto de forma aleatória, com possíveis adições de aditivos e finos.

A melhoria das propriedades do concreto através da adição das fibras pode ser conferida tanto pelo mecanismo de transferência de tensões entre a fibra e a matriz de concreto como pelo efeito “costura” das fissuras pelas fibras (MORAES NETO, 2013). Isto é, as fibras de aço atuam principalmente após a fissuração, com a finalidade de atuar como ponte de transferência de tensão, evitando concentração de tensões na fissura, desempenhando papel de costura entre a fissura e reduzindo a velocidade de propagação das mesmas.

Na Figura 4-a observa-se que a fissura representa uma barreira à propagação das tensões no concreto convencional e na Figura 4-b percebe-se a atuação das fibras como ponte de transferência de tensões na fissura, reduzindo a concentração de tensões nas extremidades da mesma.

Figura 4 – Distribuição das tensões em concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço.

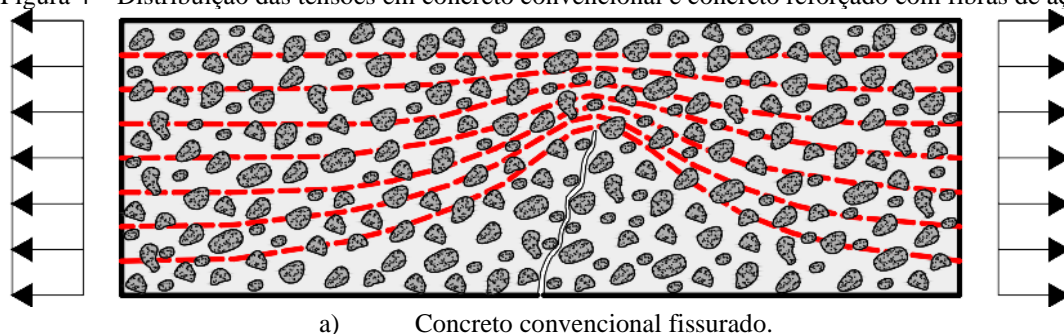
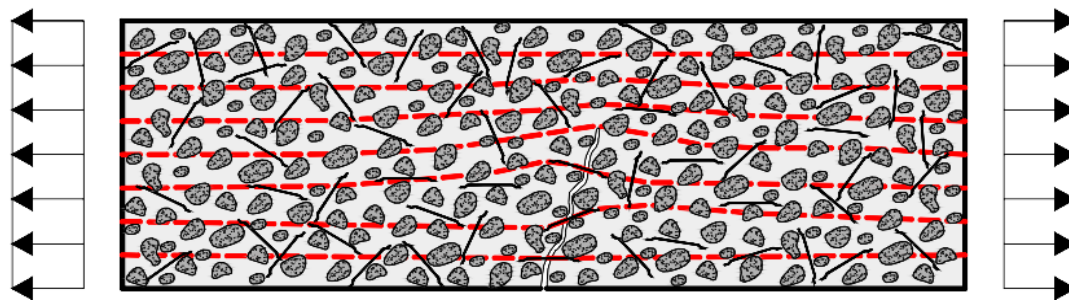


Figura 4 – Distribuição das tensões em concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço (Continuação).



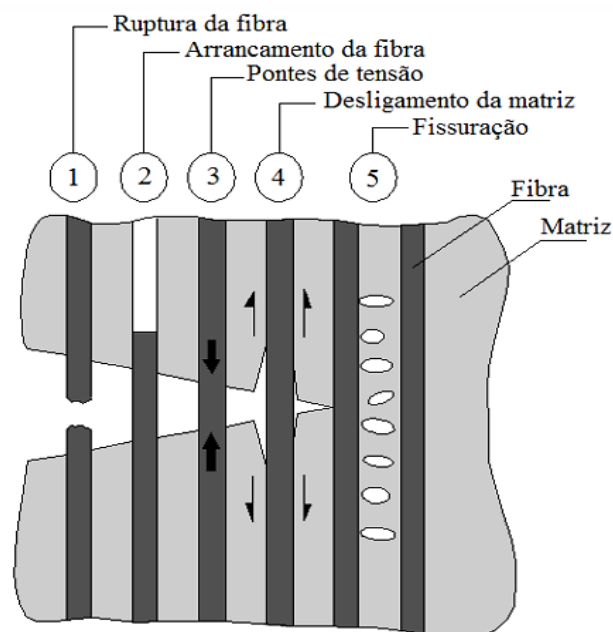
b) Concreto reforçado com fibras de aço fissurado.

Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000).

Segundo o ACI 544.4R-88 (1999, p.3), o mecanismo de reforço da fibra compreende a transferência de tensão da matriz para a fibra através do cisalhamento interfacial, ou por intertravamento entre a fibra e a matriz se a superfície da fibra for deformada. Sendo assim, a tensão é compartilhada pela matriz e pela fibra até que haja a fissuração da matriz, e então a tensão total é transferida de forma progressiva para as fibras.

Para explicar a transferência de esforços entre a matriz e o reforço, ou seja, o concreto e a fibra, Garcez (2005) apresenta o procedimento de transferência como fases (Figura 5), em que se observa na fase 5 o surgimento da fissuração, posteriormente, com solicitações superiores ocorre o deslocamento das fibras na fase 4. A fase 3 representa o momento em que o material é submetido a maiores solicitações e a fissura aumenta, acarretando com que as fibras atuem como pontes de transferência de tensão até que haja o arrancamento total da fibra ou a ruptura, representado pelas fases 2 e 1, respectivamente.

Figura 5 – Transferência de esforços

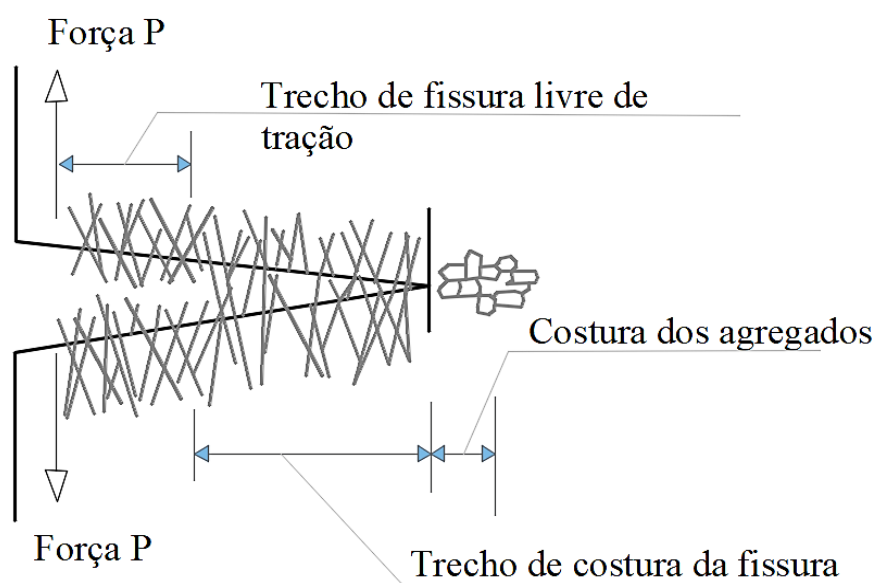


Fonte: Adaptado de Garcez (2005).

Barros (1995) afirma que as fibras podem perder a sua capacidade de reforço de duas formas: por escoamento e posterior ruptura, ou por deslizamento da matriz de concreto. O ACI 544 4R-88 (1999, p.3) relata que a falha pode compreender a ruptura de algumas fibras, mas, geralmente, o arrancamento predomina. O documento destaca que o tipo de falha por arrancamento é vantajoso pois ocorre de forma gradual e dúctil, diferentemente da falha por ruptura que é rápida e possivelmente catastrófica.

Vale destacar que, Wecharatana & Shah (1983) identificam três zonas para representar uma fissura no concreto reforçado com fibras: a zona livre de tração em que a matriz se encontra fissurada com fibras arrancadas ou rompidas; a zona de “costura” das fissuras em que é transferida a tensão da matriz para as fibras por atrito; e a zona de micro fissuração da matriz, apresentando continuidade e engrenamento dos agregados com a finalidade de ocorrer a transferência de tensão na própria matriz (Figura 6).

Figura 6 – Zonas de uma fissura no concreto reforçado com fibras.



Fonte: Adaptado de Wecharatana & Shah (1983).

De acordo com Rodrigues de Souza (2021), o comportamento do concreto reforçado com fibras na zona de pós fissuração depende da resistência das pontes formadas pelas fibras que cruzam a fissura. O efeito do intertravamento dos agregados tem ação pequena comparado às fibras. Dessa forma, se a abertura da fissura é pequena, os agregados têm maior participação na transferência de tensões, porém, com o aumento da fissura, sua contribuição diminui. Já a ação das fibras cresce à medida que o processo de arrancamento se desenvolve até que a fibra seja totalmente arrancada da matriz de concreto. Nunes & Agopyan (1998) relatam em seus

estudos que a presença das fibras acarreta no surgimento de fissuras mais finas, menos espaçadas e distribuídas de modo mais uniforme.

Barros (2000) afirma que a utilização das fibras possui vantagens econômicas e técnicas. As vantagens econômicas são devido à supressão da mão de obra necessárias no corte e montagem das armaduras convencionais, além da redução do tempo de execução da estrutura, e, as vantagens técnicas são devido ao reforço que as fibras garantem, melhorando a ductilidade e o comportamento da resistência. De acordo com o Model Code 10 (CEB-FIP, 2010, p.220), as fibras podem ser utilizadas para melhorar o comportamento no estado limite de serviço (ELS), pois podem reduzir o tamanho da fissura, melhorando a sua durabilidade, e também no estado limite último (ELU), em que podem substituir parcialmente ou completamente as armaduras convencionais.

#### **2.1.1.1 Fibras de aço**

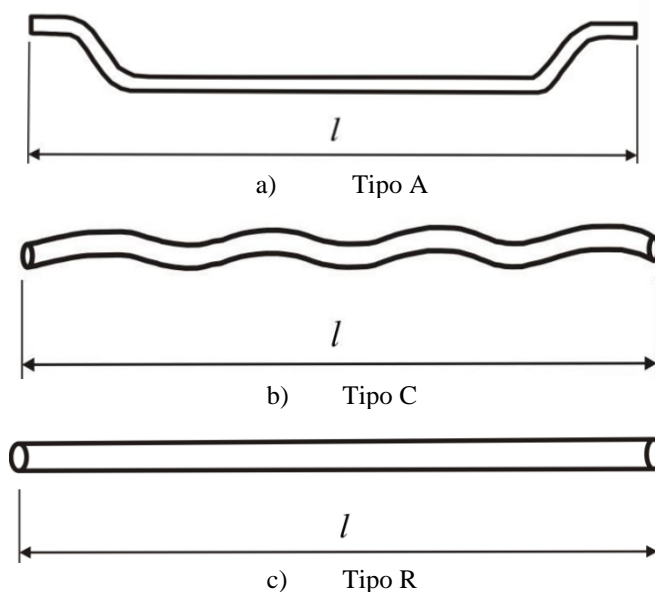
De acordo com o ACI 544.4R-88 (1999, p.2), as fibras podem assumir diferentes formas como seções transversais circulares, retangulares, meia-volta, irregulares ou variáveis. Ademais, as fibras também podem ser retas ou dobradas e com diferentes comprimentos. O documento destaca que é utilizado como parâmetro para descrever a geometria da fibra a razão entre o seu comprimento e o diâmetro ( $l_f/d_f$ ), denominado de fator de forma.

O item 5 da NBR 15530 (ABNT, 2019) classifica as fibras de aço baseado na fabricação, revestimento, forma, classificação do aço (teor de carbono) e tolerâncias de comprimento e diâmetro da fibra. O documento citado classifica as fibras de acordo com sua fabricação em grupos, são eles: Grupo I (Arame trefilados a frio); Grupo II (Chapas cortadas); Grupo III (Arame trefilados a frio e escarificados); Grupo IV (fibras produzidas por fusão); Grupo V (usinadas a partir de blocos de aço).

Quanto ao revestimento, a referida norma destaca que quando as fibras de aço são fornecidas com algum tipo de revestimento, por exemplo, a galvanização, devem ser declarados o tipo e a quantidade.

De acordo com a forma, a norma técnica brasileira apresenta que as fibras podem ser retas ou deformadas, sendo especificado pelo fabricante a forma, parâmetros de controle e tolerâncias da forma. Além disso, outra classificação apresentada é baseada no perfil da fibra, compreendendo perfis em tipo A (com ancoragem nas extremidades - *hooked*), tipo C (corrugada, ondulada - *crimped*), tipo R (sem ancoragem, lisa), como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Tipo de ancoragem da fibra de aço.



Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15530 (2019).

Com base na classificação do aço, as fibras podem apresentar: baixo teor de carbono (no máximo 0,30 % de carbono); médio teor de carbono (de 0,30 % a 0,60 % de carbono); ou, alto teor de carbono (0,60 % a 1,00 % de carbono). Ademais, é importante ressaltar que esta norma também classifica as fibras segundo as tolerâncias de comprimento e diâmetro em Classe A, B e C.

O ACI 544.1R-96 (2002, p.8) ressalta que as fibras de aço destinadas para o reforço do concreto devem ser suficientemente curtas para serem dispersas de forma aleatória na massa fresca de concreto usando procedimentos de misturas usuais, e, geralmente, em aplicações estruturais, as fibras são usadas como um papel complementar às barras de reforço.

### 2.1.2 Fatores que influenciam as propriedades do CRFA

De acordo com o ACI 544.4R-88 (1999, p.3), a eficiência e o teor da fibra (porcentagem da fibra em volume ou peso e número total de fibras) são os fatores mais importantes que influenciam as propriedades do CRFA, além da própria matriz de concreto.

O documento explica que a eficiência da fibra depende da resistência da fibra ao arrancamento, que por sua vez depende da interação da interface fibra-matriz. Muitos estudos demonstraram que as fibras de aço tendem a ser arrancadas da matriz de concreto ao invés de se romper. Susetyo (2009) relata que modelos constitutivos foram desenvolvidos com o intuito de aumentar a resistência ao arrancamento da fibra, como é o caso de fibras com extremidades em gancho ou achatadas. Para Barros (2000), o mecanismo de reforço conferido pelas fibras



depende da configuração geométrica da fibra. Ou seja, ao utilizar fibras lisas, os benefícios ao material resultam da aderência e do atrito entre as fibras e a matriz, e da deformação elástica das fibras; para as fibras com superfícies irregulares, além dos mecanismos citados anteriormente, acrescenta-se o mecanismo do efeito das engrenagens entre a fibra e a matriz; e, para fibras dobradas tem-se o mecanismo proporcionado pelo atrito, aderência e deformação elástica das fibras, além do mecanismo resultante da ancoragem nas extremidades das fibras na matriz.

O ACI 544.4R-88 (1999, p.3) complementa que a resistência ao arrancamento é proporcional à área da superfície interfacial, ou seja, quanto maior a área de superfície por unidade de volume (ou menor diâmetro) mais efetivamente as fibras se ligam. Logo, para um determinado comprimento de fibra, uma alta proporção do fator de forma ( $l_f/d_f$ ) está associado a uma maior eficácia da fibra.

Sendo assim o documento considera que as fibras devem ter uma alta razão, entretanto, pesquisas mostram que utilizando técnicas convencionais de misturas de concreto, quando o fator de forma é elevado, geralmente, surgem problemas relacionados com a trabalhabilidade da mistura e distribuição das fibras não uniformes. Figueiredo (2000), Elsaigh (2001) e Arquez (2010) constataram em seus trabalhos que quanto maior o fator de forma, maior a possibilidade de acontecer o empelotamento das fibras, denominados também de ouriços ou nichos, como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Aglomeração de fibras ou ouriço.



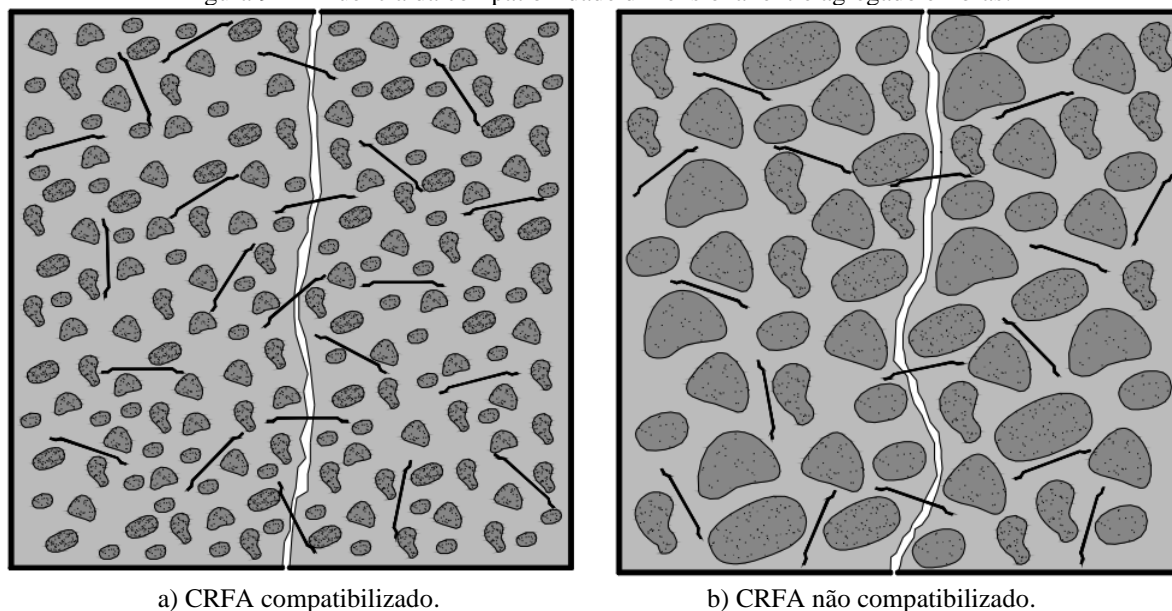
Fonte: Belgo Bekaert Arames (2018).



Figueiredo (2000) destaca em seus estudos, que deve haver uma compatibilidade dimensional entre o agregado e a fibra, permitindo o ancoramento das fibras corretamente na matriz com a finalidade destas desempenharem a função de ponte de transferência de tensão. O autor recomenda que o comprimento da fibra seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto, e destaca que caso não haja essa compatibilização, uma menor quantidade de fibras trabalha como ponte de tensão.

Na Figura 9 é apresentado a compatibilidade entre as fibras e o agregado graúdo em que é possível perceber que no concreto onde há compatibilização dimensional um maior número de fibras trabalha como ponte de transferência de tensão.

Figura 9 – Influência da compatibilidade dimensional entre agregado e fibras.

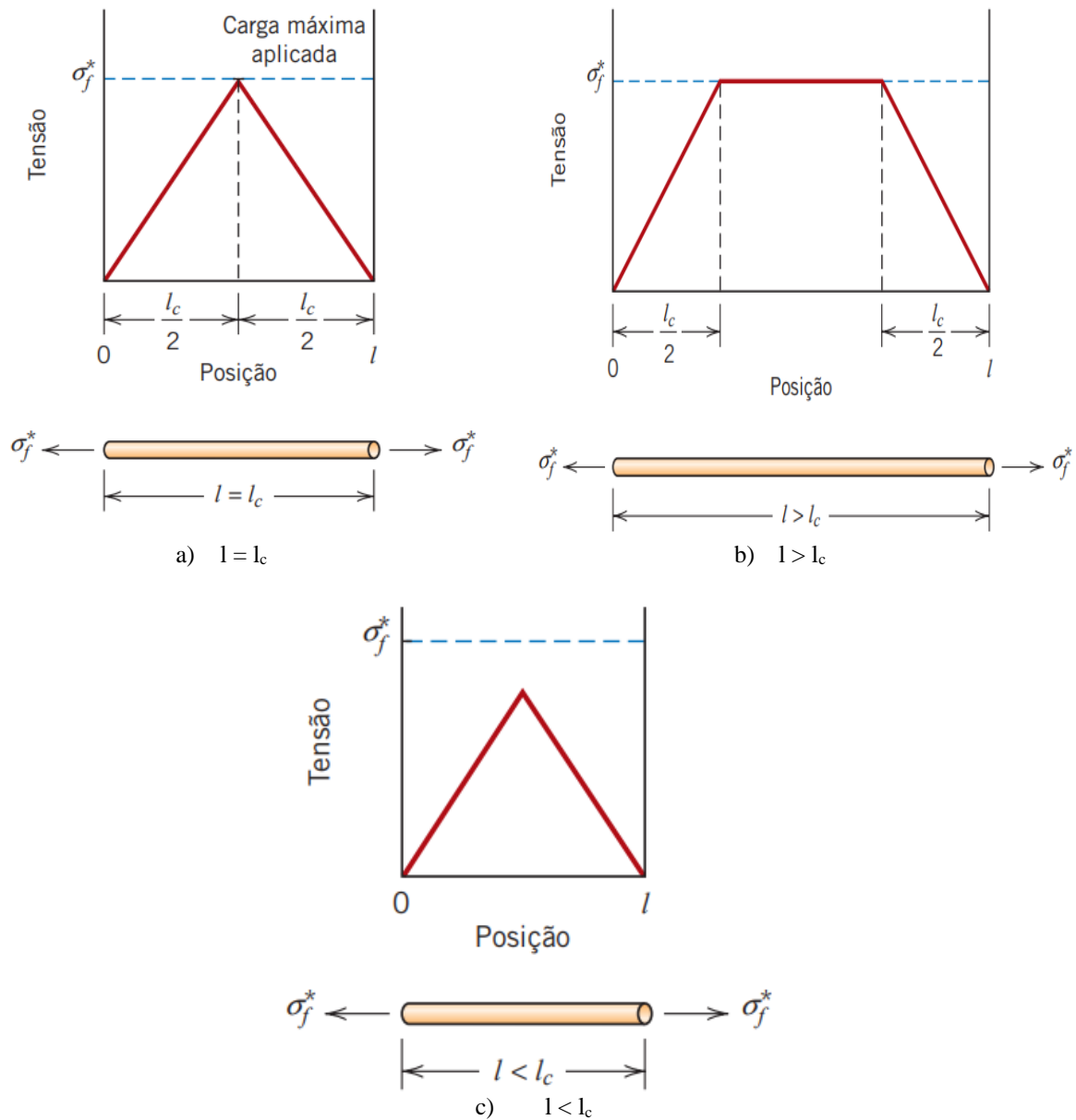


Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000).

Em relação ao comprimento da fibra, Callister & Rethwisch (2016, p.588) expõe que é necessário um determinado comprimento crítico ( $l_c$ ) da fibra para que haja aumento na resistência e na rigidez do material, e, este comprimento depende do diâmetro e da resistência da fibra, assim como da resistência da ligação fibra-matriz.

Na Figura 10-a tem-se que, quando uma tensão é aplicada a uma fibra que possui o comprimento igual ao comprimento crítico, a carga máxima na fibra é atingida apenas no ponto central do eixo da fibra. Quando o comprimento da fibra aumenta, o reforço proporcionado torna-se mais efetivo (Figura 10-b), e, quando o comprimento da fibra é inferior ao comprimento crítico (Figura 10-c), a matriz se deforma em torno das fibras, apresentando uma transferência de tensão pequena ou inexistente e, portanto, pouco reforço devido às fibras.

Figura 10 – Perfis tensão-posição para um compósito reforçado com fibras que está submetido a uma tensão de tração igual ao limite de resistência à tração da fibra.



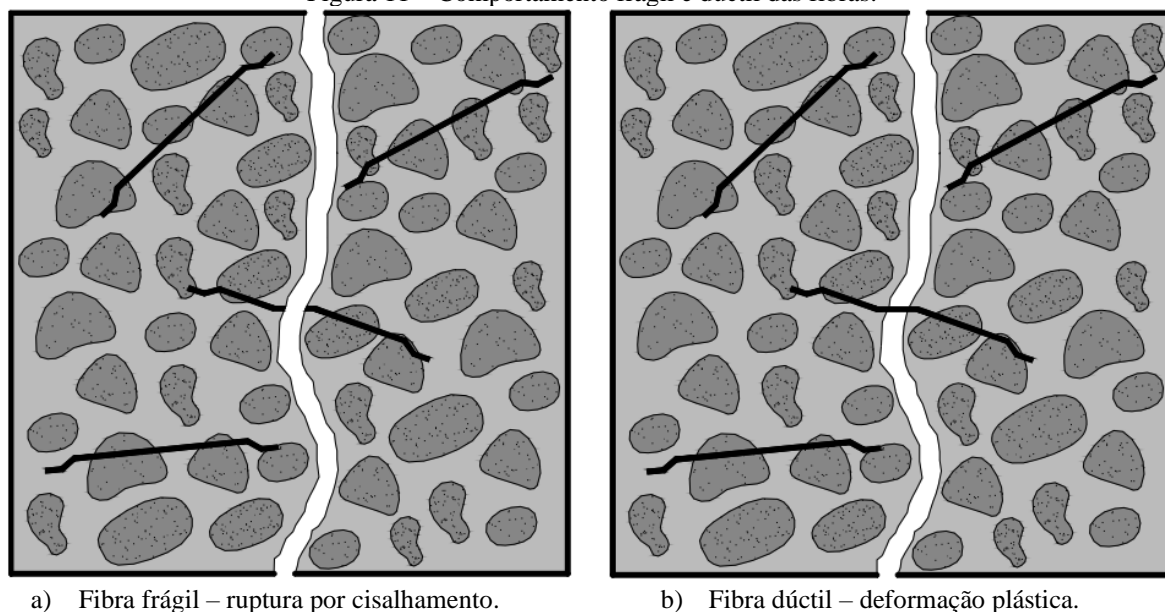
Fonte: Adaptado de Callister & Rethwisch (2016).

Quanto a influência do teor de fibras, Figueiredo (2000) define o volume crítico de fibras como aquele em que proporciona valores da resistência residual (pós fissuração) igual a tensão de ruptura da matriz e explana que para volumes abaixo do crítico, após a ruptura da matriz há a redução da capacidade portante pós-fissuração e, para volumes acima do crítico, o compósito pode aceitar níveis de carregamentos crescentes após a ruptura da matriz. Mehta & Monteiro (2006, p. 503) complementa que volumes de fibras inferiores a um por cento são, geralmente, utilizadas para reduzir fissuras por retração; entre um e dois por cento, para melhorar a resistência à ruptura e ao impacto; e, superior a dois por cento, em compósitos de alto desempenho reforçado com fibras.

Araújo, Curado & Rodrigues (2014) e Lobo (2017) explanam em seus trabalhos que quando há o aumento do volume de fibras, há uma maior probabilidade de estas cruzarem as fissuras, melhorando a transferência de tensões, o comportamento pós fissuração e a resistência. É de referir o estudo de Susetyo (2009) que relata que a utilização de fibras curtas acarretou em uma melhor “costura” das fissuras e melhor transferência de tensões, resultando em um melhor controle de abertura de fissuras. O autor atribui o melhor desempenho das fibras curtas a necessidade de um número maior de fibras para atingir o volume de fibras definido inicialmente, pois o comprimento e o diâmetro das fibras são menores comparados às fibras longas, além disso, as fibras curtas também apresentariam um menor espaçamento.

Figueiredo (2000) também ressalta que se as fibras não possuem uma ductilidade adequada para se deformar plasticamente no momento da fissuração, a capacidade portante do concreto reforçado pode ser comprometida, ou seja, as fibras com pouca ductilidade podem romper por corte antes do deslizamento da matriz do concreto, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Comportamento frágil e dúctil das fibras.



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000).

Para Banthia *et al.* (2014), utilizar diferentes tipos de fibras acarreta em uma melhor eficiência em níveis de fissuração, consequentemente, combinar fibras com características distintas em geometria, material, dimensões pode melhorar o comportamento do concreto, principalmente no quesito de controle de formação de fissuras.

Em relação à orientação da fibra, Lobo (2017) explica que o comportamento do CRFA também é influenciado. Sabe-se que, no concreto armado convencional tem-se uma maior eficiência das fibras quando estão posicionadas paralelamente à direção da tração. Porém, no

CRFA, as fibras são dispersas, não uniformes, e a orientação da fibra varia. Corroborando com o exposto, Gomes (2013) relata que as fibras orientadas na direção das tensões principais de tração são mais eficientes e Robins *et al.* (2002) demonstram com o ensaio de arrancamento de fibras deformáveis que para orientações variando entre 10° e 20° obteve-se as maiores cargas de arrancamento e os maiores valores de absorção de energia. Os autores justificam esse resultado com a tendência da fibra em se orientar na direção da carga, introduzindo no concreto uma tensão de contato, e, conseqüentemente, gerando uma componente adicional de resistência ao arrancamento.

Sendo assim, a fim de modelar o CRFA considerando a orientação das fibras e seu impacto sobre a eficiência do modelo através do fator de orientação de fibra é necessário estudos computacionais. O fator de orientação representa o ângulo de orientação das fibras em relação a fibra que estaria na direção da tensão. Ressalta-se que, o fator de orientação aumenta quando há a diminuição das dimensões do modelo de CRFA, pois assim, há a maior probabilidade de as fibras ficarem alinhadas na direção da tensão (VOO & FOSTER, 2004; LEE *et al.*, 2011).

### **2.1.3 Propriedades do concreto reforçado com fibras de aço no estado fresco**

O ACI 544.1R-96 (2002, p.10) cita que as propriedades do CRFA no estado fresco são influenciadas pelas propriedades das fibras (fator de forma, geometria e quantidade de fibra adicionada ao concreto), pela matriz de concreto e pela aderência interfacial entre a fibra e o concreto. Araújo, Curado & Rodrigues (2014) relatam que a propriedade mais afetada pela adição de fibras ao concreto fresco é a trabalhabilidade, visto que a fibra se comporta como inerte causando o intertravamento da mistura. Mehta & Monteiro (2006, p.508) relatam que independentemente do tipo de fibra, a perda da trabalhabilidade é proporcional ao volume de fibras inseridas no concreto.

Bentur & Mindess (1990), Figueiredo (2000) e Lopes (2005) em seus estudos relatam que a trabalhabilidade diminui com o aumento do fator de forma, porém a relação água/cimento pode ser aumentada para que possa atingir a trabalhabilidade adequada, desde que tenha seus devidos cuidados para não comprometer o concreto e torná-lo poroso e com baixa resistência, e também, superplastificantes podem ser adicionados. Segundo o ACI 544.3R-08 (2008, p.6), a trabalhabilidade também pode ser melhorada através da adição de pozolanas (cinzas volantes, escórias e sílica ativa) à mistura, ou substituindo parte do cimento pelas mesmas.

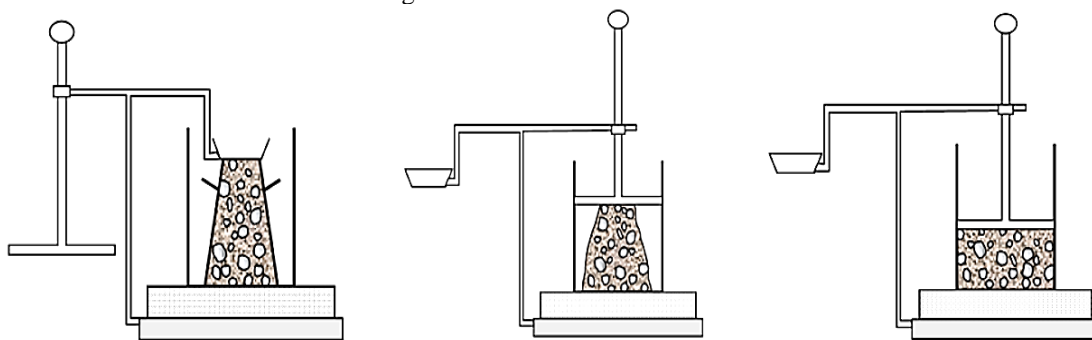
A partir disso, o ACI 544.3R-08 (2008, p.7) dispõe de recomendações sobre como se deve executar a mistura do concreto com as fibras de aço e evitar que haja a formação de ouriços

(aglomerado de fibras). O documento referido apresenta dois métodos de mistura, em que, o primeiro recomenda adicionar as fibras em último lugar ao misturador, e o segundo recomenda adicionar as fibras aos agregados, se possível junto ao agregado, mas se não, após a inserção do agregado a mistura, e recomenda que mesmo seguindo os métodos deve-se ter cuidado com a aglomeração das fibras. Pois, a tendência das fibras de aço se agruparem durante a mistura aumenta com o aumento do tamanho máximo do agregado, a proporção de agregado graúdo para fino, o fator de forma e a quantidade e a taxa de adição de fibras ao misturador, e também depende do método de adição de fibras ao misturador, geometria da fibra e se elas são agrupadas ou não (ACI 544.3R-08, 2008, p.5).

Sabe-se que, para uma determinada mistura de CRFA, o grau de consistência influencia a resistência e outras propriedades do material endurecido, assim como acontece com o concreto simples. Então, para medir a trabalhabilidade do CRFA através do ensaio de abatimento de cone (“*slump test*”), o ACI 544.1R-96 (2002, p.10) relata que o resultado do abatimento para o concreto reforçado com fibras pode ser reduzido de 25 mm a 102 mm, comparando com o concreto convencional, para volumes de fibras entre 0,25% e 1,5%.

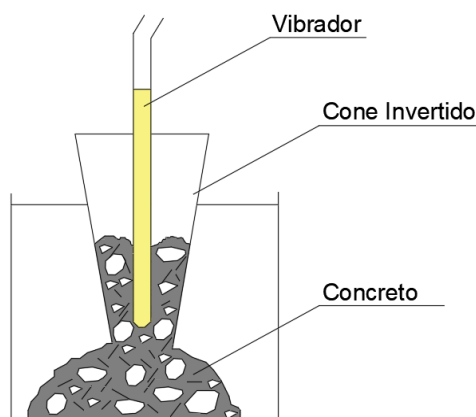
Ainda assim, o ensaio de abatimento de tronco não é apropriado para avaliar a trabalhabilidade do concreto com fibras sendo recomendado a utilização do ensaio Vebe consistômetro descrito de acordo com a Instituição britânica BS 1881 e o ensaio do tempo de queda do cone invertido padronizado por ASTM C995 (ACI 544.1R-96, 2002, p.10). O ACI 544.3R-08 (2008, p.5) salienta que as propriedades das fibras, assim como a quantidade de cimento, areia e agregado podem interferir nos resultados dos testes de trabalhabilidade. A Figura 12 representa o ensaio de teste Vebe consistômetro que consiste na moldagem do cone, e posteriormente, apoio do disco sobre o cone para realização da vibração a fim de obter o tempo necessário que o concreto precisa para passar da forma tronco-cônica para a forma cilíndrica. E a Figura 13 representa o ensaio do tempo de queda do cone invertido, que consiste em preencher o cone com três camadas de concreto a fim de evitar acúmulo de ar, e com o cone nivelado no topo insere-se o vibrador.

Figura 12 – Ensaio do teste Vebe.



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2000).

Figura 13 – Ensaio do tempo de queda do cone invertido.



Fonte: Adaptado de Figueiredo2000).

## 2.1.4 Propriedades do concreto reforçado com fibras de aço no estado endurecido

O ACI 544.4R-88 (1999, p.2) apresenta que as propriedades mecânicas do CRFA variam de acordo com vários fatores, como o tipo de fibra; fator de forma; a quantidade de fibra; a resistência da matriz; o tamanho, forma e método de preparação da amostra; o tamanho do agregado. Dentre os benefícios conferidos ao concreto com a introdução das fibras tem-se a melhoria da ductilidade sob todas as formas de carregamento (compressão, tração, cisalhamento, torção e flexão), e, em relação a resistência, o seu acréscimo varia para cada carregamento (ACI 544.1R-96, 2002, p.10). O documento ressalta que, as propriedades conferidas ao material não aumentam na mesma proporção em que as fibras são adicionadas.

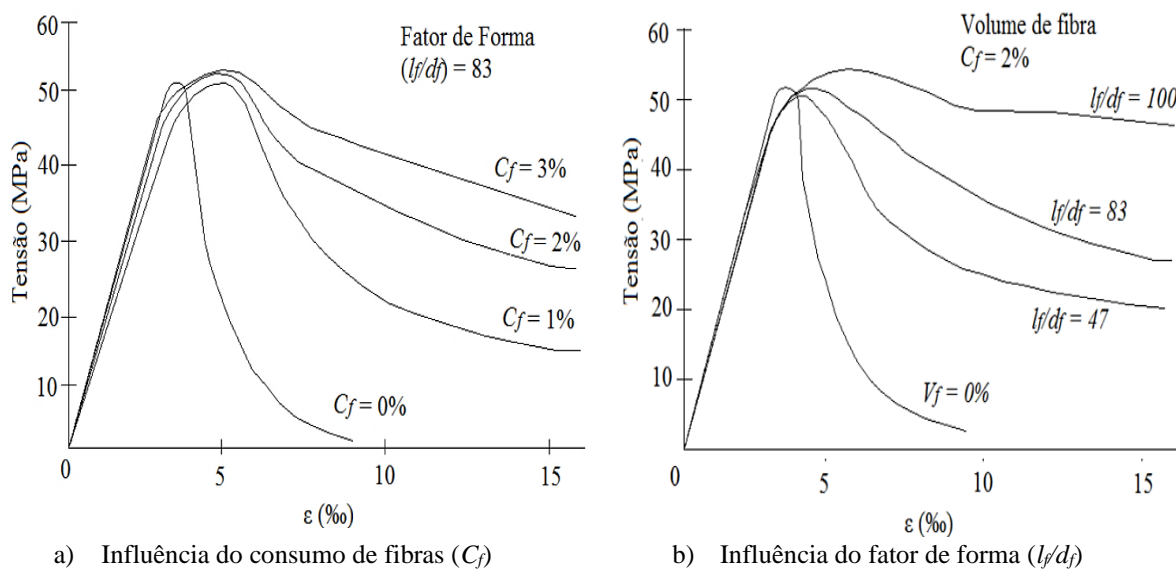
### 2.1.4.1 Resistência à compressão

De acordo com o ACI 544.1R-96 (2002, p.10), a incorporação das fibras à matriz de concreto afeta ligeiramente a resistência à compressão, colaborando com um aumento de cerca de 15% para consumos de fibras de até 1,5%. Apesar disso, este documento enfatiza que o objetivo final da adição de fibras não é melhorar a resistência à compressão.

Autores como Lim & Oh (1999) comentam que acréscimos de, aproximadamente, 25% são alcançados para dosagens de fibras de 2%, e Barros (1995) e Ramli & Daawood (2011) afirmam que os acréscimos na resistência à compressão do concreto são discretos quando se utiliza a fibra como reforço. O Model Code 10 (CEB-FIP, 2010, p.220) relata que a resistência à compressão não é significativamente afetada pelas fibras, a menos que seja utilizada uma alta porcentagem de fibras.

As Figuras 14-a e 14-b representam as curvas tensão x deformação de um concreto comprimido em que é possível verificar o aumento na deformação no pico de tensão à medida que há a inserção de fibras à mistura, além disso, a inclinação descendente pós pico se torna menos íngreme. Isto significa que é possível observar o aumento da tenacidade, calculada através da área sob curva tensão x deformação, e definida como a capacidade de absorver energia durante a deformação.

Figura 14 – Curva tensão x deformação do concreto comprimido.



a) Influência do consumo de fibras ( $C_f$ )

b) Influência do fator de forma ( $l_f/d_f$ )

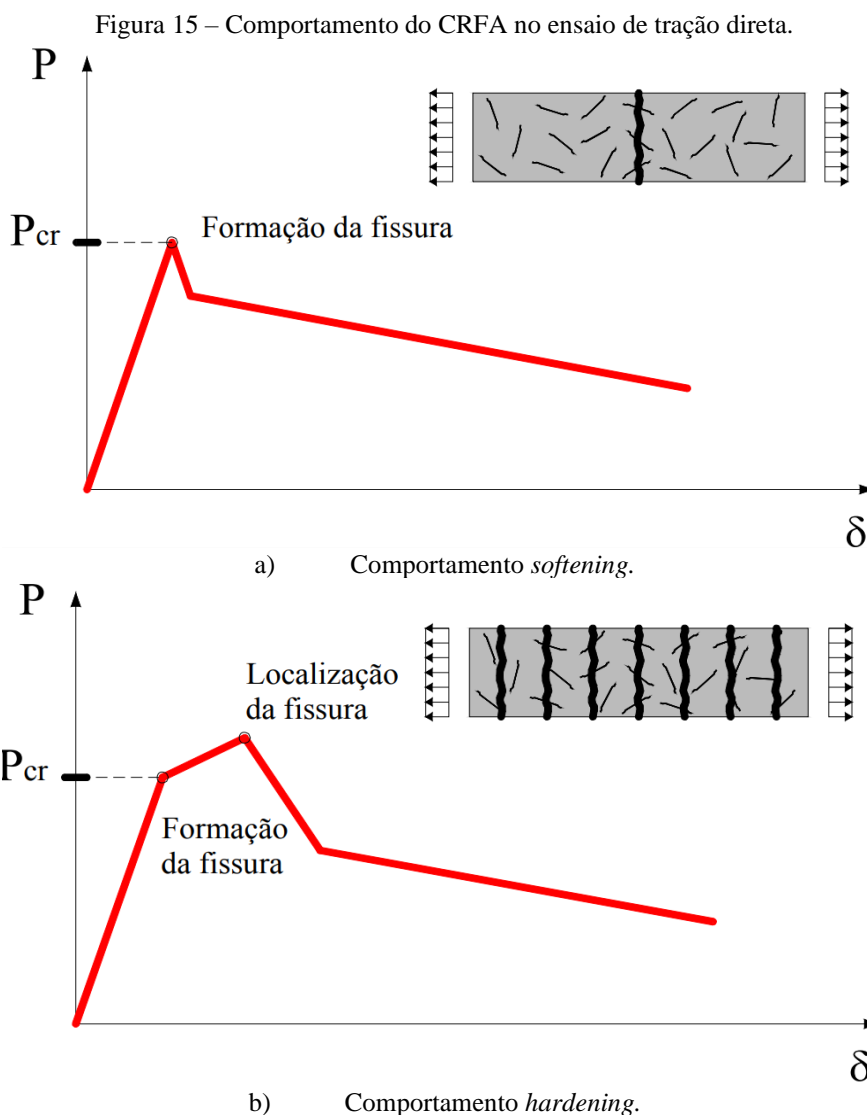
Fonte: Adaptado de ACI 544.4R-88 (1999).

Todavia, alguns estudiosos discordam sobre os acréscimos na resistência à compressão a partir da adição das fibras, como é o caso do autor Lima (2012), que relata que a adição de fibras à massa de concreto pode reduzir ligeiramente a resistência à compressão do concreto, pois as fibras provocam a incorporação de vazios à matriz e quando o método de preparo desse material for inadequado pode ocorrer formação de ouriços. Figueiredo (2000) relata que em alguns trabalhos a adição das fibras à massa de concreto reduz a resistência à compressão do concreto reforçado com fibras, mas o autor confere este efeito ao preparo inadequado do material. Ramli & Dawood (2011) também realçam que a menor resistência seja atribuída à distribuição não homogênea das fibras na matriz de concreto.

### 2.1.4.2 Resistência à tração direta

Conforme o ACI 544.1R-96 (2002, p.10), a resistência à tração do concreto reforçado com fibras apresenta uma melhora significativa. O documento menciona que há acréscimos em cerca de 30% a 40% quando se adiciona cerca de 1,5% de fibras à massa de concreto. Segundo o Model Code 10 (CEB-FIP, 2010, p.222), o teste de tração direta não é adequado para a representação do teste padrão de novas misturas, pois a execução e a interpretação dos resultados destes testes são difíceis.

O Model Code 10 (CEB-FIP, 2010, p.220) acrescenta que o ensaio de tração em CRFA pode fornecer, dependendo da composição do compósito, comportamento *softening* (resposta pós-fissura com amolecimento), quando as deformações se localizam em uma única fissura, ou *hardening* (resposta pós-fissura com endurecimento), quando múltiplas fissuras são formadas antes de ser alcançada a carga máxima de tração (Figura 15).



Fonte: Adaptado de Model Code 10 (2010).

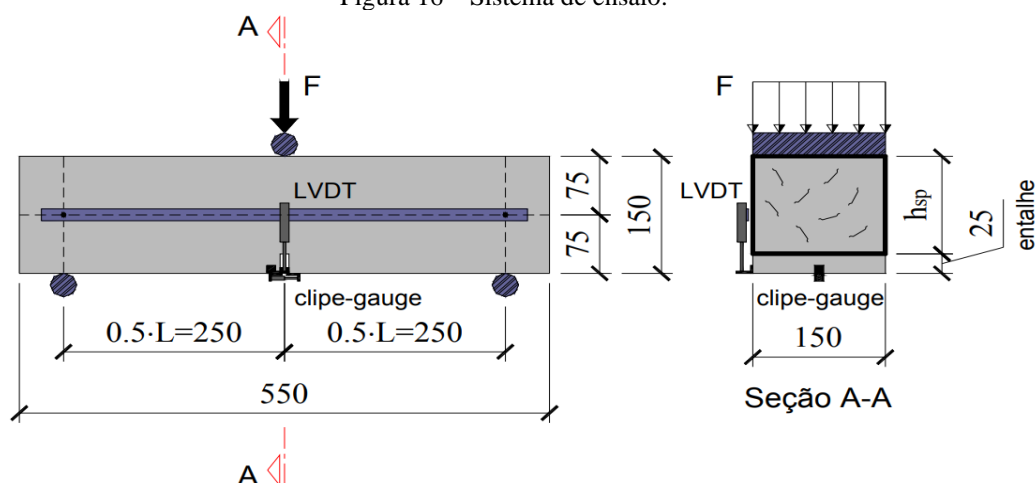


Ressalta-se que, o comportamento *softening* é caracterizado pela propagação da fissura no compósito ocorrendo imediatamente no local da primeira fissura, de forma que as deformações se localizam em uma única fissura, ocorrendo uma perda gradativa da resistência residual após o aparecimento da primeira fissura na matriz. Sendo assim, a tensão pós fissura é menor do que a tensão de fissuração (Figura 15-a). Por outro lado, o comportamento *hardening* é caracterizado pela formação de múltiplas fissuras em diferentes pontos do compósito ocorrendo após o início da fissuração e com ganho da capacidade resistente da matriz, já que estas fissuras são geradas antes mesmo de ser atingida a carga máxima de tração, portanto, a tensão de pós fissura é maior que a tensão de fissuração (Figura 15-b). Segundo Barros (1995), Lobão (2005), Wang (2010) e Moraes Neto (2013) a contribuição das fibras como mecanismo de reforço é verificada na fase pós-fissura do concreto, apresentando uma contribuição pouco representativa na fase pré-fissura.

#### 2.1.4.3 Resistência à tração na flexão

Conforme os estudos de Garcez (2005), o aumento de resistência mais significativo ocorre na resistência à tração na flexão, sendo possível constatar acréscimos de até 100%. O ACI 544.1R-96 (2002, p.11) relata acréscimos de 50% a 70%, dependendo das propriedades do concreto reforçado com fibras para ensaios em três pontos. O RILEM 162-TDF (2002) sugere o ensaio de flexão em prismas entalhados com três pontos para avaliar o comportamento do CRFA à tração na flexão. O sistema do ensaio pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Sistema de ensaio.



Fonte: Adaptado de RILEM 162 TDF (2002).

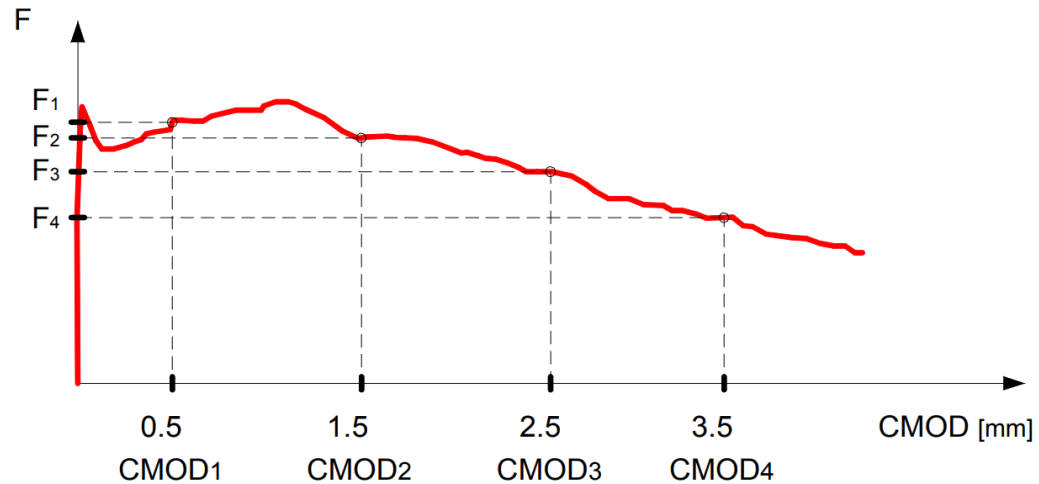
Neste ensaio são registradas as relações carga-deslocamento e carga-CMOD, sendo CMOD a medida da abertura do entalhe (CMOD = *Crack Mouth Opening Displacement*). A partir da análise destas relações é possível determinar o limite de proporcionalidade do material

( $f_{fct,L}$ ), além das resistências equivalentes ( $f_{eq,j}$ , com  $j=2,3$ ) e residuais ( $f_{Ri}$ , com  $i=1,2,3,4$ ) à tração na flexão, as quais são utilizadas pelo RILEM 162-TDF (2002) e pelo Model Code 10 (CEB-FIP, 2010) no dimensionamento dos elementos estruturais em CRFA. A Equação 1 apresenta a fórmula referente a resistência residual  $f_{r1}$ ,  $f_{r2}$ ,  $f_{r3}$  e  $f_{r4}$  para os valores de CMOD, em milímetros, iguais a 0,5; 1,5; 2,5 e 3,5, respectivamente.

$$f_{R,i} = \frac{3 * F_{R,i} * L}{2 * b_w * h_{sp}^2} \quad (1)$$

Onde  $F_{R,i}$  é a carga corresponde para cada valor determinado para CMOD,  $L$  é o vão do prisma,  $b_w$  é a largura do prisma e  $h_{sp}$  é a altura do entalhe feito no prisma. A Figura 17 apresenta a curva carga x CMOD típica de um teste de flexão, em que é possível calcular o parâmetro  $f_{R,i}$  ( $i=1, 2, 3$  e  $4$ ).

Figura 17 – Curva carga x CMOD típica de um teste de flexão sugerido pelo RILEM TC 162-TDF



Fonte: Adaptado de RILEM TC 162-TDF (2002).

#### 2.1.4.4 Resistência ao cisalhamento

De acordo com o ACI 544.4R-88 (1999, p.12), o mecanismo de reforço proporcionado pelas fibras promove acréscimos de resistência significativos, com capacidade para substituir o reforço convencional do concreto armado, ou seja, os estribos das vigas. Este desempenho satisfatório se deve basicamente à capacidade das fibras em conter as aberturas das fissuras e por aprimorar os mecanismos de engrenamento no plano da fissura.

O documento cita que as fibras de aço apresentam diversas vantagens quando utilizadas para substituir os estribos das vigas, dentre elas: a distribuição aleatória de fibras ao longo do volume de concreto em espaços muito mais próximo do que pode ser obtido com barras de reforço convencional, o acréscimo da resistência à tração na primeira fissura e a resistência à

tração final do concreto, o acréscimo da resistência ao atrito de cisalhamento devido a resistência ao arrancamento e as fissuras nas pontes das fibras. É importante destacar que o ACI 544-1R-96 (2002, p.11) informa que o aumento da resistência ao cisalhamento pode alterar o modo de ruína de frágil para dúctil dependendo do tipo, da geometria, e da quantidade de fibras adicionadas ao concreto.

Madan *et al.* (2007) e Kwak *et al.* (2002) comentam que a relação  $a/d$  também é fundamental na avaliação da resistência ao cisalhamento de vigas, sendo  $a$  e  $d$  o vão de cisalhamento e a altura útil da viga, respectivamente. Ressalta-se que a relação  $a/d$  se refere ao comportamento de uma viga esbelta, onde ela pode apresentar um comportamento de arco (modelo teórico de biela e tirante) ou comportamento de viga (modelo de cálculo I ou II).

## **2.2 AGREGADO**

Souza (2010) define agregado como materiais granulares, que não apresentam volume e forma fixados, inertes e que podem ser utilizados em obras de engenharia, principalmente, na produção de concreto e argamassas de cimento Portland.

Mehta & Monteiro (2006, p.253) relatam que a visão tradicional do agregado como uma carga inerte vem sendo questionada devido a conscientização crescente da função desempenhada pelo agregado na determinação de propriedades do concreto. De acordo com Neville (1995), os agregados não são totalmente inertes, pois suas propriedades físicas, térmicas e químicas podem afetar o desempenho do concreto com eles fabricados. Ou seja, o agregado pode, em certas condições, reagir com a matriz de concreto.

A utilização do agregado no concreto apresenta vantagens técnicas e econômicas. De acordo com Souza (2010) o agregado, do ponto de vista técnico, proporciona maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade em relação a pasta de cimento pura, e, do ponto de vista econômico, reduz o volume ocupado pela pasta, acarretando em redução do custo, pois, o agregado possui um menor custo em comparação com o cimento.

Com a produção do concreto em larga escala, e, conseqüentemente, maior uso de agregados, Rosário (2013) relata que se tem estudado alternativas ambientalmente corretas com o objetivo de atender as demandas da indústria da construção civil, visto que, jazidas naturais de agregados vêm sendo esgotadas. Ademais, a autora destaca que como a seleção do tipo de agregado depende da disponibilidade do local de extração, há uma grande diversidade de outros materiais que podem ser utilizados para a produção do concreto, como exemplo, tem-se que na

região norte do Brasil, o agregado do tipo seixo é o mais utilizado. Outros materiais também vêm sendo estudados e desenvolvidos a fim de produzir um agregado sintético que possua as mesmas propriedades dos agregados naturais, um exemplo é a produção desse agregado a partir do resíduo de bauxita, que é um resíduo produzido em grande quantidade resultante da fabricação de alumina a partir do processo Bayer.

### **2.2.1 Classificação dos agregados**

Os agregados podem ser classificados de acordo com a origem (naturais ou sintéticos), dimensão dos agregados (miúdo ou graúdo) ou densidade aparente (leves, normais ou pesados). Os agregados são classificados em naturais quando já se encontram em sua forma particulada na natureza, como é o caso de areias e cascalhos, e industrializados quando tem sua composição obtida através de processos industriais, por exemplo, a argila expandida e também agregados obtidos a partir de subprodutos industriais (MEHTA & MONTEIRO, 2006, p.254).

De acordo com NBR 7211 (ABNT, 2022), o termo agregado graúdo é utilizado para descrever partículas que passam na peneira de 75mm e são retidas na peneira de 4,75 mm, e o termo agregado miúdo é usado para partículas que passam na peneira de 4,75 mm e são retidas na peneira de 150  $\mu\text{m}$ . Em relação a classificação quanto a densidade aparente, Mehta & Monteiro (2006, p.254) destacam que, geralmente, agregados que apresentam valores inferiores a 1120 kg/m<sup>3</sup> são denominados leves, os que apresentam valores superiores a 2080 kg/m<sup>3</sup> são denominados pesados, e aqueles que apresentam valores intermediários são denominados normais.

### **2.2.2 Bauxita, alumina e resíduo de bauxita**

O resíduo de bauxita resulta do processo de produção de alumínio, onde há a extração da alumina da bauxita, normalmente pelo processo Bayer. De acordo com Nunn (1998), a deposição deste resíduo tem se tornado um problema para as indústrias produtoras de alumina que utilizam o processo Bayer, pois o mesmo se torna um problema ambiental devido ao elevado volume gerado.

O Instituto Internacional do Alumínio (2022) explana que uma tonelada produzida de alumina gera em torno de 1,2 toneladas de resíduo de bauxita e o Anuário Mineral Brasileiro do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) mostra que o alumínio (bauxita) ocupa o quarto lugar na produção anual de minério bruto no Brasil. Ademais, é o metal não ferroso que apresenta maiores quantidades produzidas anualmente nas usinas de tratamento

(produção beneficiada), das quais o estado do Pará possui a maior produção (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2022).

Quanto à classificação ambiental, a literatura apresenta divergências em relação à classificação do resíduo como um rejeito perigoso. Por exemplo, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) não classifica o resíduo de bauxita como um rejeito perigoso (EPA, 2022), no entanto, de acordo com os requisitos apresentados pela NBR 10004 (ABNT, 2013), o resíduo da bauxita pode ser classificado como um resíduo perigoso de classe I, devido sua alta corrosividade.

O descarte inadequado do resíduo pode acarretar em sérios problemas ambientais como poluição do solo, rios e lençóis freáticos, destruição da flora e fauna, corrosão de equipamentos e aparência desagradável de áreas de armazenamento (YANG & XIAO, 2008). Posto isso, as indústrias de alumínio demonstram grande interesse em se obter um material que possua características atrativas para outras aplicações industriais, pois assim diminuiriam os impactos ambientais e os custos referentes a etapa de armazenamento.

A Figura 18 representa o depósito de resíduos sólidos em Barcarena, Pará, em que a empresa Hydro Alunorte utiliza filtros prensa que reduzem a umidade do resíduo de bauxita e a concentração de soda cáustica no material depositado, possibilitando assim, o empilhamento a seco e depois a compactação no depósito (ALUNORTE, 2023). A empresa ressalta que a combinação do filtro de prensa e empilhamento a seco resulta em uma redução de quatro vezes no espaço necessário para armazenar resíduos, além de apresentar vantagens quanto a maior segurança do depósito, pois o resíduo está seco.

Figura 18 – Depósito de resíduos sólidos em Barcarena, Pará.



Fonte: Alunorte (2023).

### 2.2.2.1 Processo Bayer

O processo Bayer foi patenteado pelo austríaco Karl Joseph Bayer, no fim do século XIX, em 1888. Este processo surgiu com a necessidade de atender a indústria têxtil que utilizava o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como fixador para tingir algodão, entretanto, o processo obteve maior relevância no campo da metalurgia devido a sua combinação com o processo Haal-Hérault, que é um processo eletrolítico de obtenção de alumínio metálico (SANTOS 2019; ROSÁRIO 2013).

Antes de surgir o processo Bayer utilizava-se o processo Le Chantelier, que consiste no aquecimento da bauxita com carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a  $1200^\circ\text{C}$ , remoção dos aluminatos formados com água, precipitação do hidróxido de alumínio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) através da ação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e, finalmente, o hidróxido de alumínio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) formado era filtrado, seco e limpo. Esse método foi substituído devido à redução no custo de produção do óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) proporcionado pelo processo Bayer (HIND *et al.*, 1999).

De acordo com o Instituto Internacional do Alumínio (2022), atualmente, o processo Bayer ocorre a partir do aquecimento da bauxita a temperaturas elevadas ( $280^\circ\text{C}$ ) sob pressão com uma solução de soda cáustica (hidróxido de sódio ou  $\text{NaOH}$ ) para dissolver a alumina como aluminato de sódio, deixando a maior parte dos outros minerais não dissolvidos e formando o principal elemento sólido do resíduo de bauxita. A solução do aluminato de sódio é então filtrada e os cristais de hidróxidos de alumínio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), também chamado de gibbsita ou alumina tri-hidratada, são precipitados em reatores semeados ou precipitadores. A maioria do hidróxido de alumínio produzido é aquecido em cerca de  $1000^\circ\text{C}$  para remover a água de hidratação na gibbsita e produzir a alumina. E como subproduto da produção de alumina tem-se um compilado de minerais em bauxita juntamente com algum licor de processo alcalino. Essa mistura dos minerais com o licor é denominada de resíduo de bauxita.

A Figura 19 apresenta o resumo das etapas do processo Bayer nos dias atuais, que consiste na etapa da digestão com a dissolução dos minerais de alumina com a solução de soda cáustica em temperaturas entre  $108^\circ\text{C}$  a  $280^\circ\text{C}$ ; na etapa da clarificação em que há a separação do licor cáustico Bayer do resíduo de bauxita e o encaminhamento do resíduo para a instalação de armazenamento; na etapa de precipitação que encaminha o licor para reprecipitar a alumina trihidratada; e, por último, na etapa de calcinação, em que a alumina trihidratada é aquecida a  $1000^\circ\text{C}$  para ser convertida em alumina.

Figura 19 – Processo Bayer atualmente.



Fonte: Adaptado de Instituto internacional do Alumínio (2022).

O processo Bayer é utilizado até os dias de hoje, sem mudanças muito significativas, somente a substituição do carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) pelo hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e a utilização de pressão durante a etapa da digestão (HIND *et al.*, 1999).

#### 2.2.2.2 Composição do resíduo de bauxita

Quanto à composição do resíduo de bauxita, McConchie *et al.* (2002) discorrem que está relacionada com a natureza da bauxita e com a técnica empregada no processo Bayer. Os autores ressaltam que o resíduo, normalmente, retém o ferro (Fe), titânio (Ti) e silício (Si) presentes na bauxita, bem como o alumínio (Al) não extraído no refino, combinado com o sódio (Na) sob a forma de silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica. Pradhan *et al.* (1996) acrescentam que outros elementos podem estar presentes como elementos vestigiais como o óxido de vanádio (V), gálio (Ga), fósforo (P), manganês (Mn), magnésio (Mg), zinco (Zn), tório (Th), cromo (Cr), nióbio (Nb). A Tabela 1 corresponde a composição química do resíduo de bauxita em diferentes locais de extração com % em peso, sendo o óxido de ferro e óxido de alumínio os componentes com maiores quantidades.

Tabela 1 – Composição química do resíduo da bauxita em diferentes locais de extração com % em peso.

Referência	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	País
Ascensão <i>et al.</i> (2017)	52,25	14,63	5,67	9,41	4,82	1,88	0,08	0,08	Portugal
Díaz <i>et al.</i> (2004)	37	12	-	20	5	6	-	-	Espanha
Freitas (2003)	46,60	14,36	16,57	4,34	2,43	2,62	0,08	-	Brasil
Hildebrando (1998)	38	19	19,90	3,83	8,58	0,87	0,04	0,12	Brasil

Tabela 1 – Composição química do resíduo da bauxita em diferentes locais de extração com % em peso (Continuação).

Referência	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	País
Li <i>et al.</i> (2014)	48,2	7,3	8,4	1,4	1,4	0,9	-	-	China (Sul)
Santos (2019)	34	22	18,8	5	9	1,30	-	-	Brasil

**Nota:** Óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>); dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>); óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O); óxido de cálcio (CaO); óxido de magnésio (MgO); óxido de potássio (K<sub>2</sub>O).

Fonte: Autoria própria (2024).

O Instituto Internacional do Alumínio (2022), corroborando com os autores citados, apresenta que os principais elementos metálicos no resíduo de bauxita são o ferro, titânio, silício, alumínio, sódio e cálcio. Destaca-se que a hematita de óxido de ferro dá ao resíduo sua cor vermelha, por isso, o mesmo era chamado de lama vermelha. Na Tabela 2 tem-se as seguintes faixas da composição química do resíduo de bauxita de acordo com o Instituto Internacional do Alumínio.

Tabela 2 – Faixa de composição química do resíduo de bauxita em porcentagem.

Componente	Faixa típica (%)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-30
TiO <sub>2</sub>	0.3-15
CaO	2-14
SiO <sub>2</sub>	3-50
Na <sub>2</sub> O	1-10

Fonte: Adaptado de Instituto Internacional do Alumínio (2022).

O Instituto também destaca que alguns dos elementos podem permanecer não dissolvidos ou inalterados através do processo Bayer e como parte do resíduo de bauxita, outros podem ser solúveis no licor do processo, se acumulando no licor ou precipitando, dependendo das condições de processamento alguns elementos serão menos ou mais extraídos do licor ou transformados no resíduo.



### **2.2.3 Principais características do agregado graúdo**

Segundo Mehta & Monteiro (2006, p. 267), as propriedades do agregado influenciam tanto na proporção da mistura de concreto, como no comportamento do concreto fresco e endurecido. Por isso, os autores dividem o estudo das propriedades dos agregados em três categorias: características que dependem de fatores de processamento (tamanho, forma e textura); características que dependem da porosidade (densidade, absorção de umidade, resistência, módulo de elasticidade); e, características que dependem da composição química e mineralógica (resistência, dureza, módulo de elasticidade e presença de substâncias deletérias).

Souza (2010) explana que as características referentes ao tamanho, forma e textura do agregado influenciam no modo como acontece a acomodação do agregado na mistura lançada, bem como na interação entre o agregado e a pasta de cimento. Ademais, o autor ressalta que a compactidade, que se refere ao grau de empacotamento e está relacionado com a distribuição granulométrica, ou seja, diz respeito ao volume de vazios, é um dos fatores que determina a resistência do concreto.

Mehta & Monteiro (2006, p. 276) relatam que a textura superficial do agregado influencia a aderência do agregado à pasta de cimento, ou seja, uma textura mais áspera acarreta em maiores forças de aderência, e, conseqüentemente, em uma maior resistência mecânica, principalmente à flexão. Para Souza (2010), a resistência mecânica dos agregados é um dos fatores que limita a resistência do concreto. Os agregados devem apresentar resistência significativamente maior que a pretendida para o concreto, porque as tensões na interface das partículas podem ser muito maiores que a tensão nominal aplicada.

De acordo com Souza (2010), a porosidade, permeabilidade e absorção do agregado influenciam o desempenho do concreto pois interferem na aderência entre o agregado e a pasta de cimento, na resistência à abrasão e na estabilidade química. O autor explana que os poros da superfície do agregado influenciam na aderência entre o agregado e a pasta de cimento e, portanto, na resistência mecânica do concreto, ou seja, agregados com partículas polidas podem apresentar menor aderência à pasta de cimento. Quanto à permeabilidade, o autor ressalta que um concreto poroso tem mais chances de ser permeável, e assim está mais suscetível a ataques de agentes externos, e acrescenta que a absorção de água da mistura pelos agregados pode acarretar em um aumento de consistência do concreto fresco, podendo comprometer a trabalhabilidade.

Rosário (2013) acrescenta que a resistência à compressão, a resistência à abrasão e o módulo de elasticidade do agregado são propriedades influenciadas pela porosidade, logo, agregados que possuem estrutura mais porosa apresentam valores de resistência inferior aqueles com estrutura pouco porosa, admitindo a mesma matéria prima e processo de fabricação. As propriedades do concreto no estado fresco também são afetadas pela porosidade e absorção de água do agregado, em que para agregados com altos índices de absorção de água é recomendado a pré-saturação a fim de evitar prejuízos na trabalhabilidade. Em relação as propriedades do concreto no estado endurecido, a elevada absorção de água pelo agregado pode acarretar em retração por secagem e redução da resistência ao fogo, no entanto também pode melhorar as propriedades da zona de transição entre agregado e pasta de cimento.

Vale destacar que, normalmente, os agregados sintéticos possuem peso específico inferior ao agregado natural britado, além de elevada absorção de água. De acordo com Rosário (2013), as características destes agregados são associadas à sua queima em alta temperatura, e, comumente, são considerados três fatores: a matéria prima, o tempo de queima e a conformação cerâmica.

## **2.2.4 Aplicações do resíduo de bauxita**

Com a grande produção de alumina, e, conseqüentemente, geração de resíduo de bauxita, as refinarias têm buscado aproveitar o resíduo, recuperando minerais encontrados nele, ou transformando em novos produtos. Segundo o Instituto Internacional do Alumínio (2022) apesar do volume significativo de resíduo, apenas uma pequena parte é utilizado, já que a maioria das aplicações estudadas são tecnicamente viáveis, mas não economicamente.

De acordo com o Instituto Internacional do Alumínio (2022), o resíduo de bauxita pode ser aplicado como material a granel (recuperação de terras, cobertura de aterro, alteração de solo, base de estrada), extração de valor dos componentes minerais (óxido de ferro, de titânio), materiais de construção civil (tijolos, azulejos, agregado de concreto), e, processado (drenagem, agregado de superfície de estradas).

Muitos estudos estão sendo desenvolvidos em busca de uma utilização sustentável e de larga escala para o resíduo de bauxita, entre eles, destaca-se o estudo de Hildebrando (1998) que confeccionou corpos de prova por prensagem a seco de misturas com 50% de resíduo e 70% de argila, submetendo-os a queima em temperaturas variadas, a fim de determinar as propriedades cerâmicas a partir de comparações com a literatura; Yalçın & Sevinç (2000) realizaram pesquisas sobre a utilização do resíduo de bauxita na produção de revestimentos

cerâmicos; Diaz *et al.* (2004) propuseram a utilização do resíduo de bauxita no tratamento de superfícies com a proteção do aço contra corrosão; Souza (2010) verificou que o resíduo pode ser utilizado na produção de agregados sintéticos para aplicação na construção civil; Oliveira & Rossi (2012) sugeriram para literatura científica a produção de agregados graúdos com resíduo de bauxita para uso em concreto; Rosário (2013) estudou a viabilidade da produção de concreto apropriado para a construção civil por meio de agregados sintéticos obtido a partir do resíduo de bauxita; e, Santos (2019) estudou sobre a influência da sílica nas propriedades mecânicas e físicas dos agregados produzidos através do resíduo.

A aplicação do resíduo do processo Bayer como agregado sintético é uma forma de destinar e reciclar grande parte do resíduo de bauxita que seria estocado em lagoas e sistemas de contenção, acarretando assim, na redução dos impactos ambientais e também na extração de agregados naturais. De acordo com os estudos de Souza, Racanelli & Quaresma (2022), o controle da temperatura para produção do agregado é de suma importância, já que está relacionada com a formação da fase amorfa que é necessária para expansão e redução da densidade do material. Com isso, os autores relatam que é possível produzir agregados com densidades diferentes, sendo possível produzir agregados que substituam a brita ou o seixo, ou agregados leves.

Ribeiro (2022) em seus estudos verificou as características físicas do agregado sintético de resíduo de bauxita produzido no projeto desenvolvido pela empresa Hydro Alunorte em parceria com a Universidade Federal do Pará e realizou dosagem de concreto através do método IPT/EUSP, obtendo como resultado acréscimos na resistência de 11,63% em relação ao concreto de referência realizado com seixo. A autora considera o uso do agregado sintético viável, mas é necessário expandir os estudos para conhecer melhor o efeito do material a longo prazo.

### **2.3 CISALHAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO**

Para Carvalho & Filho (2014, p.114), admitindo uma viga solicitada continuamente até a ruptura e que a resistência à flexão desta viga seja superior à resistência ao cisalhamento, verifica-se que nos níveis iniciais de carga surgem apenas fissuras de flexão e somente em níveis mais avançados de carga surgem as fissuras inclinadas, provenientes das tensões de cisalhamento, produzindo um complexo reajuste de tensões entre concreto e armadura, que podem crescer até chegar à ruptura. Embora seja dada uma descrição simplificada do modo de ruptura de uma viga de cisalhamento, o mecanismo de ruptura pode ocorrer de diferentes

maneiras, dependendo das dimensões do elemento estrutural, do tipo de carga aplicada e das propriedades mecânicas dos materiais envolvidos.

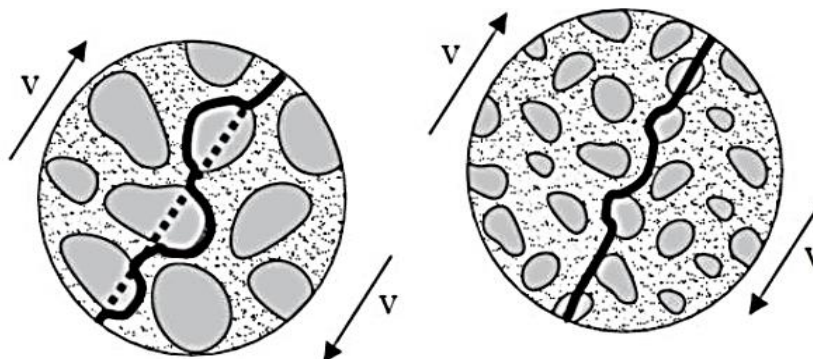
### 2.3.1 Fatores preponderantes para transferência de esforços de cisalhamento em vigas

Sabe-se que, o mecanismo de ruptura por cisalhamento de vigas de concreto armado ainda é pouco compreendido, pois a transferência de forças cortantes é variada, complexa e de difícil mensuração, já que o sistema estrutural segue um padrão não linear com aparecimento de fissuras inclinadas e com uma redistribuição de tensões. Além disso, a transferência de esforços é determinada por diversos fatores induzidos, ponderados diferentemente de acordo com as propriedades mecânicas da viga, seguindo as características do material intrínseco e sua distribuição espacial de agregado graúdo (LIMA, 2019).

Estudos são desenvolvidos isolando os fatores de contribuição de maior preponderância no cisalhamento, entretanto a interação entre eles exige um maior grau de complexidade, dificultando modelos de cálculo mais precisos. Um desses fatores considerados é o engrenamento do agregado graúdo em que, para POLI *et al.* (1992), os engrenamentos do agregado entre as interfaces das fissuras aumentam significativamente a resistência a força cortante, pois ao realizar o estudo referente a vigas de concreto armado e protendido determinou que 33% a 50% da carga última total é proveniente do engrenamento entre interfaces.

Lachemi *et al.* (2005) afirmam que quando há o aumento do diâmetro máximo do agregado graúdo tem-se o aumento da resistência última ao cisalhamento. Da mesma maneira, quando há o aumento da concentração de agregados graúdos na mistura tem-se uma melhora da capacidade resistente última do concreto a esse esforço. Com isso, os autores afirmam que o volume e o diâmetro do agregado interferem no modo de traçado das fissuras. A Figura 20 representa o modo de seccionamento do agregado graúdo.

Figura 20 – Modo de seccionamento do agregado.



Fonte: Adaptado de Lachemi *et al.* (2005).

Wight & Macgregor (2012) relatam que quanto maior o diâmetro do agregado graúdo, maior a rugosidade da superfície da fissura, pois o concreto tende a romper contornando os agregados. Ademais, quanto maior a rugosidade de uma superfície, tensões de cisalhamento mais altas são transferidas pela fissura, acarretando assim no aumento da resistência ao cisalhamento do concreto.

Cladera & Mari (2006) destacam que, desde que o agregado graúdo apresente resistência maior que a argamassa, há um maior engrenamento entre as faces das fissuras, acarretando na ruptura entre a pasta e o agregado. Em contrapartida, nos casos de concreto de alta resistência, quando a resistência da argamassa é superior à resistência do agregado, a ruptura acontece através do agregado, reduzindo o engrenamento. Wight & MacGregor (2012) afirmam que o engrenamento dos agregados apresenta como fator limitante a abertura das fissuras, pois, quando há o aumento da altura da viga, por exemplo, o espaçamento e a abertura da fissura tendem a aumentar, acarretando na diminuição do atrito nas interfaces da fissura e consequentemente na redução do cisalhamento.

O fator referente a ação do pino surge quando fissuras de cisalhamento atravessam a barra longitudinal, provocando esforços perpendiculares ao seu eixo. A interação entre a barra e a matriz provoca deslizamento entre as superfícies, acarretando na redução da rigidez do concreto ao redor da barra, que resulta em fissuras (LIMA, 2019). Para os autores Tassios & Vintzeleou (1990), a ação do pino em uma junta depende do cobrimento da armadura, do diâmetro da barra e do seu comprimento de ancoragem, da qualidade do concreto e da forma de carregamento.

O concreto comprimido não fissurado também proporciona quantidade na resistência ao esforço cortante. Este método de transferência de esforço acontece quando as partes do concreto ainda estão no estágio I, sujeitas a interação de tensões de tração, compressão e esforços cortantes. Lima (2019) relata que essa contribuição é em função da altura da zona comprimida, ou seja, vigas com altura útil pequena e ausentes de forças axial de compressão apresentam menor contribuição desse fator.

### **2.3.2 Vigas sem armadura de cisalhamento**

Wight & Macgregor (2012, p.256) explicam que vigas sem armadura transversal falham logo após a ocorrência da fissura inclinada, sendo a capacidade de cisalhamento de tais barras consideradas igual à da fissura inclinada. A carga de fissuração de uma viga é afetada principalmente pelas variáveis: taxa de armadura longitudinal, tamanho do agregado graúdo,

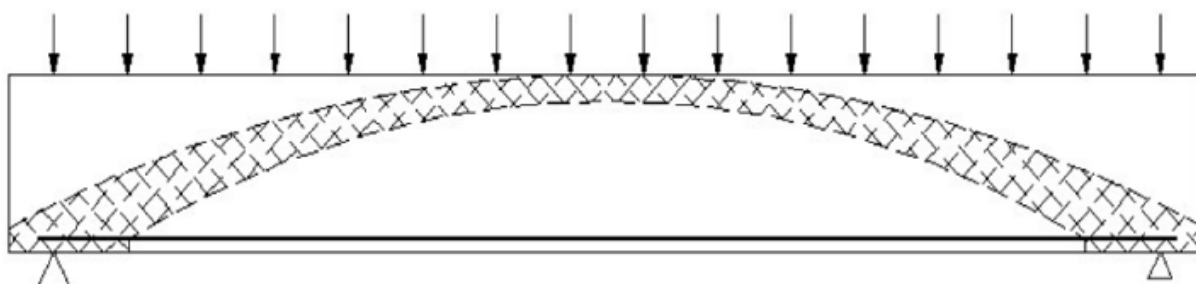
relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil ( $a/d$ ).

Em relação a taxa de armadura longitudinal, os autores explicam que quando a taxa de aço é pequena, as fissuras de flexão se estendem mais para dentro da viga e se abrem mais do que seria o caso para valores maiores da taxa. Esse aumento na largura da fissura acarreta na diminuição dos valores das componentes de cisalhamento, que são transferidos através as trincas inclinadas pela ação de pino ou por tensões de cisalhamento nas superfícies das trincas. Com essa redução na resistência, a viga falha repentinamente por cisalhamento. O tamanho do agregado graúdo também influencia nas tensões de cisalhamento, pois quanto maior o agregado, maior a rugosidade na superfície da fissura e consequentemente maiores valores de tensão de cisalhamento.

A relação entre o vão e a profundidade de cisalhamento ( $a/d$ ) afeta o cisalhamento da fissura inclinada. Wight & Macgregor (2012, p.257) relatam que um aumento na profundidade da viga com pouca ou nenhuma armadura na alma resulta em uma redução no cisalhamento para uma determinada resistência, taxa de armadura e relação  $a/d$ . A largura da fissura depende do produto da deformação da armadura que atravessa a fissura e o espaçamento da fissura. Logo, quando há o aumento da profundidade da viga, o espaçamento e a largura da fissura tendem a aumentar levando a uma redução na tensão de cisalhamento máximo, que pode ser transferida através do intertravamento do agregado.

Além dos aspectos comentados, os autores ressaltam a influência da ação de arco no padrão de comportamento de uma viga, em que, este efeito é identificado quando a resultante de compressão, proveniente da flexão, é transferida quase que diretamente aos apoios, formando um mecanismo semelhante a um arco, que absorve parte do esforço cortante, como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 – Ação de arco.



Fonte: Adaptado de Leonhardt & Möning (1994).

A partir disso, os autores destacam que para vigas com relação  $a/d$  inferior a 1,0, as fissuras inclinadas se formam e se estendem do ponto de apoio até o ponto de aplicação da carga

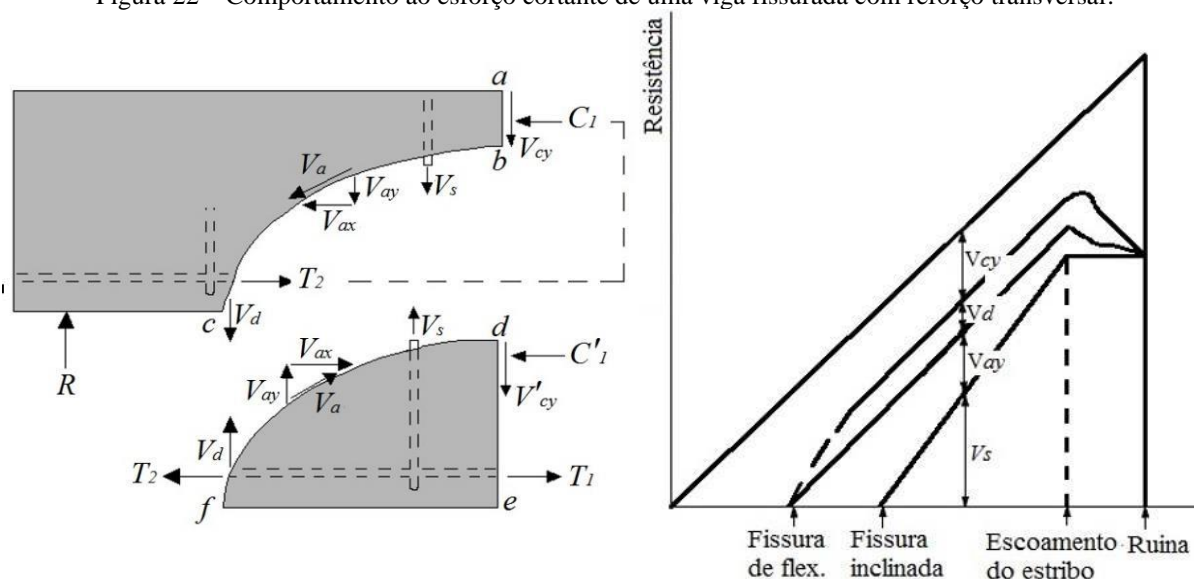
prevalecendo a ação de arco e a ruína por falha na ancoragem da armadura de flexão. Para vigas com relação  $a/d$  entre 1,0 e 2,5, as fissuras inclinadas se formam, mas após a redistribuição das forças internas a viga apresenta capacidade de receber carregamento adicional devido, em parte, à ação de arco. Nestas condições, a fissura inclinada se propaga mais que as fissuras de flexão, logo, prevalecem a ruína por cisalhamento. Para valores desta relação entre 2,5 e 6,5, a fissura inclinada impede a redistribuição das forças internas ao ponto da ruína acontecer no momento da sua formação. E para valores superiores a 6,5, a ruína por flexão ocorre antes da formação da fissura inclinada se a viga for reforçada transversalmente, caso contrário, a fissura inclinada causa a ruína imediata da viga por cisalhamento.

### **2.3.3 Vigas com armadura de cisalhamento**

Wight & Macgregor (2012, p.259) relatam que a armadura de cisalhamento atua como reforço após o surgimento da fissura inclinada, não impedindo a sua formação. Desta forma, na Figura 22-a é possível observar as principais forças internas que se desenvolvem ao longo de uma fissura inclinada em uma viga com estribos onde  $V_{cy}$  corresponde ao esforço cortante transferido na zona comprimida,  $V_d$  é a componente do esforço cortante devido ao engrenamento dos agregados, em que  $V_{ax}$  e  $V_{ay}$  são as componentes horizontal e vertical, respectivamente,  $V_d$  é a parcela do esforço cortante referente ao efeito de pino proporcionado pelas armaduras de flexão e a componente  $V_s$  corresponde ao esforço cortante transferido pela armadura de cisalhamento.

Na Figura 22-b é possível observar que antes da formação da fissura de flexão, o esforço cortante é transferido somente pelo concreto não fissurado ( $V_{cy}$ ). Com o aumento do carregamento e o surgimento das fissuras, o esforço cortante é resistido pela parcela correspondente ao esforço cortante transferido na zona comprimida ( $V_{cy}$ ), pela parcela devido ao engrenamento dos agregados ( $V_{ay}$ ) e pela parcela referente ao efeito de pino ( $V_d$ ), ressaltando que a armadura de cisalhamento só atua como reforço após a formação da fissura inclinada. Em maiores solicitações, é possível verificar a armadura de cisalhamento escoando ( $V_s$ ). Com este escoamento, há o aumento da abertura da fissura, restringindo assim, a contribuição da parcela referente ao engrenamento do agregado e aumentando a contribuição das parcelas referente ao efeito de pino e esforço cortante transferido na zona comprimida.

Figura 22 – Comportamento ao esforço cortante de uma viga fissurada com reforço transversal.



a) Transferência das forças internas

b) Relação resistência-solicitação ao cisalhamento

Fonte: Adaptado de Wight & Macgregor (2012).

Vale ressaltar que a componente  $V_s$  apresenta comportamento dúctil, e as componentes  $V_{cy}$ ,  $V_d$  e  $V_{ay}$  apresentam comportamento frágil, dificultando assim a estimativa de suas contribuições acarretando em simplificações na maioria das propostas de cálculo, onde atribuem as contribuições de  $V_{cy}$ ,  $V_d$  e  $V_{ay}$  à contribuição do concreto ( $V_c$ ) (GOMES, 2016).

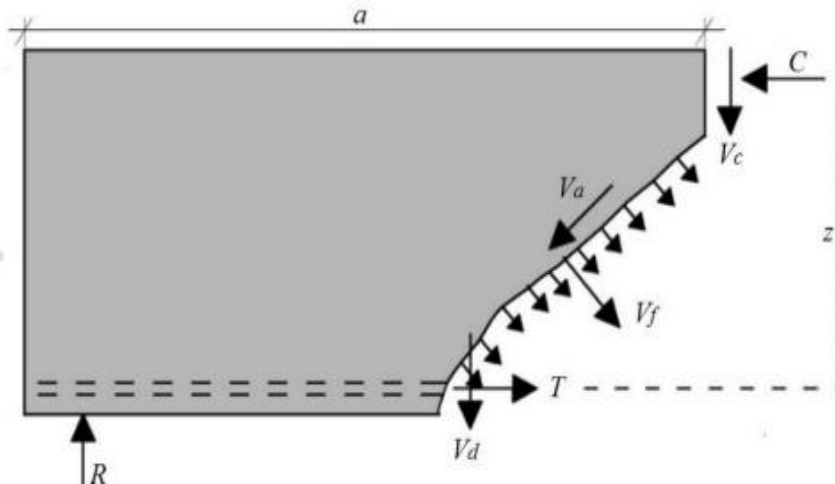
### 2.3.4 Vigas reforçadas com fibras

Para os casos de vigas reforçadas com fibras de aço, Wight & Macgregor (2012, p.261) relatam que as fibras aumentam a capacidade de cisalhamento, pois resultam em um acréscimo da parcela de engrenamento do agregado por garantir uma resistência à tração do concreto ao longo da fissura. Os autores destacam também que o uso das fibras acarreta na formação de múltiplas fissuras e uma falha de cisalhamento menos brusca.

Lim & Oh (1999) explicam que os esforços cisalhantes para uma viga simplesmente apoiada de concreto reforçada com fibras são transmitidos através das parcelas de efeito do concreto não fissurado da região comprimida ( $V_c$ ), efeito do engrenamento entre os agregados ao longo da fissura diagonal ( $V_a$ ), efeito de pino da armadura longitudinal que atravessa a fissura ( $V_d$ ) e componentes verticais da força de arrancamento das fibras ao longo da fissura inclinada ( $V_f$ ), como pode ser observado na Figura 23.



Figura 23 – Componentes principais de uma viga fissurada sem reforço transversal com fibras de aço.



Fonte: Adaptado de Lim & Oh (1999).

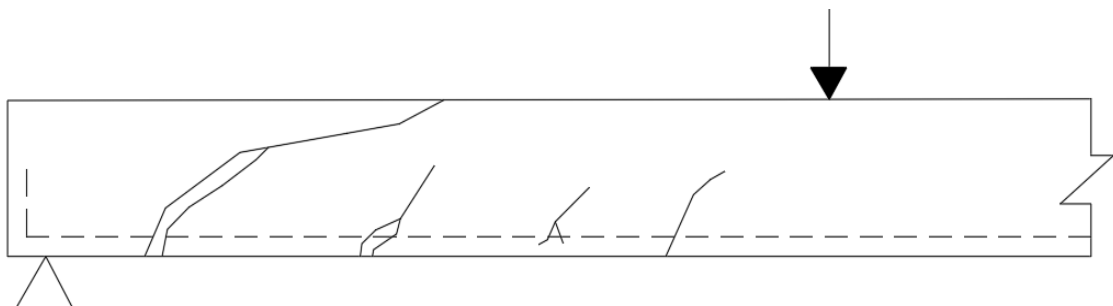
### 2.3.5 Modos de falha no cisalhamento

O esforço de cisalhamento tende a produzir uma falha por deslizamento ao longo de um plano paralelo a direção da força, e quando a capacidade resistente ao cisalhamento é inferior a resistência a flexão tem-se a falha por cisalhamento que é um tipo de falha frágil, ou seja, não fornece aviso. Fusco (2008) define os modos de ruptura como as diferentes formas que pode ocorrer a ruptura física do elemento estrutural. Para vigas de concreto armado submetidas a forças cortantes, o autor classifica a ruptura em três casos: ruptura na ausência de armaduras transversais eficazes, ruptura na presença de armaduras transversais eficazes e ruptura por deficiência das ancoragens.

#### 2.3.5.1 Ruptura na ausência de armaduras transversais eficazes

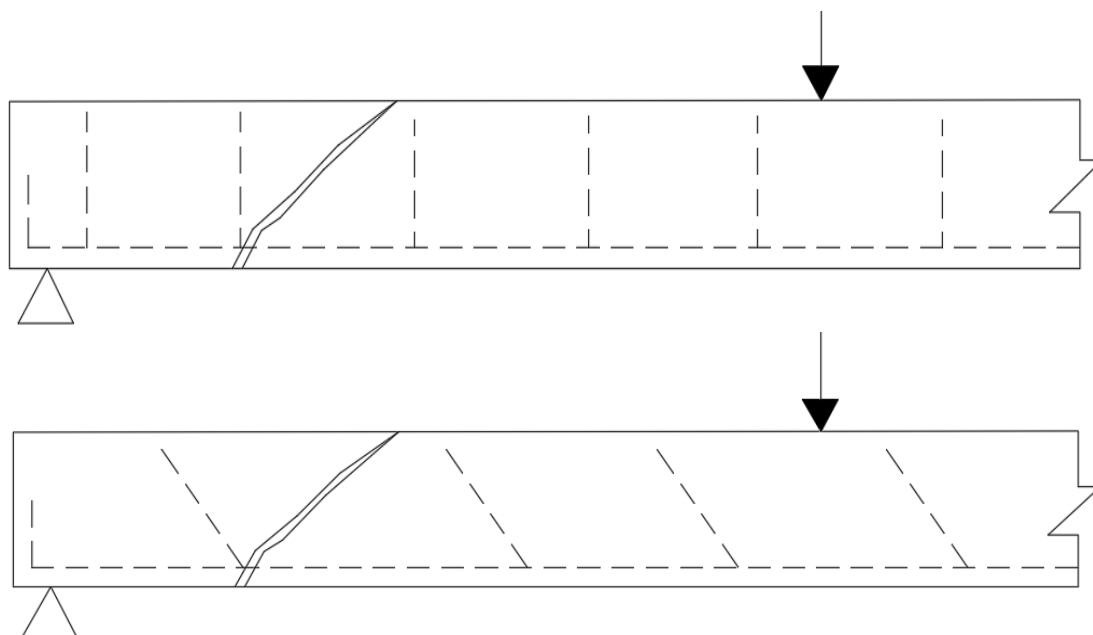
Para este modo de ruptura, Fusco (2008) destaca dois casos: Ruptura das peças sem armadura transversal e ruptura das peças com espaçamento excessivo das barras da armadura transversal (estribos verticais e estribos inclinados), como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Modos de ruptura na ausência de armaduras transversais eficazes



a) Ruptura do elemento sem armadura transversal.

Figura 24 – Modos de ruptura na ausência de armaduras transversais eficazes (Continuação).



b) Ruptura dos elementos com espaçamento excessivo da armadura transversal (Estribos verticais e inclinados).  
Fonte: Adaptado de Fusco (2008).

O autor explica que, para o primeiro caso (Figura 24-a), a falta de uma armadura transversal, que intercepte a superfície de ruptura, faz com que a resistência do elemento dependa apenas da resistência à tração do concreto e de outras resistências conferidas à estrutura interna. Ou seja, nesse caso a segurança do elemento estrutural depende de outros comportamentos de resistência que não o da treliça. Quando o modo de ruptura é devido a espaçamentos excessivos na armadura transversal (Figura 24-b), tem-se que a estrutura apresenta defeito em sua disposição. Sendo assim, para garantir a segurança do elemento, é necessário respeitar os afastamentos máximos permitidos a fim de que a armadura possa trabalhar efetivamente.

#### 2.3.5.2 Ruptura na presença de armaduras transversais eficazes

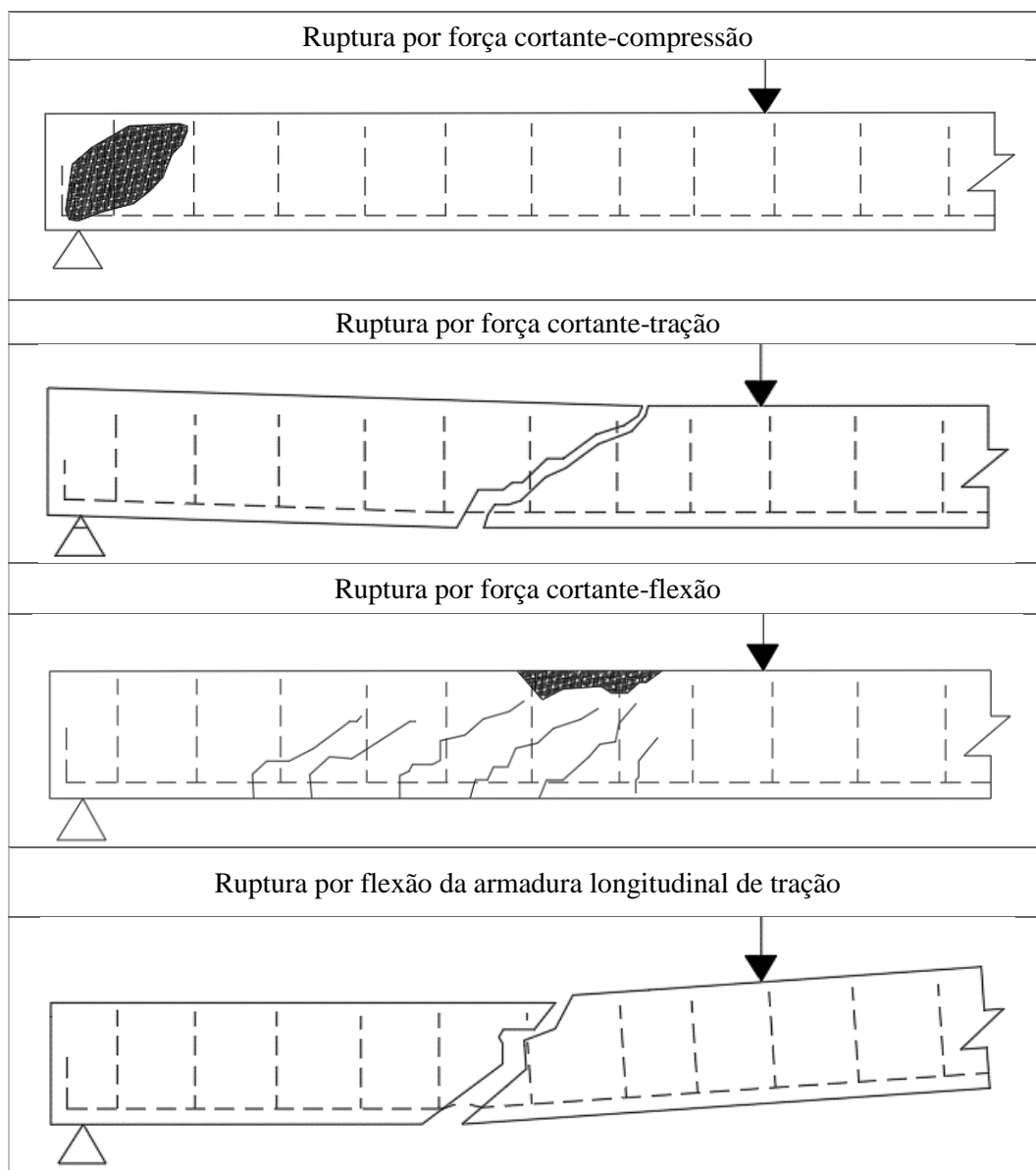
Os modos de ruptura podem ocorrer mesmo com a resistência de armaduras transversais eficazes podendo ser classificados em ruptura por força cortante-compressão, força cortante-tração, força cortante-flexão, flexão da armadura longitudinal (FUSCO, 2008).

A ruptura por força cortante-compressão acontece quando há o esmagamento das bielas de concreto antes que a armadura transversal escoe (superarmada). A ruptura para este caso é frágil, sem aviso, e a segurança é garantida desde que haja a limitação da tensão tangencial em relação a tensão última. A ruptura por força cortante-tração ocorre quando a armadura transversal atinge o escoamento (subarmada). Nesse tipo de ruptura ocorre deformações na

armadura transversal e fissuras excessivas. Ademais, a segurança é garantida com a quantidade suficiente de armadura transversal.

Já a ruptura por força cortante-flexão ocorre, geralmente, em seções próximas a elevadas forças concentradas, quando as fissuras diagonais de cisalhamento cortam uma região do banzo comprimido. A segurança para este tipo de ruptura é garantida através do correto dimensionamento e detalhamento da viga à flexão. E a ruptura por flexão da armadura longitudinal acontece quando as bielas de concreto provocam tensões de flexão elevadas nas armaduras longitudinais impedindo o funcionamento como treliça, sendo assim, a segurança pode ser garantida verificando os critérios de disposição das armaduras. O Quadro 1 apresenta os modos de ruptura na presença de armaduras transversais eficazes.

Quadro 1 – Modos de ruptura na presença de armaduras transversais eficazes.



Fonte: Adaptado de Fusco (2008).

### 2.3.5.3 Ruptura por deficiência das ancoragens

As armaduras tendem a escorregar em relação ao concreto, aparecendo assim tensões longitudinais de cisalhamento na interface dos dois materiais. Tais tensões podem acarretar no fendilhamento longitudinal do concreto, implicando no desligamento dos materiais, ou seja, no desaparecimento do funcionamento em conjunto do aço e do concreto (FUSCO, 2008).

## 2.4 TRABALHOS REALIZADOS SOBRE O COMPORTAMENTO DE VIGAS AO CISALHAMENTO COM REFORÇO DE FIBRA DE AÇO

### 2.4.1 ARAÚJO *et al.* (2014)

Este estudo analisou o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras de aço sem e com a presença de armadura de cisalhamento.

O programa experimental consistiu na produção de seis vigas com as mesmas dimensões, sendo 150 mm de largura, 390 mm de altura e 2600 mm de comprimento, submetidas à carga de cisalhamento ( $\rho_w$ ) e ensaiadas até a ruptura. Para este estudo a taxa de armadura de cisalhamento foi igual a 0,21%, a taxa de armadura longitudinal ( $\rho_l$ ) para todas vigas foi de 3,05%, e o teor de fibra ( $v_f$ ) variou de 1,0% e 2,0%. Ademais, as vigas foram simplesmente apoiadas e submetidas à quatro pontos de carga, em que a distância entre os pontos de carregamento foi mantida constante e igual a 500 mm, resultando em uma relação entre o vão de cisalhamento e altura útil igual a 2,5. Na Tabela 3 é possível observar as propriedades e nomeação das vigas ensaiadas.

Tabela 3 – Propriedades das vigas ensaiadas.

Viga	$v_f$ (%)	$\rho_w$ (%)
V-0-0,21	0,0	0,21
V-1-0,21	1,0	0,21
V-2-0,21	2,0	0,21
V-0-0	0,0	0,0
V-1-0	1,0	0,0
V-2-0	2,0	0,0

Fonte: Adaptado de Araújo *et al.* (2014).

O resultado deste estudo demonstrou que as fibras de aço são eficazes em aumentar a resistência ao cisalhamento do concreto, pois com a adição de 1,0% e 2,0% de teor de fibra nas vigas sem estribos aumentou a resistência ao cisalhamento em 51% e 68%, respectivamente,

em relação a viga de referência. E as vigas com estribos e teor de fibra de 1,0% apresentou uma resistência 20% maior que a da viga de concreto simples com estribos. A utilização de 2,0% no teor de fibras combinado com estribos na viga de concreto armado (V-2-0,21) provocou mudança no modo de ruptura, de cisalhamento para flexão. Na Tabela 4, é possível observar os resultados das vigas ensaiadas pelos autores.

Tabela 4 – Resultados obtidos das vigas ensaiadas.

<b>Viga</b>	<b><math>f_c</math> (MPa)</b>	<b><math>V_u</math> (kN)</b>	<b><math>V_{crit}</math> (kN)</b>	<b><math>\omega_{max}</math> (mm)</b>	<b>Modo de ruptura</b>
<b>V-0-0</b>	46,30	172,5	75	2,37	Cortante
<b>V-0-0,21</b>	47,23	228,5	95	1,62	Cortante
<b>V-1-0</b>	58,87	260,0	120	1,55	Cortante
<b>V-1-0,21</b>	52,89	275,5	110	1,37	Cortante
<b>V-2-0</b>	51,67	290,5	125	1,85	Cortante
<b>V-2-0,21</b>	57,89	360,0	190	0,90	Flexão

Fonte: Adaptado de Araújo *et al.* (2014).

Sendo que,  $f_c$  é a resistência à compressão;  $V_u$  é a resistência ao cisalhamento ( $V_u = V/2$ ), onde  $V$  é a carga máxima medida pela célula de carga;  $V_{crit}$  é a força de cisalhamento na qual ocorre a abertura da trinca;  $\omega_{max}$  é a abertura máxima da fissura medida pelo transdutor.

#### 2.4.2 VITOR *et al.* (2017)

Os autores avaliaram o cisalhamento em vigas de CRFA sem a armadura transversal no vão de cisalhamento com a finalidade de compreender a influência do teor de fibras, taxa de armadura longitudinal, resistência à compressão do concreto no modo de ruína e a resistência da viga ao cisalhamento.

O programa experimental consistiu em doze vigas com as mesmas dimensões, sendo 2400 mm de comprimento, 150 mm de largura e 300 mm de altura. As vigas foram divididas em duas séries, onde a primeira, denominada S20, foi composta de seis vigas moldadas com concreto de resistência à compressão de 20 MPa e, a segunda, denominada S40, foi composta de seis vigas moldadas com concreto de resistência à compressão de 40 MPa.

Os autores utilizaram três teores de fibras para ambas as séries, sendo 0%, 0,64% e 0,77%. Além disso, foi utilizado duas taxas de armaduras longitudinais, sendo 1,32% (4 barras de 12,5mm) e 1,5% (3 barras de 16mm). Para a taxa de armadura longitudinal de 1,32% foi

utilizado uma relação  $a/d$  de 2,83, e para a taxa de armadura longitudinal de 1,5% foi utilizado uma relação  $a/d$  de 2,67. O vão de cisalhamento para todas as vigas foi igual a 700 mm.

O ensaio de flexão em quatro pontos foi monitorado através do uso de extensômetros elétricos e do LVDT. Os extensômetros tem como finalidade medir as deformações específicas nas armaduras e no concreto e o LVDT mede os deslocamentos verticais.

Na Tabela 5, é possível observar as propriedades e resultados das vigas ensaiadas pelos autores neste programa experimental, bem como os resultados.

Tabela 5 – Propriedades e resultados das vigas ensaiadas.

Vigas	$d$ (mm)	$\rho_l$ (%)	$f_c$ (MPa)	$P_u$ (kN)	$V_u$ (kN)	Modo de ruptura
<b>S20A-0</b>	247,5	1,32	23,93	111,0	55,5	Cortante
<b>S20A-0,64</b>	247,5	1,32	22,32	145,0	72,5	Cortante
<b>S20A-0,77</b>	247,5	1,32	24,16	213,0	106,5	Cortante
<b>S20B-0</b>	262,0	1,55	28,54	113,0	56,5	Cortante
<b>S20B-0,64</b>	262,0	1,55	26,92	162,0	81,0	Cortante
<b>S20B-0,77</b>	262,0	1,55	23,76	185,0	92,5	Cortante
<b>S40A-0</b>	262,0	1,32	35,67	120,0	60,0	Cortante
<b>S40A-0,64</b>	247,5	1,32	35,70	210,0	104,5	Flexo-Cortante
<b>S40A-0,77</b>	247,5	1,32	42,43	202,0	101,0	Flexo-Cortante
<b>S40B-0</b>	262,0	1,55	36,29	137,0	68,5	Cortante
<b>S40B-0,64</b>	262,0	1,55	39,38	246,0	123,0	Flexo-Cortante
<b>S40B-0,77</b>	262,0	1,55	37,05	230,0	115,0	Cortante

**Nota:**  $d$  é a altura útil;  $a$  é o vão de cisalhamento;  $\rho_l$  é a taxa de armadura longitudinal;  $f_c$  é a resistência a compressão,  $P_u$  é a força última,  $V_u$  é o cortante último.

Fonte: Adaptado de Vitor *et al.* (2017).

Para as vigas S20A-0,64 e S40A-0,64, os autores verificaram que um aumento de 60% na resistência à compressão foi acompanhado de um aumento de 44% na resistência ao cisalhamento última. Já nas vigas S20B-0,77 e S40B-0,77, o aumento de 56% na resistência à compressão foi acompanhado de um aumento de 24,3% na resistência ao cisalhamento última.

Os autores atribuem esse efeito devido ao aumento da aderência fibra matriz com a elevação da resistência à compressão.

Em suma, o resultado deste estudo demonstrou a capacidade das fibras de melhorar a capacidade resistente ao cisalhamento das vigas mesmo utilizando teores baixos de adição. Além disso, o estudo concluiu que o aumento do teor de fibra resultou no aumento do momento último, do deslocamento último e da ductilidade. O padrão de fissuração das vigas com adição de fibras apresentou um maior número de fissuras diagonais e de flexão, sendo um padrão mais favorável a segurança. Na Figura 25 é apresentado a alteração do padrão de fissuração com o aumento do teor de fibras nas vigas da série 40.

Figura 25 – Alteração do padrão de fissuração com o aumento do teor de fibras nas vigas S40.



Fonte: Vitor *et al.* (2017).

### 2.4.3 DEBELLA *et al.* (2023)

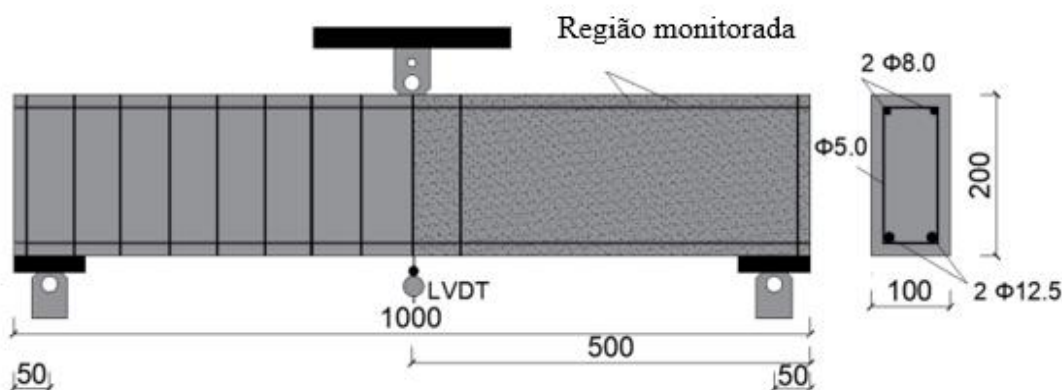
Este trabalho consistiu em avaliar a contribuição do engrenamento dos agregados ao longo do processo de formação das fissuras críticas até a carga última, realizando ensaios de flexão em vigas retangulares de CA e CRFA de pequena escala sem levar em consideração o efeito da armadura transversal.

Para o programa experimental foram produzidas nove vigas retangulares com dimensões iguais a 100 mm de largura, 200 mm de altura e 1000 mm de comprimento, resultando em um vão útil de 900 mm. Das nove vigas, três foram armadas apenas com

vergalhões, e as demais, com vergalhões e fibras de aço. Foi utilizada armadura convencional longitudinal composta por 2 barras com diâmetro de 12,5 mm na parte inferior, resultando em uma taxa de armadura de 1,25%, e, 2 barras com diâmetro de 8,0 mm na parte superior, resultando em uma taxa de armadura de 0,5%.

Além disso, os estribos de 5,0 mm de diâmetro foram utilizados com espaçamento de 60 mm na direção transversal na metade não monitorada da viga a fim de garantir a falha por cisalhamento no lado oposto (Figura 26). O cobrimento nominal das armaduras longitudinal e transversal foi de 15 mm e a relação  $a/d$  igual a 2,58. O teor de fibras de aço com ponta em gancho foi variado entre 0%, 0,5% e 1,0%, que, em volume é igual a 40 kg/m<sup>3</sup> e 80 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Figura 26 – Armadura das vigas - unidades em mm.



Fonte: Adaptado de Debelle *et al.* (2023).

O resultado deste estudo demonstrou que a utilização das fibras de aço aumentou a resistência do material e causou uma mudança no padrão de fissuração, devido à sua capacidade de redistribuir as tensões e alterar os mecanismos de fratura em comparação com o concreto convencional. Os autores destacam que, enquanto o volume de fibras na mistura aumenta, a abertura da trinca crítica ( $\omega_{max}$ ) também aumenta, resultando em uma diminuição na contribuição da parcela do intertravamento do agregado.

Quanto a avaliação do cisalhamento, os autores concluíram que a adição das fibras resultou em uma relação mais baixa entre a força de cisalhamento na qual ocorre a abertura da trinca ( $V_{crit}$ ) e a força máxima resistida pela viga ( $V_{max}$ ), ressaltando assim, a ideia de que as fibras permitem uma redistribuição de tensões, promovendo o desenvolvimento do processo de fissuração. Na Tabela 6 é possível observar os resultados obtidos neste estudo em que as vigas denominadas C0 referem-se as três vigas constituídas apenas com vergalhões, C0.5 são as vigas



que apresentam vergalhões e 0,5% de fibras de aço, e C1.0 apresentam vergalhões e 1.0% de fibras.

Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio das vigas.

Vigas	$f_c$ (MPa)	$V_{max}$ (kN)	$V_{crit}/V_{max}$	$\omega_{max}$ (mm)
<b>C0</b>	31,14	29,9	0,97	0,152
<b>C0.5</b>	35,56	43,3	0,79	0,249
<b>C1.0</b>	39,75	61,3	0,51	0,967

Fonte: Adaptado de Debelle *et al.* (2023).

## 2.5 TRABALHOS REALIZADOS SOBRE O CONCRETO COM AGREGADO SINTÉTICO DE RESÍDUO DE BAUXITA

### 2.5.1 OLIVEIRA & ROSSI (2012)

Este estudo apresentou como finalidade produzir concretos com agregados graúdos com até 80% de RB, 30% de metacaulim e 30% de sílica ativa. Foi realizado ensaios para determinar as propriedades físicas do agregado e avaliar o desempenho mecânico dos concretos. Para a elaboração desta pesquisa o resíduo utilizado veio de uma mineradora localizada próxima a cidade de Belém, no norte do Brasil. Neste trabalho foi adicionada areia de origem quartzosa como agregado miúdo e o seixo rolado foi utilizado como agregado graúdo natural de referência. A Tabela 7 apresenta a proporção das misturas utilizadas para produzir o agregado com RB.

Tabela 7 – Proporção da mistura para produção do agregado graúdo com RB.

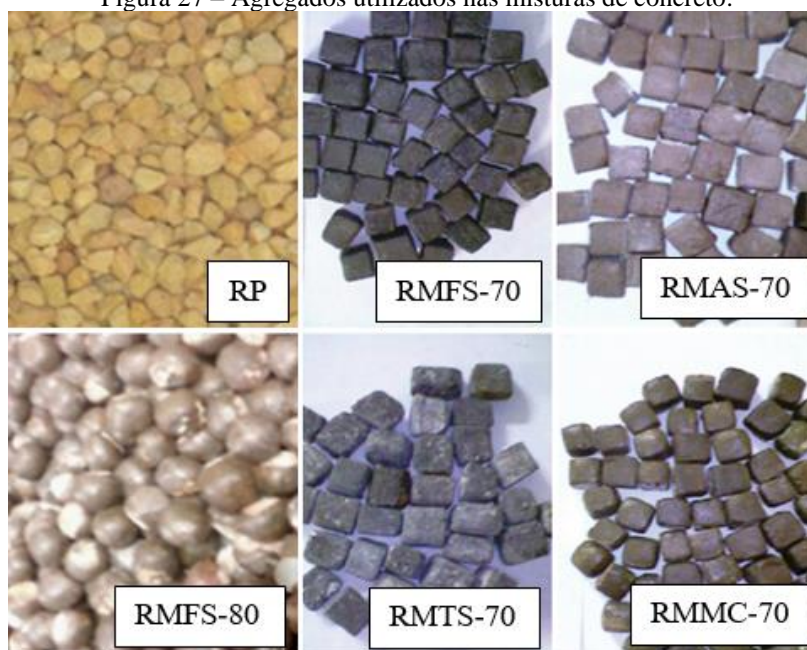
Mistura	Componente (%)				
	Sílica ativa (AS)	Metacaulim (MC)	Areia fina (FS)	Areia grossa (TS)	Resíduo (RM)
<b>RMA70</b>	30	0	0	0	70
<b>RMMC70</b>	0	30	0	0	70
<b>RMFS70</b>	0	0	30	0	70
<b>RMTS70</b>	0	0	0	30	70
<b>RMFS80</b>	0	0	20	0	80

Fonte: Adaptado de Oliveria & Rossi (2012).

Para produzir a mistura de concreto, os autores utilizaram o cimento CP II-Z-32, areia fina lavada e agregados graúdos com RB para comparação com os concretos de referência com

seixo rolado. A resistência prevista para os concretos de referência foi de 25 MPa, com proporção água/cimento (a/c) constante de 0,45 para todas as misturas. Houve a necessidade do aditivo plastificante Glenium 51 na dosagem das amostras RMFS80 e RP19b. A Figura 27 apresenta os agregados utilizados nas misturas e, a Figura 28, o procedimento de mistura e a preparação da amostra cilíndrica.

Figura 27 – Agregados utilizados nas misturas de concreto.



Fonte: Adaptado de Oliveira & Rossi (2012).

Figura 28 – Preparação dos corpos de prova de concreto.



Fonte: Adaptado de Oliveira & Rossi (2012).

Para estabelecer a influência dos agregados nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos, foram realizados ensaios para determinar a densidade, resistência à compressão, o módulo de elasticidade. Os resultados referentes as propriedades dos agregados e do concreto são mostradas nas Tabelas 8 e 9, respectivamente. O menor valor de densidade para os

agregados ( $\gamma_a$ ) foi encontrado para RMAS70 que apresentou a maior absorção ( $abs$ ) de água igual a 3,25%. A maior densidade foi para o RMFS70, apresentando absorção de água de 0,5%. Quanto a classificação conforme a densidade dos agregados ( $\gamma_a$ ) experimentais os agregados RM foram classificados como pesados ( $\gamma_a > 2.080 \text{ kg/m}^3$ ), exceto RMAS70 e RMMC70, classificados como agregados normais ( $1.120 \text{ kg/m}^3 < \gamma_a < 2.080 \text{ kg/m}^3$ ).

Tabela 8 – Propriedades físicas dos agregados graúdos.

Mistura	$\gamma_a \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\mu_a \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$abs \text{ (\%)}$	$\emptyset_{inicial} \text{ (mm)}$	$\emptyset_{final} \text{ (mm)}$
<b>RP19</b>	2.650	1.450	1,00	19.0	19.0
<b>RP9.5</b>	2.660	1.510	1,00	9.5	9.5
<b>RMFS80</b>	2.440	1.410	0,83	20.0	19.0
<b>RMFS70</b>	2.650	1.670	0,50	20.0	19.0
<b>RMTS70</b>	2.160	1.240	1,00	20.0	19.0
<b>RMAS70</b>	1.200	0.690	3,25	20.0	19.0
<b>RMMC70</b>	2.040	1.180	0,25	10.0	9.5

Fonte: Adaptado de Oliveira & Rossi (2012).

Tabela 9 – Densidade do concreto e propriedades mecânicas

Mistura	$\gamma_c \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$E_c \text{ (GPa)}$	$f_c \text{ (MPa)}$
<b>RP19a</b>	2.300	23,6	23,4
<b>RP19b</b>	2.310	20,6	25,9
<b>RP9.5</b>	2.270	24,3	28,2
<b>RMFS80</b>	2.350	38,9	40,3
<b>RMFS70</b>	2.330	30,2	20,0
<b>RMTS70</b>	2.040	25,8	18,2
<b>RMAS70</b>	1.780	19,4	17,2
<b>RMMC70</b>	2.050	29,9	24,1

Fonte: Adaptado de Oliveira & Rossi (2012).

Para os concretos produzidos, o RMAS70 apresentou a menor densidade ( $\gamma_c$ ), com 1.780 kg/m<sup>3</sup>, um resultado esperado já que o agregado também era mais leve. E o maior valor foi encontrado para RMFS80, com 2.350 kg/m<sup>3</sup>, apenas 2% maior que o concreto de referência RP19b. Em relação ao módulo de elasticidade ( $E_c$ ), com exceção do RMAS70, todos os concretos com agregados de resíduo de bauxita apresentaram valores superiores aos de referência. O maior valor foi encontrado para RMFS80 de 38,9 GPa e foi 90% maior que o de RP19b, com a mesma proporção de mistura. As resistências do concreto de referência ficaram próximas do esperado para 28 dias, 25 MPa, e o concreto com amostra de agregado RMFS80 apresentou resistência em torno de 40 MPa, corroborando com o comportamento do módulo de elasticidade.

### **2.5.2 MACHADO (2022)**

Este estudo abordou as características físico-mecânicas e potencial reativo por reação álcali-agregado (RAA) de 3 agregados graúdos sintéticos (AGS 70, AGS 80 e AGS 90), obtidos a partir do RB junto à sílica e argila, baseados nos requisitos normativos exigidos para a utilização em concretos.

O programa experimental foi dividido em etapas, onde a primeira etapa consistiu na obtenção, tratamento prévio, caracterização físico-químico-mineralógica do resíduo de bauxita, assim como a caracterização apenas física dos outros materiais utilizados na pesquisa (cimento, seixo e areia); na segunda etapa aconteceu a produção do agregado graúdo sintético realizando os testes necessários e otimizando misturas; a terceira etapa realizou-se a dosagem e produção do concreto; a quarta etapa consistiu na caracterização dos concretos quanto a resistência mecânica, porosidade e durabilidade; e, na quinta etapa realizou-se a análise dos dados e conclusões.

Neste trabalho, os agregados graúdos sintéticos apresentaram um formato alongado com grande presença de grãos irregulares, devido ao método de conformação do processo produtivo e a superfície externa apresentou textura medianamente áspera com rugosidade acentuada em parte dos grãos. Além disso, o diâmetro máximo característico de todas as amostras produzidas assumiu valor na ordem de 19 mm. A Figura 29 apresenta as amostras dos agregados graúdos sintéticos.

Figura 29 – Amostras dos agregados graúdos sintéticos utilizados.



Fonte: Adaptado de Machado (2022).

O autor elaborou o traço de concreto através do método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT/EPUSP e através de testes notou que o agregado graúdo sintético não se comportava de maneira semelhante ao concreto de referência, sob às mesmas condições, no concreto fresco, sendo necessário realizar ajustes no traço a fim de atender o critério de consistência (abatimento =  $100 \pm 20\text{mm}$ ), aumentando assim o teor de argamassa ( $\alpha$ ) das misturas com agregado sintético, como pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10 – Traço (em massa), teor de argamassa, relação a/c, consistência e teor de agregado graúdo dos concretos produzidos.

ID	Traço unitário (cimento:agregados)	$\alpha$ (%)	a/c	Agregado graúdo (%)		Abatimento (mm)
				Natural	Sint.	
REF	1:5,0	51	0,55	100	0	≈90
AGS 70	1:5,0	55	0,65	0	100	
AGS 80	1:5,0	59	0,65	0	100	
AGS 90	1:5,0	61	0,65	0	100	

Fonte: Adaptado de Machado (2022).

Logo após, os concretos produzidos com estes agregados, em substituição total ao seixo, foram avaliados quanto a resistência à compressão axial ( $f_c$ ), tração por compressão diametral ( $f_{ct,sp}$ ) módulo de elasticidade (E), absorção de água por capilaridade ( $a_{cap}$ ) e à durabilidade a partir da carbonatação acelerada e penetração de cloretos. Os autores obtiveram como resultados que os agregados sintéticos de RB se mostraram condizentes com as especificações técnicas para utilização no concreto estrutural e não desencadearam a RAA. A resistência à compressão axial (28 dias) atingiu valores entre 36-24 MPa; tração e módulo de elasticidade

(E) demonstraram pouca variabilidade. Os concretos com AGS 70 e AGS 80 obtiveram melhor desempenho nas características físico-mecânicas analisadas. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos.

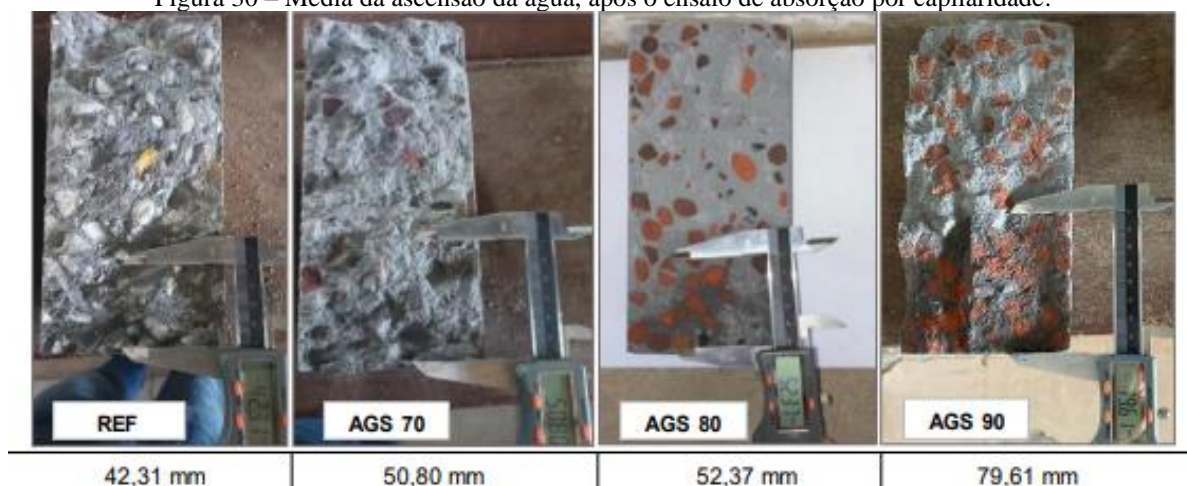
Tabela 11 – Resultados obtidos.

ID	$f_c$	$f_{ct,sp}$	$E_c$	$a_{cap}$
	28 dias (MPa)	28 dias (MPa)	28 dias (GPa)	72h - g/cm <sup>2</sup>
REF	35,29	2,50	21,21	0,52
AGS 70	35,57	2,42	21,65	0,64
AGS 80	26,30	2,45	21,78	0,88
AGS 90	24,60	1,78	17,42	1,17

Fonte: Adaptado de Machado (2022).

Os autores ressaltaram que tanto a absorção por capilaridade quanto a ascensão de água mostraram comportamentos semelhantes ao ocorrido na absorção individual apresentada pelos agregados graúdos (sintéticos e natural), apesar da diferença no teor de argamassa dos concretos analisados. A absorção capilar se mostrou proporcional à tendência linear crescente das absorções de água dos agregados graúdos. Vale salientar também, que os agregados graúdos sintéticos possuíam porosidades distintas devido aos teores diferentes de sílica empregados nas composições, sendo esse fato evidenciado pelos resultados de absorção de água já analisados. A Figura 30 apresenta a média da ascensão de água nos corpos de prova.

Figura 30 – Média da ascensão da água, após o ensaio de absorção por capilaridade.



Fonte: Adaptado de Machado (2022).

A resistência à carbonatação dos concretos contendo o AGS 70 e AGS 80, como base nos referenciais normativos, classificaram-se como baixa e excepcional, respectivamente. Em

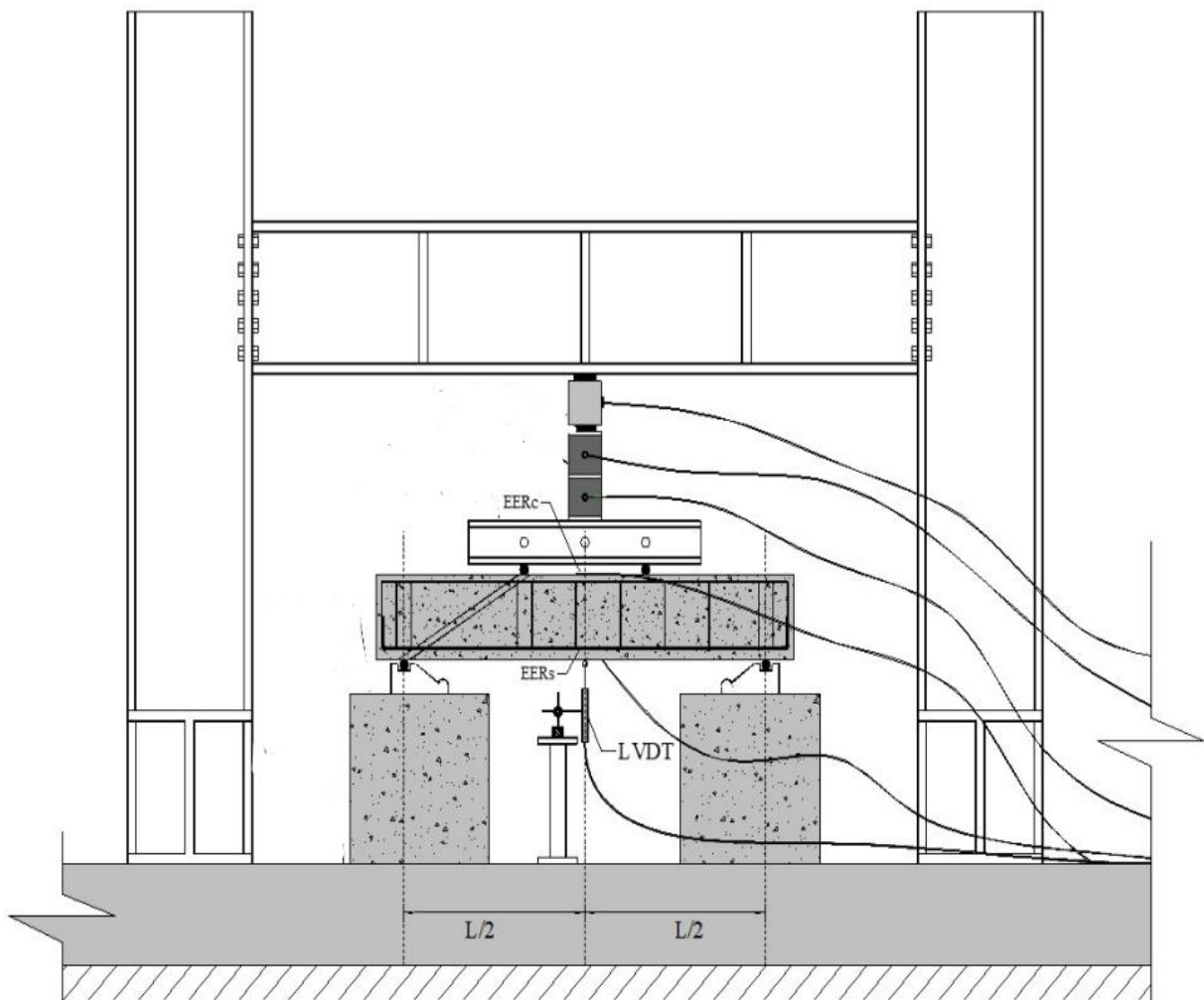


relação à penetração de cloretos, os mesmos foram classificados como resistência moderada (AGS 70 e AGS 80) e baixa (AGS 90) segundo a metodologia utilizada.

### 2.5.3 AMARAL & OLIVEIRA (2023)

Este trabalho apresentou como finalidade realizar o estudo de cisalhamento em vigas de concreto armado com agregado sintético contendo elevados teores do resíduo de bauxita (70%, 80% e 90%) e utilizando frisos para fixação da superfície de ruptura com angulação de 30° e 45°, de acordo com os modelos de cálculo recomendados pela norma brasileira, visando reduzir as influências do efeito de arco na absorção do esforço cortante. O programa experimental consistiu na produção de 4 vigas em que, duas foram produzidas com concreto convencional (brita) e duas vigas com agregado sintético de resíduo de bauxita. As vigas foram testadas sob o sistema de teste de quatro pontos ou esquema de carregamento de Stuttgart (Figura 31).

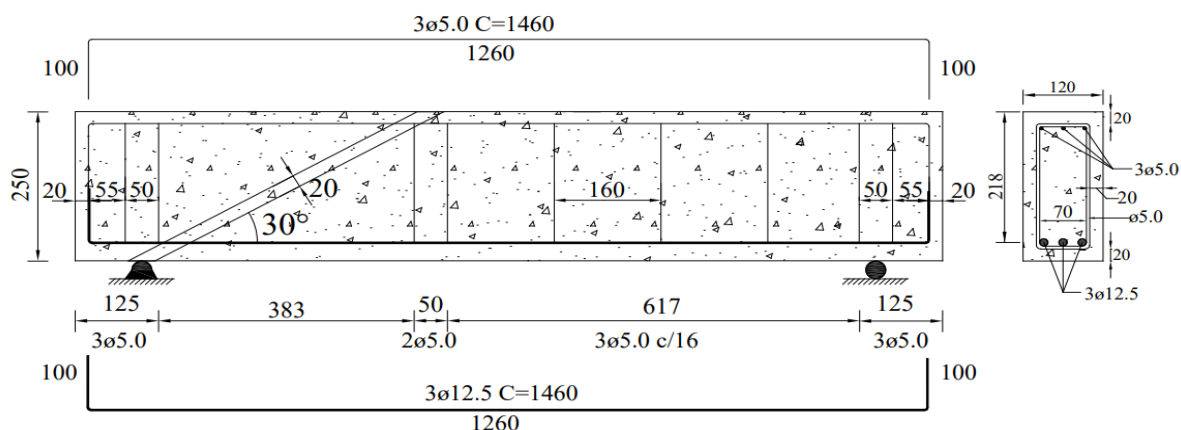
Figura 31 – Sistema de teste em quatro pontos.



Fonte: Amaral & Oliveira (2023).

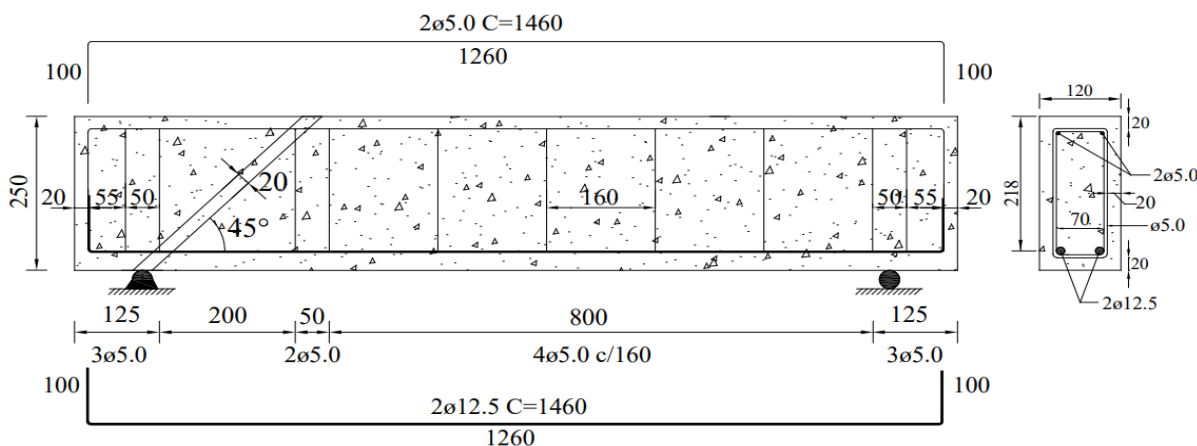
As vigas apresentaram dimensões de 120 mm de largura, 250 mm de altura, 1300 mm de comprimento e 1100 mm de vão livre. As armaduras longitudinais foram projetadas para resistir à flexão e a ruptura por cisalhamento ocorreria antes de ceder ao longo do comprimento do friso (Figuras 32 e 33).

Figura 32 – Vigas com frisos inclinados a 30°.



Fonte: Adaptado de Amaral & Oliveira (2023).

Figura 33 – Vigas com frisos inclinados a 45°.



Fonte: Adaptado de Amaral & Oliveira (2023).

O agregado sintético (AS) foi constituído por três materiais, sendo eles o resíduo de bauxita, a sílica e a argila em que as porcentagens das suas composições podem ser observadas na Tabela 12. O agregado foi produzido pela mistura e queima desses materiais a uma temperatura de 1200°C por um período de 3 horas. Variando as proporções desses materiais, amostras SA-90, SA-80 e SA-70 foram obtidas, cujo objetivo é aumentar a escala de produção de agregados sintéticos e, consequentemente, o consumo de resíduo de bauxita.



Tabela 12 – Propriedades do agregado graúdo sintético (70%, 80% e 90% de RB).

<b>Amostra</b>	<b>RB (%)</b>	<b>Sílica (%)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Peso específico (g/cm³)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tempo (h)</b>
<b>AS-90</b>	95-90	0-5	5	>2,0	1200	3
<b>AS-80</b>	85-80	10-15	5	>1,5 e 2,0<	1200	3
<b>AS-70</b>	75-70	20-25	5	<1,5	1200	3

Fonte: Adaptado de Amaral & Oliveira (2023).

A composição química do RB foi fornecida pela HYDRO Alunorte. É importante ressaltar que a toxicidade do agregado sintético não foi avaliada. A composição definitiva de agregado sintético graúdo mostra que o material é composto essencialmente por ferro (37%), alumínio (16%) e silício (29%), mostrando que o agregado detém as principais proporções de RB. A lista de materiais para a dosagem do concreto seguiu a proporção [1:1,5:2,5:0,4], tanto para o concreto convencional como para concreto com agregado sintético, e ambos os concretos atingiram trabalhabilidade semelhante, permitindo a concretagem em situações usuais.

O desempenho mecânico de vigas de concreto com agregado sintético apresentou resultados satisfatórios em termos de cisalhamento. As vigas convencionais de concreto apresentaram resultados superiores a 8% e 11% para vigas com frisos a 30° e 45°, respectivamente. O concreto convencional apresentou maiores valores de resistência à compressão. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos em que  $\rho_l$  é a taxa de armadura longitudinal,  $f_c$  é a resistência à compressão do concreto,  $P_u$  é a carga útil,  $P_{flex}$  é a carga de escoamento da armadura de flexão  $\delta$  é a flecha,  $\delta_{lim}$  é a flecha limite de acordo com os critérios de aceitabilidade sensorial da normativa brasileira igual a  $l/250$ .

Tabela 13 – Resultados obtidos no ensaio das vigas.

<b>Viga</b>	<b><math>\rho_l</math> (%)</b>	<b><math>f_c</math> (MPa)</b>	<b><math>P_u</math> (kN)</b>	<b><math>P_{flex}</math> (kN)</b>	<b><math>P_{flex}/P_u</math></b>	<b><math>\delta</math> (mm)</b>	<b><math>\delta_{lim}=l/250</math> (mm)</b>
<b>B30C</b>	1,4	47,4	89,4	162,8	1,81	2,5	4,4
<b>B30S</b>	1,4	41,3	81,7	161,4	1,97	3,8	4,4
<b>B45C</b>	0,9	47,4	156,9	196,8	1,25	4,3	4,4
<b>B45S</b>	0,9	41,3	139,1	194,4	1,38	5,3	4,4

Fonte: Adaptado de Amaral & Oliveira (2023).

Os autores verificaram que as vigas com friso inclinado de 30° resistiram menos que as de friso de 45°, evidenciando a contribuição do intertravamento do agregado, onde foi observado experimentalmente que quanto maior a razão  $a/d$ , menor a inclinação da biela e menor a contribuição devido ao intertravamento dos agregados na resistência das vigas. Além disso, as falhas das vigas deste estudo ocorreram por cisalhamento na falha pré-determinada de 30° e 45°, ressaltando assim, que a utilização de frisos para induzir a ruptura por cisalhamento se mostrou eficiente.

## **2.6 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS**

Nesta seção serão apresentadas as prescrições da resistência ao cisalhamento divididas em duas partes, em que, na primeira será abordado os códigos de projeto referentes ao concreto convencional e, na segunda, os códigos de projeto referentes ao concreto reforçado com fibras de aço.

### **2.6.1 Estruturas de concreto armado convencional**

#### **2.6.1.1 NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento (ABNT, 2023)**

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023), os estribos podem ser as armaduras designadas para resistir aos esforços de tração provocados pelos esforços cortantes. Este código tem como base, para o dimensionamento ao esforço cortante, a analogia da viga fissurada como uma treliça de Ritter-Mörsch.

Para o dimensionamento da armadura transversal a norma prever dois modelos de cálculo, em que o modelo I admite a hipótese da treliça clássica, com ângulo de inclinação das bielas de compressão, ou seja, o ângulo das diagonais de compressão, fixado em 45° em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, e, o modelo II admite o ângulo de inclinação das bielas de compressão variando livremente entre 30° e 45°. Ademais, em ambos os modelos se admite uma parcela de força cortante complementar ( $V_c$ ). Tal parcela é uma componente difícil de quantificar, utilizando assim, valores empíricos. Ademais, os principais mecanismos que geram essa parcela são o efeito do pino da armadura longitudinal, o engrenamento dos agregados e o banzo de concreto comprimido.

A resistência do elemento estrutural, em uma determinada seção transversal, deve ser considerada satisfatória, quando verificadas simultaneamente as condições apresentadas nas equações 2 e 3.

$$V_{sd} \leq V_{Rd2} \quad (2)$$

$$V_{sd} \leq V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (3)$$

Em que,  $V_{sd}$  é a força cortante solicitante de cálculo,  $V_{Rd2}$  é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de cálculo (modelo I ou modelo II);  $V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$  é a força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal;  $V_c$  é a parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares da treliça;  $V_{sw}$  é a parcela resistida pela armadura transversal.

#### 2.6.1.1.1 Modelo de cálculo I ( $\theta = 45^\circ$ )

O modelo de cálculo I, explanado no item 17.4.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2023), admite o ângulo de inclinação das bielas de compressão fixado em  $45^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural e também admite que a parcela complementar  $V_c$  tenha valor constante, independentemente da força cortante solicitante ( $V_{sd}$ ).

A primeira etapa para proceder o dimensionamento consiste em realizar a verificação quanto a compressão diagonal do concreto. Sendo assim, deve-se realizar o cálculo da força cortante resistente de cálculo de acordo com a Equação 4.

$$V_{Rd2} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \quad (4)$$

Onde,  $f_{ck}$  é a resistência à compressão característica expressa em megapascal (MPa),  $b_w$  é a menor largura da seção,  $d$  é a altura útil da seção.

Posteriormente, realiza-se o cálculo das diagonais tracionadas ( $V_{Rd3}$ ) que considera as contribuições do concreto e da armadura,  $V_c$  e  $V_{sw}$ , respectivamente (Equação 5).

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (5)$$

Onde o cálculo de  $V_{sw}$  corresponde a Equação 6.

$$V_{sw} = \left(\frac{A_{sw}}{s}\right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\text{sen}\alpha + \text{cos}\alpha) \quad (6)$$

Em que,  $f_{ywd}$  corresponde a tensão na armadura transversal, limitada ao valor de  $f_{yd}$  para o caso de estribos e 70% desse valor no caso de barras dobradas, não se tomando, para ambos os casos valores superiores a 435 MPa e  $\alpha$  é o ângulo de inclinação da armadura transversal em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural.

Para os casos de flexão simples e flexo-tração com a linha neutra cortando a seção, a parcela  $V_c$  é igual a Equação 7.

$$V_c = V_{c0} = V_{c0} = 0,6 \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d \quad (7)$$

Sendo  $f_{ctd}$  a resistência de cálculo do concreto à tração direta, calculada através das equações 8, 9 e 10.

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctd,inf}}{\gamma_c} \quad (8)$$

$$f_{ctd,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m} \quad (9)$$

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (10)$$

A partir do exposto, a parcela da força cortante pode ser reescrita de acordo com a Equação 11.

$$V_c = \frac{0,126 \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot b_w \cdot d}{\gamma_c} \quad (11)$$

#### 2.6.1.1.2 Modelo de cálculo II ( $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ )

O modelo de cálculo II, explanado no item 17.4.2.3 da NBR 6118 (ABNT, 2023), admite o ângulo de inclinação das bielas de compressão variando livremente entre  $30^\circ$  e  $45^\circ$ , e, diferentemente do modelo I, admite que a parcela complementar ( $V_c$ ) reduz com o aumento da força cortante solicitante ( $V_{sd}$ ).

De forma análoga ao modelo de cálculo I, inicialmente, deve-se realizar a verificação quanto a compressão diagonal do concreto, sendo assim, realiza-se o cálculo da força cortante resistente de cálculo de acordo com a Equação 12.

$$V_{Rd2} = 0,54 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \sin^2 \theta \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \quad (12)$$

Em que,  $\alpha$  corresponde à inclinação do estribo em relação ao eixo longitudinal. Para o caso de estribos verticais, a equação pode ser reescrita de acordo com a Equação 13.

$$V_{Rd2} = 0,54 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot \sin^2 \theta \cdot \cotg \theta \quad (13)$$

Onde,  $f_{ck}$  é a resistência à compressão característica expressa em mega pascal (MPa),  $b_w$  é a menor largura da seção,  $d$  é a altura útil da seção e  $\theta$  é o ângulo da biela comprimida.

Posteriormente, realiza-se o cálculo das diagonais tracionadas ( $V_{Rd3}$ ) que considera as contribuições do concreto e da armadura,  $V_c$  e  $V_{sw}$ , respectivamente (Equação 14).

$$V_{sd} = V_{Rd3} = V_c + V_{sw} \quad (14)$$

Para os casos de flexão simples e flexo-tração com a linha neutra cortando a seção, a parcela  $V_c$  é igual a Equação 15.

$$V_c = V_{c1} \quad (15)$$

Onde  $V_{c1}$  é determinado através das condições das equações 16 e 17.

$$V_{c1} = V_{c0}, \text{ para } V_{sd} \leq V_{c0} \quad (16)$$

$$V_{c1} = 0, \text{ para } V_{sd} = V_{Rd2} \quad (17)$$

Devendo ser realizada interpolação para os valores intermediários de  $V_{c1}$  em função de  $V_{sd}$ , a partir da Equação 18.

$$V_{c1} = V_{c0} \cdot \frac{V_{Rd2} - V_{sd}}{V_{Rd2} - V_{c0}} \quad (18)$$

A parcela referente a armadura ( $V_{sw}$ ) pode ser calculada a partir da diferença entre a solicitação e a parcela de concreto  $V_c$ , podendo ser escrita de acordo com a Equação 19.

$$V_{sd} - V_c = V_{sw} = \left( \frac{A_{sw}}{s} \right) \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\cotg \alpha + \cotg \theta) \cdot \sen \alpha \quad (19)$$

#### 2.6.1.2 Model Code 10 (CEB-FIP, 2010)

De acordo com o Model Code 10 (CEB-FIP, 2010), a estimativa do cisalhamento de vigas de concreto armado convencional deve obedecer a relação da Equação 20.

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \geq V_{Ed} \quad (20)$$

Em que,  $V_{Rd}$  representa a resistência ao cisalhamento de projeto da viga,  $V_{Rd,c}$  é a resistência de projeto ao cisalhamento devido a contribuição do concreto,  $V_{Rd,s}$  é a resistência de projeto devido a contribuição da armadura de cisalhamento, e,  $V_{Ed}$  é o valor de projeto da força de cisalhamento atuante na seção de análise, também denominado pela normativa como seção de controle, em que recomenda-se o estabelecimento de uma distância  $z = 0,9 \cdot d$  da face do apoio, sendo  $d$  a altura útil da seção transversal.

Inicialmente, deve-se garantir que não haja esmagamento da biela comprimida do concreto, utilizando a Equação 21 de verificação.

$$V_{Rd} \leq V_{Rd,max} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta} \quad (21)$$

Na equação,  $z$  é o braço de alavanca para elementos de altura constante, sendo definido como  $0,9 \cdot d$ ;  $\alpha$  é o ângulo entre o estribo e o eixo longitudinal da viga;  $\gamma_c$  é o coeficiente de segurança do concreto e  $k_c$  é o fator de redução da resistência à compressão do concreto fissurado, determinado a partir da Equação 22.

$$k_c = 0,55 \cdot \left( \frac{30}{f_{ck}} \right)^{\frac{1}{3}} \leq 0,55 \quad (22)$$

Feita a verificação do esmagamento da biela comprimida de concreto, pode-se encontrar os valores referentes a contribuição da armadura transversal e a resistência ao cisalhamento de projeto atribuída ao concreto, através das equações 23 e 24, respectivamente.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (23)$$

$$V_{Rd,c} = k_v \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z \cdot b_w \quad (24)$$

Sendo  $A_{sw}$  a área de aço referente ao cisalhamento ( $\text{mm}^2$ ),  $s$  o espaçamento entre os estribos e  $f_{ywd}$  a tensão de escoamento de cálculo da área de aço referente ao cisalhamento (MPa). Vale ressaltar também que, segundo o documento, o valor de  $\sqrt{f_{ck}}$  não deve ser considerado superior a 8 MPa.

Os parâmetros  $\theta$  e  $k_v$ , definidos como inclinação da biela comprimida e coeficiente de contribuição do concreto na transmissão dos esforços de tração nas fissuras, respectivamente, são determinados de acordo com o nível de aproximação adotado.

A normativa cita, em seu texto, quatro níveis de aproximação para a determinação da resistência ao cisalhamento de um elemento. Os primeiros níveis são indicados para dimensionamento inicial, sendo menos complexos e precisos, pois geram resultados conservantistas. Ao passo que se aumenta o nível, maior é a precisão dos resultados, porém demandam maior custo por conta da complexidade, esforço e nível de detalhamento necessários.

O nível de aproximação 1 define o ângulo  $\theta$  como sendo  $36^\circ$  e o parâmetro  $k_v$  através da Equação 25, a depender da utilização ou não da armadura de cisalhamento.

$$k_v = \begin{cases} \frac{200}{(1000 + 1,3 \cdot z)}, & \text{se } \rho_w = 0 \\ 0,15, & \text{se } \rho_w \geq \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \end{cases} \quad (25)$$

O nível de aproximação 2 deriva da abordagem do campo de tensões com ângulo variável, ou seja, o ângulo de inclinação da diagonal de compressão  $\theta$ , para o nível de aproximação em questão, assume valores seguindo os limites mostrados na Equação 26.

$$20^\circ + 10000 \cdot \varepsilon_x \leq \theta \leq 45^\circ \quad (26)$$

Em que  $\varepsilon_x$  é definida como a deformação longitudinal calculada à meia-altura da seção transversal e é determinada através da Equação 27.

$$\varepsilon_x = \frac{\frac{M_{Ed}}{Z} + 0,5 \cdot V_{Ed} \cdot \cot \theta + 0,5 \cdot N_{Ed} - A_p \cdot f_{p0}}{2 \cdot (E_s \cdot A_s + E_p \cdot A_p)} \quad (27)$$

Sendo  $M_{Ed}$  o momento solicitante de cálculo (N.mm),  $V_{Ed}$  a força de cisalhamento solicitante de cálculo (N),  $N_{Ed}$  a força axial solicitante de cálculo (N),  $A_p$  a área de armadura protendida na região de tração devido a flexão (mm<sup>2</sup>),  $f_{p0}$  a tensão inicial no aço de protensão (MPa),  $A_s$  a área de armadura passiva na região tracionada devido a flexão (mm<sup>2</sup>),  $E_s$  o módulo de Elasticidade do aço da armadura passiva (MPa),  $E_p$  o módulo de Elasticidade do aço da armadura ativa (MPa).

Esse modelo também é aplicável a elementos que possuem armadura de cisalhamento, e difere do nível 1 de aproximação pois não considera nenhuma parcela de contribuição do concreto, ou seja, o parâmetro  $k_v$  para esse caso assume o valor de 0 (Zero).

No nível de aproximação 3, os cálculos são baseados diretamente na Teoria do Campo de Compressão Modificados (MCFT) e em suas equações. Nesse nível, os parâmetros  $\theta$  e  $k_v$  podem ser determinados através das equações 28 e 29, respectivamente.

$$\theta = 29^\circ + 7000 \cdot \varepsilon_x \quad (28)$$

$$k_v = \begin{cases} \frac{0,4}{(1 + 1500 \cdot \varepsilon_x)} \cdot \frac{1300}{(1000 + 0,7 \cdot k_{dg} \cdot z)}, & \text{se } \rho_w = 0 \\ \frac{0,4}{(1 + 1500 \cdot \varepsilon_x)}, & \text{se } \rho_w \geq \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \end{cases} \quad (29)$$

Onde  $k_{dg}$  é definido como uma medida de rugosidade das fissuras, encontrada pela Equação 30.

$$k_{dg} = \frac{48}{d_g + 16} \geq 1,15 \quad (30)$$

Sendo  $d_g$  o diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado.

A deformação longitudinal  $\varepsilon_x$  é calculada à meia-altura da seção transversal e pode ser determinada através da Equação 31.

$$\varepsilon_x = \frac{\frac{M_{Ed}}{Z} + V_{Ed} + 0,5 \cdot N_{Ed} - A_p \cdot f_{p0}}{2 \cdot (E_s \cdot A_s + E_p \cdot A_p)} \quad (31)$$

O nível de aproximação 4, por sua vez, dita que a resistência dos elementos pode ser determinada satisfazendo as condições de equilíbrio e compatibilidade de deformações através das relações de deformação para o aço e o concreto fissurado diagonalmente, entretanto o uso dessas ferramentas requer elevado grau de experiência e precisão para que se garanta resultados seguros e consistentes.

### 2.6.1.3 ACI 318 (ACI, 2019)

O Instituto Americano de Concreto (ACI) dimensiona vigas de concreto armado de acordo com a hipótese da analogia da treliça clássica, em que o ângulo da biela em relação ao eixo horizontal longitudinal é fixado em  $45^\circ$ . Dessa forma, o esforço cortante nominal resistente é igual a Equação 32.

$$V_n = V_c + V_s \leq \frac{5}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (32)$$

Em que,  $V_n$  é o esforço cortante nominal resistente,  $V_c$  é o esforço cortante resistido pelo concreto,  $V_s$  é o esforço cortante resistido pela armadura transversal,  $f'_c$  é a resistência característica do concreto em MPa, devendo ser entre 17,2 e 69.

Para a parcela do esforço resistido pelos mecanismos do concreto tem-se a Equação 33.

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (33)$$

Quanto à parcela resistida pelos estribos, se estiverem perpendiculares ao eixo longitudinal da viga, o esforço resistido pode ser encontrado através da Equação 34.

$$V_s = \frac{A_s}{s} \cdot f_y \cdot d \leq \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (34)$$



Caso os esforços cisalhantes solicitantes não superem o valor de  $V_c$ , utiliza-se a armadura mínima ( $A_{v,min}$ ) igual a Equação 35, em que  $s$  é o espaçamento.

$$A_{v,min} = 0,062 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot \frac{b_w \cdot s}{f_y} \quad (35)$$

#### 2.6.1.4 JSCE (2008)

Segundo este método de cálculo proposto pela Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis, a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto convencional, denotada por  $V_u$ , é estabelecida como sendo a somatória entre as parcelas de contribuição da resistência do concreto simples ( $V_c$ ), e da armadura transversal de cisalhamento ( $V_s$ ), de acordo com a Equação 36.

$$V_u = V_c + V_s \quad (36)$$

A contribuição de cada parcela é descrita a partir das equações 37 e 38.

$$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d \quad (37)$$

$$V_s = A_{sw} \cdot \frac{f_{wyd}}{s_s} \cdot (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) \cdot \frac{d}{1,15} \quad (38)$$

Para a parcela do concreto,  $\beta_d$  é o coeficiente que considera o efeito da profundidade efetiva na capacidade ao cisalhamento;  $\beta_p$  é o coeficiente que considera o efeito do reforço longitudinal no cisalhamento,  $\beta_n$  é o coeficiente que considera o efeito da força axial na capacidade de cisalhamento. Os parâmetros necessários para o cálculo de  $V_{cd}$  podem ser calculados de acordo com as equações 39, 40, 41 e 42.

$$\beta_d = \min \left( \sqrt[4]{\frac{1000}{d}} ; 1,5 \right) \quad (39)$$

$$\beta_p = \min \left( \sqrt[3]{\frac{1000 \cdot A_s}{b_w \cdot d}} ; 1,5 \right) \quad (40)$$

$$\beta_n = 1,0 \quad (\text{caso não haja protensão}) \quad (41)$$

$$f_{vcd} = \min(0,2 \cdot \sqrt[3]{f_{cd}} ; 0,72) \quad (42)$$

Já para a expressão da parcela de contribuição das armaduras de cisalhamento ( $V_s$ ),  $f_{wyd}$  corresponde a tensão de escoamento de cálculo da armadura transversal, ao passo que  $s_s$  e  $\alpha_s$  são, respectivamente, o espaçamento e a inclinação, com relação ao eixo longitudinal da viga, das armaduras supracitadas.

## 2.6.2 Estruturas de CRFA

### 2.6.2.1 NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras - Procedimento (ABNT, 2021)

A NBR 16935 (ABNT, 2021) apresenta que para elementos lineares com concreto reforçado com fibras, com armadura longitudinal e transversal, a resistência do elemento é considerada satisfatória quando verificada a condição da Equação 43.

$$V_{sd} \leq V_{Rd} = V_{Rd,F} + V_{sw} \quad (43)$$

Onde,  $V_{sw}$  é calculado de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023) e  $V_{Rd,F}$  é a parcela da resistência do CRFA ao cisalhamento calculada através da Equação 44.

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[ 100 \cdot \rho_1 \cdot \left( 1 + 7,5 \cdot \frac{f_{FtuK}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \quad (44)$$

Em que,  $k$  é o coeficiente que considera a não uniformidade das tensões internas no concreto reforçado com fibras e armadura convencional,  $\rho_1$  é a taxa de armadura longitudinal,  $f_{FtuK}$  é a resistência característica à tração direta do CRF,  $f_{ctk}$  é a resistência característica do concreto à tração direta,  $f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto,  $\sigma_{cp}$  é a tensão média na seção transversal de concreto,  $b_w$  é a largura da seção transversal, e,  $d$  é a altura útil da seção transversal. Os parâmetros  $k$ ,  $\rho_1$ ,  $F_{ftuk}$ ,  $f_{fts}$ ,  $\sigma_{cp}$  podem ser calculados de acordo com as equações 45, 46, 47, 48 e 49.

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (45)$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w d} \quad (46)$$

$$F_{ftuk} = f_{fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} \cdot (f_{fts} - 0,5 \cdot f_{r3} + 0,2 \cdot f_{R1}) \geq 0 \quad (47)$$

$$f_{Fts} = 0,45 \cdot f_{R1} \quad (48)$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{ed}}{A_c} < 0,2 \cdot f_{cd} \quad (49)$$

Ademais, deve-se satisfazer a condição  $V_{Rd,F} \geq V_{Rd,Fmin}$ , onde  $V_{Rd,Fmin}$  é calculado de acordo com a Equação 50.

$$V_{Rd,Fmin} = (0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} + 0,15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (50)$$

O valor de  $V_{Rd,Fmin}$  é limitado superiormente pelo valor obtido pela Equação 51.

$$V_{Rd,max} = k_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot\theta + \cot\alpha}{1 + \cot^2\theta} \quad (51)$$

Sendo  $k_c$  calculado de acordo com a Equação 52.

$$k_c = 0,5 \cdot \left(\frac{30}{f_{ck}}\right)^{1/3} \leq 0,5 \quad (52)$$

A norma destaca que, a armadura mínima de cisalhamento convencional (estribos), conforme prevista na NBR 6118 (ABNT 2023), pode ser dispensada quando forem utilizados o CRF e a condição da Equação 53 for atendida:

$$f_{Ftuk} \geq 0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (53)$$

Em que,  $f_{Ftuk}$  é igual a Equação 54.

$$f_{Ftuk} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0,5 \cdot f_{R3} + 0,2 \cdot f_{R1}) \geq 0 \quad (54)$$

Onde  $CMOD_3$  é a medida da abertura do entalhe de  $w = 2,5$  mm;  $f_{R1}$  é a resistência residual à tração na flexão do CRF correspondente ao  $CMOD_1 = 0,5$  mm;  $f_{R3}$  é a resistência residual à tração na flexão do CRF correspondente ao  $CMOD_3 = 2,5$  mm.

### 2.6.2.2 Model Code 10 (CEB-FIP, 2010)

O método de cálculo proposto pelo Model Code 10 (CEB-FIP, 2010) para a resistência ao cisalhamento de vigas de CRFA ( $V_{Rd}$ ) é definida através da somatória da contribuição da resistência do CRFA ( $V_{Rd,f}$ ) e da armadura transversal ( $V_{Rd,s}$ ), de acordo com a Equação 55.

$$V_{Rd} = V_{Rd,f} + V_{Rd,s} \quad (55)$$

Em que,  $V_{Rd,f}$  e  $V_{Rd,s}$  podem ser calculados de acordo com as equações 56 e 57, respectivamente.

$$V_{Rd,f} = \max \left\{ 0,18 \cdot k \cdot \left[ 100 \cdot \rho_l \cdot \left( 1 + 7,5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d; 0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \cdot b_w \cdot d \right\} \quad (56)$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (57)$$

Destaca-se que na expressão da parcela da resistência do CRFA ao cisalhamento ( $V_{Rd,f}$ ),  $f_{Ftuk}$  representa a resistência residual característica no estado limite último e  $f_{ctk}$  é a resistência característica do concreto à tração determinados pelas equações 58, 59, 60 e 61.

$$f_{Ftuk} = \max \left[ f_{Fts} - \frac{1,5}{2,5} \cdot (f_{Fts} - 0,5 \cdot f_{R3} + 0,2 \cdot f_{R1}); 0 \right] \quad (58)$$

$$f_{Fts} = 0,45 \cdot f_{R1} \quad (59)$$

$$f_{ctk} = \begin{cases} 0,3 \cdot (f_{ck})^{\frac{2}{3}}, & \text{para } f_{ck} \geq 50 \text{ MPa} \\ 2,12 \cdot \ln \left( 1 + \frac{f_{ck}}{10} \right), & \text{para } f_{ck} < 50 \text{ MPa} \end{cases} \quad (60)$$

$$k = \min \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}; 2 \right) \quad (61)$$

Sendo  $f_{Fts}$  a resistência residual no estado limite de serviço e os parâmetros  $f_{R1}$  e  $f_{R3}$  os quais são obtidos a partir do ensaio à flexão de três pontos de prismas entalhados relacionados às tensões correspondentes às aberturas de fissura, respectivamente iguais a  $CMOD_1 = 0,5 \text{ mm}$  e  $CMOD_3 = 2,5 \text{ mm}$ .

Observa-se que, as recomendações apresentadas pela NBR 16935 (ABNT, 2021) são similares as do Model Code 10 (CEB-FIP, 2010), entretanto, a normativa brasileira não apresenta limitação quanto a taxa de armadura longitudinal ( $\rho$ ) de 2%.

### 2.6.2.3 RILEM TC162-TDF (2002)

Segundo a normativa a força cortante resistente de cálculo para uma viga reforçada com fibras ( $V_{Rd,3}$ ) (Equação 62) é estimada através da soma das parcelas de contribuição atribuídas

ao concreto, às fibras de reforço de aço, e às armaduras de cisalhamento, denominadas  $V_{cd}$ ,  $V_{fd}$  e  $V_{wd}$ , respectivamente, previstos nas equações 63, 64 e 65.

$$V_{Rd,3} = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd} \quad (62)$$

$$V_{cd} = 0,12 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d \quad (63)$$

$$V_{fd} = 0,7 \cdot k_f \cdot k_l \cdot \tau_{fd} \cdot b_w \cdot d \quad (64)$$

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (1 + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (65)$$

$$k = k_l = \min \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}; 2 \right) \quad (66)$$

$$\rho_l = \min \left( \frac{A_s}{b_w \cdot d}; 2 \right) \quad (67)$$

$$\tau_{fd} = 0,12 \cdot f_{Rk,4} \quad (68)$$

Na Equação 66 o fator  $k_f$  considera a contribuição da mesa para vigas com seção T; para caso de vigas retangulares, esse fator é igual a 1,0. A Equação 67 representa a taxa de armadura longitudinal e a Equação 68 representa a contribuição para a resistência ao cisalhamento devido à adição de fibra de aço ( $\tau_{fd}$ ) que depende de  $f_{Rk,4}$  que é a resistência residual característica à tração na flexão obtida a partir do ensaio de flexão em três pontos de prismas entalhados para  $CMOD_4 = 3,5$  mm.

#### 2.6.2.4 JSCE (2008)

O cálculo proposto pela Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis, a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto reforçadas com fibra de aço, denotada por  $V_{ud}$  (Equação 69) é estabelecida como sendo a somatória entre as parcelas de contribuição da resistência do concreto simples ( $V_c$ ), das fibras de aço ( $V_f$ ) e da armadura transversal de cisalhamento ( $V_s$ ).

$$V_u = V_c + V_f + V_s \quad (69)$$

A parcela da contribuição do concreto simples e da armadura transversal segue o exposto no item 2.6.1.4 do presente trabalho. A contribuição da parcela da fibra de aço é descrita através da Equação 70.

$$V_f = \frac{f_{tyd} \cdot b_w \cdot d}{1,15 \cdot \tan \beta_u} \quad (70)$$

Em que,  $\beta_u$  representa a inclinação da biela de compressão;  $f_{tyd}$  corresponde à resistência ao escoamento de cálculo do concreto tracionado e é obtida a partir da curva *tensão-deformação* ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) do ensaio de tração axial. A Sociedade Japonesa relata que na ausência de capacidades técnicas para realizar o ensaio e de uma expressão teórica para estimar o valor dessa resistência, pode-se adotar a resistência à tração axial do CRFA ( $f_{ct}$ ) proposta por Choi *et al.* (2007) (Equação 71).

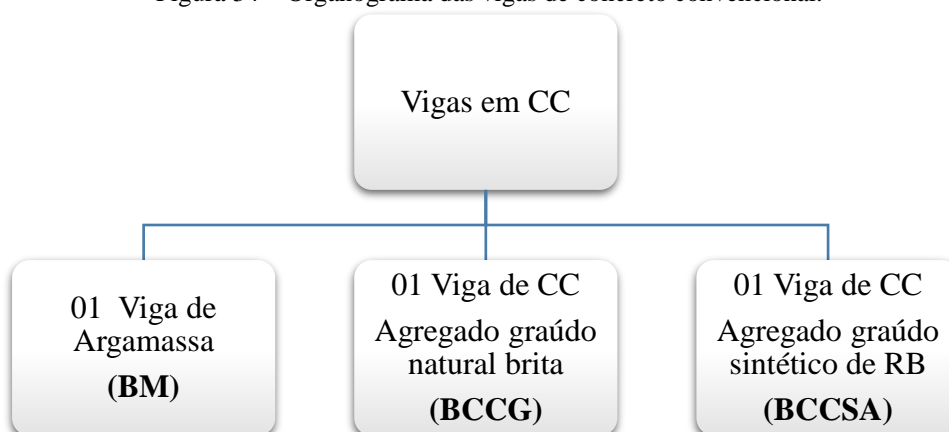
$$f_{ct} = 0,292 \cdot (f_c)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ 1 + C_f \cdot \left( 0,1 \cdot \frac{l_f}{d_f} - 1 \right) \right] \quad (71)$$

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

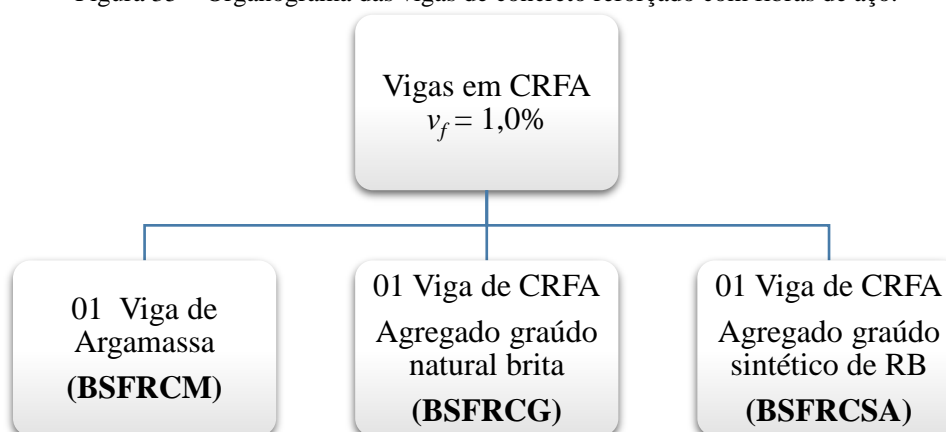
O programa experimental foi composto por seis vigas, sendo três de CC e três de CRFA, ensaiadas até a ruptura a fim de avaliar a capacidade resistente ao cisalhamento e o ganho proporcionado pela adição de fibras e pelo agregado graúdo sintético de resíduo de bauxita. Dessas três vigas, a primeira foi produzida sem o agregado graúdo, ou seja, uma viga de argamassa, a segunda, foi produzida com agregado graúdo natural do tipo brita, e a terceira foi produzida com o agregado graúdo sintético de RB. Para o CRFA, a fração volumétrica de fibras ( $v_f$ ) foi igual a 1,0%. Ressalta-se que este estudo experimental foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA). As figuras 34 e 35 representam o esquema das vigas ensaiadas em dois grupos, sendo o primeiro referente as vigas em CC e o segundo em CRFA.

Figura 34 – Organograma das vigas de concreto convencional.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 35 – Organograma das vigas de concreto reforçado com fibras de aço.



Fonte: Autoria própria (2024).

A fim de melhor explicar as siglas adotadas na presente pesquisa, é apresentado na Quadro 2 a definição e as principais variáveis de controle das vigas.

Quadro 2 – Nomenclatura das vigas.

<b>Sigla</b>	<b>Definição</b>	<b>Material</b>
<b>BM</b>	<i>Beam mortar</i>	Argamassa
<b>BCCG</b>	<i>Beam concrete conventional with gravel</i>	Concreto convencional com brita
<b>BCCSA</b>	<i>Beam concrete conventional with synthetic aggregate</i>	Concreto convencional com agregado sintético
<b>BSFRCM</b>	<i>Beam mortar reinforced with steel fiber</i>	Argamassa com fibra de aço
<b>BSFRCG</b>	<i>Beam concrete with gravel reinforced with steel fiber</i>	Concreto com brita reforçado com fibra de aço
<b>BSFRCSA</b>	<i>Beam concrete with synthetic aggregate reinforced with steel fiber</i>	Concreto com agregado sintético reforçado com fibra de aço

Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

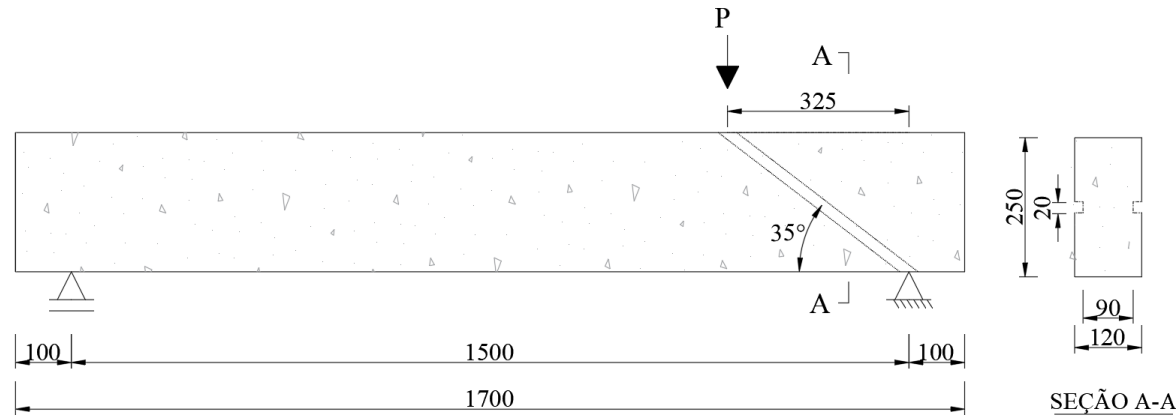
As seis vigas apresentaram as mesmas características geométricas, sendo as dimensões: 120 mm de largura ( $b_w$ ), 250 mm de altura ( $h$ ), 1700 mm de comprimento ( $C$ ) e 1500 mm de vão livre ( $L$ ). Além disso, as vigas também possuem a mesma taxa de armadura, diferenciando apenas no tipo de agregado gráúdo a ser utilizado, e na utilização de uma fração volumétrica igual a 1,0% de fibras de aço como reforço. Destaca-se que, a carga foi aplicada considerando o vão de cisalhamento ( $a$ ) igual a 325 mm e a altura útil da viga ( $d$ ) igual a 229 mm, correspondendo assim, a uma relação fixada de  $a/d$  (vão de cisalhamento/altura útil) igual a 1,4.

Para fixar a superfície de ruptura da viga, foram realizados frisos (entalhes com angulações pré-definidas) com inclinação de 35° na região lateral das vigas, através da colagem de madeirites em cada face lateral interna da forma, apresentando uma largura de 20 mm e profundidade de 15 mm. Na Figura 36 é possível observar a vista longitudinal e transversal da



viga com o friso pré-definido de 35°, e na Tabela 14 é apresentado um resumo das características das vigas.

Figura 36 – Características geométricas das vigas (unidades em mm).



Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 14 – Resumo das características das vigas.

Viga	$b_w$ (mm)	$a$ (mm)	$d$ (mm)	$L$ (mm)	$a/d$	$v_f$ (%)
<b>BM</b>						
<b>BCCG</b>	120	325	229	1500	1,4	-
<b>BCCSA</b>						
<b>BSFRCM</b>						
<b>BSFRCG</b>	120	325	229	1500	1,4	1,0
<b>BSFRCSA</b>						

Fonte: Autoria própria (2024).

Vale destacar que, no que diz respeito à resistência à compressão do concreto foi estimado um valor igual a 30 MPa aos 28 dias, já que essa classe de resistência representa situações práticas de projeto. Ademais, para o cobrimento das armaduras foi adotado 10 mm, valor mínimo suficiente para total aderência das barras, sendo utilizados espaçadores do tipo cadeirinha da marca Atex para garantir o espaçamento.

As formas e armação das vigas deste estudo foram confeccionadas por profissional qualificado a fim de minimizar alterações no produto final. Para elaboração das formas foi utilizado folhas de madeirites com espessura igual a 12 mm, e, para atender o friso pré-definido de 35° utilizou-se folha de madeirite com espessura igual a 15 mm coladas em cada face lateral da viga, como pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 – Forma das vigas com entalhe pré definido.

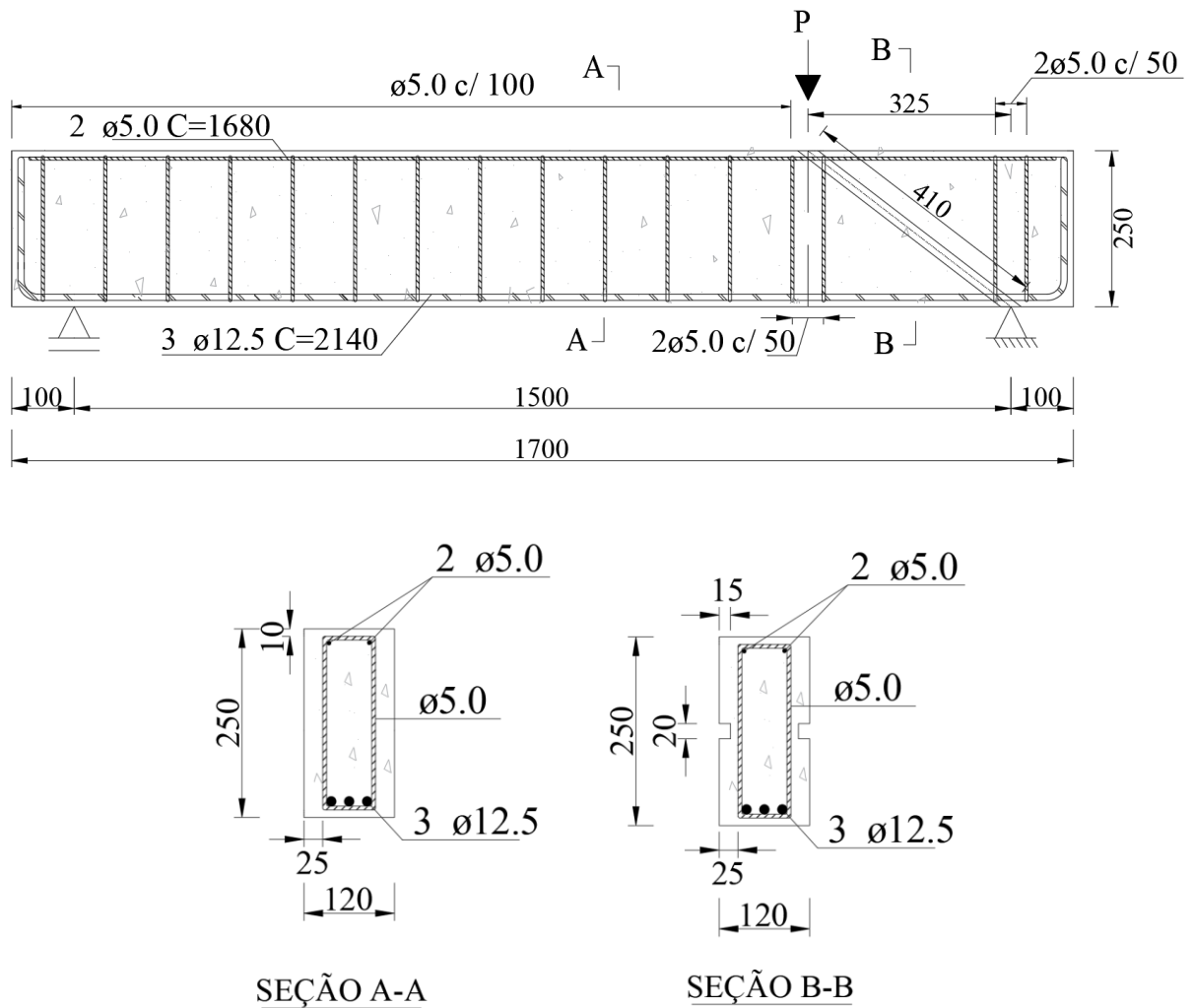


Fonte: Autoria própria (2024).

Em relação a armadura longitudinal, todas as vigas possuíram a mesma taxa de armadura longitudinal ( $\rho_l=1,36\%$ ) e foram compostas por três barras de aço CA-50 de diâmetro igual a 12,5 mm na parte inferior da viga (tração), e duas barras de aço CA-60 de diâmetro igual a 5,0 mm na parte superior da viga atuando como porta-estribos.

Quanto à armadura transversal (estribos), o trecho representado pelo vão de cisalhamento não foi armado a fim de ser determinado a capacidade resistente da biela de compressão, já os demais trechos foram armados transversalmente com taxa de armadura transversal ( $\rho_w$ ) igual a 0,3%, sendo compostas por estribos de aço CA-60 com diâmetro igual a 5,0 mm a cada 100 mm, com a finalidade de garantir que a ruptura ocorra na região monitorada, sem estribos e com os frisos. A Figura 38 representa a armação longitudinal e transversal das vigas ensaiadas neste estudo e a Figura 39 representa a produção da armação finalizada.

Figura 38 – Armadura longitudinal e transversal das vigas (unidades em mm).



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 39 – Produção da armadura longitudinal e transversal das vigas finalizada.

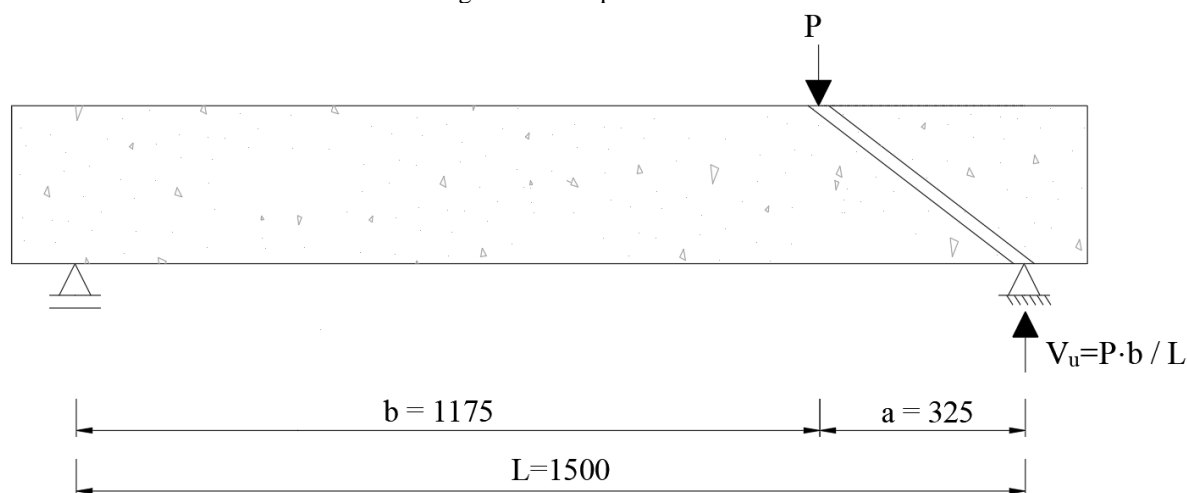


Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.3 SISTEMA DE ENSAIO

Neste trabalho foram estudadas seis vigas biapoiadas solicitadas em três pontos com a finalidade de avaliar o comportamento da resistência ao cisalhamento quando há a utilização do agregado graúdo sintético de resíduo de bauxita e quando tem-se a incorporação da fibra de aço. Sendo assim, as vigas foram posicionadas sobre roletes metálicos para simular as condições de apoio de 1º e 2º gênero, simulando um sistema isostático. O esquema estático desse estudo é representado através da Figura 40, em que se verifica na região de estudo a aplicação de uma carga ( $P$ ) distante 325 mm do apoio direito (vão de cisalhamento) e a reação ( $V_u$ ) gerada neste mesmo apoio.

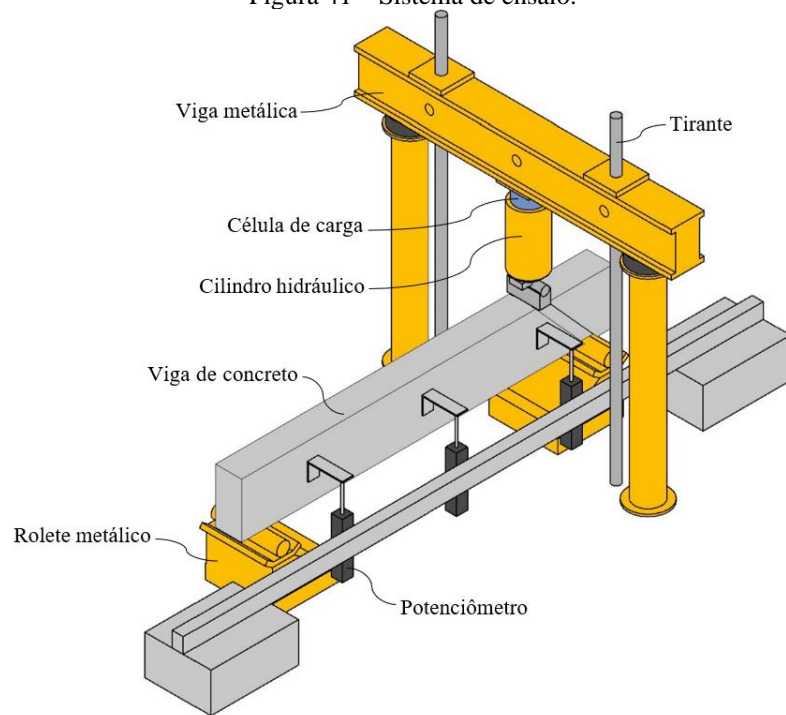
Figura 40 – Esquema estático.



Fonte: Autoria própria (2024).

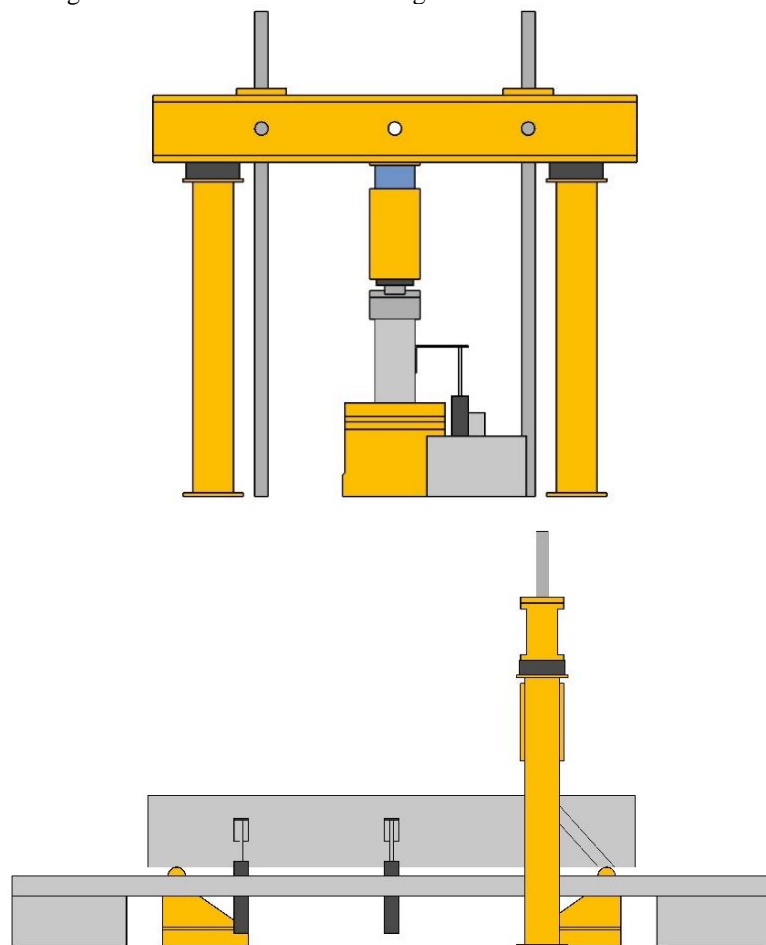
O carregamento foi aplicado a partir de um cilindro hidráulico com capacidade de 1000 kN, e o acionamento do cilindro foi realizado através de uma bomba hidráulica. Ambos, o cilindro e a bomba hidráulica (modelo ZE-4440 MG), são da fabricante ENERPAC. Sobre o cilindro foi instalada uma célula de carga com 1000 kN de capacidade e 0,2 kN de precisão, modelo Coluna C, da fabricante ALFA INSTRUMENTOS, que viabilizou o registro do carregamento. Na Figura 41 é possível observar o esquema tridimensional do sistema de ensaio e na Figura 42 tem-se a vista transversal e longitudinal do sistema de ensaio.

Figura 41 – Sistema de ensaio.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 42 – Vista transversal e longitudinal do sistema de ensaio.

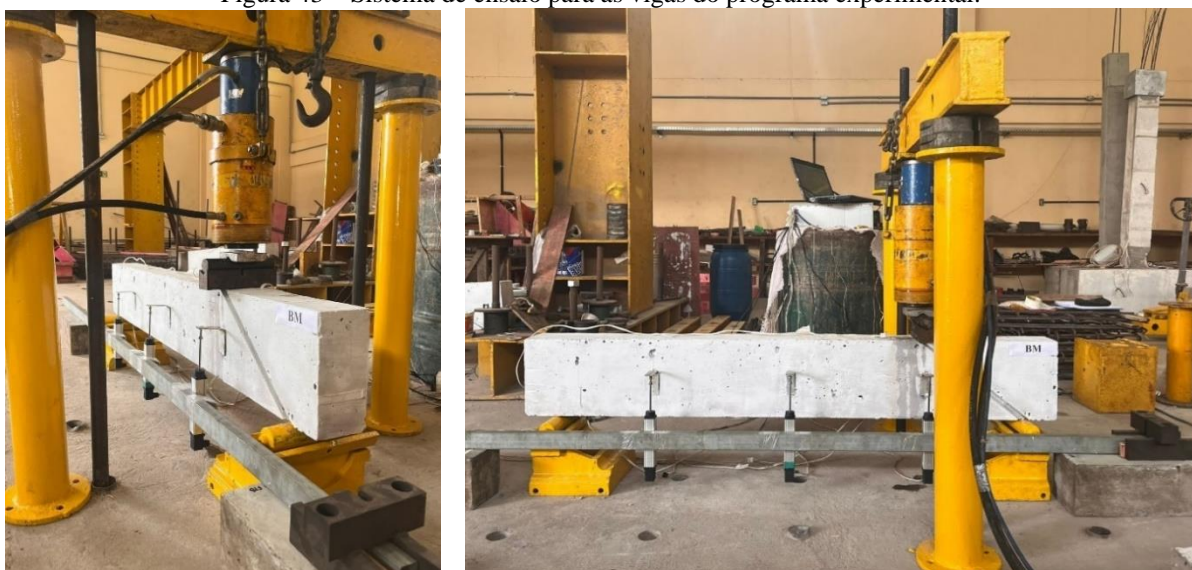


Fonte: Autoria própria (2024).



A coleta dos dados referentes ao carregamento (célula de carga), ao deslocamento (potenciômetros) e às deformações (extensômetros) foi realizada pelo sistema de aquisição de dados, composto pelo registrador de dados ALMEMO® 5690-2, da fabricante AHLBORN e por um laptop. Os dados eram coletados continuamente a uma frequência de 6 Hz. Destaca-se que foi utilizado uma carga inicial de 1 kN para acomodação do sistema. A Figura 43 mostra a disposição final de todos os elementos do sistema de carregamento e do sistema de aquisição de dados.

Figura 43 – Sistema de ensaio para as vigas do programa experimental.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.4 INSTRUMENTAÇÃO

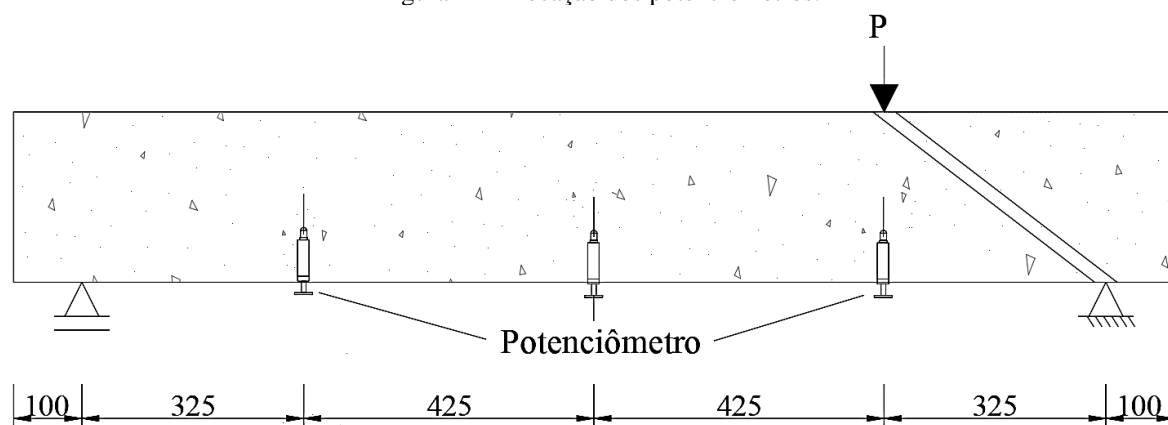
A instrumentação visa coletar os dados referentes ao estudo. Sendo assim, foram coletados a leitura dos deslocamentos verticais, das deformações da armadura longitudinal, da armadura transversal e do concreto da viga.

#### 3.4.1 Deslocamento vertical

Para realizar a leitura do deslocamento vertical foram posicionados três potenciômetros, com leitura máxima de 108 mm e precisão de 0,01mm. O primeiro potenciômetro foi posicionado no alinhamento do ponto de aplicação da carga, o segundo no meio da viga, e o terceiro no ponto simétrico ao ponto de aplicação da carga. Tal posicionamento tem como finalidade verificar que o esperado pela teoria ocorra na prática, isto é, ao analisar as condições de apoio e carregamento, para este caso, o maior deslocamento vertical deve ocorrer embaixo da aplicação de carga. Os medidores tiveram a mesma marcação em todas as vigas e foram

fixados com o auxílio de uma régua metálica, que por sua vez foi apoiada em um suporte secundário independente do sistema de ensaio de forma que não houvesse qualquer interferência nas leituras dos deslocamentos. Na Figura 44 é possível observar o esquema da locação dos potenciômetros do presente estudo.

Figura 44 – Locação dos potenciômetros.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.4.2 Deformações

#### 3.4.2.1 Armadura longitudinal

O registro destas deformações tem como objetivo avaliar o nível de solicitação destas armaduras, permitindo assim identificar o seu possível escoamento. Cada viga instrumentada recebeu um extensômetro elétricos de resistência (EERs) de dimensões (3,18 x 3,18) mm do modelo PA-06-125AA-120L da Excel Sensores. Estes foram colados na face lateral da barra de aço CA-50 de diâmetro igual a 12,5 mm posicionados no alinhamento vertical da aplicação da carga. Ressalta-se que como a viga é composta por três barras longitudinais, a barra instrumentada foi a do centro.

A execução da instrumentação se deu antes da montagem das armaduras e consiste em limar a barra para o correto posicionamento do extensômetro, fixando-o com a cola de cianoacrilato, posteriormente, deve-se realizar a ligação dos seus contatos e do cabo de leitura a partir da soldagem com estanho em dois fios de cobre, e então, cobrir a ligação com cola epóxi e fita de autofusão a fim de protegê-lo de interferências do meio externo. Na Figura 45, é possível observar a ligação do extensômetro ao cabo de leitura da barra longitudinal antes de ser protegido pela cola epóxi e a fita de autofusão.

Figura 45 – Extensometria da barra de aço longitudinal (12,5 mm).



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.4.2.2 Armadura transversal

Apesar da região de estudo não ser armada transversalmente, coletou-se o registro da deformação do estribo situado no alinhamento da aplicação de carga, com o objetivo de avaliar o nível de solicitação desta armadura, permitindo identificar o seu possível escoamento. Cada viga instrumentada recebeu um extensômetro elétrico de resistência (EERT) na barra de aço transversal fixado em seu ponto médio. Ressalta-se que foi utilizado o mesmo modelo de extensômetro das barras longitudinais e a execução da instrumentação acontece da mesma forma como explanado no item anterior. Na Figura 46 é possível verificar a extensometria da barra de aço transversal CA-60 de diâmetro igual a 5,0 mm antes de ser protegido pela cola epóxi e fita de auto fusão.

Figura 46 – Extensometria da barra de aço transversal (5,0 mm).



Fonte: Autoria própria (2024).

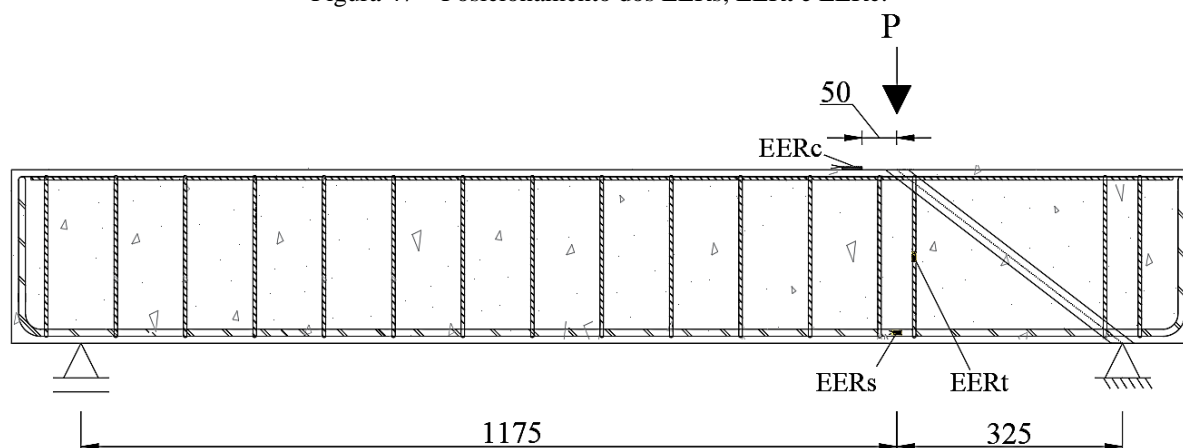


### 3.4.2.3 Concreto

Para realizar a leitura das deformações do concreto foi utilizado um extensômetro elétrico de resistência (EERc) para cada viga, com grelha de dimensões (51,1 x 2,03) mm do modelo PA-06-201BA-120L da Excel Sensores. Estes foram colados na face superior externa do concreto e posicionados a uma distância de 50 mm do ponto de aplicação de carga a fim de evitar que o êmbolo do cilindro hidráulico o atinja.

A execução da instrumentação consiste em regularizar a superfície com cola epóxi e depois utilizar a cola de cianoacrilato para fixação do extensômetro na superfície. A ligação dos seus contatos e do cabo de leitura será realizada a partir da soldagem com estanho em dois fios de cobre. O posicionamento dos extensômetros elétricos da armadura longitudinal (EERs), da transversal (EERt) e do concreto (EERc) são apresentados na Figura 47.

Figura 47 – Posicionamento dos EERs, EERt e EERc.



Fonte: Autoria própria (2024).

## 3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 3.5.1 Concreto

O concreto estimado para este programa experimental foi de 30 MPa para os 28 dias de idade e foi dosado através do método desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e de forma empírica a fim de realizar ajustes necessários.

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland do tipo II com adição de fíler com classe de resistência de 32 MPa (CPII-F-32). O agregado miúdo foi uma areia do tipo quartzosa, típica da região de Belém, com massa específica igual a 2,53 kg/dm<sup>3</sup>, módulo de finura igual 2,52 e diâmetro máximo de 1,18 mm. Vale destacar que a areia foi secada em estufa a fim de evitar que a sua umidade interferisse na relação água/cimento ( $a/c$ ) do concreto.

O agregado graúdo natural do tipo brita possui massa específica de 2,63 kg/dm<sup>3</sup>, módulo de finura igual a 6,07 e diâmetro máximo do agregado igual a 12,5 mm, pois a porcentagem retida acumulada na peneira de 9,5 mm apresentou valor superior a 5%. Este agregado foi lavado a fim de descartar o volume de finos e permanecer com o diâmetro entre a faixa granulométrica de 4,75 mm e 9,5 mm (Brita 0). Já o agregado graúdo sintético de resíduo de bauxita, produzido e disponibilizado pelo laboratório de química da Universidade Federal do Pará em parceria com a empresa Hydro Alunorte, é constituído por resíduo de bauxita, sílica e argila (Tabela 15), através da mistura e queima desses materiais a uma temperatura de 1200°C por um período de 3 horas.

Tabela 15 – Propriedades do agregado graúdo sintético (80% de RB)

<b>Amostra</b>	<b>RB (%)</b>	<b>Sílica (%)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Peso específico (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tempo (h)</b>
<b>AS-80</b>	85-70	10-15	5	> 1,5 e < 2,0	1200	3

Fonte: Universidade Federal do Pará (2023).

A absorção do agregado sintético apresentou resultado em torno de 8,15%, e ressalta-se que foi selecionado uma amostra do material que apresentasse granulometria semelhante a brita zero, ou seja, entre a faixa granulométrica de 4,75 mm e 9,5 mm. Assim, não foi preciso fazer a saturação do agregado 24h antes da concretagem. Na Figura 48 é possível observar uma amostra do agregado graúdo natural de brita e sintético de RB.

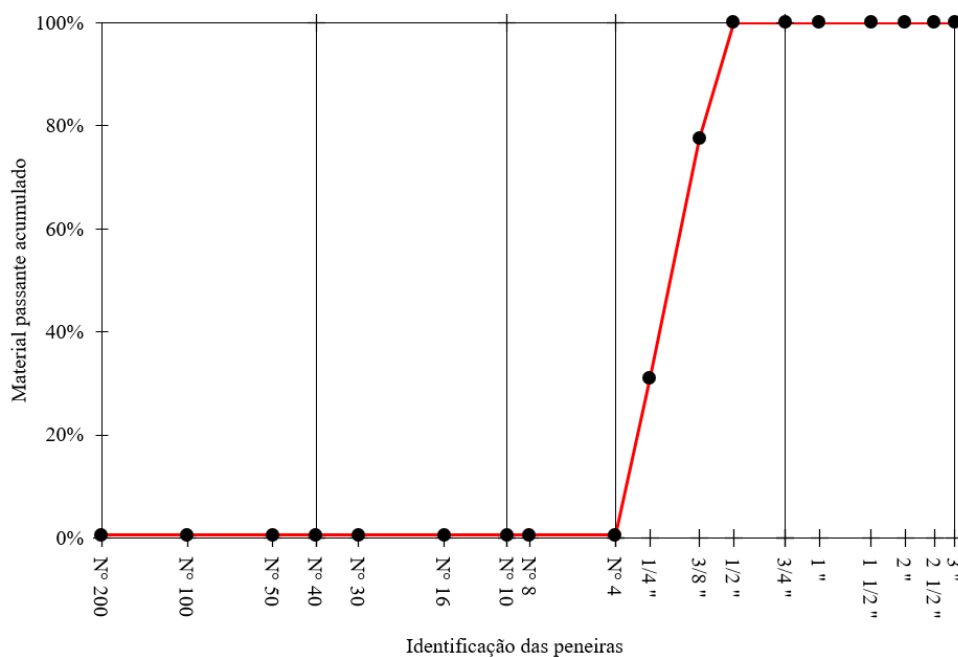
Figura 48 – Amostra do agregado graúdo natural e sintético.



Fonte: Autoria própria (2024).

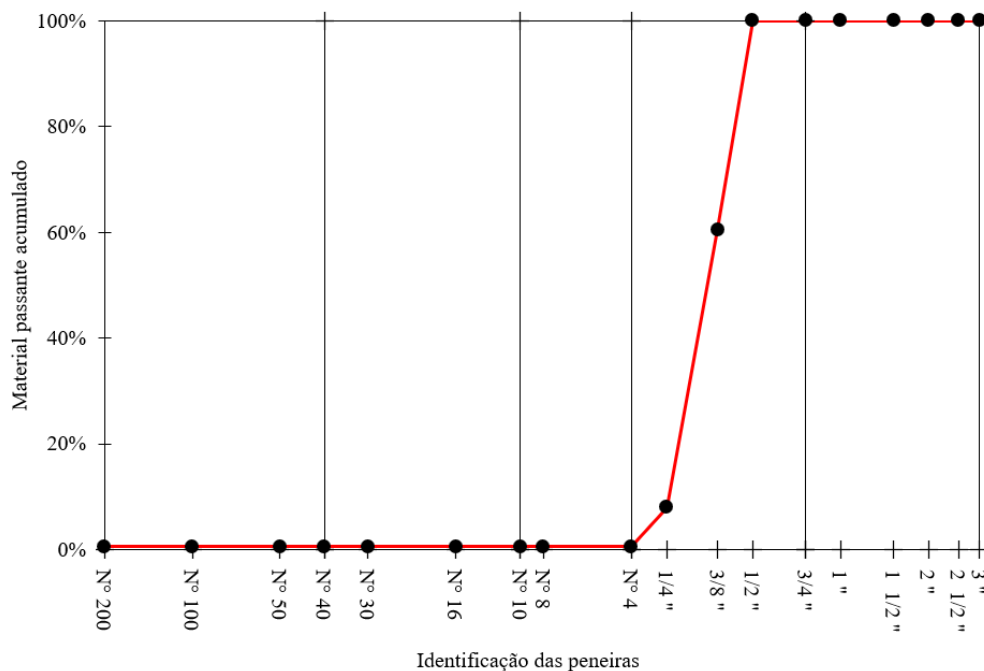
O módulo de finura do agregado sintético foi igual a 6,40. As figuras 49 e 50 representam as curvas granulométricas dos agregados graúdos natural (brita 0) e sintético, respectivamente, preconizado pela NBR 17054 (ABNT, 2022).

Figura 49 – Curva granulométrica do agregado graúdo natural do tipo brita.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 50 – Curva granulométrica do agregado graúdo sintético de resíduo de bauxita.



Fonte: Autoria própria (2024).

A composição química do resíduo de bauxita foi fornecida pela Hydro Alunorte (Tabela 16). A composição final do agregado sintético (Tabela 17) é composta principalmente por ferro (37%), alumínio (16,9%) e silício (29,3%), o que significa que o agregado apresenta as principais proporções do resíduo.

Tabela 16 – Composição química do resíduo de bauxita.

<b>Composição</b>	<b>Teor (%)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,27
SiO <sub>2</sub>	17,72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,31
TiO <sub>2</sub>	6,89
Na <sub>2</sub> O	9,25
CaO	1,22
LOI	8,11

Fonte: Hydro Alunorte (2023).

Tabela 17 – Composição química AS-80.

<b>Composição</b>	<b>Teor (%)</b>
Na <sub>2</sub> O	7,68
MgO	0,56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,90
SiO <sub>2</sub>	29,30
SO <sub>3</sub>	0,20
K <sub>2</sub> O	0,32
CaO	1,02
TiO <sub>2</sub>	5,22
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10
MnO	0,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,00
ZrO <sub>2</sub>	1,05
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	0,11
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25

Fonte: Universidade Federal do Pará (2023).

Como já mencionado anteriormente, a resistência à compressão estimada destes concretos aos 28 dias de idade foi de 30 MPa. A partir disso, foi possível realizar a dosagem dos materiais utilizados na preparação do concreto, em que o traço unitário do concreto convencional e do concreto com fibras foi o mesmo, sendo igual a 1:1,5:2,5:0,5. A composição por metro cúbico, em peso, dos materiais utilizados é apresentada na Tabela 18.

Tabela 18 – Consumo dos materiais por metro cúbico, em peso.

Consumo (kg/m³)	Cimento	Areia	Brita	RB	Água	Fibra	a (%)
<b>BM</b> <b>1:1,5:0</b>	708,5	1062,8	0,0	-	354,3	0,0	100
<b>BCCG</b> <b>1:1,5:2,5</b>	423,4	635,1	1058,5	-	211,7	0,0	50
<b>BCCSA</b> <b>1:1,5:2,5</b>	423,4	635,1	-	1058,5	211,7	0,0	50
<b>BSFRCM</b> <b>1:1,5:0</b>	708,5	1062,8	0,0	-	354,3	79,3	100
<b>BSFRCG</b> <b>1:1,5:2,5</b>	423,4	635,1	1058,5	-	211,7	79,3	50
<b>BSFRCSA</b> <b>1:1,5:2,5</b>	423,4	635,1	-	1058,5	211,7	79,3	50

Fonte: Autoria própria (2024).

É importante destacar, que foram seguidas as recomendações da Arcerlormittal (2018) para a mistura de concretos com fibra, onde o teor de argamassa ( $a$ ) deve ser superior a 50% e a relação água cimento ( $a/c$ ) deve ser inferior a 0,50. E para o cálculo do consumo de fibras de aço foi utilizado a regra da mistura apresentada na Equação 72 (CALLISTER & RETHWISCH, 2016).

$$V_{fibra} = \frac{\frac{m_f}{\mu_f}}{\frac{m_c}{\mu_c} + \frac{m_a}{\mu_a} + \frac{m_p}{\mu_p} + H_2O + \frac{m_f}{\mu_f}} \quad (72)$$

Em que,  $V_{fibra}$  é a fração volumétrica da fibra igual a 1% para o presente estudo;  $m_f$ ,  $m_c$ ,  $m_a$  e  $m_p$  são a massa da fibra, do cimento, do agregado miúdo e do agregado graúdo, respectivamente;  $\mu_f$ ,  $\mu_c$ ,  $\mu_a$  e  $\mu_p$  são a massa específica da fibra, do cimento, da areia e do agregado graúdo, respectivamente.

### 3.5.2 Aço

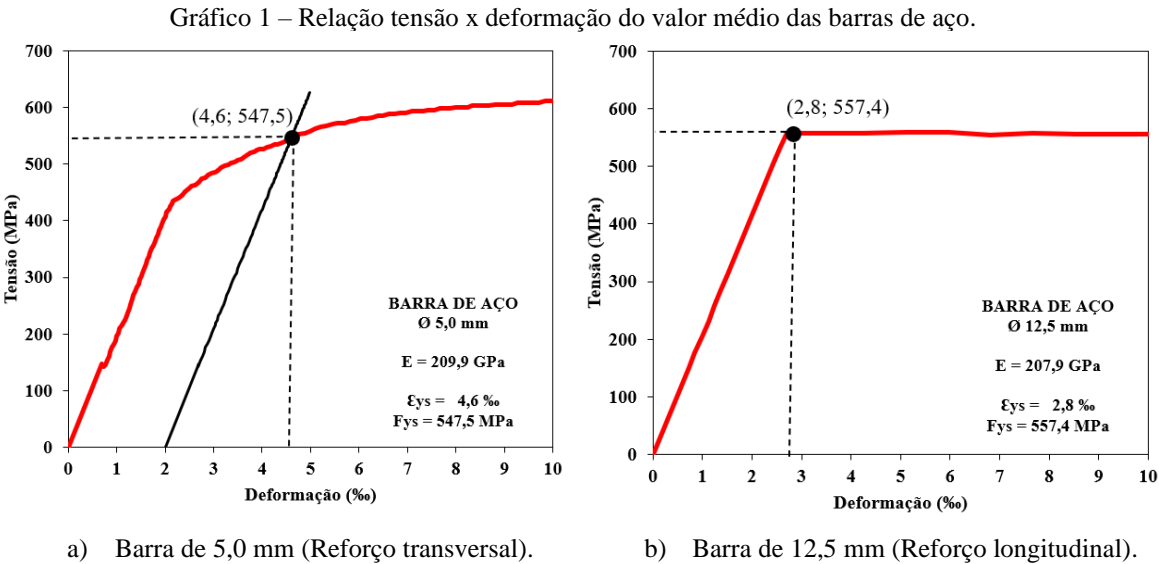
Os aços utilizados na presente pesquisa foram caracterizados através do ensaio de tração a partir de seis amostras de barras de aço, em que três amostras possuíam diâmetro igual a 5,0

mm (CA-60) (armadura transversal) e três possuíam diâmetro igual a 12,5 mm (CA50) (armadura longitudinal), ambas com comprimento igual a 600 mm e ensaiadas de acordo com as recomendações da NBR 6892-1 (ABNT, 2024). Na Tabela 19 é apresentado os resultados dos ensaios de tração uniaxial das barras de aço em que o valor estabelecido foi a média das três amostras ensaiadas e em seguida tem-se o Gráfico 1 referente a relação tensão x deformação das barras de aço.

Tabela 19 – Ensaio de tração uniaxial em barras de aço.

$\varnothing$ (mm)	$F_{ys}$ (MPa)	$\epsilon_s$ (‰)	$E_s$ (GPa)
5,0	547,5	4,6	209,9
12,5	557,4	2,8	207,9

Fonte: Autoria própria (2024).

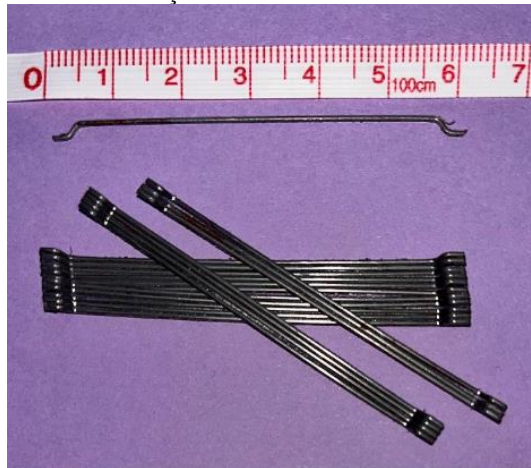


Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.5.3 Fibra de aço

A fibra de aço utilizada nas vigas de CRFA foi do tipo *hooked* (3D Dramix 80/60 BG) coladas em pente e produzidas pela Belgo Bekaert Arames. Tais fibras estão em conformidade com NBR 15530 (ABNT, 2019) e possuem comprimento igual a 60 mm e diâmetro igual a 0,75 mm, que corresponde a um fator de forma ( $l_f/d_f$ ) igual a 80 (Figura 51). Ademais, apresentam módulo de elasticidade aproximado de 210 GPa e resistência à tração de 1225 N/mm². Sendo assim, segundo a NBR 15530 (ABNT, 2019), estas fibras de aço são classificadas como do tipo A, classe I.

Figura 51 – Fibras de aço 3D Dramix 80/60 BG coladas em pente.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 3.6 PREPARO DO CONCRETO

Para o preparo do concreto foi utilizado uma betoneira com capacidade máxima de 400 litros, a mistura do concreto seguiu o recomendado pela NBR 12821 (Preparação de concreto em laboratório – Procedimento) (ABNT, 2009), em que se adicionou inicialmente o agregado graúdo e parte da água de amassamento (aproximadamente  $\frac{1}{3}$  do volume), posteriormente adicionou-se o cimento e mais aproximadamente  $\frac{1}{3}$  do volume da água, e, depois adicionou-se o agregado miúdo e o restante da água. Ressalta-se que, a fibra de aço foi o último elemento adicionado a mistura a fim de proporcionar uma melhor dispersão das fibras e minimizar a formação dos ouriços. As figuras 52, 53 e 54 representam os materiais utilizados para produção dos concretos do presente estudo.

Figura 52 – Materiais para mistura de argamassa com e sem fibra de aço.



Fonte: Autoria própria (2024).



Figura 53 – Materiais para mistura de concreto convencional com agregado do tipo brita com e sem fibra de aço.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 54 – Materiais para mistura de concreto convencional com agregado sintético de resíduo de bauxita com e sem fibra de aço.



Fonte: Autoria própria (2024).

Após a produção do concreto, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone a fim de avaliar a consistência do concreto de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020). Quanto aos corpos de prova, estes foram moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Para o ensaio de resistência à compressão ditado pela NBR 5739 (ABNT, 2018), foram moldados três corpos de prova para cada viga, totalizando dezoito corpos de prova. Da mesma forma, para o ensaio de módulo de elasticidade ditado pela NBR 8522 (ABNT, 2021), foram moldados três corpos de prova para cada viga, totalizando dezoito corpos de prova. Estes corpos de prova cilíndricos possuem dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.



Para o ensaio de flexão em três pontos com prisma entalhado ditado pela NBR 16940 (ABNT, 2021), que visa avaliar a resistência à tração na flexão para compreender a influência da fibra de aço no concreto a partir dos resultados das tensões residuais, foram moldados três prismas com dimensões (150 x 150 x 550) mm para cada viga, totalizando, dezoito primas. Ressalta-se que, os ensaios de caracterização para o estado endurecido foram realizados aos 28 dias de idade. Na Tabela 20 é apresentado o resumo do número de corpos de prova utilizados para cada ensaios de caracterização do concreto no estado endurecido.

Tabela 20 – Resumo do número de corpos de prova para os ensaios de caracterização do concreto.

<b>Concretos</b>	<b>Resistência à compressão axial (28 dias)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (28 dias)</b>	<b>Resistência à Tração na Flexão (28 dias)</b>
<b>BM</b>	3	3	3
<b>BCCG</b>	3	3	3
<b>BCCSA</b>	3	3	3
<b>BSFRCM</b>	3	3	3
<b>BSFRCG</b>	3	3	3
<b>BSFRCSA</b>	3	3	3
<b>Total</b>	18	18	18

Fonte: Autoria própria (2024).

O lançamento nas formas das vigas, dos prismas e dos corpos de prova foi realizado de forma manual. O adensamento das vigas e dos prismas aconteceram com o auxílio de um vibrador de imersão (diâmetro=40 mm e comprimento=600 mm) e o adensamento dos corpos de prova aconteceu de forma manual em que se aplicou golpes com a haste de socamento em cada camada, uniformemente distribuídas em toda seção transversal do molde. Na Figura 55 é mostrado o adensamento das vigas e dos prismas utilizando o vibrador de imersão e a finalização da concretagem para o par de vigas produzidas com agregado sintético (viga sem fibra de aço x viga com fibra de aço).

Figura 55 – Adensamento com auxílio do vibrador nas vigas e prismas e finalização da concretagem.



Fonte: Autoria própria (2024).

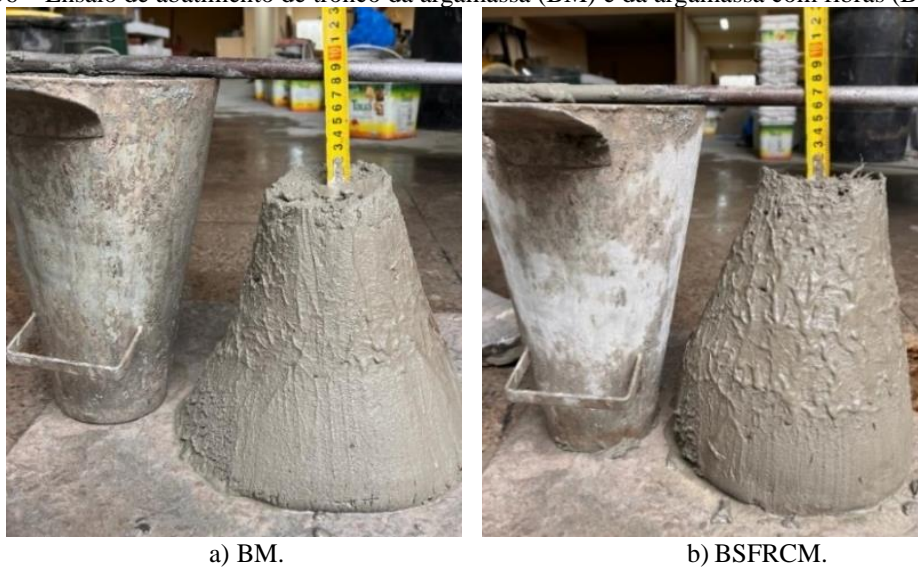
Vale ressaltar que, as formas das vigas, dos prismas e dos corpos de prova foram untadas com desmoldantes (Denver Imper) para facilitar a desforma. A cura das vigas, dos prismas e dos corpos de prova começaram após o início do endurecimento superficial do concreto sob as mesmas condições, sendo do tipo úmida, onde os elementos foram cobertos por tecidos e molhados constantemente (intervalo de  $\approx 7$  horas) por 14 dias consecutivos.

### 3.7 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

#### 3.7.1 Ensaio de abatimento do tronco de cone

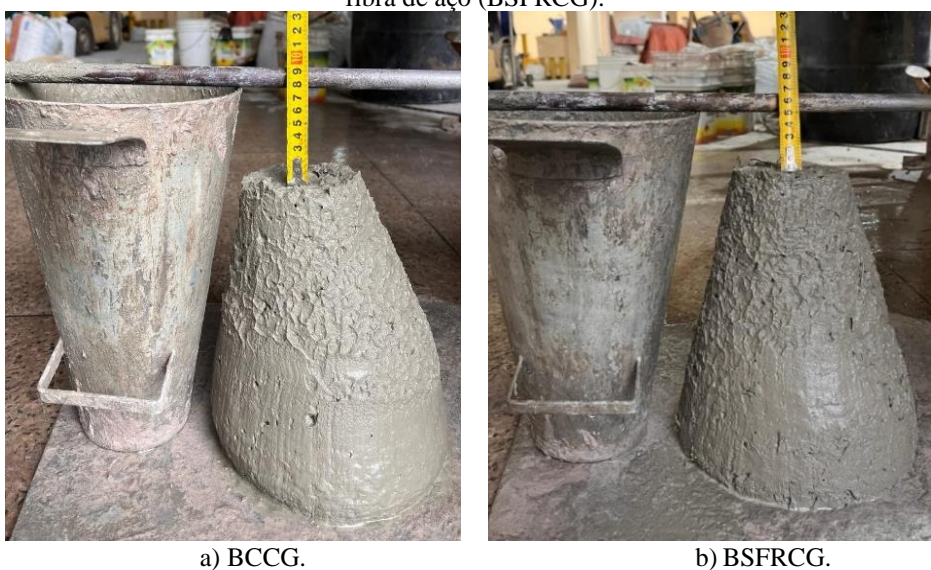
A fim de determinar a consistência dos concretos produzidos para este estudo, realizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020). O molde do tronco de cone foi preenchido em três camadas, cada uma com aproximadamente um terço da altura do molde e cada camada foi adensada com 25 golpes da haste distribuídos uniformemente sobre a seção de cada camada. As figuras 56, 57 e 58 representam o ensaio de abatimento de tronco para cada tipo de concreto produzido para o presente trabalho.

Figura 56 – Ensaio de abatimento de tronco da argamassa (BM) e da argamassa com fibras (BSFRCM).



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 57 – Ensaio de abatimento de tronco do concreto convencional (BCCG) e do concreto reforçado com fibra de aço (BSFRCG).



Fonte: Autoria própria (2024).



Figura 58 – Ensaio de abatimento de tronco do concreto convencional com agregado sintético (BCCSA) e do concreto com agregado sintético reforçado com fibra de aço (BSFRCSA).



a) BCCSA.

b) BSFRCSA.

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Tabela 21 é apresentado o resumo dos resultados referentes ao abatimento do tronco do cone dos concretos produzidos para este trabalho.

Tabela 21 – Resumo dos resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone.

Concreto	Abatimento (mm)
BM	90
BCCG	80
BCCSA	60
BSFRCM	70
BSFRCG	60
BSFRCSA	40

Fonte: Autoria própria (2024).

Através dos resultados apresentados, nota-se que ao adicionar a fibra à mistura, o concreto apresentou uma redução no abatimento de tronco, como já era esperado, pois segundo Araújo, Curado & Rodrigues (2014) a fibra se comporta como inerte, causando o intertravamento da mistura, ou seja, o concreto tornou-se menos trabalhável.

Além disso, é possível verificar que a adição do agregado também interferiu no abatimento do tronco, sendo a maior interferência do agregado sintético. Esse fato é atribuído

a elevada absorção de água que o agregado sintético de resíduo de bauxita apresenta em comparação ao agregado natural britado.

### **3.8 PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO**

#### **3.8.1 Resistência à compressão**

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), em que foram ensaiados três corpos de prova com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada viga. Ressalta-se que, a resistência à compressão foi estimada para 30 MPa para os 28 dias de idade, com a finalidade de representar um cenário prático de projeto. Na Figura 59 tem-se a representação do ensaio de compressão axial realizada na máquina de ensaios EMIC.

Figura 59 – Ensaio de compressão axial.



Fonte: Autoria própria (2024).

A análise da resistência média à compressão ( $f_{cm}$ ), ocorreu a partir dos indicadores estatísticos de média aritmética, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). Na Tabela 22 é possível observar o resumo dos resultados.

Tabela 22 – Resumo do ensaio de compressão de compressão axial.

Concreto	Tensão				$f_{cm}/f_{c,teo}^a$	$f_{cm,SFRC}/f_{cm,CC}^b$	$f_{cm,G,SA}/f_{cm,M}^c$	$f_{cm,SA}/f_{cm,G}^d$
	$f_c$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	DP	CV (%)				
BM	35,54							
	39,81	37,1	2,4	6,4	1,24	-	-	-
	35,86							
BCCG	35,81							
	32,43	35,2	2,5	7,0	1,17	-	0,95	-
	37,22							
BCCSA	37,10							
	36,94	37,4	0,7	1,8	1,25	-	1,01	1,06
	38,21							
BSFRCM	39,34							
	37,51	37,5	1,8	4,7	1,25	1,01	-	-
	35,79							
BSFRCG	35,82							
	36,76	35,4	1,6	4,4	1,18	1,01	0,94	-
	33,71							
BSFRCSA	38,94							
	35,72	37,8	1,8	4,7	1,26	1,01	1,01	1,07
	38,59							

Nota: <sup>a</sup>  $f_{cm,teo} = 30$  MPa;

<sup>b</sup>  $f_{cm,SFRC}/f_{cm,CC}$  é a razão entre a resistência à compressão do concreto com fibras e do concreto convencional;

<sup>c</sup>  $f_{cm,G,SA}/f_{cm,M}$  é a razão entre a resistência à compressão do concreto com agregado graúdo natural ou sintético em relação a argamassa;

<sup>d</sup>  $f_{cm,SA}/f_{cm,G}$  é a razão entre a resistência à compressão do concreto com agregado sintético em relação ao concreto com agregado natural.

Fonte: Autoria própria (2024).

Através da Tabela 22, percebe-se que a dispersão dos resultados para  $f_c$  foi razoável, com  $CV \in [1,8-7,0]$  %, desta forma, tem-se que  $f_{cm}$  representa satisfatoriamente a resistência média à compressão dos concretos. Também é possível contrastar o valor adotado para a resistência à compressão,  $f_{cm,teo}=30,0$  MPa, com os valores obtidos experimentalmente,  $f_{cm,exp}$ . A razão  $f_{cm,exp}/f_{cm,teo}$  evidencia que os concretos atingiram as expectativas teóricas, sendo registrado valores desta razão entre 1,17 e 1,26.

Além disso, a razão  $f_{cm,SFRC}/f_{cm,CC}$ , que representa o quociente entre a resistência à compressão média ( $f_{cm}$ ) dos concretos reforçados com fibras de aço e dos concretos convencionais, evidencia a influência das fibras na resistência à compressão. Neste estudo, a fibra de aço não alterou significativamente a resistência à compressão do concreto, apresentando valores da razão  $f_{cm,SFRC}/f_{cm,CC}$  igual a 1,01.

Do mesmo modo, as relações  $f_{cm,G,AS}/f_{cm,M}$  e  $f_{cm,AS}/f_{cm,G}$  não obtiveram alterações significativas na resistência à compressão ao alterar o tipo de agregado graúdo, porém, vale ressaltar que os concretos produzidos com agregado sintético de resíduo de bauxita apresentaram melhores resistência à compressão em comparação aos demais concretos, para a faixa granulométrica adotada neste estudo.

### 3.8.2 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2021), em que também foram ensaiados três corpos de prova para cada viga produzida com dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. A Figura 60 representa o ensaio de módulo de elasticidade dos corpos de prova na máquina de ensaios EMIC.

Figura 60 – Ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: Autoria própria (2024).

A partir da realização do ensaio de módulo de elasticidade foi possível obter os valores de módulo de elasticidade médio ( $E_{cm}$ ) presentes na Tabela 23. Para este estudo foi utilizado a metodologia A da NBR 8522 (ABNT, 2021), que tem como característica a fixação da tensão ( $\sigma_a$ ) em 0,5MPa.

Tabela 23 – Resumo do ensaio de módulo de elasticidade.

Concreto	Módulo de Elasticidade				$E_{cm,SFRC}/E_{cm,CC}^a$	$E_{cm,G,SA}/E_{cm,M}^b$	$E_{cm,SA}/E_{cm,G}^c$
	$E_c$ (GPa)	$E_{cm}$ (GPa)	DP	CV (%)			
BM	19,4	19,3	0,7	3,5	-	-	-
	20,0						
	18,7						
BCCG	28,5	30,3	1,8	5,8	-	1,57	-
	32,1						
	30,5						
BCCSA	23,2	24,0	0,7	2,9	-	1,24	0,79
	24,4						
	24,5						
BSFRCM	21,3	21,6	0,3	1,6	1,12	-	-
	21,9						
	21,8						
BSFRCG	31,3	31,6	1,8	5,8	1,04	1,46	-
	33,5						
	29,9						
BSFRCSA	24,5	24,6	2,3	9,2	1,02	1,14	0,78
	22,3						
	26,9						

**Nota:** <sup>a</sup>  $E_{cm,SFRC}/E_{cm,CC}$  é a razão entre o módulo de elasticidade do concreto com fibras e do concreto convencional;

<sup>b</sup>  $E_{cm,G,SA}/E_{cm,M}$  é a razão entre o módulo de elasticidade do concreto com agregado graúdo natural ou sintético em relação a argamassa;

<sup>c</sup>  $E_{cm,SA}/E_{cm,G}$  é a razão entre o módulo de elasticidade do concreto com agregado sintético em relação ao concreto com agregado natural.

Fonte: Autoria própria (2024).

O módulo de elasticidade reflete a rigidez do material, ou seja, a capacidade de deformar temporariamente sob a ação de uma carga e retornar à sua forma original quando a carga é removida. Através da Tabela 23, percebe-se que a dispersão dos resultados para  $E_{cm}$  foi razoável, com  $CV \in [1,6-9,2]$  %. Quanto aos concretos reforçados com fibra de aço, estes apresentaram pequenos acréscimos nos valores de módulo de elasticidade com intervalo da razão  $E_{m,SFRC}/E_{m,CC} \in [1,02-1,12]$ .



Ademais, através das razões  $E_{m,G,SA}/E_{m,M}$  e  $E_{m,SA}/E_{m,G}$  nota-se que, quando foi utilizado a brita como agregado graúdo houve um acréscimo no módulo de elasticidade comparado com os demais concretos produzidos, ou seja, percebe-se que o agregado sintético não foi tão vantajoso no quesito módulo de elasticidade em comparação com o agregado natural. Mehta & Monteiro destacam que o módulo de elasticidade pode ser influenciado pela porosidade do agregado, a matriz de pasta de cimento e a zona de transição interfacial.

### 3.8.3 Resistência residual à tração na flexão em três pontos do concreto

O ensaio de flexão em três pontos com prisma entalhado foi realizado com a finalidade de melhor compreender o comportamento pós fissura dos concretos, assim como a influência da fibra de aço no concreto a partir dos resultados das tensões residuais. Foram produzidos, de acordo com a NBR 16940 (ABNT, 2021), três prismas com dimensões (150 x 150 x 550) mm. Ressalta-se que o entalhe, executado com o auxílio de uma serra, foi de 25 mm para todos os prismas e que os ensaios foram realizados aos 28 dias de idade. Na Figura 61 tem-se a representação do ensaio de flexão em três pontos do prisma na máquina universal de ensaios.

Figura 61 – Ensaio de flexão em três pontos no prisma.



Fonte: Autoria própria (2024).

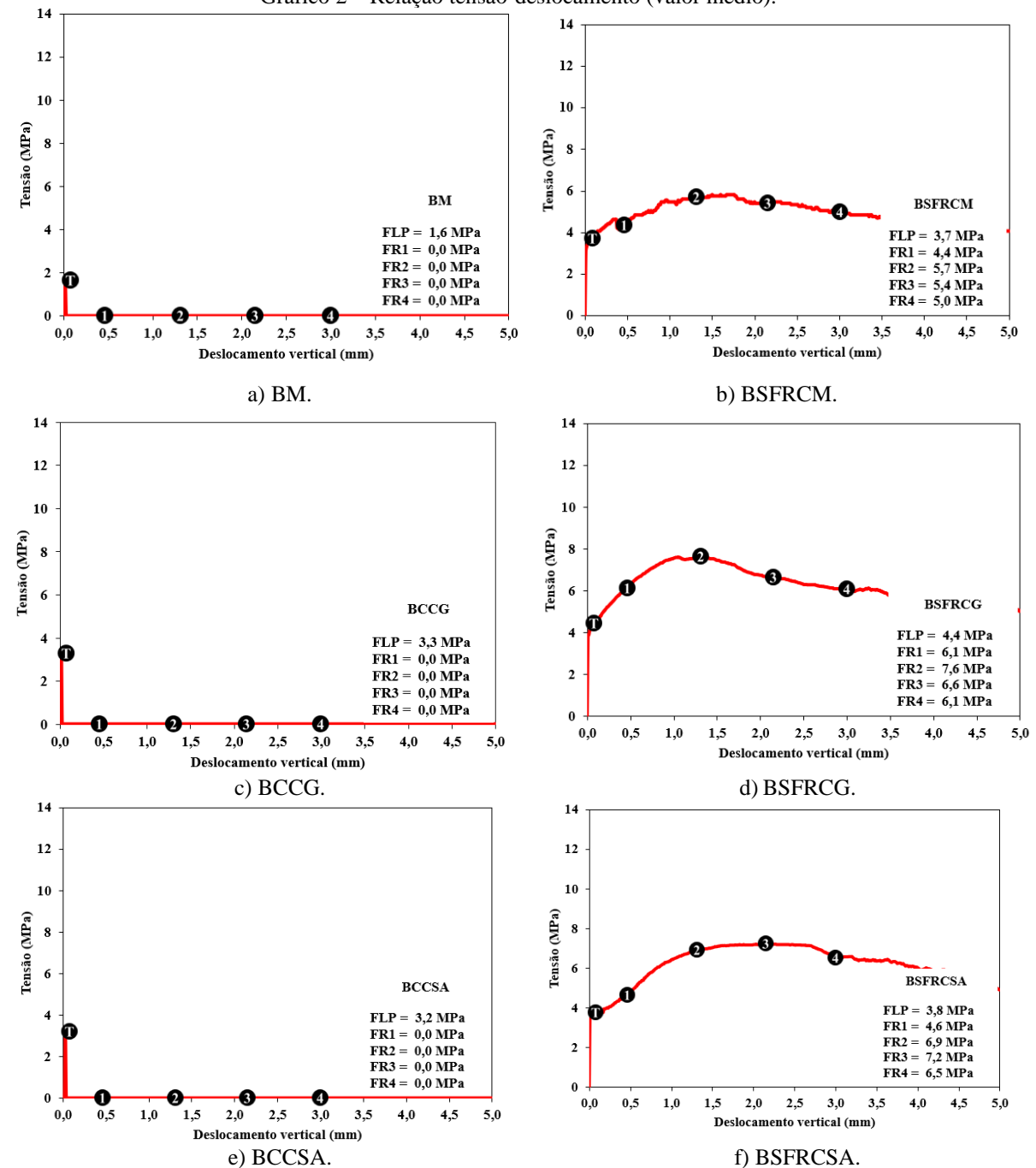
Nos modelos de cálculo, a resposta pós-fissura é abordada a partir das tensões residuais  $f_{Ri}$  ( $i=1$  até 4), que são definidas a partir das relações carga-deslocamento ( $f-\delta$ ) ou carga-CMOD. Nesse estudo, os valores de  $f_{Ri}$  foram obtidos da relação  $f-\delta$ , para os deslocamentos  $\delta_1=0,46$  mm,  $\delta_2=1,31$  mm,  $\delta_3=2,15$  mm e  $\delta_4=3,0$  mm, conforme NBR 16940 (ABNT, 2021). O deslocamento  $\delta$  foi monitorado por um potenciômetro (leitura máxima de 108 mm e precisão de 0,01 mm), que foi acoplado ao prisma a partir do yoke, dispositivo de fixação. O Gráfico 2

representa a relação média entre a tensão e o deslocamento dos prismas ensaiados, sendo, a tensão calculada de acordo com a Equação 73.

$$f = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot (h_{sp})^2} \tag{73}$$

Em que,  $P$  é a carga monitorada no ensaio,  $L$  é o vão do prisma igual a 550 mm,  $b$  é a largura do prisma igual a 150 mm e  $h_{sp}$  é a altura do prisma na seção do entalhe ( $h_{sp}=150 - 25=125$  mm).

Gráfico 2 – Relação tensão-deslocamento (valor médio).



Fonte: Autoria própria (2024).

O resumo do resultado das tensões residuais é mostrado na Tabela 24, juntamente com a tensão  $f_{LP}$ , que corresponde ao limite de proporcionalidade dos concretos. Segundo a NBR 16940 (ABNT, 2021),  $f_{LP}$  representa a maior tensão encontrada na relação  $f$ - $\delta$  entre o intervalo  $\delta \in [0-0,05]$  mm.

Tabela 24 – Resumo das tensões (Valores médios).

<b>Prisma</b>	$f_{LP,m}$ (MPa)	$f_{LP,m,SFRC}/f_{LP,m,CC}$	$f_{r1}$ (MPa)	$f_{r2}$ (MPa)	$f_{r3}$ (MPa)	$f_{r4}$ (MPa)
<b>BM</b>	1,6	-	-	-	-	-
<b>BCCG</b>	3,3	-	-	-	-	-
<b>BCCSA</b>	3,2	-	-	-	-	-
<b>BSFRCM</b>	3,7	2,3	4,4	5,7	5,4	5,0
<b>BSFRCG</b>	4,4	1,4	6,1	7,6	6,6	6,1
<b>BSFRCSA</b>	3,8	1,2	4,6	6,9	7,2	6,5

Fonte: Autoria própria (2024).

Para os concretos convencionais, percebe-se que os concretos convencionais com agregado natural (BCCG) e sintético (BCCSA) apresentaram valores próximos de  $f_{LP}$ , porém em relação a argamassa (BM) nota-se que a inserção do agregado graúdo influenciou no aumento da tensão  $f_{LP}$ .

Em relação aos concretos com fibras nota-se alterações expressivas, sendo a razão  $f_{LP,m,SFRC}/f_{LP,m,CC} \in [1,2-2,3]$ . Ademais, o prisma referente ao concreto com agregado natural e fibras de aço (BSFRCG) apresentou maior valor de tensão  $f_{LP}$  dentre os concretos.

Para as tensões residuais, os maiores valores das tensões  $f_{r1}$  e  $f_{r2}$  foram referentes ao concreto BSFRCG, enquanto que para as tensões  $f_{r3}$  e  $f_{r4}$ , os maiores valores foram referentes ao concreto BSFRCSA. Ressalta-se que, no trecho pós-fissura da relação  $f$ - $\delta$  foram observados, conforme esperado, padrões distintos de comportamento entre os concretos simples e os reforçados com fibras. De um modo geral, são observados para os concretos com fibra de aço comportamento com resposta pós-fissura com endurecimento (*hardening*).

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS VIGAS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da instrumentação das vigas, que possibilitam a avaliação da influência do tipo de agregado graúdo e do consumo de fibras no comportamento estrutural. Para este fim, analisa-se o deslocamento vertical das vigas, a deformação da barra de aço longitudinal e transversal, a deformação do concreto, o mapeamento das fissuras e o modo de ruptura, e, por fim, as cargas últimas e a capacidade resistente ao cisalhamento das vigas.

### 4.1 DESLOCAMENTO VERTICAL DAS VIGAS

Como mencionado anteriormente, o deslocamento vertical das vigas foi obtido a partir de potenciômetros fixados em uma estrutura secundária independente do sistema de ensaio das vigas para não haver interferência na leitura. Tal posicionamento permitiu verificar se o ensaio aconteceu de forma coerente. Ressalta-se que, as vigas possuem o mesmo momento de inércia, sendo o concreto a única variável na rigidez de flexão ( $E \cdot I$ ) devido a composição do material, diferenciando pelo tipo de agregado e pela adição das fibras de aço.

Os resultados das leituras fornecem os deslocamentos verticais para cada etapa de carga, observados em três pontos, sendo o primeiro ( $D_1$ ) abaixo da aplicação de carga, o segundo ( $D_2$ ) no centro do vão, e o terceiro ( $D_3$ ) no ponto simétrico a aplicação de carga. No Gráfico 3 é apresentado a relação carga aplicada x deslocamento vertical dos três potenciômetros utilizados no ensaio.

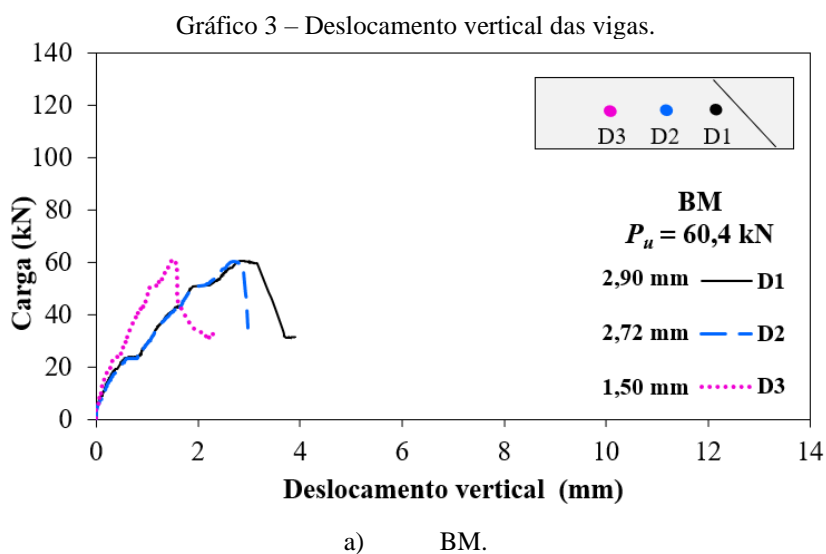
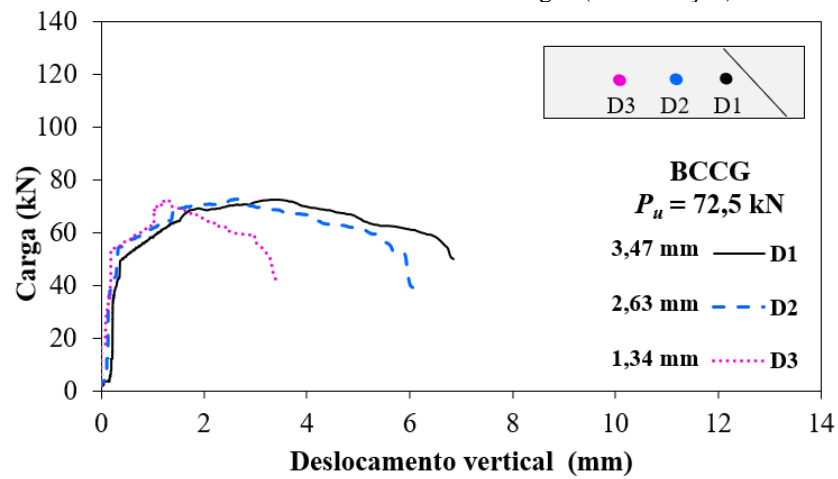
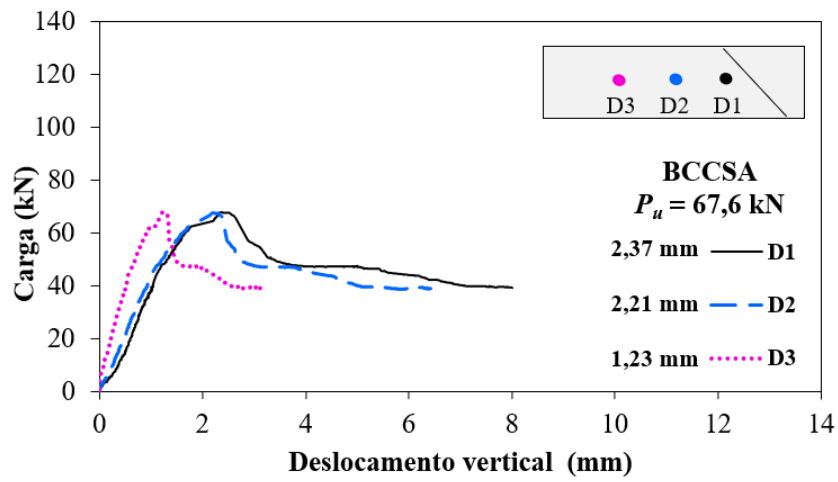


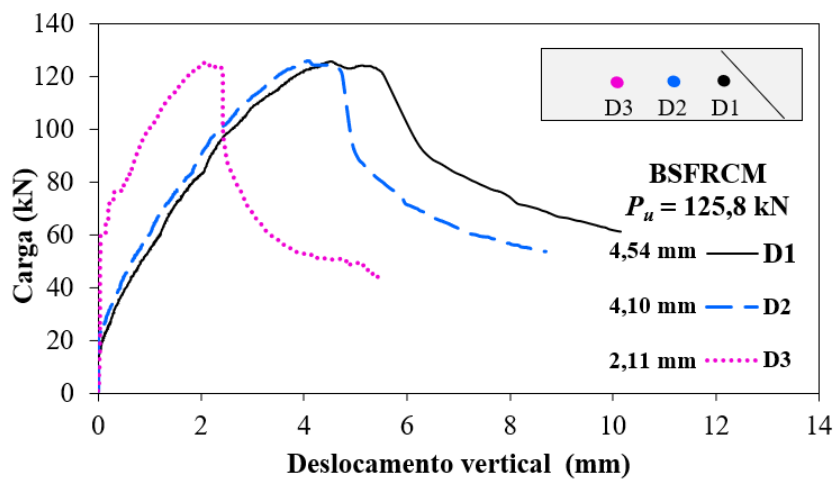
Gráfico 3 – Deslocamento vertical das vigas (Continuação).



b) BCCG.

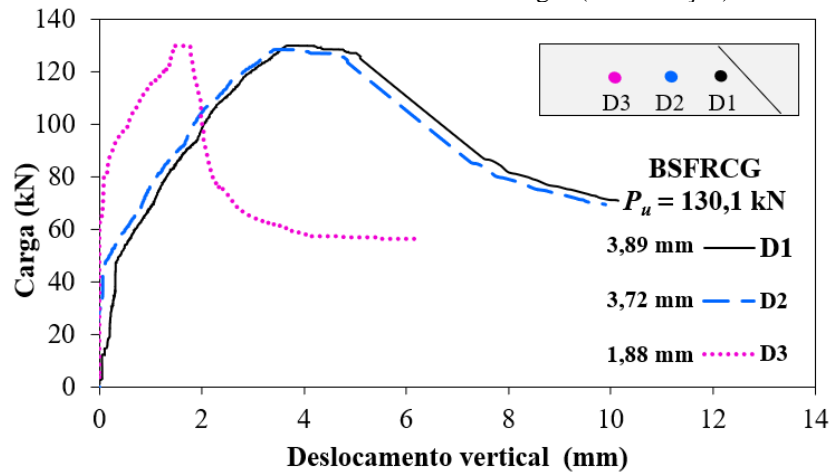


c) BCCSA.

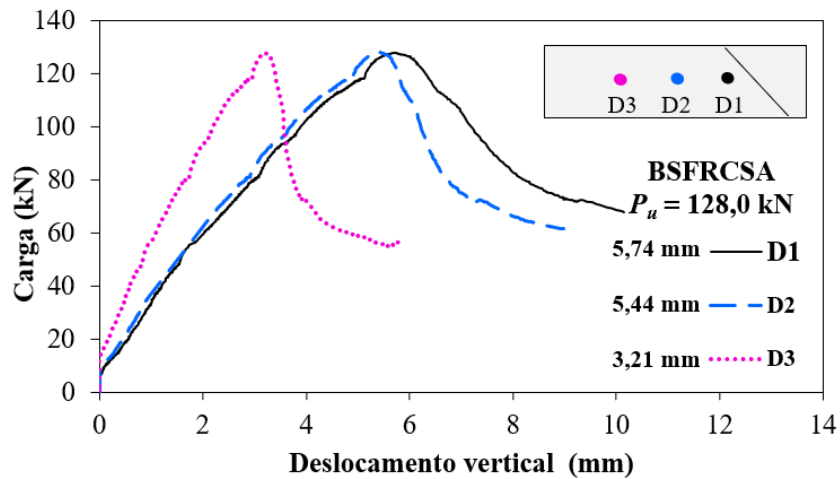


d) BSFRCM.

Gráfico 3 – Deslocamento vertical das vigas (Continuação).



e) BSFRCG.



f) BSFRCSA.

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Tabela 25 é apresentado um resumo dos resultados dos deslocamentos verticais das vigas, em que foi possível confirmar que a teoria ocorreu na prática, pois o resultado para deflexão observado no ponto de aplicação de carga ( $D_1$ ) foi maior do que a deflexão nos demais pontos ( $D_2$  e  $D_3$ ).

Tabela 25 – Resultados carga x deslocamento.

Viga	$P_u$ (kN)	Deflexão			$D_{1,SFRC}/D_{1,CC}^a$	$D_{1,G,SA}/D_{1,M}^b$	$D_{1,SA}/D_{1,G}^c$
		$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$D_3$ (mm)			
BM	60,4	2,90	2,72	1,50	-	-	-
BCCG	72,5	3,47	2,63	1,34	-	1,20	-
BCCSA	67,6	2,37	2,21	1,23	-	0,82	0,68
BSFRCM	125,8	4,54	4,10	2,11	1,57	-	-

Tabela 25 – Resultados carga x deslocamento (Continuação).

Viga	$P_u$ (kN)	Deflexão			$D_{1,SFRC}/D_{1,CC}^a$	$D_{1,G,SA}/D_{1,M}^b$	$D_{1,SA}/D_{1,G}^c$
		$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$D_3$ (mm)			
<b>BSFRCG</b>	130,1	3,89	3,72	1,88	1,12	0,86	-
<b>BSFRCSA</b>	128,0	5,74	5,44	3,21	2,42	1,26	1,47

**Nota:** <sup>a</sup>  $D_{1,SFRC}/D_{1,CC}$  é a razão entre o deslocamento do concreto com fibras e do concreto convencional no ponto de aplicação de carga;

<sup>b</sup>  $D_{1,G,SA}/D_{1,M}$  é a razão entre o deslocamento do concreto com agregado graúdo natural ou sintético em relação a argamassa no ponto de aplicação de carga;

<sup>c</sup>  $D_{1,SA}/D_{1,G}$  é a razão entre o deslocamento do concreto com agregado sintético em relação ao concreto com agregado natural no ponto de aplicação de carga.

Fonte: Autoria própria (2024).

Para as vigas deste trabalho, a deflexão limite é igual a 6,0 mm para uma extensão de 1500 mm, de acordo com os critérios de aceitabilidade sensorial da NBR 6118 (ABNT, 2023), logo, a partir do exposto pode-se observar que o máximo deslocamento ocorreu na viga BSFRCSA igual a 5,74 mm, dentro do limite estabelecido pela normativa.

Em relação a razão  $D_{1,SFRC}/D_{1,CC} \in [1,12-2,42]$ , percebe-se que houve um acréscimo nos valores de deslocamento com a inserção das fibras de aço ao concreto, sendo a viga de agregado sintético a que apresentou maiores acréscimos de deslocamento.

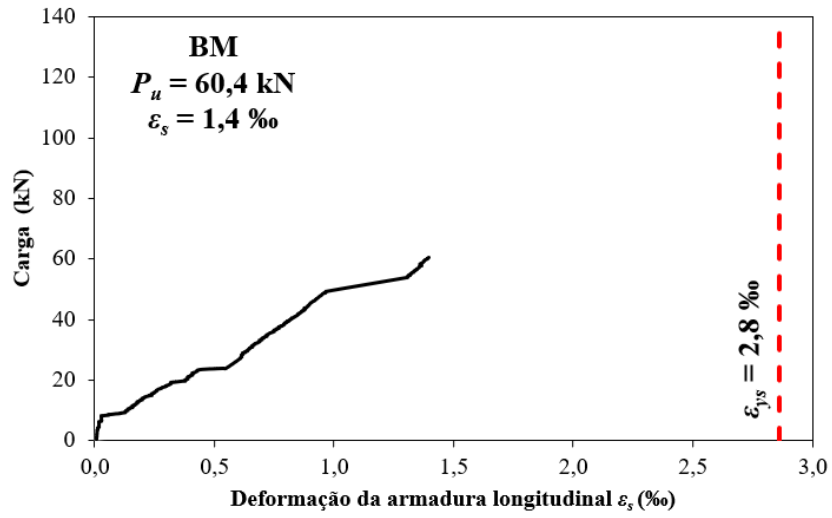
Em relação aos concretos convencionais, o menor deslocamento foi da viga BCCSA, apresentando um deslocamento menor 18% e 32% do que as vigas BM e BCCG, respectivamente. Já para as vigas de concreto reforçado com fibras de aço, o menor deslocamento foi da viga BSFRCG, apresentando um deslocamento menor 14% e 32% do que a viga BSFRCM e BSFRCSA, respectivamente.

## 4.2 DEFORMAÇÕES

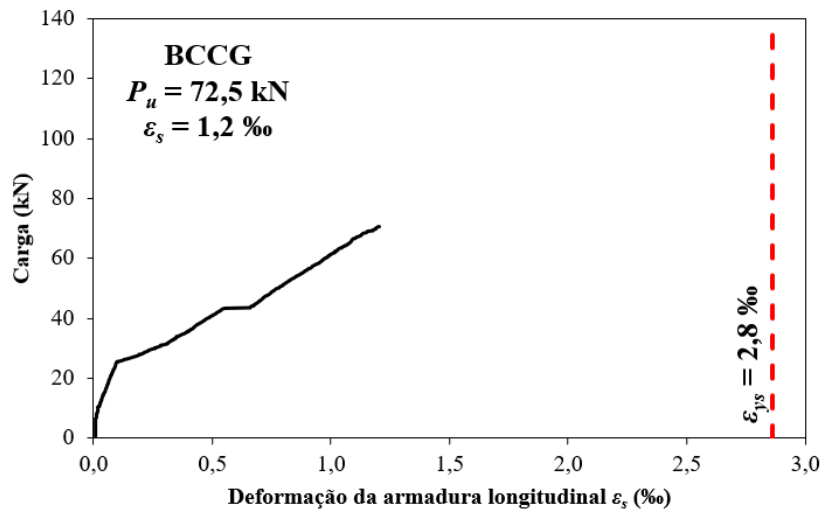
### 4.2.1 Armadura longitudinal

Para verificar a solicitação da armadura longitudinal de cada viga, foi instalado um extensômetro na barra de aço posicionada no alinhamento do ponto de aplicação de carga. No Gráfico 4 é apresentado a evolução das deformações de tração na armadura de flexão a medida que o carregamento aumenta.

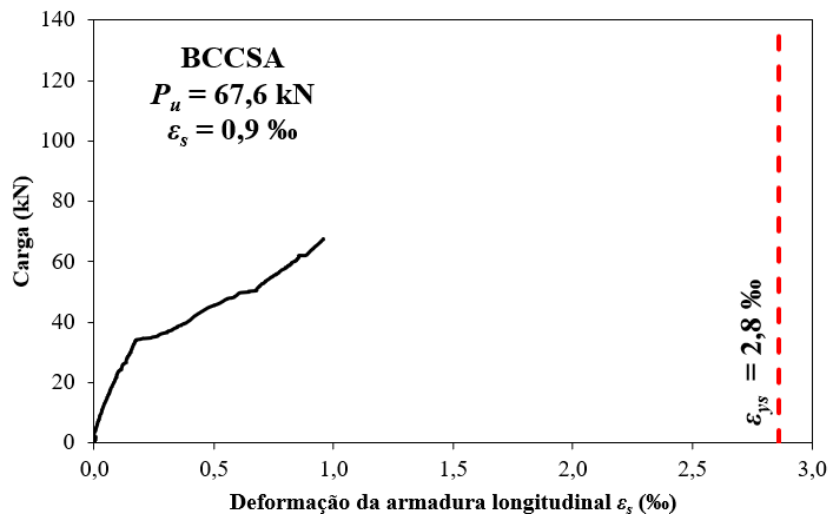
Gráfico 4 – Deformação da armadura longitudinal.



a) BM.



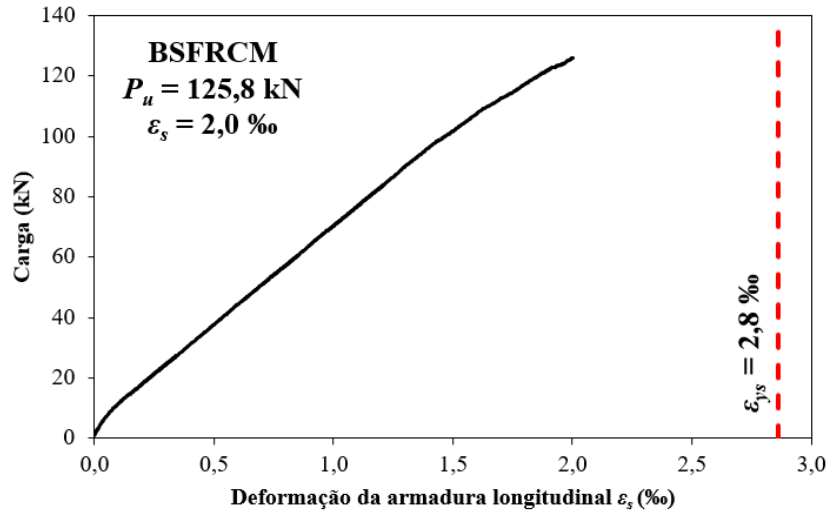
b) BCCG.



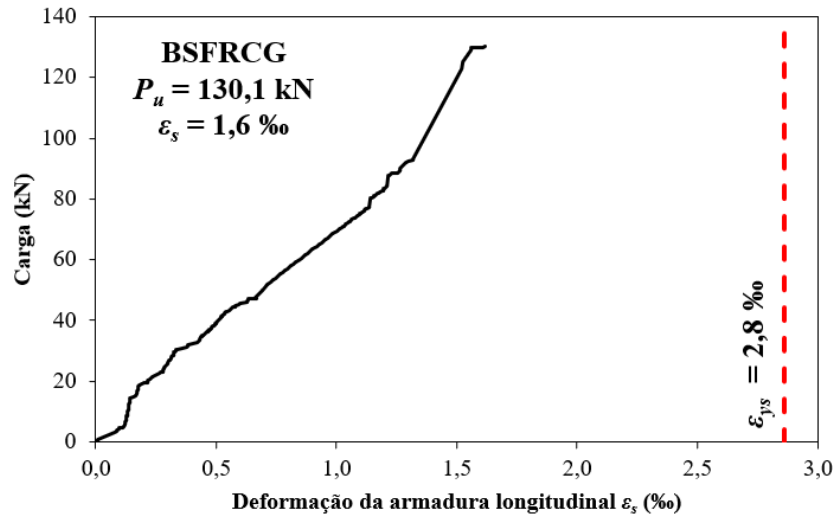
c) BCCSA.



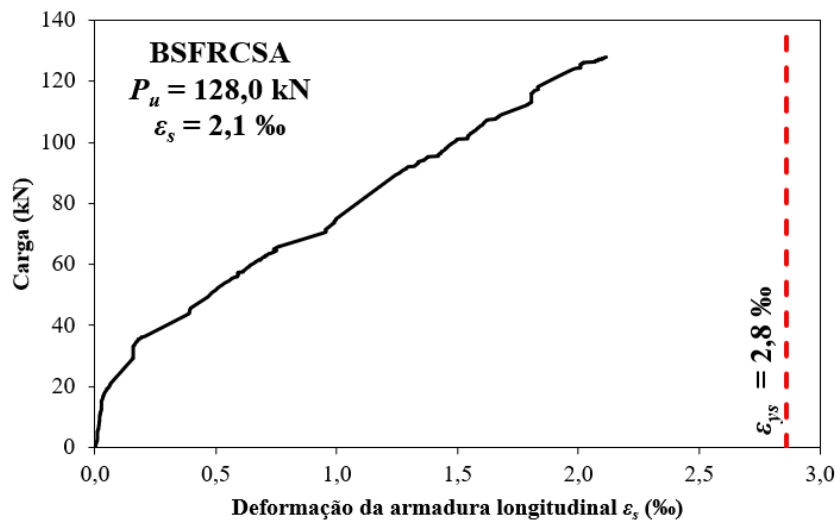
Gráfico 4 – Deformação da armadura longitudinal (Continuação).



d) BSFRM.



e) BSFRCG.



f) BSFRCSA.

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Tabela 26 é apresentado o resumo dos valores de deformação última registrado para as vigas do presente estudo, em que é possível observar que as vigas com fibras de aço tiveram uma maior solicitação da armadura de flexão seguida de um aumento significativo na carga última em relação as vigas sem fibras.

Tabela 26 – Caracterização da relação  $P_u \times \epsilon_s$ .

Viga	$P_u$ (kN)	$\epsilon_s$ (‰)	$\epsilon_{s,SFRC}/\epsilon_{s,CC}$	$\epsilon_{s,G,SA}/\epsilon_{s,M}$	$\epsilon_{s,SA}/\epsilon_{s,G}$	Modo de Ruptura
<b>BM</b>	60,4	1,4	-	-	-	Cisalhamento
<b>BCCG</b>	72,5	1,2	-	0,86	-	Cisalhamento
<b>BCCSA</b>	67,6	0,9	-	0,64	0,75	Cisalhamento
<b>BSFRCM</b>	125,8	2,0	1,43	-	-	Cisalhamento
<b>BSFRCG</b>	130,1	1,6	1,33	0,80	-	Cisalhamento
<b>BSFRCSA</b>	128,0	2,1	2,33	1,05	1,31	Cisalhamento

Fonte: Autoria própria (2024).

Através da razão  $\epsilon_{s,SFRC}/\epsilon_{s,CC}$  nota-se que a adição de 1,0% de fibra de aço ao concreto acarretou em um acréscimo de 43%, 33% e 133% na deformação do aço longitudinal das vigas de argamassa, concreto com agregado graúdo natural e concreto com agregado sintético, respectivamente.

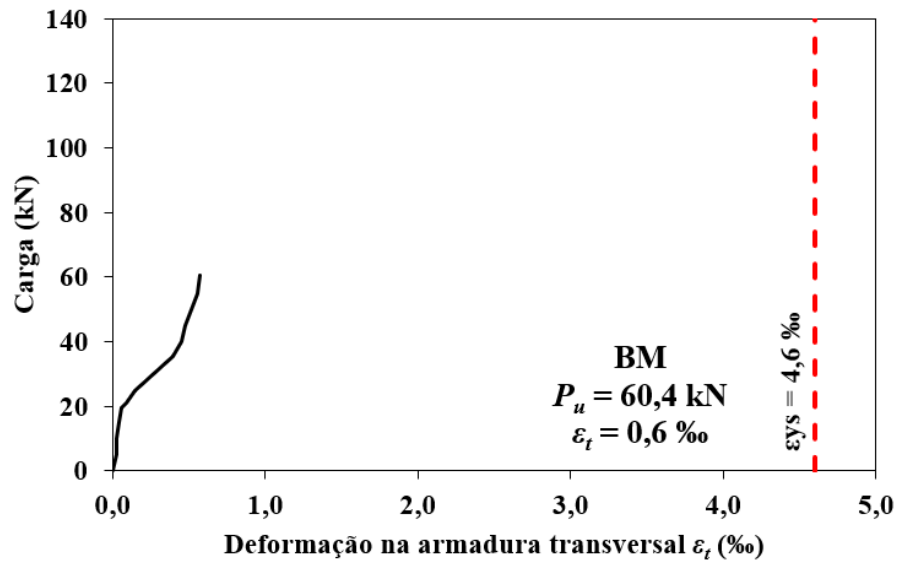
Quanto à razão  $\epsilon_{s,G,SA}/\epsilon_{s,M}$  e  $\epsilon_{s,SA}/\epsilon_{s,G}$  é possível observar que, a viga BM apresentou maior solicitação da barra de aço longitudinal ao analisar as vigas sem fibras, enquanto que a viga BCCSA apresentou menor solicitação. Já para as vigas com fibra, percebeu-se que as vigas BSFRCM e BSFRCSA apresentaram maiores solicitações da barra de aço com valores próximos de deformação ( $\approx 2,00\%$ ), enquanto que a viga BSFRCG apresentou menor solicitação.

Ressalta-se que, nenhuma das barras monitoradas pelos EERs excedeu o limite de escoamento igual a 2,8 ‰ para o aço CA-50 utilizado nesta armadura, e todas as vigas tiveram o modo de ruptura por cisalhamento, como previsto.

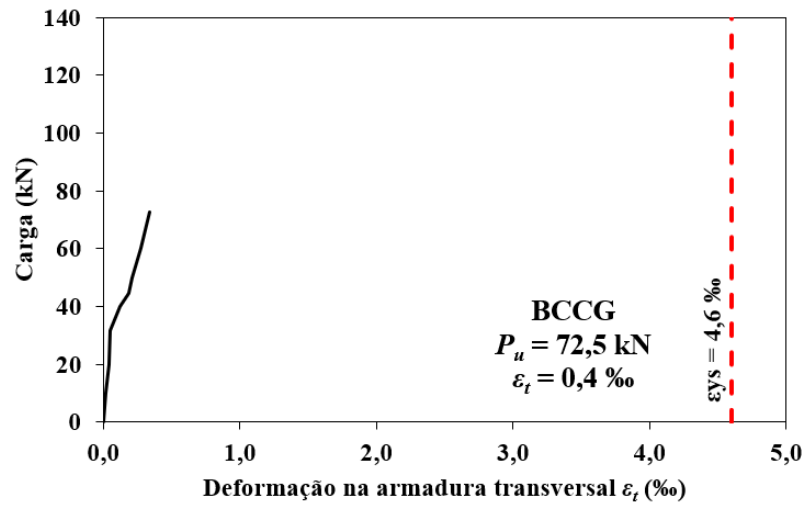
#### 4.2.2 Armadura transversal

Apesar do presente estudo não utilizar armadura transversal na região de estudo (friso), foi instalado um extensômetro no primeiro estribo, localizado no ponto de aplicação de carga, para verificar a solicitação da armadura transversal. Os resultados, expresso pela relação carga-deformação da armadura transversal, são apresentados no Gráfico 5.

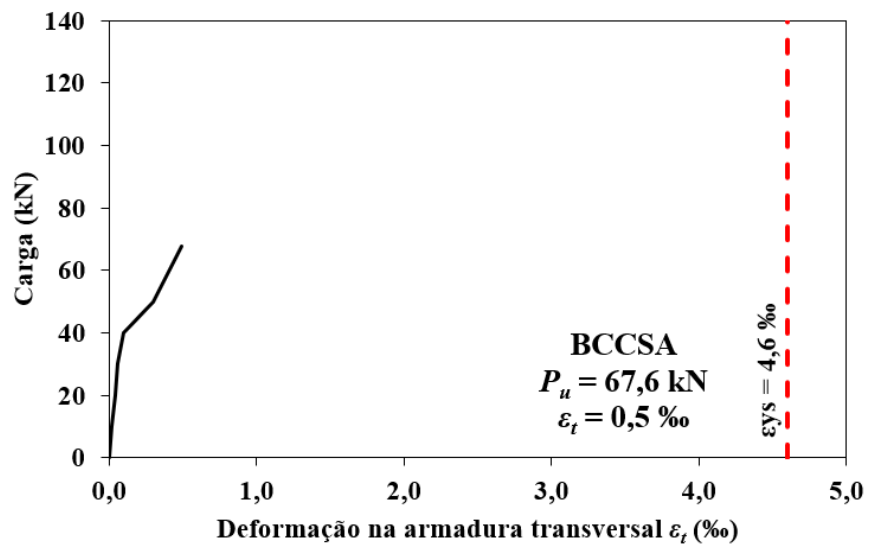
Gráfico 5 – Deformação da armadura transversal.



a) BM.

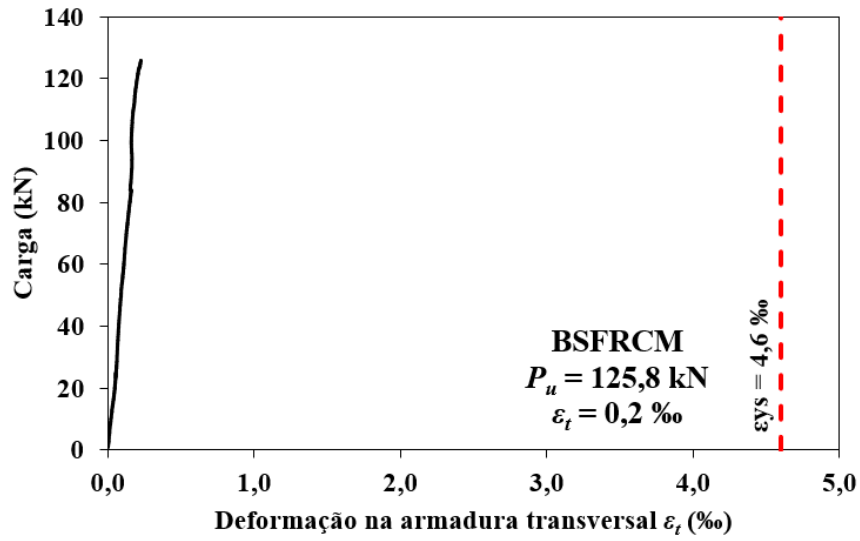


b) BCCG.

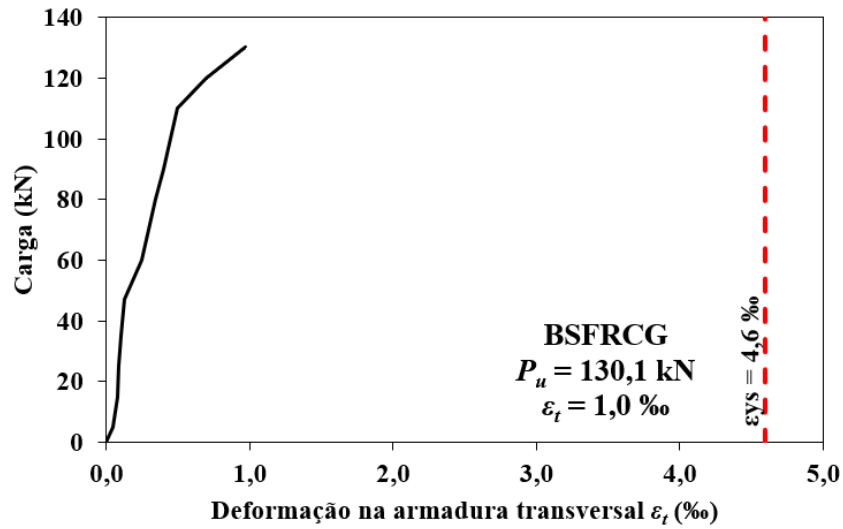


c) BCCSA.

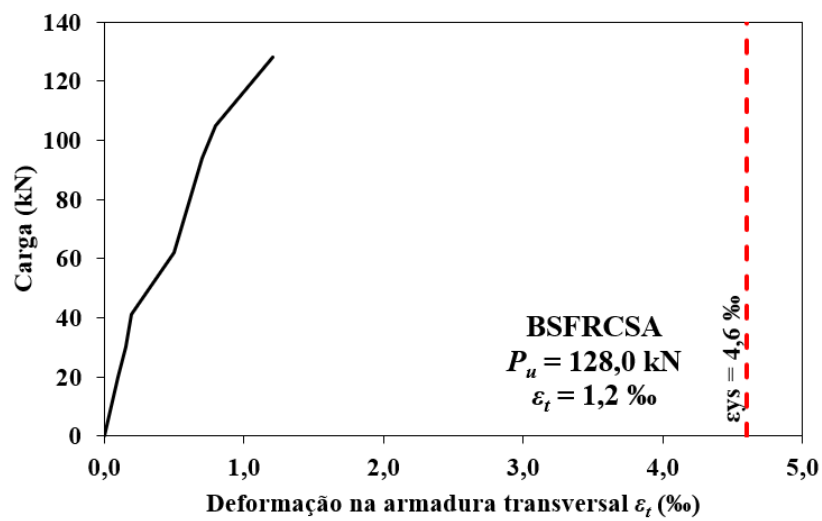
Gráfico 5 – Deformação da armadura transversal (Continuação).



d) BSFRMCM.



e) BSFRCG.



f) BSFRCSA.

Fonte: Autoria própria (2024).

O comportamento da armadura transversal está relacionado com a formação e evolução das fissuras inclinadas. Antes da interceptação da fissura na seção, especula-se não haver, ou haver uma contribuição mínima da armadura na resistência ao cisalhamento dessas vigas. Nesse instante, os esforços transversais são resistidos fundamentalmente pelas parcelas de resistência correspondentes ao concreto não fissurado, ao engrenamento entre os agregados e ao efeito de pino. Na Tabela 27 é apresentado o resumo das deformações da armadura transversal situada no ponto de aplicação de carga das vigas.

Tabela 27 – Caracterização da relação  $P_u \times \varepsilon_t$ .

<b>Viga</b>	<b><math>P_u</math> (kN)</b>	<b><math>\varepsilon_t</math> (‰)</b>	<b><math>\varepsilon_{t, \text{SFRC}}/\varepsilon_{t, \text{CC}}</math></b>	<b><math>\varepsilon_{t, \text{G,SA}}/\varepsilon_{t, \text{M}}</math></b>	<b><math>\varepsilon_{t, \text{SA}}/\varepsilon_{t, \text{G}}</math></b>
<b>BM</b>	60,4	0,6	-	-	-
<b>BCCG</b>	72,6	0,4	-	0,67	-
<b>BCCSA</b>	67,6	0,5	-	0,83	1,25
<b>BSFRCM</b>	125,8	0,2	0,33	-	-
<b>BSFRCG</b>	130,1	1,0	2,50	5,00	-
<b>BSFRCSA</b>	128,0	1,2	2,40	6,00	1,20

Fonte: Autoria própria (2024).

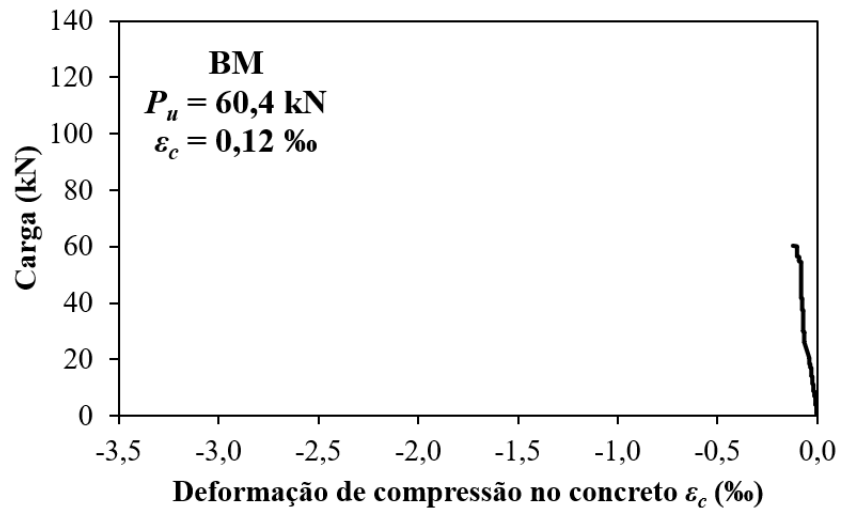
Examinando a deformação da armadura transversal, verifica-se que as vigas sem fibras (BM, BCCG e BCCSA) apresentaram valores aproximados em um intervalo entre 0,4‰ e 0,6‰, diferentemente das vigas com fibras que apresentaram intervalo entre 0,2‰ e 1,2‰, sendo a viga BSFRCSA a de maior solicitação. Observa-se também que, nenhuma das barras monitoradas pelos EERt excedeu o limite de escoamento igual a 4,6‰ para o aço CA-60 utilizado nesta armadura.

É importante destacar que, a viga de argamassa com fibra (BSFRCM) apresentou menor solicitação do estribo do que a viga sem fibra (BM). Para Gomes (2013), este fato significa que o mecanismo de reforço proporcionado pelas fibras de aço aliviou de forma mais efetiva os esforços nas armaduras.

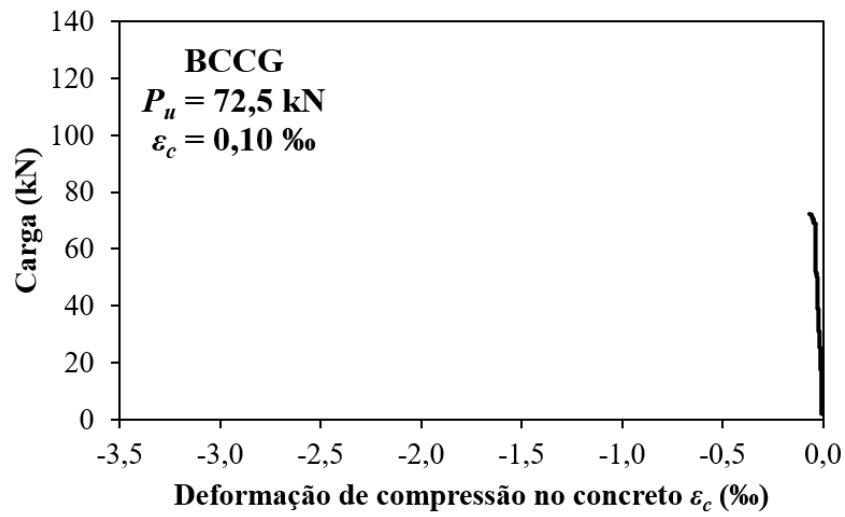
#### 4.2.3 Concreto

Como mencionado em seções anteriores, para monitorar as deformações do concreto foi utilizado um extensômetro distante 50 mm da aplicação da carga. Destaca-se que, as deformações do concreto ficaram abaixo da deformação limite para esmagamento do concreto (3,5 ‰) em todas as vigas, variando as deformações de acordo com a rigidez de cada elemento, conforme observado nos diagramas carga-deformação (Gráfico 6).

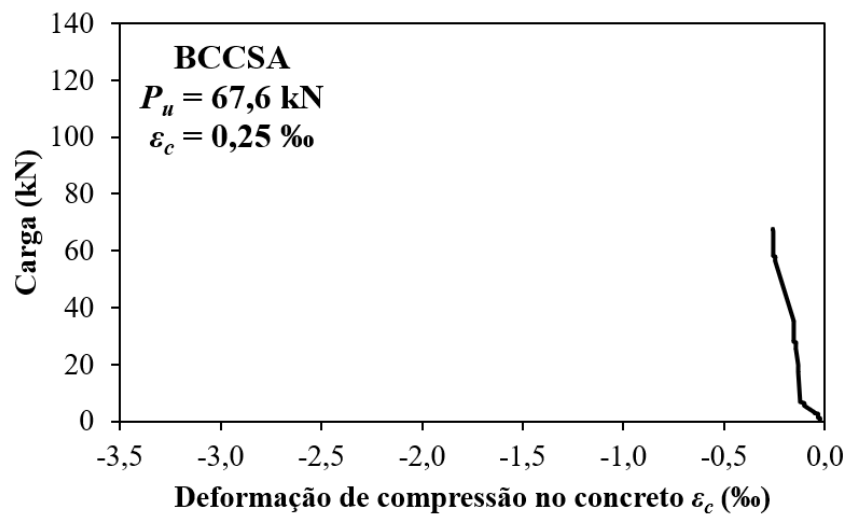
Gráfico 6 – Deformação do concreto.



a) BM.

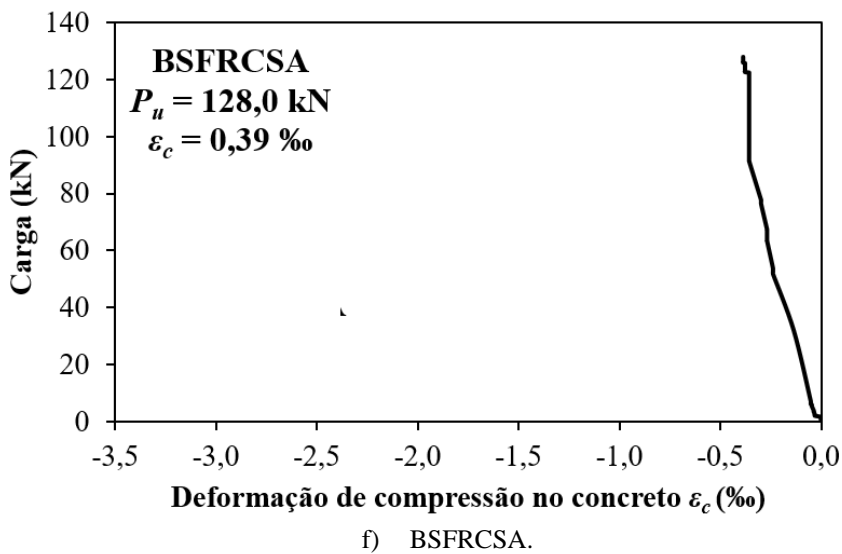
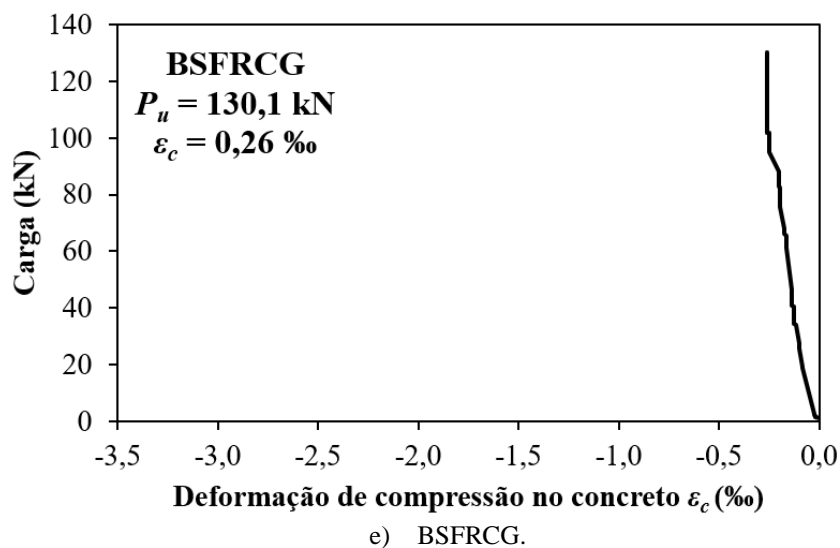
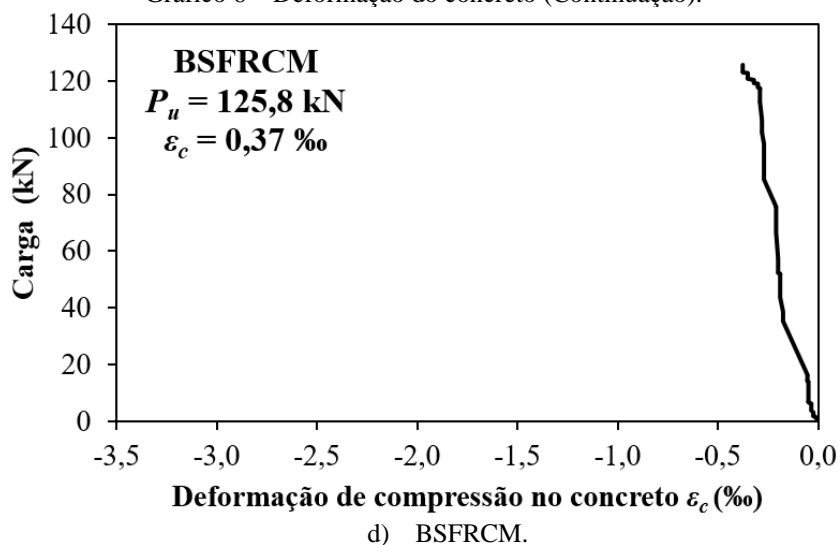


b) BCCG.



c) BCCSA.

Gráfico 6 – Deformação do concreto (Continuação).



Fonte: Autoria própria (2024).

Na Tabela 28 é apresentado o resumo das deformações do concreto das vigas, em que é possível observar que as vigas com agregado sintético (BCCSA e BSFRCSA) apresentaram maiores deformações tanto na viga de concreto convencional, como na viga com adição de fibras, e as vigas com agregado natural (BCCG e BSFRCG) apresentaram menores valores de deformação do concreto.

Tabela 28 – Caracterização da relação  $P_u \times \varepsilon_c$ .

Viga	$P_u$ (kN)	$\varepsilon_c$ (‰)	$\varepsilon_{c,SFRC}/\varepsilon_{c,CC}$	$\varepsilon_{c,G,SA}/\varepsilon_{c,M}$	$\varepsilon_{c,SA}/\varepsilon_{c,G}$
<b>BM</b>	60,4	0,12	-	-	-
<b>BCCG</b>	72,5	0,10	-	0,83	-
<b>BCCSA</b>	67,6	0,25	-	2,08	2,50
<b>BSFRCM</b>	125,8	0,37	3,08	-	-
<b>BSFRCG</b>	130,1	0,26	2,60	0,70	-
<b>BSFRCSA</b>	128,0	0,39	1,56	1,05	1,50

Fonte: Autoria própria (2024).

Em relação a razão  $\varepsilon_{c,SFRC}/\varepsilon_{c,CC}$ , percebe-se que as vigas de concreto com fibras de aço apresentaram acréscimos na deformação do concreto em relação as vigas de concreto convencional, sendo a razão  $\varepsilon_{c,SFRC}/\varepsilon_{c,CC} \in [1,56-3,08]$ .

Ressalta-se que as deformações do concreto obtidas experimentalmente para as vigas foram relativamente pequenas devido ao momento solicitante apresentar valores baixos na região do ensaio.

#### 4.3 MAPEAMENTO DAS FISSURAS E MODO DE RUPTURA

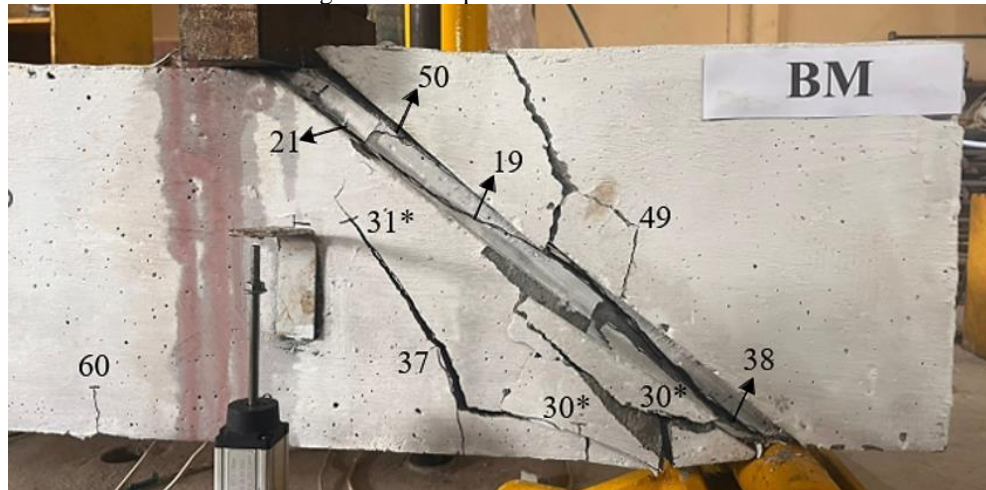
Esta análise tem como objetivo registrar na região de estudo, a integridade das vigas a partir da evolução das fissuras até a ruína. Para consolidar esta análise foi utilizada a inspeção visual em que ao verificar a abertura da fissura foi feito a marcação do caminho percorrido e a carga em que se encontrava, posteriormente, foi realizado o registro fotográfico. Na Figura 62 tem-se o mapeamento da fissuração. Ressalta-se que para as fissuras que surgiram após a carga máxima ser atingida foi designado o número da carga seguido por um asterisco (\*).

À medida que o carregamento aumentou, a fissuração tornou-se significativa e começou a apresentar uma inclinação em direção ao carregamento, configuração típica de fissura de cisalhamento. Quanto às fissuras de flexão, as vigas de concreto convencional apresentaram poucas fissuras próximas ao ponto de aplicação de carga. Já as vigas de concreto reforçado com fibras de aço, as fissuras se estenderam até o centro da viga. Ou seja, o padrão de fissuração das

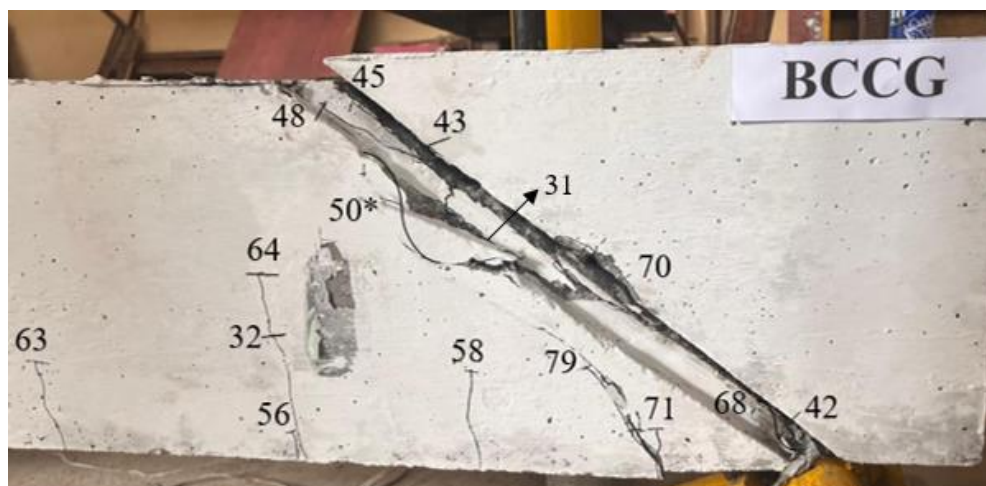


vigas de CRFA apresentou um maior número de fissuras diagonais e de flexão, sendo um padrão mais favorável a segurança. É importante ressaltar que a viga BSFRCSA apresentou uma maior quantidade de fissuras de flexão em relação as demais.

Figura 62 – Mapeamento das fissuras.



a) Carga na 1ª fissura de cisalhamento:  $0,31 \cdot P_u \approx 19 \text{ kN}$  ( $P_u = 60,4 \text{ kN}$ ).



b) Carga na 1ª fissura de cisalhamento:  $0,43 \cdot P_u \approx 31 \text{ kN}$  ( $P_u = 72,5 \text{ kN}$ ).



c) Carga na 1ª fissura de cisalhamento:  $0,44 \cdot P_u \approx 30 \text{ kN}$  ( $P_u = 67,6 \text{ kN}$ ).

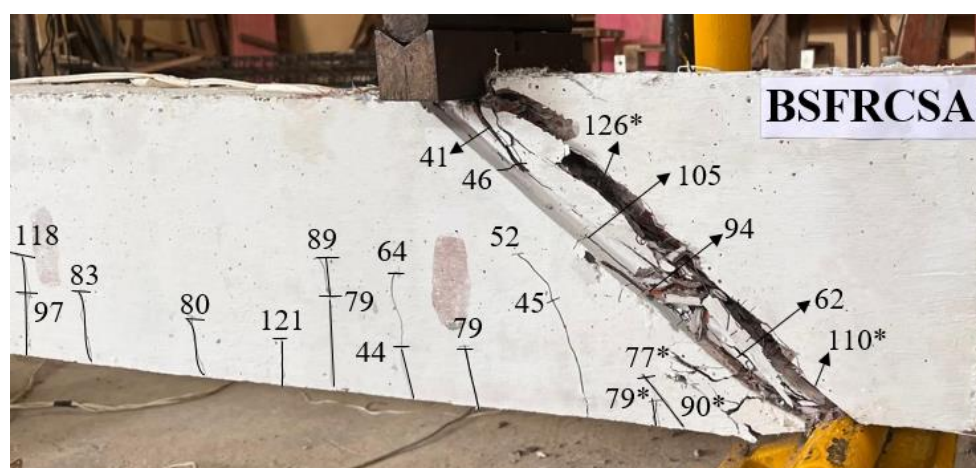
Figura 62 – Mapeamento das fissuras (Continuação).



d) Carga na 1ª fissura de cisalhamento:  $0,21 \cdot P_u \approx 26 \text{ kN}$  ( $P_u = 125,8 \text{ kN}$ ).



e) Carga na 1ª fissura de cisalhamento:  $0,36 \cdot P_u \approx 47 \text{ kN}$  ( $P_u = 130,1 \text{ kN}$ ).



f) Carga na 1ª fissura de cisalhamento:  $0,32 \cdot P_u \approx 41 \text{ kN}$  ( $P_u = 128,0 \text{ kN}$ ).

Fonte: Autoria própria (2024).

As vigas sem agregado graúdo, BM e BSFRCM, apresentaram a primeira fissura com uma carga menor do que as demais vigas, com 19 kN e 26 kN, cerca de 31% e 21% da carga última, respectivamente. As vigas com agregado graúdo e sem fibras, BCCG e BCCSA,

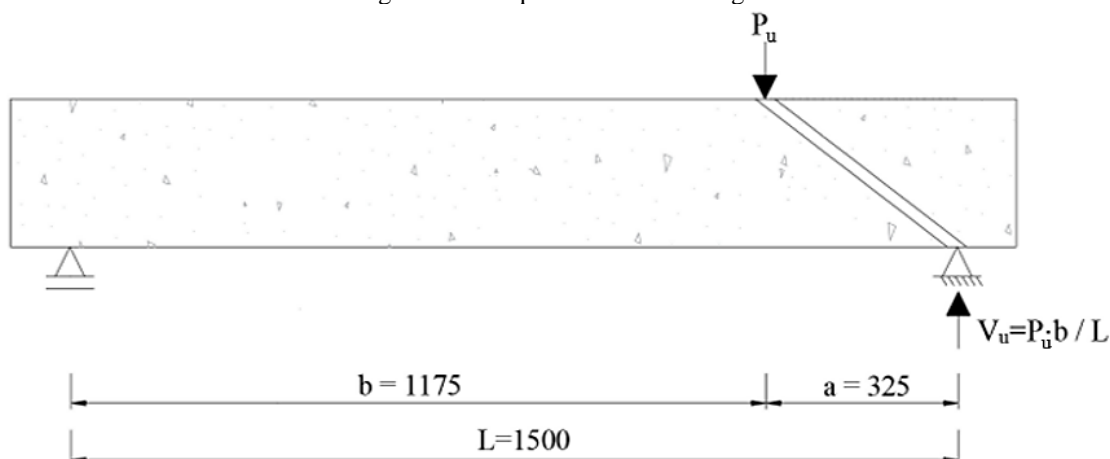
apresentaram a primeira fissura em torno de 31 kN e 30 kN, ou seja, cerca de 43% e 44% da carga última, respectivamente. Já as vigas BSFRCG e BSFRCSA iniciaram a fissuração com carga igual a 47 kN e 41 kN, cerca de 36% e 32 % da carga última, respectivamente. Percebe-se que as vigas com agregado sintético apresentaram fissura crítica próximo aos valores das vigas com agregado natural.

A partir do exposto, nota-se que as vigas com agregado graúdo apresentaram o início da fissuração com uma carga maior do que as vigas sem o agregado, sendo as vigas de agregado natural as que apresentaram maiores valores da fissura crítica. Além disso, a adição da fibra de aço foi imprescindível para conter a evolução da fissura crítica de cisalhamento. O reforço das fibras proporcionou a formação de múltiplas fissuras na região de análise (região menos reforçada transversalmente), o que confirma a capacidade das fibras em transferir esforços em um plano fissurado. É importante destacar também que, todas as vigas apresentaram ruptura por cisalhamento dentro do entalhe pré definido.

#### 4.4 CARGAS ÚLTIMAS E CAPACIDADE RESISTENTE AO CISALHAMENTO

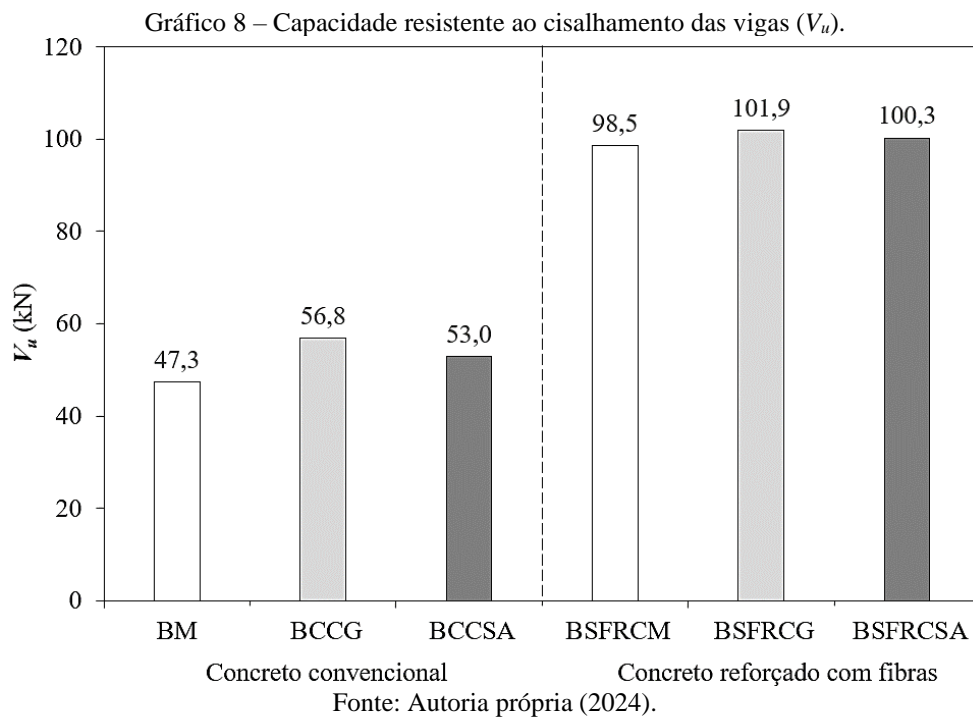
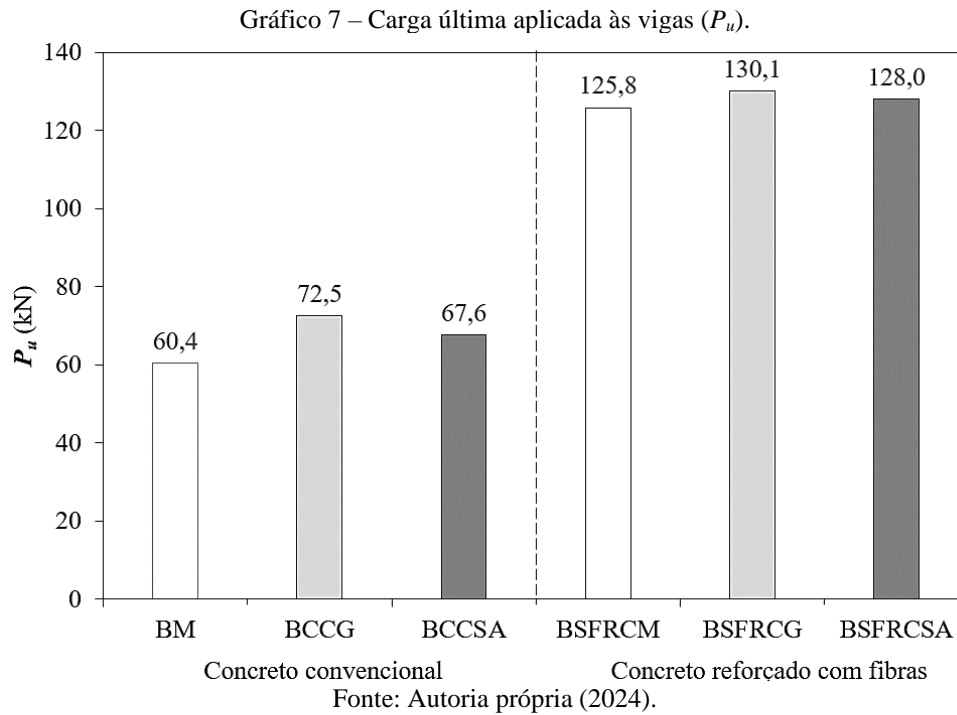
Como já descrito, o esquema estático do presente estudo é composto por uma viga biapoiada com uma carga pontual ( $P_u$ ) aplicada a 325 mm do apoio direito. A partir disso, foi possível encontrar a maior força cortante atuante em seu apoio ( $V_u$ ). A Figura 63 retrata o esquema estático das vigas ensaiadas, o Gráfico 7 representa as cargas aplicadas à viga experimentalmente ( $P_u$ ) e o Gráfico 8 representa a capacidade resistente ao cisalhamento ( $V_u$ ).

Figura 63 – Esquema estático da viga.



Fonte: Autoria própria (2024).





A partir da análise dos gráficos, nota-se que as vigas produzidas com agregado graúdo apresentaram maiores cargas últimas tanto para o concreto convencional como para o concreto reforçado com fibras. Dentre as vigas produzidas com concreto convencional, observa-se que a viga BCCG apresentou maior capacidade resistente, sendo maior 20% em relação a viga BM e 7% em relação a viga BCCSA. Para as vigas de concreto reforçado com fibras de aço, houve

pouca variação na capacidade resistente, sendo a viga BSFRCG maior 3% e 1% em relação a viga BSFRCM e BSFRCSA, respectivamente.

Rodrigues de Souza (2021) explica este fato através do engrenamento do agregado graúdo que tem ação pequena quando comparadas as fibras. Se a abertura da fissura é pequena, os agregados têm maior participação na transferência de tensões, porém, com o aumento da fissura, sua contribuição diminui. Já a ação das fibras cresce à medida que o processo de arrancamento se desenvolve até que a fibra seja totalmente arrancada da matriz de concreto.

É importante salientar que as vigas de concreto reforçado com fibras de aço tiveram acréscimo na carga última quando comparadas com as vigas de concreto convencional, o que significa que a fibra está atuando como mecanismo de reforço. A viga de argamassa com fibra apresentou um aumento de 108% na sua capacidade resistente, a viga com agregado natural do tipo brita apresentou acréscimos em torno de 80% e a viga com a agregado sintético em torno de 90%, quando comparadas aos seus pares sem fibras. Ademais, ressalta-se que as vigas produzidas com agregado sintético com e sem fibras de aço apresentaram comportamento satisfatório em termos de cisalhamento para este estudo.

## 5 ESTIMATIVAS DE RESISTÊNCIA

### 5.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS VIGAS EM CC

Para a verificação da capacidade de resistência da diagonal tracionada até a ruptura foram retirados os coeficientes normativos minoradores da resistência do material, bem como os coeficientes de majoração dos carregamentos. A capacidade resistente das vigas em concreto armado foi calculada de acordo com NBR 6118 (ABNT, 2023), Model Code 10 (CEB-FIP, 2010), ACI 318 (ACI, 2019) e JSCE (2008), considerando apenas a parcela de resistência proporcionada pelo concreto segundo cada norma. Embora  $b_w$  seja 120 mm, a carga final foi prevista considerando a largura  $b_w$  para 90 mm, devido à profundidade dos frisos, igual a 15 mm. A Tabela 29 apresenta os dados experimentais das vigas utilizados para os cálculos das estimativas teóricas.

Tabela 29 – Dados das vigas.

Viga	$f_{cm, exp}$ (MPa)	$b_w, friso$ (mm)	$a$ (mm)	$d$ (mm)	$L$ (mm)
BM	37,1	90	325	229	1500
BCCG	35,2				
BCCSA	37,4				

Fonte: Autoria própria (2024).

Segundo o Model Code 10 (CEB-FIP, 2010) pode-se utilizar níveis de aproximação para o cálculo da resistência ao cisalhamento de uma viga. Sendo assim, neste estudo foi realizado o cálculo da capacidade ao cisalhamento tanto para o primeiro nível de aproximação como para o terceiro nível de aproximação. O primeiro nível considera o ângulo de inclinação da biela fixo igual a  $36,6^\circ$  e o parâmetro  $k_v$  considera a presença ou ausência da armadura transversal. O terceiro nível de aproximação é baseado diretamente na Teoria do Campo de Compressão Modificado (MCFT) e se pode utilizar o ângulo de inclinação de biela comprimida igual a  $35^\circ$ , além disso para o cálculo do parâmetro  $k_v$  há a consideração do diâmetro máximo do agregado graúdo. Vale destacar que, o nível de aproximação II não foi estimado, visto que não leva em consideração a contribuição do concreto, este que é o principal objeto de estudo da pesquisa.

Ressalta-se que, para as normativas utilizadas, a variação do tipo do agregado graúdo não influencia na parcela de resistência do concreto ao cisalhamento. Na Tabela 30 é apresentado os resultados para a resistência ao cisalhamento previstos por cada norma utilizando os valores médios experimentais de resistência à compressão deste estudo.

Tabela 30 – Resistência ao cisalhamento das vigas em CC para o lado monitorado (Sem estribos).

Viga	$V_{NBR}$ (kN)	$V_{MC10}$ (kN)		$V_{ACI}$ (kN)	$V_{JSCE}$ (kN)
		$V_{MC10,1}$ (kN)	$V_{MC10,3}$ (kN)		
<b>BM</b>	40,4	25,4	31,0	20,9	29,8
<b>BCCG</b>	39,0	24,7	30,2	20,4	29,3
<b>BCCSA</b>	40,6	25,5	31,1	21,0	29,9

Fonte: Autoria própria (2024).

Com isso, foi possível analisar a razão entre a resistência ao cisalhamento experimental encontrada no capítulo anterior e a resistência ao cisalhamento das normas analisadas. A razão  $V_{exp}/V_{teo}$  é apresentada na Tabela 31, assim como a média, desvio padrão e coeficiente de variação dessa relação. Ressalta-se que, para a razão referente ao Model Code 10 (CEB-FIP, 2010) foi utilizado os valores do terceiro nível de aproximação.

Tabela 31 – Relação entre a resistência ao cisalhamento experimental e teórica das vigas em CC.

Viga	$V_{exp}$ (kN)	$V_{exp}/V_{NBR}$	$V_{exp}/V_{MC10,3}$	$V_{exp}/V_{ACI}$	$V_{exp}/V_{JSCE}$
<b>BM</b>	47,3	1,17	1,53	2,26	1,59
<b>BCCG</b>	56,8	1,46	1,88	2,78	1,94
<b>BCCSA</b>	53,0	1,31	1,70	2,52	1,77
<b>Média</b>		1,3	1,7	2,5	1,8
<b>Desvio padrão</b>		0,1	0,2	0,3	0,2
<b>CV (%)</b>		10,1	10,4	10,4	10,0

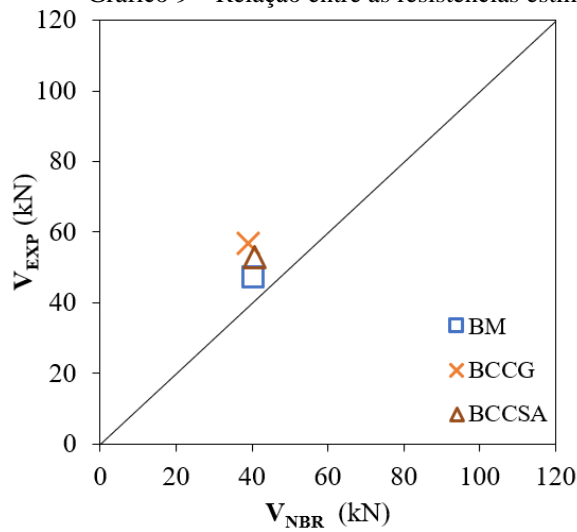
Fonte: Autoria própria (2024).

Através da razão  $V_{exp}/V_{teo}$  é possível perceber que a NBR 6118 (ABNT, 2023) foi a norma em que as estimativas mais se aproximaram dos valores experimentais. Diferentemente, o ACI 318 (2019) apresentou maiores valores para a relação  $V_{exp}/V_{teo}$ , sendo a normativa mais conservadoras dentre as calculadas no presente estudo. É importante destacar que para efeitos de cálculo utilizou-se o esforço cortante nominal, visto isso, ao utilizar os valores de projeto com os devidos coeficientes para cada norma essa relação aumentaria, tornando os resultados ainda mais conservadores.

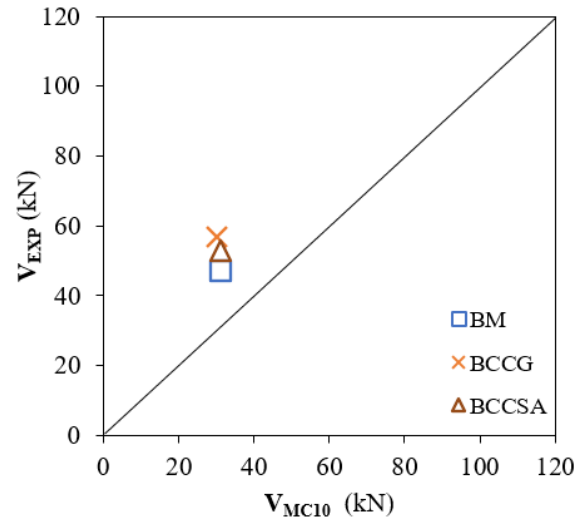
Ressalta-se também que, quanto a variação do tipo de agregado, as vigas produzidas com agregado sintético apresentaram resultados da razão  $V_{exp}/V_{teo}$  a favor da segurança em relação as normativas apresentadas.

Para uma melhor análise é possível observar o Gráfico 9, que é representado a precisão dos códigos e o Gráfico 10, que é representado a dispersão (curva “*box and whiskers*”).

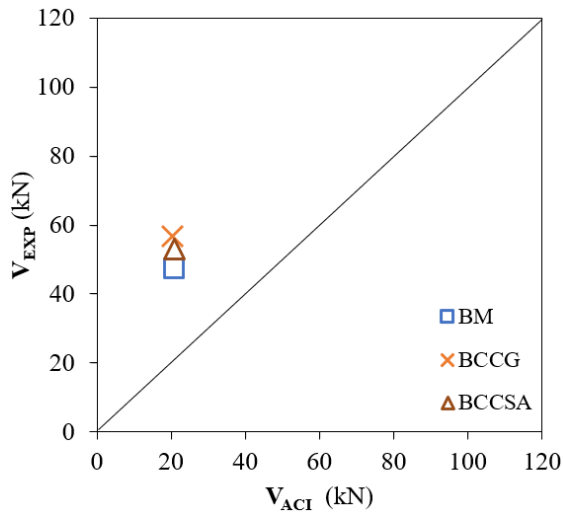
Gráfico 9 – Relação entre as resistências estimadas para as vigas de CC e as resistências experimentais.



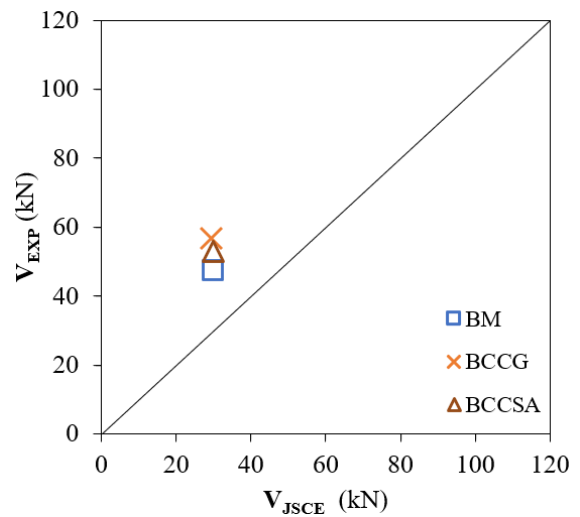
a) NBR 6118 (ABNT, 2023).



b) Model Code 10 (CEB-FIP, 2010).



c) ACI 318 (ACI, 2019).

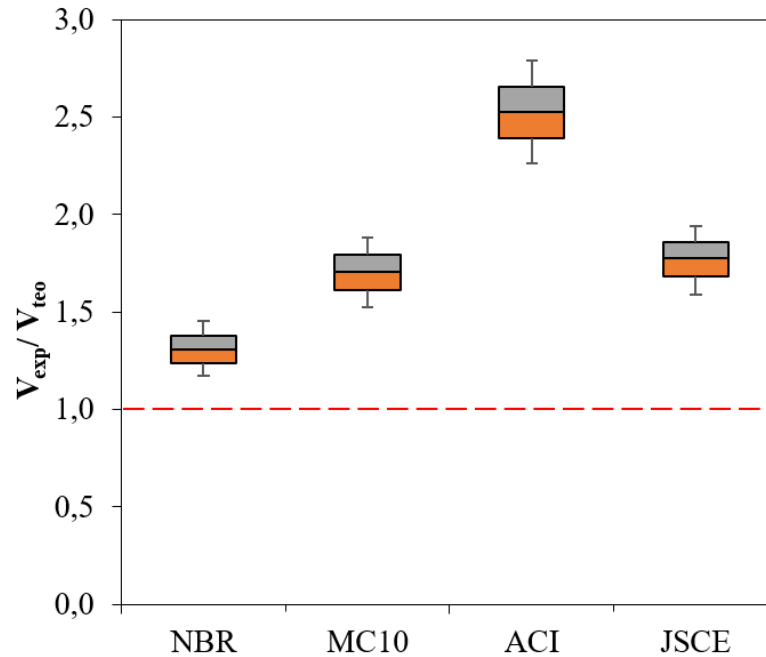


d) JSCE (2008).

Fonte: Autoria própria (2024).



Gráfico 10 – Análise quanto à dispersão das vigas de concreto convencional.



Fonte: Autoria própria (2024).

A análise dos gráficos mostrou que a normativa brasileira apresentou resultados mais satisfatórios, pois foram verificados resultados mais precisos e menos dispersos em relação as normativas apresentadas.

Avaliando estas estimativas segundo uma adaptação do critério de penalidade proposto por Collins (2001), o *Demerit Points Classification* – DPC (Tabela 32), pode-se classificar as vigas em níveis de conservadorismo e insegurança, através da relação  $V_{exp}/V_{teo}$ .

Tabela 32 – Classificação segundo critério de penalidade adaptado por Collins (2001).

Valor	Intervalo	Classificação	Penalidade
$\leq 0,50$	I	Extremamente perigoso	10
$]0,50-0,85]$	II	Perigoso	5
$]0,85-1,15]$	III	Segurança apropriada	0
$]1,15-2,00]$	IV	Conservador	1
$>2,00$	V	Extremamente conservador	2

Fonte: Adaptado de Collins (2001).

Nota-se que para as vigas analisadas do presente estudo, todos os códigos analisados tiveram predominância de resultados na classe “conservador” e “extremamente conservador”. Apesar da normativa brasileira apresentar valores menos dispersos e mais precisos, a razão  $V_{exp}/V_{NBR}$  é classificada como conservadora de acordo com o critério de Collins.

A Tabela 33 representa a classificação das vigas deste estudo, indicando a norma utilizada e o intervalo de classificação segundo o critério de Collins com suas respectivas penalidades. Nota-se que, as vigas não apresentaram resultados classificados como perigosos.

Tabela 33 – Classificação segundo o critério de Collins (2001) para as vigas de CC ensaiadas.

$V_{exp}/V_{teo}$ (CC)		<0,5	[0,5-0,85[	[0,85-1,15[	[1,15-2[	≥2	TOTAL
<b>NBR</b>	Total Vigas	0	0	0	3	0	3
	Total Penalidade	0	0	0	3	0	3
<b>MC 10</b>	Total de Vigas	0	0	0	3	0	3
	Total Penalidade	0	0	0	3	0	3
<b>ACI</b>	Total de Vigas	0	0	0	0	3	3
	Total Penalidade	0	0	0	0	6	6
<b>JSCE</b>	Total de Vigas	0	0	0	3	0	3
	Total Penalidade	0	0	0	3	0	3

Fonte: Autoria própria (2024).

A NBR 6118 (ABNT, 2023), o Model Code 10 (CEB-FIP, 2010) e o JSCE (2008) apresentaram menor penalidade (penalidade = 3) dentre as normas, pois todas as vigas foram classificadas no intervalo IV (conservador). Já o ACI 318 (2019) apresentou a maior penalidade dentre as normas (penalidade = 6), devido apresentarem todas as vigas na classificação V (extremamente conservador).

## 5.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS EM CC

Para a realização do cálculo da resistência à flexão também foram retirados os coeficientes normativos que reduzem a resistência do material, bem como os coeficientes que majoram a carga. A partir disso, foi possível encontrar o valor do momento resistente característico da viga de concreto convencional ( $M_{rk,CC}$ ), conforme norma brasileira, utilizando os valores experimentais médios de resistência à compressão. Os resultados são apresentados na Tabela 34.

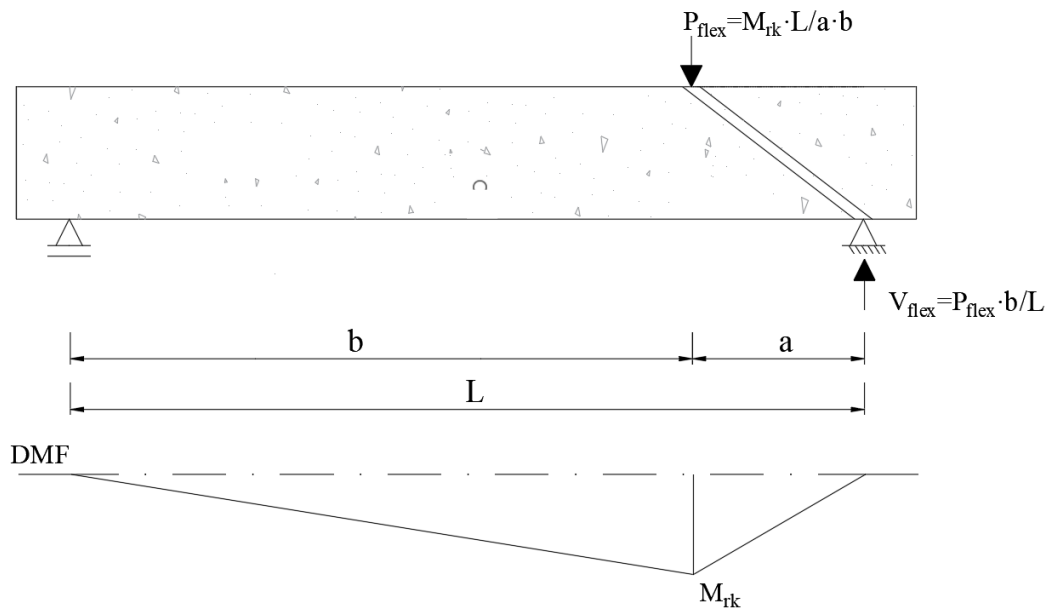
Tabela 34 – Momento resistente característico para as vigas em CC.

Viga	$M_{rk, CC} \text{ (kN.m)}$
<b>BM</b>	37,60
<b>BCCG</b>	37,33
<b>BCCSA</b>	37,64

Fonte: Autoria própria (2024).

Ressalta-se que, os valores de momento resistente característico foram aproximados, pois, as vigas apresentam as mesmas características geométricas e taxa de armadura longitudinal. O esquema estático utilizado para a determinação da carga teórica de ruptura à flexão e o diagrama de momento fletor é apresentado na Figura 64.

Figura 64 – Esquema para calcular a carga teórica de ruptura à flexão.



Fonte: Autoria própria (2024).

Sendo assim, a fim de encontrar o valor referente a carga teórica de ruptura por flexão ( $P_{flex}$ ) utilizou-se a Equação 74, e para encontrar a capacidade resistente ( $V_{flex}$ ) utilizou-se a Equação 75.

$$P_{flex, CC} = \frac{M_{rk, CC} \cdot L}{a \cdot b} \quad (74)$$

$$V_{flex, CC} = \frac{P_{flex} \cdot b}{L} \quad (75)$$

Obtendo assim, como resultado a carga teórica de ruptura à flexão ( $P_{flex}$ ) e a capacidade resistente ( $V_{flex}$ ) mostrada na Tabela 35.

Tabela 35 – Carga teórica de ruptura à flexão ( $P_{flex}$ ) e capacidade resistente ( $V_{flex}$ ) para vigas em CC.

Viga	$P_{flex,CC}$ (kN)	$V_{flex,CC}$ (kN)
BM	147,7	115,7
BCCG	146,6	114,8
BCCSA	147,8	115,8

Fonte: Autoria própria (2024).

A partir disto, foi possível realizar a análise da razão entre a capacidade resistente correspondente à carga de flexão ( $V_{flex}$ ) e a carga resistente ao cisalhamento teórica ( $V_{cis}$ ) encontrada no item 5.1 deste trabalho. A razão  $V_{flex}/V_{cis}$  é apresentada na Tabela 36.

Tabela 36 – Razão entre as resistências teóricas à flexão e ao cisalhamento para as vigas em CC.

Viga	$V_{flex,CC}/V_{NBR}$	$V_{flex,CC}/V_{MC10,3}$	$V_{flex,CC}/V_{ACI}$	$V_{flex,CC}/V_{JSCE}$	$V_{flex,CC}/V_{exp}$	Modo de ruptura
BM	2,8	3,7	5,5	3,8	2,4	Cisalhamento
BCCG	2,9	3,8	5,6	3,9	2,0	Cisalhamento
BCCSA	2,8	3,7	5,5	3,8	2,2	Cisalhamento

Fonte: Autoria própria (2024).

A partir da Tabela 37 constata-se que, para todas as vigas de concreto convencional deste estudo, o modo de ruptura previsto foi por cisalhamento para as normativas apresentadas, corroborando assim, com os resultados experimentais.

### 5.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DAS VIGAS EM CRFA

Para estimar a resistência ao cisalhamento das vigas de concreto reforçado com fibras de aço foram utilizados a NBR 16935 (ABNT, 2021), Model Code 10 (CEB-FIP, 2010), RILEM TC162-TDF (2002) e JSCE (2008) considerando nos cálculos a parcela de contribuição proporcionada pelo concreto reforçado com as fibras, segundo cada normativa. Embora  $b_w$  seja 120 mm, a carga final foi prevista considerando a largura  $b_w$  para 90 mm, devido à profundidade dos frisos, igual a 15 mm. Na Tabela 37 tem-se os dados experimentais das vigas.

Tabela 37 – Dados das vigas.

Viga	$f_{cm, exp}$ (MPa)	$b_w, friso$ (mm)	$a$ (mm)	$d$ (mm)	$L$ (mm)	$V_f$ (%)
BSFRCM	37,5	90	325	229	1500	1
BSFRCG	35,4					
BSFRCSA	37,8					

Fonte: Autoria própria (2024).

De acordo com os métodos de cálculo propostos pelas normas, faz-se necessário a utilização de experimentos a fim de determinar as resistências residuais à tração por flexão. Sendo assim, para as tensões residuais necessárias nos cálculos foram utilizados os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão do presente trabalho.

Na Tabela 38 pode-se observar os resultados da resistência ao cisalhamento das vigas de concreto reforçadas com fibras de aço.

Tabela 38 – Resistência ao cisalhamento das vigas em CRFA para o lado monitorado (Sem estribos).

Viga	V <sub>NBR</sub> (kN)	V <sub>MC10</sub> (kN)	V <sub>RILEM</sub> (kN)	V <sub>JSCE</sub> (kN)
<b>BSFRCM</b>	76,6	76,6	54,5	78,8
<b>BSFRCG</b>	80,5	80,5	59,3	76,9
<b>BSFRCSA</b>	82,4	82,4	62,1	79,1

Fonte: Autoria própria (2024).

Para os resultados obtidos, vê-se que, a NBR 16935 (ABNT, 2021) e Model Code 10 (CEB-FIP, 2010) possuem valores idênticos de resistência, visto que a Norma Brasileira se trata de uma derivação do Model Code 10.

Com isso, foi possível analisar a razão entre a carga experimental e a carga teórica das normas analisadas. A razão  $V_{exp}/V_{teo}$  é apresentado na Tabela 39, assim como a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dessa relação.

Tabela 39 – Relação entre a resistência ao cisalhamento experimental e teórica das vigas em CRFA.

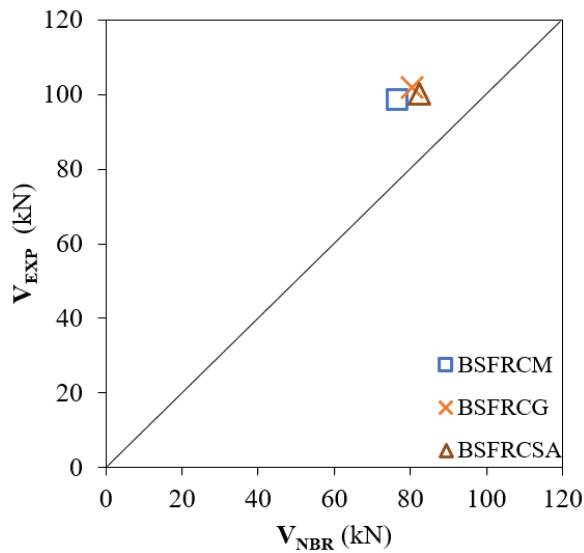
Viga	V <sub>exp</sub> (kN)	V <sub>exp</sub> / V <sub>NBR</sub>	V <sub>exp</sub> / V <sub>MC10</sub>	V <sub>exp</sub> / V <sub>RILEM</sub>	V <sub>exp</sub> / V <sub>JSCE</sub>
<b>BSFRCM</b>	98,5	1,29	1,29	1,81	1,25
<b>BSFRCG</b>	101,9	1,27	1,27	1,72	1,33
<b>BSFRCSA</b>	100,3	1,22	1,22	1,62	1,27
<b>Média</b>		1,26	1,26	1,72	1,28
<b>Desvio Padrão</b>		0,04	0,04	0,10	0,04
<b>CV (%)</b>		2,80	2,80	5,72	3,10

Fonte: Autoria própria (2024).

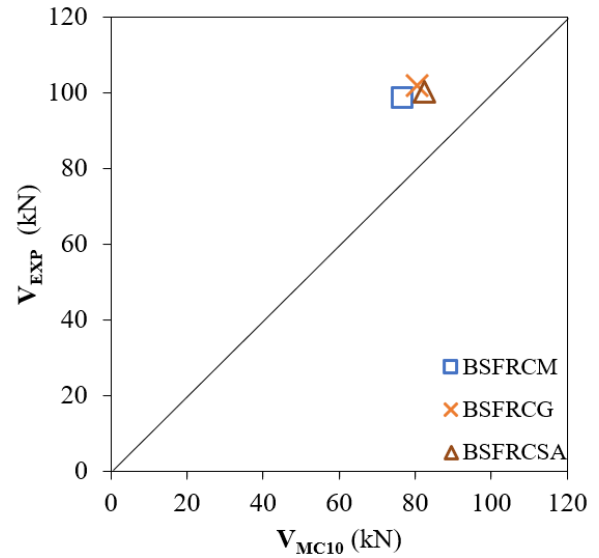
Através da razão  $V_{exp}/V_{teo}$  é possível perceber que a NBR 16935 (ABNT, 2021), Model Code 10 (CEB-FIP, 2010) e o código JSCE (2008) apresentaram estimativas que mais se aproximaram dos valores experimentais. Ressalta-se também que, quanto a variação do tipo de

agregado, as vigas produzidas com agregado sintético apresentaram resultados a favor da segurança em relação as normativas apresentadas. Para uma melhor análise é possível observar o Gráfico 11, que é representado a precisão dos códigos e o Gráfico 12, que é representado a dispersão (curva “*box and whiskers*”).

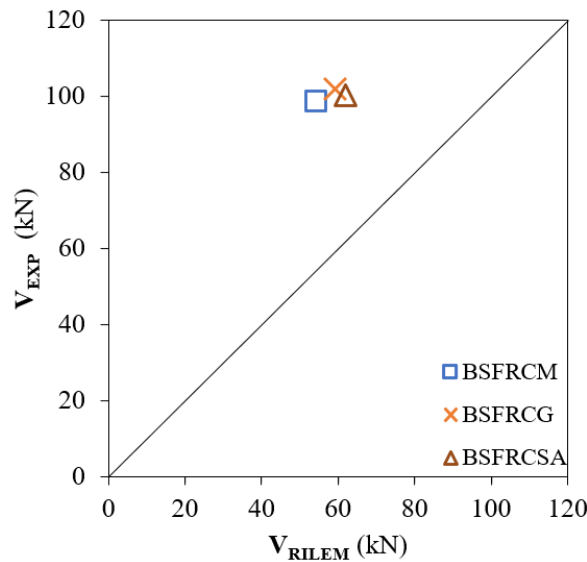
Gráfico 11 – Relação entre as resistências estimadas para as vigas de CRFA e as resistências experimentais.



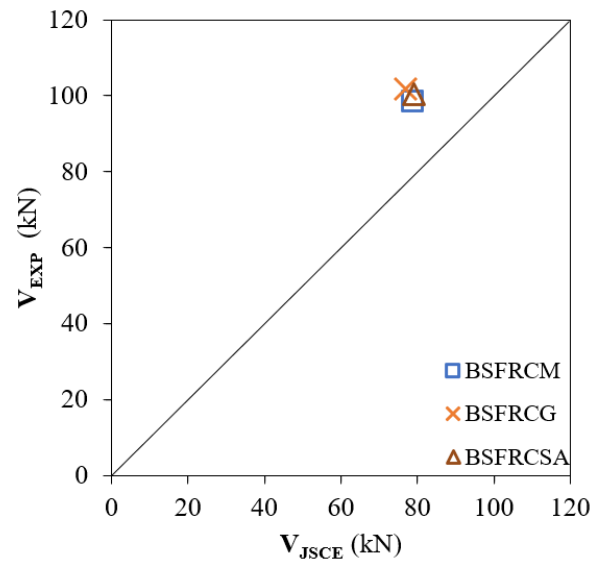
a) NBR 16935 (ABNT, 2021).



b) Model Code 10 (CEB-FIP, 2010).

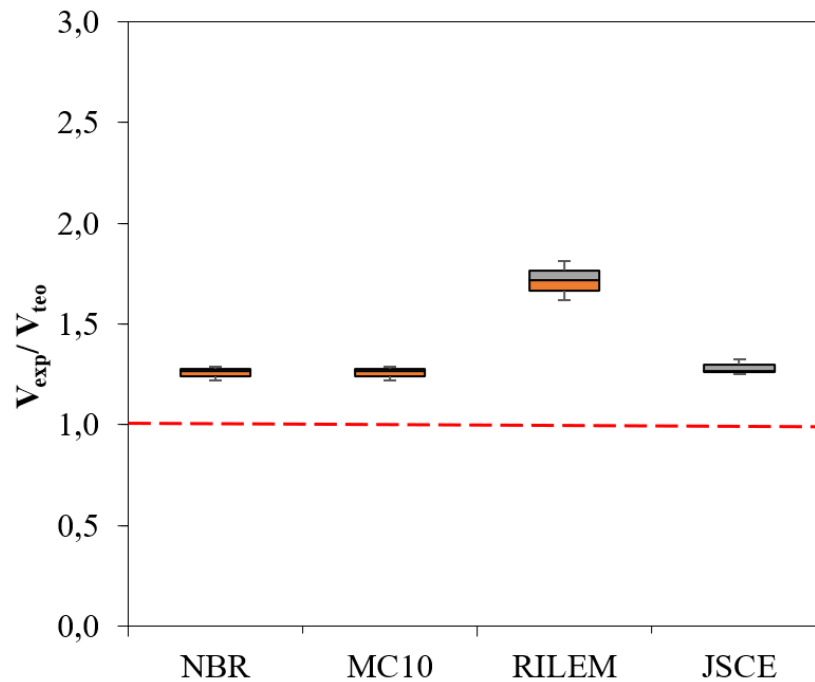


c) RILEM TC 162-TDF (2002).



d) JSCE (2008).

Gráfico 12 – Análise quanto à dispersão das vigas de concreto reforçado com fibras de aço.



Fonte: Autoria própria (2024).

A análise dos gráficos mostrou que a normativa brasileira e o Model Code (2010) apresentaram resultados mais satisfatórios, pois foram verificados resultados mais precisos e menos dispersos em relação as normativas apresentadas.

Avaliando estas estimativas segundo uma adaptação do critério de penalidade proposto por Collins (2001), o *Demerit Points Classification* – DPC, pode-se classificar as vigas em níveis de conservadorismo e insegurança, através da relação  $V_{exp}/V_{teo}$ . Na Tabela 40 é possível observar a classificação das vigas de concreto reforçado com fibras de aço segundo a adaptação do critério de penalidade proposto por Collins (2001).

Tabela 40 – Classificação segundo o critério de Collins (2001) para as vigas de CRFA ensaiadas.

$V_{exp}/V_{teo}$ (SFRC)		<0,5	[0,5-0,85[	[0,85-1,15[	[1,15-2[	≥2	TOTAL
<b>NBR</b>	Total de Vigas	0	0	0	3	0	3
	Total Penalidade	0	0	0	3	0	3
<b>MC 10</b>	Total de Vigas	0	0	0	3	0	3
	Total Penalidade	0	0	0	3	0	3
<b>RILEM</b>	Total de Vigas	0	0	0	3	0	3
	Total Penalidade	0	0	0	3	0	3
<b>JSCE</b>	Total de Vigas	0	0	0	3	0	3
	Total Penalidade	0	0	0	3	0	3

Fonte: Autoria própria (2024).

Apesar do RILEM (2008) ter apresentado valores teóricos mais distantes do experimental e a NBR 16935 (ABNT, 2021), Model Code 10 (CEB-FIP, 2010) e JSCE (2008) ter apresentado valores mais próximos do experimental, verifica-se com a Tabela 40 que ambos os códigos obtiveram a mesma penalidade (penalidade = 3), visto que, todos apresentaram a classificação das vigas no intervalo IV (conservador).

#### 5.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS EM CRFA

Assim como na verificação da resistência à flexão das vigas de concreto convencional, para as vigas de CRFA também foi retirado os coeficientes de minoração e majoração. Foi escolhido o modelo de cálculo proposto pela NBR 16935 (ABNT, 2021) para determinar o momento resistente característico das vigas em CRFA, denominado  $M_{rk,CRFA}$ . Na Tabela 41 tem-se os valores de momento resistente característico das vigas de CRFA.

Tabela 41 – Momento resistente característico das vigas em CRFA.

<b>Viga</b>	<b><math>M_{rk,SFRC}</math> (kN.m)</b>
<b>BSFRCM</b>	40,69
<b>BSFRCG</b>	40,70
<b>BSFRCSA</b>	40,71

Fonte: Autoria própria (2024).

Ressalta-se que, os valores de momento resistente característico apresentados foram aproximados, pois, as vigas apresentam as mesmas características geométricas e taxa de armadura longitudinal. Ademais, foi utilizado os valores de resistência residual do presente trabalho.

Análogo ao apresentado no cálculo da carga de ruptura por flexão do CC, utilizou-se a Equação 76 para encontrar a carga de ruptura por flexão do CRFA e a Equação 77 para encontrar a capacidade resistente da viga de concreto reforçado com fibras.

$$P_{flex,SFRC} = \frac{M_{rk,CC} \cdot L}{a \cdot b} \quad (76)$$

$$V_{flex,SFRC} = \frac{P_{flex} \cdot b}{L} \quad (77)$$

Obtendo assim, como resultado a carga teórica de ruptura à flexão ( $P_{flex}$ ) e a capacidade resistente ( $V_{flex}$ ) mostrada na Tabela 42.



Tabela 42 – Carga teórica de ruptura à flexão ( $P_{flex}$ ) e capacidade resistente ( $V_{flex}$ ) para vigas em CRFA.

<b>Viga</b>	<b><math>P_{flex,SFRC}</math> (kN)</b>	<b><math>V_{flex,SFRC}</math> (kN)</b>
<b>BSFRFC</b>	159,8	125,2
<b>BSFRCG</b>	159,9	125,2
<b>BSFRCSA</b>	159,9	125,2

Fonte: Autoria própria (2024).

A partir disto, foi possível realizar a análise da razão entre a capacidade resistente correspondente a carga de flexão ( $V_{flex}$ ) e a carga resistente ao cisalhamento teórica ( $V_{cis}$ ) encontrada no item 5.3 deste trabalho. A razão  $V_{flex}/V_{cis}$  é apresentada na Tabela 43.

Tabela 43 – Razão entre as resistências teóricas à flexão e ao cisalhamento para as vigas em CRFA.

<b>Viga</b>	<b><math>V_{flex,SFRC}/V_{NBR}</math></b>	<b><math>V_{flex,SFRC}/V_{MC10}</math></b>	<b><math>V_{flex,SFRC}/V_{RILEM}</math></b>	<b><math>V_{flex,SFRC}/V_{JSCE}</math></b>	<b><math>V_{flex,SFRC}/V_{exp}</math></b>	<b>Modo de ruptura</b>
<b>BSFRFC</b>	1,6	1,6	2,3	1,6	1,3	Cisalhamento
<b>BSFRCG</b>	1,5	1,5	2,1	1,6	1,2	Cisalhamento
<b>BSFRCSA</b>	1,5	1,5	2,0	1,6	1,2	Cisalhamento

Fonte: Autoria própria (2024).

A partir da Tabela 43 constata-se que, para todas as vigas de concreto reforçado com fibras de aço deste estudo, o modo de ruptura previsto foi por cisalhamento para as normativas apresentadas, corroborando com os resultados experimentais.

## 6 CONCLUSÕES

A presente pesquisa avalia o comportamento ao cisalhamento de vigas em concreto armado convencional (CC) e reforçado com fibras (CRFA) com a aplicação do agregado sintético de resíduo de bauxita e a utilização de uma fração volumétrica de 1,0% de fibra de aço. Ressalta-se que, a utilização do agregado sintético de resíduo de bauxita visa reduzir a demanda do uso do agregado natural e proporcionar uma destinação do resíduo em larga escala e o concreto reforçado com fibra de aço é visto como um material promissor na área da engenharia devido suas características de pós-fissuração.

No que concerne ao estudo experimental, foram ensaiadas até a ruína seis vigas com dimensões (120x250x1700) mm, apresentando como variáveis de estudo o tipo do agregado gráúdo e a presença ou não de fibras. As vigas apresentaram a mesma taxa de armadura longitudinal, e quanto a armadura transversal, o trecho representado pelo vão de cisalhamento não foi armado a fim de ser determinado a capacidade resistente da biela de compressão, já os demais trechos foram armados transversalmente com a finalidade de garantir que a ruptura ocorra na região monitorada. Ademais, foram realizados frisos na região de estudo com inclinação de 35°, a fim de fixar a superfície de ruptura da viga. Sendo assim, a relação  $a/d$  foi igual a 1,4. No que se refere ao sistema de ensaio, instrumentação e monitoramento das vigas, pode-se afirmar que as funções atribuídas foram cumpridas satisfatoriamente.

Para consolidar essa proposta, também discute-se o assunto sob uma perspectiva teórica em que foi explorado quatro recomendações para estimar a resistência ao cisalhamento de vigas em concreto convencional (CC), sendo a NBR 6118 (ABNT, 2023), Model Code 10 (CEB-FIP, 2010), ACI 318 (ACI, 2019) e JSCE (2008), e quatro recomendações para estimar a resistência ao cisalhamento de vigas em concreto reforçado com fibra de aço (CRFA), sendo a NBR 16935 (ABNT, 2021), Model Code 10 (CEB-FIP, 2010), RILEM TC 162-TDF (2002) e JSCE (2008).

Diante das análises realizadas, discute-se a seguir as conclusões da pesquisa.

O ensaio das vigas mostrou que a teoria foi confirmada na prática quanto aos deslocamentos verticais das vigas, ou seja, o resultado para deflexão no ponto de aplicação de carga foi maior do que a deflexão nos demais pontos registrados. Além disso, a deflexão das vigas não ultrapassou o valor limite de acordo com os critérios de aceitabilidade sensorial preconizado pela NBR 6118 (ABNT, 2023). Quanto à adição de fibras de aço ao concreto, foi verificado que acarretou em acréscimo no deslocamento, sendo a viga com agregado sintético (BSFRCSA) a que apresentou maiores deslocamentos.

Para as deformações, conclui-se que, para as vigas de concreto convencional, a viga sem agregado graúdo (BM) apresentou maiores solicitações da armadura longitudinal. Para as vigas de concreto reforçado com fibras, a viga sem agregados (BSFRCM) e a viga com agregado sintético de resíduo de bauxita (BSFRCSA) apresentaram maiores solicitações da armadura longitudinal. A inserção da fibra à mistura proporcionou acréscimos nessa solicitação juntamente com acréscimos significativos na capacidade resistente. Ressalta-se que, nenhuma das barras monitoradas pelos EERs excedeu o limite de escoamento e todas as vigas tiveram o modo de ruptura por cisalhamento, como previsto.

Para análise da solicitação da armadura transversal percebeu-se que as vigas sem fibras (BM, BCCG e BCCSA) apresentaram valores de deformação baixos e aproximados entre si, diferentemente das vigas com fibras, em que se pode observar um aumento desta solicitação com exceção da viga BSFRCM que apresentou menor solicitação do estribo em relação ao seu par sem fibra, viga BM. Este fato é justificado pelo mecanismo de reforço proporcionado pelas fibras que aliviou de forma mais efetiva os esforços nessa armadura (GOMES, 2013). Destaca-se que, nenhuma das barras monitoradas excedeu o limite de escoamento da armadura.

As deformações do concreto ficaram abaixo da deformação limite para esmagamento do concreto (3,5‰) até a ruptura por cisalhamento em todas as vigas. A deformação do concreto monitorada para todas as vigas foram relativamente pequenas devido o momento solicitante na região de ensaio ser baixo.

A partir do mapeamento das fissuras nas vigas percebe-se que à medida que o carregamento aumentou, a fissuração tornou-se significativa e começou a apresentar uma inclinação em direção ao carregamento, configuração típica de fissura de cisalhamento. Quanto às fissuras de flexão, percebe-se que para as vigas sem fibras houve o surgimento de poucas fissuras próximas ao ponto de aplicação de carga. Já para as vigas com adição de fibra de aço, nota-se que essas fissuras se estenderam até o centro da viga. Ou seja, o padrão de fissuração das vigas com adição de fibras apresentou um maior número de fissuras diagonais e de flexão, sendo um padrão mais favorável a segurança.

Em relação à carga última e à capacidade resistente das vigas de CRFA, nota-se que todas as vigas tiveram acréscimos quando comparadas com as vigas sem fibras, o que significa que a fibra está atuando como mecanismo de reforço ao cisalhamento. Ademais, foi verificado uma maior influência do agregado graúdo para as vigas de CC quando comparadas com as vigas de CRFA, pois o acréscimo da capacidade resistente entre as vigas de CC foi maior do que entre as vigas de CRFA, visto que o engrenamento do agregado graúdo tem ação pequena quando

comparadas às fibras. Em relação ao desempenho mecânico, as vigas de concreto com agregado sintético apresentaram resultados satisfatórios em termos de cisalhamento para este estudo.

Para as estimativas de carga teórica de ruptura das vigas, notou-se que as normativas analisadas não consideram parâmetros do agregado graúdo utilizado, apenas o terceiro nível de aproximação proposto pelo Model Code 10 (CEB-FIB, 2010) considera o diâmetro máximo do agregado para cálculo do parâmetro  $k_v$ .

Para as estimativas das vigas de concreto convencional, os códigos analisados apresentaram predominância de resultados na classe conservadora e extremamente conservadora, de acordo com o critério de Collins (2001). O ACI 318 (2019) foi o mais conservador dentre os códigos analisados e o que apresentou o maior valor de penalidade. A NBR 6118 (ABNT, 2023) foi a normativa que apresentou valores menos dispersos e precisos, porém, ainda assim foi classificada como conservadora de acordo com o critério de Collins.

Para as estimativas das vigas com fibras de aço, a NBR 16935 (ABNT, 2021), o Model Code 10 (CEB-FIP, 2010) e o JSCE (2008) foram os que mais se aproximaram dos resultados experimentais. O RILEM TC 162-TDF (2002) apresentou valores mais dispersos que os demais códigos. Apesar disso, de acordo com o critério de Collins, ambos os códigos apresentaram as vigas na classificação conservadora, e obtiveram o mesmo valor de penalidade.

### **Sugestões para trabalhos futuros:**

Os resultados apresentados na presente pesquisa demonstram que o uso de agregado sintético de resíduo de bauxita apresentaram comportamentos mecânicos semelhantes ao concreto com agregados naturais, no entanto deve-se investigar mais este material pois os ensaios executados limitaram-se a um pequeno número de variáveis, deixando espaço para um leque de pesquisas futuras, como: Variar o volume e o tipo de fibras em vigas semelhantes as desenvolvidas desse trabalho; variar o volume de agregado graúdo sintético para cada traço a fim de compreender melhor sobre o engrenamento desse material, assim como utilizar outras faixas granulométricas desse agregado; variar a relação  $a/d$  das vigas e o ângulo de inclinação da biela comprimida; estudar o potencial da aplicação do agregado sintético de resíduo de bauxita em estruturas dinâmicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALUNORTE, **Depósitos de Resíduos Sólidos**. 2023. Disponível em: <<https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/americas/brasil/barcarena/alunorte/deposito-de-residuos-solidos/>>. Acesso em: julho de 2023.
- AMARAL, W. J. R.; OLIVEIRA, D. R. C. Cisalhamento induzido em vigas de concreto armado com agregado sintético. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, vol. 17, n. 3, e17303, 2024. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952024000300003>
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete, Farmington Hills, Michigan: ACI Committee 318, 2019.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.1R-96**: State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. Farmington Hills, Michigan: ACI Committee 544, 2002.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.3R-08**: Guide for specifying proportioning, and production of fiber reinforced concrete. Farmington Hills, Michigan: ACI Committee 544, 2008.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.4R-88**: Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. Farmington Hills, Michigan: ACI Committee 544, 1999.
- ARAÚJO, D. L.; CURADO, M. C.; RODRIGUES, P. F. Loop connection with fibre-reinforced precast concrete components in tension. **Engineering Structures**, v. 72, p. 140–151, ago. 2014. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.032>
- ARAÚJO, D. L.; NUNES, F. G. T.; TOLEDO FILHO, R. D.; ANDRADE, M. A. S. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams. **ACTA Scientiarum**, v. 36, n. 3, p. 389-397. Maringá, 2014. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v36i3.19005>
- ARCELOMITTAL, **Aços longos**. Dramix. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/construcao-civil/dramix>>. Acesso em: julho de 2023.
- ARQUEZ, A. P. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.
- ASCENSÃO, G.; SEABRA, M.; AGUIAR, J. B.; LABRINCHA, J. A. Red mud- Based geopolymers with tailored alkali diffusion properties and Ph buffering ability. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 148, p. 23-30, 2017. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.150>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto -Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892-1**: Materiais metálicos – Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio em temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação. Rio de Janeiro. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12821**: Preparação do concreto em laboratório - Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16935**: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras - Procedimento. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16940**: Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

BANTHIA, N.; MAJDZADEH, F.; WU, J.; BINDIGANAVILE, V. Fiber Synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in Flexure and Direct Shear. *Cement and Concrete Composites*, v. 48, p. 91-97, -, 2014. Elsevier BV.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.018>

BARROS, J. A. O. Betão reforçado com fibras de aço: conceitos fundamentais. **Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto (APEB), ISISE - Artigos em Revistas Nacionais**. 2000.

BARROS, J. A. O. **Comportamento de betão reforçado com fibras – Análise experimental e simulação numérica**. Dissertação de Doutorado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Portugal, 1995.

BELGO BEKAERT ARAMES. Não deixe o ouriço invadir sua obra. **Informativo Técnico**. 2018. Disponível em: < <https://www.belgo.com.br/wp-content/uploads/2019/02/FOLDER-DRAMIX-OURICO-2018.pdf>>. Acesso em: janeiro de 2023.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. Elsevier Science Ltd, London. CEB-FIP (2010). Model Code 2010: Final Draft. Model Code prepared by Special Activity Group 5, Lausanne, September, 1990.

BRITANNICA, Os Editores da Enciclopédia. "Torre CN". **Encyclopedia Britannica**, 23 de outubro de 2022. Disponível em: < <https://www.britannica.com/topic/CN-Tower>>. Acesso em: maio de 2023.

BURATTI, N.; MAZZOTTI, C.; SAVOIA, M. Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 25, n. 5, p. 2713-2722, maio 2011. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.022>.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

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

CARVALHO, R. M.; VARUM, H.; BERTINI, A. A. Expedição caminhos da terra – Levantamento final das construções em adobe na região norte e nordeste do estado do Ceará. III Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, Mato Grosso do Sul, 2010.

CHOI, K. K.; REDA TAHA, M. M.; PARK, H. G.; MAJI, A. K. "Punching shear strength of interior concrete slab-column connections reinforced with steel fibers," **Cement Concr. Compos.** vol. 29, no. 5, pp. 409–420, 2007.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.003>

CLADERA, A.; MARÍ, A. R. Shear design of prestressed and reinforced concrete beams. **Magazine of concrete research**, v. 58, nº 10, p. 712-722, 2006.

COLLINS, M. P. Evaluation of shear design procedures for concrete structures. A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design, 2001.

DEBELLA L. C.; MONTOYA-CORONADO L. A.; RESENDE T. L.; E PIERALISI R. Investigação da contribuição do engrenamento dos agregados em vigas de concreto armado e concreto reforçado com fibras de aço **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. vol. 16, no. 3, e16303, 2023. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000300003>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Anuário Mineral Brasileiro**. Brasília (DF), 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>>

DIAZ, B.; JOIRET, S.; KEDDAM, M.; NÓVOA, X. R.; PÉREZ, M. C.; TAKENOUTI, H. "Passivity of iron in red mud's water solutions", **Electrochimica Acta**, n. 49, pp. 3039-3048, 2004.

ELSAIGH, W. A. **Steel fiber reinforced concrete ground slabs: a comparative evaluation of plain and steel fiber reinforced concrete ground slabs**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade de Pretoria. 2001.

EPA - Environmental Protection Agency, Electronic code of federal regulations. **Title 40**, Part 261, Sect 4 (b) (7) (ii) (c), 2022. Disponível em: <<https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2022-title40-vol28/xml/CFR-2022-title40-vol28-sec261-4.xml>>. Acesso em: julho de 2023.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com Fibras de Aço. **Boletim Técnico** – Série BT/PCC/260, Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto reforçado com fibras. 2011. 248 f, Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia da Construção Civil, 2011.

FREITAS, R. A. S. **Comportamento de geotêxteis como filtros em resíduos – Fosfogesso e lama vermelha**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.

FUSCO, P. B. Estruturas de concreto: Solicitações tangenciais. São Paulo: Pini, 2008.

GARCEZ, E. O. **Análise Teórico-Experimental do comportamento de concretos reforçados com fibra de aço submetidos a carga de impacto**. 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GOMES, J. G. **Influência das fibras metálicas no comportamento ao esforço transversal de vigas SFRC**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2013.

GOMES, L. D. S. **Análise experimental da eficiência das fibras de aço no reforço ao cisalhamento de vigas em concreto armado**. 2016. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

HILDEBRANDO, E. A. **Aplicação do rejeito do processo Bayer (lama vermelha) como matéria-prima na indústria cerâmica estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química.) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 1998.

HIND, R. A.; BHARGAVA, S. K.; GROCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects**, n. 146, pp.359-374, 1999.

INSTITUTO INTERNACIONAL DO ALUMÍNIO. **Sustainable bauxite residue management guidance**. Londres. 2 ed. 2022.

JSCE. Japanese Society of Civil Engineers Design: Standard methods – Parte 3. Concrete, 2008.



JSCE. Japanese Society of Civil Engineers - Specification of Steel Fibers for Concrete, Concrete Library, v. 50. 2008.

KWAK, Y. K.; EBERHARD, M. O.; KIM, W. S.; KIM, J. Shear of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups. **ACI Structural Journal**, v. 99, n 4, p. 530-538, 2002.

LACHEMI, M; HOSSAIN, K. M. A; LAMBROS, V. Shear resistance of self-consolidating concrete beams — experimental investigations. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [S.L.], v. 32, n. 6, p. 1103-1113, 1 dez. 2005. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/105-066>.

LEE, S. C.; CHO, J. Y.; VECCHIO, F. J. Diverse Embedment Model for Steel Fiber Reinforced Concrete in Tension: Model Verification. **ACI Material Journal**, v. 108, n. 5, pp. 592-600, September-October, 2011.

LEONHARDT, N. M.; MÖNNING, E. Construções de concreto – Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Vol 1, Rio de Janeiro, Editora interciência, 1994.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. Compósitos estruturais: ciência e tecnologia. São Paulo: Blucher, 2006.

LI, G.; LIU, M.; RAO, M.; JIANG, T.; ZHUANG, J.; ZHANG, Y. Stepwise Extraction of valuable components from red mud based on reductive coasting with sodium salts. **Journal Hazardous Materials**, [s. l.], v. 35, p. 87-95, 2014. Elsevier BV. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.005>

LIM, D. H.; OH, B. H. Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 21, n. 10, p. 937-944, out. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0141-0296\(98\)00049-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0141-0296(98)00049-2)

LIMA, R. P. A. F. P. **Utilização de fibras metálicas com funções estruturais em estruturas de betão**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, setembro, 2012.

LIMA, J. C. L. **Proposta para Cálculo da Tensão de Cisalhamento em Vigas de Concreto Armado com Estribos**. 2019. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

LOBÃO, L. M. M. **Taxa de armadura longitudinal mínima em vigas de concreto de resistência normal com fibras de aço**. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, 2005.

LOBO, F. A., **Estudo dos mecanismos de transferência de tensões de cisalhamento em concreto reforçado com fibras de aço: análise do intertravamento de agregados**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

LOPES, M. M. **Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto**. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, 2005.

MACHADO, V. C. **Resíduo da bauxita na produção de agregados graúdos sintéticos para concreto estrutural: análise de durabilidade**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

MADAN, S. K.; KUMAR, G. R.; SINGH, S. P. Steel fibers as replacement of web reinforcement RCC deep beams in shear. **Asian Journal of Civil Engineering** (Building and Housing), v. 8, n 5, p. 479-489, 2007.

McCONCHIE, D.; CLARK, M.; DAVIES-McCONCHIE, F. **New strategies for the management of bauxite refinery residues (red mud)**. In: Proceedings of the 6th international alumina quality workshop, Brisbane, Australia, pp. 327-332, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais. Ed. PINI. São Paulo, 2006.

MODEL CODE 2010. CEB-FIP model code 2010 e final draft. Lausanne, Switzerland: Thomas Thelford; 2010.

MORAES NETO, B. N. **Comportamento à Punção de Lajes Lisas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço sob Carregamento Simétrico**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD-001A/13 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 343 p. 2013.

NAAMAM, A. E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**. v.1, n.3, p. 241-252, Novembro, 2003.

NEVILLE, A. M. (1995). Properties of concrete, 5th Edition. Pitman Publishing Comp. Ltd., New York.

NUNES, N. L.; AGOPYAN, V. Influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibra de aço. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. São Paulo, 1998. 26 p.

NUNN, R. F. Advances in red mud dewatering and disposal Technologies. **The Minerals, Metals & Materials Society**, 1998.

OLIVEIRA, D. R. C.; ROSSI, C. R. C. Concretes with red mud coarse aggregates. **Materials Research**, vol. 15, n. 3, pp. 333–340, May 2012 (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392012005000033>

OLIVEIRA, F. L. **Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete**. Tese de doutorado. Universidade Politécnica de Catalunya. Departamento de Engenharia civil. Barcelona. 2010.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Revista Concreto & Construções**, Revista oficial do IBRACON, Ano XXXVII, n. 53, pg. 14-19, 2009.

POLI, S. D.; PRISCO, M. D.; GAMBAROVA, P. G. Shear Response, Deformations, and Subgrade Stiffness of a Dowel Bar Embedded in Concrete, **ACI Structural Journal**, Vol. 89, nº 6, p. 665-675, 1992.

PRADHAN, J.; DAS, S. N.; DAS, J.; RAO, S. B. THAKUR, R.S. Characterization of Indian red muds and recovery of their metal values. **Light Metals**, pp. 87-92, 1996.

RAMLI, M.; DAWOOD, E. T. High-strength flowable mortar reinforced by steel fiber. **Slovak Journal of Civil Engineering**. v. 19, p. 10-16, 2011.

RIBEIRO, M. C. D. **Agregado sintético de resíduo de Bauxita para produção de concreto**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2022.

RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete, Recommendation. **Materials and Structures**, v. 34, p. 3-6, 2002.

ROBINS, P.; AUSTIN, S.; JONES, P. Pull-out Behaviour of Hooked Steel Fibres. **Materials and Structures**, V 35, p. 434-442, Rilem Publications, 2002.

RODRIGUES DE SOUZA, F. **Concreto reforçado com fibras de PVA aplicado a pavimentos aeroportuários: propriedades mecânicas e dimensionamento**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

ROSÁRIO, K. A. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura**. 78 f. Tese de Doutorado (Doutor) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2013.

SANTOS, D. H. **Influência da Sílica e temperatura nas propriedades físicas dos agregados sintéticos produzidos com o resíduo do processo Bayer**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará. 2019.

SANTOS, S. P. F. **The Bending and Shear Behaviour of Laminar Structures of High Performance Fibre Reinforced Concrete**. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. 2009.

SOUZA, J. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil**. Tese. (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia), Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

SOUZA, J. A. S.; RACANELLI, L. A.; QUARESMA, J. N. N. Estudo da Produção do Agregado Sintético Fabricado com Resíduo do Processo Bayer para indústria da construção civil - Parte I. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro. 2022. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220001.1356>.

SUSETYO, J. **Fiber Reinforcement for Shrinkage Crack Control in Prestressed, Precast Segmental Bridges**. Ph.D. Dissertation, University of Toronto, Department of Civil Engineering, p. 532, 2009.

TASSIOS, T. P.; VINTZELEOU, E. Shear crack stability along a precast reinforced concrete joint. In: CARPINTERI, A. Applications of Fracture Mechanics to Reinforced Concrete. Taylor & Francis Group, p. 465-485, 1990.

VELASCO, R. V. **Concretos autoadensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânica e térmicas**. tese de doutorado, UFRJ – RJ: 349 p, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

VITOR, P. C. P.; SANTOS, A. C.; TRAUTWEIN, L. M. Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço. **Ambiente Construído**, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 255-270, set. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000300280>.

VOO, J. Y. L.; FOSTER, S. J. Tensile fracture of fibre reinforced concrete: variable engagement model. **Sixth Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concrete (FRC)**, Varenna, Italy, pg. 875-884.2004

WECHARATANA, M.; SHAH, S. P. A model for predicting fracture resistance of fibre reinforced concrete. **Cement and concrete research**, v. 13, p. 819-829, 1983.

WANG, Z. L.; WU, L. P.; WANG, J. G. A study of constitutive relation and dynamic failure for SFRC in compression. **Construction and Building Materials**, V 24, n. 8, p. 1358-1363; 2010. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.038>

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. Reinforced concrete: mechanics and design. 6th ed. New Jersey: Pearson, 2012.

YALÇIN, N.; SEVINÇ, V. Utilization of bauxite waste in ceramic glazes, **Ceramics International**, v. 26, ed. 5, pp. 485-493, 2000. ELSEVIER BV. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(99\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(99)00083-8)

YANG J.; XIAO B. Development of unsintered construction materials from red mud wastes produced in the sintering alumina process. **Construction and Building Materials**. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.005>