

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

RICARDO LAGUARDIA JUSTEN DE ALMEIDA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO DE
ALTA RESISTÊNCIA REFORÇADO COM FIBRAS**

São Carlos – SP
2023

RICARDO LAGUARDIA JUSTEN DE ALMEIDA

COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA REFORÇADO COM FIBRAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Guilherme Aris Parsekian

Coorientador: Marco Antônio Carnio

São Carlos – SP
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Ricardo Laguardia Justen de Almeida, realizada em 30/11/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian (UFSCar)

Profa. Dra. Renata Monte (USP)

Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima (UEFS)

Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti (PUECAMP)

Profa. Dra. Gláucia Maria Dalfré (UFSCar)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais pelo incentivo e apoio sempre que precisei, em todos os momentos da minha vida, para que chegasse até aqui.

Ao Prof. Guilherme Aris Parsekian pela orientação, dedicação, solicitude e conselhos ao longo dessa jornada, além da confiança depositada em mim ao longo de todo este trabalho, nunca medindo esforços para me auxiliar.

Ao Prof. Marco Carnio por todos os conselhos, disponibilidade e contribuições indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

À Evolução Engenharia por disponibilizar seu laboratório para a realização dos ensaios de flexão, e ao Guilherme Sumitomo por todo o cuidado e atenção na execução dos experimentos.

Ao Prof. Rogério Ribeiro, do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), por disponibilizar o Laboratório de Mecânica das Rochas para a realização dos ensaios de compressão por controle de deslocamento, e ao técnico Oscar Neto, pela atenção e prudência na execução dos ensaios.

Ao Prof. Cláudio Pinto, do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), por disponibilizar o Laboratório de Tecnologia de Rochas para a finalização dos ensaios de compressão por controle de deslocamento, e ao técnico Cleber Eustáquio também pela atenção e cuidado na execução dos ensaios.

Aos professores Daniel Araújo e Paulo Lima, membros da banca do exame de qualificação, por todas as relevantes contribuições para o progresso deste trabalho.

Aos técnicos Ricardo Canato e José Roberto, dos Laboratório de Sistemas Estruturais e Laboratório de Materiais e Componentes da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) por todo o auxílio ao longo do programa experimental.

Aos fornecedores dos materiais para a pesquisa, sem os quais a realização deste trabalho não seria possível:

Fábio Saráo, pelas fibras de vidro pultrudadas e poliméricas monofiladas;

Belgo Bekaert Arames, por meio do Vinícius Gonçalves, pelas fibras de aço com gancho;

Matcon Supply, por meio do Sérgio Fiaschi, pelas fibras de aço corrugadas;

VIAPOL, por meio do Gustavo Polidoro, pelas fibras poliméricas torcidas;
Owens Corning, por meio do Sinésio Baccan, pelas fibras de vidro filamentada;
MC-Bauchemie, por meio do Alberto Silva, pelo superplastificante;
Elkem, por meio do José Eduardo Marão, pela sílica em pó.

À Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL) e principalmente ao José Mário Barbosa Alves, pela compreensão e concessão do Regime Especial de Cumprimento de Jornada de Trabalho para que eu pudesse finalizar o doutorado.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGECiv) por todos os ensinamentos e contribuições na jornada acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e fomento à minha pesquisa.

Aos amigos e colegas do PPGECiv pelas conversas, apoio, conselhos e pelos momentos de descontração. Agradeço em especial ao amigo Tiago Padilha pelo auxílio nas moldagens dos corpos de prova.

Finalmente, agradeço a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a finalização deste trabalho.

RESUMO

A adição de fibras ao concreto proporciona ductilidade e sua contribuição ao concreto de alta resistência pode ser ainda mais relevante devido à elevada fragilidade do material. Apesar disso, as pesquisas na literatura que investigam o comportamento mecânico do concreto de alta resistência reforçado com fibras (CARRF) são limitadas e envolvem majoritariamente concretos reforçados com fibras de aço. Nesse contexto, esta pesquisa investigou o comportamento mecânico do CARRF por meio de um extenso programa experimental contemplando seis tipos diferentes de fibra, divididos em três categorias conforme o material da fibra: fibra de aço com gancho, fibra de aço corrugada, fibra de vidro filamentada, fibra de vidro pultrudada, fibra polimérica monofilada e fibra polimérica torcida. Cada uma dessas fibras foi estudada em três frações volumétricas (V_f) diferentes (0,50%, 0,75% e 1,00%), formando 29 diferentes traços no programa experimental. Os parâmetros analisados foram o tipo e o teor de fibra e a resistência à compressão do concreto (60 e 90 MPa). O comportamento mecânico foi investigado por meio de ensaios de compressão por controle de deslocamento para a obtenção da curva tensão-deformação completa, enquanto ensaios de flexão em três pontos foram realizados para a determinação das resistências residuais em conformidade com a ABNT NBR 16940 (2021). Os resultados dos ensaios de compressão mostraram que a adição de fibras pode afetar as propriedades mecânicas do concreto, como resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico, dependendo do tipo e do teor de fibra. A tenacidade, por outro lado, é claramente influenciada pela adição e teor de fibras. Em geral, quanto maior a fração volumétrica de fibras, maiores são a tenacidade e a resistência residual na compressão, independentemente do tipo de fibra. As maiores tenacidades e resistências residuais na compressão foram observadas para as fibras de aço, seguidas pelas fibras de vidro e fibras poliméricas. Modelos constitutivos na compressão foram ajustados para cada tipo de fibra e apresentaram ótima concordância com os resultados experimentais, podendo ser utilizado para estimar a ductilidade e tenacidade do CARRF para a faixa de resistência à compressão investigada. Na flexão, foi observado que o limite de proporcionalidade é levemente influenciado pelo teor de fibras, e as maiores resistências residuais foram observadas para as fibras de aço com gancho, seguidas pelas fibras de vidro pultrudadas e fibras de aço corrugadas, fibras poliméricas e fibras de vidro filamentadas. Além disso, foi observado que as condições exigidas pela norma técnica para a utilização de fibras em aplicações estruturais devem ser revistas para o concreto de alta resistência reforçado com fibras. Um modelo numérico em elementos finitos foi desenvolvido para simular os ensaios de flexão e as curvas obtidas apresentaram boa concordância com os resultados experimentais em termos de tenacidade. A partir de sua validação, modelos constitutivos multilíneares foram propostos por meio de uma análise inversa e podem ser utilizados para fins de dimensionamento. As análises realizadas também demonstraram que os modelos simplificados da norma técnica podem superestimar (no caso do modelo linear) ou subestimar (no caso do modelo rígido-plástico) a tenacidade CARRF e não representam o comportamento pós-fissuração do concreto de alta resistência reforçado com fibras de vidro e poliméricas.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras; modelo constitutivo; resistência residual; concreto de alta resistência.

ABSTRACT

The addition of fibers to concrete provides ductility and their contribution to high-strength concrete may be even more relevant due to the high brittleness of the material. Nevertheless, research in the literature investigating the mechanical behavior of high-strength fiber-reinforced concrete (HSFRC) is limited and mostly involves concrete reinforced with steel fibers. This research investigated the mechanical behavior of high-strength fiber-reinforced concrete (HSFRC) through an extensive experimental program with six different types of fiber divided into three categories according to the material of the fiber: hooked-end steel fiber, crimped steel fiber, chopped glass fiber, pultruded glass fiber, monofilament polymeric fiber and twisted polymeric fiber. Each one of these fibers was studied at three different volume fractions (V_f) (0.50%, 0.75% and 1.00%), making a total of 29 different mixes in the experimental program. The parameters analyzed were the type and fiber content and the compressive strength of the concrete (60 and 90 MPa). The mechanical behavior was investigated through compressive displacement-controlled tests to obtain the complete stress-strain curve and three-point bending tests in notched beams to determine the residual strengths. The test results showed that the addition of fibers can affect the mechanical properties of concrete, such as compressive strength, elastic modulus and peak strain, depending on the type and fiber content. Toughness, on the other hand, is clearly influenced by the fiber addition and content. In general, the greater the fiber content, the greater the toughness and residual strength in bending regardless of the fiber type. Steel fibers provided the highest toughness and residual strengths in compression, followed by glass fibers and polymeric fibers. Constitutive models in compression were proposed for each type of fiber and showed good agreement with the experimental results and can be used to estimate the ductility and toughness of the HSFRC. In bending, the limit of proportionality is slightly influenced by the fiber content and hooked-end steel fibers also provided the highest residual strengths, followed by pultruded glass fibers and crimped steel fibers, polymeric fibers and chopped glass fibers. Furthermore, the requirements of technical standards for using fibers in structural applications were discussed and must be reviewed for high-strength fiber-reinforced concrete. The experimental results of the bending tests were used in finite element modelling (FEM) to obtain the constitutive model in tension by inverse analysis. The results obtained with the numerical model showed good agreement with the experimental results in terms of toughness and proved to be a useful tool for numerical simulations of fiber-reinforced concrete. From the validation of the numerical model, multilinear constitutive models were proposed and can be used for design purposes. The analyzes carried out also demonstrated that the simplified models of the technical standard can overestimate (in the case of the linear model) or underestimate (in the case of the rigid-plastic model) the toughness of HSFRC and do not represent the post-cracking behavior of high-strength concrete reinforced with glass and polymeric fibers.

Keywords: fiber-reinforced concrete; constitutive model; residual strength; high-strength concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aplicações do CRF: (a) pavimentos industriais; (b) elementos pré-moldados; (c) revestimento de túneis.....	24
Figura 2. Procedimento adotado para o levantamento de estudos sobre CRF (pesquisa realizada em 19/09/2023).....	28
Figura 3. Pesquisas que envolvem a caracterização do concreto reforçado com fibras.	30
Figura 4. Diagrama tensão-deformação do concreto submetido à compressão simples segundo a ABNT NBR 6118:2023.	31
Figura 5. Frequência de estudos envolvendo o cisalhamento do concreto reforçado com fibras.	34
Figura 6. Quantidade de publicações sobre cisalhamento do CRF com caracterização mecânica do material.....	35
Figura 7. Evolução dos tipos de concreto segundo a relação a/c e a resistência à compressão.	39
Figura 8. Modelo do compósito considerado como um sistema de dois componentes: a matriz e a fibra.	42
Figura 9. Características das fibras utilizadas no concreto.....	45
Figura 10. Tipos de fibras utilizados no concreto.....	45
Figura 11. Feixes de fibras: (a) não torcida e (b) torcida	46
Figura 12. Influência do módulo de elasticidade e da resistência mecânica da fibra sobre o comportamento mecânico do compósito.	50
Figura 13. Propriedades recomendadas da fibra e da matriz.	51
Figura 14. Tipos de fibras de aço: (a) formatos e (b) seções transversais típicas. ...	53
Figura 15. Fibras de aço coladas e soltas.	54
Figura 16. Pentes de fibras de aço com ganchos nas extremidades.....	54
Figura 17. Fibras de vidro: (a) macrofibra para reforço; (b) fibras contínuas (<i>roving</i>); (c) manta.....	56
Figura 18. Desempenho das fibras de vidro-E e vidro-AR em meio alcalino.....	58
Figura 19. Fibra de vidro AR pultrudada.....	60
Figura 20. Processo de pultrusão.....	60

Figura 21. Macrofibras poliméricas.....	61
Figura 22. Distribuição de tensões de cisalhamento elástica e por atrito ao longo da fibra interceptando uma fissura.....	65
Figura 23. Comportamento da fibra durante o ensaio <i>pull-out</i>	66
Figura 24. Variação do espaço disponível em função do tamanho do agregado.	67
Figura 25. Equipamento utilizado no método do consistômetro VeBe para avaliar a consistência do concreto.	68
Figura 26. Influência do teor e do fator de forma das fibras sobre a consistência do concreto.....	68
Figura 27. Influência do teor de fibras sobre a consistência do concreto obtido em duas metodologias: (a) <i>slump test</i> e (b) tempo VeBe.....	69
Figura 28. Influência do tamanho do agregado na consistência do concreto.	71
Figura 29. Compatibilidade dimensional entre o agregado e a fibra.....	71
Figura 30. Pontes de transferência de tensões criadas pelas fibras.....	74
Figura 31. Influência da adição de fibras sobre o comportamento à compressão do concreto.....	77
Figura 32. Influência das fibras no comportamento a compressão do CRF: declividade do ramo pós-pico.	78
Figura 33. Representação da tenacidade relativa proposta por Ezeldin e Balaguru (1992).	79
Figura 34. Resultados de ensaios de compressão de concreto reforçado com fibras de aço: (a) influência do teor de fibras e (b) influência do fator de forma das fibras sobre a tenacidade à compressão.....	82
Figura 35. Efeito da adição de fibras sobre o comportamento a compressão do concreto convencional.	83
Figura 36. Modo de falha observado corpos de prova cilíndricos: (a) concreto simples e (b) concreto reforçado com fibras de aço ($V_f = 3,0\%$; $l_f = 22$ mm; fator de forma = 40)	87
Figura 37. Classificação do comportamento do CRF à tração direta.....	88
Figura 38. Curva tensão-deformação do concreto reforçado com fibras: (a) <i>strain-softening</i> e (b) <i>strain-hardening</i>	90
Figura 39. Ruptura de protótipos de CRF ilustrando o comportamento (a) <i>strain-softening</i> e (b) <i>strain-hardening</i>	91

Figura 40. Classificação do CRF para ensaios de tração e flexão.	93
Figura 41. Configurações de ensaios de tração para obtenção da curva tensão-deformação.	94
Figura 42. Modelo constitutivo à tração proposto por Garcez; Kabir; Macleod (2019).	97
Figura 43. Mecânica básica do CRF.	98
Figura 44. Possíveis seções transversais de fibras e seus respectivos valores de <i>FIER</i> comparado com a fibra de seção circular.	99
Figura 45. Disposição das fibras no concreto.	100
Figura 46. Distribuição e quantidade de fibras no plano da fissura.	100
Figura 47. Orientação das fibras (1D).	101
Figura 48. Orientação das fibras: (a) 2D; (b) 3D.	101
Figura 49. (a) ensaio de arrancamento da fibra e (b) ensaio de tração direta.	105
Figura 50. Influência da relação a/a_g em fibras de náilon: (a) $a/a_g = 0,20$ e (b) $a/a_g = 0,30$	106
Figura 51. Resultados de ensaios de flexão: (a) fibras de polipropileno rompidas e (b) fibras de aço corrugadas arrancadas.	107
Figura 52: Resultados de ensaios de arrancamento: influência da taxa de carregamento e comprimento de embutimento da fibra.	107
Figura 53. Curvas típicas de força-deslizamento e o processo de arrancamento para (a) fibras de aço retas e (b) fibras de aço com gancho.	110
Figura 54. Modelo de distribuição de tensão e deformação na seção fissurada de uma viga sob de CRF sob flexão.	112
Figura 55. Frações volumétricas estudadas por Oettel <i>et al.</i> (2021).	114
Figura 56. Consumo de fibras dos estudos investigados por Galeotte <i>et al.</i> (2022).	115
Figura 57. Distribuição de tensões ao longo da fibra de acordo com seu comprimento.	116
Figura 58. Atuação das fibras curtas e longas no processo de fissuração do concreto.	118
Figura 59. Planejamento experimental	123
Figura 60. Fibras de aço com ganchos nas extremidades.	125

Figura 61. Fibras de aço corrugadas.	126
Figura 62. Fibras de vidro-AR em filamento.	127
Figura 63. Fibras de vidro-AR pultrudada.	127
Figura 64. Fibras poliméricas em monofilamento.	128
Figura 65. Fibras poliméricas torcida.	128
Figura 66. Granulometria do agregado miúdo.	129
Figura 67. Granulometria do agregado graúdo.	130
Figura 68. Armazenamento de materiais: (a) agregado graúdo e (b) sílica em pó.	130
Figura 69. Aditivo superplastificante de alto desempenho utilizado na confecção dos corpos de prova.	131
Figura 70. Separação dos materiais para o início da moldagem.	133
Figura 71. Propriedades do concreto no estado fresco: consistência e teor de ar incorporado no concreto.	134
Figura 72. Moldes utilizados para os corpos de prova.	134
Figura 73. Adensamento do concreto em mesa vibratória.	135
Figura 74. Corpos de prova cobertos com plástico para evitar perda de água por evaporação.	135
Figura 75. Cura submersa dos corpos de prova.	136
Figura 76. Preparação dos corpos de prova para ensaio: (a) retífica dos corpos de prova cilíndricos e (b) entalhe nos prismas.	137
Figura 77. (a) Transporte dos prismas; (b) corpos de prova aguardando a data de ensaio.	137
Figura 78. Abatimento do tronco de cone dos traços do Grupo 1.	139
Figura 79. Abatimento do tronco de cone dos traços do Grupo 2.	140
Figura 80. Teor de ar incorporado dos traços do Grupo 1.	141
Figura 81. Teor de ar incorporado dos traços do Grupo 2.	141
Figura 82. Massa específica dos traços do Grupo 1.	142
Figura 83. Massa específica dos traços do Grupo 2.	142
Figura 84. Máquina MTS815 utilizada nos ensaios de compressão.	145

Figura 85. Metodologia dos ensaios de compressão.....	146
Figura 86. Efeito Poisson em ensaios de compressão.....	148
Figura 87. Curvas tensão-deformação normalizadas na compressão dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.....	151
Figura 88. Curvas tensão-deformação normalizadas na compressão (Grupo 1): (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; e (c) $V_f = 1,00\%$	154
Figura 89. Curvas tensão-deformação na compressão dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.....	154
Figura 90. Modos de falha observados nos ensaios de compressão em conformidade com a ABNT NBR 5739 (2018).....	155
Figura 91. Influência da fração volumétrica de fibra sobre a resistência à compressão do concreto (Grupo 1).....	156
Figura 92. Resultados do teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos resultados.....	157
Figura 932. Análise de variância da adição e teor de fibras sobre a resistência à compressão dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.....	158
Figura 94. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência da adição e teor de fibras sobre a resistência à compressão dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida....	160
Figura 95. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre a resistência à compressão dos traços do Grupo 1: (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; (c) $V_f = 1,00\%$	161
Figura 96. Influência da fração volumétrica de fibras sobre o módulo de elasticidade do concreto (Grupo 1).....	162
Figura 97. Módulo de elasticidade experimental e teórico (Grupo 1).....	163
Figura 98. Análise de variância da adição e teor de fibras sobre o módulo de elasticidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.....	164
Figura 99. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência da adição e teor de fibras sobre o módulo de elasticidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com	

gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.... 165

Figura 100. Influência do teor de fibra sobre a deformação de pico do concreto (Grupo 1). 166

Figura 101. Análise de variância da adição e teor de fibras sobre a deformação de pico dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida. 167

Figura 102. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência da adição e teor de fibras sobre a deformação de pico dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida. 168

Figura 103. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre a deformação de pico dos traços do Grupo 1: (a) $V_f = 0,50\%$; (b) (a) $V_f = 0,75\%$; (c) $V_f = 1,00\%$ 169

Figura 104. Influência da fração volumétrica de fibras sobre a tenacidade do concreto. 170

Figura 105. Análise de variância da adição e teor de fibras sobre a tenacidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida. 171

Figura 106. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência da adição e teor de fibras sobre a tenacidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida..... 172

Figura 107. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre a tenacidade dos traços do Grupo 1: (a) $V_f = 0,50\%$; (b) (a) $V_f = 0,75\%$; (c) $V_f = 1,00\%$ 173

Figura 108. Determinação da resistência residual do concreto reforçado com fibras na compressão. 174

Figura 109. Influência da fração volumétrica de fibra sobre a resistência residual na compressão. 175

Figura 110. Curva tensão-deformação dos traços do Grupo 2: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de vidro em filamento e (c) fibra polimérica em monofilamento... 177

Figura 111. Análise das curvas tensão-deformação do concreto reforçado com fibra polimérica em monofilamento (Grupo 2)..... 177

Figura 112. Curvas tensão-deformação normalizadas na compressão (Grupo 2): (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; e (c) $V_f = 1,00\%$ 178

Figura 113. Modo de falha dos corpos de prova: (a) ruptura cônica do traço de referência após ensaio de controle de deslocamento e (b) cunhas de concreto reforçado com fibras de vidro após ensaio por controle de carga.	179
Figura 114. Influência da fração volumétrica de fibras sobre a resistência à compressão do concreto (Grupo 2).	181
Figura 115. Influência da fração volumétrica de fibras sobre o módulo de elasticidade.	182
Figura 116. Módulo de elasticidade experimental e teórico (Grupo 2).	183
Figura 117. Influência da fração volumétrica de fibra sobre a deformação de pico do concreto (Grupo 2).	183
Figura 118. Influência do parâmetro β no modelo constitutivo de Carreira e Chu (1985).	186
Figura 119. Análise de regressão linear para determinação da deformação de pico (ϵ_{co}) em função de RI.	189
Figura 120. Análise de regressão linear para determinação do parâmetro β em função de RI.	189
Figura 121. Comparação entre as curvas analíticas e experimentais.	190
Figura 122. Comparação entre os modelos constitutivos ajustados ($f_c = 60$ MPa) e o modelo constitutivo da ABNT NBR 6118 (2023): (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.	191
Figura 123. Comparação entre o modelo constitutivo ajustado e modelos da literatura ($V_f = 0,50\%$).	195
Figura 124. Comparação entre o modelo constitutivo ajustado e modelos da literatura ($V_f = 0,75\%$).	196
Figura 125. Comparação entre o modelo constitutivo ajustado e modelos da literatura ($V_f = 1,00\%$).	198
Figura 126. Máquina InterMetric utilizada nos ensaios de flexão em três pontos. ...	202
Figura 127. Detalhe do <i>clip-gage</i> para o ensaio de flexão em três pontos e dimensões dos prismas entalhados (em mm).	203
Figura 128. Curva carga-abertura de fissura genérica obtida no ensaio de flexão de vigas.	203
Figura 129. Tenacidade na flexão.	204
Figura 130. Curvas tensão-CMOD dos traços do Grupo 1.	205

Figura 131. Curvas tensão-CMOD dos traços do Grupo 1 separados por fração volumétrica de fibra.....	208
Figura 132. Comportamentos <i>deflection-hardening</i> e <i>deflection-softening</i> observados nos experimentos.	208
Figura 133. Evolução da fissuração ao longo do ensaio com o traço 60-POLMON-0,75.	209
Figura 134. Limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 1.	210
Figura 135. Resultados do teste de Shapiro-Wilk para verificação da distribuição normal do limite de proporcionalidade do Grupo 1.	211
Figura 136. Análise de variância do teor de fibras sobre o limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.	212
Figura 137. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência do teor de fibras sobre o limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida....	213
Figura 138. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre o limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 1: (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; (c) $V_f = 1,00\%$	214
Figura 139. Regressões lineares para estimar f_{R1} do Grupo 1.	215
Figura 140. Regressões lineares para estimar f_{R3} do Grupo 1.	216
Figura 141. Resistências residuais dos traços do Grupo 1.....	217
Figura 142. Tenacidade na flexão dos traços do Grupo 1.	224
Figura 143. Curvas tensão-CMOD do Grupo 2.....	226
Figura 144. Curvas tensão-CMOD dos traços do Grupo 2 separados por fração volumétrica de fibra.....	226
Figura 145. Limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 2.	227
Figura 146. Resultados do teste de Shapiro-Wilk para verificação da distribuição normal do limite de proporcionalidade do Grupo 2.	228
Figura 147. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do teor de fibra sobre o limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 2: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de vidro em filamento; (c) fibra polimérica em monofilamento.	228

Figura 148. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre o limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 2: (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; (c) $V_f = 1,00\%$	229
Figura 149. Regressões lineares para estimar f_{R1} do Grupo 2.	230
Figura 150. Regressões lineares para estimar f_{R3} do Grupo 2.	231
Figura 151. Resistências residuais dos traços do Grupo 2.....	232
Figura 152. Tenacidade na flexão dos traços do Grupo 2.	236
Figura 153. Comparação entre as curvas tensão-CMOD dos Grupos 1 e 2.....	239
Figura 154. Classificação do concreto reforçado com fibras.	245
Figura 155. Verificação das condições para uso de fibras em aplicações estruturais.	251
Figura 156. Modelos constitutivos: (a) rígido-plástico e (b) linear.....	252
Figura 157. Distribuição de tensões ao longo da seção no modelo rígido-plástico.	253
Figura 158. Distribuição de tensões no modelo linear, em que $w_u = CMOD_3$	253
Figura 159. Modelo constitutivo linear pós-fissuração.	254
Figura 160. Modelo constitutivo rígido-plástico dos traços do Grupo 1.....	256
Figura 161. Modelo constitutivo linear dos traços do Grupo 1.....	257
Figura 162. Modelos constitutivos do Grupo 2: rígido-plástico e linear.....	258
Figura 163. Comparação entre os modelos lineares dos Grupos 1 e 2.	259
Figura 164. Fluxograma adotado para a obtenção do modelo constitutivo à tração por análise inversa.....	263
Figura 165. Geometria e condições de contorno do modelo numérico.....	264
Figura 166. Malha dos elementos.....	265
Figura 167. Energia interna e cinética do modelo numérico.	266
Figura 168. Função do deslocamento aplicado no modelo numérico.	267
Figura 169. Dano no concreto comprimido (a) e tracionado (b).....	267
Figura 170. Modelos constitutivos utilizados para o concreto tracionado: (a) modelo rígido-plástico; (b) modelo linear e (c) modelo proposto.	269
Figura 171. Curvas numéricas tensão-CMOD dos concretos reforçados com fibras de aço do Grupo 1.	272

Figura 172. Curvas numéricas tensão-CMOD dos concretos reforçados com fibras de vidro do Grupo 1.....	273
Figura 173. Curvas numéricas tensão-CMOD dos concretos reforçados com fibras poliméricas do Grupo 1.....	274
Figura 174. Aspecto da fissuração experimental e numérico ($CMOD_4 = 3,50$ mm).276	
Figura 175. Curvas numéricas tensão-CMOD do concreto reforçado com fibras de aço com gancho do Grupo 2.	279
Figura 176. Curvas numéricas tensão-CMOD do concreto reforçado com fibras de vidro filamentadas do Grupo 2.....	279
Figura 177. Curvas numéricas tensão-CMOD do concreto reforçado com fibras poliméricas monofiladas do Grupo 2.	280
Figura 178. Interseção entre os resultados experimentais e o modelo rígido-plástico	281
Figura 179. Modelos constitutivos propostos na tração para cada tipo de fibra.	283

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estimativa do consumo de fibras para concreto por ano em 2018 (em toneladas).....	24
Tabela 2. Normas técnicas brasileiras sobre o CRF.....	26
Tabela 3. Pesquisas sobre CRF envolvendo diferentes metodologias de caracterização.	28
Tabela 4. Propriedades de diferentes tipos de fibras.....	47
Tabela 5. Composição química das fibras de vidro.	57
Tabela 6. Classificação das fibras em função do diâmetro e forma.....	59
Tabela 7. Modelos constitutivos na compressão de concreto reforçado com fibras retirados da literatura.....	85
Tabela 8. Modelos constitutivos apresentados por diferentes normas técnicas e recomendações.	95
Tabela 9. Parâmetros que influenciam o comportamento de arrancamento da fibra da matriz de concreto.	111
Tabela 10. Frações volumétricas de fibras adotadas em diferentes estudos.	114
Tabela 11. Parâmetros avaliados na pesquisa.	120
Tabela 12. Tipos de fibra conforme a resistência do concreto.....	120
Tabela 13. Consumo de fibras correspondente a cada teor [kg/m ³].....	121
Tabela 14. Traços do programa experimental.	122
Tabela 15. Propriedades do concreto reforçado com fibras avaliadas no programa experimental.	124
Tabela 16. Características das fibras de aço com ganchos nas extremidades.	125
Tabela 17. Características da fibra de aço corrugada.	126
Tabela 18. Características da fibra de vidro-AR em filamento.....	127
Tabela 19. Características da fibra de vidro-AR pultrudada.	127
Tabela 20. Características da fibra polimérica em monofilamento.	128
Tabela 21. Características da fibra polimérica torcida.	128
Tabela 22. Propriedades dos agregados.....	130
Tabela 23. Traços da matriz de concreto.....	131

Tabela 24. Propriedades do concreto reforçado com fibras no estado fresco.	138
Tabela 25. Resultados dos ensaios de compressão (Grupo 1).	149
Tabela 26. Modo de falha dos corpos de prova.	153
Tabela 27. Resultados dos ensaios de compressão por controle de deslocamento (Grupo 2).	175
Tabela 28. Corpos de prova do Grupo 2 após o ensaio por controle de deslocamento.	180
Tabela 29. Comparação entre curvas tensão-deformação dos concretos dos Grupos 1 e 2.	184
Tabela 30. Expressões para estimar a deformação de pico (ϵ_{c0}) e o parâmetro β	187
Tabela 31. Resultados médios dos ensaios de flexão do Grupo 1 ($n = 4$).	207
Tabela 32. Análise de variância (ANOVA) do teor de fibras sobre as resistências residuais f_{R1} e f_{R3}	219
Tabela 33. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência do teor de fibra sobre as resistências residuais f_{R1} e f_{R3}	220
Tabela 34. Análise de variância (ANOVA) do tipo de fibra sobre as resistências residuais f_{R1}	221
Tabela 35. Análise de variância (ANOVA) do tipo de fibra sobre as resistências residuais f_{R3}	222
Tabela 36. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre as resistências residuais f_{R1} e f_{R3}	223
Tabela 37. Resultados dos ensaios de flexão dos traços do Grupo 2 ($n = 4$).	225
Tabela 38. Análise de variância (ANOVA) do teor de fibras sobre a resistência residual f_{R1} dos traços do Grupo 2	231
Tabela 39. Análise de variância (ANOVA) do teor de fibras sobre a resistência residual f_{R1} dos traços do Grupo 2	233
Tabela 40. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência do teor de fibra sobre as resistências residuais f_{R1} e f_{R3} dos traços do Grupo 2.	233
Tabela 41. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre a resistência residual f_{R1} dos traços do Grupo 2.	235
Tabela 42. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre a resistência residual f_{R1} dos traços do Grupo 2.	235
Tabela 43. Propriedades mecânicas do Grupo 2 em relação ao Grupo 1.	237

Tabela 44. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre o limite de proporcionalidade das fibras de aço com gancho.....	240
Tabela 45. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre o limite de proporcionalidade das fibras de vidro filamentadas.....	240
Tabela 46. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre o limite de proporcionalidade das fibras poliméricas em monofilamento.	241
Tabela 47. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R1} das fibras de aço com gancho.....	241
Tabela 48. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R1} das fibras de vidro filamentadas.....	242
Tabela 49. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R1} das fibras poliméricas em monofilamento.	242
Tabela 50. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R3} das fibras de aço com gancho.	243
Tabela 51. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R3} das fibras de vidro filamentadas.....	243
Tabela 52. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R3} das fibras poliméricas em monofilamento.	243
Tabela 53. Classificação do CRF em função da relação f_{R3k}/f_{R1k}	245
Tabela 54. Coeficientes de variação dos traços do Grupo 1.	246
Tabela 55. Coeficientes de variação dos traços do Grupo 2.	247
Tabela 56. Classificação do concreto reforçado com fibras.....	248
Tabela 57. Tenacidade na flexão dos modelos constitutivos dos traços do Grupo 1.	255
Tabela 58. Relação $f_{Ftu,linear} / f_{Ftu,RP}$ dos traços do Grupo 1.	255
Tabela 59. Relação $f_{Ftu,linear} / f_{Ftu,RP}$ dos traços do Grupo 2.	257
Tabela 60. Parâmetros adotados para o CDP.	269

Tabela 61. Modelos constitutivos adotados para tração (curvas tensão-abertura de fissura).....	270
Tabela 62. Comparação entre as tenacidades dos modelos do Grupo 1.	277
Tabela 63. Comparação entre as tenacidades dos modelos do Grupo 2.	278

SUMÁRIO

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	22
1.1 Objetivos.....	32
1.2 Justificativa	33
1.3 Contextualização do Concreto de Alta Resistência	36
1.4 Estrutura do Documento.....	39
2 Conceitos Fundamentais	41
2.1 Matriz.....	42
2.2 Fibras.....	44
2.2.1 Fibras de aço	52
2.2.2 Fibras de vidro	56
2.2.3 Fibras poliméricas	61
2.3 Interação fibra-matriz.....	62
2.4 Propriedades do CRF no estado fresco.....	66
3 Mecânica básica do concreto reforçado com fibras	73
3.1 Comportamento na compressão.....	75
3.2 Comportamento na tração	87
3.2.1 Método de caracterização.....	93
3.2.2 Modelos constitutivos.....	94
3.3 Mecânica básica do concreto reforçado com fibras.....	97
3.3.1 Orientação e distribuição das fibras	99
3.3.2 Aderência fibra-matriz	102
3.3.3 Teor de fibras	112
3.3.4 Geometria da fibra	115
4 Programa Experimental	119
4.1 Planejamento experimental	119
4.2 Materiais	124
4.2.1 Fibras	124
4.2.2 Matriz de concreto.....	129

4.3	Produção do concreto reforçado com fibras	132
4.4	Propriedades do concreto reforçado com fibras no estado fresco.....	137
4.4.1	Consistência (<i>slump test</i>).....	139
4.4.2	Teor de ar incorporado no concreto	140
4.4.3	Massa específica do concreto.....	141
4.5	Considerações finais	142
5	Comportamento do CARRF na compressão.....	144
5.1	Metodologia de ensaio.....	144
5.2	Resultados e discussão.....	147
5.2.1	Grupo 1	147
5.2.2	Grupo 2	175
5.3	Modelos constitutivos	185
5.3.1	Comparação com modelos constitutivos da literatura.....	194
5.4	Considerações finais	199
6	Comportamento do CARRF na flexão.....	201
6.1	Metodologia de ensaio.....	202
6.2	Resultados e discussão.....	205
6.2.1	Grupo 1	205
6.2.2	Grupo 2	224
6.2.3	Influência da resistência à compressão do concreto.....	236
6.3	Classificação do concreto reforçado com fibras	244
6.4	Condições para utilização das fibras em aplicações estruturais.....	249
6.5	Modelos constitutivos	252
6.6	Considerações finais	260
7	Comportamento do CARRF por meio de análise inversa	261
7.1	Metodologia da análise inversa	262
7.2	Descrição do modelo numérico	263
7.2.1	Geometria, condições de contorno e carregamento	263
7.2.2	Malha dos elementos finitos.....	264
7.2.3	Método de análise.....	265
7.2.4	Propriedades dos materiais.....	267
7.3	Resultados e discussão.....	271
7.3.1	Grupo 1	271
7.3.2	Grupo 2.....	277
7.4	Modelos constitutivos	281

7.5	Considerações finais	284
8	Conclusões finais	285
8.1	Conclusões gerais	285
8.2	Sugestões para trabalhos futuros	290
	Referências Bibliográficas	291
	Apêndice A: Resultados dos ensaios de compressão	307
	Apêndice B: Resultados dos ensaios de flexão	309

1

Introdução

O concreto é um material amplamente utilizado no mundo e é objeto de estudo de inúmeras pesquisas científicas na área da engenharia. Propriedades como elevada resistência mecânica, alta durabilidade, bom isolamento térmico, moldabilidade e custo relativamente baixo são algumas das vantagens que fazem do concreto um dos materiais mais utilizados na construção civil. Contudo, assim como qualquer outro material, o concreto também possui algumas limitações, como a elevada fissuração quando submetido a tensões de tração e o comportamento frágil com baixa capacidade de deformação.

Para contornar essas desvantagens, o concreto pode ser reforçado com diferentes materiais, como barras de aço, telas, fios e fibras. O concreto armado utilizado nas estruturas de edificações usuais, por exemplo, é composto pelo concreto e por uma armadura constituída por barras de aço responsáveis por resistir às tensões de tração e proporcionar capacidade resistente e ductilidade aos elementos estruturais.

Uma alternativa é o concreto reforçado com fibras (CRF), em que fibras descontínuas são adicionadas ao concreto para conferir ductilidade e controlar a fissuração. As fibras podem ser o único reforço do concreto ou podem atuar em conjunto com a armadura formada pelas barras de aço. A substituição parcial ou total das barras de aço por fibras pode oferecer três vantagens principais: (a) a resistência à fissuração é “distribuída” em toda a massa de concreto; (b) tem-se menor sensibilidade à corrosão das armaduras; e (c) redução do custo de mão de obra (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além disso, a eliminação da etapa de montagem da armadura (no caso de elementos reforçados apenas com fibras) pode ser acompanhada pelo ganho de produtividade e racionalização do canteiro de obras.

Segundo Naaman (2008), o avanço dos compósitos cimentícios reforçados com fibras se deve, principalmente, a pesquisas e desenvolvimentos envolvendo a matriz, a fibra, a interface fibra-matriz, o processo de produção do compósito, a compreensão dos mecanismos que governam o comportamento desse material e a relação custo-benefício que melhora continuamente. Alguns exemplos desses desenvolvimentos envolvem a introdução de uma nova geração de superplastificantes no mercado que permitem a produção de concretos de alta resistência com pequena perda de trabalhabilidade, e o uso crescente de materiais de enchimento na composição dos concretos, como a sílica ativa e a cinza volante. Além disso, o aumento da disponibilidade de diferentes tipos de fibra a serem adicionadas ao concreto e as inovações nos processos de produção que levam a uma distribuição mais uniforme das fibras na mistura também são aspectos responsáveis por disseminar a utilização do concreto reforçado com fibras (NAAMAN, 2008).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), embora o mercado para o concreto reforçado com fibras ainda seja pequeno quando comparado à produção total de concreto, há uma taxa de crescimento anual de 20% na América do Norte. No Brasil, o uso do CRF tem se intensificado especialmente pela publicação de normas sobre o assunto (como será visto ao longo do texto), e seu campo de aplicação pode ser dividido em três áreas: pavimentos industriais; concreto projetado para revestimento de túneis; e elementos pré-moldados (Figura 1).

Figura 1. Aplicações do CRF: (a) pavimentos industriais; (b) elementos pré-moldados; (c) revestimento de túneis.



Fonte: ALMEIDA; PARSEKIAN; CARNIO (2022)

Em 2002, estimava-se que o consumo mundial de fibras era um valor em torno de 300 mil toneladas por ano, baseado em um levantamento junto à iniciativa privada (LI, 2002). Pouco depois, em uma pesquisa realizada no ano de 2008 por Naaman (2018), novas estimativas indicavam que o consumo de fibras no mundo dobraria nos próximos cinco a dez anos, ou seja, até o ano de 2018, e estão apresentadas na Tabela 1. No entanto, essas estimativas não contemplavam o consumo de fibras na China, um dos países que mais utilizam o material de reforço para concreto, principalmente devido ao expressivo crescimento em infraestrutura no período de 2008 a 2018 como também pelo fato de o país estar localizado em uma região suscetível a abalos sísmicos (NAAMAN, 2018).

Tabela 1. Estimativa do consumo de fibras para concreto por ano em 2018 (em toneladas).

Tipo de fibra	EUA e Canadá	Mundo	Observações
aço	200.000	400.000	Uma estimativa maior é um consumo em torno de 1.000.000 de toneladas, incluindo a China
micro e macrofibras sintéticas de baixo módulo de elasticidade (pp, náilon, PVA)	80.000	140.000	Principais aplicações: lajes apoiadas sobre o solo e concreto projetado
vidro	8.000	24.000	Principais aplicações: concreto projetado (<i>spray-up</i>) e elementos pré-fabricados
micro e macrofibras sintéticas de alto módulo de elasticidade (carbono, kevlar, aramida)	muito baixo	muito baixo	Principais aplicações: pesquisas e projetos demonstrativos
naturais	muito baixo	muito baixo	Principais aplicações: blocos de concreto, projetos de baixo custo e pesquisa

Fonte: NAAMAN (2018)

Em 2010, o mercado de fibras no Brasil encontrava-se concentrado em pavimentos industriais, com 74% das aplicações de fibras de aço e 85% das aplicações de macrofibras poliméricas (FIGUEIREDO, 2011). Na época em que o estudo foi divulgado, Figueiredo (2011) descrevia a prática de utilização do CRF no Brasil como uma atividade basicamente empírica, visto a ausência de procedimentos de controle de qualidade do compósito e os teores fixos de fibras adotados no dimensionamento dos elementos.

Acredita-se que o consumo de concreto no mundo seja em torno de dez bilhões de toneladas por ano (NAAMAN, 2018). Considerando a densidade do concreto de $2,4\text{t/m}^3$, tem-se um consumo de volume de concreto de 4,167 bilhões de metros cúbicos anuais. Em um contexto no qual apenas 1% desse volume de concreto utilizasse fibras de aço, o mundo contaria com um volume de 41,67 milhões de metros cúbicos de concreto reforçado com fibras de aço. Para um concreto com uma fração volumétrica de 1,00% (equivalente a cerca de $80\text{ kg/m}^3 = 0,080\text{ t/m}^3$), o consumo de fibras de aço anualmente seria em torno de 3,334 milhões de toneladas, um número significativamente maior que aquele estimado na Tabela 1. Segundo Naaman (2018), esses valores sugerem que o aumento da utilização das fibras em estruturas de concreto é assertivo, e esse aspecto é evidenciado, atualmente, pela publicação de normas técnicas e diretrizes para utilização do concreto reforçado com fibras em aplicações estruturais (DI PRISCO *et al.*, 2021; ALMEIDA; PARSEKIAN; CARNIO, 2022; DE LA FUENTE *et al.*, 2023).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou, em fevereiro de 2021, normas que estabelecem requisitos, procedimentos e métodos de ensaios relativos às estruturas de concreto reforçado com fibras e seus materiais constituintes, conforme indicado na Tabela 2. Esse conjunto de normas constitui as primeiras diretrizes técnicas sobre concreto reforçado com fibras desenvolvidas em âmbito nacional. Cabe destacar que a aplicação da norma ABNT NBR 16935 (2021) é limitada aos concretos convencionais, isto é, das classes C20 a C50.

Tabela 2. Normas técnicas brasileiras sobre o CRF

Norma	Escopo*
ABNT NBR 16935 (2021)	Estabelece os requisitos de desempenho mecânico para as estruturas de CRF
ABNT NBR 16938 (2021)	Estabelece os procedimentos para a qualificação inicial do CRF e para o controle tecnológico durante a sua produção
ABNT NBR 16939 (2021)	Especifica o método de ensaio de duplo puncionamento para os corpos de prova ou testemunhos de CRF
ABNT NBR 16940 (2021)	Estabelece o método de ensaio para avaliação do comportamento mecânico do CRF na flexão
ABNT NBR 16941 (2021)	Especifica os requisitos e métodos de ensaio para fibras de vidro álcali-resistentes (AR)
ABNT NBR 16942 (2021)	Especifica os requisitos e métodos de ensaio para fibras poliméricas

*Escopo resumido. O escopo completo encontra-se no texto da norma.

A norma europeia que abrange as diretrizes para o dimensionamento de estruturas em concreto armado (EN 1992-1-1, 2004) está em processo de revisão (DI PRISCO *et al.*, 2021; DE LA FUENTE *et al.*, 2023). Em sua nova versão, a norma será contemplada com um anexo direcionado para as estruturas de concreto reforçado com fibras de aço. De acordo com di Prisco *et al.* (2021), as diretrizes do código modelo 2010 (FIB, 2011) foram consideradas como base para o desenvolvimento desse novo anexo à norma europeia, que deve ser disponibilizada ainda nesse ano.

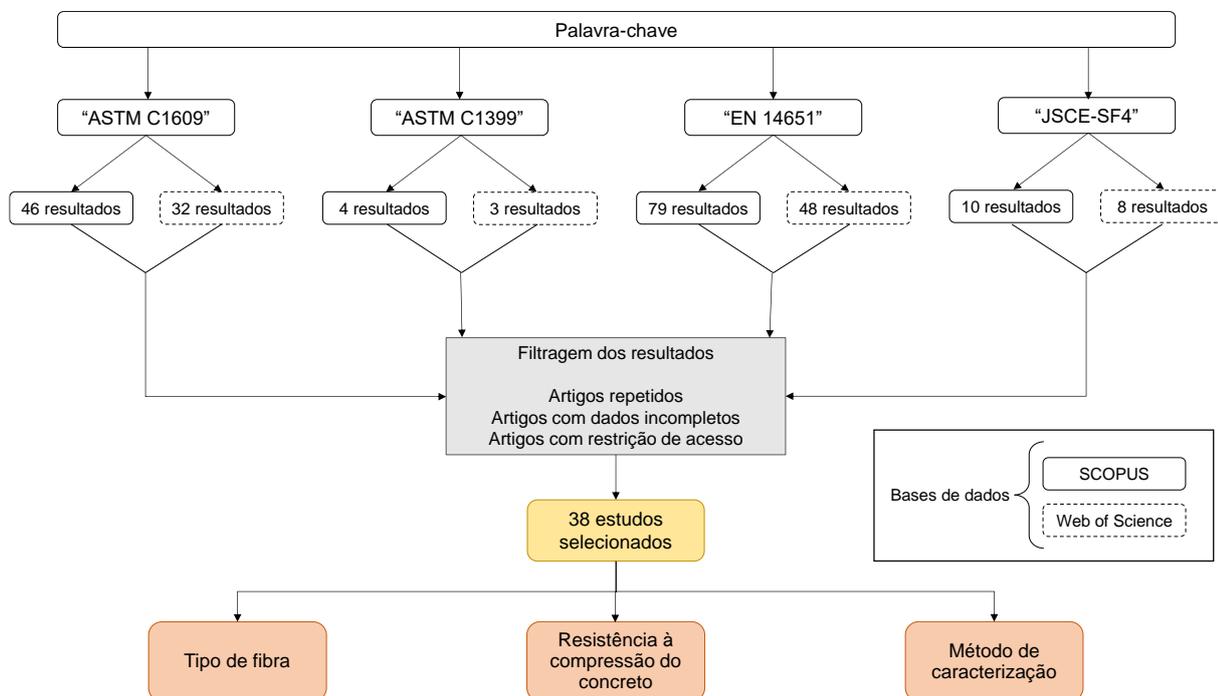
Na realização de um programa experimental, é essencial que a caracterização dos materiais seja realizada segundo padrões reconhecidos, usualmente disponibilizados em diretrizes e normas técnicas. Esses procedimentos são fundamentais para que os resultados da pesquisa sejam validados e possam contribuir na pesquisa de outros autores. No caso do concreto reforçado com fibras, a caracterização de seu comportamento mecânico é realizada por meio da determinação da resistência residual pós-fissuração no ensaio de flexão em prismas, cuja metodologia é apresentada por diferentes normas técnicas, como as normas europeias EN 14651 (2007) e EN 14488-3 (2006) – essa última para concreto projetado, a norma japonesa JSCE-SF4 (1984), e as normas americanas ASTM C1609 (2019) e ASTM C1399 (2015). Métodos alternativos ao ensaio de flexão de prismas são

apresentados na norma técnica espanhola AENOR UNE 83515 (2010), conhecida mundialmente como ensaio Barcelona, que consiste no duplo puncionamento de um corpo de prova cilíndrico (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013; MONTE; TOALDO; FIGUEIREDO, 2014; MONTE *et al.*, 2016) e na norma americana ASTM C1550 (2020), em que o ensaio envolve a flexão de painéis circulares de concreto (CONFORTI; PLIZZARI; ZERBINO, 2017; RYABCHIKOV *et al.*, 2020). Apesar da existência de diferentes procedimentos, o código modelo 2010 (FIB, 2011) estabelece o método da norma europeia EN 14651 (2007) como o ensaio básico de caracterização do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras (SALVADOR; FERNANDES; FIGUEIREDO, 2015), sendo a metodologia mais utilizada pelos estudos mais recentes e na qual a norma técnica brasileira recém-publicada foi baseada (ABNT NBR 16935, 2021).

A grande maioria das pesquisas sobre o concreto reforçado com fibras envolve matrizes de concreto cuja resistência à compressão corresponde aos valores referentes aos concretos convencionais, isto é, valores entre 20 e 50 MPa (LANTSOGHT, 2019). Enquanto há inúmeras pesquisas envolvendo o Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD ou UHPC – sigla em inglês para *Ultra-High Performance Concrete*), cuja resistência à compressão atinge valores superiores a 100 MPa (YOO; BANTHIA; YOON, 2016; YOO; YOON, 2016; YOO; KIM; PARK, 2017; AZMEE; SHAFIQ, 2018; POURBABA *et al.*, 2018; LARSEN; THORSTENSEN, 2020), investigações sobre o comportamento mecânico do CRF com resistência à compressão entre 55 e 90 MPa, denominado ao longo desse texto como concreto de alta resistência (CAR) – conforme contextualizado no item 1.3 – são escassas. Para exemplificar essa questão, foi realizado um levantamento pelo autor junto às bases de dados SCOPUS e Web of Science de estudos envolvendo a caracterização do concreto reforçado com fibras segundo os métodos frequentemente utilizados: ASTM C1609 (2019), ASTM C1399 (2015), EN 14651 (2007) e JSCE-SF4 (1984). O levantamento foi realizado segundo o procedimento ilustrado na Figura 2: inicia-se a pesquisa com a palavra-chave; os resultados obtidos são previamente analisados e filtrados; os estudos selecionados são verificados em relação ao tipo de fibra, resistência à compressão do concreto e método de caracterização adotado para o compósito. Ressalta-se que os artigos selecionados foram publicados nos últimos sete

anos, isto é, desde 2017. Pesquisas anteriores a essa data não foram incluídas no levantamento, cujos resultados são apresentados na Tabela 3 e na Figura 3.

Figura 2. Procedimento adotado para o levantamento de estudos sobre CRF (pesquisa realizada em 19/09/2023).



Fonte: Autoria própria.

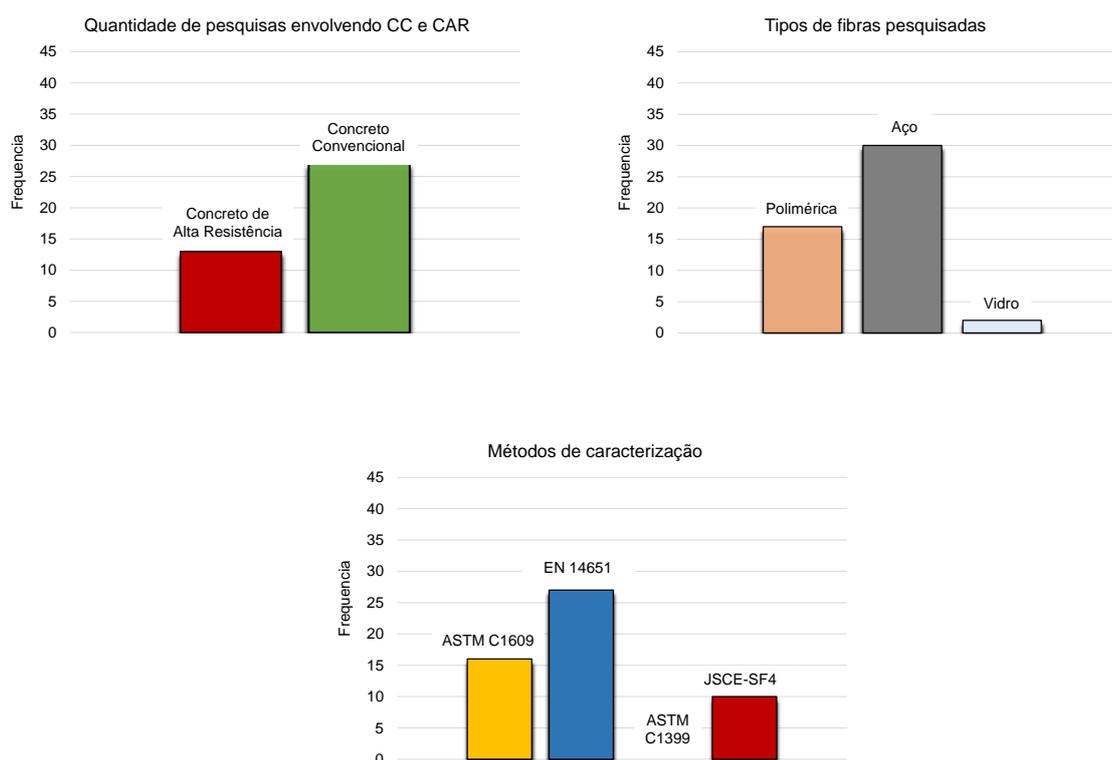
Tabela 3. Pesquisas sobre CRF envolvendo diferentes metodologias de caracterização.

Referência	Tipo de fibra	Resistência à compressão do concreto média [MPa]	Método de caracterização
Conforti <i>et al.</i> (2018)	polimérica	49,8; <u>82,8</u>	ASTM C1609; EN 14651; JSCE-SF4; ASTM C1550
Conforti; Plizzari; Zerbino (2017)	aço; polimérica	<u>59,5 - 62,7</u>	EN 14651
Li <i>et al.</i> (2017)	aço; polimérica	35,5	ASTM C1609; JSCE-SF4
Feng <i>et al.</i> (2018)	aço	<u>100,0</u>	ASTM C1609; JSCE-SF4
Gao; Zhang (2018)	aço	44,9	ASTM C1609; EN 14651; JSCE-SF4
Noushini <i>et al.</i> (2018)	polimérica	50,4	ASTM C1609; EN 14651; JSCE-SF4
Venkateshwaran; Tan; Li (2018)	aço	20 - 50	EN 14651
Hu <i>et al.</i> (2018)	aço	37,6 - 47,5	ASTM C1550; EN 14651
Hu <i>et al.</i> (2018)	aço	46,0	EN 14651
Lee <i>et al.</i> (2018)	aço	30,0	EN 14651
Vrijdaghs; di Prisco; Vandewalle (2018)	polimérica	43,0	EN 14651

Referência	Tipo de fibra	Resistência à compressão do concreto média [MPa]	Método de caracterização
Ramezani; Esfahani, (2019)	aço; polimérica	39,6	ASTM C1609; JSCE-SF4
Koenig <i>et al.</i> (2019)	aço; polimérica	<u>55,7</u>	EN 14651
Monetti <i>et al.</i> (2019)	aço	39,2; 41,7	EN 14651
Vandevyvere <i>et al.</i> (2019)	vidro	54,6	EN 14651
Gomes; Dias; Silva (2020)	aço	32,5	EN 14651
Manfredi; Silva (2020)	polimérica	<u>73,0</u>	ASTM C1609; ASTM C1550; EN 14651; EN14488
Ryabchikov <i>et al.</i> (2020)	aço	25,0	ASTM C1550; EN 14651; EN 14488
Suta; Lukasenoks; Cepuritis (2020)	aço	52,1	EN 14651
Trindade <i>et al.</i> (2020)	aço	35,0	EN 14651
Carrillo; Vargas; Alcocer (2021)	aço	24,0	EN 14651
Vrijdaghs <i>et al.</i> (2021)	aço; polimérica	42 - <u>60</u>	EN 14651
Nana <i>et al.</i> (2021)	polimérica	40,0	EN 14651
Li <i>et al.</i> (2021)	aço	54,0	ASTM C1609
Guler; Öker; Akbulut (2021)	aço; polimérica	38,1	JSCE-SF4
Zeng; Tang (2021)	basalto; polimérica	44,1	ASTM C1609; JSCE-SF4
Zhu <i>et al.</i> (2021)	polimérica	30 - 40	ASTM C1609; JSCE-SF4
Junior <i>et al.</i> (2021)	aço; vidro e polimérica	50,0	ASTM C1609
Chen <i>et al.</i> (2021)	aço	35 - <u>80</u>	EN 14651
Blazy; Drobiec; Wolka (2021)	polimérica	<u>60,0</u>	EN 14651
Gondokusumo <i>et al.</i> (2021)	aço	<u>55,0</u>	EN 14651
Tan <i>et al.</i> (2021)	aço	<u>90 - 110</u>	EN 14651
Manfredi; Silva; Cardoso (2022)	aço	40,0	EN 14651
Medeghini <i>et al.</i> (2022)	aço	<u>75,0</u>	EN 14651
Yun; Choi; Choi (2023)	aço	<u>65,0</u>	EN 14651
Afshoon; Miri; Mousavi (2023)	aço	35,0	ASTM C1609; JSCE-SF4
Del Savio <i>et al.</i> (2023)	polimérica	40,0	ASTM C1609
Sengun <i>et al.</i> (2023)	aço; polimérica	41 - 55	ASTM C1609

Fonte: Autoria própria.

Figura 3. Pesquisas que envolvem a caracterização do concreto reforçado com fibras.



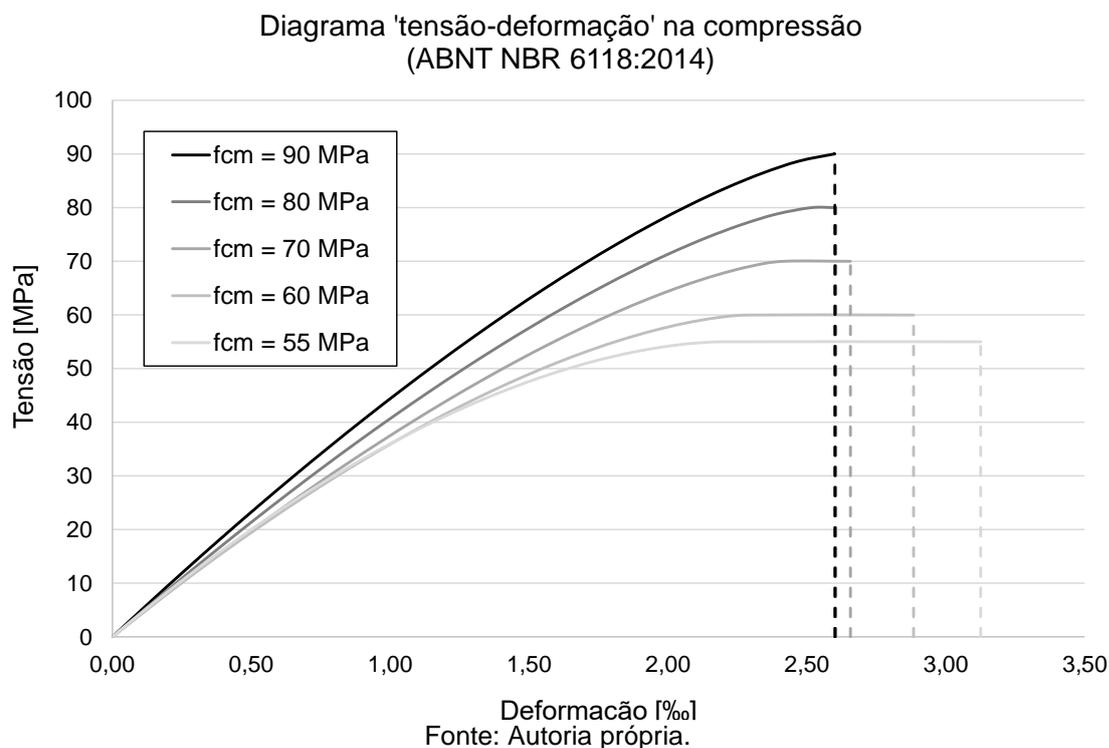
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 3, observa-se que a maioria dos estudos encontrados foram realizados com matrizes de concreto convencional, isto é, com resistência à compressão variando entre 20 e 50 MPa. Observa-se também que as pesquisas envolvem, majoritariamente, fibras de aço, seguidas pelas fibras poliméricas e fibras de vidro, indicando uma carência de estudos com outras fibras que não sejam as de aço. Há de se atentar também que, embora várias pesquisas apresentem os resultados e a metodologia de caracterização do concreto reforçado com fibras, muitas vezes essa é uma etapa preliminar para que objetivo principal da pesquisa (que não envolve o comportamento mecânico do material) seja atingido. Dentre os estudos com fibras poliméricas, por exemplo, há pesquisas que comparam os diferentes métodos de caracterização do CRF (CONFORTI; PLIZZARI; ZERBINO, 2017; MANFREDI e SILVA, 2020; CARRILLO; VARGAS; ALCOCER, 2021; TAN *et al.*, 2021), estudos que avaliam o comportamento do CRF com agregados leves (LI *et al.*, 2017) e com ligantes ativados por álcalis (KOENIG *et al.*, 2019), e artigos que estudam o comportamento mecânico de concreto geopolimérico reforçado com fibras sintéticas

(NOUSHINI *et al.*, 2018) e a fluência em concretos reforçados com fibras de polipropileno (VRIJDAGHS *et al.*, 2018).

No campo dos concretos de altas resistências, a norma técnica brasileira de estruturas em concreto armado (ABNT NBR 6118, 2023) apresenta um diagrama tensão-deformação para dimensionamento na compressão em que a deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura (ϵ_{cu}) é reduzida na medida em que se eleva a resistência do concreto (Figura 4). Essa redução é proveniente do aumento da fragilidade do material em resistências elevadas. Nessa situação, a adição de fibras pode melhorar as condições de dimensionamento do concreto de altas resistências, uma vez que as fibras proporcionam ductilidade quando adicionadas ao material.

Figura 4. Diagrama tensão-deformação do concreto submetido à compressão simples segundo a ABNT NBR 6118:2023.



Além da quantidade limitada de estudos sobre a caracterização do concreto de alta resistência reforçado com fibras (CARRF), há de se atentar também para as exigências dos projetos arquitetônicos atuais, cada vez mais arrojados e que demandam elementos esbeltos para as edificações. Nesse contexto, os concretos de alta resistência constituem uma opção para cumprir os requisitos de projeto. Embora mais caros, estudos na literatura demonstram que a utilização de concretos mais

resistentes pode ser uma alternativa mais econômica do que aumentar a quantidade de barras de armadura para elevar sua capacidade resistente (SHIN, 2016).

As diretrizes e recomendações do código modelo 2010 (FIB, 2011) foram desenvolvidas, sobretudo, a partir de pesquisas realizadas em concretos reforçados com fibras de aço (DI PRISCO; COLOMBO; DOZIO, 2013; DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009). Nesse contexto, as condições exigidas pela diretriz para a utilização de fibras em elementos estruturais têm sido questionadas por pesquisadores quando se deseja utilizar outros tipos de fibras (GARCEZ; KABIR; MACLEOD, 2019; NANA *et al.*, 2021). Baseando-se em seus resultados experimentais, os autores alegam que os modelos constitutivos propostos no documento não são adequados para fibras cujo módulo de elasticidade é muito inferior ao do aço, como é o caso das fibras poliméricas. Marahla e Garcia-Taengua (2021) afirmam que não há, na literatura, uma definição clara que restringe a utilização de fibras não-metálicas a aplicações não-estruturais, como controle de fissuração por retração plástica do concreto. Ademais, o estudo com fibras não-metálicas tem sido impulsionado, atualmente, pela crescente demanda por materiais mais sustentáveis na construção civil, com menor emissão de carbono (MARAHLA; GARCIA-TAENGUA, 2021). Dessa forma, cabe uma investigação sobre o comportamento mecânico dos concretos reforçados com fibras que não sejam as de aço.

Com a divulgação das normas técnicas brasileiras que estabelecem requisitos e diretrizes para o dimensionamento de estruturas de concreto reforçado com fibras (Tabela 2), espera-se que as estruturas de CRF estejam cada vez mais presentes no mercado da construção civil. Nesse sentido, torna-se indispensável as pesquisas para ampliar os campos de aplicação desse material.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa é investigar a influência das fibras no comportamento mecânico do concreto de alta resistência e ajustar modelos constitutivos para representar o comportamento mecânico desse material.

Para atingir o objetivo principal, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

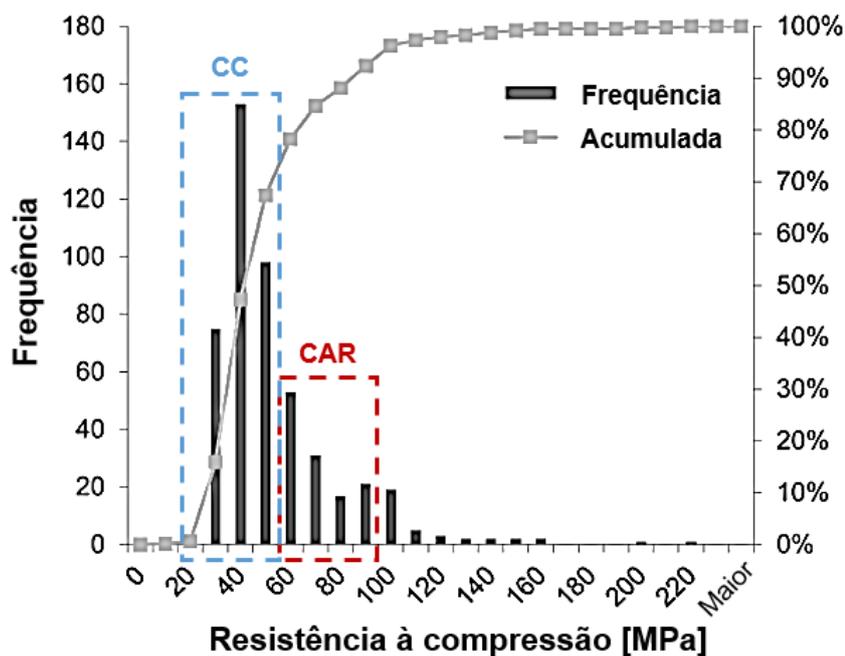
- ✓ determinar a influência do teor e do tipo de fibra sobre o comportamento mecânico do concreto de alta resistência submetido à compressão e suas propriedades, como resistência, módulo de elasticidade, deformação de pico, tenacidade e resistência residual;
- ✓ determinar a influência do teor e do tipo de fibra sobre o comportamento mecânico do concreto de alta resistência na flexão e suas propriedades, como limite de proporcionalidade e resistências residuais;
- ✓ propor modelos constitutivos que representem o comportamento do concreto de alta resistência reforçado com fibra na compressão para cada fibra utilizada;
- ✓ propor modelos constitutivos que representem o comportamento do concreto de alta resistência reforçado com fibra na tração por meio de análise inversa, validados por modelagem numérica.

1.2 JUSTIFICATIVA

A adição de fibras confere tenacidade ao concreto. Dessa forma, tem-se um material dúctil e com elevada resistência mecânica, características essenciais para a concepção eficaz de estruturas, aliadas ao ganho de produtividade e à redução de mão de obra proporcionados pelo CRF. Contudo, quando não dosado adequadamente, um elevado teor de fibras pode inviabilizar a aplicação do CRF devido aos custos elevados e à dificuldade inerente à trabalhabilidade do concreto. Nesse sentido, faz-se necessária uma investigação sobre a dosagem do CRF em faixas de resistências pouco exploradas. Além disso, a quantidade limitada de estudos envolvendo a caracterização do comportamento mecânico do concreto de alta resistência reforçado com fibras – apresentada anteriormente e reforçada a seguir – demonstra a necessidade de se investigar esse aspecto do material.

Em estudo sobre cisalhamento em concretos reforçados com fibras de aço, Lantsoght (2019) analisou 488 experimentos disponíveis na literatura para investigar os principais parâmetros que afetam a resistência ao cisalhamento do compósito. Dentre os dados levantados, a autora verificou que os resultados experimentais estão concentrados na faixa que compreende os concretos convencionais (CC), isto é, com resistência à compressão entre 20 e 50 MPa (Figura 5).

Figura 5. Frequência de estudos envolvendo o cisalhamento do concreto reforçado com fibras.

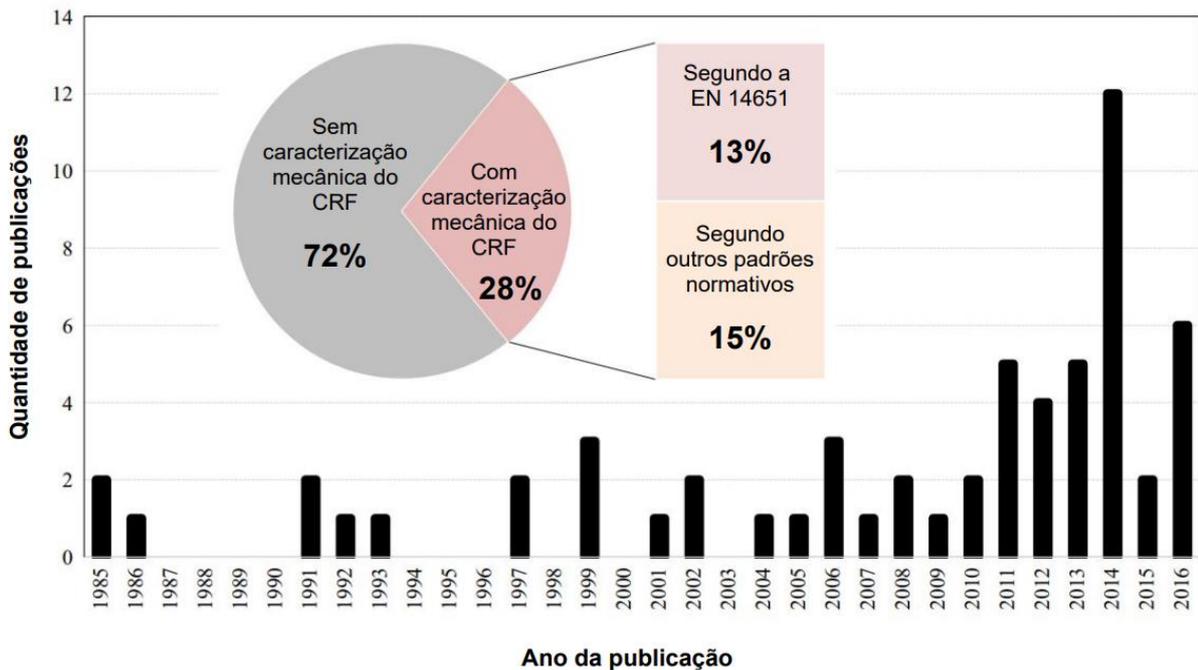


Fonte: Adaptado de LANTSOGHT (2019)

Embora os dados apresentados pela autora não representem a totalidade dos casos, inclusive pelo fato de terem sido selecionados em função do objetivo da pesquisa (ruptura por cisalhamento de protótipos de concretos reforçados com fibras de aço), os resultados indicam que os programas experimentais com CRF envolvem, majoritariamente, concretos de resistência à compressão entre 20 e 50 MPa.

Cuenca *et al.* (2018) realizaram um levantamento de resultados experimentais de protótipos de CRF com ruptura por cisalhamento de pesquisas ocorridas entre 1985 e 2016, envolvendo apenas artigos de revistas indexadas (Figura 6). Os autores observaram que a maioria dos estudos não forneceram ou não realizaram a caracterização mecânica do CRF (72%), dificultando a utilização dos dados pelos autores para comparar o desempenho do CRF ao cisalhamento entre diferentes pesquisas. Dentre os estudos que forneceram a caracterização do comportamento mecânico do CRF, 13% seguiram a metodologia da norma EN 14651, considerada como ensaio básico de caracterização pelo código modelo 2010 (FIB, 2011), enquanto o restante das pesquisas (15%) realizou a caracterização segundo outros padrões normativos.

Figura 6. Quantidade de publicações sobre cisalhamento do CRF com caracterização mecânica do material.



Fonte: Adaptado de CUENCA *et al.* (2018)

Conforme discutido anteriormente, a ausência de caracterização dos materiais dificulta a utilização dos resultados da pesquisa por outros autores. Para o desenvolvimento de um modelo capaz de estimar determinada propriedade de um material, por exemplo, é necessária uma extensa base de dados com todas as informações necessárias sobre os materiais e o programa experimental. A falta dessas informações pode impossibilitar a utilização dos resultados da pesquisa, limitando a aplicabilidade desses modelos.

Oettel; Schulz; Haist (2022) analisaram um banco de dados com resultados experimentais de ensaios de tração na flexão em conforme a EN 14651 (2007) a partir de um levantamento realizado pelo Comitê Alemão para Concreto Estrutural (DAfStb – sigla em alemão). Dos 1092 resultados de ensaios em concreto reforçado com fibras de aço que contemplam o banco de dados, apenas 204 envolvem concreto de alta resistência, ou seja, pouco mais de 18%.

Mais recentemente, Galeote *et al.* (2022) analisaram resultados de quase 700 ensaios de tração na flexão de acordo com a norma europeia EN 14651 (2007) realizados na Universidade Politécnica de Cataluña e na Universidade Politécnica de Madrid. No banco de dados criado pelos autores, que envolve 371 corpos de prova de

concreto reforçado com fibras de aço e 315 prismas de concreto reforçado com fibras sintéticas (poliolefina e polipropileno), foi observado que apenas 22% dos protótipos possuem resistência à compressão entre 55 e 70 MPa, reforçando a carência de estudos em concretos de alta resistência reforçado com fibras.

A capacidade das fibras em proporcionar ductilidade ao concreto é inquestionável, sendo comprovada por diversos autores na literatura com fibras de diferentes materiais e formatos. Por esse motivo, a contribuição das fibras para contornar a elevada fragilidade do concreto de alta resistência deve ser explorada. Esse fato, juntamente com a quantidade reduzida de estudos sobre o concreto de alta resistência reforçado com fibras, sobretudo com fibras não-metálicas, justifica uma pesquisa para investigar o comportamento mecânico do CARRF. Essa pesquisa visa contribuir em futuras revisões da norma técnica, cuja aplicação é atualmente limitada a concretos de classes C20 a C50 (ABNT NBR 16935, 2021).

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO DO CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

Na literatura, muitas vezes o Concreto de Alto Desempenho (CAD ou HPC – sigla em inglês para *High Performance Concrete*) é confundido com o Concreto de Alta Resistência (CAR ou HSC – sigla em inglês para *High Strength Concrete*). O termo “desempenho”, no CAD, não é limitado apenas à resistência à compressão, uma vez que esse tipo de concreto possui uma microestrutura aprimorada capaz de proporcionar, além de alta resistência, grande durabilidade para as estruturas. Por outro lado, o concreto é definido como de “alta resistência” apenas com base na resistência à compressão a uma determinada idade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A definição de Concreto de Alta Resistência tem sido ajustada frente ao desenvolvimento contínuo no cenário dos materiais de construção ao longo dos anos. Na década de 1950, concretos com resistência à compressão de 34 MPa eram considerados como de alta resistência. Ao longo da década de 1960, já era possível desenvolver concretos com resistência à compressão de 41 e 52 MPa. A demanda por um concreto mais resistente ocorreu no início da década de 1970, primordialmente em edifícios altos construídos nos Estados Unidos. Naquela época, os concretos de alta resistência eram utilizados nos pilares das edificações para reduzir sua seção transversal, como é o caso dos edifícios Water Tower Place e 311 South Wacker,

ambos construídos em Chicago com concretos de resistência iguais a 62 e 83 MPa, respectivamente. Na época, os dois edifícios possuíam os recordes dos edifícios mais altos do mundo: Water Town Place, construído em 1976 com 260 metros de altura e o edifício 311 South Wacker, de 1990, com 293 metros de altura. Em 1989, o edifício Two Union Square, em Seattle, atingia o recorde pelo concreto de maior resistência à compressão utilizado em uma edificação, de 131 MPa (ACI, 2010).

Nos dias atuais, concretos com resistência à compressão igual a 138 MPa já são utilizados em moldagem *in loco* de edifícios, enquanto pesquisadores produzem concretos de 800 MPa de resistência em laboratórios (SCHMIDT; FEHLING, 2004). Na medida em que a tecnologia dos materiais e seus processos de produção evoluem, a resistência à compressão máxima do concreto também tende a aumentar, assim como seu campo de aplicação (ACI, 2010).

Em 1992, o Comitê 363 do Instituto Americano do Concreto (ACI – sigla em inglês) definia o Concreto de Alta Resistência como aquele que possui resistência à compressão maior ou igual a 41 MPa. Mais tarde, quando concretos de 60 a 120 MPa chegaram ao mercado, o mesmo comitê revisou a definição para concretos com resistência à compressão maior ou igual a 55 MPa (MEHTA; MONTEIRO, 2014; ACI, 2010), definição que permanece até hoje e que será adotada ao longo desse texto.

Apesar da definição apresentada pelo ACI para o Concreto de Alta Resistência, o comitê reconhece que a definição varia de acordo com a localização geográfica. Em regiões onde concretos com resistência à compressão de 60 MPa já são produzidos no âmbito comercial, a resistência do CAR pode abranger a faixa compreendida entre 80 e 100 MPa. Por outro lado, nas regiões em que a resistência máxima à compressão do concreto encontrada no mercado é de 35 MPa, um concreto que possui 60 MPa de resistência à compressão é considerado como um CAR (ACI, 2010).

No Brasil, embora não exista uma definição explícita em documentos normativos do Concreto de Alta Resistência, a ABNT NBR 8953 (2015) classifica os concretos em dois grupos: Grupo I, que abrange concretos de resistência característica à compressão de 20 até 50 MPa; e o Grupo II, que especifica concretos de 55 até 100 MPa. Desse modo, infere-se que os Grupos I e II envolvem concretos

convencionais e de alta resistência, respectivamente, seguindo a mesma linha do ACI (2010) e do código modelo 2010 (FIB, 2011).

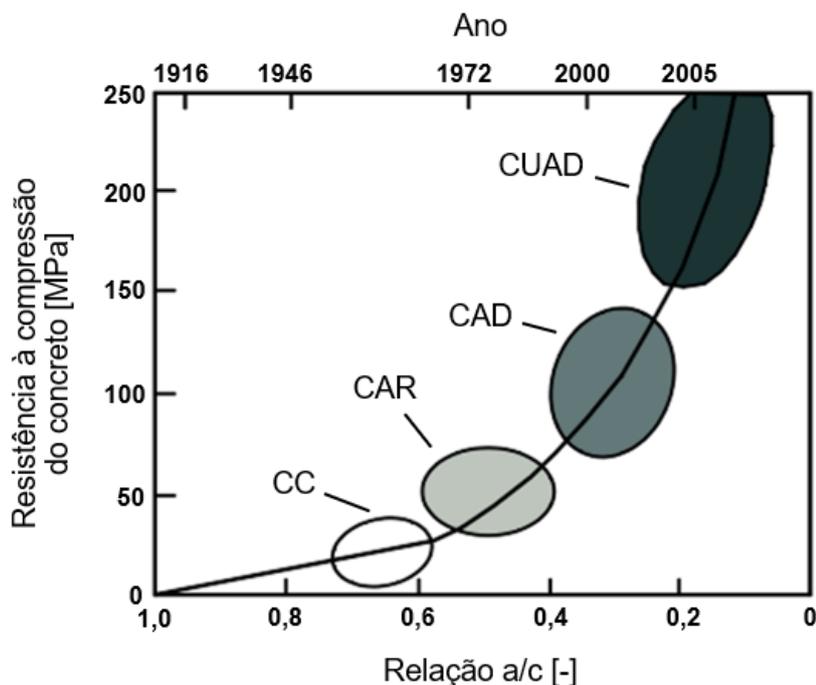
Diferente do CAR, o Concreto de Alto Desempenho (CAD) é um material que apresenta comportamento em patamar mais elevado que o concreto convencional em vários aspectos além da resistência mecânica, como a trabalhabilidade, a estética, o acabamento, a integridade e, principalmente, a durabilidade (TUTIKIAN; HELENE, 2011). Usualmente, o termo “alto desempenho” é utilizado para designar materiais com propriedades diferentes dos materiais convencionais, considerando a tecnologia disponível e a localização geográfica da estrutura (NAAMAN, 2008). Essa terminologia também implica uma combinação otimizada das propriedades do material para atingir as características de durabilidade e resistência exigidas pela estrutura. Pode-se dizer, portanto, que a definição de CAR não contempla a definição de CAD, porque enquanto o primeiro possui a resistência mecânica como elemento básico da sua constituição, o segundo abrange diversas propriedades do concreto focado no resultado final: o máximo desempenho global (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Na década de 1970, os agentes redutores de água e superplastificantes foram introduzidos na construção civil, possibilitando a produção de concretos com relação água/cimento (a/c) entre 0,45 e 0,60 sem prejudicar a trabalhabilidade do concreto (Figura 7). Desse modo, era possível produzir concretos com resistência à compressão entre 60 e 70 MPa. Para obter concretos ainda mais resistentes, foram desenvolvidos agentes redutores de água extremamente efetivos, com os quais era possível reduzir a relação a/c para valores extremamente baixos, próximos de 0,25 (SHIN, 2017).

Devido à maior durabilidade do CAD, suas principais aplicações abrangem pontes e viadutos, com casos de utilização de concretos com resistência à compressão próxima de 78 MPa em pontes ferroviárias no Japão. Na Alemanha, o CAD foi utilizado pela primeira vez nos pilares do edifício “Trianon”, com 186 metros de altura, em Frankfurt, em 1990. Em 1998, pontes rodoviárias foram construídas com pequenas lajes protendidas de CAD nas cidades de Baden-Württemberg e Bavaria, também na Alemanha (SHIN, 2017).

Nas últimas décadas, avanços significativos relacionados ao desempenho do concreto foram alcançados, impulsionando o desenvolvimento do Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD). Considerado como o concreto da próxima geração, o CUAD é definido pelo Comitê 239 do ACI como um concreto que possui resistência à compressão mínima de 150 MPa, com requisitos mínimos de durabilidade, tenacidade e ductilidade (GRAYBEAL *et al.*, 2019). Outros países, como Canadá e Suíça, definem um valor mais baixo da resistência à compressão mínima para caracterizar um concreto como um CUAD, de 120 MPa. Usualmente, o CUAD é constituído de cimento Portland, sílica ativa, pó de quartzo moído, areia fina, aditivos superplastificantes e fibra, possuindo uma relação água/aglomerante (a/ag) variando entre 0,15 e 0,25. Ao longo dos últimos anos, o CUAD tem ganhado visibilidade com diversas aplicações, como pontes, artificios arquitetônicos e projetos de reabilitação de estruturas (AZMEE; SHAFIQ, 2018).

Figura 7. Evolução dos tipos de concreto segundo a relação a/c e a resistência à compressão.



Fonte: Adaptado de SHIN (2016).

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Essa tese está dividida em sete capítulos além da introdução, descritos a seguir.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos fundamentais sobre o concreto reforçado com fibras, abrangendo a matriz, a fibra e a interação fibra-matriz que o autor julga

importante para contextualizar o leitor acerca da pesquisa. Para cada uma das fases do compósito (fibra e matriz), são apresentadas características e parâmetros relevantes para a investigação experimental.

No Capítulo 3 é descrita a mecânica básica do concreto reforçado com fibras, contemplando a orientação e distribuição das fibras no concreto, a aderência fibra-matriz, o teor e a geometria das fibras e como cada um desses parâmetros pode afetar o comportamento mecânico do concreto.

No Capítulo 4 é descrito o programa experimental realizado para atingir os objetivos da pesquisa, abrangendo os materiais utilizados e suas propriedades, além da etapa de produção dos corpos de prova. Nesse capítulo também são apresentadas e discutidas as propriedades do concreto reforçado com fibras no estado fresco avaliadas durante o processo de moldagem.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de compressão e as propriedades mecânicas do compósito para cada fibra e teor de fibra estudados. No final do capítulo, modelos analíticos que simulam o comportamento à compressão foram propostos e comparados com modelos da literatura.

O Capítulo 6 contempla os resultados e discussões acerca dos ensaios de flexão em três pontos em prismas entalhados. As resistências residuais e limite de proporcionalidade são avaliadas frente ao tipo e teor de fibras no compósito e à resistência à compressão do CRF. Nesse capítulo, as leis constitutivas do material e os requisitos para a utilização das fibras em aplicações estruturais da norma técnica brasileira também são avaliados e discutidos para todos os traços do programa experimental.

No Capítulo 7 são apresentados o desenvolvimento e a validação do modelo numérico frente aos resultados experimentais dos ensaios de tração na flexão, bem como o procedimento da análise inversa para a obtenção da curva tensão-abertura de fissuras. Modelos constitutivos são propostos e comparados com aqueles da norma técnica brasileira.

Finalmente, no Capítulo 8, são apresentadas as conclusões finais da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

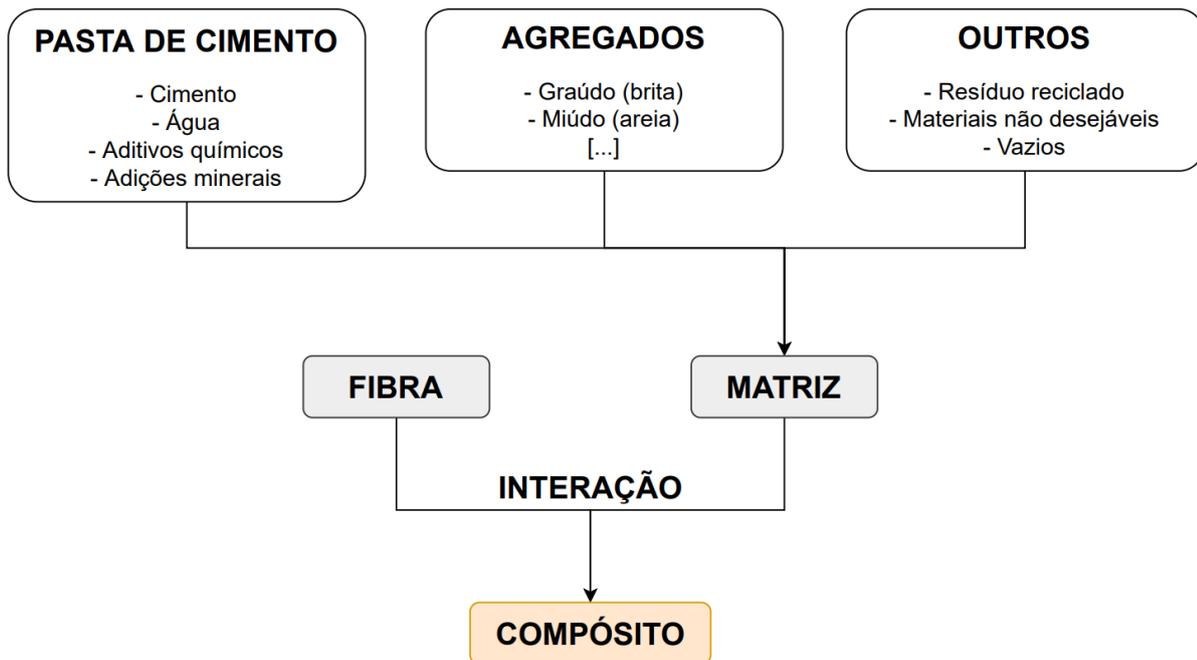
2

Conceitos Fundamentais

O concreto reforçado com fibras (CRF) é um material compósito constituído por duas fases: a matriz cimentícia e a fibra (Figura 8). Embora a matriz cimentícia por si só possa ser considerada um compósito com vários componentes, ela será tratada, no contexto dessa pesquisa, como um dos elementos principais que constituem o CRF. A fibra, definida como o outro componente principal do CRF, é considerada descontínua, estável em meio alcalino e distribuída aleatoriamente na matriz de concreto. Presume-se que a fibra e a matriz trabalhem em conjunto e forneçam o sinergismo necessário para produzir um material compósito eficaz (NAAMAN, 2008).

Desse modo, para uma completa descrição do material, é necessário explorar toda a estrutura que constitui o compósito, isto é, a matriz, as fibras e a interação fibra-matriz (BENTUR; MINDESS, 2007).

Figura 8. Modelo do compósito considerado como um sistema de dois componentes: a matriz e a fibra.



Fonte: Adaptado de NAAMAN (2008).

2.1 MATRIZ

As matrizes a base de cimento têm evoluído significativamente desde a década de 1960 devido à melhor compreensão de sua microestrutura, principalmente em relação ao empacotamento das partículas e porosidade do material (NAAMAN, 2008). Além disso, o surgimento de adições minerais e aditivos químicos contribuíram para o desenvolvimento de concretos cada vez mais resistente sem perda de trabalhabilidade. O pó de cimento utilizado para a produção do concreto, por exemplo, pode conter materiais cimentícios suplementares, como a escória de alto-forno, microsíllica, pozolana, entre outros. Atualmente, componentes minerais como sílica ativa e cinza volante são comumente utilizados como adições ou para substituir parcialmente a quantidade de cimento utilizada na confecção do concreto. Segundo Naaman (2000), a utilização de grãos finos e adições minerais na composição da matriz é recomendado para otimizar o comportamento estrutural do compósito, especialmente em elementos finos de fachadas, como paredes-cortina. Essas adições auxiliam na produção de um compósito mais denso e de menor porosidade, além de melhorar as propriedades do concreto no estado fresco, sua resistência e durabilidade. Nesse contexto, destaca-se o estudo de Guerrero e Naaman (2000), em que os autores verificaram que a utilização de areia fina (diâmetro ~ 14 mm) e

metacaulim aumentaram a aderência entre a fibra e a matriz. Essa otimização da ligação entre as fases do compósito pode ser explicada pela alteração na microestrutura da interface fibra-matriz: o efeito de empacotamento das partículas produz uma matriz extremamente densa, eliminando boa parte da zona de transição do compósito (BENTUR; MINDESS, 2007).

De acordo com Bentur e Mindess (2007), as matrizes a base de cimento podem ser divididas em dois grupos dependendo da sua composição: matrizes de argamassa (mistura de cimento, agregado miúdo e água) e matrizes de concreto (mistura de cimento, agregados miúdo e graúdo e água). As argamassas de cimento reforçadas com fibras são usualmente utilizadas em elementos finos para revestimentos. Nessas aplicações, as fibras atuam como reforço primário, em teores que variam entre 5 e 15% em volume. Por outro lado, nas matrizes de concreto, as fibras atuam como reforço secundário para o controle de fissuração e, usualmente, em volume inferior a 2%. Segundo Bentur e Mindess (2007), teores mais altos de fibras também podem ser utilizados desde que um controle rigoroso da reologia e microestrutura do compósito seja realizado.

Em geral, a matriz exerce, entre outras, as seguintes funções nos compósitos reforçados com fibras (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2018):

- atua como o meio através do qual uma tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída para as fibras;
- protege as fibras contra danos superficiais (resultado da abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente);
- atua como uma barreira contra a propagação de fissuras de uma fibra para outra, uma vez que a matriz isola as fibras entre si.

A resistência final do compósito depende, entre outros fatores, da magnitude da aderência matriz-fibra. Uma aderência adequada maximiza a transferência dos esforços entre a fibra e a matriz, por isso as forças de ligação entre esses componentes devem ser suficientemente grandes para minimizar a extração das fibras do compósito (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2018). De acordo com Figueiredo (2011), a maioria dos concretos podem ser reforçados com fibras, sejam eles plásticos, fluídos ou secos, de baixa ou alta resistência. Contudo, na dosagem de

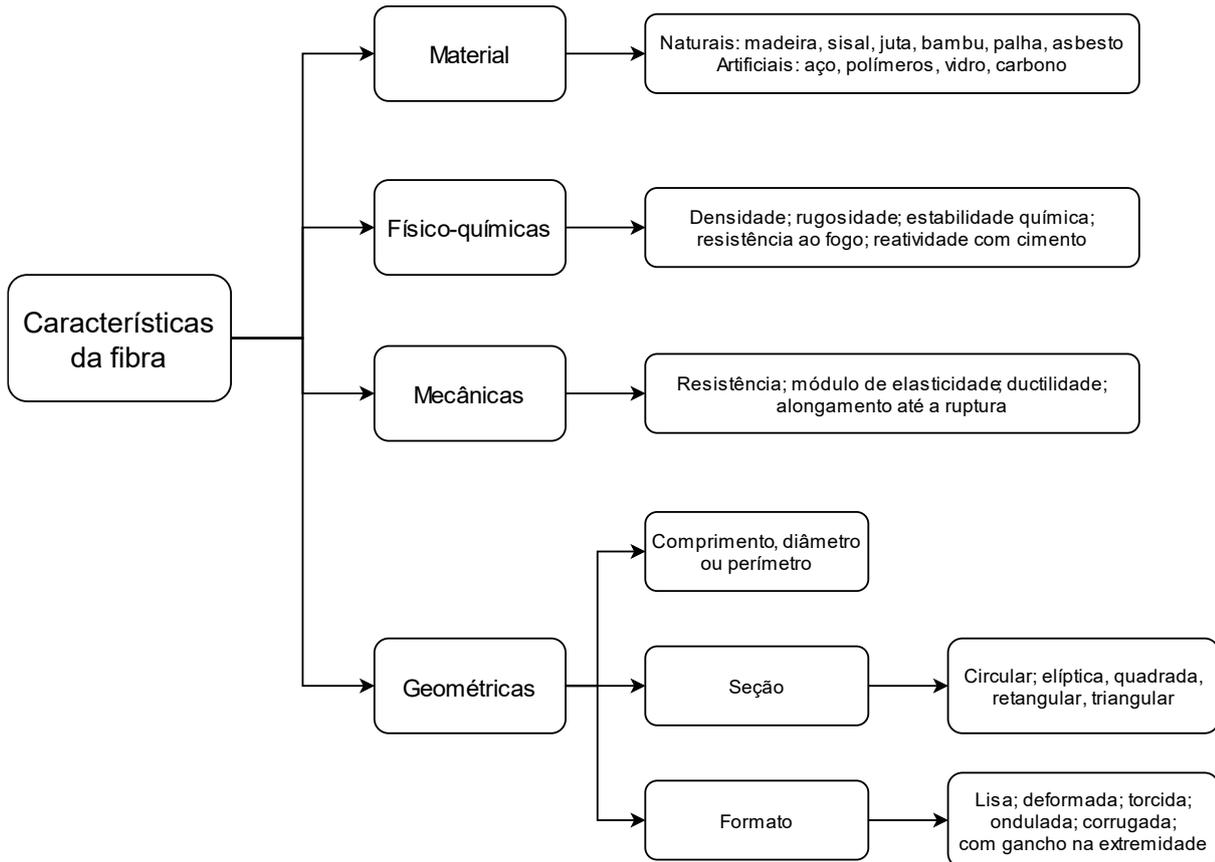
uma matriz de concreto para a produção de um compósito com fibras, deve-se ter atenção com a fluidez da mistura, uma vez que a adição de fibras provoca uma perda de fluidez considerável. Segundo Carnio (2009), isso ocorre devido à grande área superficial das fibras e ao maior contato entre elas, aumentando o atrito entre os materiais e diminuindo a fluidez.

2.2 FIBRAS

A definição de fibra pode variar conforme sua composição, e diferentes definições são apresentadas nas normas técnicas sobre fibras de aço (ABNT NBR 15530, 2019), fibras de vidro álcali-resistente (ABNT NBR 16941, 2021) e fibras poliméricas para concreto (ABNT NBR 16942, 2021). De modo geral, diz-se que as fibras utilizadas para reforçar o concreto são um material de formato linear, cortado longitudinalmente em comprimentos uniformes – fibras descontínuas - e que não se degrada quando submetido ao meio alcalino.

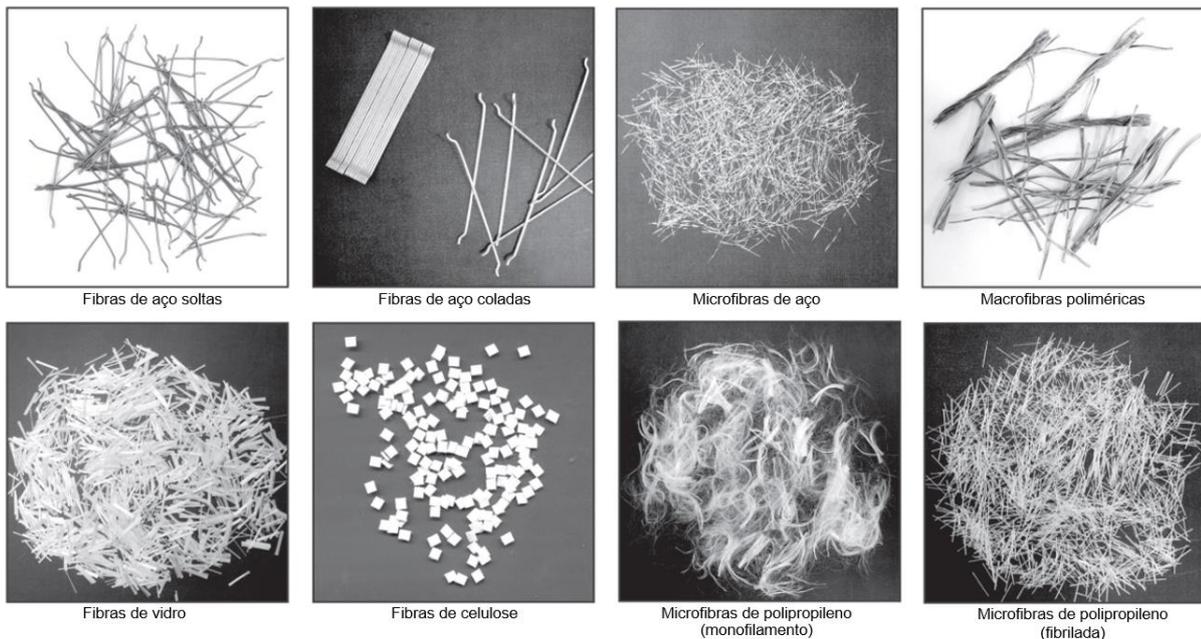
Diferentes tipos de fibras têm sido utilizados como material de reforço e controle de fissuração concreto, cada uma com suas características, as quais se diferem umas das outras pelo seu processo de fabricação, composição química e física, características mecânicas, geometria, formato, entre outros parâmetros (CARNIO, 2009). Dentre as fibras mais comuns disponíveis no mercado atualmente, estão as de aço, de vidro e de polipropileno (FIGUEIREDO, 2011; ACI, 2009), as quais serão tratadas particularmente por constituírem objetos de estudo desta pesquisa. Na Figura 9, são apresentadas possíveis classificações das fibras em função do tipo de material e de suas características físico-químicas, mecânicas e geométricas, enquanto na Figura 10 são ilustrados diferentes tipos de fibras.

Figura 9. Características das fibras utilizadas no concreto.



Fonte: Adaptado de NAAMAN (2008).

Figura 10. Tipos de fibras utilizados no concreto.



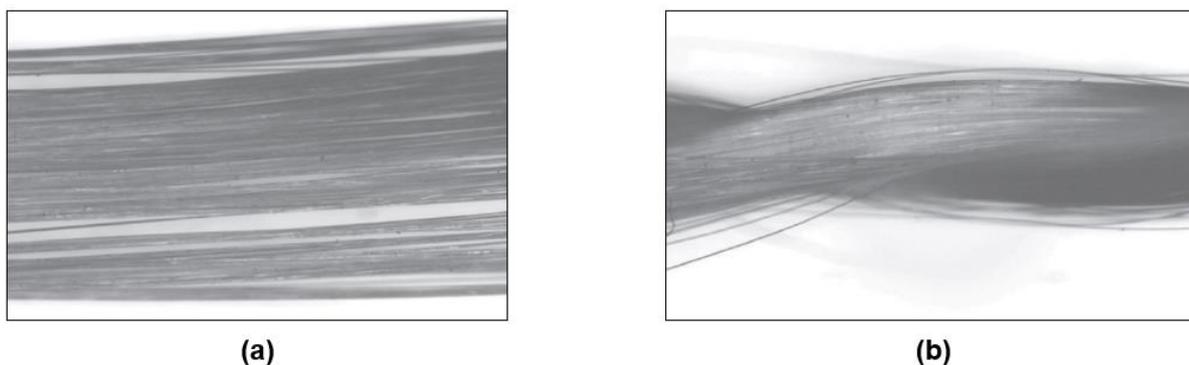
Fonte: Adaptado de SARZALEJO *et al.* (2021)

Uma vez que o material da fibra tenha sido selecionado, algumas combinações de suas propriedades geométricas relacionadas ao formato da seção transversal,

comprimento, diâmetro (ou diâmetro equivalente) e superfície da fibra precisam ser definidas. No caso das fibras de aço, por exemplo, a seção transversal pode ser circular, retangular, quadrada, triangular ou qualquer outro formato poligonal desejado (NAAMAN, 2000). Para aprimorar a ligação mecânica entre a fibra e a matriz, as fibras podem ser modificadas por meio de tratamentos que tornam sua superfície mais rugosa ou ter a geometria alterada através de deformações produzidas que melhoram a aderência fibra-matriz, como a inserção de ganchos nas extremidades. Na sequência, é apresentada uma breve discussão das fibras em função da sua disposição, forma e diâmetro da seção transversal.

Bentur e Mindess (2007) dividem as fibras em dois grupos dependendo da sua disposição: (i) fibras em monofilamentos, que consistem em fios cortados em comprimentos padronizados (FIGUEIREDO, 2011); e (ii) fibras que se apresentam como feixes de finos filamentos, com cada feixe consistindo em várias centenas (por exemplo, vidro) a vários milhares (por exemplo, carbono) de filamentos, cada um com diâmetro menor ou igual a 10 μm . Os filamentos são geralmente mantidos juntos por meio de um tratamento polimérico fino aplicado nos filamentos durante seu processo de produção. Na fabricação do compósito, o feixe pode ser separado em filamentos individuais para obter uma distribuição uniforme na matriz, ou os filamentos podem permanecer agrupados, resultando em uma unidade de reforço que é um feixe envolvido pela matriz (BENTUR; MINDESS, 2007). Os feixes podem ser torcidos ou não torcidos (Figura 11): o feixe não torcido é chamado de “*strand*”, enquanto os filamentos torcidos recebem o nome de “*yarn*” (MALLICK, 2008).

Figura 11. Feixes de fibras: (a) não torcida e (b) torcida



Fonte: MALLICK (2008).

Os feixes de filamentos disponíveis no mercado de fibras compõem a solução encontrada para solucionar a dificuldade em manusear as fibras com diâmetros extremamente pequenos (MALLICK, 2008). Essa estrutura (em pequenos filamentos) é típica de várias fibras sintéticas, sejam inorgânicas (como a fibra de vidro) ou orgânicas (como as fibras de carbono e kevlar), e também de fibras naturais, como a fibra de amianto (BENTUR; MINDESS, 2007). Os diâmetros e outras propriedades de diferentes tipos de fibras são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades de diferentes tipos de fibras.

Tipo de fibra	Diâmetro [μm]	Densidade [g/m³]	Resistência à tração [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Alongamento último [%]
Metálicas					
Aço	5-1000	7,85	200-2600	195-210	0,5-5,0
Vidro					
Vidro-A	8-15	2,46	3000	65	4,7
Vidro-E	8-15	2,54	2000-4000	72	3,0-4,8
Vidro-AR	8-20	2,70	1500-3700	80	2,5-3,6
Poliméricas					
Acrílico (PAN)	5-17	1,18	200-1000	14,60-19,60	7,5-50,0
Aramida	10-12	1,40-1,50	2000-3500	62-130	2,0-4,6
Carbono (baixo módulo)	7-18	1,60-1,70	800-1100	38-43	2,1-2,5
Carbono (alto módulo)	7-18	1,70-1,90	1500-4000	200-800	1,3-1,8
Nylon (poliamida)	20-25	1,16	965	5,17	20,0
Poliéster (PET)	8-10	1,34-1,39	280-1200	10-18	10,0-50,0
Polietileno (PE)	25-1000	0,96	80-600	5,00	12,0-100,0
Polipropileno (PP)	10-200	0,90-0,91	310-760	3,50-4,90	6,0-15,0
Acetato de polivinila (PVA)	3-8	1,20-2,50	800-3600	20-80	4,0-12,0
Naturais					
Celulose	15-125	1,50	300-2000	10-50	20,0
Bambu	50-400	1,50	50-350	33-40	10,0-25,0
Asbesto	0,02-25	2,55	200-1800	164	2,0-3,0

Fonte: Adaptado de LÖFGREN (2005)

Em relação à sua forma, as fibras podem ser contínuas (fibras longas – comumente chamadas de fios), inseridas na matriz por meio de técnicas como enrolamento filamentar ou aplicação de camadas de manta de fibra (LEITE, 2018) ou curtas e descontínuas, geralmente com menos de 50 mm de comprimento e incorporadas

diretamente na matriz por meio de processo de mistura. Como dito anteriormente, no caso de elementos de CRF, utiliza-se fibras descontínuas e distribuídas aleatoriamente na matriz de concreto, isto é, as fibras assumem uma orientação aleatória. Contudo, mesmo nesses sistemas, a distribuição das fibras não é completamente uniforme e sua orientação não é idealmente aleatória. A uniformidade da distribuição do volume das fibras é muito sensível ao processo de mistura e, na prática, dificilmente se consegue uma distribuição totalmente uniforme (BENTUR; MINDESS, 2007).

As fibras podem ser divididas em dois grupos em função do diâmetro da seção transversal: as microfibras e as macrofibras. Embora exista diferentes definições na literatura para essas duas classificações (BENTUR; MINDESS, 2007; NAAMAN, 2008; BRANDT, 2009; FIGUEIREDO, 2011; SALVADOR, 2013), há uma tendência em se utilizar a seguinte definição: as macrofibras são aquelas que possuem diâmetro maior ou igual a 0,30 mm, enquanto as microfibras possuem diâmetro da ordem de 0,10 a 0,30 mm. Devido às pequenas dimensões, as microfibras oferecem uma grande quantidade de fibras por unidade de volume, capazes de proporcionar uma “microtenacidade” ao compósito e reduzir o tamanho das microfissuras. Embora não seja o principal objetivo das microfibras, elas também podem aumentar a resistência do compósito ao surgimento da primeira fissura – resistência conhecida como limite de proporcionalidade. Além disso, auxiliam no controle de fissuras devido à retração do concreto, ainda no estado fresco. Dessa forma, elas atuam em conjunto com a matriz de concreto desde o início do carregamento (BERNARDI, 2003). Por outro lado, as macrofibras atuam como reforço estrutural no estado endurecido do compósito, na fase pós-fissuração. Assim, diz-se que o ponto de início de atuação das macrofibras corresponde à fissuração da matriz.

O teor de fibras nas matrizes cimentícias é especificado por sua fração volumétrica (em valor percentual), ou seja, corresponde ao volume das fibras dividido pelo volume total do compósito. A dosagem de fibras, por outro lado, corresponde à quantidade de fibras, em massa, adicionadas a um volume de concreto. Nesse caso, a dosagem é usualmente fornecida em kg/m^3 . Em função dos diferentes pesos específicos dos materiais, a mesma fração volumétrica de diferentes tipos de fibras corresponde a diferentes dosagens de fibras. Embora elas sejam adquiridas por peso, as

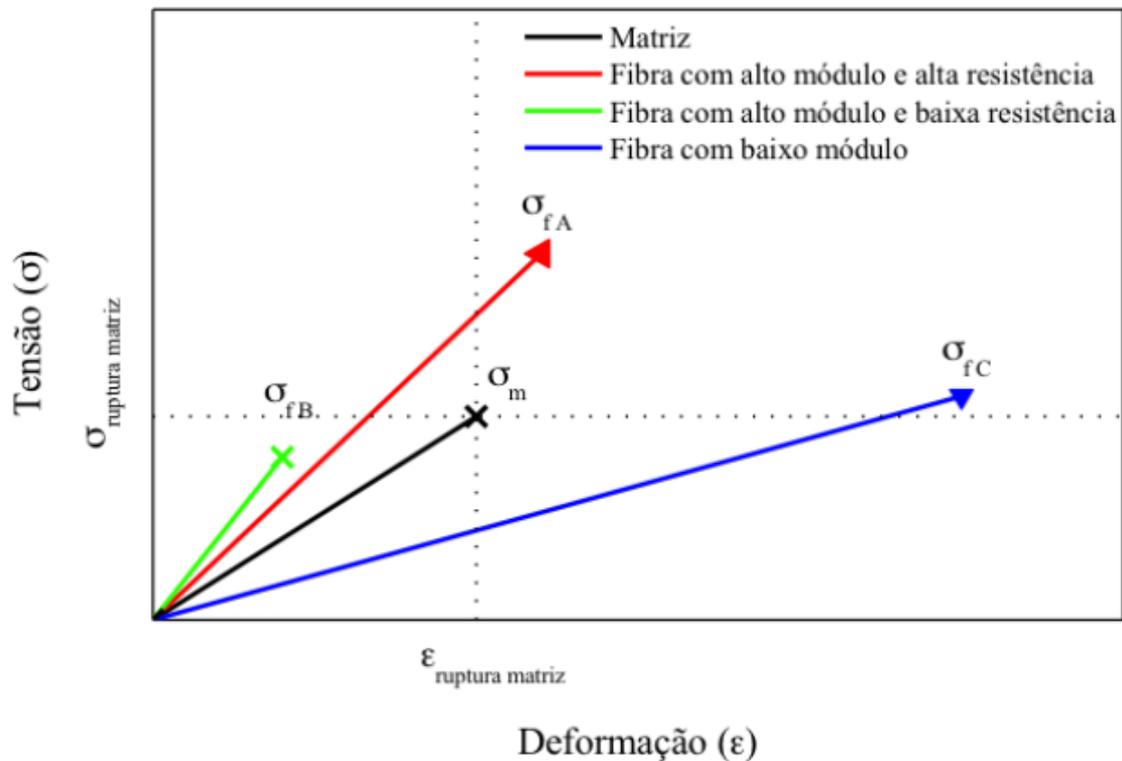
propriedades mecânicas dos compósitos são descritas em função da fração volumétrica e não da dosagem das fibras. Um teor de 1% em volume de fibras de aço, por exemplo, corresponde à aproximadamente 80 kg/m³ de concreto; no entanto, um teor de 1% de fibras de polipropileno equivale a cerca de apenas 9,1 kg/m³ de concreto (NAAMAN, 2008). Nesse contexto, Mehta e Monteiro (2014) classificam os compósitos reforçados com fibras em função da fração volumétrica de fibra, dividindo-os da seguinte forma:

- baixa fração volumétrica (menor que 1,0%): as fibras são utilizadas, principalmente, em elementos com grande superfície exposta, como lajes e pavimentos, para controle de fissuração por retração;
- fração volumétrica moderada (entre 1,0 e 2,0%): as fibras proporcionam aumento do módulo de ruptura, tenacidade e resistência ao impacto, aplicadas em estruturas que exigem maior capacidade de absorção de energia;
- alta fração volumétrica (maior que 2,0%): nesse caso, as fibras proporcionam o comportamento de “*strain-hardening*” ao concreto, isto é, o compósito apresenta ganho de resistência após o surgimento da primeira fissura.

Segundo Figueiredo (2011), a função da fibra no interior da matriz de concreto depende, principalmente, da sua resistência mecânica e módulo de elasticidade, uma vez que essas propriedades definem a capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto. Nesse contexto, o autor define as fibras de baixo e alto módulo quando elas possuem módulo de elasticidade inferior ou superior ao módulo do concreto, respectivamente. Embora existam fibras de diferentes materiais com resistências à tração iguais, aquelas que possuem maior módulo de elasticidade são mais eficientes para matrizes de concreto de densidade normal (NAAMAN, 2008). De modo geral, as fibras poliméricas possuem baixo módulo de elasticidade e as fibras de aço e de vidro possuem alto módulo de elasticidade (SALVADOR, 2013).

Para ilustrar a influência das propriedades das fibras no comportamento mecânico do compósito, são apresentadas, na Figura 12, curvas tensão-deformação perfeitamente elásticas de uma matriz de concreto reforçada com três tipos de fibra: (i) fibra com alto módulo e alta resistência; (ii) fibra com alto módulo e baixa resistência; e (iii) fibra com baixo módulo.

Figura 12. Influência do módulo de elasticidade e da resistência mecânica da fibra sobre o comportamento mecânico do compósito.



Fonte: SALVADOR (2013) adaptado de FIGUEIREDO (2011).

Sabe-se que o início da atuação das fibras com finalidade de reforço do concreto corresponde à fissuração da matriz. Nesse caso, para avaliar a influência das propriedades das fibras sobre o comportamento mecânico do compósito (Figura 12), deve-se analisar o comportamento de cada tipo de fibra quando a resistência à tração da matriz é atingida (σ_m).

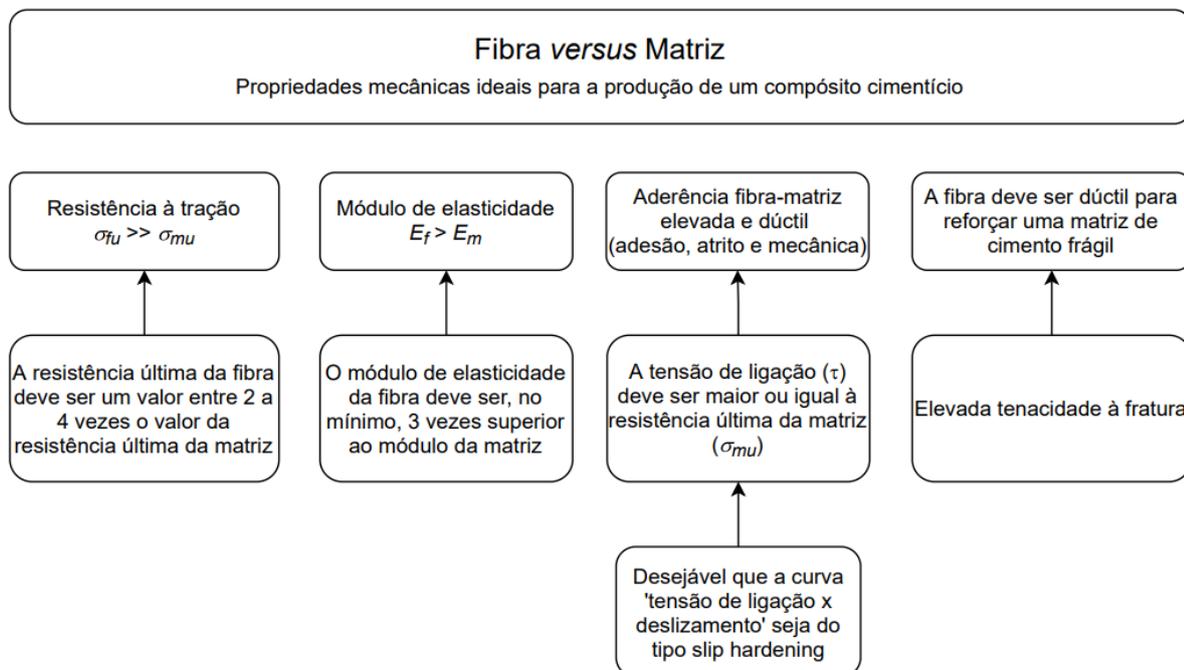
O nível de tensão que uma fibra de baixo módulo pode suportar é inferior à tensão de ruptura da matriz (SALVADOR, 2013). Desse modo, para que a fibra proporcione capacidade de reforço ao concreto, é necessário um elevador teor de fibras para que a tensão por fibra não ultrapasse sua tensão de ruptura (FIGUEIREDO, 2011).

Na situação em que a fibra de alto módulo e baixa resistência é utilizada, observa-se que a tensão última da fibra (σ_{fB}) já foi ultrapassada quando a matriz de concreto sofre ruptura. Dessa forma, a contribuição da fibra para o reforço do concreto é praticamente nula, visto sua baixa capacidade de deformação elástica (FIGUEIREDO, 2011; SALVADOR, 2013).

No último caso, em que a matriz é reforçada com uma fibra de alto módulo e alta resistência mecânica, a fibra apresenta um nível de tensão elevado quando a matriz sofre ruptura. Nessa ocasião, a fibra é capaz de proporcionar o reforço adequado à matriz mesmo em baixos teores, desde que sua resistência não seja atingida (FIGUEIREDO, 2011; SALVADOR, 2013).

De modo geral, Naaman (2003) define que, para que as fibras sejam eficazes em reforçar o concreto, elas devem, preferencialmente, apresentar as seguintes propriedades (Figura 13): (i) resistência à tração significativamente superior à resistência do concreto (2 a 3 vezes superior); (ii) resistência de aderência com a matriz de concreto igual ou superior à resistência à tração da matriz; e (iii) módulo de elasticidade significativamente superior ao módulo da matriz de concreto. Destaca-se, no entanto, que essa última propriedade é válida para as fibras de aço, visto que, atualmente, existem fibras poliméricas (cujo módulo é inferior ao do concreto) capazes de proporcionar um reforço eficaz, conforme pode ser visto no trabalho de Salvador (2013). Outras propriedades, como o coeficiente de Poisson e de expansão térmica, devem possuir a mesma ordem de magnitude que o concreto (NAAMAN, 2003).

Figura 13. Propriedades recomendadas da fibra e da matriz.



Fonte: Adaptado de NAAMAN (2003).

2.2.1 Fibras de aço

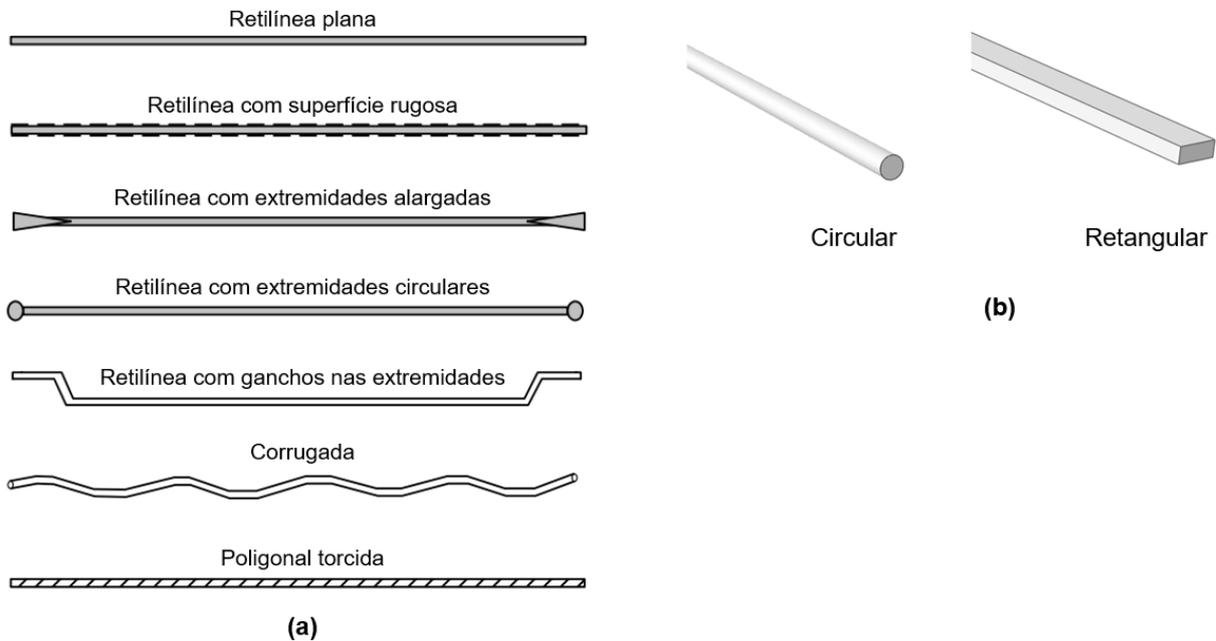
Os primeiros estudos sobre CRF ocorreram no final da década de 1950 e no início da década de 1960, em que foram investigados o comportamento de concretos reforçados com fibras de aço (CRFA). Desde então, as fibras de aço constituem o grupo de fibras mais estudado e aplicado na engenharia estrutural, conforme identificado na Figura 5. Inicialmente, essas fibras eram utilizadas para substituir armadura secundária (construtiva) para controle de fissuras em lajes de concreto, pavimentos e revestimento de túneis. No âmbito comercial, a primeira aplicação do concreto reforçado com fibras de aço nos Estados Unidos ocorreu em agosto de 1971, na construção de um pavimento para posto de pesagem de caminhões próximo a cidade de Ashland, em Ohio (ACI, 2009). Atualmente, embora as fibras de aço ainda sejam amplamente utilizadas com essas finalidades, elas são também utilizadas como o principal material de reforço em elementos estruturais, seja para substituir totalmente a armadura convencional, seja para atuar em conjunto com a armadura (BENTUR; MINDESS, 2007).

As fibras de aço podem ser produzidas por diferentes processos de fabricação, sendo o corte de arame trefilado o mais comum entre eles (MEDEIROS, 2012). Outros processos de fabricação envolvem o corte de chapas para obtenção de fibras com seções transversais quadradas ou retangulares; arames trefilados a frio e escarificados; e processos usinados, em que a fibra é obtida a partir do processo de corte de um bloco de aço (ABNT NBR 15530, 2019). As fibras trefiladas, embora sejam as mais utilizadas atualmente, possuem um custo unitário relativamente alto devido à tecnologia de corte e trefilação a frio (BRANDT, 2009). Além disso, as fibras passam por operações adicionais para melhorar sua aderência com a matriz. Essas operações envolvem, por exemplo, a inserção de ganchos nas extremidades da fibra ou ondulações ao longo do seu comprimento. Segundo Brandt (2009), as fibras obtidas a partir de cortes em chapas finas são mais baratas e possuem uma resistência de aderência superior que os fios trefilados, sem a necessidade de procedimentos adicionais.

As fibras de aço mais utilizadas possuem seção transversal circular, com diâmetro compreendido entre 0,40 e 0,80 mm e comprimento variando entre 25 e 80 mm. Usualmente, o fator de forma dessas fibras é inferior a 100, permanecendo numa faixa

entre 40 e 80 na maioria dos casos (NAAMAN, 2008). Outras configurações de fibras de aço são ilustradas na Figura 14.

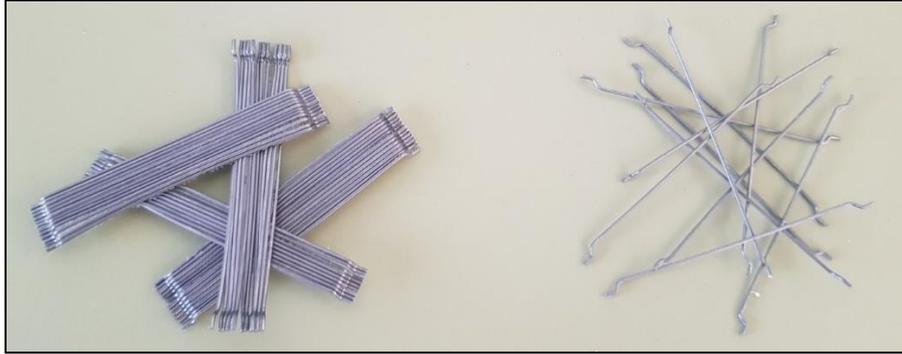
Figura 14. Tipos de fibras de aço: (a) formatos e (b) seções transversais típicas.



Fonte: (a) Adaptado de NAAMAN (2003); (b) Autoria própria.

Atualmente, as fibras de aço retas e planas são pouco utilizadas devido à sua baixa aderência com a matriz de concreto, que reduz a eficácia do compósito. Em contrapartida, as fibras com ganchos nas extremidades são provavelmente as fibras mais utilizadas no mundo, visto a elevada resistência de aderência proporcionada pela ancoragem (BENTUR; MINDESS, 2007; BRANDT, 2009). Para otimizar a dispersão das fibras na matriz, tem-se utilizado o conceito das fibras coladas para evitar a formação de ouriços (empelotamento das fibras de aço). Nesse caso, as fibras são fornecidas em pentes e são interligadas, uma a uma, por uma cola hidrossolúvel. No momento em que a cola entra em contato com a água presente na argamassa do concreto, as fibras se descolam umas das outras e se distribuem de forma homogênea na matriz de concreto (Figura 15).

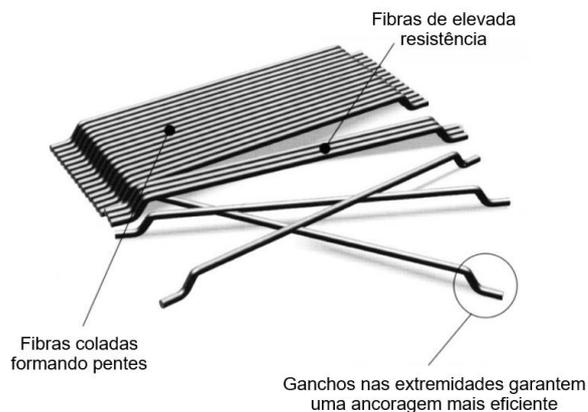
Figura 15. Fibras de aço coladas e soltas.



Fonte: Autoria própria

A ancoragem das fibras de aço é fundamental para a sua eficiência nas matrizes de concreto. Devido à fraca adesão química, o esforço é transferido da matriz para as fibras majoritariamente por meio de aderência mecânica, isto é, dispositivos e conformações inseridas na fibra que otimizam essa transferência de esforços (BRANDT, 2009). Nos casos em que a aderência ao longo do comprimento da fibra não é suficiente para a eficácia do compósito, tem-se duas alternativas: (i) aumentar o comprimento da fibra ou (ii) inserir dispositivos mecânicos para aumentar a ancoragem, como ganchos nas extremidades (Figura 16). Nessa situação, Brandt (2009) recomenda que o comprimento da fibra deve ser tal que seu fator de forma seja menor ou igual a 100; caso contrário, a distribuição das fibras e a trabalhabilidade da mistura é afetada negativamente. Dessa forma, recomenda-se a utilização de fibras mais curtas com aderência melhorada em relação à matriz, seja por meio de inserção de ganchos em suas extremidades, seja por meio de rugosidade e/ou ondulações aplicadas ao longo do seu comprimento.

Figura 16. Pentes de fibras de aço com ganchos nas extremidades.



Fonte: Adaptado de BARROS (2000).

Embora as fibras possam ser produzidas em diferentes tipos de aço, a grande maioria é fabricada a partir de ligas metálicas de baixo carbono, com resistência à tração entre 500 e 1000 MPa. Em algumas situações, tem-se fibras mais resistentes, atingindo patamares de 2400 MPa de resistência à tração. Na construção de elementos refratários, como paredes de alto-forno, as fibras de aço inoxidável garantem maior durabilidade aos elementos (BRANDT, 2009).

No Brasil, a ABNT NBR 15530:2019 apresenta diferentes classificações das fibras de aço para concreto. Em função de sua conformação geométrica, as fibras podem ser:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades
- Tipo C: fibra de aço corrugada
- Tipo R: fibra de aço reta sem ancoragens

Deve-se destacar que essa classificação das fibras contempla apenas o perfil longitudinal da fibra. O formato da seção transversal depende do tipo de aço utilizado na produção da fibra (FIGUEIREDO, 2011). Desse modo, a norma técnica supracitada ainda classifica as fibras de acordo com o material base que lhe deu origem, da seguinte forma:

- Grupo I: fibra oriunda de arames trefilados a frio
- Grupo II: fibra oriunda de chapas cortadas
- Grupo III: fibra oriunda de arames trefilados a frio e escarificados
- Grupo IV: fibras produzidas por fusão
- Grupo V: fibras usinadas a partir de blocos de aço

Em relação ao teor de carbono do aço utilizado na fabricação das fibras, as mesmas podem ser classificadas de três modos:

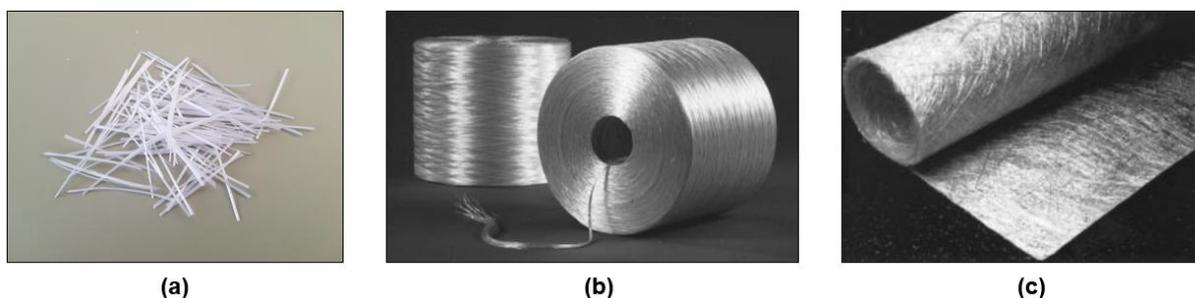
- Baixo teor de carbono: no máximo 0,30% de carbono
- Médio teor de carbono: de 0,30% a 0,60% de carbono
- Alto teor de carbono: 0,60% a 1,00% de carbono

Segundo esses critérios, as fibras de aço trefiladas com ganchos nas extremidades, por exemplo, correspondem à classificação IA.

2.2.2 Fibras de vidro

As fibras de vidro são um tipo de fibra cerâmica e são geralmente fabricadas na forma de “cachos”, ou seja, fios compostos de centenas de filamentos individuais. Por possuírem alto módulo de elasticidade (em torno de 72 GPa), as fibras de vidro podem ser utilizadas para reduzir os efeitos de retração do concreto na fase endurecida (SALVADOR, 2013). As fibras de vidro podem ser disponibilizadas na forma de filamentos por aglutinação de fios, como é o caso da macrofibra para reforço (Figura 17a), na forma de fios contínuos (*roving* - Figura 17b) ou em mantas de fibras (Figura 17c) com aberturas suficientemente grandes para permitir a penetração dos grãos de cimento (BENTUR; MINDESS, 2007).

Figura 17. Fibras de vidro: (a) macrofibra para reforço; (b) fibras contínuas (*roving*); (c) manta.



Fonte: (a) Autoria própria; (b) e (c) ACI 440R-96 (2002).

O espaço reduzido entre os filamentos das fibras reforça o concreto em nível microscópico, criando pontes de transferência de tensão entre as microfissuras do concreto antes das mesmas atingirem uma abertura crítica. Quando comparadas com as fibras de aço, a área superficial elevada e o tamanho relativamente pequeno das fibras de vidro proporcionam maior capacidade de dispersão na matriz de concreto (MOBASHER, 2012).

As primeiras pesquisas envolvendo matrizes cimentícias reforçadas com fibras de vidro ocorreram no início da década de 1960, quando foram analisadas fibras de vidro de boro-silicato (vidro-E) e fibras de vidro de sodo-cálcico (vidro-A), cujas composições químicas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Composição química das fibras de vidro.

Componente	vidro-A	vidro-E	vidro-AR CemFIL	vidro-AR NEG
SiO ₂	73,0	54,0	62,0	61,0
Na ₂ O	13,0	-	14,8	15,0
CaO	8,0	22,0	-	-
MgO	4,0	0,5	-	-
K ₂ O	0,5	0,8	-	2,0
Al ₂ O ₃	1,0	15,0	0,8	-
Fe ₂ O ₃	0,1	0,3	-	-
B ₂ O ₃	-	7,0	-	-
ZrO ₂	-	-	16,7	20,0
TiO ₂	-	-	0,1	-
Li ₂ O	-	-	-	1,0

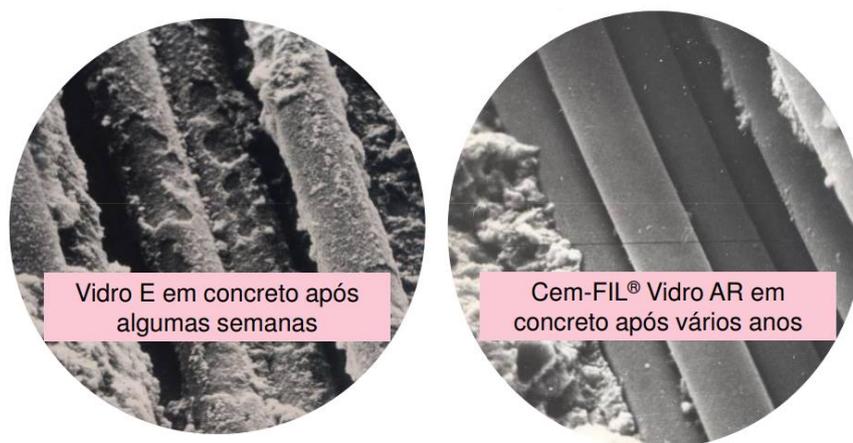
Fonte: ACI 440R-96 (2002).

Os autores observaram que as fibras produzidas a partir do vidro-E e do vidro-A se degradavam rapidamente devido à alta alcalinidade ($\text{pH} \geq 12,5$) presente na matriz cimentícia, motivo pelo qual esses tipos de fibras de vidro não devem ser utilizados como material de reforço do concreto (ACI 544.1R-96, 2009). Para contornar o problema, em 1967, cientistas britânicos iniciaram uma investigação sobre vidros resistentes aos álcalis para a produção de fibras que não sofressem degradação em meio alcalino. O resultado das pesquisas foi apresentado em 1971, com o desenvolvimento de uma fibra de vidro contendo 16% de óxido de zircônia (ZrO_2), patenteada sob o nome CemFIL[®]. As fibras foram cortadas em comprimentos próximos a 40 mm, com diâmetros variando entre 12 e 14 μm , e seriam chamadas na literatura técnica de 'fibras de vidro AR (álcali-resistente)' (BRANDT, 2009).

Embora promissores, os resultados dos ensaios de elementos reforçados com as fibras CemFIL[®] não atenderam totalmente as expectativas. Placas finas de argamassa de cimento reforçadas com as fibras CemFIL[®] foram ensaiadas em diferentes condições ambientais ao longo de dez anos, e os cientistas verificaram que, após seis meses de exposição à umidade, a resistência dos compósitos foi reduzida significativamente. Após o período de dez anos, a resistência das placas reforçadas com fibras era igual a resistência de placas de argamassa com nenhum tipo de reforço, isto é, sem a presença de fibras. A perda de resistência do compósito foi,

então, atribuída ao processo de corrosão das fibras (BRANDT, 2009). Nesse contexto, uma nova pesquisa liderada pelo grupo Pilkington Brothers foi realizada para fornecer um revestimento adicional nas fibras de vidro AR existentes, resultando em um novo tipo de fibra no início da década de 1980, denominada CemFIL[®] 2. Após um extenso programa experimental que avaliou a estabilidade das fibras submetidas a diferentes condições ambientais, os cientistas encontraram uma fibra estável em meio alcalino e em condições de ser utilizada a longo prazo (Figura 18).

Figura 18. Desempenho das fibras de vidro-E e vidro-AR em meio alcalino.



Fonte: ARAÚJO (2010).

Desde a introdução das fibras de vidro AR no Reino Unido em 1971 pela CemFIL[®], outros fabricantes surgiram no mercado ao longo dos anos: em 1975, a japonesa Nippon Electric Glass (NEG) desenvolveu um vidro resistente a álcalis para a produção de fibras contendo, no mínimo, 20% de zircônia em sua composição (Tabela 5); em 1973, a empresa norte-americana Owens-Corning Fiberglas lançou uma fibra de vidro AR; em 1976, a Owens-Corning Fiberglas e o grupo Pilkington Brothers concordaram em produzir a mesma formulação de vidro AR para aprimorar o desenvolvimento das fibras e produtos de vidro em geral (ACI 544.1R-96, 2009).

Uma abordagem alternativa que pode ser adotada para otimizar a vida útil das fibras de vidro no interior de matrizes cimentícias é a redução da alcalinidade da matriz (BENTUR; MINDESS, 2007). Essa redução pode ser obtida com adições de materiais suplementares na composição da matriz, como sílica ativa e metacaulim.

O concreto reforçado com fibras de vidro (CRFV) é particularmente atraente devido à sua facilidade na confecção de formas complexas e de componentes finos (~10 mm

de espessura), sendo considerado, portanto, uma base para a fabricação de várias unidades pré-fabricadas. Mesmo quando de pequena espessura, elementos constituídos por esse material compósito possuem elevada resistência logo nas primeiras idades (BENTUR; MINDESS, 2007).

As fibras de vidro podem ser utilizadas para reforçar o concreto em diversas aplicações, das quais o revestimento de painéis de fachadas pré-fabricadas é a mais comum. Outras aplicações desenvolvidas ao longo dos anos envolvem tubos de concreto, lajes de pisos industriais e pavimentos rodoviários. Para uma aplicação bem-sucedida das fibras, contudo, atenção especial deve ser dada ao desempenho ao longo prazo, particularmente em relação à deterioração das propriedades mecânicas provocadas por variações nas condições climáticas. Atualmente, devido às alterações nas propriedades mecânicas do compósito com o avanço da idade, há uma tendência de limitar o uso CRFV a componentes não estruturais ou semiestruturais, como painéis de revestimento. Segundo Bentur e Mindess (2007), o desempenho a longo prazo CRFV ainda é o principal critério pelo qual sua qualidade é avaliada, de modo que pesquisas são realizadas continuamente para melhorar a vida útil de tais materiais (CHENG *et al.*, 2019; SHAFEI *et al.*, 2021).

No Brasil, os requisitos e métodos de ensaio das fibras de vidro álcali-resistentes para uso estrutural em concreto são estabelecidos na norma técnica ABNT NBR 16941:2021. Segundo a diretriz técnica, as fibras devem conter um teor mínimo de 16% de dióxido de zircônia (ZrO_2) e são classificadas em função da sua apresentação (integral ou monofilamento) e de seu diâmetro equivalente, indicado na Tabela 6.

Tabela 6. Classificação das fibras em função do diâmetro e forma.

Classe			
I			II
a	b		
Diâmetro	< 0,30 mm	< 0,30 mm	$\geq 0,30 \text{ mm}^1$
Forma	Monofilamento	Integral	-

¹ Para as fibras da Classe II, deve ser considerado o diâmetro do elemento, fio ou filamento que se espera que permaneça individualizado após o procedimento da mistura do concreto ou argamassa.

Fonte: ABNT NBR 16941:2021

Além da fibra de vidro constituída por uma aglutinação de pequenos filamentos comumente encontrada no mercado, um novo tipo de fibra de vidro que vem sendo estudada é a fibra de vidro pultrudada AR, que é proveniente de um reprocesso de pultrusão (Figura 19). Por ser um material ainda em desenvolvimento, os poucos estudos existentes na literatura são restritos.

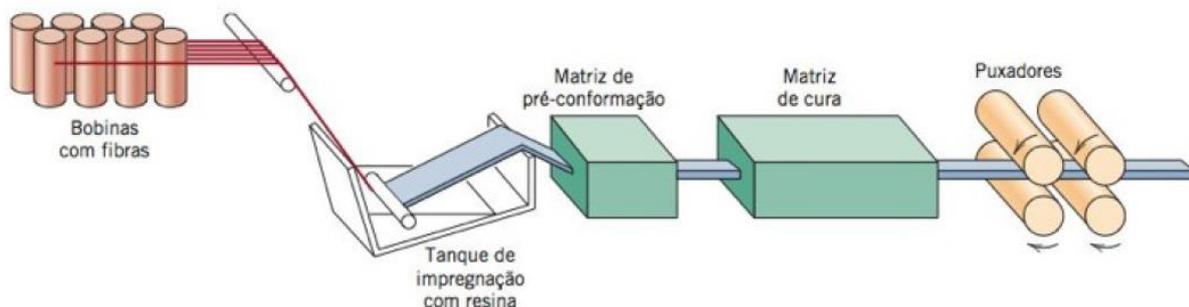
Figura 19. Fibra de vidro AR pultrudada.



Fonte: Autoria própria.

No processo de pultrusão (Figura 20), os feixes de fibras contínuas, inicialmente impregnadas com uma resina termofixa, são puxadas por um molde de aço que as pré-conforma para a forma desejada. Posteriormente, o material é usinado por uma matriz de cura que confere à peça sua forma final (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018). O processo de pultrusão é usualmente utilizado para a fabricação **de barras** de FRP (*fiber reinforced polymer*).

Figura 20. Processo de pultrusão.



Fonte: CALLISTER JR; RETHWISCH (2018).

2.2.3 Fibras poliméricas

As fibras poliméricas são definidas pela norma técnica brasileira recém-publicada (ABNT NBR 16942:2021) como “fibras obtidas por extrusão e estiramento de polímeros”, e podem ser descontínuas, alinhadas ou torcidas, onduladas ou com rugosidade superficial. Os polímeros mais utilizados são polietileno, polipropileno, poliamidas álcool polivinílico (PVA) e poliácridonitrila (PAN) (BENTUR; MINDESS, 2007; ZHENG; FELDMAN, 1995).

Diferente das fibras de vidro que são classificadas em função da sua forma e diâmetro, as fibras poliméricas são classificadas na norma técnica brasileira apenas em função do diâmetro, e seguem os mesmos critérios indicados na Tabela 6 para as fibras de vidro. Apesar disso, as microfibras são encontradas no mercado nas formas de monofilamento e fibriladas, isto é, como uma malha de finos filamentos de seção retangular (FIGUEIREDO, 2011).

As macrofibras poliméricas surgiram no mercado internacional na década de 1990, quando eram fornecidas em feixes contendo uma grande quantidade de fibras unidas por uma fita externa (Figura 21). As primeiras aplicações ocorreram na Austrália e Canadá com concreto projetado (FIGUEIREDO, 2011). Desde então, as fibras poliméricas têm sido objeto de estudo em várias pesquisas recentes que buscam compreender cada vez mais seu desempenho no concreto (LUCENA, 2017; OLIVEIRA, 2018; PAKRAVAN; OZBAKKALOGLU, 2019; LEITE; CASTRO, 2020;).

Figura 21. Macrofibras poliméricas.



Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros geométricos das fibras poliméricas podem variar consideravelmente. O diâmetro das fibras em monofilamento, por exemplo, variam desde 0,01 mm para as fibras de carbono ou Kevlar até 0,80 mm para as fibras de polipropileno e PVA. Nas aplicações de CRF, o fator de forma das fibras sintéticas é compreendido entre valores inferiores a 100 (no caso de fibras com diâmetros maiores) até algumas centenas (no caso de fibras extremamente finas) (NAAMAN, 2008).

Essas fibras possuem um módulo de elasticidade inferior ao módulo da matriz de concreto. Dessa forma, para que elas possam atuar como reforço estrutural, elas devem estar presentes em elevado teor, conforme discutido anteriormente, o que pode inviabilizar a aplicação do CRF devido aos custos elevados e à dificuldade inerente à trabalhabilidade do concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Atualmente, pode-se encontrar no mercado brasileiro diferentes tipos de fibra polimérica conforme a finalidade de utilização. Além das macrofibras com foco no reforço estrutural, tem-se as microfibras para controle de fissuração devido à retração plástica do concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Além das aplicações usuais de controle da fissuração e reforço do concreto, as fibras poliméricas, particularmente as de polipropileno, são utilizadas como método de prevenção ao lascamento do concreto. Nessas situações, as fibras são misturadas diretamente ao concreto e, por possuírem uma temperatura de fusão em torno de 170°C, ao se fundirem, criam pequenos vazios e canais que permitem a dissipação da pressão do vapor no interior do concreto durante um incêndio (FIGUEIREDO, 2011), retardando ou até mesmo prevenindo o *spalling*. De acordo com Nince; Figueiredo; Bittencourt (2003), as fibras produzidas em monofilamentos são mais eficientes que as fibras fibriladas por possuírem, para uma mesma massa, um maior número de fibras e, desta forma, um maior número de vazios pode ser criado.

2.3 INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

De acordo com Bentur e Mindess (2007), em matrizes cimentícias reforçadas com fibras, três tipos de interação merecem destaque: adesão física e química; atrito entre

a fibra e a matriz; e ancoragem mecânica induzida pela geometria da fibra (ganchos nas extremidades, ondulações, dentre outros).

A aderência por adesão e atrito entre a fibra e a matriz são relativamente fracas. Contudo, elas possuem uma contribuição significativa no caso de compósitos reforçados com fibras de elevada área superficial (como, por exemplo, as fibras sintéticas de carbono, com diâmetros da ordem de 10 μm) e de matrizes cimentícias caracterizadas por uma microestrutura densa e de baixa porosidade, isto é, com relação água/aglomerante (a/ag) inferior a 0,30. Em concretos reforçados com fibras convencionais, em que a relação a/ag é superior a 0,40 e as fibras possuem diâmetros da ordem de 100 μm , a interação proporcionada por adesão e atrito é relativamente fraca, sendo necessária a ancoragem mecânica (BENTUR; MINDESS, 2007). Por esse motivo, diversos formatos de fibras foram desenvolvidos para melhorar a aderência entre o material de reforço e a matriz cimentícia (NAAMAN, 2003; NAAMAN, 2008).

Na prática, a principal contribuição das fibras ocorre após a fissuração da matriz, em que as fibras atuam como pontes de transferência (*bridging effect*) de tensão entre as faces da fissura, impedindo sua propagação e evitando a ruptura frágil do material. A transferência de esforços pela fibra atuando como ponte entre as faces da fissura é avaliado por meio de ensaios de arrancamento (*ensaio pull-out*), em que uma única fibra ou um conjunto de fibras é submetido a uma força de tração até a ocorrência do arrancamento. Por meio desse ensaio, é possível obter a curva tensão-deslizamento da fibra utilizada em modelagens numéricas para simular o comportamento da interação fibra-matriz. Nessa curva, a tensão obtida é relativa à tensão na interface fibra-matriz (BENTUR; MINDESS, 2007).

A compreensão dos mecanismos responsáveis pela transferência de tensões é essencial para o desenvolvimento de compósitos de alto desempenho, uma vez que os mesmos podem ser obtidos otimizando a interação entre a fibra e a matriz. Isso pode ser alcançado, por exemplo, por meio de mudanças na forma da fibra ou por meio de um tratamento em sua superfície (BENTUR; MINDESS, 2007).

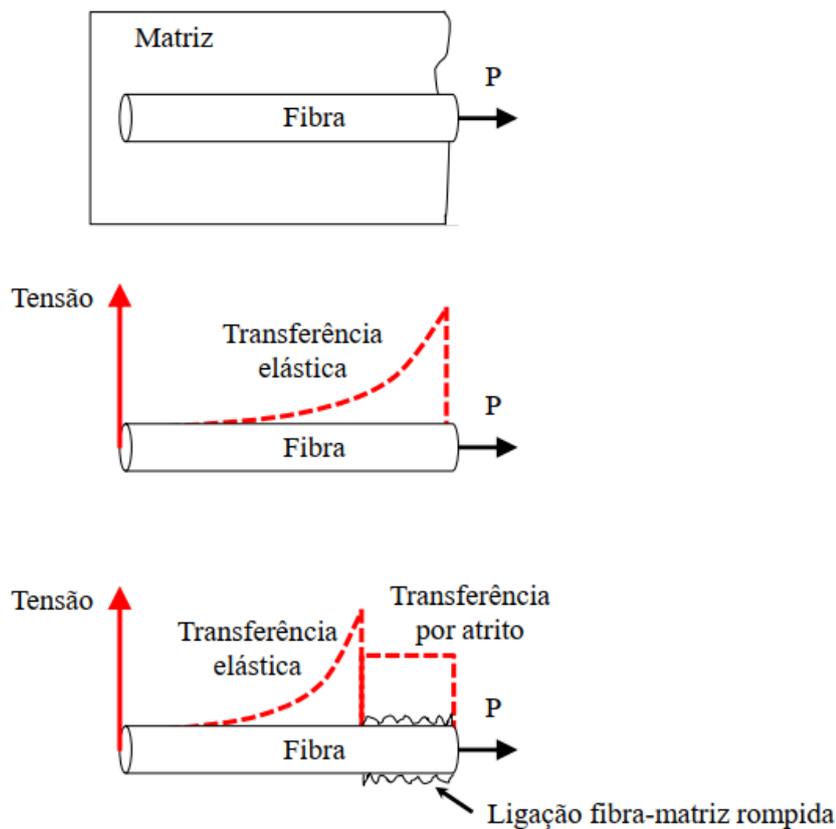
Em compósitos em que a matriz é constituída por um material frágil, como é o caso do concreto reforçado com fibras, os efeitos de transferência de tensão devem ser

considerados tanto na fase pré-fissuração como na fase pós-fissuração, uma vez que os processos podem ser bastante diferentes nesses dois casos. Antes de fissurar, a parcela elástica da transferência de tensão predomina, e os deslocamentos longitudinais da fibra e da matriz na interface são compatibilizados. Nessa etapa, o carregamento aplicado é distribuído entre as fibras e a matriz proporcionalmente à rigidez de cada fase por meio da tensão que se desenvolve na interface, de forma que as deformações desses dois componentes sejam iguais nessa região. Segundo Bentur e Mindess (2007), a parcela elástica da transferência de tensões não é uniforme ao longo da interface fibra-matriz, e é o principal mecanismo que deve ser considerado para estimar o limite de proporcionalidade e a tensão associada ao surgimento da fissura no compósito.

Em estágios mais avançados de carregamento, o atrito se torna o mecanismo principal de transferência de tensão na medida em que a fibra é arrancada da matriz. Nessa etapa, inicia-se os deslocamentos relativos entre a fibra e a matriz (BENTUR; MINDESS, 2007).

A transição do mecanismo predominante da transferência de tensão entre a parcela elástica e o atrito ocorre quando as tensões na interface superam a resistência de aderência. Na medida em que essa resistência é superada, inicia-se o arrancamento da fibra, momento em que o mecanismo de transferência por atrito predomina na região arrancada da fibra (Figura 22).

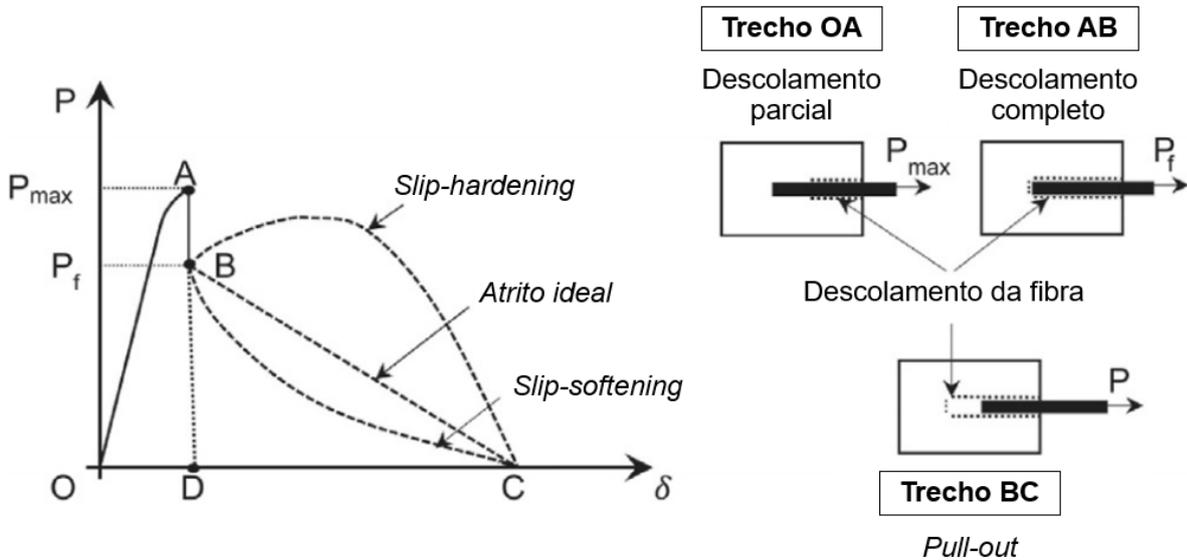
Figura 22. Distribuição de tensões de cisalhamento elástica e por atrito ao longo da fibra interceptando uma fissura.



Fonte: BANTHIA (1998); BENTUR; MINDESS (2007) – Adaptado por SALVADOR (2013).

Durante o ensaio de arrancamento da fibra, a curva na região pós-pico pode apresentar um decaimento (*slip-softening*), uma ascensão (*slip-hardening*) ou um declínio linear intermediário, esse último caracterizado usualmente como o comportamento ideal por atrito (Figura 23). A natureza do comportamento pós-pico é, em grande parte, um produto das mudanças que ocorrem na interface durante o processo de arrancamento da fibra, que são afetadas pelas características da zona de transição. No caso de uma fibra mais rígida e dura que a matriz circunjacente, o arrancamento da mesma danifica a zona de transição, e a resistência ao atrito é reduzida com o aumento do deslizamento (*slip-softening*). Quando a fibra é menos rígida que a matriz, o processo de arrancamento danifica a fibra, levando à desfibrilação e descamação de sua superfície, gerando uma curva ascendente (*slip-hardening*), caracterizando uma interface de boa qualidade (BENTUR; MINDESS, 2007; BONNET-MASIMBERT *et al.*, 2020).

Figura 23. Comportamento da fibra durante o ensaio *pull-out*.



Fonte: Adaptado de BONNET-MASIMBERT *et al.* (2020).

Mehta e Monteiro (2014) resumem o equilíbrio necessário para otimizar a aderência entre a fibra e a matriz: caso a aderência seja pequena, as fibras podem escorregar sob carregamentos baixos, e sua contribuição no controle de fissuração e aumento de tenacidade não é expressiva; por outro lado, caso a aderência entre a fibra e a matriz seja muito elevada, as fibras podem se romper antes de dissipar energia, proporcionando apenas uma melhoria periférica das propriedades mecânicas.

A interação fibra-matriz é abordada novamente no Capítulo 3, no qual é apresentado o estado da arte acerca do assunto e sua influência sobre o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras dentro do escopo da presente pesquisa.

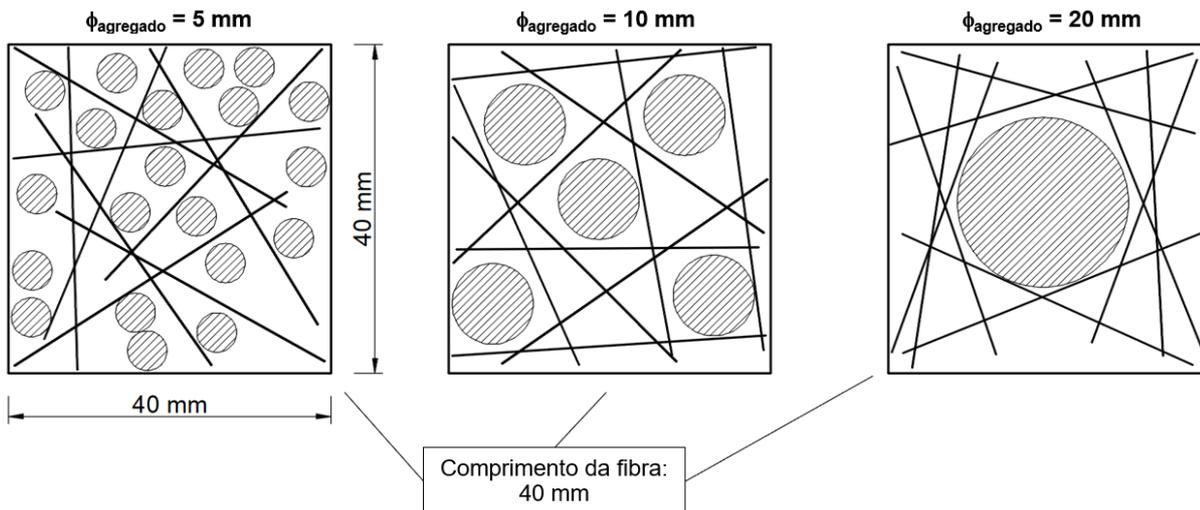
2.4 PROPRIEDADES DO CRF NO ESTADO FRESCO

As fibras são componentes finos que são adicionadas a uma pasta de cimento convencional, argamassa ou matriz de concreto. Determinados tipos de fibra, como as de aço, são relativamente rígidas, enquanto outras, como as de vidro ou polipropileno, são mais flexíveis. Conforme discutido anteriormente, elas podem ser adicionadas em diferentes formas, como monofilamento ou como um feixe de filamentos temporário que é separado em monofilamentos durante o processo de mistura. As características de um compósito reforçado com fibras no estado fresco dependem do tipo e do formato das fibras, da natureza e proporções dos constituintes

da matriz e do processo utilizado para a adição das fibras na matriz (JOHNSTON, 2001).

Pastas de cimento e argamassas são capazes de acomodar maiores teores de fibra devido à existência de uma fração volumétrica elevada da fase fluida do compósito, no interior da qual as fibras devem ser confinadas. Em concretos convencionais, por outro lado, a fração volumétrica da fase fluida é reduzida pela presença do agregado graúdo, limitando o espaço disponível para as fibras (JOHNSTON, 2001). Assim, para uma trabalhabilidade adequada do CRF, o controle do tamanho máximo do agregado graúdo é essencial na etapa de dosagem. Um exemplo é ilustrado na Figura 24, em que é apresentada a distribuição de fibras rígidas de 40 mm de comprimento no interior de concretos em que o tamanho do agregado graúdo varia entre 5 e 20 mm.

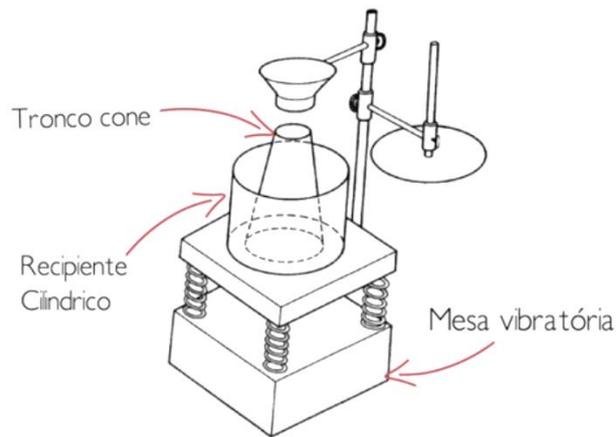
Figura 24. Variação do espaço disponível em função do tamanho do agregado.



Fonte: Adaptado de JOHNSTON (2001).

Usualmente, a consistência do concreto é avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conhecido na literatura internacional como “*slump test*”, e padronizado no Brasil pela norma técnica ABNT NBR 16889 (2020). Alternativamente ao “*slump test*”, tem-se o método do consistômetro “VeBe” (DNIT, 2004), que avalia a consistência do concreto a partir do tempo necessário para que um tronco de cone de concreto fresco amolde-se a um cilindro sob a ação de uma vibração padronizada (Figura 25).

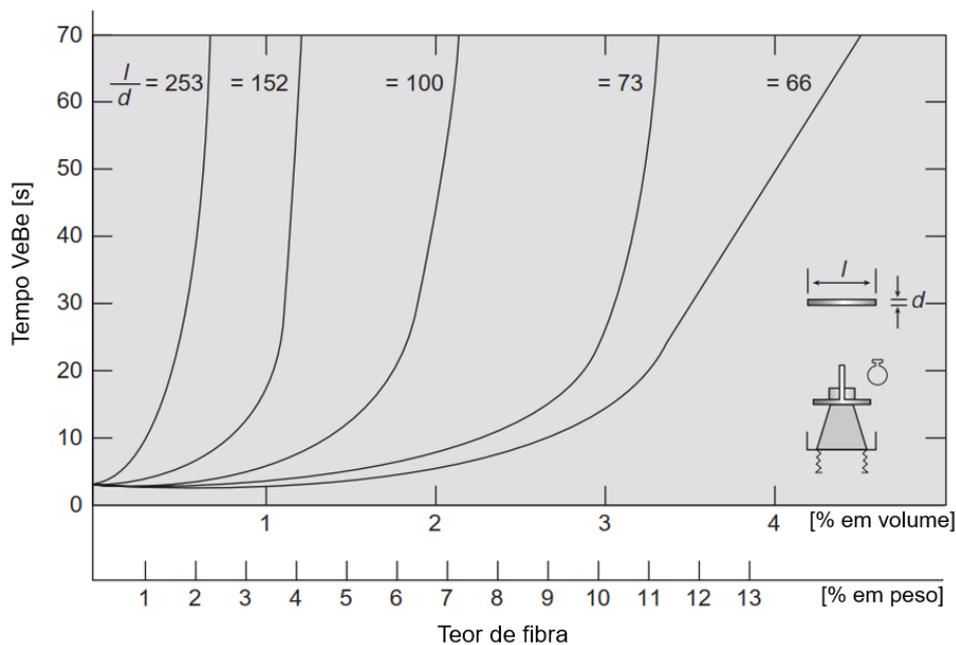
Figura 25. Equipamento utilizado no método do consistômetro VeBe para avaliar a consistência do concreto.



Fonte: David Grubba (2017).

Uma vez que as fibras proporcionam estabilidade considerável a uma massa de concreto fresco, o ensaio de abatimento do tronco de cone pode não ser um bom índice de trabalhabilidade. Por esse motivo, o ensaio VeBe é considerado mais apropriado para avaliar a trabalhabilidade de misturas de concreto reforçado com fibras (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Pesquisadores do *British Building Research Establishment* analisaram a influência do teor e fator de forma das fibras sobre a consistência do concreto. Os resultados da pesquisa mostraram que o aumento desses parâmetros pode gerar uma redução no índice de consistência do material, conforme ilustrado na Figura 26 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

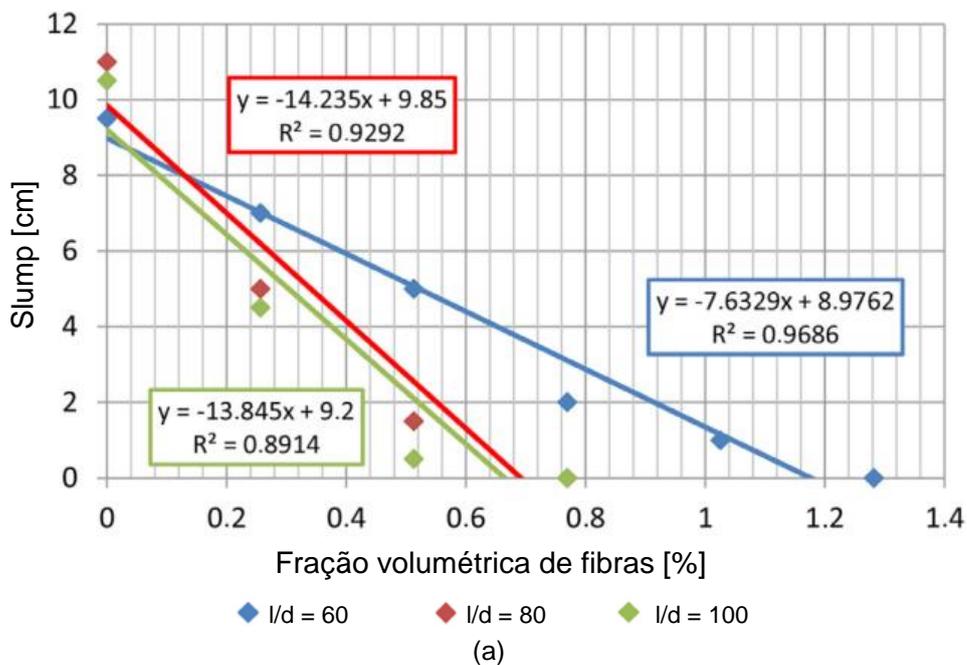
Figura 26. Influência do teor e do fator de forma das fibras sobre a consistência do concreto.

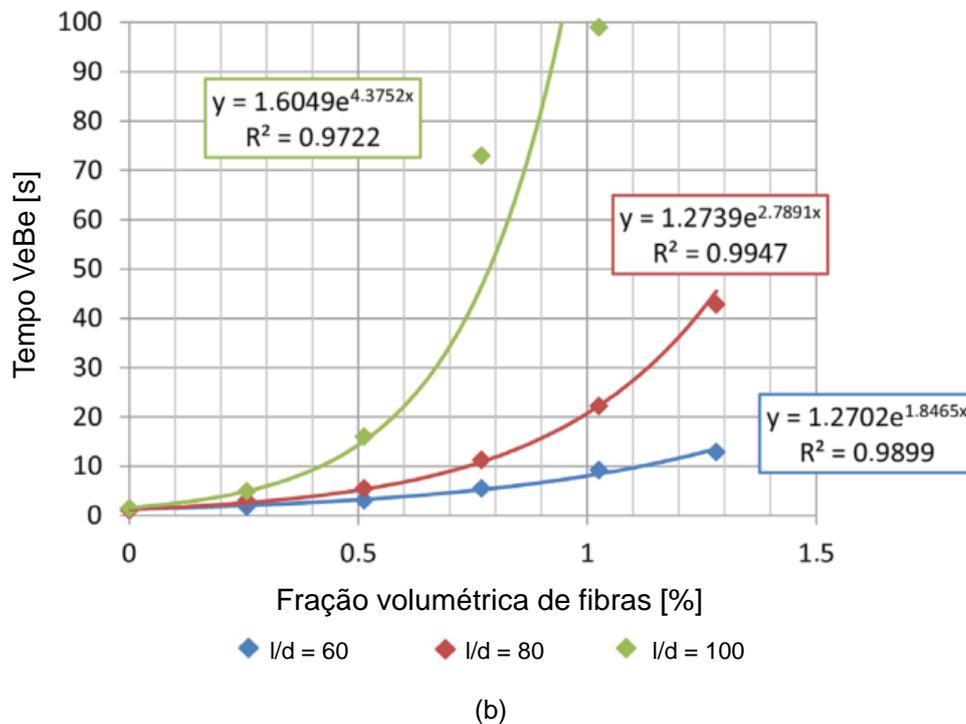


Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2014).

Figueiredo e Ceccato (2015) avaliaram a influência do teor e fator de forma de fibras de aço com gancho sobre a consistência do concreto utilizando as duas metodologias apresentadas: *slump test* e tempo Vebe. Os autores observaram que, na medida em que se aumenta o teor de fibras, tem-se uma queda linear no abatimento do tronco de cone do *slump test*, enquanto o tempo VeBe aumenta exponencialmente para atingir determinada consistência (Figura 27). Ainda segundo os autores, isso ocorre porque as fibras atuam como uma barreira na movimentação do agregado graúdo, fazendo com que a mobilidade dos materiais seja reduzida. Dessa forma, na medida em que se aumenta a quantidade ou o fator de forma das fibras tem-se uma redução de fluidez do material (FIGUEIREDO; CECCATO, 2015).

Figura 27. Influência do teor de fibras sobre a consistência do concreto obtido em duas metodologias: (a) *slump test* e (b) tempo VeBe.





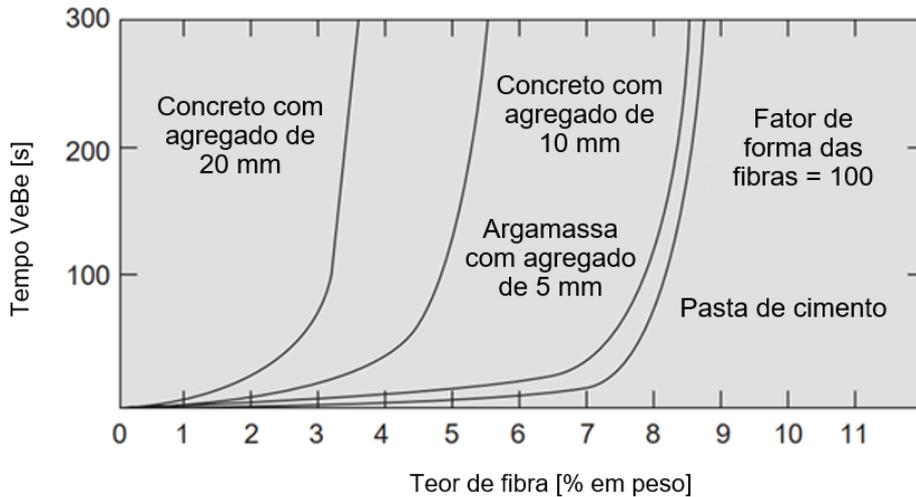
Fonte: FIGUEIREDO; CECCATO (2015).

As fibras de aço com fatores de forma maiores que 100 tendem a produzir o fenômeno de empelotamento ou aglomeração, mesmo em concentrações mais baixas, de até 1,13% em volume (SWAMY; MANGAT, 1974). Em geral, a quantidade de fibras de aço no concreto é limitada a cerca de 2% por volume, com um fator de forma máximo de 100 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Conforme explicado anteriormente, o tamanho do agregado reflete diretamente sobre a quantidade de fibras a ser adicionado na mistura que exige uma determinada consistência, conforme apresentado na Figura 28. Para produzir um concreto com um tempo VeBe de 100 segundos, por exemplo, o teor de fibras que deve ser utilizado é muito menor para concretos produzidos com agregados de 20 mm do que 10 mm (HANNANT, 1978¹ *apud* JOHNSTON, 2001). Isso acontece devido à redução do volume da fase fluida do compósito (no interior da qual as fibras são dispersas) decorrente do aumento do tamanho do agregado. Destaca-se que os gráficos apresentados na Figura 28 foram obtidos para fibras de aço com fator de forma igual a 100, e os limites apresentados podem variar conforme o tipo e o fator de forma da fibra (JOHNSTON, 2001).

¹HANNANT, D.J. **Fibre Cements and Fibre Concretes**, Wiley, 1978. 215p.

Figura 28. Influência do tamanho do agregado na consistência do concreto.

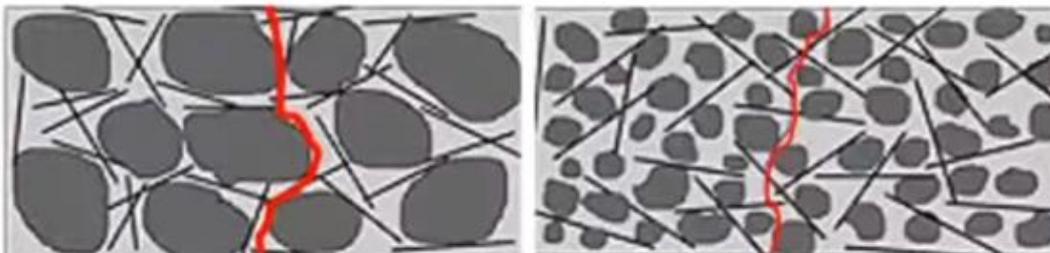


Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2014).

De acordo com o Instituto Americano do Concreto (ACI, 2009), agregados maiores que 19 mm não são recomendados para o uso em concretos reforçados com fibras de aço.

Segundo Figueiredo (2011), é recomendado a utilização de fibras cujo comprimento seja maior ou igual ao dobro da dimensão máxima característica do agregado graúdo. A compatibilidade dimensional entre agregados e fibras permite que estas interceptem as fissuras do concreto com maior frequência, impedindo a propagação da mesma (Figura 29b). Quando não há compatibilidade dimensional, poucas fibras atuam como ponte de transferência de tensões entre as faces da fissura (Figura 29a). Além disso, quanto maior o tamanho do agregado em relação ao comprimento da fibra, maior será a inclinação da fibra em relação à superfície de fratura, reduzindo a eficácia da fibra como ponte de transferência de tensões (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 29. Compatibilidade dimensional entre o agregado e a fibra.



Fonte: FIGUEIREDO (2000).

Para serem eficazes como reforço, as fibras não podem ser danificadas durante o processo de mistura do concreto. Dependendo do método de mistura adotado, as fibras podem ser danificadas e ter seu fator de forma alterado, reduzindo sua eficácia como material de reforço. Procedimentos de mistura inadequados podem ocasionar a separação dos pequenos filamentos que formam os feixes das fibras de vidro, reduzindo a trabalhabilidade da mistura. O desempenho das fibras poliméricas fibriladas, que passam por um processo de desfibrilação durante a mistura, também pode ser afetado por método de mistura inapropriado: enquanto uma mistura insuficiente pode não ser capaz de provocar a desfibrilação das fibras, uma mistura excessiva pode levar ao rompimento das mesmas (JOHNSTON, 2001). Dessa forma, o método e o tempo de mistura devem ser analisados e avaliados para obter uma trabalhabilidade satisfatória da mistura sem provocar danos nas fibras do concreto.

3

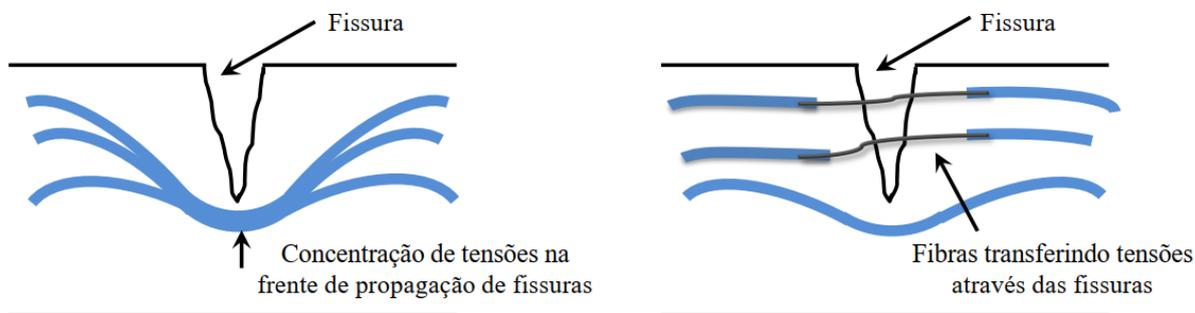
Mecânica básica do concreto reforçado com fibras

O concreto é um material que apresenta um comportamento frágil, com baixa capacidade resistente e baixas capacidade de deformação quando submetido a esforços de tração. Dessa forma, quando tensões de tração solicitam o concreto, surgem fissuras que se constituem como barreiras às linhas de tensão no material. Como as linhas de tensão não conseguem ultrapassar essa barreira, elas tendem a contornar a fissura, fazendo com que exista uma elevada concentração de tensões em sua extremidade. Na medida em que o carregamento aumenta, essa concentração de tensões se eleva e a fissura se propaga até a ruptura do material (FIGUEIREDO, 2011; SALVADOR, 2013).

Quando as fibras são adicionadas ao concreto, elas atuam como pontes de transferência de tensão entre as faces da fissura de modo que as tensões percorrem a fibra, “costurando” a fissura do concreto. Além de controlar a abertura da fissura, as

fibras reduzem a concentração de tensões em sua extremidade, prevenindo também a propagação da fissura (Figura 30).

Figura 30. Pontes de transferência de tensões criadas pelas fibras.



Fonte: SALVADOR (2013).

A principal função das fibras ocorre na fase pós-fissuração, em que inibem ou retardam a propagação das fissuras, proporcionando uma resistência residual pós-fissuração (BENTUR; MINDESS, 2007; SALVADOR, 2013; MONTE, 2015). Em outras palavras, as fibras conferem tenacidade ao compósito, melhorando sua capacidade de absorver energia e reduzindo a fragilidade do material.

Em estruturas usuais de concreto armado, os parâmetros de projeto e controle de qualidade são definidos em função da resistência à compressão do concreto. Segundo Löfgren (2005), a principal razão disso é a facilidade em se avaliar a resistência à compressão do concreto quando comparada com outras propriedades do material. Além disso, algumas propriedades do concreto, como o módulo de elasticidade e a resistência à tração, dependem da resistência à compressão e, dessa forma, podem ser inferidas a partir dos resultados de ensaios de resistência. Entretanto, no caso do concreto reforçado com fibras, apenas a resistência à compressão do concreto não é suficiente para definir as propriedades mecânicas necessárias em projetos, sobretudo a resistência residual pós-fissuração proporcionada pela adição de fibras na matriz. Nesse sentido, a caracterização do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para fins de projeto consiste na determinação de dois parâmetros principais: (i) resistência à compressão; e (ii) resistência residual à tração, isto é, a resistência pós-fissuração proporcionada pela adição de fibras na matriz de concreto.

Enquanto a avaliação da resistência à compressão do concreto reforçado com fibras pode ser realizada seguindo os mesmos procedimentos recomendados para o

concreto convencional (BRANDT, 2009; FIB, 2011; ACI 544.9R-17, 2017; SINGH, 2017), normas técnicas de vários países prescrevem diferentes metodologias para a determinação da resistência residual à tração pós-fissuração do CRF, sendo que a maioria dos métodos de ensaio é baseado na flexão de vigas (EN 14651, 2007; ASTM C1609, 2019; ASTM C1399, 2015; JSCE-SF4, 1984; ABNT NBR 16940, 2021). De acordo com Bernard (2009), como os elementos de CRF são solicitados majoritariamente por flexão em situação de serviço (que é o caso de pisos e revestimentos de túneis, por exemplo), os ensaios de flexão são os mais utilizados para realizar a caracterização mecânica do material. Contudo, outras configurações de ensaios também são utilizadas para avaliar a resposta pós-fissuração do CRF (VANDEWALLE, 2003; AENOR UNE 83515, 2010; BLANCO *et al.*, 2013; SALVADOR, 2013; MONTE, 2015; ASTM C1550, 2020).

Na sequência, o estado da arte acerca do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras frente a solicitações de tração, flexão e compressão é apresentado, bem como os principais parâmetros que influenciam o comportamento do compósito.

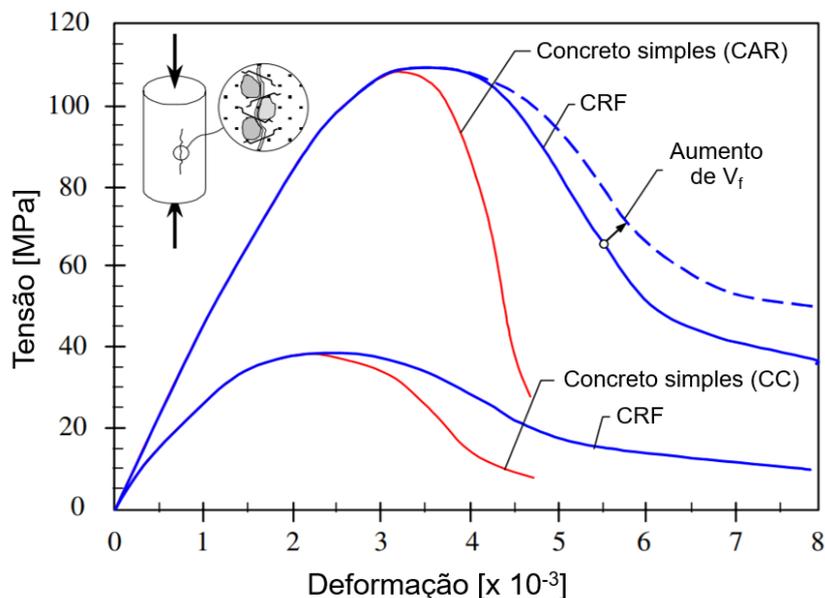
3.1 COMPORTAMENTO NA COMPRESSÃO

A incapacidade do concreto em resistir às solicitações de tração deve-se principalmente à existência da zona de transição em torno dos agregados graúdos, definida como o elo mais fraco do material (TUTIKIAN *et al.*, 2011). A zona de transição no concreto atua como uma ponte entre os agregados graúdos e a pasta de cimento hidratado e é o único meio para transferir as tensões entre as diferentes fases do concreto. A presença de vazios e microfissuras na zona de transição não permite a transferência efetiva de tensões, reduzindo a capacidade resistente do concreto. No entanto, uma melhora significativa no comportamento à compressão do concreto, sobretudo na região pós-pico da curva tensão-deformação, é presenciada quando fibras são adicionadas aleatoriamente na massa de concreto, embora a resistência máxima à compressão seja pouco influenciada pela inclusão de fibras na mistura (LÖFGREN, 2005; BRANDT, 2009; SINGH, 2017; KOENIG *et al.*, 2019; NANA *et al.*, 2021).

Singh (2017) descreve o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) submetido à compressão. De forma similar ao concreto convencional, o CRFA apresenta um comportamento elástico-linear até uma tensão próxima de 30% de sua resistência à compressão. Na medida em que o carregamento aumenta e a tensão se aproxima do nível correspondente à 50% da resistência à compressão, tem-se uma redução de rigidez do material, que é refletida por uma perda de linearidade na curva tensão-deformação. Segundo Singh (2017), o início da não linearidade ocorre principalmente devido à extensão das microfissuras presentes na zona de transição do concreto para as regiões adjacentes, que são atenuadas pelas fibras de aço. Nesse trecho, apesar da contribuição das fibras, a curva tensão-deformação praticamente não se difere da curva do concreto simples (SINGH, 2017). Após atingir a tensão máxima, o trecho descendente da curva na região do pós-pico pode ser monitorado por meio de ensaio por controle de deslocamento. Nessa região, a tensão é rapidamente reduzida até um valor próximo de 50% da tensão máxima do concreto, até atingir um ponto de inflexão. Nesse trecho da curva, fissuras se formam continuamente com a aplicação de carga até que, interligadas umas com as outras, tem-se o surgimento de uma fissura predominante em toda a seção do corpo de prova. Após atingir o ponto de inflexão, a taxa de decréscimo da tensão se reduz na medida em que a deformação aumenta, até que o corpo de prova sofre um colapso (OUYANG *et al.*, 2022).

Brandt (2009) classifica o aumento da resistência à compressão do concreto proporcionado pela adição de fibras como pequeno e incerto pelo seguinte motivo: enquanto as fibras constituem um material de reforço para o concreto, sua inclusão modifica consideravelmente a trabalhabilidade da mistura e, usualmente, aumenta a porosidade do concreto. Como resultado, pode-se observar, em alguns casos, uma redução na resistência à compressão do compósito. Segundo o autor, o principal objetivo da adição de fibras em elementos comprimidos é modificar o trecho descendente da curva tensão-deformação para obter um material pseudo-dúctil, visto que a inclusão de fibras na mistura proporciona um aumento significativo na tenacidade do material, controlando a abertura e propagação das fissuras (Figura 31).

Figura 31. Influência da adição de fibras sobre o comportamento à compressão do concreto.



Fonte: Adaptado de LÖFGREN (2005).

A adição de fibras em elementos estruturais submetidos à compressão não é usual, uma vez que os benefícios proporcionados por sua utilização não são compensados pelo elevado custo das fibras. No entanto, o aumento da capacidade de absorção de energia que se obtém com a adição de fibras pode ser interessante para colunas de concreto armado em regiões sujeitas a sismos (BENCARDINO *et al.*, 2008; BRANDT, 2009; OTTER; NAAMAN, 1988).

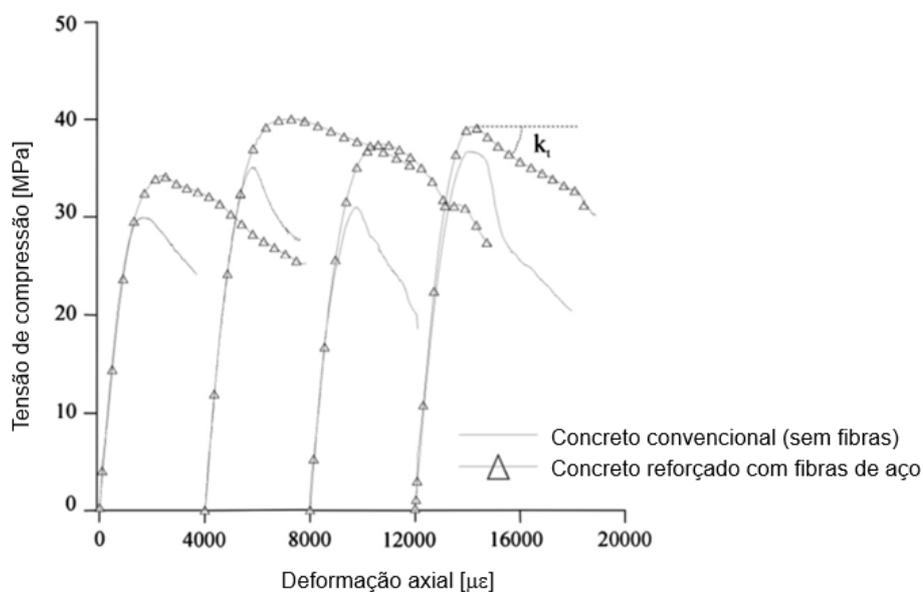
A tenacidade de um material corresponde à sua capacidade de absorção de energia até a ruptura, e é definida como a área sob a curva tensão-deformação. Nesse sentido, a tenacidade é uma forma para avaliar a ductilidade do concreto reforçado com fibras na compressão (BHARGAVA; SHARMA; KAUSHIK, 2006).

De acordo com Wang *et al.* (2020), ainda não há um procedimento normatizado comumente aceito para determinar a tenacidade de compósitos cimentícios submetidos à compressão. Dessa forma, tem-se, na literatura, metodologias propostas por diferentes autores para avaliar essa propriedade em elementos de concreto reforçado com fibras. O índice de tenacidade (*toughness index*), proposto por Fanella e Naaman (1985), é definido como a razão entre a tenacidade do concreto reforçado com fibras e do concreto simples (sem fibras – para controle) até uma determinada deformação, que foi definida pelos autores em sua pesquisa como 1,50%. Segundo Fanella e Naaman (1985), esse valor de deformação é suficiente

para representar a tendência do comportamento pós-pico de elementos comprimidos de CRF, sendo também adotado por outros autores em suas pesquisas (BHARGAVA; SHARMA; KAUSHIK, 2006; EZELDIN; BALAGURU, 1992; NATARAJA; DHANG; GUPTA, 1999; OU *et al.*, 2012). Contudo, a definição da deformação máxima considerada no cálculo da tenacidade do material varia conforme a pesquisa e a aquisição de dados durante o ensaio, sendo encontrados diferentes valores na literatura (HSU; HSU, 1994; MANSUR; CHIN; WEE, 1999; MARAR; EREN; YITMENA, 2011; OTTER; NAAMAN, 1988; SUN *et al.*, 2018; TAERWE, 1993; WANG *et al.*, 2020; ZHOU *et al.*, 2015).

Outra forma de avaliar a contribuição das fibras sobre o comportamento do CRF na compressão é por meio da declividade do trecho pós-pico da curva tensão-deformação, sugerido por Carneiro *et al.* (2014). Em seu estudo sobre concretos com agregados reciclados reforçados com fibras de aço, os autores verificaram que a adição de fibras no concreto reduz a declividade (k_t) desse trecho na curva quando comparado ao concreto convencional (Figura 32), indicando um aumento da tenacidade do concreto.

Figura 32. Influência das fibras no comportamento a compressão do CRF: declividade do ramo pós-pico.

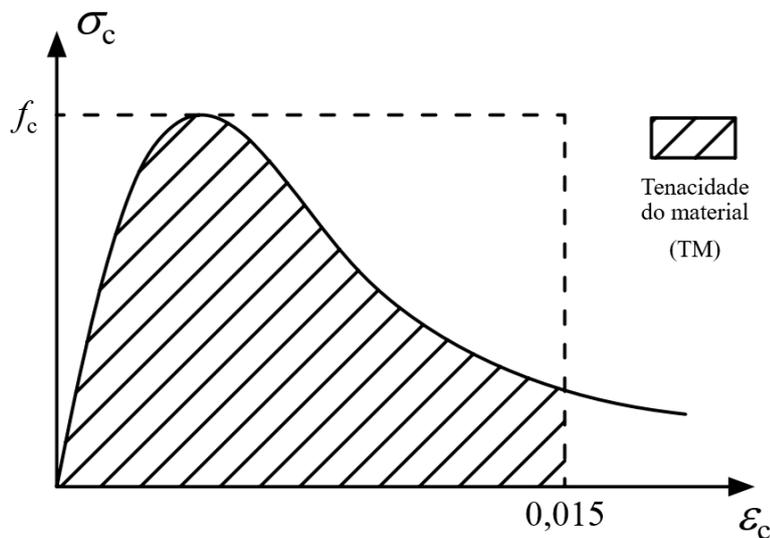


Fonte: Adaptado de Carneiro *et al.* (2014).

Ezeldin e Balaguru (1992) propuseram avaliar a tenacidade à compressão do concreto reforçado com fibras por meio do que os autores chamaram de tenacidade relativa (TR), que consiste na relação entre a tenacidade do compósito obtida a partir do

ensaio de compressão e de um material perfeitamente plástico até a deformação de 1,50% (Figura 33). Segundo Oliveira Júnior (2012), a tenacidade relativa representa a relação entre a energia dissipada pelo material durante sua deformação e a energia que o material dissiparia se esse material fosse plástico perfeito, e é determinada de acordo com a Equação (3.1). Uma metodologia similar foi adotada por Lima; Toledo Filho; Melo Filho (2014), na qual os autores determinam a tenacidade até a deformação de 0,60% em argamassas reforçadas com fibras de sisal.

Figura 33. Representação da tenacidade relativa proposta por Ezeldin e Balaguru (1992).



Fonte: Adaptado de OU *et al.* (2011).

$$TR = \frac{TM}{0,015f_c} \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1), TM é a tenacidade do material e f_c é a resistência à compressão do concreto, em MPa.

A adição de fibras no concreto apresenta sua maior contribuição na região pós-pico da curva tensão-deformação, em que as fibras impedem a propagação das fissuras e proporcionam uma resistência residual ao concreto, permitindo que o concreto atinja deformações da ordem de cinco a seis vezes a deformação última do concreto sem fibras dependendo da fração volumétrica adotada (BENCARDINO *et al.*, 2008). Neste trecho, o fator de forma da fibra e sua geometria tem menor efeito que sua fração volumétrica (OLIVEIRA JUNIOR, 2012). Além disso, Mansur *et al.* (1999) verificaram que o efeito das fibras sobre a tenacidade do concreto é mais pronunciado em

concretos mais resistentes, visto sua maior fragilidade quando comparado com concreto menos resistentes.

De modo geral, os estudos que investigam o comportamento à compressão do concreto reforçado com fibras avaliam a influência do teor e do fator de forma (relação comprimento/diâmetro) das fibras sobre as propriedades mecânicas do material, como resistência à compressão, módulo de elasticidade, deformação de pico (deformação correspondente à tensão máxima) e tenacidade.

Um dos primeiros estudos reportados na literatura acerca do assunto, Fanella e Naaman (1985) investigaram o comportamento na compressão de argamassas reforçadas com fibras de aço, de vidro e poliméricas em monofilamento e torcidas, das quais a resistência à compressão variava entre 50 e 70 MPa. Os autores observaram um aumento de até 15% na resistência à compressão dos protótipos reforçados com fibras de aço ($V_f = 1\%$ a 3%), enquanto a adição de fibras poliméricas e de vidro não influenciaram essa propriedade. Ainda segundo os autores, as fibras, independentemente do material, confinam a argamassa e retardam a propagação de fissuras, proporcionando um aumento na deformação de pico e na ductilidade pós-pico.

Ezeldin e Balaguru (1992) estudaram o efeito da adição de fibras de aço com gancho e de sílica ativa nas propriedades mecânicas de concretos cuja resistência à compressão varia entre 35 MPa (sem sílica ativa) a 85 MPa (com sílica ativa). Os autores observaram um ligeiro aumento na resistência à compressão, deformação de pico e módulo de elasticidade devido à adição de fibras (com ou sem sílica ativa). No entanto, as fibras foram efetivas em proporcionar tenacidade ao material. Por outro lado, a adição de sílica ativa aumentou a fragilidade do concreto, notada maior declividade do trecho pós-pico da curva tensão-deformação na compressão, fato que pode ser contornado pela adição de fibras.

Após a realização de um extenso programa experimental em concretos de alta resistência ($f_{cm} = 94$ MPa) reforçado com fibras de aço com gancho ($\lambda = 75$), Wafa e Ashour (1992) observaram que a adição de fibras de aço em uma fração volumétrica de 1,50% proporcionou um pequeno aumento de 4,60% na resistência à compressão.

Outra observação importante feita pelos autores é que a adição de fibras reduziu o espaçamento e abertura de fissuras dos prismas ensaiados a flexão.

Hsu e Hsu (1994) observaram que a adição de fibras de aço com gancho à matriz do concreto de alta resistência ($f_c = 66$ a 87 MPa) praticamente não afeta o trecho ascendente da curva tensão-deformação na compressão. Apesar disso, foi observado em alguns casos um aumento na deformação de pico conforme se aumenta a fração volumétrica de fibras ($V_f = 0,50\%$ a $1,00\%$) no concreto.

Campione, Mindess e Zingone (1999) observaram uma redução de 23% e 38% na resistência à compressão de concretos reforçados com fibras de carbono (comparado ao concreto sem fibras) em frações volumétricas de 1,50% e 3,00%, respectivamente. Essa redução foi atribuída pelos autores ao elevado teor de ar incorporado no concreto devido à adição de fibras. Os corpos de prova possuíam resistências à compressão de 48,88 MPa (sem fibra), 37,15 MPa ($V_f = 1,50\%$) e 30,01 MPa ($V_f = 3,00\%$). Além disso, os autores também observaram um comportamento dúctil do protótipo reforçado com fibras de carbono ($V_f = 3,00\%$) até uma deformação de 3,5%.

Bhargava *et al.* (2006) estudaram o comportamento na compressão de concretos de alta resistência reforçado com fibras de aço corrugadas. Os autores observaram que, para uma fração volumétrica constante, fibras de maior fator de forma proporcionaram maior ductilidade e deformação de pico e menor resistência à compressão ao concreto quando comparadas com fibras de mesmo material e menor fator de forma.

Bencardino *et al.* (2008) verificaram que fibras de aço com gancho em frações volumétricas de 1,60% e 3,00% proporcionaram uma resistência residual cerca de 74% e 78% da resistência máxima na compressão em uma deformação de 0,01, respectivamente. Além disso, a deformação última na compressão do concreto com essas frações volumétricas atingiu valores de três a cinco vezes o valor de deformação usualmente considerado em normas técnicas, de 0,0035.

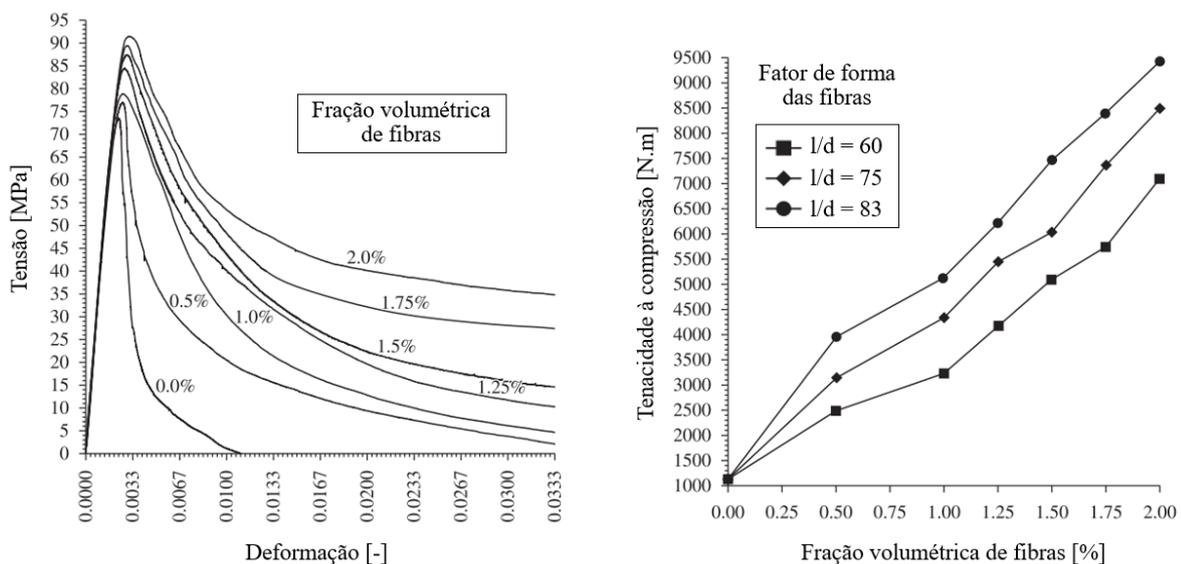
Ou *et al.* (2012) observaram que a adição de fibras de aço com gancho ao concreto não afetou o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do material. Além disso, seus resultados experimentais indicaram que as fibras longas de menor fator de forma foram as que proporcionaram mais tenacidade ao compósito.

Lima; Toledo Filho; Melo Filho (2014) verificaram que a adição de fibras de sisal em argamassas reduziu a tensão máxima de compressão, o módulo de elasticidade e a deformação de pico do material. Por outro lado, os autores observaram um aumento de tenacidade da matriz.

Em concretos reforçados com fibras de basalto, Ayub; Shafiq; Khan (2016) verificaram a adição de fibras não afetou a resistência à compressão significativamente, mas proporcionou tenacidade e aumento da deformação de pico nas matrizes de concreto alta resistência.

Em seus estudos com fibra de aço com gancho, Lee; Oh; Cho (2015) observaram um comportamento mais dúctil na compressão para fibras com maior fator de forma. Segundo os autores, isso ocorre pelo maior efeito de confinamento transversal proporcionado pelas fibras. Esse comportamento pode ser notado também na Figura 34, em que são apresentados a influência do teor e do fator de forma das fibras sobre a curva tensão-deformação e sobre a tenacidade à compressão do concreto, proveniente dos resultados experimentais de Marar; Eren; Yitmen (2011).

Figura 34. Resultados de ensaios de compressão de concreto reforçado com fibras de aço: (a) influência do teor de fibras e (b) influência do fator de forma das fibras sobre a tenacidade à compressão.



Fonte: Adaptado de MARAR *et al.* (2011).

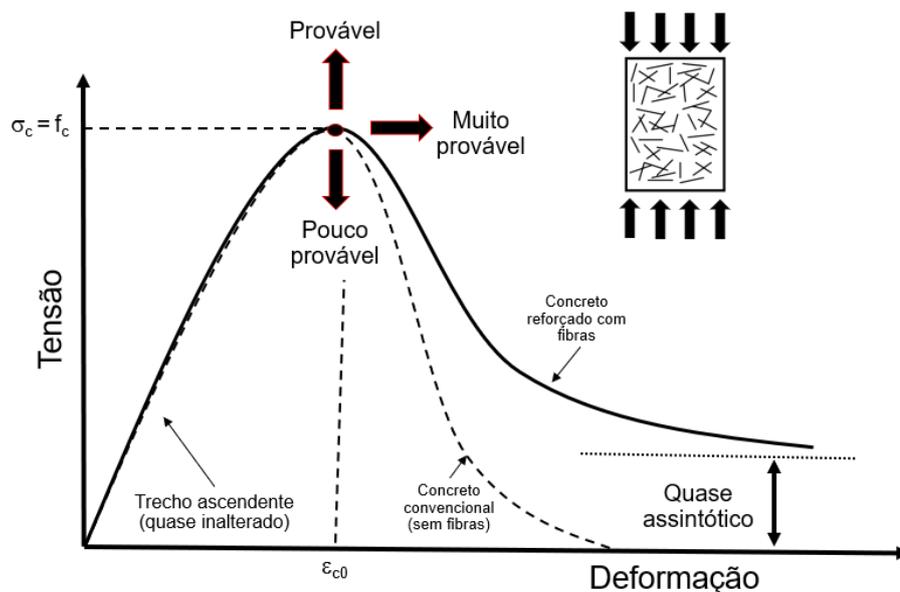
Sun *et al.* (2018) estudaram o comportamento mecânico na compressão do compósito cimentício reforçado com fibras de aço e de PVA. De forma análoga a outros autores

com fibras de aço, Sun *et al.* (2018) verificaram que o aumento na quantidade de fibras provoca um aumento na tenacidade e na deformação de pico do compósito.

Pesquisas mais recentes com conclusões similares acerca dos efeitos das fibras (majoritariamente de aço) sobre as propriedades mecânicas na compressão, como resistência, ductilidade, tenacidade, deformação e módulo de elasticidade, podem ser encontradas na literatura (ABBAS; HUSSAIN; KHAN, 2022; FENG *et al.*, 2021; SHI *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020). Como dito anteriormente, os parâmetros usualmente analisados nas pesquisas são o tipo (material), o fator de forma e a quantidade de fibra. Outros parâmetros menos frequentes envolvem a utilização de agregados reciclados na constituição do concreto e a combinação de diferentes tipos de fibra.

De modo geral, acerca do comportamento mecânico da compressão, diz-se que: resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico são pouco afetados pela adição de fibras no concreto. Dentre esses parâmetros, a deformação de pico é o parâmetro mais susceptível a variações, sendo maior quanto maior for a quantidade de fibra adicionada ao concreto. Por outro lado, a propriedade mais afetada é a tenacidade, sendo maior quanto mais elevado for o teor e o fator de forma da fibra. Um resumo do efeito das fibras sobre o comportamento mecânico na compressão do concreto convencional é apresentado na Figura 35.

Figura 35. Efeito da adição de fibras sobre o comportamento a compressão do concreto convencional.



Fonte: Adaptado de Naaman (2018).

A avaliação da resistência à compressão do concreto reforçado com fibras é realizada de acordo com os mesmos procedimentos e normas técnicas válidas para o concreto convencional (LÖFGREN, 2005; BENTUR; MINDESS, 2007; FIB, 2011; ACI 544.9R-17, 2017). Contudo, o Instituto Americano do Concreto não recomenda a utilização de corpos de prova cilíndricos com dimensões inferiores a 10 x 20 cm (diâmetro x altura), principalmente quando são utilizadas macrofibras longas, pois as fibras podem não ser distribuídas uniformemente e podem apresentar um alinhamento preferencial, resultando em uma resistência à compressão irreal. Além disso, segundo o ACI, corpos de prova cúbicos também não são recomendados para avaliar a resistência à compressão do concreto reforçado com fibras, uma vez que o atrito desenvolvido na interface entre a superfície do corpo de prova e a prensa da máquina de ensaio pode ocasionar uma resistência à compressão superestimada (ACI 544.9R-17, 2017).

Na literatura técnica, há ainda vários trabalhos que propõem modelos constitutivos (curva tensão-deformação) para o concreto reforçado com fibras, sobretudo com fibras de aço. Esse fato pode ser notado na Tabela 7, na qual é apresentado um resumo de modelos constitutivos existentes na literatura levantados pelo autor, destacando a resistência à compressão do concreto, o tipo, a fração volumétrica e o fator de forma das fibras utilizadas no programa experimental, o formato do modelo constitutivo proposto e a taxa de deslocamento adotada para a obtenção da curva tensão-deformação completa. Essas curvas são importantes para a elaboração de normas de projeto de estruturas, e são obtidas a partir dos resultados de ensaios de compressão com deformação controlada, visto que esses ensaios permitem a medição de tensões e deformações após o pico de resistência ser atingido (OLIVEIRA JUNIOR, 2012). De acordo com o levantamento realizado pelo autor (Tabela 7), poucos são os trabalhos que propõem um modelo constitutivo para concretos reforçados com fibras de vidro ou poliméricas e que investigam a tenacidade na compressão proporcionada pela adição desses tipos de fibra. A falta de pesquisas sobre o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras poliméricas e de vidro na compressão também foi evidenciada nas pesquisas apresentadas anteriormente, as quais, em sua grande maioria, investigam fibras de aço.

Tabela 7. Modelos constitutivos na compressão de concreto reforçado com fibras retirados da literatura.

Referência	f_c [MPa]	Tipo de fibra	Fator de forma (l_f/ϕ)	V_f [%]	Taxa de deslocamento	Modelo constitutivo
Ezeldin e Balaguru (1992)	35 a 85	aço c/ gancho e retas	100; 75; 60	0,375; 0,5625; 0,75	controle de carga	Carreira e Chu (1985)
Mebarkia e Vipulanandan (1992)		vidro	1000	2, 4 e 6	-	Vipulanandan (1990)
Hsu e Hsu (1994)	66 a 87	aço c/ gancho, coladas	60	0,50; 0,75; 1,00	$1,67 \cdot e^{-5}$ strain/s	Carreira e Chu (1985)
Someh e Saeki (1994)	28	aço c/ superfícies lisas e rugosas	50	0,625; 1,25; 1,875	-	Carreira e Chu (1985) e Popovics
Barros e Figueiras (1999)	30 a 55	aço c/ gancho	60; 75	0; 0,38; 0,57; 0,76	0,01 a 0,03 mm/s	Mebarkia e Vipulanandan (1992)
Mansur <i>et al.</i> (1999)	70 a 120	aço c/ gancho	60	0; 0,5; 1,0; 1,5	$\approx 0,001$ mm/s	Carreira e Chu (1985)
Nataraja <i>et al.</i> (1999)	30 a 50	aço corrugada de seção circular	55; 82	0,5; 0,75; 1,0	controle de carga	Carreira e Chu (1985)
Bhargava <i>et al.</i> (2006)	58 a 77	aço corrugada de seção reta	20; 40	0,5; 1,0; 1,5; 2,0	0,83 mm/s	Carreira e Chu (1985)
Oliveira Júnior <i>et al.</i> , 2010)	40 e 60	aço c/ gancho	65	1,0; 2,0	-	Carreira e Chu (1985)
Ou <i>et al.</i> (2011)	32 a 47	aço c/ gancho de diferentes comprimentos	50; 60	0; 0,80; 1,60; 2,0; 2,40; 2,60; 3,0; 3,40	0,01 mm/s	Carreira e Chu (1985)
Carneiro <i>et al.</i> (2014)	30 a 40	aço c/ gancho	63	0,75	$\approx 0,001$ mm/s	Carreira e Chu (1985)
Ayub; Shafiq; Khan (2016)	70 a 85	basalto	-	1; 2; 3	$\approx 0,001$ mm/s	Carreira e Chu (1985)

Referência	f _c [MPa]	Tipo de fibra	Fator de forma (I _f /φ)	V _f [%]	Taxa de deslocamento	Modelo constitutivo
Lee; Oh; Cho (2015)	50 e 80	aço c/ gancho	47,6; 63,6; 78,9	0,5; 1,0; 1,5; 2,0	0,0067 mm/s	Carreira e Chu (1985)
Liao; Perceka; Liu, (2015)	30; 40; 50; 60	aço c/ gancho	80	0; 0,75; 1,0; 1,5	0,01 mm/s	Carreira e Chu (1985) + modelo próprio
Zhou <i>et al.</i> (2015)	40 a 70	PVA	-	2	0,001 mm/s	Graybeal (2007) e bilinear
Abadel <i>et al.</i> (2016)	65	aço c/ gancho, pp ¹ e kevlar		1,2 e 1,4	-	Carreira e Chu (1985)
Ruiz <i>et al.</i> (2018)	29,4 a 93,5	aço c/ gancho	20 a 107	0,24 a 3,0	-	Modelo próprio
Sun <i>et al.</i> (2018)	30 a 60	aço e PVA	65 (aço) e 300 (pva)	1,0; 1,5; 2,0	controle de carga e deslocamento ²	Guo (2004)
Shi <i>et al.</i> (2020)	40 a 50	aço c/ gancho e retas	60 (aço c/gancho) e 65 (reta)	0,5; 1,0; 1,5; 2,0	0,02 mm/s	Modelo trilinear
Wang <i>et al.</i> (2020)	15; 40 a 60	aço e PVA	65 (aço) e 307 (pva)	1,7 (PVA); 0; 0,6; 1,0; 1,5 (aço)	2·e ⁻⁴ strain/s	Fanella e Naaman (1985)
Feng <i>et al.</i> (2021)	25 a 35	aço c/gancho e pp	47 (aço c/ gancho) e 30 (pp)	0; 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,50	0,003 mm/s	China Code GB50010-2010

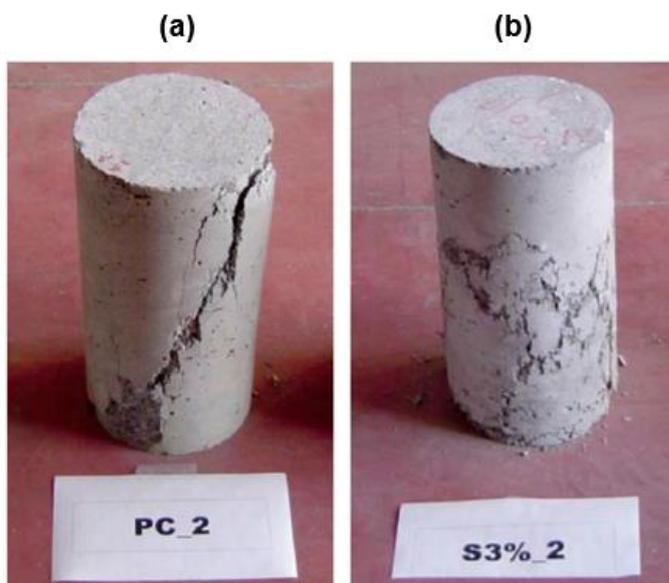
¹ Fibra de polipropileno

² Taxa de 4,5 kN/s até 80% da carga máxima e 0,18 mm/min até a carga ser reduzida (no pós-pico) pra cerca de 50% da carga máxima

Fonte: Autoria própria.

Um aspecto que deve ser destacado é o modo de falha observado em corpos de prova cilíndricos de CRF em ensaios de compressão. A ruptura é caracterizada por pequenas fissuras paralelas à aplicação da carga, diferente do que é observado usualmente nos protótipos de concreto simples, em que a ruptura é definida por uma falha espúria de cisalhamento (Figura 36). Essa alteração no modo de ruptura é mais pronunciada quanto mais elevado é o índice de reforço, definido por $V_f l_f / d_f$, que se reflete na redução da fragilidade do concreto (ACI 544.9R-17, 2017).

Figura 36. Modo de falha observado corpos de prova cilíndricos: (a) concreto simples e (b) concreto reforçado com fibras de aço ($V_f = 3,0\%$; $l_f = 22$ mm; fator de forma = 40)



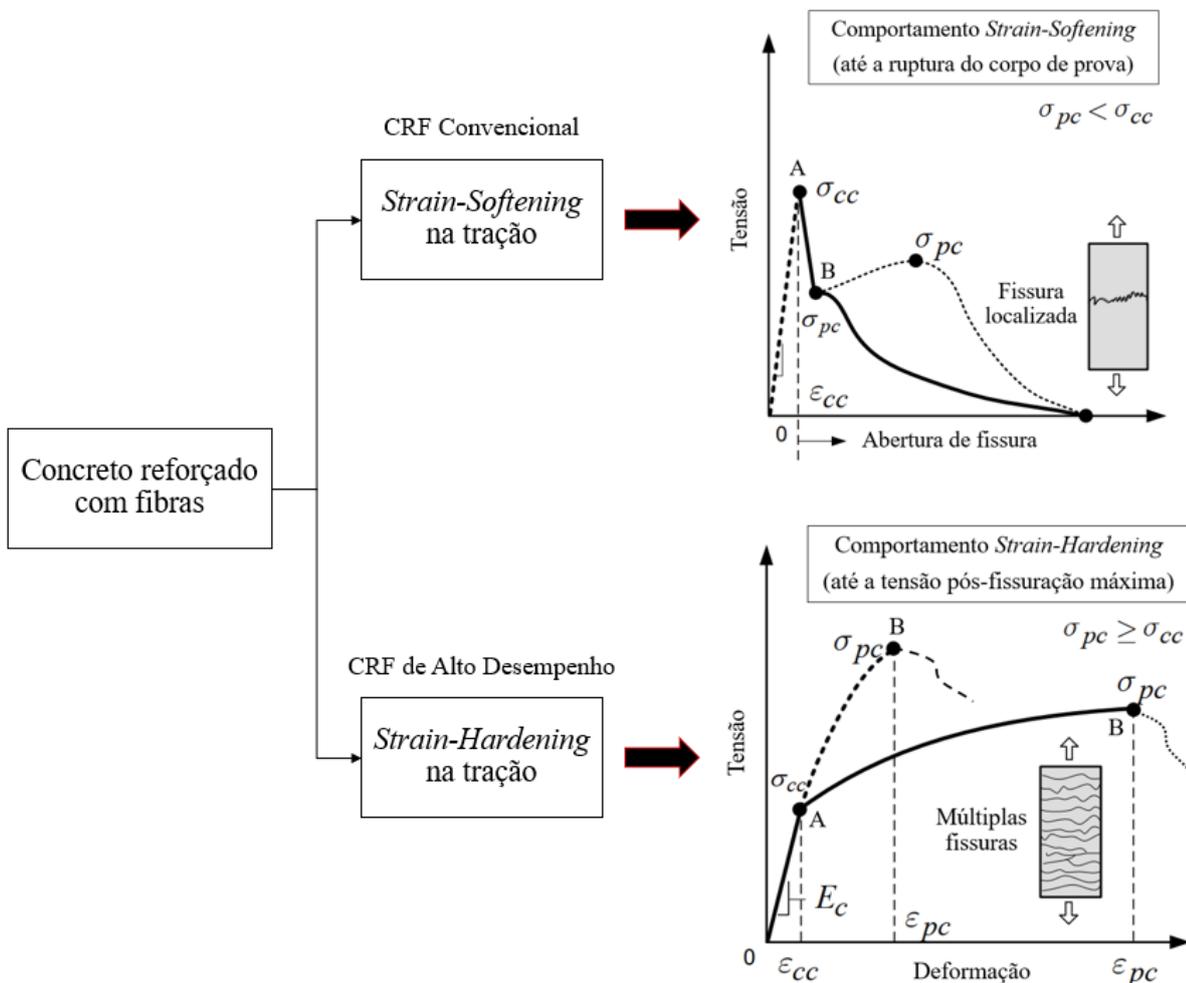
Fonte: BENCARDINO *et al.* (2008).

3.2 COMPORTAMENTO NA TRAÇÃO

O comportamento do concreto reforçado com fibras submetido à tração direta (uniaxial) pode ser classificado como *strain-hardening* ou *strain-softening* (NAAMAN, 2003; NAAMAN; REINHARDT, 2006; NAAMAN, 2018). Naaman (2008) define ainda o “concreto reforçado com fibras de alto desempenho (CRFAD)” (*high performance fiber reinforced concrete – HPFRC*) como o compósito que apresenta o comportamento *strain-hardening*. Em outras palavras, diz-se que o CRFAD é um material compósito cujo comportamento à tração é, no mínimo, elastoplástico perfeito (NAAMAN, 2008). Caso contrário, tem-se o chamado “concreto reforçado com fibras convencional”, caracterizado por um comportamento *strain-softening* na tração

(Figura 37). Os diferentes comportamentos (*strain-softening* e *strain-hardening*) são utilizados como principal via de classificação dos compósitos cimentícios reforçados com fibras (FIGUEIREDO, 2011; NAAMAN; REINHARDT, 2006).

Figura 37. Classificação do comportamento do CRF à tração direta.



Fonte: Adaptado de NAAMAN (2018).

O comportamento *strain-hardening* é associado à formação de múltiplas fissuras e uma grande capacidade de absorção de energia pelo compósito, motivos que tornam esse comportamento desejável nos materiais compósitos reforçados com fibras (NAAMAN, 2008). O comportamento *strain-hardening* é atingido quando a Equação (3.4) é satisfeita:

$$\sigma_{pc} \geq \sigma_{cc} \quad (3.4)$$

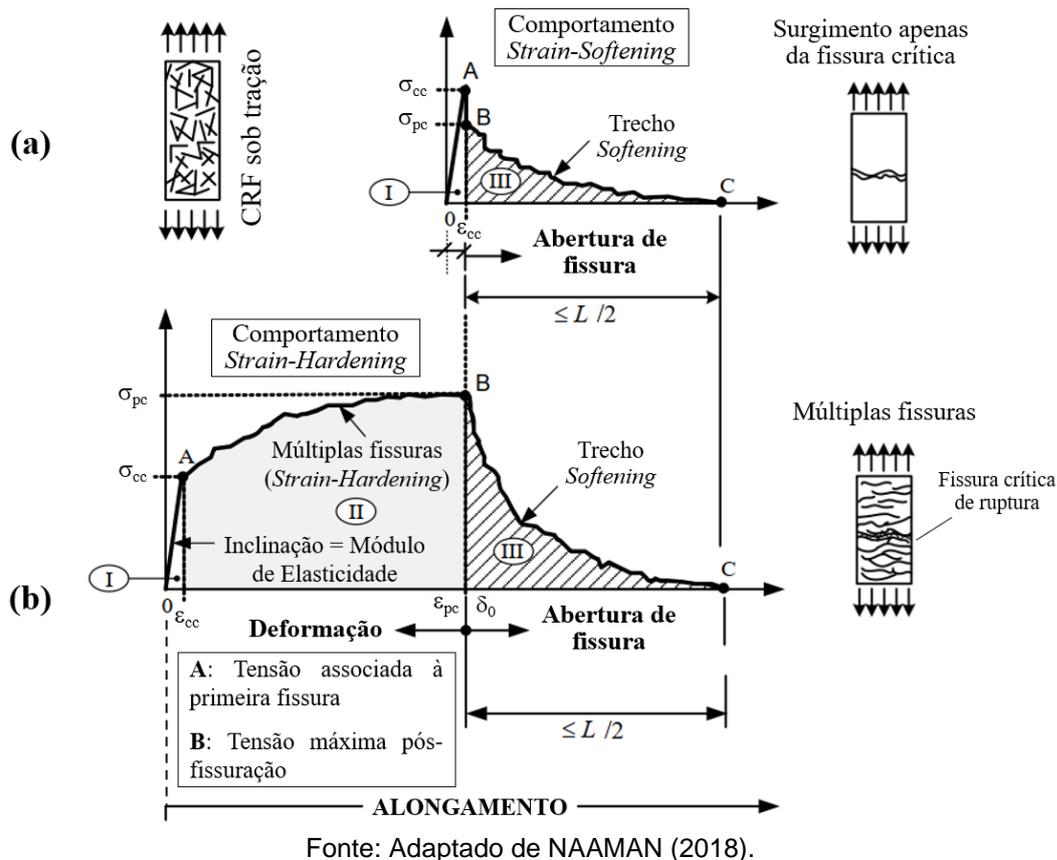
em que:

σ_{pc} é a tensão pós-fissuração do compósito;

σ_{cc} é a tensão de fissuração do compósito, isto é, a tensão correspondente ao surgimento da primeira fissura.

A curva tensão-deformação (ou tensão-abertura de fissura) típica de um comportamento *strain-softening* tem início com um trecho ascendente até atingir tensão correspondente à fissuração do compósito – ponto A, com coordenadas $(\epsilon_{cc}, \sigma_{cc})$ – que também corresponde à tensão máxima resistida pelo compósito nesse caso (parte I da Figura 38a). A partir desse momento, não há o surgimento de novas fissuras, e apenas a fissura crítica formada tende a se abrir com o aumento da aplicação de carga. Nessa etapa, a presença das fibras proporciona um ramo descendente (*softening*) no comportamento do material (parte III da Figura 38a), que corresponde, majoritariamente, a uma curva tensão-abertura da fissura crítica do compósito. Durante esse trecho de *softening*, tem-se o arrancamento (*pull-out*) e/ou a ruptura das fibras do compósito. Embora a matriz cimentícia possa contribuir com alguma resistência nessa etapa, ela é usualmente desprezada (NAAMAN, 2018). Destaca-se ainda que, no comportamento *strain-softening*, a tensão máxima pós-fissuração (σ_{pc}) atingida pelo compósito é menor que a tensão medida na primeira fissura (σ_{cc}). Além disso, o alongamento do corpo de prova correspondente a σ_{pc} pode ser igual ou superior ao de σ_{cc} dependendo da resistência de aderência, do módulo de elasticidade e da quantidade de fibra no compósito. Segundo Naaman (2018), após a formação da fissura crítica, o alongamento do corpo de prova é governado apenas pela abertura dessa fissura, motivo pelo qual a curva tensão-deformação deve ser substituída, nesse trecho, por uma curva tensão-abertura de fissura.

Figura 38. Curva tensão-deformação do concreto reforçado com fibras: (a) *strain-softening* e (b) *strain-hardening*.

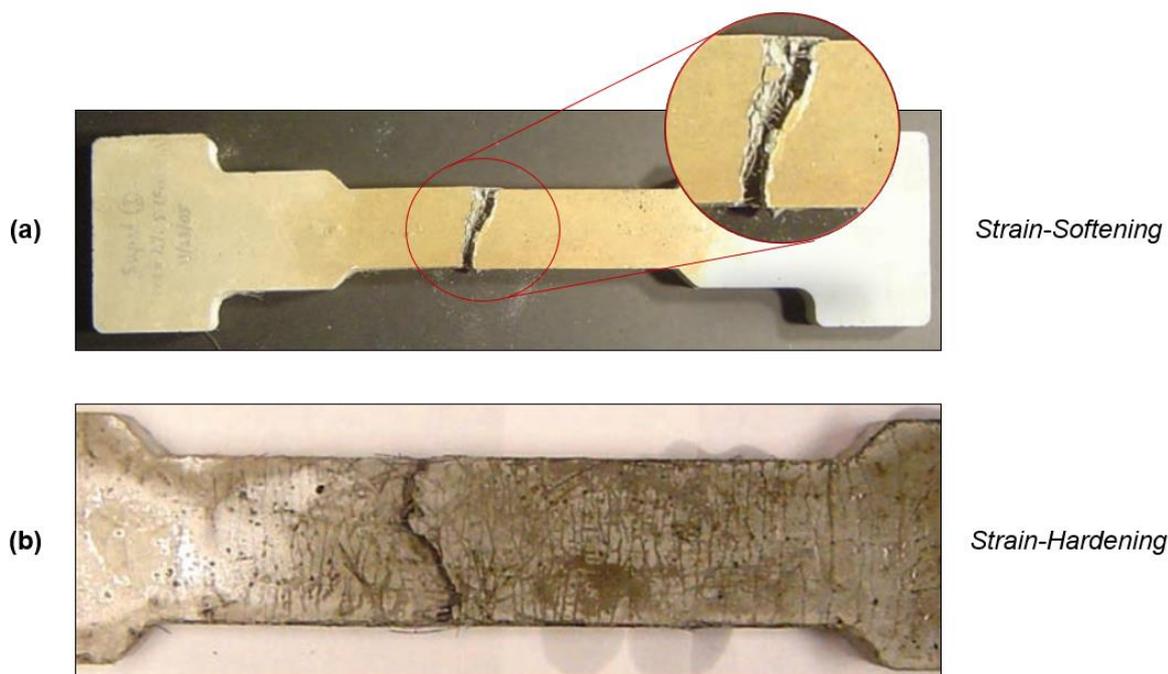


No caso de um compósito *strain-hardening* (Figura 38b), o trecho inicial da curva tensão-deformação do material (parte I) é análogo ao início da curva de um material *strain-softening*. Após atingir a fissuração da matriz, contudo, diferente do comportamento *strain-softening*, a curva é caracterizada por um trecho ascendente, definido como *strain-hardening*, no qual o material sofre múltiplas fissuras e absorve uma quantidade significativa de energia (parte II). Nessa etapa, as fibras que “costuram” as primeiras fissuras do compósito permitem o desenvolvimento de múltiplas fissuras na matriz sob tensões iguais ou maiores que aquela associada à primeira fissura (σ_{cc}). Esse processo continua até a formação de uma fissura crítica de ruptura no compósito, identificado pelo ponto B (ε_{pc} , σ_{pc}) na curva tensão-deformação (Figura 38b). A partir do momento em que o compósito atinge a resistência máxima pós-fissuração (ponto B), a resistência do compósito é reduzida continuamente devido ao arrancamento e ruptura das fibras, acompanhada do aumento de abertura da fissura crítica e da diminuição das outras fissuras (parte III da Figura 38b). Esse último trecho é similar ao comportamento *strain-softening*

observado na parte III da Figura 38a. A “fissura crítica de ruptura” não representa necessariamente uma única fissura, mas pode ser acompanhada de uma ramificação de microfissuras no seu entorno (NAAMAN; 2003; NAAMAN; REINHARDT, 2006; NAAMAN, 2008; NAAMAN, 2018).

Na Figura 39, são apresentados corpos de prova de concreto reforçado com fibras ensaiados à tração uniaxial por Naaman (2007) que ilustram os comportamentos definidos como *strain-softening* e *strain-hardening*.

Figura 39. Ruptura de protótipos de CRF ilustrando o comportamento (a) *strain-softening* e (b) *strain-hardening*.



Fonte: NAAMAN (2007).

O comportamento do concreto reforçado com fibras à tração está intimamente associado ao teor de fibras no compósito, sobretudo ao conceito do volume crítico de fibras ($V_{f,crit}$), que corresponde ao teor de fibras que mantém a capacidade resistente para o compósito a partir da ruptura da matriz (FIGUEIREDO, 2011). Segundo essa definição, o compósito com fração volumétrica de fibras (V_f) acima do volume crítico ($V_{f,crit}$) apresenta um comportamento *strain-hardening*, enquanto um comportamento *strain-softening* é obtido nos compósitos com teores de fibra inferiores ao volume crítico (Figura 40).

Considerando a condição básica para o compósito apresentar um comportamento *strain-hardening* representada pela Equação (3.4), o volume crítico de fibras é obtido substituindo os parâmetros dessa equação (σ_{cc} e σ_{pc}) por expressões que estimam a tensão pós-fissuração e a tensão corresponde ao início da fissuração, propostas por diferentes autores desde o início dos anos 1970 (NAAMAN, 2008). Essas expressões dependem de uma série de parâmetros, como a resistência à tração da matriz, comprimento e diâmetro (no caso de fibras circulares) das fibras, resistência de aderência na interface fibra-matriz, além de vários coeficientes que consideram a inclinação e orientação das fibras, e podem ser encontradas na literatura (BENTUR; MINDESS, 2007; NAAMAN, 2007; NAAMAN, 2008; NAAMAN, 2018).

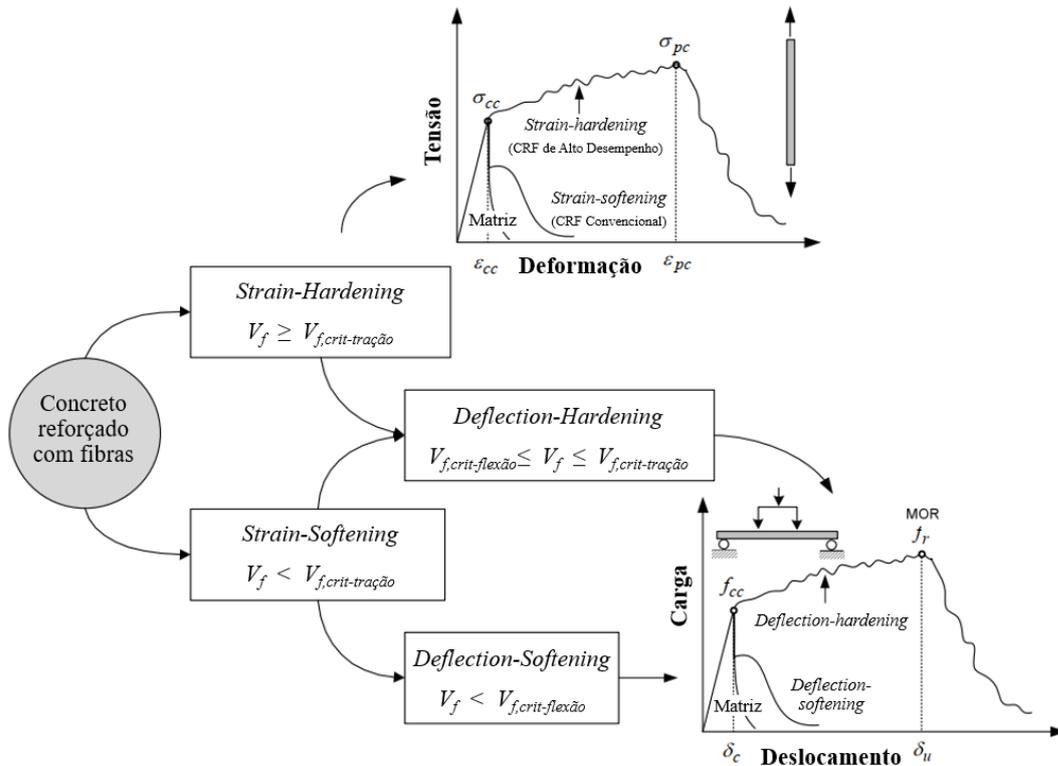
O volume crítico de fibras para concretos reforçados com fibras de aço, polipropileno e vidro é compreendido entre 0,3% e 0,8%, considerando fibras longas e alinhadas, isto é, na direção do carregamento. Caso a orientação e o comprimento da fibra sejam aleatórios, o volume crítico aumenta consideravelmente, sendo um valor compreendido entre 1,0% e 3,0% ou até mais. Segundo Bentur e Mindess (2007), essa faixa corresponde ao teor máximo de fibra que podem ser adicionadas ao concreto utilizando métodos de mistura convencionais.

Quando a resistência à tração do compósito é avaliada de forma indireta, como ocorre em ensaios de flexão de vigas, a classificação do comportamento é realizada de forma bastante similar. Nesse caso, as terminologias “*deflection-softening*” e “*deflection-hardening*” são utilizadas na flexão para descrever os comportamentos equivalentes a “*strain-softening*” e “*strain-hardening*” na tração direta, respectivamente. Naaman (2018) destaca que a classificação do compósito de acordo com seu comportamento na flexão é particularmente interessante, visto que na maioria das aplicações do concreto reforçado com fibras a solicitação predominante é a flexão.

Modelagens analíticas do comportamento do compósito realizadas por Naaman (2018) sugerem que os materiais de comportamento *strain-hardening* na tração direta possuem, necessariamente, comportamento *deflection-hardening* em ensaios de flexão. Por outro lado, materiais de comportamento *strain-softening* na tração, quando ensaiados a flexão, podem apresentar um comportamento *deflection-hardening* ou *deflection-softening*, dependendo dos parâmetros da fibra (Figura 40). Nesse caso, para que o comportamento *deflection-hardening* seja obtido na flexão, a

tensão máxima pós-fissuração (σ_{pc}) deve possuir um valor entre $0,33\sigma_{cc}$ e $0,40\sigma_{cc}$ (BENTUR; MINDESS, 2007; NAAMAN, 2008; NAAMAN, 2018).

Figura 40. Classificação do CRF para ensaios de tração e flexão.

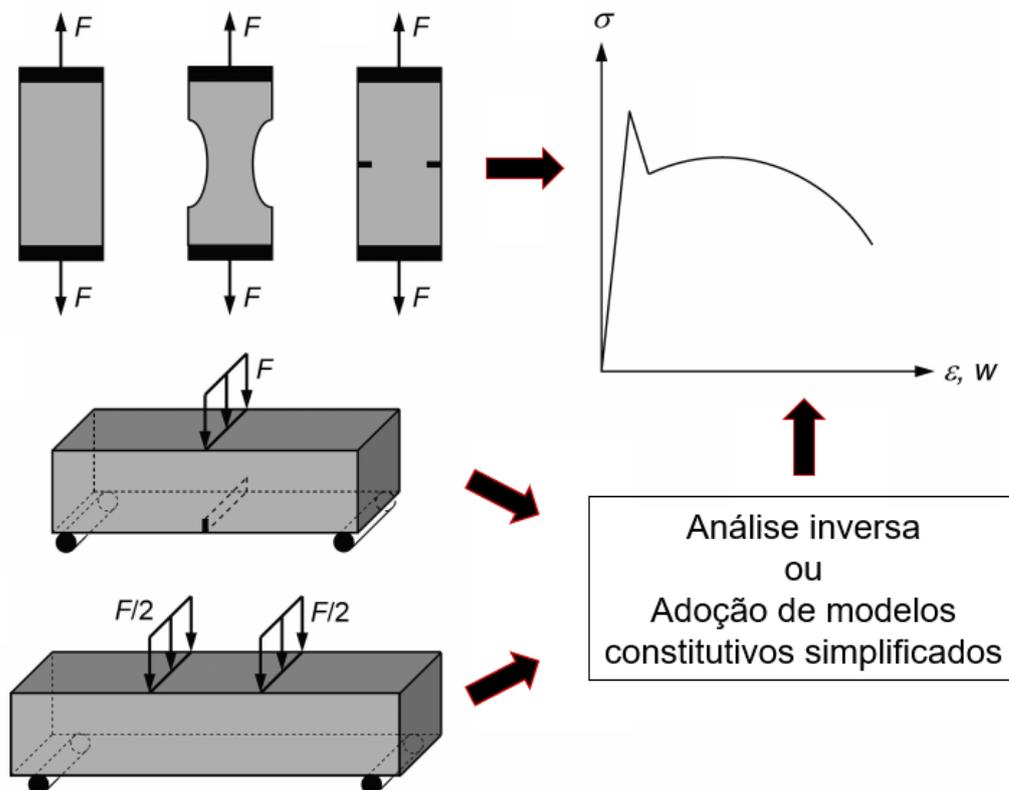


Fonte: Adaptado de NAAMAN (2007).

3.2.1 Método de caracterização

O ensaio por tração uniaxial é o método mais direto de caracterização do comportamento do material tracionado, enquanto os métodos indiretos, como os ensaios de flexão em vigas, exigem a realização da análise inversa para se obter a curva tensão-deformação ou tensão-abertura de fissura do material (Figura 41). Apesar disso, o ensaio de tração uniaxial é pouco utilizado em função da complexidade de execução, exigindo dispositivos especiais para a fixação do corpo de prova à prensa da máquina, e da confiabilidade nos resultados, visto a necessidade de um controle rigoroso na montagem do ensaio para que não ocorra esforços de flexão provenientes da falta de alinhamento do corpo de prova (BUTTIGNOL *et al.*, 2018). Dessa forma, os métodos indiretos são geralmente utilizados para a caracterização do CRF, sobretudo os ensaios de flexão em vigas.

Figura 41. Configurações de ensaios de tração para obtenção da curva tensão-deformação.



Fonte: Adaptado de Leutbecher e Rebling (2019).

A recém-publicada norma brasileira ABNT NBR 16940 (2021) estabelece o método de ensaio para avaliação do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras na flexão. A metodologia apresentada nessa norma segue os mesmos procedimentos da norma europeia EN 14651 (2007), considerada como método básico de caracterização pelo código modelo 2010 (FIB, 2011). O procedimento de ensaio é descrito no Capítulo 6.

3.2.2 Modelos constitutivos

O objetivo principal da caracterização do comportamento mecânico dos materiais é a obtenção de relações constitutivas – curva tensão-deformação – que estão diretamente relacionadas com a resposta estrutural do material (BUTTIGNOL *et al.*, 2018). Esses modelos constitutivos são essenciais para o dimensionamento de estruturas. No contexto do concreto reforçado com fibras, a resposta estrutural à tração é o principal ponto de interesse, visto que a principal contribuição das fibras ocorre sob essa solicitação.

A identificação do modelo constitutivo mais adequado para simular o comportamento pós-fissuração do concreto reforçado com fibras representa uma das etapas principais no projeto de estruturas de CRF (BLANCO *et al.*, 2013). Nos últimos 20 anos, uma série de normas e diretrizes técnicas foram publicadas para contribuir no dimensionamento de estruturas de CRF, apresentando diferentes modelos constitutivos que simulam o comportamento pós-fissuração do material (DBV, 2001; VANDEWALLE, 2003; CPH, 2008; FIB, 2011). Na Tabela 8, são apresentados alguns modelos constitutivos propostos por diferentes normas e recomendações.

Tabela 8. Modelos constitutivos apresentados por diferentes normas técnicas e recomendações.

Diagrama	Parâmetros	Caracterização	
	$\sigma_1 = f_{ctd} = \alpha_c^f \cdot f_{ctk,fl} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,fl} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_3 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,fl} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}; \epsilon_2 = \epsilon_1 + 0.1\%; \epsilon_3 = \epsilon_U = 10\%$	NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = 0.7 f_{ctm,fl} (1.6-d);$ $\sigma_2 = 0.45 \cdot K_h \cdot f_{R,1};$ $\sigma_3 = 0.37 \cdot K_h \cdot f_{R,4}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}; \epsilon_2 = \epsilon_1 + 0.1\%; \epsilon_3 = \epsilon_U = 25\%$	RILEM TEST 	RILEM
	$\sigma_1 = f_{ct,d} = 0.6 f_{ct,fl,d}$ $\sigma_2 = f_{ctR1,d} = 0.45 f_{R,1,d}$ $\sigma_3 = f_{ctR3,d} = k_1 (0.5 f_{R,3,d} - 0.2 f_{R,1,d})$ $\epsilon_2 = 0.1 + 1000 \cdot f_{ct,d} / E_{c,0}$ $\epsilon_3 = 2.5 / l_{cs} \quad (l_{cs}: \text{comprimento característico})$ $\epsilon_U = [20\% \text{ flexão}; 10\% \text{ tração pura}]$	EN 14651 	EHE
	$f_{ctm} = 0.30 (f_{ck})^{2/3}$ $f_{Fts} = 0.45 f_{R1}$ $f_{FTU} = k [f_{Fts} - (w_w / CMOD_3) (f_{Fts} - 0.5 f_{R3} + 0.2 f_{R1})]$ $\epsilon_{SLU} = CMOD_1 / l_{cs}$ $\epsilon_{SLU} = w_w / l_{cs} = \min(\epsilon_{FU}, 2.5 / l_{cs} = 2.5 / \gamma)$ $\epsilon_{FU} = [20\% \text{ softening}; 10\% \text{ hardening}]$	EN 14651 	Model Code

Fonte: BLANCO *et al.* (2013) – adaptado por MONTE (2015).

O formato dos modelos constitutivos pode variar desde modelos mais simples, constituído por diagramas multilíneares, até modelos mais complexos, envolvendo diagramas não-lineares, como funções parabólicas. No entanto, o comportamento pós-fissuração do concreto reforçado com fibras é usualmente representado por diagramas multilíneares devido à sua simplicidade, sendo facilmente incorporados na

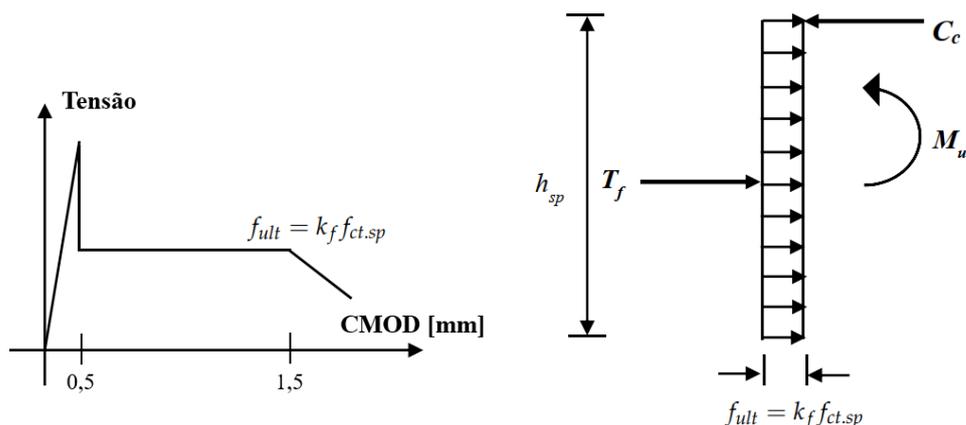
prática de projetos de estruturas de CRF. Os parâmetros dos modelos constitutivos são determinados através de ensaios de flexão em três ou quatro pontos, com ou sem a presença do entalhe.

Por ser uma propriedade essencial no projeto de estruturas de CRF, modelos constitutivos capazes de representar adequadamente o comportamento pós-fissuração do concreto reforçado com fibras são objeto de pesquisa constante na literatura técnica, sobretudo com fibras de aço (ALGUHI; ELSAIGH, 2016; BARROS *et al.*, 2005; LÖFGREN; STANG; OLESEN, 2005; QIAN; LI, 2007; SOUSA; GETTU, 2006). A maioria dos modelos constitutivos encontrados literatura compartilham das seguintes características: são diagramas simples, multilineares, e obtidos por meio de análise inversa. Um extenso levantamento sobre os modelos constitutivos na tração de concretos reforçados com fibras de aço propostos por diferentes autores pode ser encontrado em Oliveira (2010).

Recentemente, estudos envolvendo fibras poliméricas têm sido realizados para avaliar sua contribuição nas propriedades mecânicas do concreto (AMIN *et al.*, 2017; DENG *et al.*, 2016; DOPKO *et al.*, 2018; NOUSHINI *et al.*, 2018; VRIJDAGHS *et al.*, 2021; XU *et al.*, 2018), entre os quais se destacam (no contexto dos modelos constitutivos) os estudos de Garcez; Kabir; Macleod (2019) e Nana *et al.* (2021).

Garcez; Kabir; Macleod (2019) propuseram um modelo constitutivo na tração para o concreto autoadensável reforçado com macrofibras poliméricas, em que a resistência residual última (f_{ult}) é determinada em função da resistência indireta à tração obtida por compressão diametral ($f_{ct,sp}$). Dessa forma, uma vantagem desse modelo é a realização do ensaio por compressão diametral, de fácil execução quando comparado com o ensaio de flexão em vigas, para determinar as resistências residuais (Figura 42). O coeficiente k_f que acompanha a resistência à tração por compressão diametral é definido em função da fração volumétrica das fibras (0,44%; 0,66%; 0,88%).

Figura 42. Modelo constitutivo à tração proposto por Garcez; Kabir; Macleod (2019).



Fonte: Adaptado de Garcez; Kabir; Macleod (2019).

Nana *et al.* (2021) analisaram as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de polipropileno por meio de ensaios de flexão em vigas com entalhe. Com os resultados, os autores realizaram uma análise inversa através de modelagem computacional e propuseram um modelo constitutivo trilinear para simular o comportamento pós-fissuração na tração do material. Além disso, os autores ainda propuseram modificações nas condições exigidas pelo código modelo 2010 (FIB, 2011) para utilização das fibras de polipropileno em aplicações estruturais, discutido anteriormente. No Brasil, os modelos constitutivos propostos na norma técnica (ABNT NBR 16935, 2021) para simular o comportamento mecânico pós-fissuração na tração são os mesmos adotados no código modelo 2010 (FIB, 2011). Esses modelos são apresentados no Capítulo 6.

3.3 MECÂNICA BÁSICA DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

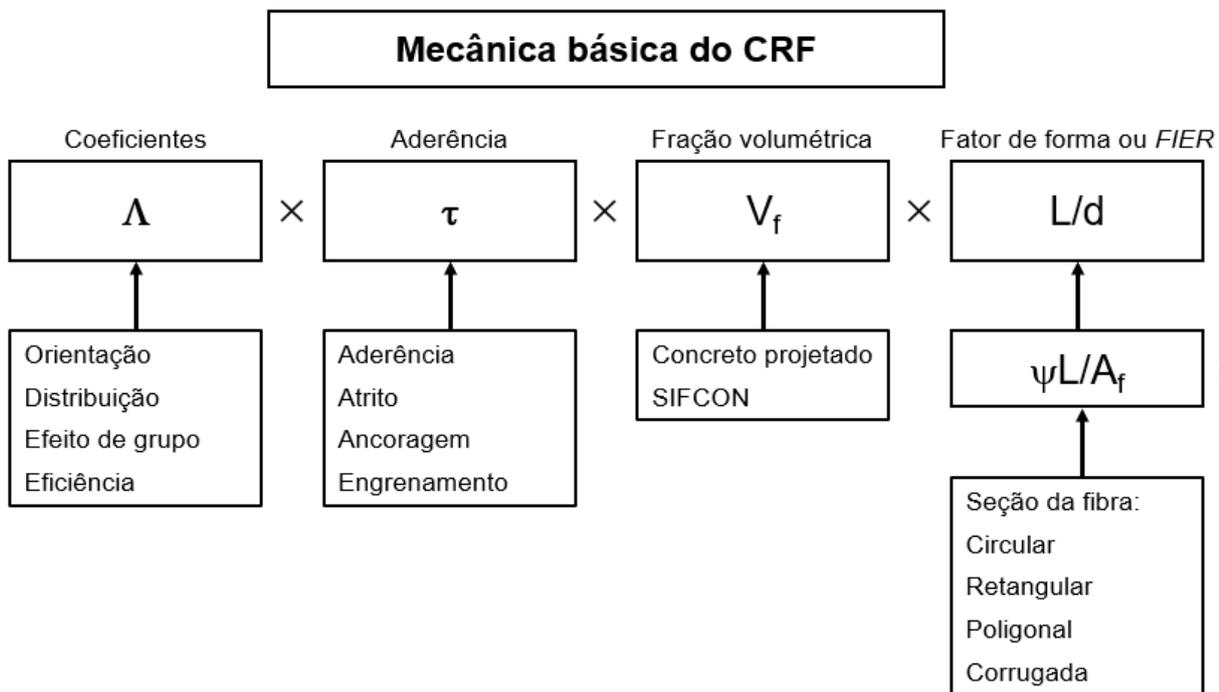
No concreto simples, as propriedades mecânicas são correlacionadas com a resistência à compressão do concreto (f_c), considerado o principal parâmetro de projeto de estruturas de concreto. As resistências à tração, ao cisalhamento, à flexão, e o módulo de elasticidade, por exemplo, podem ser determinados a partir de expressões que dependem da resistência à compressão (NAAMAN, 2018).

A contribuição mais evidente da adição de fibras ao concreto sujeito a solicitações de tração é presenciada após a fissuração da matriz, em que se destaca a ductilidade e a resistência pós-fissuração (σ_{pc}) proporcionadas pelas fibras. Nesse sentido,

Naaman (2003) afirma que o desenvolvimento de um compósito de êxito é conseguido com a busca por melhorias da resistência pós-fissuração.

A resistência pós-fissuração depende de uma série de fatores associados à fibra e, principalmente, à interação fibra-matriz. Dessa forma, Naaman (2018) estabelece a mecânica básica do concreto reforçado com fibras por meio de uma expressão – Equação (3.13) – que estima a resistência pós-fissuração do compósito, envolvendo uma série de parâmetros (Figura 43).

Figura 43. Mecânica básica do CRF.



Fonte: Adaptado de NAAMAN (2018).

$$\sigma_{pc} = \Lambda \tau V_f \frac{L}{d} \quad (3.13)$$

A Equação (3.13) é utilizada para fibras de seções circulares, com diâmetro ‘d’. Para fibras de seções não circulares, o diâmetro ‘d’ é substituído pelo diâmetro equivalente ‘de’. Apesar disso, o termo ‘L/d’ não representa adequadamente o significado do parâmetro no caso de fibras não circulares. Para contornar essa situação, Naaman (2003) sugere reescrever a Equação (3.13) da seguinte forma:

$$\sigma_{pc} = \frac{\Lambda}{4} \tau V_f \frac{\psi L}{A} \quad (3.14)$$

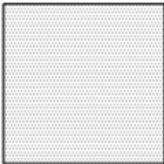
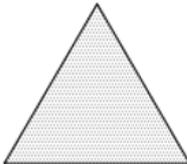
em que ψ é o perímetro da fibra e A corresponde à área de sua seção transversal.

Para avaliar a influência do parâmetro ψ/A , Naaman (2003) define a razão da eficiência intrínseca da fibra (*fiber intrinsic efficiency ratio* – *FIER*) como a razão entre a área lateral e a área da seção transversal da fibra (Equação (3.15)).

$$FIER = \frac{\psi L}{A} \quad (3.15)$$

Na Figura 44, são apresentados valores relativos da variável *FIER* para fibras de seções circulares, quadradas, triangulares e retangulares planas. Observa-se que, no caso de fibras com mesma área de seção transversal, a fibra triangular é 28% mais efetiva que a circular, enquanto a fibra quadrada é 12% mais efetiva (NAAMAN, 2003).

Figura 44. Possíveis seções transversais de fibras e seus respectivos valores de *FIER* comparado com a fibra de seção circular.

Formato da seção transversal				
<i>FIER</i> Relativo	1	1.12	1.28	> 1.28

Fonte: Adaptado de NAAMAN (2003).

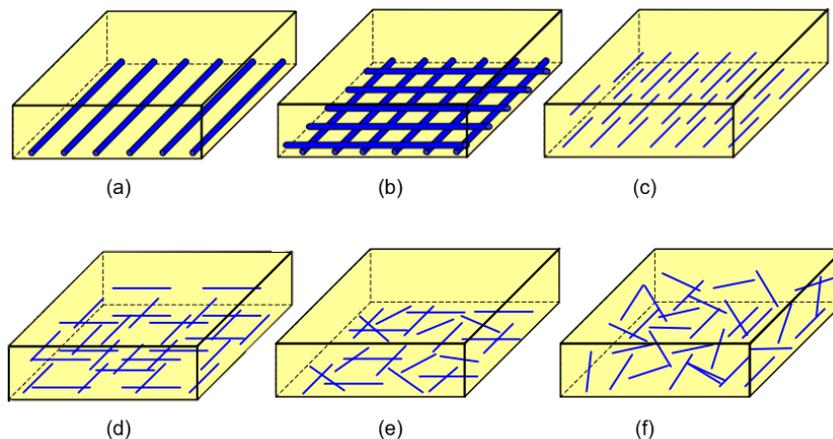
A partir das expressões apresentadas, infere-se que a resistência pós-fissuração do compósito (σ_{pc}), principal propriedade promovida pela adição de fibras, depende de dos seguintes fatores: orientação e distribuição das fibras (A); aderência fibra-matriz (τ); teor de fibras (V_f); e geometria da fibra (*FIER*). A influência de cada um desses parâmetros sobre o comportamento do concreto reforçado com fibras é discutida, resumidamente, nos próximos itens.

3.3.1 Orientação e distribuição das fibras

As fibras podem se apresentar na massa de concreto com diferentes configurações dependendo da tecnologia utilizada no desenvolvimento do compósito. Os compósitos em que as fibras possuem orientação bem definidas são fabricados, principalmente,

com filamentos contínuos ou mantas de fibras, ou por meio de técnicas apropriadas para essa finalidade, como o posicionamento prévio das fibras na forma, que é o caso do SIFCON (Figura 45a-d). Por outro lado, as fibras podem possuir uma orientação randômica na matriz, em que fibras curtas são inseridas aleatoriamente na mistura (Figura 45e-f).

Figura 45. Disposição das fibras no concreto.

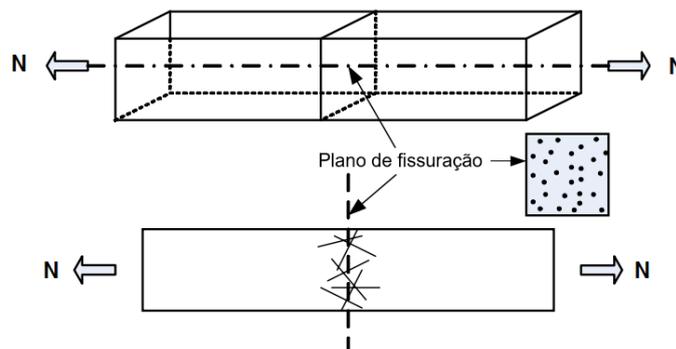


Fonte: LÖFGREN (2005).

A orientação aleatória das fibras pode ocorrer tanto no plano (2D – Figura 45e) – quando a espessura do elemento é inferior ao comprimento da fibra, como é caso de elementos de placa – quanto no espaço (3D – Figura 45f).

A tenacidade e resistência residual pós-fissuração na tração, principais propriedades afetadas pela adição de fibras ao concreto, variam conforme a capacidade individual da fibra em controlar a abertura das fissuras, bem como da quantidade e orientação das fibras em relação ao plano da fissura, conforme ilustrado na Figura 46 (OLIVERA, 2010).

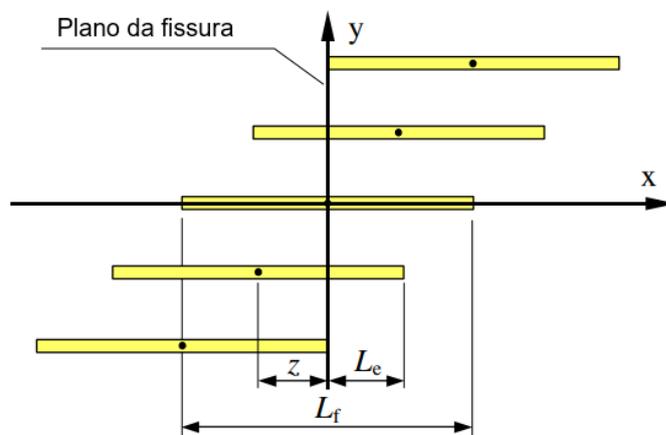
Figura 46. Distribuição e quantidade de fibras no plano da fissura.



Fonte: Adaptado de NAAMAN (2008).

A influência da orientação da fibra sobre o comportamento mecânico do CRF é usualmente avaliada por meio do fator de eficiência da fibra (η_f), que expressa a relação entre uma fibra orientada em um ângulo ϕ e uma fibra alinhada na direção do esforço (BENTUR; MINDESS, 2007; SALVADOR, 2013). No caso em que todas as fibras são alinhadas em apenas uma direção (1D – Figura 47) – qual seja, direção do carregamento – o fator de eficiência da fibra é igual a unidade e o comprimento de embutimento da fibra na matriz varia entre zero e metade do comprimento da fibra ($0 < L_e \leq L_f/2$).

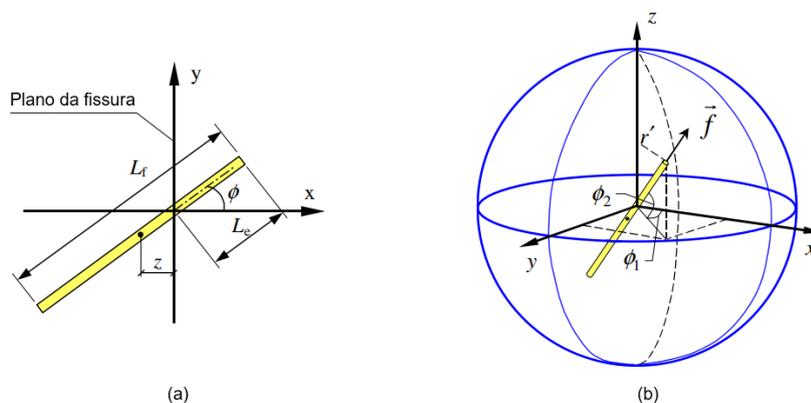
Figura 47. Orientação das fibras (1D).



Fonte: Adaptado de LÖFGREN (2005).

Nos casos em que a fibra possui orientação aleatória (2D e 3D), a quantidade de fibras que atravessam o plano da fissura e suas orientações podem ser determinadas considerando todos os possíveis comprimentos de embutimento (L_e) e ângulos (ϕ), respectivamente (Figura 48). A descrição completa das expressões utilizadas para avaliar esses parâmetros podem ser encontradas no trabalho de Löfgren (2005).

Figura 48. Orientação das fibras: (a) 2D; (b) 3D.



Fonte: Adaptado de LÖFGREN (2005).

Usualmente, as fibras são consideradas orientadas de forma aleatória e dispersas homogeneamente no concreto, possibilitando a obtenção de um material com comportamento mais homogêneo e isotrópico (OLIVEIRA, 2019). Contudo, a orientação e dispersão reais das fibras no concreto são afetadas por muitos fatores, como as propriedades do compósito no estado fresco, a geometria da forma, método de lançamento e a vibração do material (LÖFGREN, 2005; OLIVEIRA, 2010; DOYON-BARBANT; CHARRON, 2018). Dessa forma, dificilmente se consegue uma distribuição das fibras completamente uniforme na prática (BENTUR; MINDESS, 2007). De modo geral, estudos da literatura mostram que as fibras paralelas à direção das tensões de tração proporcionam maiores incrementos das resistências à tração e à flexão do que aquelas orientadas aleatoriamente no concreto (KANG *et al.*, 2011; KANG; KIM *et al.*, 2011; YOO *et al.*, 2014; YOO *et al.*, 2015).

Em solicitações de compressão, estudos da literatura verificaram que as fibras rígidas, como as de aço, paralelas à direção do carregamento, podem reduzir a resistência à compressão do concreto devido ao fenômeno de flambagem que ocorre nas fibras (HSU; HSU, 1994). Por outro lado, as fibras perpendiculares à direção do carregamento podem aumentar a resistência à compressão, uma vez que essas fibras tendem a confinar a expansão lateral do protótipo e reduzir a propagação de fissuras longitudinais (HSU; HSU, 1994; MANSUR *et al.*, 1999).

3.3.2 Aderência fibra-matriz

A aderência fibra-matriz nos compósitos cimentícios reforçados com fibras, como é o caso do CRF, é extremamente complexa e envolve diferentes componentes intrínsecos à sua natureza. Embora seja difícil (senão impossível) mensurar a contribuição de cada componente na prática, Naaman (1999) define a aderência fibra-matriz como a contribuição dos seguintes componentes:

(i) Adesão física e química. No caso de fibras de aço e poliméricas, a contribuição dessa aderência é extremamente pequena (quando existe), podendo ser aprimorada com a adição de agentes adesivos como látex ou resina PVA. O autor relata, no entanto, que esses aditivos contribuem apenas na resistência à fissuração da matriz,

sendo o efeito praticamente nulo na região pós-fissuração, além de possuir um custo relativamente alto.

(ii) Atrito. Esse componente é influenciado pela área lateral de contato entre a fibra e a matriz e pela finura da zona de transição no entorno da fibra. A contribuição do atrito é reduzida na medida em que a fibra é arrancada da matriz devido ao menor comprimento de embutimento.

(iii) Ancoragem mecânica. A ancoragem mecânica é obtida por meio de conformações geométricas impostas propositalmente na fibra para aprimorar sua aderência com a matriz de concreto. A ancoragem mecânica nas fibras de aço é usualmente imposta por meio de inserção de ganchos nas extremidades ou por um processo de corrugação ao longo do comprimento da fibra, conforme discutido anteriormente. No caso das fibras poliméricas, as principais conformações impostas são a ondulação, a fibrilação e o torcimento dos fios (SALVADOR, 2013). O componente mecânico da aderência é ativado tão logo o processo de arrancamento da fibra é iniciado, e seu efeito é presenciado até níveis significativos de arrancamento da fibra (NAAMAN, 1999).

(iv) Engrenamento das fibras. Esse componente de aderência é proporcionado pelo contato entre as fibras, e ocorre apenas nos compósitos com elevados teores de fibras, como é o caso do SIFCON.

Em suas investigações, Naaman (2000) relata que, enquanto a adesão física e química é o primeiro componente que contribui na aderência fibra-matriz, a ancoragem mecânica é o componente que mais afeta o comportamento do compósito, responsável por conferir tenacidade, capacidade de absorção de energia e proporcionar o desenvolvimento de múltiplas fissuras no material. Ainda segundo o autor, o trabalho gasto durante o processo de fabricação da fibra para induzir essas conformações geométricas é recuperado pelos ganhos obtidos nas propriedades mecânicas do compósito.

Embora uma investigação a respeito do processo exclusivo de arrancamento da fibra da matriz de concreto não seja o foco da pesquisa, o autor entende que é de suma importância a compreensão desse processo para avaliar o comportamento mecânico

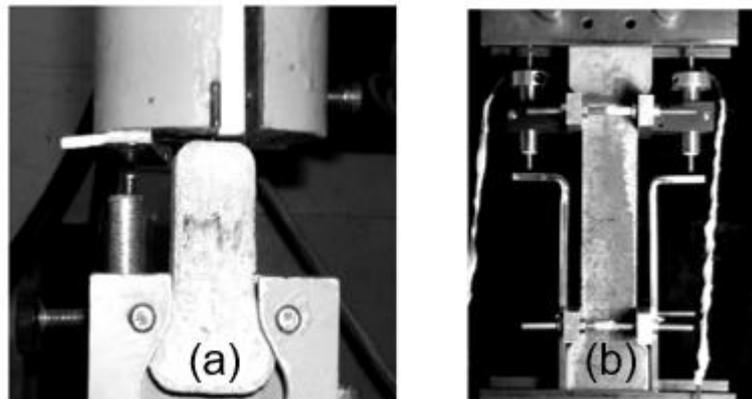
do CRF em ensaios de flexão, que fazem parte do escopo da pesquisa. A ductilidade de um compósito cimentício reforçado com fibras é caracterizado por um mecanismo de dissipação de energia que depende da aderência entre a fibra e a matriz de concreto, definida pelo processo de arrancamento da fibra (LEE; KIM; WON, 2016). Nesse sentido, pesquisas da literatura acerca do assunto são apresentadas na sequência.

De acordo com He e Yang (2021), durante ensaios de flexão em prismas de concreto reforçado com fibras de aço em conformidade com a norma europeia EN 14651 (2007), o limite de proporcionalidade é atingido quando uma fissura se forma na direção do entalhe. Na medida em que o concreto fissura, a linha neutra se movimenta em direção à zona de compressão da seção transversal, de forma que a seção abaixo da linha neutra é mantida predominantemente pela resistência ao arrancamento das fibras que atuam como pontes de transferência de tensão entre as faces da fissura. Em pequenas aberturas da fissura, o deslizamento da fibra é limitado, de modo que as fibras estão em um processo de “descolamento” da matriz. Conforme o ensaio prossegue e a abertura da fissura aumenta, inicia-se o processo de arrancamento das fibras e diferentes fenômenos podem ocorrer nesse contexto, como alongamento da fibra, lascamento do concreto, deslizamento por atrito ou ruptura da fibra. A contribuição desses fenômenos na resistência ao arrancamento da fibra depende da resistência da matriz e da inclinação, resistência e geometria das fibras (HE; YANG, 2021).

Kim, El-Tawil e Naaman (2007) realizaram ensaios de arrancamento e de tração direta com fibras de aço com gancho ($f_y = 2100$ MPa) e torcida ($f_y = 2760$ MPa) de alta resistência para investigar uma possível correlação entre o processo de arrancamento da fibra e o comportamento na tração (Figura 49). Os corpos de prova possuíam uma resistência à compressão de 48,3 MPa e uma fração de volumétrica de fibras de 2,0%. Ambas as fibras possuíam um comprimento de 30 mm, com um comprimento embutido (para o ensaio de arrancamento) de 15 mm ($L_f/2$). Os autores verificaram que a fibra de aço torcida atingiu a resistência máxima em um deslizamento de 11,4 mm, enquanto a fibra de aço com gancho atingiu esse mesmo parâmetro com um deslizamento em torno de 0,76 mm, seguido por uma rápida redução da carga. Desse modo, a energia dissipada ao longo do processo de arrancamento da fibra torcida foi

mais que o dobro da energia dissipada pela fibra de aço com gancho. Apesar dessa grande diferença, ambas as fibras proporcionaram um comportamento do tipo *strain-hardening* na tração direta, induzindo múltiplas fissuras no corpo de prova.

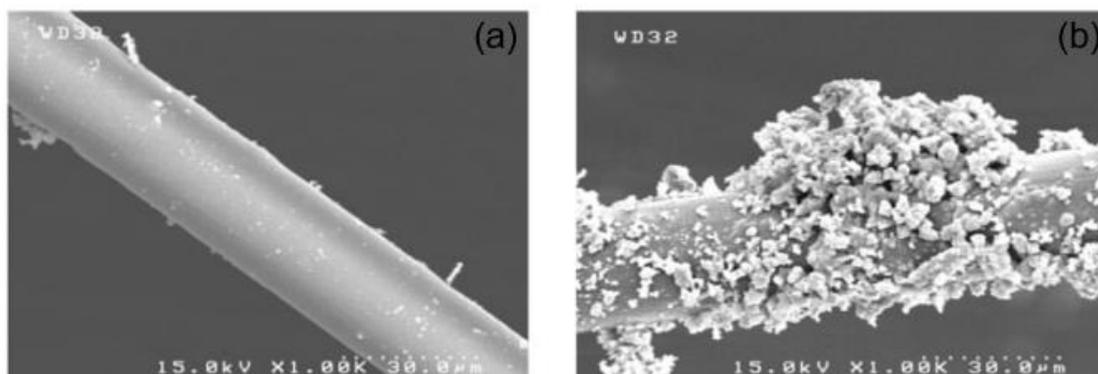
Figura 49. (a) ensaio de arrancamento da fibra e (b) ensaio de tração direta.



Fonte: KIM; EL-TAWIL; NAAMAN (2007).

Halvaei, Jamshidi e Latifi (2016) estudaram a aderência de fibras poliméricas com a matriz de concreto de agregados finos (isto é, sem agregado graúdo) por meio de ensaios de arrancamento. As fibras, cujo material-base varia entre acrílico, polipropileno e náilon, possuíam um diâmetro equivalente de $30\ \mu\text{m}$ e foram investigadas em pedaços de comprimento de 30 mm, dos quais 5 mm eram embutidos em um bloco de concreto. As fibras de acrílico apresentaram as maiores tensões de aderência, e os autores atribuíram esse fato à maior área de superfície lateral da fibra (comparado com as outras fibras) devido ao formato da seção transversal da fibra. Dessa forma, tem-se uma área maior de contato com a matriz de concreto. Apesar disso, as fibras de acrílico sofreram uma ruptura no ensaio, indicando uma forte aderência com a matriz de concreto. As fibras de polipropileno e náilon, por outro lado, foram totalmente arrancadas do bloco de concreto, ocasionando maior dissipação de energia ao longo do ensaio. Os autores verificaram ainda que, quanto menor é a relação água/aglomerante do traço do concreto, maiores são a energia dissipada e a tensão máxima atingida no ensaio de arrancamento com fibras de náilon. De acordo com Halvaei; Jamshidi e Latifi (2016), isso ocorre devido à maior quantidade de cristais depositados na superfície lateral da fibra em quantidades maiores de água na mistura, que leva a uma redução da resistência de aderência fibra-matriz (Figura 50).

Figura 50. Influência da relação a/ag em fibras de náilon: (a) $a/ag = 0,20$ e (b) $a/ag = 0,30$.

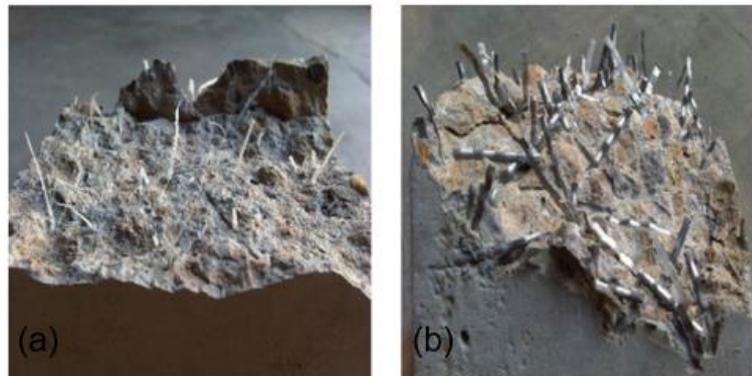


Fonte: HALVAEI; JAMSHIDI; LATIFI (2016).

Lee, Kim e Won (2016) investigaram o comportamento na flexão do concreto reforçado com fibras poliméricas retas, corrugadas e torcidas. Todas as fibras possuíam as mesmas dimensões geométricas e a resistência à compressão do concreto variava entre 50 e 60 MPa. Apesar de a fibra corrugada apresentar maior área de contato lateral com a matriz cimentícia, as fibras poliméricas torcidas apresentaram as maiores resistências residuais ($f_{R,i}$) e tenacidade na flexão, seguidas pelas fibras corrugadas e fibras retas. Os autores atribuíram esse comportamento principalmente à maior ancoragem das fibras torcidas à matriz cimentícia. As fibras torcidas são “distorcidas” durante o arrancamento da matriz, isto é, sofrem uma torção no sentido oposto à torção inicial induzida na fibra em seu processo de fabricação, proporcionando maior dissipação de energia, tenacidade e resistência residual.

Li *et al.* (2017) estudaram o comportamento do concreto com agregado leve reforçado com fibras de polipropileno de alto desempenho e de aço por meio de ensaios de flexão. Ambas as fibras eram igualmente corrugadas e possuíam um comprimento de 38 mm, e a matriz de concreto possuía uma resistência à compressão em torno de 40 MPa. Após os ensaios, os autores verificaram que, enquanto as fibras de aço sofreram o processo de arrancamento, várias das fibras de polipropileno foram rompidas (Figura 51). Segundo os autores, no caso do concreto reforçado com fibras de aço, pelo fato da fibra apresentar uma resistência à tração superior à resistência do concreto, a aderência entre a fibra e a matriz foi o principal fator que governou o comportamento do material na flexão. Por outro lado, a resistência à tração das fibras de polipropileno foi determinante nos resultados dos ensaios em concreto reforçado com fibras poliméricas.

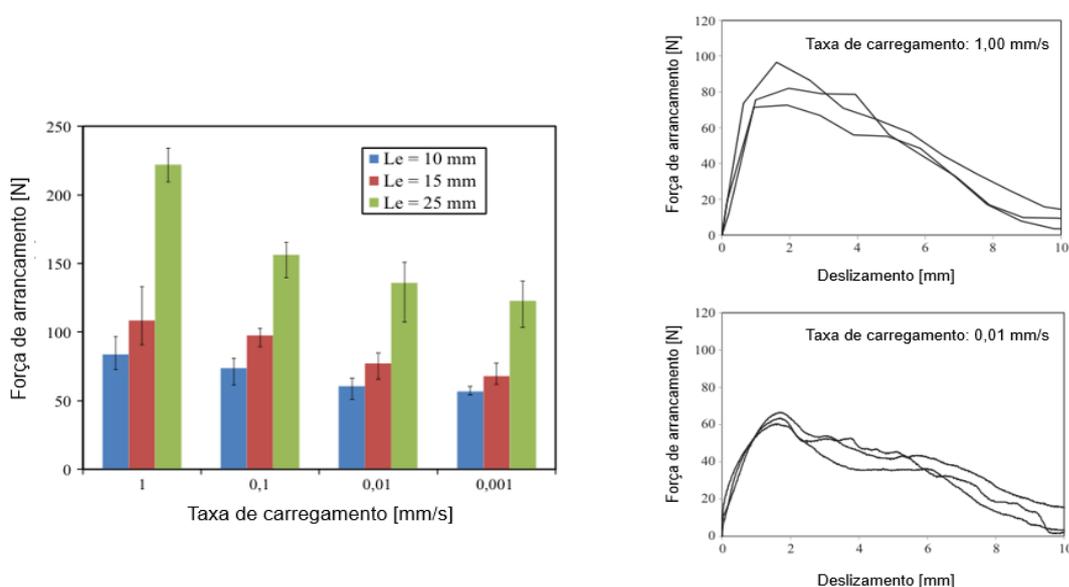
Figura 51. Resultados de ensaios de flexão: (a) fibras de polipropileno rompidas e (b) fibras de aço corrugadas arrancadas.



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

Babafemi e Boshoff (2017) investigaram o comportamento de macrofibras poliméricas em polipropileno ($L_f = 40$ mm; $\lambda = 50$) por meio de ensaios de arrancamento. Os parâmetros analisados foram, entre outros, o comprimento de embutimento das fibras na matriz de concreto (10, 15 e 25 mm) – cuja resistência à compressão não foi fornecida – e a taxa de carregamento do ensaio. Os resultados indicaram que, quanto maiores o comprimento da fibra embutida e a taxa de carregamento, maior é a carga necessária para provocar seu arrancamento (Figura 52). Os autores verificaram ainda que, para a taxa de carregamento de 1,0 mm/s, a curva “força-deslizamento” é quase linear até a carga máxima atingida. Por outro lado, para as taxas de carregamento mais baixas, a não-linearidade é mais pronunciada.

Figura 52: Resultados de ensaios de arrancamento: influência da taxa de carregamento e comprimento de embutimento da fibra.



Fonte: BABAFEMI; BOSHOF (2017).

Yoo, Park e Kim (2017) avaliaram a influência da resistência da matriz de um compósito cimentício de alto desempenho (Tipo A – $f_c = 112,2$ MPa; Tipo B – $f_c = 152,5$ e Tipo C – $f_c = 190,2$ MPa) sobre o comportamento de arrancamento das fibras. Os autores verificaram que os maiores valores de resistência de aderência ocorreram com o concreto mais resistente ($f_c = 190,2$ MPa) devido à interface entre a fibra e matriz de concreto ser menos porosa quando comparada à mesma interface dos outros concretos. Para o concreto do Tipo C, foi utilizado um material de enchimento (*filler*) com diâmetro de $4,2 \mu\text{m}$, enquanto o material de enchimento das Matrizes A e B possui um diâmetro de $14,1 \mu\text{m}$.

Deng *et al.* (2018) realizaram ensaios de arrancamento em fibras de aço retas e com gancho nas extremidades em uma matriz de concreto reforçado com fibras de aço e fibras de polipropileno, cuja resistência à compressão varia entre 40 e 50 MPa. Os autores verificaram que a adição de fibras de polipropileno na matriz de concreto proporcionou maiores resistências máxima e residuais de arrancamento do que fibras de aço. Por meio de microscopia eletrônica de varredura, os autores identificaram uma vasta quantidade de fibras de polipropileno no entorno da fibra de aço. Além disso, os produtos de hidratação do cimento formados próximo à superfície da fibra de aço são mais densos quanto maior é o volume de fibras de polipropileno na matriz. Deng *et al.* (2018) sugerem que esse fenômeno é explicado por dois motivos principais: o primeiro é que, enquanto a fibra de aço é um material hidrofílico, a fibra de polipropileno é um material hidrofóbico. Dessa forma, quanto mais água se deposita nas adjacências da fibra de aço, mais o clínquer do cimento é hidratado, reduzindo a porosidade da interface fibra-matriz. O segundo motivo é que as fibras de polipropileno, em sua maior quantidade, inibem a propagação das microfissuras na medida em que a fibra de aço é arrancada.

Gondokusumo *et al.* (2021) avaliaram a resistência residual do concreto leve e ultraleve reforçado com fibras de aço. Para isso, os autores realizaram ensaios experimentais conforme a norma europeia EN 14651 (2007), variando o teor de fibras e substituindo o agregado graúdo por agregados mais leves. Os resultados indicaram resistências residuais 40% e 70% menores do concreto leve e ultraleve, respectivamente, quando comparado com o concreto de densidade normal. Segundo os autores, uma possível explicação para essa redução na resistência está associada

à fraca resistência de aderência entre a fibra e a matriz de concreto leve e ultraleve. Os agregados leves possuem menor rigidez quando comparado aos agregados usualmente utilizados no concreto com densidade normal, o que reduz a restrição das fibras no concreto. Dessa forma, tem-se uma redução na resistência ao arrancamento das fibras, que afeta as resistências à tração e flexão do concreto leve e ultraleve. Os autores ressaltam, no entanto, que ensaios de arrancamento são necessários para confirmar essa hipótese.

Em seus ensaios de flexão em concretos ($f_{cm} = 40$ MPa) reforçados com macrofibras poliméricas ($\lambda \approx 72$), Nana *et al.* (2021) verificaram que as fibras foram arrancadas da matriz de concreto e casos isolados de ruptura da fibra foram observados. Os autores atribuem esse comportamento à baixa aderência fibra-matriz. No entanto, eles destacam que a ruptura da fibra seria o modo de falha predominante caso a matriz de concreto possuísse maior resistência e as fibras apresentassem modificações geométricas que melhorassem a ancoragem com a matriz. Nesse caso, a ductilidade seria reduzida e a fibra se romperia em valores menores de abertura de fissura (CMOD). Em um raciocínio similar, Zhao *et al.* (2022) observaram que a utilização de fibras de alta resistência contribui para garantir que o processo de arrancamento ocorra, além de proporcionar maior dissipação de energia para um mesmo teor de fibras.

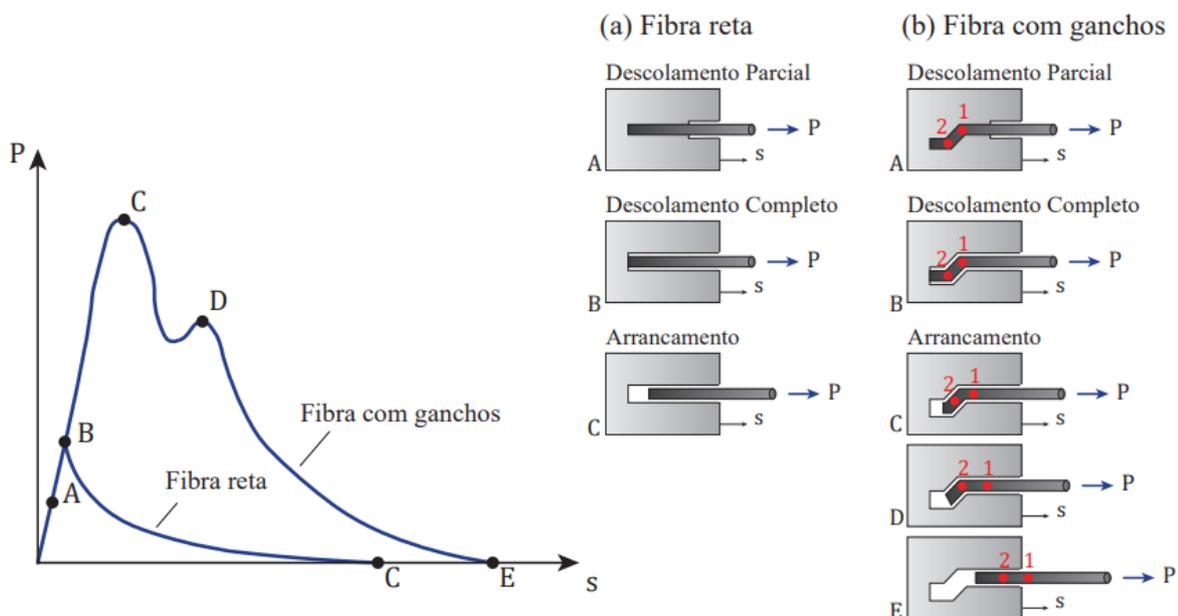
Chen *et al.* (2022) avaliaram o efeito da ancoragem de fibras de aço com um, um e meio e dois ganchos (fibras 3D, 4D e 5D, respectivamente) com a matriz de concreto sobre o comportamento pós-fissuração. Nos ensaios de flexão, os autores observaram que, em geral, quanto maior o número de ganchos e, conseqüentemente, a ancoragem entre as fibras e a matriz, maiores as resistências residuais pós-fissuração. No entanto, esse comportamento foi mais preponderante para concretos com resistência à compressão de 50 MPa, sendo menos expressivo nos concretos mais resistentes ($f_{cm} = 70$ e 80 MPa). Resultados similares com as mesmas fibras foram encontrados por Carrillo *et al.* (2021) e Venkateshwaran *et al.* (2018).

O comportamento observado por Chen *et al.* (2022) em matrizes de concreto de maiores resistências (70 e 80 MPa) pode estar associado à elevada aderência entre a fibra e a matriz proporcionada pelos ganchos nas extremidades das fibras de aço. A ancoragem mecânica promovida pelos ganchos é extremamente efetiva na

contribuição de resistências residuais pós-fissuração (desde que não ocorra a ruptura da fibra) e é constantemente objeto de pesquisa de diversos autores devido à complexidade de fenômenos que governam o processo de arrancamento da fibra de aço com gancho (DENG et al., 2018; KRAHL et al., 2020; CHEN et al., 2022; MINEIRO et al., 2022).

De acordo com Mineiro (2022), uma curva típica para fibras de aço retas é caracterizada por uma queda repentina na carga de arrancamento após o descolamento completo da fibra em relação à matriz de concreto (Figura 53). No caso das fibras de aço com gancho, após o processo de descolamento completo da fibra em relação à matriz (análogo à fibra de aço reta), o ganho obtido na carga de arrancamento é atribuído ao alinhamento das duas curvaturas da fibra (ganchos) por meio de rótulas plásticas. Após atingir a carga máxima (ponto C), a curva apresenta uma queda associada à entrada progressiva da primeira rótula plástica no trecho reto do canal, sucedida por um leve aumento de carga provocado pelo alinhamento da segunda rótula plástica (ponto D). Após esse ponto, a resistência ao atrito governa o trecho final da curva, como uma fibra reta (MINEIRO, 2022).

Figura 53. Curvas típicas de força-deslizamento e o processo de arrancamento para (a) fibras de aço retas e (b) fibras de aço com gancho.



Fonte: MINEIRO (2022)

Após a análise de diversas pesquisas, infere-se, portanto, que três são as principais propriedades do compósito que governam o processo de arrancamento da fibra da matriz de concreto: a resistência da matriz; a resistência de aderência fibra-matriz e a resistência da fibra. Cada uma dessas propriedades é influenciada por parâmetros que estão (não em sua totalidade) resumidos na Tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros que influenciam o comportamento de arrancamento da fibra da matriz de concreto.

Propriedade	Parâmetros que afetam a propriedade
Resistência à tração da matriz de concreto	composição do concreto; relação a/ag
Resistência de aderência na interface fibra-matriz	comprimento da fibra; fator de forma; composição do concreto; ancoragem com a matriz; alongamento da fibra
Resistência da fibra	resistência última da fibra; ancoragem com a matriz de concreto

Fonte: Autoria própria.

Devido à grande dissipação de energia durante o processo de arrancamento da fibra da matriz de concreto, esse é o modo de falha mais desejado em concretos reforçados com fibra (CHEN *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2023). Kelly (1973)² *apud* Bentur; Mindess (2007) verificaram que a energia absorvida quando a falha é desencadeada por uma ruptura da fibra é desprezível quando comparado à energia absorvida na ocorrência do arrancamento. Em outras palavras, a alteração do modo de falha (do arrancamento para a ruptura da fibra) resulta em uma redução significativa da energia envolvida na falha do compósito, aumentando a fragilidade do material.

Para garantir o arrancamento da fibra, é necessário, portanto, que a resistência de aderência na interface fibra-matriz seja inferior às resistências à tração da matriz e da fibra. Caso contrário, pode-se ocorrer a ruptura da fibra ou da matriz de concreto, conforme explicitado por outros autores.

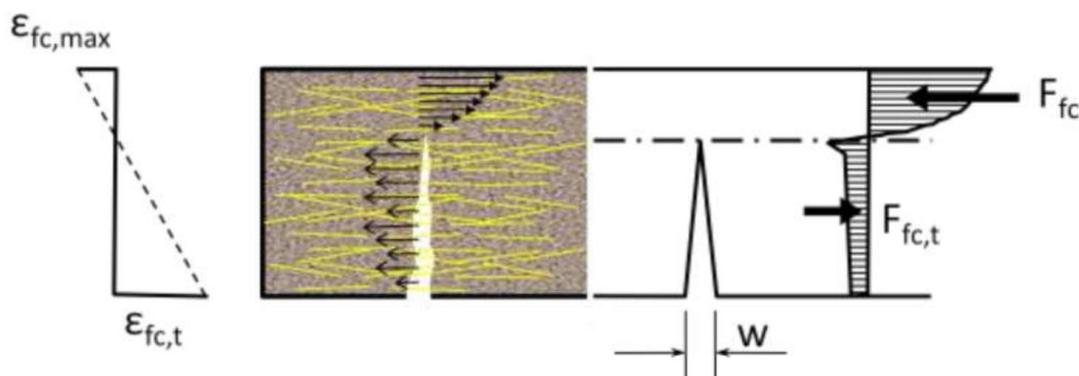
²KELLY A. **Strong Solids**, Oxford University Press, Oxford, 1973.

No contexto do concreto de alta resistência, tem-se uma matriz cimentícia mais densa e com menor quantidade de vazios quando comparada à matriz do concreto convencional, um fator que majora a aderência entre a fibra e a matriz. Ademais, a baixa relação a/ag proporciona uma resistência à compressão elevada que aumenta a pressão de confinamento da fibra e melhoram as propriedades de aderência na interface, aumentando a probabilidade de ruptura da fibra (GALEOTE *et al.*, 2022). Dessa forma, para otimizar a utilização do concreto de alta resistência reforçado com fibras, recomenda-se a utilização de fibras com resistências mais elevadas e com melhor aderência na matriz (CHEN *et al.*, 2022).

3.3.3 Teor de fibras

O teor de fibras é o parâmetro comumente avaliado em pesquisas sobre o comportamento mecânico do CRF, e seu efeito foi demonstrado diversas vezes em inúmeros trabalhos (MANFREDI; SILVA, 2020; RYABCHIKOV *et al.*, 2020; CARRILLO *et al.*, 2021; NANA *et al.*, 2021; VRIJDAGHS *et al.*, 2021). De modo geral, diz-se que, quanto maior o teor de fibras, maior é a resistência residual pós-fissuração proporcionada pelas fibras (FIGUEIREDO, 2011). Esse fato pode ser verificado por meio da Figura 54, na qual uma viga fletida fissurada é apresentada em conjunto com as tensões e deformações distribuídas ao longo da seção. Esse esquema foi proposto inicialmente pelo Comitê RILEM de CRF (VANDEWALLE, 2003), e adaptado por Figueiredo (2011).

Figura 54. Modelo de distribuição de tensão e deformação na seção fissurada de uma viga sob de CRF sob flexão.



Fonte: FIGUEIREDO (2011) – adaptado de RILEM TC 162 (2003).

Na Figura 54, os parâmetros são:

F_{fc}	resultante de compressão na seção fletida;
$F_{fc,t}$	resultante de tração na seção fletida;
$\varepsilon_{fc,máx}$	deformação máxima do compósito na compressão;
$\varepsilon_{fc,t,máx}$	deformação máxima do compósito na tração;
w	abertura da fissura.

Após a fissuração do concreto, a resistência à tração do material é dada pela somatória das cargas resistidas pelas fibras, abaixo da linha neutra da seção. Certamente, quanto maior a quantidade de fibras presente na seção fissurada, maior será a resultante de tração e a capacidade resistente do compósito (FIGUEIREDO, 2011).

Por outro lado, o aumento do teor de fibras afeta negativamente as propriedades do concreto no estado fresco, podendo ocasionar segregação dos materiais e a formação de aglomerados de fibras, além de reduzir a trabalhabilidade e dificultar o processo de mistura (NAAMAN, 2003). Uma alternativa para manter elevados teores de fibras sem prejudicar as propriedades no estado fresco é a utilização de matrizes constituídas apenas de partículas extremamente finas. Essa alternativa, no entanto, provoca uma redução no módulo de elasticidade do compósito, além de ter um elevado custo.

Após ampla investigação na literatura, foi observado que a grande maioria dos programas experimentais limitam a fração volumétrica de fibras na mistura em 1,0%. Conforme explicado anteriormente, frações volumétricas elevadas podem ocasionar problemas durante a mistura, principalmente em concretos convencionais, isto é, constituído por cimento, agregados miúdo e graúdo e água. Pesquisas recentemente publicadas e direcionadas à revisão de literatura mostram que os concretos reforçados com fibras, em sua maioria, adotam frações volumétricas inferiores a 1,0% (GALEOTE *et al.*, 2022; MARAHLA; GARCIA-TAENGUA, 2021; OETTEL; SCHULZ; HAIST, 2022; TIBERTI *et al.*, 2018). Na Tabela 10, são apresentados, resumidamente, quatro diferentes estudos de revisão de literatura, dos quais foram retirados a quantidade de

corpos de prova avaliada e as respectivas frações volumétricas adotadas. Nota-se, claramente, em conjunto com a Figura 55 e a Figura 56, que a fração volumétrica é usualmente limitada a 1,0%. Além dos motivos supracitados, deve-se levar em consideração a questão de custo da adição de fibras ao concreto.

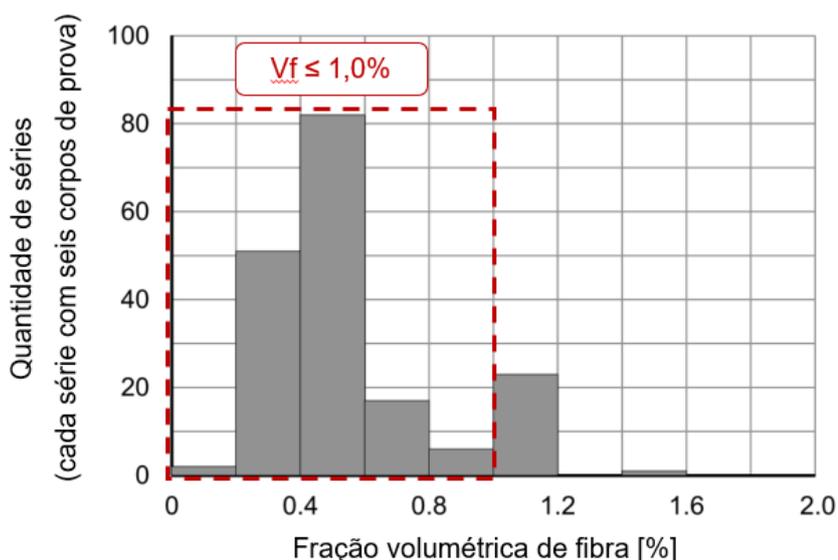
Tabela 10. Frações volumétricas de fibras adotadas em diferentes estudos.

Pesquisa	Quantidade de corpos de prova avaliados	Fração volumétrica estudada [%]
Tiberti <i>et al.</i> (2018)	528 corpos de prova	0,32 a 1,00
Garcia-Taengua <i>et al.</i> (2021)	765 corpos de prova	0,51 (mediana)
Oettel <i>et al.</i> (2021)	6738 corpos de prova	0,10 a 2,00 (Figura 55)
Galeotte <i>et al.</i> (2022)	686 corpos de prova	0,33 a 2,52 (Figura 56)

Fonte: Autoria própria.

Nos estudos de Oettel; Schulz e Haist (2022), embora a faixa de fração volumétrica se estenda até acima de 2,00%, são poucos os estudos cuja fração volumétrica supera 1,00%, conforme indicado na Figura 55.

Figura 55. Frações volumétricas estudadas por Oettel *et al.* (2021).

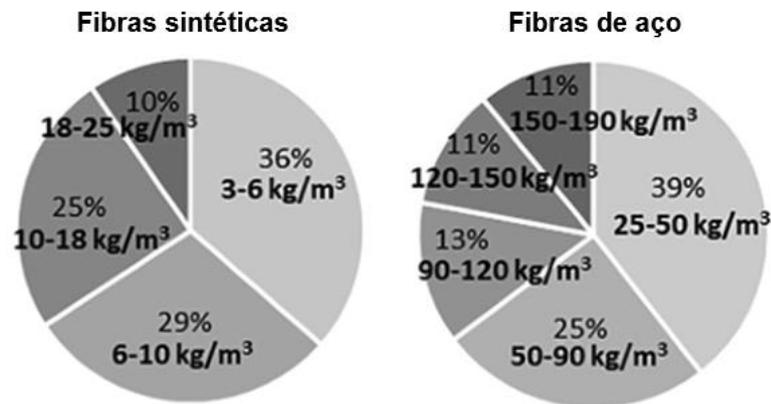


Fonte: Adaptado de OETTEL; SCHULZ; HAIST (2022).

No levantamento de Galeotte *et al.* (2022), que envolve fibras de aço e fibras sintéticas, mais da metade dos estudos analisados pelos autores envolvem consumos

de fibra inferiores a 10 kg/m³ e 90 kg/m³, equivalente a uma fração volumétrica próxima de 1,10% para as fibras sintéticas e de aço, respectivamente (Figura 56).

Figura 56. Consumo de fibras dos estudos investigados por Galeotte *et al.* (2022).



Fonte: Adaptado de Galeotte *et al.* (2022).

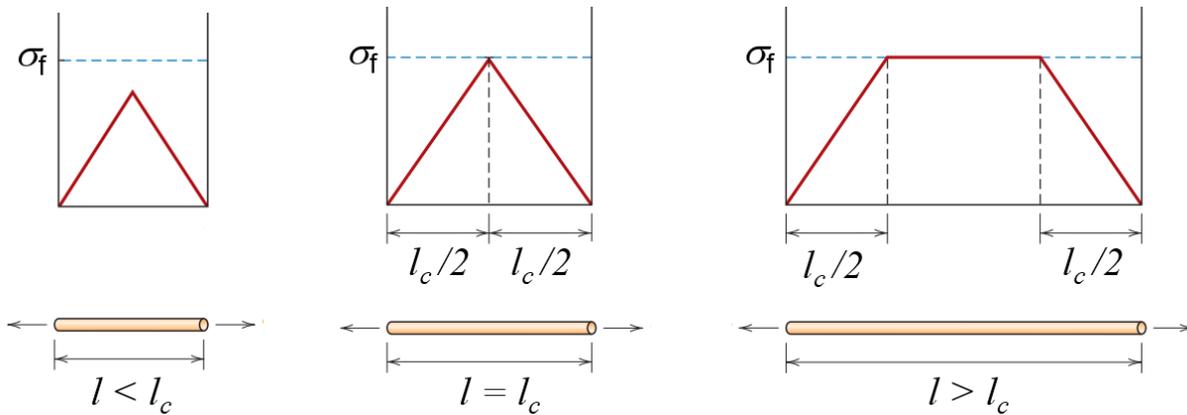
3.3.4 Geometria da fibra

A influência da geometria da fibra sobre o comportamento mecânico do CRF foi apresentada, em parte, anteriormente, onde foram discutidos o efeito da seção transversal da fibra por meio do conceito *FIER* e fator de forma e a resistência de aderência na interface fibra-matriz. Contudo, além da seção transversal, o comprimento da fibra possui grande influência no desempenho pós-fissuração do concreto (SALVADOR, 2013). Conforme explicado, quanto maior o comprimento da fibra, maior seu embutimento na matriz e, portanto, maior a resistência de aderência (*pull-out*) que essa fibra pode apresentar.

O comprimento crítico da fibra (l_c) é definido por Bentur e Mindess (2007) como o comprimento mínimo para que a tensão atuante na fibra seja igual à sua resistência à tração. Em outras palavras, é o comprimento no qual a carga suportada pela fibra provoca sua ruptura ao invés de seu arrancamento da matriz (SALVADOR, 2013). Sabe-se que a resistência de aderência da fibra é diretamente proporcional ao comprimento de embutimento (L_e) da fibra na matriz. Logo, fibras cujo comprimento supera o comprimento crítico tendem a atingir a tensão de ruptura, visto que a tensão atuante supera sua resistência. Caso contrário, as fibras são arrancadas da matriz.

Dessa forma, aumentando-se o comprimento, a resistência mecânica da fibra pode limitar a capacidade de absorção de energia do compósito. Na Figura 57, é ilustrada a distribuição de tensão na fibra de acordo com o seu comprimento para os três casos: (i) $l < l_c$; (ii) $l = l_c$; (iii) $l > l_c$.

Figura 57. Distribuição de tensões ao longo da fibra de acordo com seu comprimento.



Fonte: CALLISTER JR; RETHWISCH, 2018.

A tenacidade máxima do compósito é obtida quando $l = l_c$. Na medida em que o comprimento da fibra aumenta, mais fibras tendem a se romper antes de serem arrancadas, reduzindo a capacidade de absorção de energia do compósito. Por outro lado, o aumento no comprimento da fibra é acompanhado por um aumento na capacidade resistente da fibra, o que melhora sua eficiência como material de reforço. Nesse contexto, há uma contradição entre as exigências para a capacidade resistente e a tenacidade do compósito: o projeto de um compósito de maior resistência proporcionada pelo aumento do comprimento das fibras é penalizado por uma redução na tenacidade (BENTUR; MINDESS, 2007). Por isso, é essencial que, durante o desenvolvimento do compósito, as condições nas quais o material será utilizado estejam bem definidas.

Em linhas gerais, diz-se que, quanto maior o comprimento ou fator de forma da fibra, maiores são as resistências residuais pós-fissuração do concreto reforçado com fibras (TIBERTI *et al.*, 2018; GALEOTE *et al.*, 2022). Esse fato é evidenciado em diversas pesquisas, com fibras de aço (CHEN *et al.*, 2021; RESENDE *et al.*, 2021), fibras poliméricas (BLAZY *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2022; ZHAO *et al.*, 2023)

Em seus estudos com fibras poliméricas, Zhao *et al.* (2022) observaram que o fator de forma da fibra é mais efetivo para melhorar o comportamento pós-fissuração do

CRF do que o módulo de elasticidade e resistência da fibra, os quais são mais efetivos na tenacidade a flexão do concreto. Em um estudo mais recente dos mesmos autores, foi observado que, para fibras poliméricas de diferentes fatores de forma, quando o comprimento da fibra é constante, a fibra com menor diâmetro possui um número maior de fibras na superfície de fratura, suportando maior carga (ZHAO *et al.*, 2023).

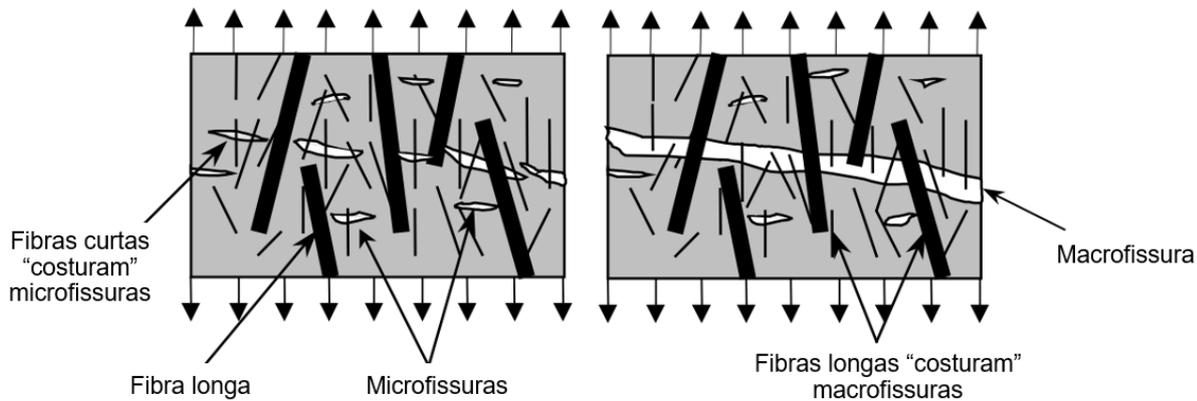
Em seus estudos com fibras de aço com gancho, Chen *et al.* (2021) verificaram que a influência do teor de fibras sobre o comportamento pós-fissuração do concreto é mais expressiva do que o comprimento e fator de forma da fibra, isto é, proporciona maiores valores de resistências residuais.

Galeote *et al.* (2022) criaram um extenso banco de dados com resultados experimentais da literatura e observaram que o fator de forma das fibras afeta diretamente as resistências residuais ($f_{R,i}$) determinadas em ensaios de flexão de acordo com a norma europeia EN 14651 (2007), De modo geral, quanto maior o fator de forma das fibras, maiores são as resistências residuais. Segundo os autores, isso ocorre devido à maior área de contato entre a matriz e a fibra que proporciona maior resistência ao arrancamento da fibra. Embora o aumento do fator de forma ocasione uma quantidade menor de fibras para a mesma fração volumétrica, outros autores da literatura tem reportado que o número de fibras que cruzam o plano da fissura não é alterado significativamente (YOO; KANG; YOON, 2014). Nesse caso, apesar de a quantidade de fibras longas ser reduzida quando comparada às fibras curtas, o aumento do comprimento da fibra também aumenta o comprimento de embutimento das fibras frente a fissura na matriz de concreto.

Uma solução interessante do ponto de vista mecânico do material é a utilização de fibras de aço com diferentes formatos e tamanhos (NANA *et al.*, 2021). O processo de fissuração do concreto se inicia com a formação de numerosas microfissuras na zona de transição em torno dos agregados. Na medida em que o carregamento aumenta, essas microfissuras se interconectam entre si e formam as macrofissuras, levando o material à ruptura. Durante esse processo, as fibras curtas “costuram” as microfissuras com mais eficiência por serem mais finas e estarem presente em maior quantidade no concreto quando comparadas com as fibras longas (para uma mesma fração volumétrica). Sabendo-se que a formação das microfissuras ocorre antes do

concreto atingir sua resistência à tração, as fibras curtas podem contribuir significativamente para o aumento da resistência (MARKOVIC, 2006).

Figura 58. Atuação das fibras curtas e longas no processo de fissuração do concreto.



Fonte: Adaptado de MARKOVIC (2006).

Na medida em que as microfissuras se desenvolvem e se interconectam para a formação das macrofissuras, as fibras longas são cada vez mais solicitadas, “costurando” as macrofissuras e proporcionando uma estabilidade na resposta pós-fissuração. Dessa forma, a combinação de fibras de comprimentos diferentes pode proporcionar, além de ductilidade, maior resistência à tração da matriz de concreto (MARKOVIC, 2006; NANA *et al.*, 2021). Contudo, deve-se destacar que a fração volumétrica das fibras longas (usualmente inferior à fração volumétrica de fibras curtas) utilizada no compósito deve ser criteriosamente selecionada, visto que sua presença reduz significativamente a trabalhabilidade da mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A solução em combinar diferentes tipos de fibras foi proposta pela primeira vez por Rossi, em 1987 (ROSSI *et al.*, 1987), e foi chamada de concreto reforçado com fibras multimodal (*MMFRC – multimodal fiber reinforced concrete*).

4

Programa Experimental

Neste capítulo é descrito o programa experimental realizado para investigar o comportamento mecânico do concreto de alta resistência reforçado com fibras. As propriedades do concreto no estado fresco também são apresentadas e discutidas. Os parâmetros analisados envolvem a resistência à compressão do concreto e as características das fibras: tipo, forma e fração volumétrica. Para cada traço definido, ensaios de compressão para a obtenção da curva tensão-deformação completa e ensaios de tração na flexão para a obtenção das resistências residuais do concreto reforçado com fibras foram realizados.

O programa experimental foi delineado considerando os objetivos desta pesquisa.

4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A influência de diferentes parâmetros foi investigada para analisar diferentes aspectos do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras. Os parâmetros avaliados no programa experimental desta pesquisa envolvem a resistência à

compressão do concreto, o tipo e o teor de fibra, esse último definido como uma fração volumétrica do material (Tabela 11).

Tabela 11. Parâmetros avaliados na pesquisa.

Parâmetros avaliados	
f_{cm} [MPa]	60; 90
Tipos de fibra	Aço; vidro e polimérica
Frações volumétricas de fibras [%]	0,50; 0,75; 1,00

Fonte: Aatoria própria.

O programa experimental é dividido em dois grupos, denominados Grupo 1 e Grupo 2 (Tabela 12). O Grupo 1 envolve os traços com resistência à compressão em torno de 60 MPa, enquanto o Grupo 2 contempla os traços com resistência à compressão próxima a 90 MPa. As fibras analisadas para cada grupo também diferem entre si: no Grupo 1 ($f_{cm} \approx 60$ MPa) foram utilizados dois tipos de fibra de cada material, isto é, duas fibras de aço, duas de vidro e duas poliméricas, enquanto apenas um tipo de fibra de cada material foi utilizado para o Grupo 2 ($f_{cm} \approx 90$ MPa). No caso do Grupo 1, por se tratar de um concreto de resistência próxima aos concretos usualmente utilizados nas construções, optou-se por essa metodologia para possibilitar a adoção de mais de um tipo de fibra conforme a disponibilidade local. Para os concretos mais resistentes (do Grupo 2) apenas um tipo de fibra de cada material foi utilizado.

Tabela 12. Tipos de fibra conforme a resistência do concreto.

Grupo	f_{cm}	Tipo de fibra
1	60 MPa	aço (c/ gancho)
		aço (corrugada)
		vidro-AR (filamento)
		vidro-AR (pultrudada)
		polimérica (monofilamento)
		polimérica (torcida)
2	90 MPa	aço (c/ gancho)
		vidro AR (filamento)
		polimérica (monofilamento)

Fonte: Aatoria própria.

As frações volumétricas de fibra estudadas foram definidas em 0,50%, 0,75% e 1,00% para todas as fibras, em conformidade com recomendações da literatura. Na Tabela 13, são apresentados os valores aproximados do consumo de fibra [kg/m³] correspondente às frações volumétricas para cada tipo de fibra.

Tabela 13. Consumo de fibras correspondente a cada teor [kg/m³]

Fibra	Teores de fibra [% em volume]		
	0,50	0,75	1,00
aço	40,0	60,0	80,0
vidro (pultrudada)	10,0	15,0	20,0
vidro (filamento)	13,5	20,0	27,0
polimérica	4,5	7,0	9,0

Fonte: Autoria própria.

A partir da definição dos materiais e dos parâmetros a serem avaliados, o programa experimental considerou 29 traços diferentes, identificados na Tabela 14 e na Figura 59. A nomenclatura dos traços é definida conforme o seguinte padrão:

$$f_{cm}\text{-Tipo de fibra-Teor}$$

Por exemplo, um concreto com resistência à compressão de 60 MPa, reforçado com fibras de vidro em filamento, com teor de 1,00% em volume, é representado pela seguinte nomenclatura:

$$60\text{-VIDFIL-1,00}$$

Para cada grupo de resistência, tem-se uma amostra de concreto simples, isto é, sem fibras, denominada “referência”. Esse caso foi utilizado como base para avaliar a contribuição das fibras sobre o comportamento mecânico do material.

Para cada traço do programa experimental, a consistência, o teor de ar incorporado e a densidade do concreto foram avaliados e registrados. Para avaliar o comportamento mecânico do material, os corpos de prova foram submetidos a ensaios de compressão por controle de deslocamento para obter a ductilidade proporcionada pela adição de

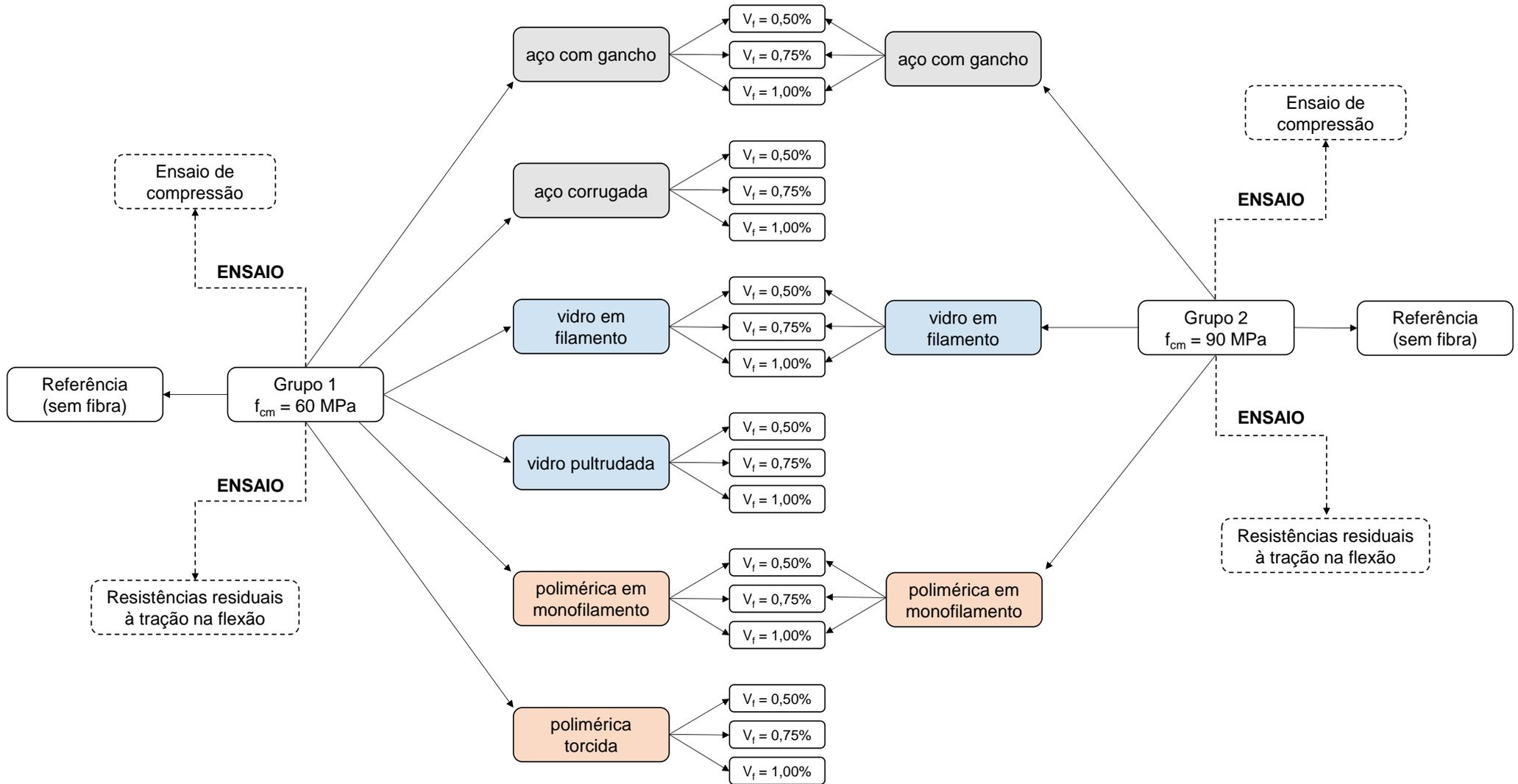
fibras na curva tensão-deformação completa e a ensaios de tração na flexão para determinação das resistências residuais à tração na flexão ($f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$) e do limite de proporcionalidade (f_L). Um resumo das propriedades avaliadas e das respectivas normas técnicas que apresentam as diretrizes para cada ensaio é apresentado na Tabela 15. A metodologia e os resultados de cada ensaio mecânico realizado ao longo do programa experimental estão descritos, separadamente, nos capítulos subsequentes.

Tabela 14. Traços do programa experimental.

Grupo	Traço	Protótipo	f_{cm} [MPa]	Tipo de fibra	Teor de fibra [% em volume]
1	1	60-REFERÊNCIA	60	-	0,00
	2	60-ACOGAN-0,50		aço (c/ gancho)	0,50
	3	60-ACOGAN-0,75	60	aço (c/ gancho)	0,75
	4	60-ACOGAN-1,00		aço (c/ gancho)	1,00
	5	60-ACOCOR-0,50		aço (corrugada)	0,50
	6	60-ACOCOR-0,75	60	aço (corrugada)	0,75
	7	60-ACOCOR-1,00		aço (corrugada)	1,00
	8	60-VIDFIL-0,50		vidro (filamento)	0,50
	9	60-VIDFIL-0,75	60	vidro (filamento)	0,75
	10	60-VIDFIL-1,00		vidro (filamento)	1,00
	11	60-VIDPUL-0,50		vidro (pultrudada)	0,50
	12	60-VIDPUL-0,75	60	vidro (pultrudada)	0,75
	13	60-VIDPUL-1,00		vidro (pultrudada)	1,00
	14	60-POLMON-0,50		polimérica (monofilamento)	0,50
	15	60-POLMON-0,75	60	polimérica (monofilamento)	0,75
	16	60-POLMON-1,00		polimérica (monofilamento)	1,00
	17	60-POLTOR-0,50		polimérica (torcida)	0,50
	18	60-POLTOR-0,75	60	polimérica (torcida)	0,75
	19	60-POLTOR-1,00		polimérica (torcida)	1,00
2	20	90-REFERÊNCIA	90	-	0,00
	21	90-ACOGAN-0,50		aço (c/ gancho)	0,50
	22	90-ACOGAN-0,75	90	aço (c/ gancho)	0,75
	23	90-ACOGAN-1,00		aço (c/ gancho)	1,00
	24	90-VIDFIL-0,50		vidro (filamento)	0,50
	25	90-VIDFIL-0,75	90	vidro (filamento)	0,75
	26	90-VIDFIL-1,00		vidro (filamento)	1,00
	27	90-POLMON-0,50		polimérica (monofilamento)	0,50
	28	90-POLMON-0,75	90	polimérica (monofilamento)	0,75
	29	90-POLMON-1,00		polimérica (monofilamento)	1,00

Fonte: Autoria própria.

Figura 59. Planejamento experimental



Fonte: Autoria própria.

Tabela 15. Propriedades do concreto reforçado com fibras avaliadas no programa experimental.

Grupo	Propriedades no estado fresco	Norma reguladora	Propriedades no estado endurecido	Norma reguladora
1	Consistência (slump)	ABNT NBR 16889 (2020)	Resistência à compressão	ABNT NBR 5739 (2018)
	Teor de ar incorporado	ABNT NBR 16887 (2020)	Resistências residuais à tração na flexão	ABNT NBR 16940 (2021)
	Densidade	ABNT NBR 9833 (2009)	-	-
2	Consistência (slump)	ABNT NBR 16889 (2020)	Resistência à compressão	ABNT NBR 5739 (2018)
	Teor de ar incorporado	ABNT NBR 16887 (2020)	Resistências residuais à tração na flexão	ABNT NBR 16940 (2021)
	Densidade	ABNT NBR 9833 (2009)	-	-

Fonte: Autoria própria.

Para cada traço definido na Tabela 14, quatro prismas e, pelo menos, seis corpos de prova cilíndricos foram moldados para a realização dos ensaios de tração na flexão (ABNT NBR 16940, 2021) e compressão, respectivamente.

4.2 MATERIAIS

4.2.1 Fibras

A adição de fibras pode afetar o comportamento e as características do concreto de diversas formas dependendo das propriedades físicas e geométricas da fibra, como sua composição química, resistência à ruptura, comprimento, diâmetro (ou diâmetro equivalente), conformações geométricas, dentre outros. Nesta pesquisa, utilizou-se diferentes formatos de fibras de aço, de vidro e poliméricas para o desenvolvimento do programa experimental com o objetivo de investigar a influência da adição dessas fibras sobre o comportamento mecânico do concreto. As características e propriedades de cada fibra estudada ao longo dessa pesquisa, fornecidas pelos fabricantes, são apresentadas a seguir.

4.2.1.1 Fibras de aço

i) Fibras com ganchos nas extremidades

As fibras com ganchos nas extremidades foram fornecidas pela empresa Belgo Bekaert Arames, e são patenteadas pelo nome DRAMIX® 3D 80/60BG. As fibras são interligadas, uma a uma, por uma cola hidrossolúvel, formando pentes de fibras, que se dispersam na matriz quando entram em contato com a água da mistura, conforme discutido no item 2.2.1 (Figura 60). As características da fibra são apresentadas na Tabela 16. De acordo com a ABNT NBR 15530:2019, essa fibra é classificada como pertencente ao grupo I, do Tipo A (ancoragem).

Figura 60. Fibras de aço com ganchos nas extremidades.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 16. Características das fibras de aço com ganchos nas extremidades.

Características da fibra de aço com ganchos nas extremidades	
Resistência à tração [MPa]	1225
Módulo de elasticidade [GPa]	200
Densidade [g/cm ³]	7,85
Comprimento [mm]	60
Diâmetro [mm]	0,75
Fator de forma	80

Fonte: Catálogo do fabricante.

ii) Fibra de aço corrugada

As fibras de aço corrugadas foram fornecidas pela MATCON SUPPLY (Figura 61), e suas características são apresentadas na Tabela 17. As fibras são produzidas com aço de baixo teor de carbono (teor máximo de 0,20%). Segundo a ABNT NBR 15530:2019, essa fibra é classificada como pertencente ao grupo III, do Tipo C (corrugada).

Tabela 17. Características da fibra de aço corrugada.

Características da fibra de aço corrugada	
Resistência à tração [MPa]	800
Módulo de elasticidade [GPa]	200
Densidade [g/cm ³]	7,85
Comprimento [mm]	40
Diâmetro equivalente [mm]	-
Fator de forma	40

Figura 61. Fibras de aço corrugadas.



Fonte: Catálogo do fabricante.

4.2.1.2 Fibras de vidro

i) Fibra de vidro-AR em filamento

As fibras de vidro em forma de filamento são produzidas a partir do vidro alcali-resistente (AR) com zircônia em sua composição, conforme exigido por diretrizes técnicas (ABNT NBR 16941:2021). As fibras foram produzidas e disponibilizadas pela Owens Corning, e são patenteadas sob o nome Anti-Crak[®] HP67/36 (Figura 62). As características dessa fibra são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18. Características da fibra de vidro-AR em filamento.

Características da fibra de vidro-AR em filamento	
Resistência à tração [MPa]	~ 1000-1700
Módulo de elasticidade [GPa]	72
Densidade [g/cm ³]	2,68
Comprimento [mm]	36
Diâmetro do filamento [μm]	19
Fator de forma	67

Figura 62. Fibras de vidro-AR em filamento.



Fonte: Catálogo do fabricante.

ii) Fibra de vidro-AR pultrudada

As fibras de vidro-AR pultrudadas (Figura 63) são fabricadas a partir de um reprocessamento de pultrusão do vidro-AR, no qual as fibras são banhadas em resinas que aprimoram seu desempenho mecânico no concreto. Algumas características dessa fibra são apresentadas na Tabela 19. Contudo, por se tratar de uma fibra ainda em desenvolvimento, poucas informações sobre suas propriedades estão disponíveis.

Tabela 19. Características da fibra de vidro-AR pultrudada.

Características da fibra de vidro-AR pultrudada	
Resistência à tração [MPa]	~ 800-1000
Módulo de elasticidade [GPa]	~ 40-45
Densidade [g/cm ³]	2,00
Comprimento [mm]	40
Diâmetro [mm]	-
Fator de forma	45

Figura 63. Fibras de vidro-AR pultrudada.



Fonte: Catálogo do fabricante.

4.2.1.3 Fibras poliméricas

i) Fibras poliméricas em monofilamento

As fibras poliméricas em monofilamento, chamadas KraTos[®], foram fabricadas pela KORDSA (Figura 64). O polímero-base das fibras é o polipropileno, e suas características são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20. Características da fibra polimérica em monofilamento.

Características da fibra polimérica em monofilamento	
Resistência à tração [MPa]	550
Módulo de elasticidade [GPa]	8,5
Densidade [g/cm ³]	0,91
Comprimento [mm]	54
Diâmetro do filamento [μm]	0,72
Polímero-base	Polipropileno

Figura 64. Fibras poliméricas em monofilamento.



Fonte: Catálogo do fabricante.

ii) Fibras poliméricas torcidas

As fibras poliméricas torcidas foram fabricadas pela empresa VIAPOL a partir de uma mistura de polietileno e polipropileno (Figura 65). As características da fibra, denominada TUF STRAND SF, são apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21. Características da fibra polimérica torcida.

Características da fibra polimérica torcida	
Resistência à tração [MPa]	~ 600-650
Módulo de elasticidade [GPa]	9,5
Densidade [g/cm ³]	0,92
Comprimento [mm]	51
Fator de forma	74
Polímero-base	Polipropileno / Polietileno

Figura 65. Fibras poliméricas torcida.



Fonte: Catálogo do fabricante.

4.2.1.4 Armazenamento das fibras

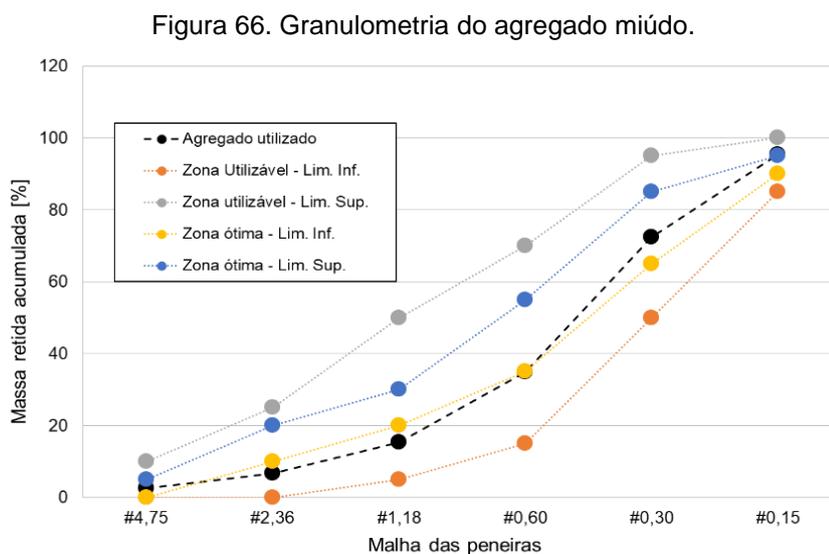
As fibras de aço com gancho e corrugadas foram disponibilizadas e armazenadas em sacos de papel Kraft, com 20kg/embalagem. As fibras de vidro filamentadas e as fibras

poliméricas torcidas foram armazenadas em sacos plásticos de 5kg e 4kg cada, respectivamente. As fibras de vidro pultrudadas e poliméricas em monofilamento, por sua vez, foram armazenadas em caixas de papelão.

4.2.2 Matriz de concreto

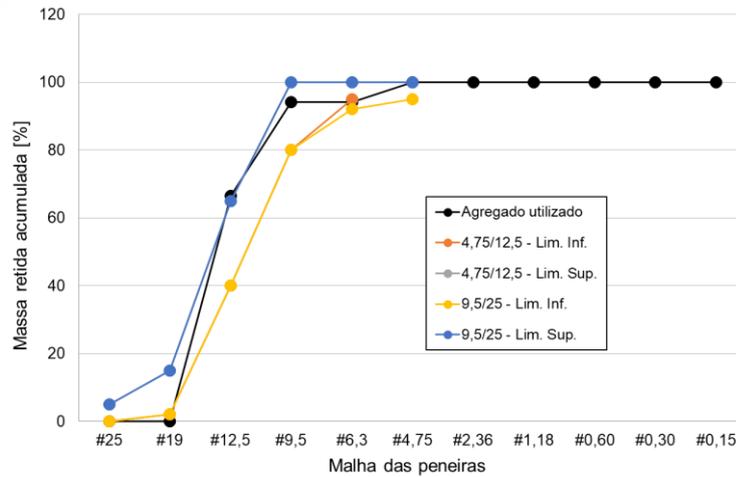
A matriz do concreto reforçado com fibras foi produzida a partir dos materiais constituintes do concreto convencional: cimento Portland, agregados miúdo e graúdo e água. No caso do Grupo 2, que contempla concretos com resistência à compressão próxima a 90 MPa, sílica ativa em pó também foi utilizada. Em ambos os grupos, um aditivo superplastificante foi utilizado para proporcionar consistência adequada à mistura, isto é, com um abatimento de tronco de cone entre 10 e 14 cm para o concreto reforçado com fibras.

O cimento Portland CPV das marcas Holcim e Liz, de alta resistência inicial (ARI), foram empregados para a confecção dos protótipos para possibilitar a rápida desforma dos corpos de prova. Areia natural de módulo de finura igual a 2,27 e dimensão máxima característica de 4,75 foi usada como agregado miúdo, enquanto a pedra britada com malha entre 4,8 e 9,5 mm (popularmente conhecida como brita nº 0 ou pedrisco) foi utilizada como agregado graúdo. A composição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo está apresentada na Figura 66 e na Figura 67, respectivamente. As propriedades dos agregados determinados por meio de ensaios em laboratório estão apresentadas na Tabela 22.



Fonte: Autoria própria.

Figura 67. Granulometria do agregado graúdo.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 22. Propriedades dos agregados

Propriedade	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Densidade na condição seca [g/cm ³]	2,60	2,79
Densidade na condição S.S.S. [g/cm ³]	2,59	2,85
Absorção de água [%]	2,32	0,22
Massa unitária [g/cm ³]	1,63	1,43

Fonte: Autoria própria.

Os agregados foram armazenados em caixas reforçadas de plástico de onde eram retiradas amostras para obtenção do teor de umidade. A sílica em pó, utilizada para os traços que contemplam o Grupo 2 e fornecida pela empresa Elkem, era armazenada em sacos de papel Kraft de 15 kg (Figura 68).

Figura 68. Armazenamento de materiais: (a) agregado graúdo e (b) sílica em pó.



Fonte: Autoria própria.

O aditivo superplastificante de alto desempenho MC-PowerFlow 4001, fornecido pela empresa MC-Bauchemie e recomendado para a produção de concretos com baixa quantidade de água, é um aditivo baseado na tecnologia de polímeros policarboxilatos e foi utilizado para proporcionar a consistência adequada à mistura (Figura 69).

Figura 69. Aditivo superplastificante de alto desempenho utilizado na confecção dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

Os traços para a produção do concreto reforçado com fibras com a resistência à compressão desejada foram definidos a partir de um levantamento da literatura realizado pelo autor. Esses traços foram, então, ajustados de acordo com as características dos materiais da região de São Carlos/SP para que a resistência à compressão atingisse os valores estabelecidos na pesquisa. Após a realização de diversos ensaios preliminares, definiu-se o traço da matriz de concreto de cada grupo conforme apresentado na Tabela 23. Uma vez que a quantidade de superplastificante adicionado à mistura varia para cada traço em função da quantidade de fibras, seu consumo é apresentado separadamente, na Tabela 24, em conjunto com as propriedades do concreto no estado fresco.

Tabela 23. Traços da matriz de concreto.

Grupo	Consumo de materiais [kg/m ³]					a/ag ¹
	Cimento	Sílica	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Água	
1	450	-	683	948	185	0,41
2	500	50	750	948	175	0,32

¹ Relação água/aglomerante

4.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

O processo de produção e moldagem ocorreu no Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) e no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da UFSCar, na cidade de São Carlos/SP. Todo o volume de concreto foi produzido em uma betoneira com capacidade de 400 litros. Antes de iniciar a produção, as paredes internas da betoneira eram sempre umedecidas para minimizar a perda de materiais que ficariam “presos” nas paredes internas do equipamento. Passada esta etapa, a produção do concreto reforçado com fibras seguiu a metodologia descrita abaixo, dividida em sete etapas (Figura 70).

1. Adicionava-se cerca de 80% do todo o volume de água previsto para produção do concreto;
2. Adicionava-se todo o agregado graúdo e o material da betoneira era misturado até que todo o agregado estivesse umedecido;
3. Todo o cimento, e a sílica em pó no caso do Grupo 2, era adicionado à betoneira em pequenas partes para garantir que as partículas finas do cimento e da sílica entrassem em contato com a água de amassamento;
4. Após a adição de todo o cimento, a pasta formada com o agregado graúdo era misturada por cerca de trinta segundos;
5. Passado o intervalo da etapa anterior, toda a areia era adicionada à betoneira e o material era misturado até a formação de um concreto homogêneo. Nessa etapa, em algumas ocasiões, a betoneira era desligada e, utilizando uma colher de pedreiro, eventuais materiais “presos” nas paredes internas do equipamento eram misturados manualmente.
6. Após a inspeção visual da formação do concreto na etapa anterior, as fibras eram adicionadas manual e cuidadosamente à betoneira para evitar a formação de ouriços e aglomerados de fibras. Destaca-se que, como as fibras de aço com gancho foram fornecidas em pentes de fibras coladas por meio de uma cola hidrossolúvel, elas eram adicionadas no início do processo de produção junto com o agregado graúdo e a água inicial. Optou-se por essa ordem no caso das fibras de aço coladas para que a água

inicial otimizasse a dispersão das fibras no concreto. Os pequenos impactos entre os pentes de fibras e o agregado graúdo auxiliavam no processo de descolamento das fibras. No entanto, o intervalo de tempo dessa etapa deve ser cuidadosamente observado para evitar que os agregados danifiquem as fibras (LERCH *et al.*, 2018).

7. Passadas essas etapas, o restante da água era adicionado à betoneira em conjunto com o superplastificante, e o concreto era misturado por, aproximadamente, três minutos. Deve-se ressaltar que ao longo de todas as etapas, pequenas parcelas da água restante eram adicionadas à mistura para auxiliar na mistura dos materiais e reduzir a quantidade de material preso nas paredes internas. Por se tratar de um concreto de alta resistência, a quantidade de água de amassamento é pequena e dificulta a mistura dos materiais e, principalmente, da fibra no interior da betoneira.

Figura 70. Separação dos materiais para o início da moldagem.



Fonte: Autoria própria.

Após a produção do concreto reforçado com fibras, a consistência do material era avaliada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump*). Nos casos em que o concreto estivesse muito seco, isto é, com um abatimento inferior a oito centímetros, adicionava-se mais aditivo superplastificante à mistura e o concreto era misturado por, aproximadamente, mais um minuto, e o processo se repetia.

Determinada a consistência do concreto, determinava-se a massa específica do material (ABNT NBR 9833, 2008), o teor de ar incorporado no concreto por meio do método pressométrico (ABNT NBR 16887, 2020) e seguia-se para o processo de moldagem dos corpos de prova (Figura 71).

Figura 71. Propriedades do concreto no estado fresco: consistência e teor de ar incorporado no concreto.



Fonte: A autoria própria.

Para a moldagem dos corpos de prova, foram utilizados moldes de madeira e de plástico para os prismas e cilindros, respectivamente (Figura 72). Em função do comprimento das fibras, os prismas possuíam dimensões de 15x15x55 cm enquanto os cilindros possuíam 10 cm de diâmetro de 20 cm de altura ($\phi 10 \times 20$). O processo de moldagem dos prismas ocorreu de acordo com os procedimentos descritos na ABNT NBR 16940 (2021) permitindo proporcionar uma orientação aleatória das fibras.

Figura 72. Moldes utilizados para os corpos de prova.



Fonte: A autoria própria.

O adensamento do concreto foi realizado em uma mesa vibratória com vibrações que duravam, aproximadamente, trinta segundos (Figura 73). Essa metodologia foi adotada uma vez que a utilização de um vibrador de imersão pode provocar um afastamento entre as fibras e, conseqüentemente, uma concentração de fibras em outra região do corpo de prova.

Figura 73. Adensamento do concreto em mesa vibratória.



Fonte: Autoria própria.

Após o adensamento, os corpos de prova eram cobertos por plástico filme por, pelo menos, doze horas, ou até que fosse possível a retirada as formas dos corpos de prova, para evitar a perda de água por evaporação nas horas iniciais de hidratação do cimento.

Figura 74. Corpos de prova cobertos com plástico para evitar perda de água por evaporação.



Fonte: Autoria própria.

Atingida as doze horas, os corpos de prova eram desmoldados e levados para a cura submersa em um tanque com água saturada em cal (Figura 75). Os corpos de prova permaneciam no tanque durante seis dias e, após esse período, os mesmos eram retirados e curados ao ar livre até a data do ensaio. Esse processo foi necessário devido ao grande volume de concreto produzido ao longo do programa experimental e o espaço disponível para a cura dos corpos de prova, associado aos dias disponíveis de trabalho, prazo e transporte até o local de ensaio.

Figura 75. Cura submersa dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

O entalhe nos prismas para o ensaio de tração na flexão em três pontos foi realizado na data mais próxima ao ensaio possível por meio de uma serra mármore, e os corpos de prova cilíndricos foram retificados para garantir a planicidade das extremidades para o ensaio de compressão (Figura 76).

Figura 76. Preparação dos corpos de prova para ensaio: (a) retífica dos corpos de prova cilíndricos e (b) entalhe nos prismas.



Fonte: Autoria própria.

Finalizado esse processo, registrava-se as dimensões de cada corpo de prova e os mesmos eram transportados até os locais de ensaio (Figura 77): os ensaios de tração na flexão com os prismas foram realizados no laboratório da Evolução Engenharia, na cidade de Valinhos/SP; e os ensaios de compressão foram conduzidos no Laboratório de Mecânica das Rochas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP) e no Laboratório de Tecnologia de Rochas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), na cidade de Belo Horizonte/MG.

Figura 77. (a) Transporte dos prismas; (b) corpos de prova aguardando a data de ensaio.



Fonte: Autoria própria.

4.4 PROPRIEDADES DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS NO ESTADO FRESCO

As propriedades do concreto reforçado com fibras no estado fresco avaliadas durante o processo de produção do material, quais sejam, abatimento do tronco de cone

(*slump test*), teor de ar incorporado e massa específica, estão apresentadas na Tabela 24 e são discutidas separadamente.

Tabela 24. Propriedades do concreto reforçado com fibras no estado fresco.

Grupo	Traço	Abatimento [cm]	Teor de ar incorporado [%]	Massa específica [kg/m ³]	SP ¹ [% do cimento]
Grupo 1	60-REFERÊNCIA	12,0	1,9	2259	0,10
	60-ACOGAN-0,50	12,9	2,2	2282	0,30
	60-ACOGAN-0,75	16,5	1,9	2304	0,40
	60-ACOGAN-1,00	14,0	1,5	2351	0,40
	60-ACOCOR-0,50	8,0	1,2	2274	0,25
	60-ACOCOR-0,75	17,5	2,3	2263	0,25
	60-ACOCOR-1,00	14,0	1,5	2238	0,25
	60-VIDFIL-0,50	10,0	2,1	2211	0,15
	60-VIDFIL-0,75	9,5	2,2	2206	0,20
	60-VIDFIL-1,00	12,0	2,0	2215	0,25
	60-VIDPUL-0,50	15,5	1,8	2202	0,20
	60-VIDPUL-0,75	14,5	1,4	2232	0,20
	60-VIDPUL-1,00	16,5	1,6	2219	0,20
	60-POLMON-0,50	15,5	1,8	2204	0,10
	60-POLMON-0,75	14,5	1,5	2183	0,10
	60-POLMON-1,00	10,5	2,0	2173	0,10
	60-POLTOR-0,50	15,0	2,3	2226	0,175
	60-POLTOR-0,75	9,5	2,0	2226	0,15
60-POLTOR-1,00	11,0	1,6	2245	0,20	
Grupo 2	90-REFERÊNCIA	5,0	0,7	2284	0,20
	90-ACOGAN-0,50	15,5	2,4	2250	0,40
	90-ACOGAN-0,75	20,0	2,3	2288	0,40
	90-ACOGAN-1,00	13,0	2,0	2293	0,50
	90-VIDFIL-0,50	13,5	2,9	2226	0,35
	90-VIDFIL-0,75	13,0	2,7	2221	0,30
	90-VIDFIL-1,00	10,0	2,5	2265	0,40
	90-POLMON-0,50	12,0	2,6	2191	0,30
	90-POLMON-0,75	8,0	1,9	2224	0,30
90-POLMON-1,00	17,0	2,0	2195	0,40	

¹ Superplastificante: indicado em porcentagem (%) do consumo de cimento

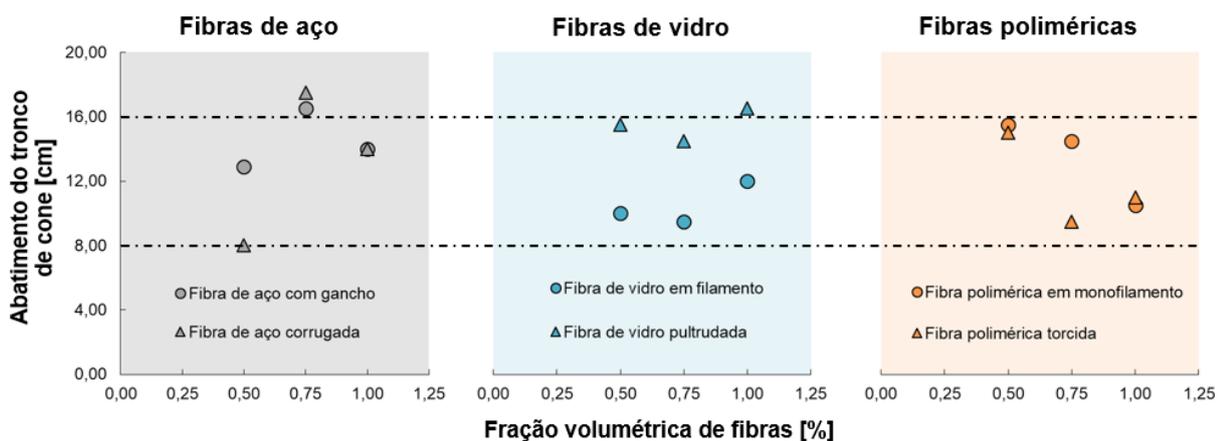
Fonte: Autoria própria.

4.4.1 Consistência (*slump test*)

A consistência avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) do concreto é diretamente afetada pela adição de fibras. Quanto maior é o teor de fibra utilizado, menor tende a ser o abatimento do tronco de cone de concreto, uma vez que as fibras reduzem a fluidez do material. A influência exata de cada tipo de fibra na redução do abatimento do tronco de cone envolve parâmetros que dificilmente são mensurados, como sua dispersão e orientação na mistura (SKADINS; CERVENKA, 2023). Os traços com maiores quantidades de fibra apresentaram, em alguns casos, um abatimento maior do que traços com menores volumes da mesma fibra. A maioria dos casos em que isso ocorreu engloba os traços nos quais foi necessário adicionar mais superplastificante após a primeira avaliação da consistência. No entanto, deve-se destacar que o ensaio de abatimento do tronco de cone pode não ser um bom índice de consistência para o concreto reforçado com fibras, uma vez que um CRF com baixo abatimento do tronco de cone ainda pode apresentar uma boa trabalhabilidade quando vibrado.

Em geral, para os traços do Grupo 1, o abatimento do tronco de cone ficou entre 8 e 16 cm (Figura 78). As fibras de aço e de vidro pultrudadas apresentaram maiores valores do abatimento, seguidas das fibras poliméricas e das fibras de vidro em filamento.

Figura 78. Abatimento do tronco de cone dos traços do Grupo 1.

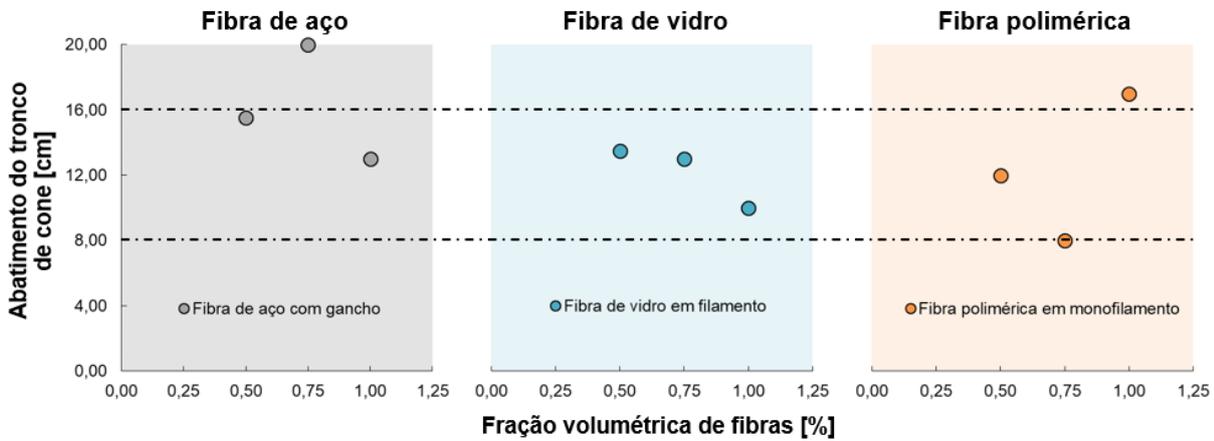


Fonte: Autoria própria.

Entre os traços do Grupo 2, destaca-se o traço 90-AÇOGAN-0,75, cujo abatimento de tronco de cone foi mais elevado que os demais, com 20 cm (Figura 79). Os demais traços também apresentaram um abatimento entre 8 e 16 cm, análogo ao Grupo 1.

Ressalta-se que efeitos de exsudação ou segregação dos materiais não foram observados nos traços moldados.

Figura 79. Abatimento do tronco de cone dos traços do Grupo 2.



Fonte: Autoria própria.

4.4.2 Teor de ar incorporado no concreto

A adição de fibras reduz a trabalhabilidade e permite maior incorporação de ar durante a mistura, o que torna o material mais poroso, elevando o teor de ar incorporado e, conseqüentemente, afetando suas propriedades mecânicas (SHI *et al.*, 2020), como a resistência à compressão. O aumento do teor de ar incorporado em relação traço de referência (sem fibras) devido à adição de fibras no concreto é claramente observado nos concretos com sílica ativa em sua composição (Grupo 2), apresentado na Figura 81. No Grupo 1, por outro lado, o teor de ar incorporado apresentou pequenas variações quando comparado ao traço de referência. Em alguns traços com fibra, inclusive, o teor de ar incorporado foi inferior ao traço de referência (Figura 80). Em todos os casos, o teor de ar incorporado no concreto foi inferior a 3,0%.

É importante destacar o efeito da sílica ativa sobre essa propriedade no concreto em estado fresco. Comparando-se os traços de referência dos Grupos 1 e 2, nota-se o teor de ar incorporado bem inferior do Grupo 2. Isso ocorre devido a maior quantidade de cimento na mistura como também às pequenas partículas da sílica ativa (que são inferiores às partículas de cimento) que preenchem uma parcela dos vazios que não é preenchida no Grupo 1.

Figura 80. Teor de ar incorporado dos traços do Grupo 1.

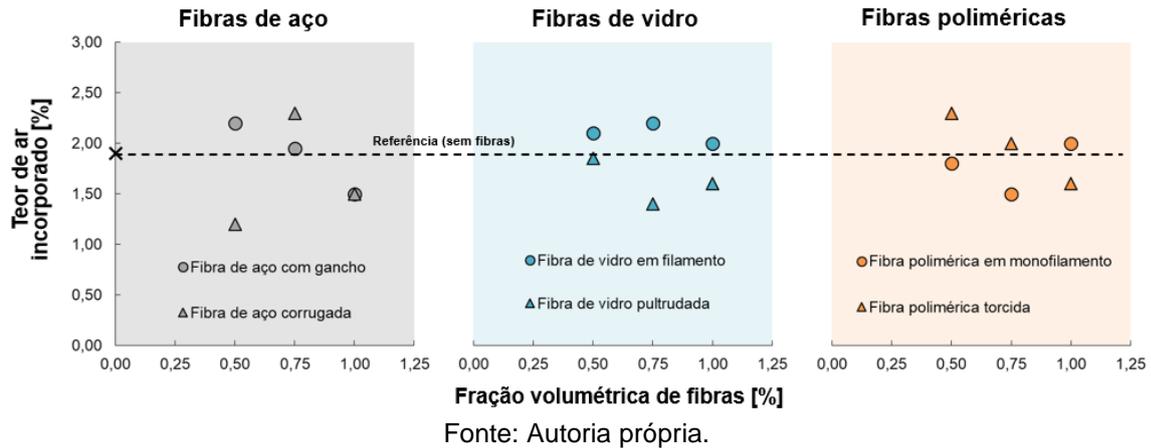
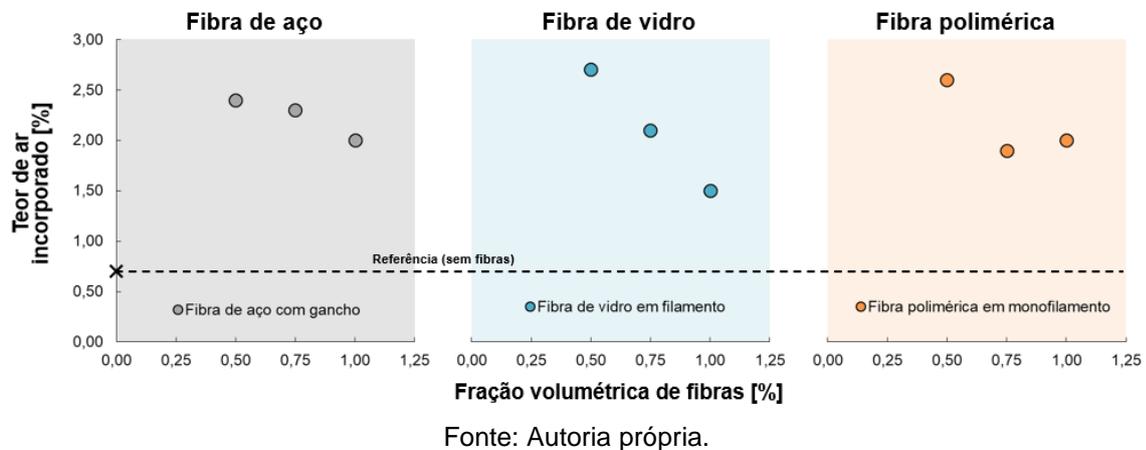


Figura 81. Teor de ar incorporado dos traços do Grupo 2.



4.4.3 Massa específica do concreto

A adição de fibras apresentou uma pequena influência na massa específica do concreto quando comparado com o traço de referência, com diferenças inferiores a 5% nos dois grupos estudados (Figura 82 e Figura 83). No entanto, deve-se destacar que, no caso do Grupo 2, a massa específica foi sempre igual ou inferior ao traço de referência. O teor de ar incorporado devido à adição de fibras nesse grupo é responsável pela redução na massa específica devido à maior quantidade de vazios na mistura (SHI *et al.*, 2020). De forma análoga, esse fato também pode ser notado no caso da fibra de aço com gancho do Grupo 1: na medida em que se aumenta o volume de fibras no compósito, maior é o teor de ar incorporado na mistura e, conseqüentemente, tem-se um aumento em sua massa específica.

Figura 82. Massa específica dos traços do Grupo 1.

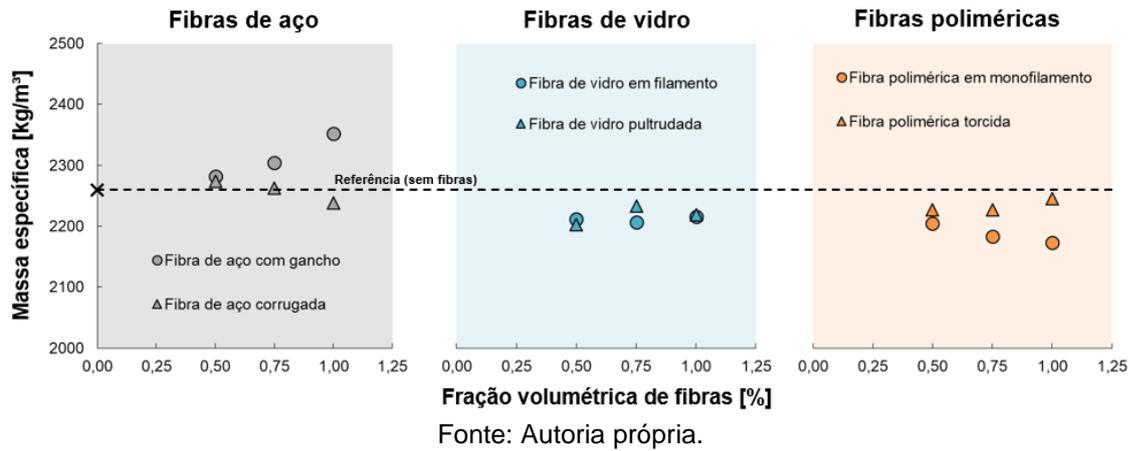
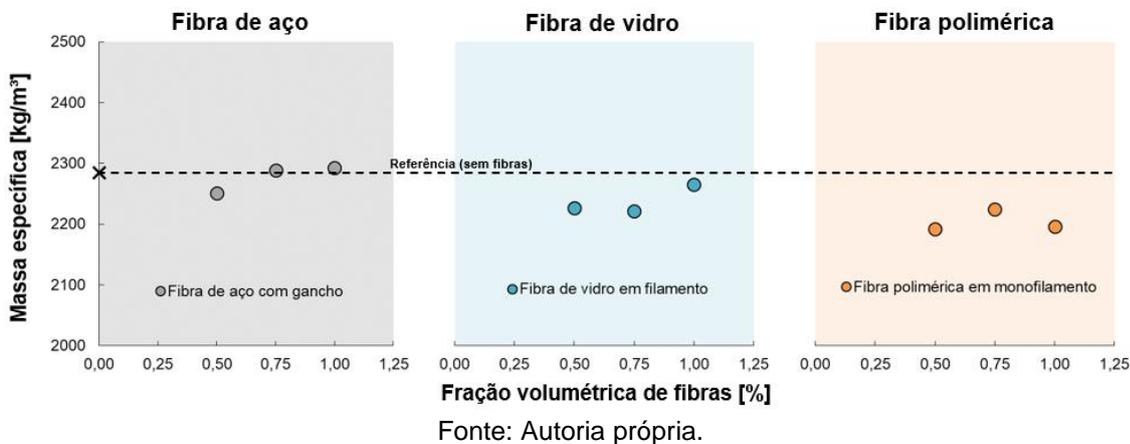


Figura 83. Massa específica dos traços do Grupo 2.



4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados o delineamento e o programa experimental da pesquisa, contemplando as propriedades dos materiais utilizados e os ensaios realizados para atingir o objetivo da pesquisa. As etapas de produção e moldagem dos corpos de prova do concreto de alta resistência reforçado com fibras também foram descritas detalhadamente, as quais foram conduzidas de modo a evitar possíveis influências de fatores externos.

Durante o processo de produção do concreto reforçado com fibras, as propriedades no estado fresco foram avaliadas e discutidas neste capítulo. Em geral, a consistência do concreto avaliada por meio do abatimento do tronco de cone (*slump test*) variou entre 8 e 16 cm, e o teor de ar incorporado de todos os traços investigados foi inferior

a 3,0%. A massa específica praticamente não sofreu alterações significativas quando comparado ao concreto sem fibras.

Após a moldagem dos corpos de prova e passado o período de cura do concreto, os corpos de prova eram transportados até o local de realização dos ensaios: Evolução Engenharia, na cidade de Valinhos/SP, para os ensaios de flexão em três pontos; Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), em São Carlos/SP e Universidade Federal de Minas Gerais, na cidade de Belo Horizonte, para os ensaios de compressão por controle de deslocamento.

Nos Capítulos 5 e 6 são apresentados e discutidos a metodologia e os resultados dos ensaios dos ensaios de compressão por controle de deslocamento e dos ensaios de flexão em três pontos, respectivamente.

5

Comportamento do CARRF na compressão

Neste capítulo são apresentados a metodologia e os resultados dos ensaios de compressão por controle de deslocamento dos traços contemplados no programa experimental. As propriedades mecânicas na compressão como resistência, módulo de elasticidade, deformação de pico, e tenacidade são discutidas frente ao tipo e fração volumétrica de fibras de cada traço. Modelos constitutivos que simulam o comportamento do concreto reforçado com fibras na compressão são propostos para cada fibra estudada e comparados com modelos da literatura.

5.1 METODOLOGIA DE ENSAIO

Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina servo-hidráulica da MTS (*Materials Testing System*), modelo 815, com capacidade de 2300 kN, por

controle de deslocamento (Figura 84). A elevada rigidez da MTS815 minimiza a quantidade de energia de deformação que é transferida ao corpo de prova no momento de sua ruptura. Esse aspecto é de extrema importância para avaliar o comportamento pós-pico de materiais frágeis, como o concreto, sobre os quais a integridade do ensaio depende, entre outros parâmetros, da perda de estabilidade do ensaio durante a ruptura do corpo de prova. Após diversos ensaios preliminares para determinar a taxa de deslocamento para a obtenção da curva tensão-deformação completa sem que o ensaio se tornasse demasiadamente longo, e considerando os valores adotados por outros autores (Tabela 7 do Capítulo 3), adotou-se uma taxa de deslocamento constante de 0,003 mm/s.

Figura 84. Máquina MTS815 utilizada nos ensaios de compressão.



Fonte: Autoria própria.

Sabe-se que os extensômetros elétricos de resistência (*strain gauges*) e compressômetros são satisfatórios nas medições de deformações até o carregamento atingir a carga máxima resistida pelo material, uma vez que o corpo de prova não apresenta deformações significativas nesse estágio (MANSUR; WEE; CHIN, 1995). No entanto, as deformações e fissuras que surgem no corpo de prova após o mesmo atingir sua resistência podem afetar as leituras dos compressômetros e provocar a falha nos extensômetros elétricos de resistência devido à sua elevada sensibilidade. Ademais, a ruptura explosiva do concreto, principalmente do concreto de alta resistência, podem danificar os dispositivos instalados externamente ao corpo de prova.

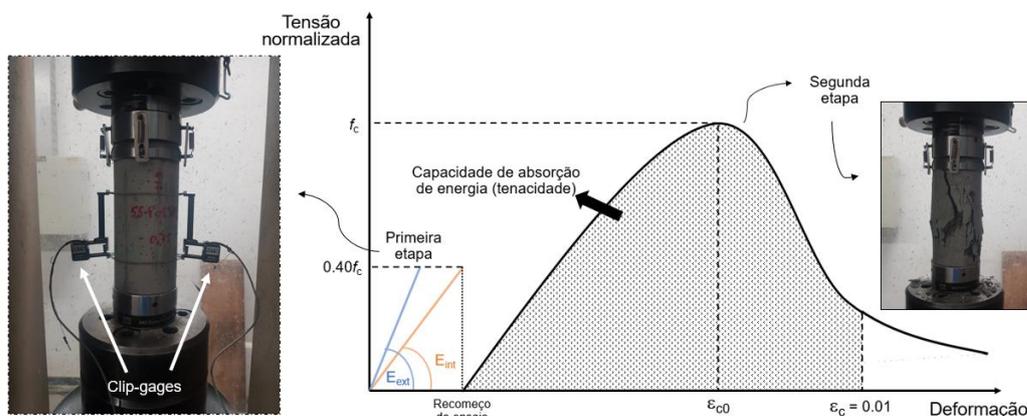
Nesse contexto, para avaliar o comportamento pós-pico do material, o deslocamento ao longo do ensaio foi medido pelo transdutor interno do equipamento. Essa medida, no entanto, envolve, além da deformação do corpo de prova, as deformações dos pratos da prensa e aquelas concentradas nas extremidades do corpo de prova. Para transformar a deformação medida pela prensa na deformação real do corpo de prova, isto é, para subtrair as deformações indesejadas medidas pelo transdutor interno do equipamento, Mansur; Wee e Chin (1995) propuseram o seguinte coeficiente de correção (Equação 5.1):

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{int} - \left(\frac{1}{E_{int}} - \frac{1}{E_{ext}} \right) \quad (5.1)$$

onde ε_c é a deformação real do concreto; ε_{int} é a deformação medida pelo transdutor interno da máquina; E_{int} e E_{ext} são os módulos de elasticidade medidos pelos transdutores interno e externo, respectivamente.

Os ensaios de compressão foram divididos em duas etapas (Figura 85): inicialmente, a carga era aplicada sobre o corpo de prova até atingir próximo de 40% da carga de ruptura (conhecida previamente) com dois transdutores externos (*clip-gages*) posicionados na região central do corpo de prova. Após a carga atingir esse valor, o ensaio era finalizado e os dados referentes à leitura do transdutor interno extraídos. Nessa etapa, determinava-se os parâmetros E_{int} e E_{ext} (Equação 5.1). Finalizada a primeira etapa, os transdutores externos eram retirados e o ensaio era recomeçado desde o início para a obtenção da curva tensão-deformação completa (segunda etapa).

Figura 85. Metodologia dos ensaios de compressão.



Fonte: Autoria própria.

A deformação máxima considerada para o cálculo da tenacidade do material (área sob a curva tensão-deformação) varia de acordo com a pesquisa e o sistema de aquisição de dados ao longo do ensaio, sendo encontrado diferentes valores na literatura (HSU; HSU, 1994; MANSUR; CHIN; WEE, 1999; MARAR; EREN; YITMENA, 2011; OTTER; NAAMAN, 1988; SUN *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2020; ZHOU *et al.*, 2015). Na presente pesquisa, a tenacidade foi determinada até o corpo de prova atingir a deformação de 0,01 (Figura 854) a partir da curva tensão normalizada vs deformação.

Ressalta-se que a metodologia descrita tem sido utilizada com êxito por outros autores da literatura para avaliar o comportamento pós-pico do concreto (LEE *et al.*, 2018a; SHAO; BILLINGTON, 2020; SHI *et al.*, 2020; ZHOU; PAN; LEUNG, 2015).

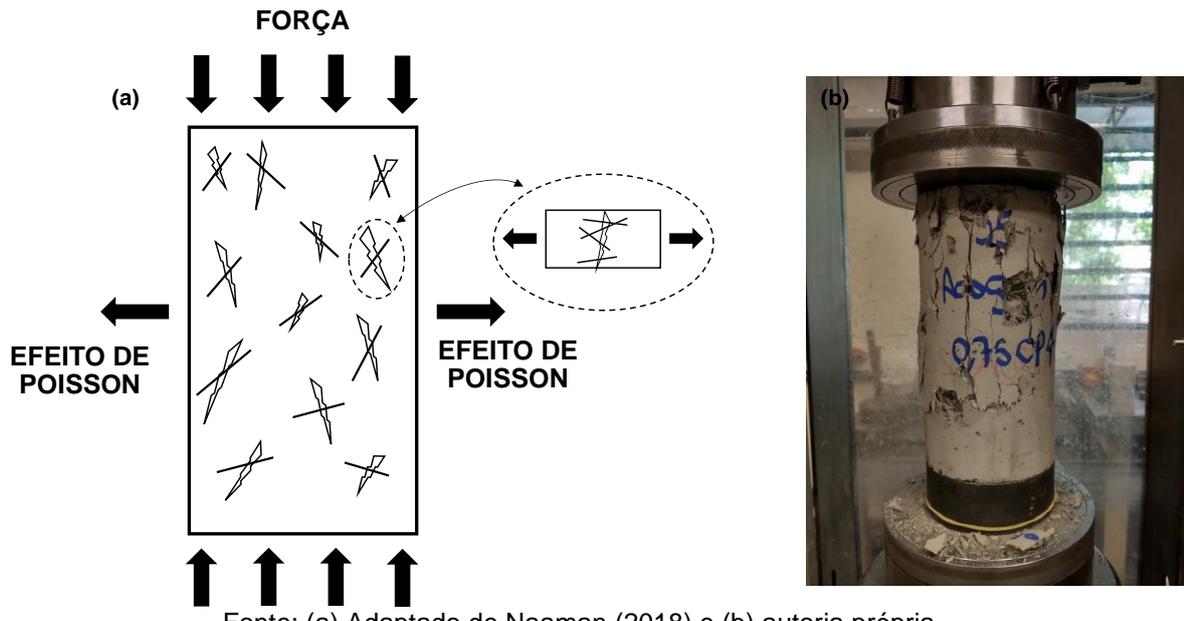
5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.2.1 Grupo 1

As propriedades mecânicas associadas ao comportamento na compressão obtidos nos ensaios com o Grupo 1 estão resumidas na Tabela 25 e cada uma delas é discutida separadamente em tópicos subsequentes. Ressalta-se que o valor de cada parâmetro corresponde à média de três corpos de prova ($n = 3$), exceto nos casos indicados na tabela.

Em geral, quanto maior é a quantidade de fibras que se adiciona ao concreto, mais dúctil é seu comportamento na compressão, conforme explicado no Capítulo 3. Sabe-se que a principal atuação das fibras ocorre quando o concreto é submetido a tensões de tração, das quais surgem fissuras que são “costuradas” pelas fibras, que atuam como pontes de transferência de tensão e impedem sua propagação. Nesse contexto, é essencial a compreensão do surgimento de tensões de tração no corpo de prova devido ao efeito de Poisson, motivo pelo qual a adição de fibras ao concreto proporciona ductilidade na compressão (Figura 86).

Figura 86. Efeito Poisson em ensaios de compressão.



Fonte: (a) Adaptado de Naaman (2018) e (b) autoria própria.

Tabela 25. Resultados dos ensaios de compressão (Grupo 1).

Traço	Propriedades mecânicas dos ensaios de compressão*				
	f_{cm} [MPa]	E_{cm} [MPa]	$\varepsilon_{c0,m}$ [‰]	TI [J/m ³]	TR
60-REFERÊNCIA	62,34 (2,07)	39470 ² (504)	2,51 ² (0,10)	4102 ¹	1,00
60-ACOGAN-0,50	65,50 (3,74)	47984 (5160)	2,61 (0,16)	7098 (71)	1,73
60-ACOGAN-0,75	70,25 (0,63)	42207 (2487)	3,00 (0,24)	7323 (413)	1,79
60-ACOGAN-1,00	71,55 (1,82)	41623 ² (933)	3,17 ² (0,30)	7680 ² (251)	1,87
60-ACOCOR-0,50	57,27 (1,05)	48446 (3935)	2,10 (0,23)	6206 (97)	1,51
60-ACOCOR-0,75	61,28 (0,55)	32952 (2544)	2,83 (0,17)	6591 (380)	1,61
60-ACOCOR-1,00	55,25 (1,06)	35598 (3843)	3,05 (0,24)	7622 (460)	1,86
60-VIDFIL-0,50	53,42 (1,58)	38403 ¹	2,18 ¹	4320 ¹	1,05
60-VIDFIL-0,75	54,32 (1,05)	32515 (1640)	2,86 (0,12)	5869 (245)	1,43
60-VIDFIL-1,00	53,58 (0,96)	29459 (812)	3,04 (0,11)	5721 (395)	1,39
60-VIDPUL-0,50	54,84 (1,41)	35852 (1579)	2,34 (0,05)	5707 (701)	1,39
60-VIDPUL-0,75	54,66 (0,79)	34076 ² (1)	2,50 ² (0,07)	6655 ² (126)	1,63
60-VIDPUL-1,00	49,03 (0,67)	34900 (2700)	2,18 (0,15)	6325 (733)	1,54
60-POLMON-0,50	48,72 ² (0,56)	36411 ² (4554)	2,10 ² (0,30)	5435 ² (271)	1,32
60-POLMON-0,75	48,69 (1,16)	34744 ² (4062)	2,19 ² (0,18)	5234 ² (170)	1,28
60-POLMON-1,00	48,48 (0,50)	56498 (890)	1,62 (0,02)	5849 (160)	1,43
60-POLTOR-0,50	68,12 (3,10)	36163 (4930)	2,44 (0,36)	4371 (259)	1,07
60-POLTOR-0,75	65,57 (1,81)	43311 (3098)	2,19 (0,06)	5266 (164)	1,28
60-POLTOR-1,00	64,74 (0,75)	43485 (5737)	2,10 (0,22)	5116 (194)	1,25

Notas:

*Desvio padrão entre parênteses.

¹Resultado referente a um corpo de prova.

²Resultado referente a dois corpos de prova.

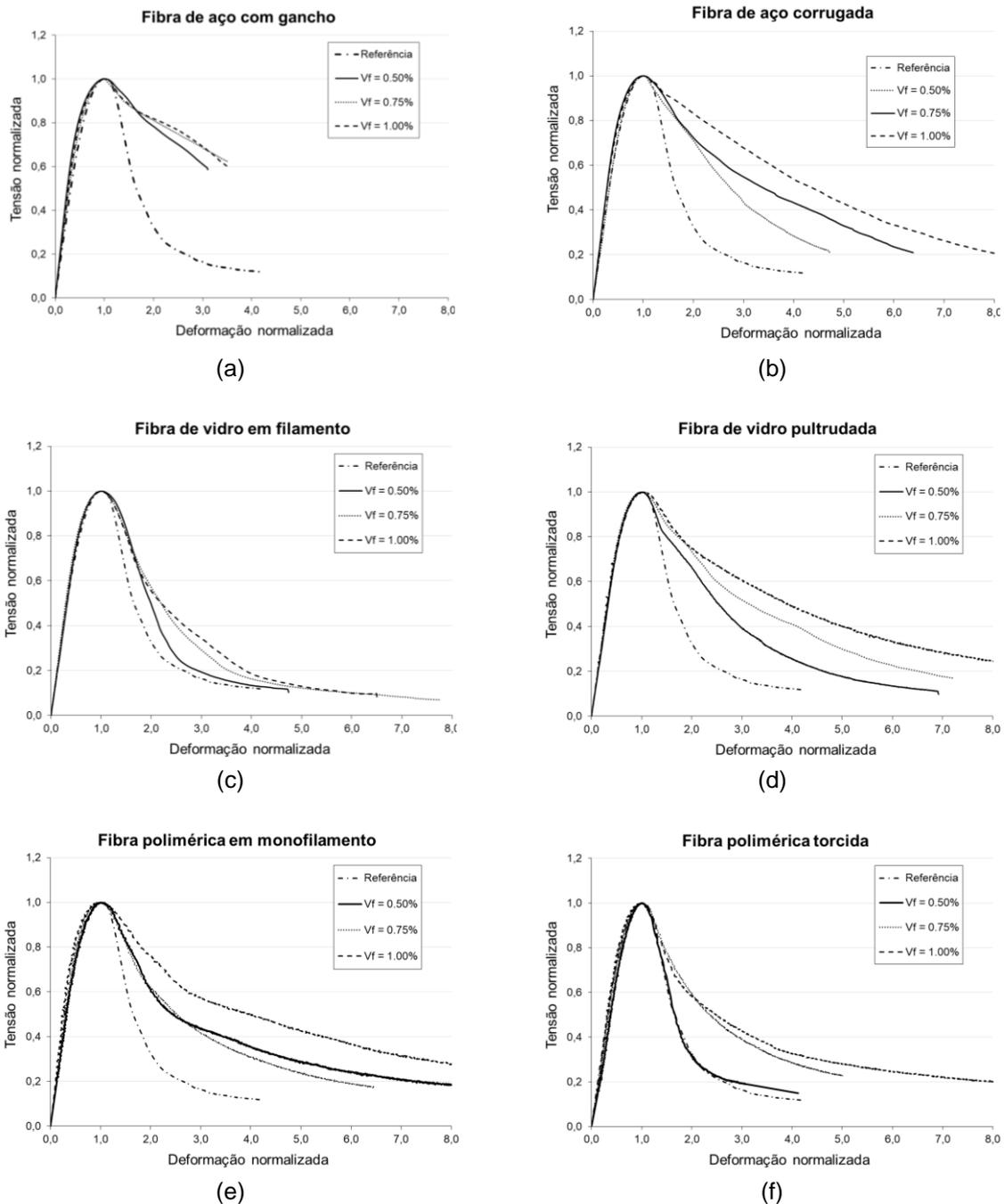
f_{cm} : resistência à compressão; E_{cm} : módulo de elasticidade; $\varepsilon_{c0,m}$: deformação de pico; TI: índice de tenacidade; TR: tenacidade relativa ($TI_{traço}/TI_{referência}$)

Na Figura 876, são apresentadas as curvas tensão-deformação normalizadas dos traços do Grupo 1. É possível observar o efeito positivo da fração volumétrica de fibras sobre a ductilidade do concreto nos traços com fibras de aço corrugadas, com fibras de vidro e fibras poliméricas torcidas. As fibras poliméricas em monofilamento proporcionaram um comportamento mais dúctil com $V_f = 0,50\%$ do que $V_f = 0,75\%$, provavelmente causado pelo maior alinhamento das fibras na direção ortogonal aos planos de falha do corpo de prova. Devido a uma falha durante a aquisição de dados com os ensaios dos corpos de prova com fibras de aço com gancho, a curva foi traçada até próximo de 60% da resistência no trecho descendente da curva. Apesar disso, nota-se uma grande contribuição das fibras sobre a ductilidade do concreto em relação ao traço de referência, com destaque para as frações volumétricas de 0,75% e 1,00%.

O ramo ascendente da curva é praticamente igual para todos os casos para as curvas tensão-deformação normalizadas. Embora não tenha sido definido um ponto exato para avaliar a deformação na ruptura no ramo descendente, é clara a influência do teor de fibra no aumento desse parâmetro nos traços com fibras de aço corrugada, fibras de vidro pultrudadas e fibras poliméricas monofiladas. Nos casos dos concretos reforçados com fibras poliméricas torcidas e fibras de vidro filamentadas, esse efeito é visível a partir de $V_f = 0,75\%$.

O comportamento pós-pico é caracterizado por uma curva que tende a uma assíntota em um nível de tensão entre 15 e 20% da tensão máxima. Um aspecto que deve ser destacado no trecho pós-pico é o ponto de inflexão da curva no ramo descendente. De acordo com Naaman (2018), infere-se que o ponto de inflexão representa o ponto no qual o modo de falha do corpo de prova é alterado de *split-tension* (em formato cônico) para uma ruptura por cisalhamento. No caso das fibras de aço corrugadas e de vidro pultrudadas, esse ponto ocorre logo após o corpo de prova atingir a resistência, em torno de 80% da tensão máxima, enquanto o ponto de inflexão das curvas dos traços com fibras poliméricas de ambos os tipos e fibra de vidro filamentada é um ponto em torno de 60% e 70% da força máxima.

Figura 87. Curvas tensão-deformação normalizadas na compressão dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.



Fonte: Autoria própria.

As fibras de vidro filamentadas e as fibras poliméricas torcidas apresentaram os piores desempenhos em termos de tenacidade. No caso das fibras de vidro, esse fato pode estar associado ao deslizamento entre fios que formam a fibra, uma vez que o fio interno não está em contato com a matriz. No caso das fibras poliméricas, a fraca aderência entre a fibra e a matriz de concreto pode ter contribuído para o baixo desempenho. As curvas associadas à fração volumétrica de 0,50% desses traços

quase sobrepueram a curva do traço de referência, indicando uma influência desprezível sobre o comportamento do concreto na compressão. As fibras poliméricas, em geral, além da fraca aderência com a matriz de concreto, possuem um baixo módulo de elasticidade quando comparado ao módulo do concreto. Nesse sentido, sua contribuição é mais relevante quando as fissuras atingem maiores dimensões (CARNOVALE; VECCHIO, 2014; NAAMAN, 2018; NANA *et al.*, 2021).

Para fim de comparação, os mesmos tipos de curvas da Figura 875 foram construídos novamente na Figura 887, separadas de acordo com a fração volumétrica de fibra. Para a fração volumétrica de fibras de 1,00%, destaca-se as curvas dos traços com fibras de vidro pultrudadas e com fibras poliméricas em monofilamento, cujo desempenho é similar aos concretos reforçados com fibras de aço. As curvas tensão-deformação não normalizadas estão apresentadas na Figura 898.

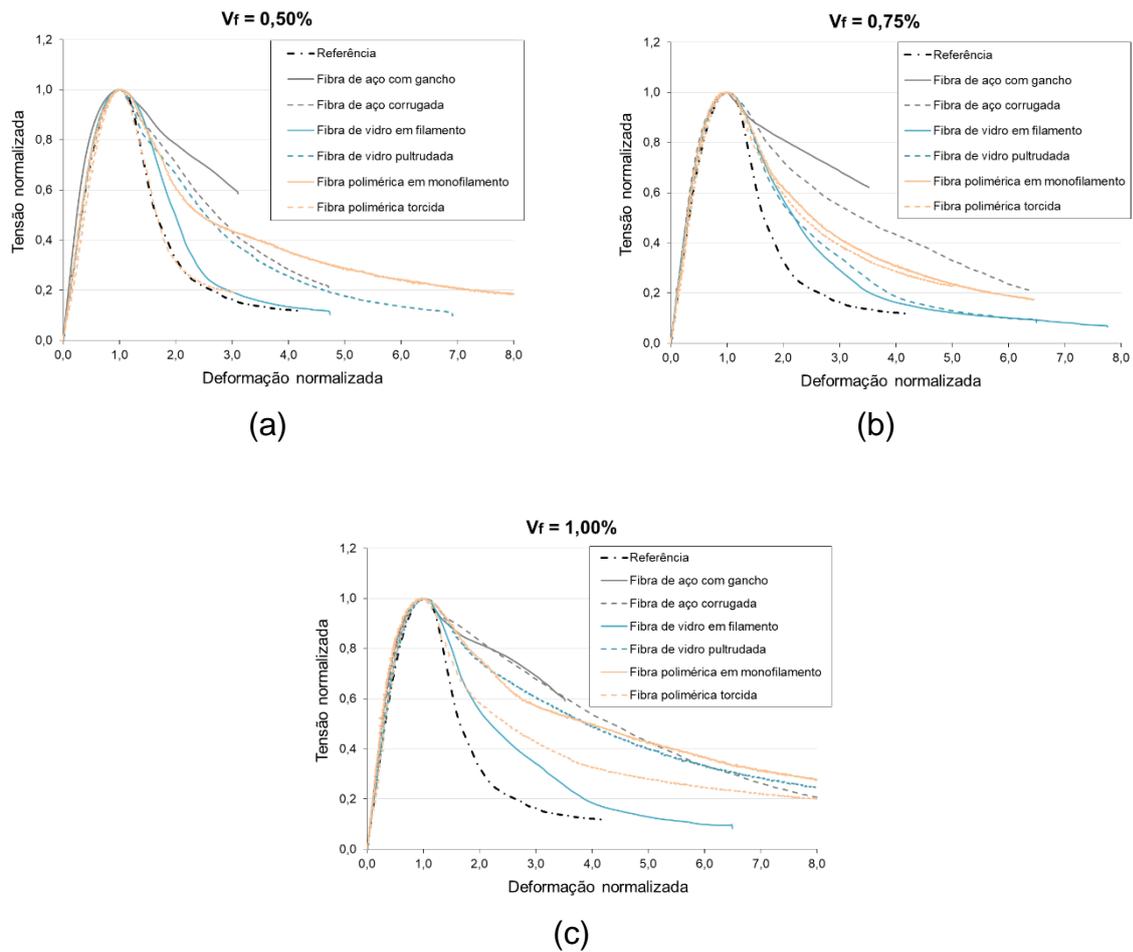
Na Tabela 26 são apresentados os aspectos dos modos de falha presenciados nos diferentes traços após os ensaios por controle de deslocamento. Na maioria dos casos, nota-se a formação de fissuras inclinadas ocasionadas principalmente pelas tensões cisalhantes que surgem nas extremidades superior e inferior do corpo de prova devido ao atrito com a placa da máquina. Dessa forma, as tensões principais são inclinadas e a ruptura interna de um corpo de prova comprimido é pela formação de fissuras internas de cisalhamento (*wing-cracks*).

Tabela 26. Modo de falha dos corpos de prova.

	Fibra de aço com gancho	Fibra de aço corrugada	Fibra de vidro em filamento	Fibra de vidro pultrudada	Fibra polimérica em monofilamento	Fibra polimérica torcida
$V_f = 0,50\%$						
$V_f = 0,75\%$						
$V_f = 1,00\%$						

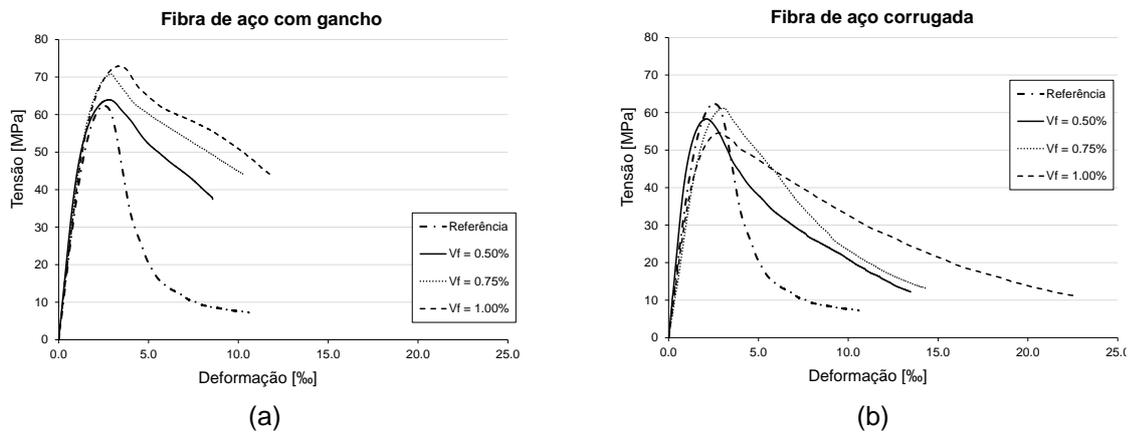
Fonte: Autoria própria.

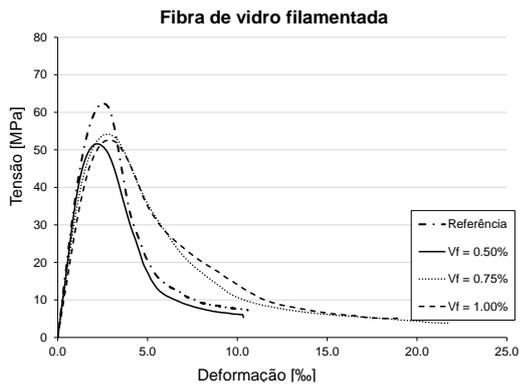
Figura 88. Curvas tensão-deformação normalizadas na compressão (Grupo 1): (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; e (c) $V_f = 1,00\%$.



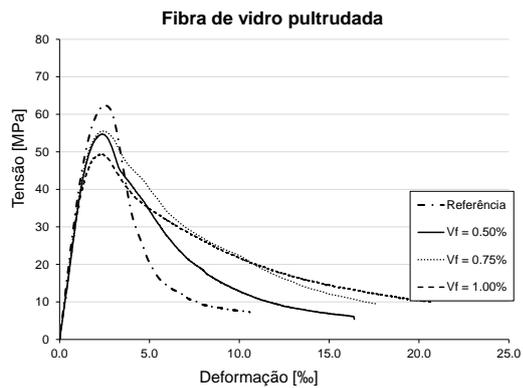
Fonte: Autoria própria.

Figura 89. Curvas tensão-deformação na compressão dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.

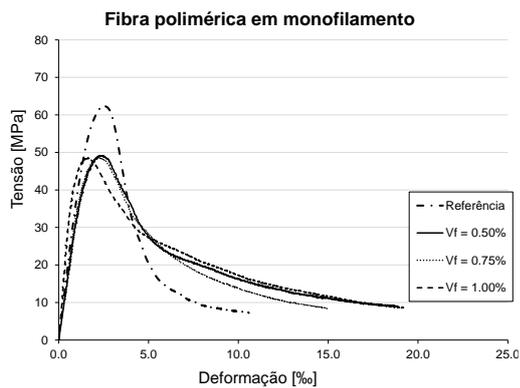




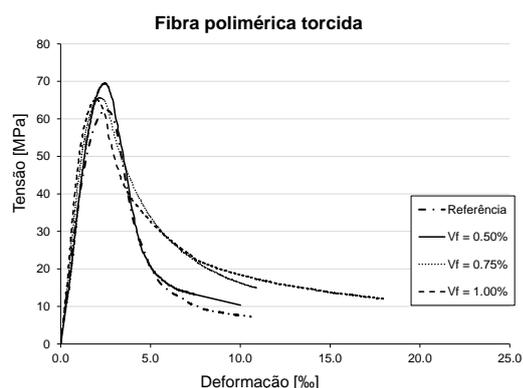
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Autoria própria.

Modos de ruptura típicos de cisalhamento também foram observados em ensaios de compressão realizados de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018) – por controle de força – antes dos ensaios por controle de deslocamento para estimar a força máxima. Esse modo de falha está ilustrado na Figura 90.

Figura 90. Modos de falha observados nos ensaios de compressão em conformidade com a ABNT NBR 5739 (2018).



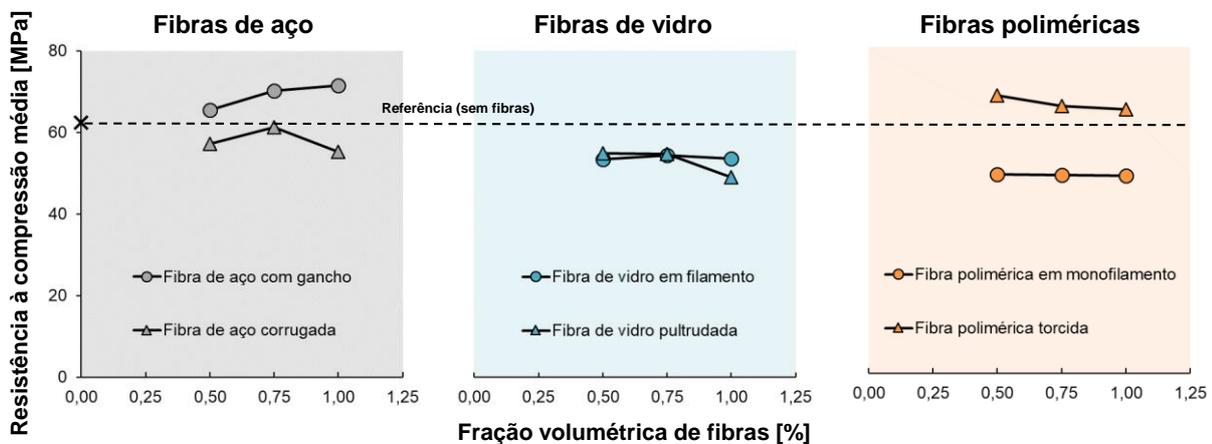
Fonte: Autoria própria.

5.2.1.1 Resistência à compressão

Os traços com fibras de aço com gancho e com fibras poliméricas torcidas foram os únicos cujos valores de resistência à compressão média foram superiores ao traço de referência (sem fibras). Em geral, a diferença entre a resistência à compressão do concreto convencional e do concreto reforçado com fibras é inferior em 15%, com exceção do concreto com fibra polimérica em monofilamento, cuja resistência à compressão é cerca de 22% inferior à resistência do traço de referência.

Deve-se destacar que os traços que envolvem as fibras de vidro em filamento e as fibras poliméricas torcidas, que apresentaram os piores desempenhos em termos de ductilidade proporcionada ao concreto, foram os que menos sofreram variações na resistência à compressão em função da quantidade de fibra. Nesses traços, a resistência à compressão permaneceu praticamente constante para as três frações volumétricas estudadas (Figura 9190).

Figura 91. Influência da fração volumétrica de fibra sobre a resistência à compressão do concreto (Grupo 1).



Fonte: Autoria própria.

A influência da adição e da quantidade de fibras sobre a resistência à compressão do concreto foi investigada por meio de Análise de Variância (ANOVA), complementada pelo Teste de Tukey, considerando um intervalo de confiança (IC) de 95% ($\alpha = 0,05$). Previamente à Análise de Variância, a normalidade dos resultados foi verificada por meio do Teste de Shapiro-Wilk, também considerando um IC de 95%, cujos resultados estão apresentados na Figura 921. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software OriginPro.

No teste de Shapiro-Wilk, quando p-valor é maior ou igual ao nível de significância ($\alpha = 0,05$), há uma tendência significativa dos resultados seguirem uma distribuição normal. De acordo com os resultados apresentados (Figura 92), observa-se que, com exceção do traço 60-VIDFIL-1,00, os resultados de resistência à compressão apresentam uma distribuição normal, condição necessária para a realização da ANOVA. Destaca-se que a resistência à compressão do traço 60-POLMON-0,50 foi obtida a partir de dois corpos de prova apenas, motivo pelo qual não foi possível aplicar o teste de Shapiro-Wilk neste traço.

Figura 92. Resultados do teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos resultados.

*NormalityTest
Shapiro-Wilk*

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
Referência	3,00	0,9752	0,6979	Can't reject normality
60-ACOGAN-0,50	3,00	0,8681	0,2900	Can't reject normality
60-ACOGAN-0,75	3,00	0,8028	0,1212	Can't reject normality
60-ACOGAN-1,00	3,00	0,8846	0,3379	Can't reject normality
60-ACOCOR-0,50	3,00	0,9992	0,9446	Can't reject normality
60-ACOCOR-0,75	3,00	0,9578	0,6048	Can't reject normality
60-ACOCOR-1,00	3,00	0,7928	0,09743	Can't reject normality
60-VIDFIL-0,50	3,00	0,7977	0,1089	Can't reject normality
60-VIDFIL-0,75	3,00	0,9913	0,8220	Can't reject normality
60-VIDFIL-1,00	3,00	0,7645	0,03229	Reject normality
60-VIDPUL-0,50	3,00	0,9962	0,8819	Can't reject normality
60-VIDPUL-0,75	3,00	0,9714	0,6754	Can't reject normality
60-VIDPUL-1,00	3,00	0,9999	0,9859	Can't reject normality
60-POLMON-0,50	--	--	--	a*
60-POLMON-0,75	3,00	0,9786	0,7197	Can't reject normality
60-POLMON-1,00	3,00	0,9976	0,9056	Can't reject normality
60-POLTOR-0,50	3,00	0,8465	0,2310	Can't reject normality
60-POLTOR-0,75	3,00	0,9948	0,8621	Can't reject normality
60-POLTOR-1,00	3,00	0,7850	0,07927	Can't reject normality

Please refer to the "Decision at level" column for conclusion

a*: Too few data points, data points number should not less than 3 for Shapiro-Wilk.

Fonte: Autoria própria.

Na análise de variância, quando p-valor (Prob) é maior ou igual ao nível de significância ($\alpha = 0,05$), aceita-se a hipótese nula (H_0) de que não há diferença significativa entre as médias das amostras. Caso contrário, a hipótese nula é rejeitada, indicando que pelo menos uma amostra (traço) é significativamente diferente das demais.

Na Figura 93, são apresentados os resultados da análise de variância para cada fibra do programa experimental, nos três teores investigados, em conjunto com o traço de referência, para avaliar a influência da adição e quantidade de fibra sobre a resistência à compressão do concreto. Com exceção dos traços com fibras poliméricas torcidas, a análise de variância indica que a média de pelo menos um traço, dentro do mesmo tipo de fibra, se difere significativamente dos demais, explicitando que há um efeito das fibras sobre a resistência à compressão do concreto. Dessa forma, para cada tipo de fibra, foi realizado o teste de Tukey para identificar os traços nos quais a diferença é significativa.

Figura 932. Análise de variância da adição e teor de fibras sobre a resistência à compressão dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.

ANOVA
Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	166,56	55,52	10,12	0,00
Error	8,00	43,89	5,49		
Total	11,00	210,45			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(a)

ANOVA
Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	100,00	33,33	19,52	0,00
Error	8,00	13,66	1,71		
Total	11,00	113,66			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(b)

ANOVA
Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	162,65	54,22	24,62	0,00
Error	8,00	17,62	2,20		
Total	11,00	180,27			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(c)

ANOVA
Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	280,71	93,57	50,96	<0.0001
Error	8,00	14,69	1,84		
Total	11,00	295,40			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(d)

ANOVA
Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	410,62	136,87	79,18	<0.0001
Error	7,00	12,10	1,73		
Total	10,00	422,72			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(e)

ANOVA
Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	51,33	17,11	3,86	0,06
Error	8,00	35,47	4,43		
Total	11,00	86,80			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

(f)

Fonte: Autoria própria.

Os resultados do teste de Tukey, apresentados na Figura 976, são separados por meio de grupos representados por letras. Os traços que compartilham das mesmas letras indicam que há equivalência estatística entre as médias, enquanto letras diferentes apontam a existência de uma diferença significativa.

Os resultados da análise estatística indicam que a adição de fibras de aço com gancho afeta significativamente (no sentido positivo) a resistência à compressão a partir de uma fração volumétrica de 0,75%, uma vez que há equivalência estatística entre o traço de referência e o traço 60-ACOGAN-0,50. Por outro lado, a adição de fibras de aço corrugadas ao concreto em frações volumétricas de 0,50% e 1,00% reduziram significativamente a resistência à compressão do concreto, enquanto uma diferença significativa (em relação ao traço de referência) não foi observada no traço 60-ACOCOR-0,75. As fibras de vidro filamentadas e pultrudadas e as fibras poliméricas em monofilamento também reduziram significativamente a resistência à compressão do concreto. No entanto, para esses três tipos de fibra, não foram observadas diferenças significativas entre os traços com diferentes teores de fibra, com exceção do traço 50-VIDFIL-1,00, cuja adição de fibras numa fração volumétrica de 1,00% provocou uma redução maior quando comparado aos outros traços com fibras de vidro filamentadas. Embora a análise de variância do concreto reforçado com fibras poliméricas torcidas tenha indicado que as médias dos traços não diferem significativamente entre si ($p\text{-valor} > \alpha$), o teste de Tukey evidencia que existe uma diferença significativa entre o traço de referência e o traço 50-POLTOR-0,50. Essa divergência entre os resultados das análises pode ter sido causada pela proximidade entre $p\text{-valor} = 0,056$ e o nível de significância ($\alpha = 0,05$).

De modo geral, os resultados da análise estatística indicam que a adição de fibras é um fator que possui maior influência sobre a resistência à compressão do concreto quando comparado ao teor de fibras. Em outras palavras, para um mesmo concreto reforçado com fibras, diferentes quantidades de fibra não afetaram significativamente a resistência à compressão do concreto, mas a adição de fibras teve grande influência quando comparada ao concreto sem fibras.

Figura 94. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência da adição e teor de fibras sobre a resistência à compressão dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOGAN-1,00	71,55	A
60-ACOGAN-0,75	70,41	A
60-ACOGAN-0,50	65,50	A B
Referência	62,33	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(a)

Tukey Test

	Mean	Groups
Referência	62,33	A
60-ACOCOR-0,75	61,28	A
60-ACOCOR-0,50	57,27	B
60-ACOCOR-1,00	55,25	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(b)

Tukey Test

	Mean	Groups
Referência	62,33	A
60-VIDFIL-0,75	54,32	B
60-VIDFIL-1,00	53,85	B
60-VIDFIL-0,50	53,42	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(c)

Tukey Test

	Mean	Groups
Referência	62,33	A
60-VIDPUL-0,50	54,84	B
60-VIDPUL-0,75	54,66	B
60-VIDPUL-1,00	48,70	C

Means that do not share a letter are significantly different.

(d)

Tukey Test

	Mean	Groups
Referência	62,33	A
60-POLMON-0,50	48,72	B
60-POLMON-0,75	48,69	B
60-POLMON-1,00	48,48	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(e)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-POLTOR-0,50	68,12	A
60-POLTOR-0,75	65,57	A B
60-POLTOR-1,00	64,74	A B
Referência	62,33	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(f)

Fonte: Autoria própria.

De modo similar, a influência do tipo de fibra sobre a resistência à compressão do concreto também foi investigada estatisticamente. Para tal, os resultados foram divididos de acordo as frações volumétricas analisadas: 0,50%, 0,75% e 1,00%. Os resultados da análise de variância e do teste de Tukey estão apresentados na Figura 954.

Figura 95. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre a resistência à compressão dos traços do Grupo 1: (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; (c) $V_f = 1,00\%$.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	6,00	775,11	129,19	24,99	<0.0001
Error	13,00	67,20	5,17		
Total	19,00	842,31			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups			
60-POLTOR-0,50	68,12	A			
60-ACOGAN-0,50	65,50	A			
Referência	62,33	A	B		
60-ACOCOR-0,50	57,27		B	C	
60-VIDPUL-0,50	54,84			C	D
60-VIDFIL-0,50	53,42			C	D
60-POLMON-0,50	48,72				D

Means that do not share a letter are significantly different.

(a)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	6,00	1002,31	167,05	103,05	<0.0001
Error	14,00	22,69	1,62		
Total	20,00	1025,00			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups				
60-ACOGAN-0,75	70,41	A				
60-POLTOR-0,75	65,57		B			
Referência	62,33		B	C		
60-ACOCOR-0,75	61,28			C		
60-VIDPUL-0,75	54,66				D	
60-VIDFIL-0,75	54,32				D	
60-POLMON-0,75	48,69					E

Means that do not share a letter are significantly different.

(b)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	6,00	1348,93	224,82	144,39	<0.0001
Error	14,00	21,80	1,56		
Total	20,00	1370,73			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups			
60-ACOGAN-1,00	71,55	A			
60-POLTOR-1,00	64,74		B		
Referência	62,33		B		
60-ACOCOR-1,00	55,25			C	
60-VIDFIL-1,00	53,85			C	
60-VIDPUL-1,00	48,70				D
60-POLMON-1,00	48,48				D

Means that do not share a letter are significantly different.

(c)

Fonte: Autoria própria.

Para uma fração volumétrica de 0,50%, as fibras que afetam significativamente a resistência à compressão do concreto são as fibras de aço corrugada, de vidro filamentada e pultrudada e a fibra polimérica em monofilamento. Esse comportamento é repetido para as frações volumétricas de 0,75% e 1,00%, com exceção do traço 60-ACOCOR-0,75, que não apresentou diferença significativa em relação à média do traço de referência. Os resultados também indicam que as fibras de aço com gancho também afetaram significativamente a resistência à compressão do concreto nas frações volumétricas de 0,75% e 1,00%. As fibras poliméricas torcidas não afetaram significativamente a resistência à compressão do concreto, fato que diverge dos resultados do teste de Tukey realizado anteriormente.

5.2.1.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade dos corpos de prova foi obtido graficamente e determinado de acordo com a Equação (5.2):

$$E_c = \frac{\sigma_{c2} - \sigma_{c1}}{\varepsilon_{a2} - 0,000050} \quad (5.2)$$

em que:

σ_{c2} é a tensão correspondente à cerca de 40% da tensão máxima;

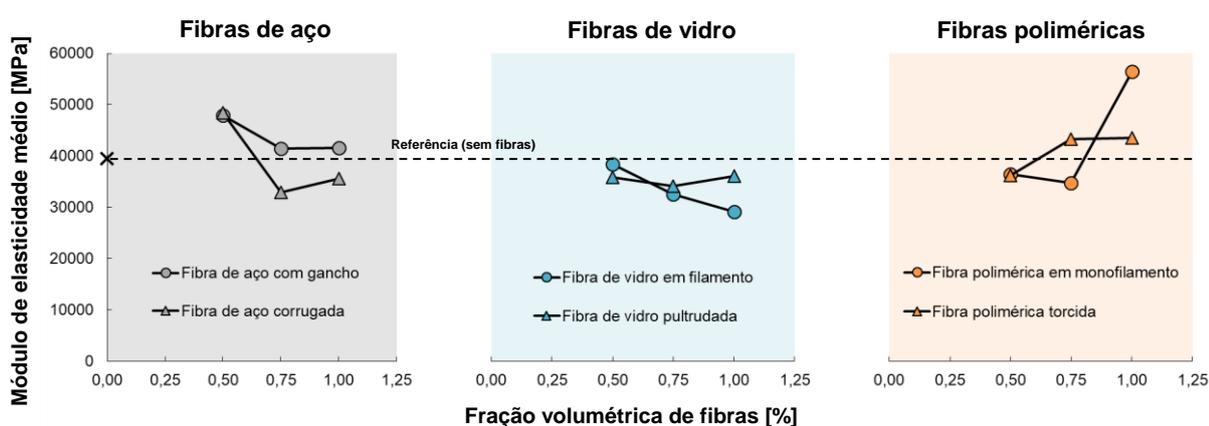
σ_{c1} é a tensão correspondente à deformação de 50×10^{-6} ;

ε_{a2} é a deformação correspondente à tensão σ_{c2} .

Deve-se destacar ainda que, em função do tipo de ensaio (por controle de deslocamento) para a obtenção da curva tensão-deformação completa na compressão, os ciclos de carga e descarga previstos na ABNT NBR 8522-1 (2021) para determinação do módulo de elasticidade não foram realizados.

De acordo com os valores apresentados na Tabela 25, nota-se que os maiores valores do módulo de elasticidade foram observados nos traços que apresentaram as maiores resistências médias (f_{cm}), quais sejam: fibras de aço com gancho e fibras poliméricas torcidas. Destaca-se também que, para um mesmo tipo de fibra, a rigidez do concreto sofreu pequenas variações, evidenciando uma pequena (senão desprezível) influência da fração volumétrica da fibra sobre esse parâmetro (Figura 96). De modo similar, observa-se que a adição de fibras não afetou expressivamente o módulo de elasticidade quando comparado ao concreto sem fibras.

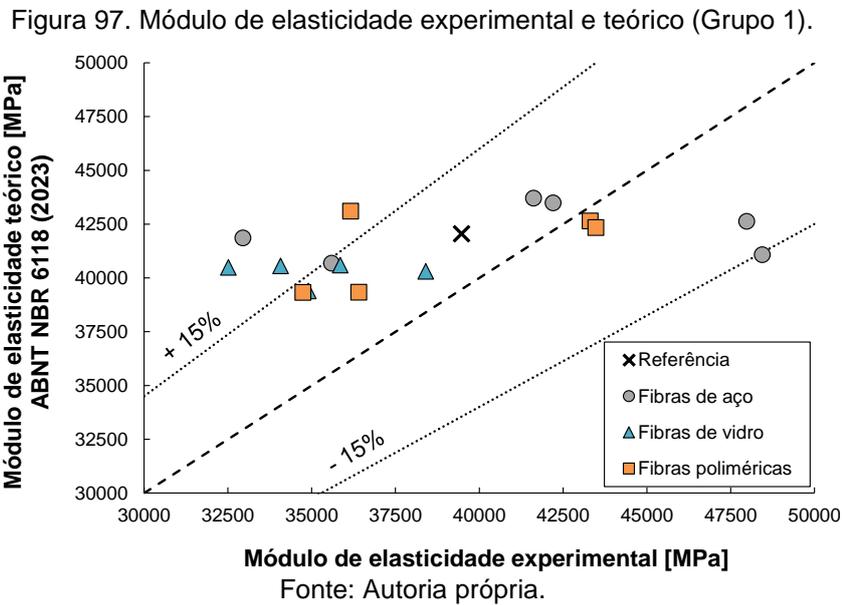
Figura 96. Influência da fração volumétrica de fibras sobre o módulo de elasticidade do concreto (Grupo 1).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 976, é apresentado um comparativo entre os valores do módulo de elasticidades experimentais e teóricos, determinados de acordo com a

ABNT NBR 6118 (2023) para fibras de diferentes materiais (aço, vidro e polimérica). Nota-se que a maioria dos resultados experimentais permaneceram dentro de uma faixa de variação de 15% em relação ao valor teórico, com a maioria sendo superestimados pela norma brasileira.



Os resultados da análise de variância ($\alpha = 0,05$) para cada tipo de fibra para avaliar a influência da adição e quantidade de fibra sobre o módulo de elasticidade do concreto são apresentados na Figura 98. Os resultados indicam que diferenças significativas nos valores do módulo de elasticidade (em relação ao concreto sem fibras) foram observadas nos traços com fibra de aço corrugada, fibra de vidro filamentada e fibra polimérica em monofilamento. A identificação dessas diferenças ocorreu por meio do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$), cujos resultados são apresentados na Figura 99.

Figura 98. Análise de variância da adição e teor de fibras sobre o módulo de elasticidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	1,04E+8	3,48E+7	3,13	0,11
Error	6,00	6,67E+7	1,11E+7		
Total	9,00	1,71E+8			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

(a)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	4,13E+8	1,38E+8	13,06	0,00
Error	7,00	7,37E+7	1,05E+7		
Total	10,00	4,86E+8			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(b)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	1,47E+8	4,90E+7	35,20	0,00
Error	5,00	6953971,17	1390794,23		
Total	8,00	1,54E+8			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(c)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	3,51E+7	1,17E+7	3,55	0,09
Error	6,00	1,98E+7	3303665,75		
Total	9,00	5,50E+7			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

(d)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	7,93E+8	2,64E+8	33,83	0,00
Error	5,00	3,91E+7	7815619,53		
Total	8,00	8,32E+8			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(e)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	1,08E+8	3,62E+7	1,89	0,22
Error	7,00	1,34E+8	1,91E+7		
Total	10,00	2,42E+8			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

(f)

Fonte: Autoria própria.

No caso do concreto reforçado com fibras de vidro filamentosas, as diferenças significativas no módulo de elasticidade foram observadas nos traços com frações volumétricas de 0,75% e 1,00%, os quais apresentaram valores inferiores quando comparado ao concreto sem fibras. Os traços com fibras de aço corrugadas e fibras poliméricas monofiladas, por outro lado, não apresentaram uma tendência clara da influência da adição de fibras sobre o módulo de elasticidade do concreto. No caso da fibra de aço corrugada, por exemplo, o maior valor do módulo de elasticidade ocorreu para o traço com $V_f = 0,50\%$, que é significativamente diferente dos valores encontrados para os traços com $V_f = 0,75\%$ e $V_f = 1,00\%$. De modo similar, nos traços com fibras poliméricas monofiladas, diferenças significativas (em relação ao traço de referência) foram observadas apenas em uma fração volumétrica de fibras de 1,00% cujo traço apresentou o maior valor do módulo de elasticidade, enquanto uma tendência de redução do módulo de elasticidade era observada na medida em que se aumentava a quantidade de fibras no concreto para $V_f = 0,50\%$ e $V_f = 0,75\%$.

Figura 99. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência da adição e teor de fibras sobre o módulo de elasticidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOGAN-0,50	47984,67	A
60-ACOGAN-0,75	42207,00	A
60-ACOGAN-1,00	41623,50	A
Referência	39470,50	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(a)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOCOR-0,50	48446,00	A
Referência	39470,50	A B
60-ACOCOR-1,00	35598,00	B
60-ACOCOR-0,75	32952,00	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(b)

Tukey Test

	Mean	Groups
Referência	39470,50	A
60-VIDFIL-0,50	38403,00	A
60-VIDFIL-0,75	32515,67	B
60-VIDFIL-1,00	29459,00	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(c)

Tukey Test

	Mean	Groups
Referência	39470,50	A
60-VIDPUL-0,50	35852,00	A
60-VIDPUL-1,00	34900,00	A
60-VIDPUL-0,75	34076,00	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(d)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-POLMON-1,00	56498,33	A
Referência	39470,50	B
60-POLMON-0,50	36411,00	B
60-POLMON-0,75	34744,50	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(e)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-POLTOR-1,00	43485,00	A
60-POLTOR-0,75	43311,00	A
Referência	39470,50	A
60-POLTOR-0,50	36163,00	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(f)

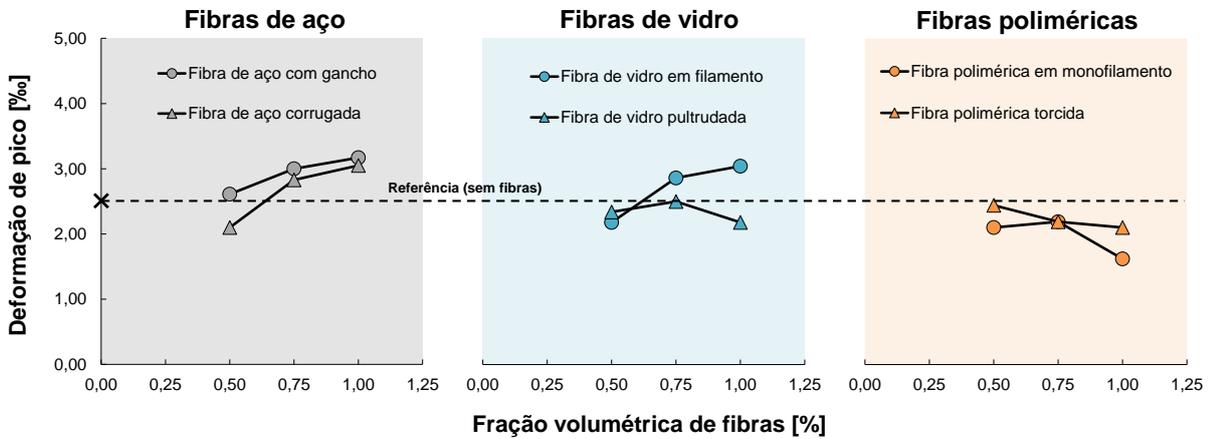
Fonte: Autoria própria.

5.2.1.3 Deformação de pico

Com exceção do caso das fibras poliméricas, a adição de fibras ao concreto aumentou a deformação de pico (deformação associada à tensão máxima no corpo de prova) quando comparado ao concreto sem fibras, com destaque para as fibras de aço e de vidro filamentadas. Esse comportamento também foi observado por outros autores em ensaios com concretos de resistências inferiores e reforçados com fibras de aço (FENG *et al.*, 2021; SHI *et al.*, 2020). As fibras de vidro pultrudadas, embora tenham proporcionado um ligeiro aumento na deformação de pico, esse aumento é reduzido na medida em que se aumenta a quantidade de fibras, chegando a um valor próximo ao do concreto convencional quando $V_f = 1,00\%$. De forma similar, os resultados experimentais sugerem que a deformação de pico do concreto reforçado com fibras poliméricas é inversamente proporcional à fração volumétrica de fibra (Figura 1009).

Com uma fração volumétrica de $V_f = 1,00\%$, as fibras de aço proporcionaram um aumento de 45% na deformação de pico comparado com o concreto sem fibras.

Figura 100. Influência do teor de fibra sobre a deformação de pico do concreto (Grupo 1).



Fonte: Autoria própria.

De acordo com Naaman (2018), a eficácia das fibras no confinamento das microfissuras que se formam no corpo de prova antes de o mesmo atingir a tensão máxima é responsável por influenciar os valores de resistência máxima e deformação de pico do concreto. No caso das fibras poliméricas, devido ao seu baixo módulo de elasticidade, essas tensões de confinamento são geradas com grandes aberturas de fissuras, motivo pelo qual as fibras poliméricas dificilmente contribuem para a deformação de pico do concreto. Um ponto que deve ser destacado é que a maior taxa de aumento na deformação de pico observada (no caso das fibras de aço e de vidro filamentada) ocorre entre $V_f = 0,50\%$ e $0,75\%$. Uma possível causa pode estar associada à dificuldade de dispersão das fibras durante o processo de mistura em frações volumétricas mais elevadas de fibras.

De acordo com os resultados da análise de variância ($\alpha = 0,05$) apresentados na Figura 101 para avaliar a influência da adição e quantidade de fibra sobre a deformação de pico do concreto, apenas o concreto reforçado com fibras poliméricas torcidas não apresentou diferenças significativas entre os teores de fibras investigados. Em outras palavras, a quantidade e a adição de fibras poliméricas torcidas não afetaram significativamente a deformação de pico no concreto.

Figura 101. Análise de variância da adição e teor de fibras sobre a deformação de pico dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	0,68	0,23	5,13	0,04
Error	6,00	0,26	0,04		
Total	9,00	0,94			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(a)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	1,51	0,50	12,45	0,00
Error	7,00	0,28	0,04		
Total	10,00	1,80			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(b)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	0,73	0,24	18,30	0,00
Error	5,00	0,07	0,01		
Total	8,00	0,80			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(c)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	0,18	0,06	5,44	0,04
Error	6,00	0,07	0,01		
Total	9,00	0,25			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(d)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	1,01	0,34	12,44	0,01
Error	5,00	0,14	0,03		
Total	8,00	1,14			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(e)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	0,31	0,10	1,91	0,22
Error	7,00	0,37	0,05		
Total	10,00	0,68			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

(f)

Fonte: Autoria própria.

Embora os resultados da ANOVA tenham indicado diferenças significativas em todos os traços com exceção do concreto reforçado com fibras poliméricas torcidas, os resultados do teste de Tukey, apresentados na Figura 102, indicam que o teor e a adição de fibras de aço com gancho e de fibras de vidro pultrudadas ao concreto também não afetaram a deformação de pico do material. Esta inconsistência entre os resultados estatísticos pode estar associada à proximidade do p-valor (0,04) com o nível de significância de ambos os traços ($\alpha = 0,05$).

Em vista dos resultados, pode-se dizer que a adição de fibras de aço corrugadas não afetou a deformação de pico do concreto, sendo estatisticamente equivalente ao traço de referência. Por outro lado, o traço com $V_f = 0,50\%$ apresentou diferenças significativas em relação aos traços com $V_f = 0,75\%$ e $V_f = 1,00\%$, uma vez que aquele reduziu e estes aumentaram a deformação de pico quando comparado ao traço de referência.

No traço com fibras de vidro filamentadas, apenas a adição de fibras numa fração volumétrica de 1,00% proporcionou aumento significativamente a deformação de pico do concreto quando comparado ao traço de referência. Além disso, para este tipo de fibra, a tendência de aumento na deformação de pico é observada a partir de $V_f = 0,75\%$, uma vez que o traço 60-VIDFIL-0,50 apresentou uma deformação de pico média inferior ao traço de referência.

A adição de fibras poliméricas monofiladas reduziram a deformação de pico no concreto, com diferenças significativas observadas (em relação ao traço de referência) no traço com $V_f = 1,00\%$.

Figura 102. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência da adição e teor de fibras sobre a deformação de pico dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOGAN-1,00	3,17	A
60-ACOGAN-0,75	3,00	A
60-ACOGAN-0,50	2,61	A
Referência	2,51	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(a)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOCOR-1,00	3,05	A
60-ACOCOR-0,75	2,83	A
Referência	2,51	A B
60-ACOCOR-0,50	2,10	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(b)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-VIDFIL-1,00	3,04	A
60-VIDFIL-0,75	2,86	A B
Referência	2,51	B C
60-VIDFIL-0,50	2,18	C

Means that do not share a letter are significantly different.

(c)

Tukey Test

	Mean	Groups
Referência	2,51	A
60-VIDPUL-0,75	2,50	A
60-VIDPUL-0,50	2,34	A
60-VIDPUL-1,00	2,18	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(d)

Tukey Test

	Mean	Groups
Referência	2,51	A
60-POLMON-0,75	2,19	A
60-POLMON-0,50	2,10	A B
60-POLMON-1,00	1,62	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(e)

Tukey Test

	Mean	Groups
Referência	2,51	A
60-POLTOR-0,50	2,44	A
60-POLTOR-0,75	2,19	A
60-POLTOR-1,00	2,10	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(f)

Fonte: Autoria própria.

De modo similar, a influência do tipo de fibra sobre a deformação de pico do concreto também foi investigada estatisticamente. Os resultados foram divididos de acordo as frações volumétricas analisadas: 0,50%, 0,75% e 1,00%. Os resultados da análise de variância e do teste de Tukey estão apresentados na Figura 103.

Figura 103. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre a deformação de pico dos traços do Grupo 1: (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; (c) $V_f = 1,00\%$.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	6,00	0,62	0,10	1,98	0,16
Error	10,00	0,52	0,05		
Total	16,00	1,13			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOGAN-0,50	2,61	A
Referência	2,51	A
60-POLTOR-0,50	2,44	A
60-VIDPUL-0,50	2,34	A
60-VIDFIL-0,50	2,18	A
60-POLMON-0,50	2,10	A
60-ACOCOR-0,50	2,10	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(a)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	6,00	1,72	0,29	11,93	0,00
Error	11,00	0,27	0,02		
Total	17,00	1,99			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOGAN-0,75	3,00	A
60-VIDFIL-0,75	2,86	A
60-ACOCOR-0,75	2,83	A
Referência	2,51	A B
60-VIDPUL-0,75	2,50	A B
60-POLMON-0,75	2,19	B
60-POLTOR-0,75	2,19	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(b)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	6,00	5,76	0,96	30,69	<0.0001
Error	12,00	0,38	0,03		
Total	18,00	6,13			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOGAN-1,00	3,17	A
60-ACOCOR-1,00	3,05	A B
60-VIDFIL-1,00	3,04	A B
Referência	2,51	B C
60-VIDPUL-1,00	2,18	C
60-POLTOR-1,00	2,10	C D
60-POLMON-1,00	1,62	D

Means that do not share a letter are significantly different.

(c)

Fonte: Autoria própria.

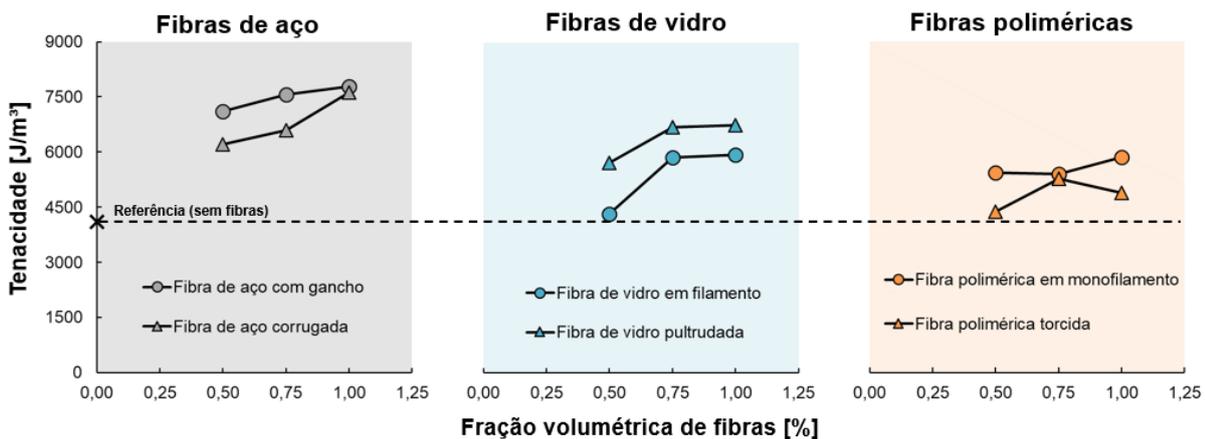
Para as frações volumétricas de 0,50% e 0,75%, não foram observadas diferenças significativas para a deformação de pico em relação ao traço de referência para nenhum tipo de fibra. Nos traços com $V_f = 0,75\%$, no entanto, as fibras de aço com gancho, fibras de vidro filamentadas e fibras de aço corrugadas proporcionaram valores para a deformação de pico significativamente maiores do que os traços com fibras poliméricas de ambos os tipos. Para $V_f = 1,00\%$, diferenças significativas em relação ao traço de referência foram observadas apenas nos concretos reforçados com fibras de aço com gancho, que apresentou as maiores deformações de pico, e nos concretos reforçados com fibras poliméricas monofiladas, que apresentou as menores deformações.

5.2.1.4 Tenacidade na compressão

A tenacidade na compressão corresponde à área sob a curva “tensão-deformação” e foi calculada até a deformação de 0,01, conforme ilustrado na Figura 85. A capacidade de absorção de energia do concreto, definida por meio da tenacidade, é uma das

principais propriedades afetadas pela adição de fibras. De modo geral, quanto maior a fração volumétrica de fibras, maior a tenacidade do material (Figura 104). As fibras de aço foram as que proporcionaram as maiores tenacidades ao concreto com valores próximos ao dobro da tenacidade do concreto sem fibras, seguidas pelas fibras de vidro e fibras poliméricas. A tenacidade também é considerada uma forma para se avaliar a ductilidade do concreto na compressão (NAAMAN, 2018) e está diretamente associada à aderência fibra-matriz e ao módulo de elasticidade da fibra. As fibras de aço, por exemplo, além de possuírem um elevado módulo de elasticidade, possuem boa ancoragem mecânica com a matriz de concreto por meio dos ganchos nas extremidades da fibra e corrugações ao longo do seu comprimento. As contribuições mais baixas na tenacidade do concreto foram provenientes das fibras de vidro em filamento e das fibras poliméricas torcidas. Esse comportamento era esperado em virtude das curvas tensão-deformação apresentadas na Figura 87.

Figura 104. Influência da fração volumétrica de fibras sobre a tenacidade do concreto.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados da análise de variância ($\alpha = 0,05$) apresentados na Figura 105 demonstram que há diferenças significativas entre as tenacidades médias em pelo menos um traço entre os três teores e o traço de referência para cada tipo de fibra, com exceção do concreto reforçado com fibra de vidro pultrudada, cujo p-valor resultou em 0,08.

Figura 105. Análise de variância da adição e teor de fibras sobre a tenacidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	9658743,67	3219581,22	38,93	0,00
Error	5,00	413483,14	82696,63		
Total	8,00	1,01E+7			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(a)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	9802334,80	3267444,93	26,80	0,00
Error	6,00	731478,78	121913,13		
Total	9,00	1,05E+7			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(b)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	3821462,88	1273820,96	11,79	0,02
Error	4,00	432180,86	108045,22		
Total	7,00	4253643,75			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(c)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	5010730,75	1670243,58	4,03	0,08
Error	5,00	2072821,30	414564,26		
Total	8,00	7083552,04			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

(d)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	2343538,25	781179,42	20,34	0,01
Error	4,00	153637,74	38409,44		
Total	7,00	2497176,00			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(e)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3,00	1978938,45	659646,15	15,07	0,00
Error	6,00	262624,39	43770,73		
Total	9,00	2241562,83			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(f)

Fonte: Autoria própria.

Os resultados do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) evidenciam a clara influência da adição de fibras sobre a tenacidade do concreto, a qual, no traço de referência, para todos os tipos de fibra analisados (com exceção da fibra de vidro pultrudada), é significativamente inferior aos traços com fibras (Figura 106). Conforme mencionado anteriormente, a adição de fibras de vidro filamentadas e fibras poliméricas torcidas numa fração volumétrica de 0,50% não afetou significativamente a tenacidade do concreto, fato que foi confirmado pelas análises estatísticas. De modo geral, o teste de Tukey também confirma que maiores quantidades de fibra proporcionam maiores tenacidades ao concreto.

No concreto reforçado com fibras de vidro pultrudadas, diferenças significativas não foram observadas entre os traços com fibra e o traço de referência pelo teste de Tukey possivelmente devido ao maior desvio padrão observado nos resultados (Tabela 25). Embora seja notável o aumento da tenacidade em relação ao concreto sem fibras, o elevado desvio padrão pode afetar os resultados das análises estatísticas.

Figura 106. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência da adição e teor de fibras sobre a tenacidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOGAN-1,00	7679,63	A
60-ACOGAN-0,75	7323,43	A
60-ACOGAN-0,50	7097,99	A
Referência	4101,60	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(a)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOCOR-1,00	7622,30	A
60-ACOCOR-0,75	6590,62	B
60-ACOCOR-0,50	6205,88	B
Referência	4101,60	C

Means that do not share a letter are significantly different.

(b)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-VIDFIL-0,75	5869,39	A
60-VIDFIL-1,00	5720,52	A B
60-VIDFIL-0,50	4319,98	B C
Referência	4101,60	C

Means that do not share a letter are significantly different.

(c)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-VIDPUL-0,75	6655,10	A
60-VIDPUL-1,00	6325,38	A
60-VIDPUL-0,50	5706,90	A
Referência	4101,60	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(d)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-POLMON-1,00	5849,27	A
60-POLMON-0,50	5435,22	A
60-POLMON-0,75	5233,66	A
Referência	4101,60	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(e)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-POLTOR-0,75	5266,35	A
60-POLTOR-1,00	5115,56	A
60-POLTOR-0,50	4370,70	B
Referência	4101,60	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(f)

Fonte: Autoria própria.

Os resultados da análise de variância e do teste de Tukey para a avaliar a influência do tipo de fibra estão apresentados na Figura 107. Para as frações volumétricas de 0,50% e 1,00%, apenas os traços com fibras de aço de ambos os tipos e as fibras de vidro pultrudadas apresentaram diferenças significativas em relação ao traço de referência em função da tenacidade proporcionada. Para $V_f = 0,75\%$, os traços com diferenças significativas se repetem, com a adição do traço com fibra de vidro filamentada. Destaca-se ainda que nas três frações volumétricas investigadas, as duas fibras de aço de proporcionaram tenacidades equivalentes estatisticamente ao concreto, uma vez que pertencem ao mesmo grupo pelo teste de Tukey (Grupo A). A adição de fibras poliméricas ao concreto, por sua vez, quando comparadas aos outros tipos de fibra, não apresentaram diferenças significativas em relação ao traço de referência.

Figura 107. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre a tenacidade dos traços do Grupo 1: (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; (c) $V_f = 1,00\%$.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	6,00	1,63E+7	2722893,78	20,09	<0.0001
Error	9,00	1219726,14	135525,13		
Total	15,00	1,76E+7			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups			
60-ACOGAN-0,50	7097,99	A			
60-ACOCOR-0,50	6205,88	A	B		
60-VIDPUL-0,50	5706,90		B	C	
60-POLMON-0,50	5435,22		B	C	D
60-POLTOR-0,50	4370,70				D
60-VIDFIL-0,50	4319,98			C	D
Referência	4101,60				D

Means that do not share a letter are significantly different.

(a)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	6,00	1,35E+7	2256889,48	26,62	<0.0001
Error	10,00	847862,79	84786,28		
Total	16,00	1,44E+7			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups			
60-ACOGAN-0,75	7323,43	A			
60-VIDPUL-0,75	6655,10	A	B		
60-ACOCOR-0,75	6590,62	A	B		
60-VIDFIL-0,75	5869,39		B	C	
60-POLTOR-0,75	5266,35			C	D
60-POLMON-0,75	5233,66			C	D
Referência	4101,60				D

Means that do not share a letter are significantly different.

(b)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	6,00	1,95E+7	3246900,65	17,87	<0.0001
Error	11,00	1998637,29	181694,30		
Total	17,00	2,15E+7			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups			
60-ACOGAN-1,00	7679,63	A	B		
60-ACOCOR-1,00	7622,30	A			
60-VIDPUL-1,00	6325,38		B	C	
60-POLMON-1,00	5849,27			C	D
60-VIDFIL-1,00	5720,52			C	D
60-POLTOR-1,00	5115,56			C	D
Referência	4101,60				D

Means that do not share a letter are significantly different.

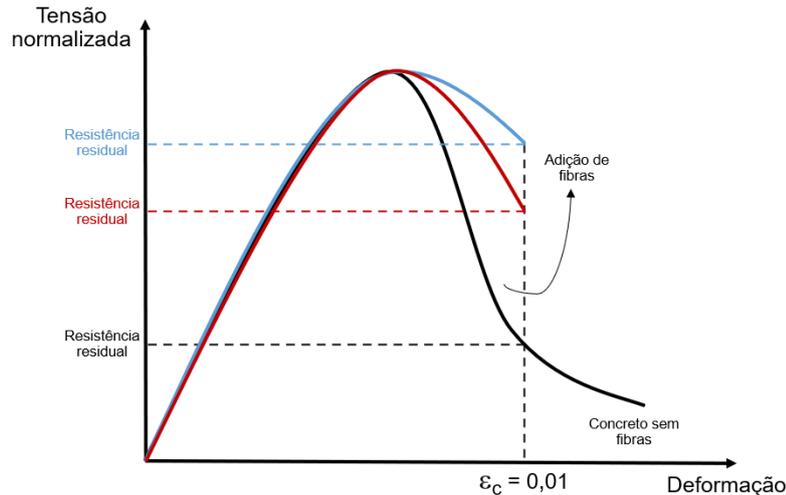
(c)

Fonte: Autoria própria.

5.2.1.5 Resistência residual na compressão

Uma vez que a adição de fibras reduz a fragilidade do concreto impedindo uma ruptura explosiva e uma queda abrupta na curva tensão-deformação, tornando-o mais dúctil, surgem resistências residuais na compressão. De forma análoga ao ensaio de tração na flexão no qual são avaliadas as resistências residuais para cada abertura de fissura ($f_{R,j}$), as resistências residuais na compressão foram determinadas nos ensaios como a resistência que corresponde à deformação axial de 0,01, o mesmo valor considerado para o cálculo da tenacidade (Figura 108).

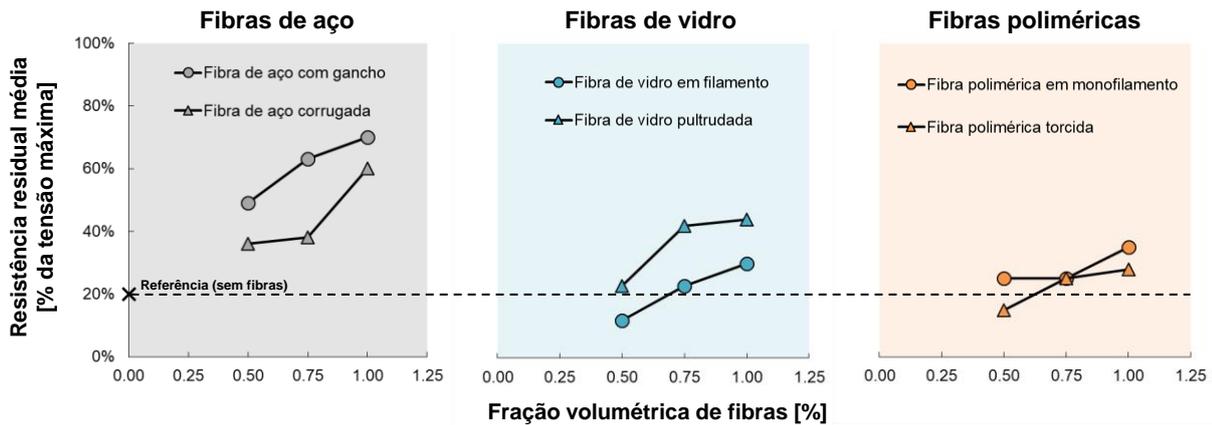
Figura 108. Determinação da resistência residual do concreto reforçado com fibras na compressão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 109, é apresentada a resistência residual na compressão para os traços estudados. As fibras de aço proporcionaram as maiores resistências residuais para uma fração volumétrica de 1,00%, com valores entre 60% e 70% da tensão máxima atingida. Esses valores vão ao encontro dos resultados de Bencardino *et al.* (2008), os quais obtiveram uma resistência residual de 74% para uma fração volumétrica de 1,60% de fibra de aço com gancho na mesma deformação. Para $V_f = 0,75\%$, a resistência residual do concreto reforçado com fibra de vidro pultrudada (cerca de 42% da tensão máxima) foi menor que a do concreto reforçado com fibras de aço com gancho, apenas. Nota-se que a adição de fibras poliméricas torcidas e de vidro filamentadas em uma fração volumétrica de 0,50% foi desfavorável ao concreto convencional (sem fibras) visto as baixas resistências residuais proporcionadas. Mesmo em frações volumétricas mais elevadas (0,75% e 1,00%), a resistência residual máxima foi de 30% da tensão máxima atingida obtida com as fibras de vidro filamentadas. Para todos os traços estudados, a resistência residual na compressão aumentou na medida em que o teor de fibras era elevado.

Figura 109. Influência da fração volumétrica de fibra sobre a resistência residual na compressão.



Fonte: Autoria própria.

5.2.2 Grupo 2

Os resultados dos ensaios de compressão realizados com os traços do Grupo 2 estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27. Resultados dos ensaios de compressão por controle de deslocamento (Grupo 2).

Traço	Propriedades mecânica dos ensaios de compressão			
	f_{cm} [MPa]	E_{cm} [MPa]	$\epsilon_{c0,m}$ [%]	TI [J/m ³]
90-REFERÊNCIA	93,97	32434	0,82	-
90-ACOGAN-0,50	100,17	41953	1,89	3428,05 ¹
90-ACOGAN-0,75	101,16	45458	2,19	5500,77
90-ACOGAN-1,00	108,42	42407	2,42	5892,50
90-VIDFIL-0,50	100,44	42913	1,75	-
90-VIDFIL-0,75	94,29	41102	1,33	-
90-VIDFIL-1,00	95,42	40644	1,60	-
90-POLMON-0,50	83,73	56473	1,02	3758,13 ¹
90-POLMON-0,75	83,64	54788	1,73	3553,28
90-POLMON-1,00	81,09	52669	1,66	4297,46

¹Tenacidade determinada até $\epsilon = 0,008$.

Fonte: Autoria própria.

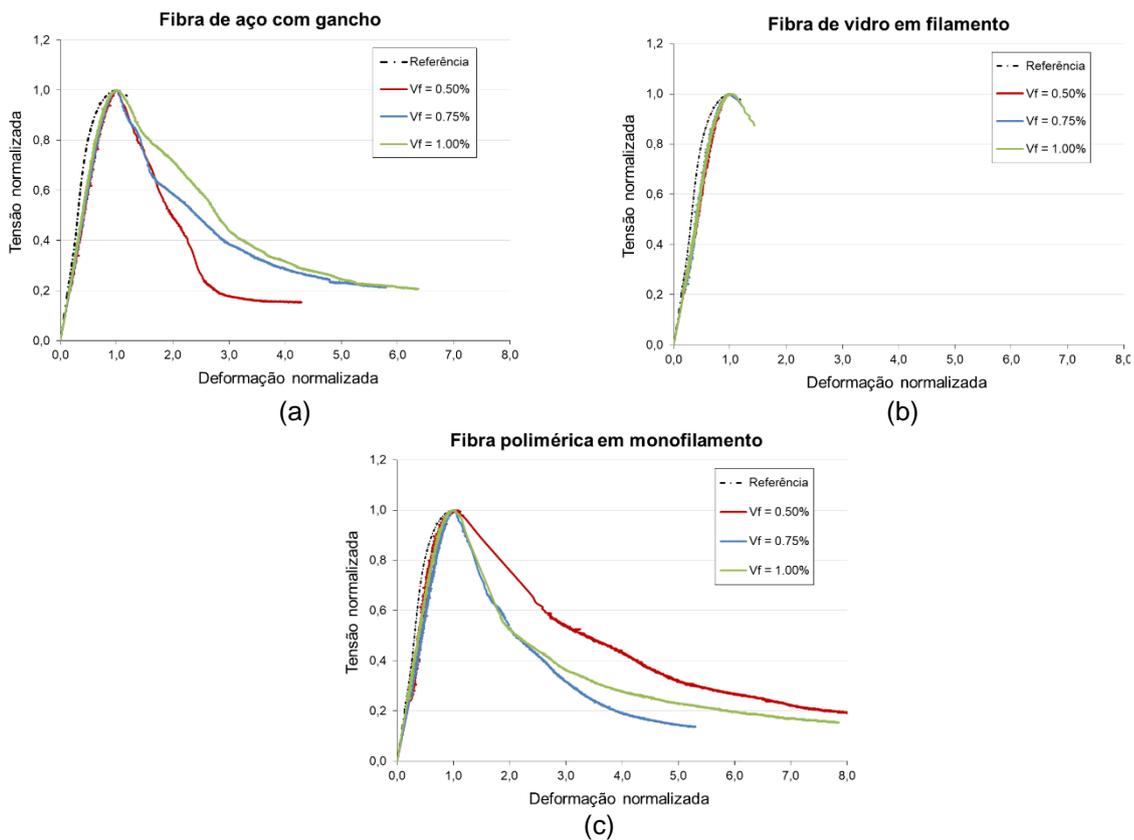
Devido à elevada resistência e rigidez dos corpos de prova pertencentes ao Grupo 2, não foi possível realizar a aquisição dos dados referentes à curva tensão-deformação

no trecho pós-pico de todos os traços. O concreto utilizado como referência (sem fibras) e o concreto reforçado com fibras de vidro filamentadas apresentaram um comportamento frágil, com uma queda abrupta na carga após os mesmos atingirem a tensão máxima de ensaio. Mesmo nos traços dos quais foi possível mensurar alguma tenacidade (AÇOGAN e POLMON), pequenas quedas abruptas na carga foram observadas ao longo do trecho descendente. Dessa forma, a tenacidade relativa não foi determinada para o Grupo 2.

Embora tenha sido utilizada uma máquina de grande rigidez para a realização dos ensaios de compressão, sabe-se que o comportamento pós-pico do concreto na compressão – conhecido na literatura como *softening* – é influenciado por diversos parâmetros, como a geometria do corpo de prova, condições de contorno do ensaio, taxa de deslocamento (ou carregamento), rigidez da máquina e do corpo de prova, atrito entre os pratos e o corpo de prova, entre outros (RILEM TC 148-SSC, 1997; SHAH *et al.*, 2000; SHAH; CHOI; JANSEN, 1994; TAERWE, 1993). Ressalta-se que, para esse grupo, diversas tentativas foram realizadas com taxas de deslocamento reduzidas (até a ordem de 0,0003 mm/s), mas o comportamento pós-pico não ficou bem definido. Uma possível solução para a obtenção da curva tensão-deformação completa seria a utilização de uma máquina que opere em circuito fechado (*closed-loop*), controlado pela deformação circunferencial ao corpo de prova (TAERWE, 1993).

Na Figura 110, são apresentadas as curvas tensão-deformação obtidas para os traços do Grupo 2. O efeito da fração volumétrica de fibras sobre o trecho pós-pico da curva tensão-deformação pode ser visualizado nos concretos reforçados com fibras de aço com gancho e fibras poliméricas. De forma análoga ao Grupo 1, observa-se um aumento da tenacidade do concreto na medida em que se aumenta o teor de fibras de aço com gancho. Por outro lado, as fibras poliméricas proporcionaram uma tenacidade maior com $V_f = 0,50\%$ do que $V_f = 0,75\%$ de acordo com a Tabela 27. Deve-se lembrar que, para $V_f = 0,50\%$, a tenacidade foi determinada até $\epsilon_c = 0,008$, diferente dos traços 90-POLMON-0,75 e 90-POLMON-1,00 nos quais esse parâmetro foi calculado até $\epsilon_c = 0,01$. As fibras de vidro, por sua vez, não proporcionaram ductilidade ao concreto com essa faixa de resistência.

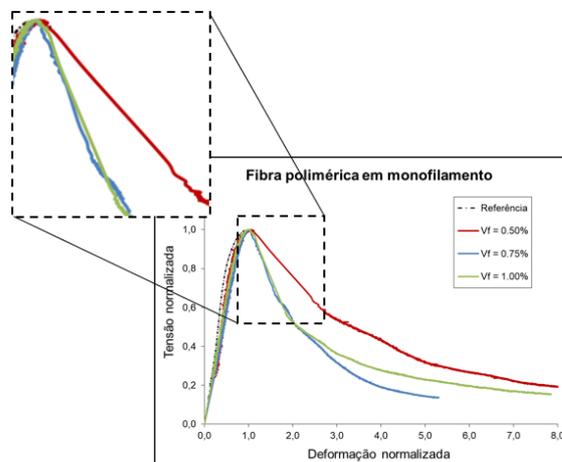
Figura 110. Curva tensão-deformação dos traços do Grupo 2: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de vidro em filamento e (c) fibra polimérica em monofilamento.



Fonte: Autoria própria.

Deve-se ressaltar também que, nas curvas do concreto reforçado com fibras poliméricas, pequenas quedas abruptas foram observadas logo após o material atingir a tensão máxima. Esse aspecto pode ser identificado nos trechos retos, isto é, sem variações na leitura (Figura 111).

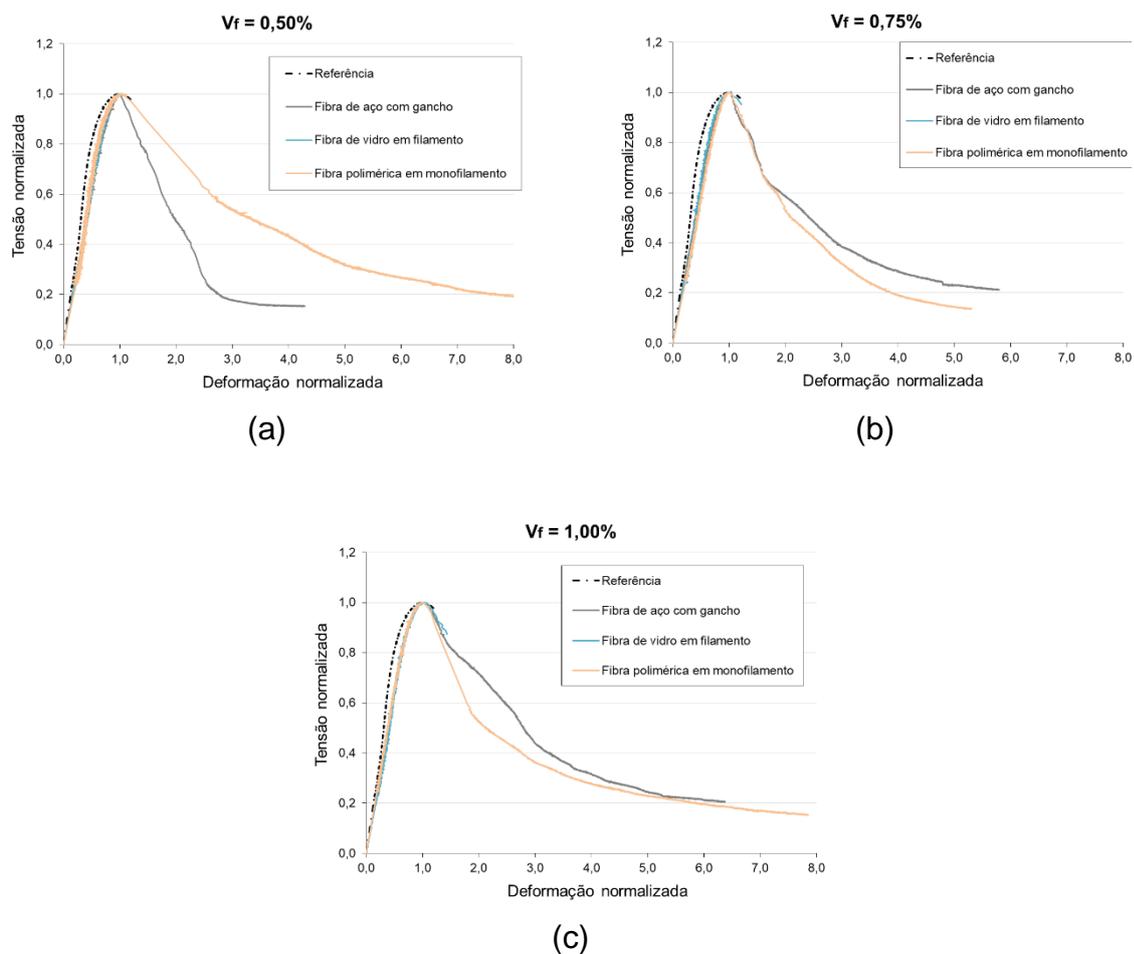
Figura 111. Análise das curvas tensão-deformação do concreto reforçado com fibra polimérica em monofilamento (Grupo 2).



Fonte: Autoria própria.

As curvas da Figura 110 estão novamente apresentadas na Figura 112 separadas de acordo com fração volumétrica de fibras utilizada. Destaca-se a maior ductilidade proporcionada pelas fibras poliméricas quando comparadas às fibras de aço, provavelmente provocado pela instabilidade do sistema na aquisição de dados logo após o material atingir a tensão máxima.

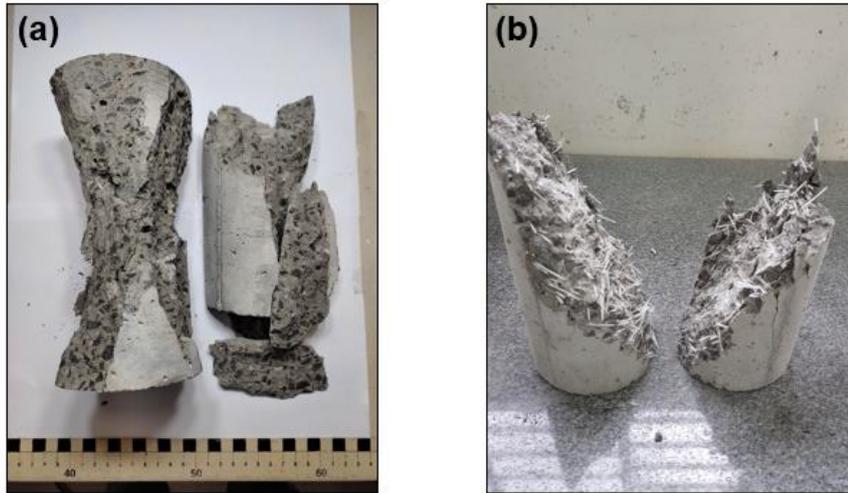
Figura 112. Curvas tensão-deformação normalizadas na compressão (Grupo 2): (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; e (c) $V_f = 1,00\%$.



Fonte: Autoria própria.

O aspecto do modo de ruptura dos corpos de prova está apresentado na Tabela 28 e segue o padrão do modo de falha observado nos corpos de prova do Grupo 1: fissuras verticais e paralelas ao sentido de aplicação de carga. Na Figura 113 é apresentado o aspecto de um dos corpos de prova do traço de referência (sem fibras), na qual se observa uma ruptura cônica de compressão e cunhas de concreto reforçado com fibras de vidro após um ensaio por controle de força.

Figura 113. Modo de falha dos corpos de prova: (a) ruptura cônica do traço de referência após ensaio de controle de deslocamento e (b) cunhas de concreto reforçado com fibras de vidro após ensaio por controle de carga.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 28. Corpos de prova do Grupo 2 após o ensaio por controle de deslocamento.

	Fibra de aço com gancho	Fibra de vidro em filamento	Fibra polimérica em monofilamento
$V_f = 0,50\%$			
$V_f = 0,75\%$			
$V_f = 1,00\%$			

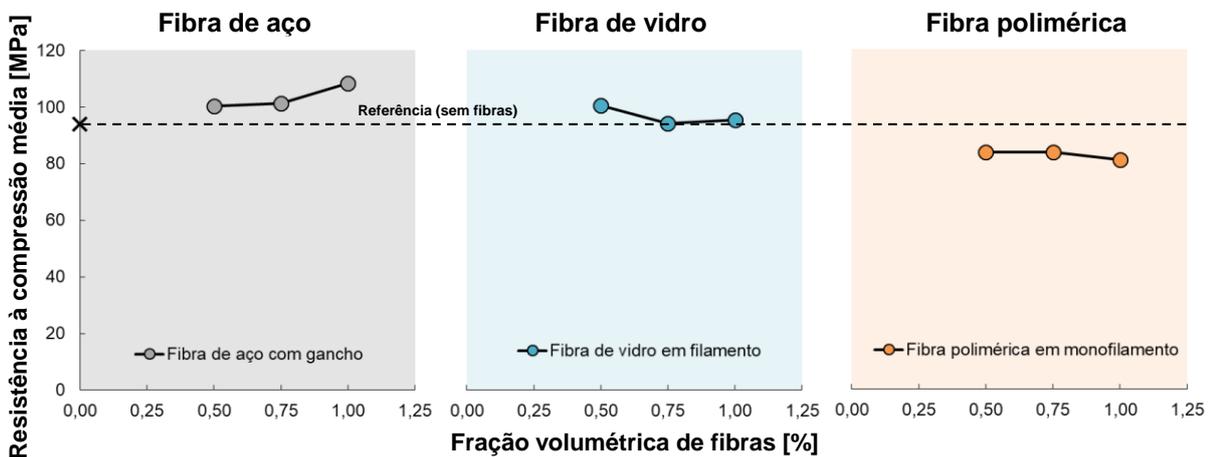
Fonte: Autoria própria.

Na sequência, são discutidos aspectos relacionados à resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico dos traços do Grupo 2.

5.2.2.1 Resistência à compressão

A adição de fibras ao concreto do Grupo 2 afetou a resistência à compressão de forma similar ao Grupo 1, com diferenças máximas em torno de 15% (positivas no caso das fibras de aço com gancho e negativas para as fibras poliméricas). Além disso, infere-se que a fração volumétrica de fibras pouco afetou a resistência à compressão do concreto (Figura 114). Destaca-se, no entanto, que as variações na resistência à compressão encontradas para o Grupo 2 segue o mesmo padrão do Grupo 1: no caso das fibras de aço com gancho, a resistência à compressão aumenta conforme se aumenta a quantidade de fibras, enquanto ela diminui com o aumento de V_f para as fibras poliméricas.

Figura 114. Influência da fração volumétrica de fibras sobre a resistência à compressão do concreto (Grupo 2).



Fonte: Autoria própria.

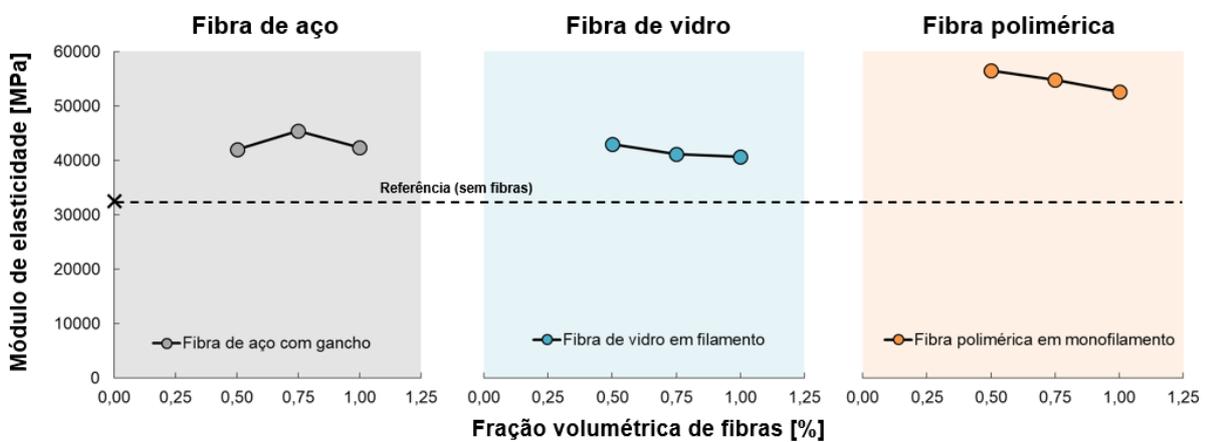
Na Tabela 29, são apresentadas as curvas tensão-deformação dos Grupos 1 e 2 para fins de comparação. O trecho ascendente das curvas dos traços do Grupo 2, que contempla o ramo elástico – até cerca de 40% da tensão máxima – e a perda de linearidade, é caracterizada por uma inclinação maior quando comparada aos concretos do Grupo 1. Isso se deve à maior rigidez dos concretos do Grupo 2 devido à sua composição e maior resistência. Por outro lado, essa rigidez é traduzida em maior fragilidade no comportamento do material, a qual é observada no trecho descendente da curva, na região do pós-pico. Mesmo após a adição de fibras, esse trecho é claramente mais inclinado para os concretos do Grupo 2 quando comparado ao Grupo 1. No caso das fibras poliméricas, nota-se uma inclinação próxima desse trecho entre os dois grupos. No entanto, esse comportamento surge após uma queda

repentina no carregamento durante o ensaio, conforme ilustrado na Figura 111, e pode estar associado à instabilidade do sistema durante a aquisição de dados.

5.2.2.2 Módulo de elasticidade

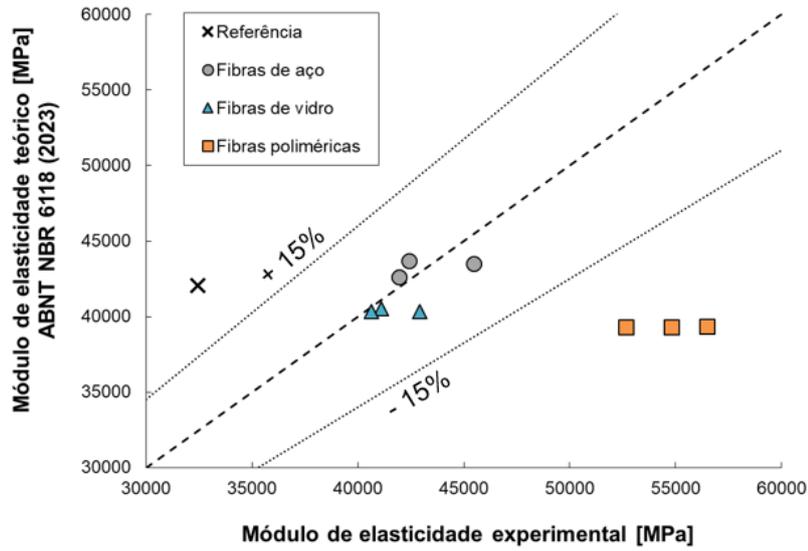
O módulo de elasticidade foi determinado conforme a Equação (5.2) e a influência da fração volumétrica de fibras sobre esse parâmetro é apresentada na Figura 115. Os concretos reforçados com fibras de aço e de vidro apresentaram módulos de elasticidade de mesma magnitude, em torno de 30% maior que o módulo de elasticidade do concreto sem fibras. Por outro lado, o concreto reforçado com fibras poliméricas, embora com menores valores de resistência à compressão, apresentou valores mais elevados para o módulo de elasticidade, acima de 50 GPa. Comparando-se os valores experimentais e teóricos determinados pela ABNT NBR 6118 (2023), boas correspondências são observadas para o concreto reforçado com fibras de aço e de vidro, enquanto o concreto convencional (sem fibras) e o reforçado com fibras poliméricas apresentaram valores fora da faixa de variação de 15% (Figura 116).

Figura 115. Influência da fração volumétrica de fibras sobre o módulo de elasticidade.



Fonte: Autoria própria.

Figura 116. Módulo de elasticidade experimental e teórico (Grupo 2).



5.2.2.3 Deformação de pico

De forma similar aos concretos do Grupo 1, a adição de fibras ao concreto proporcionou um aumento na deformação de pico quando comparado ao concreto convencional (Figura 117). No entanto, a evolução desse parâmetro com a fração volumétrica de fibras foi observada apenas para as fibras de aço com gancho, que conferiu as maiores deformações de pico ao concreto. No caso das fibras de vidro e poliméricas, as deformações de pico mais elevadas ocorreram com frações volumétricas de 0,50% e 0,75%, respectivamente.

Figura 117. Influência da fração volumétrica de fibra sobre a deformação de pico do concreto (Grupo 2).

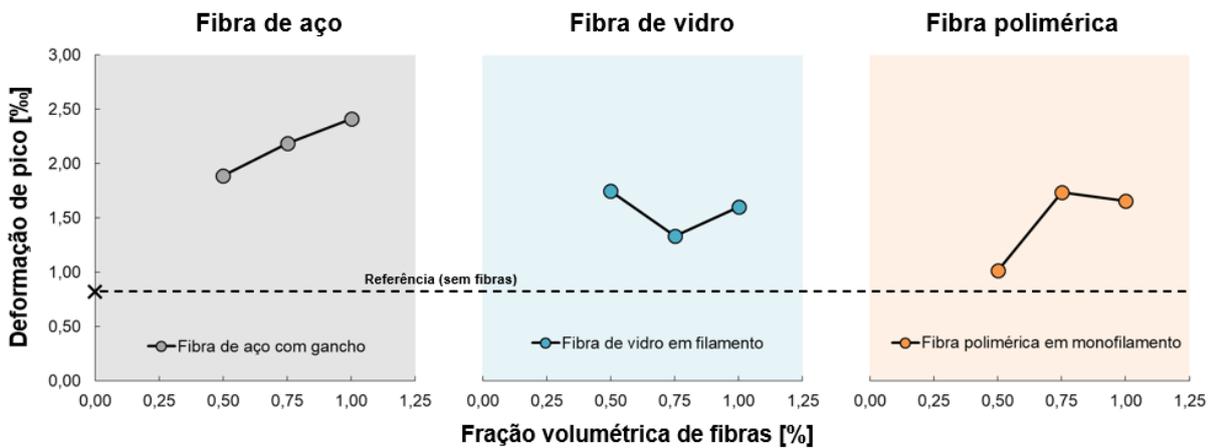
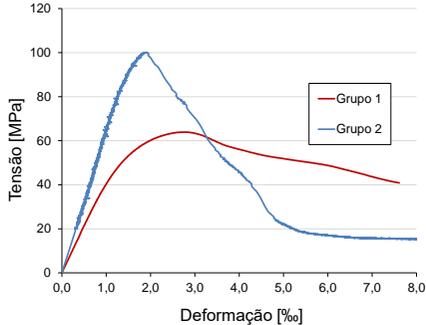
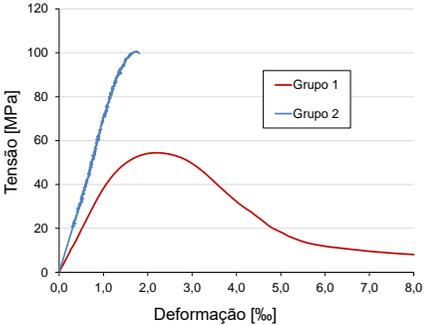
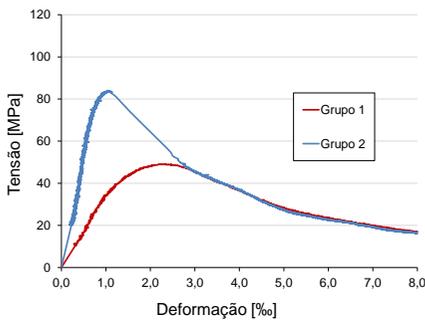
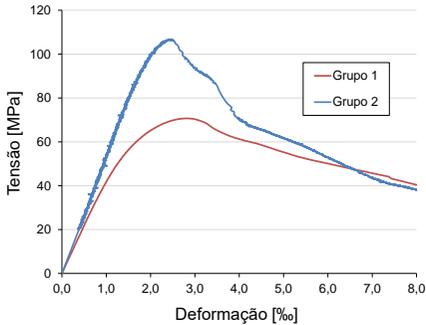
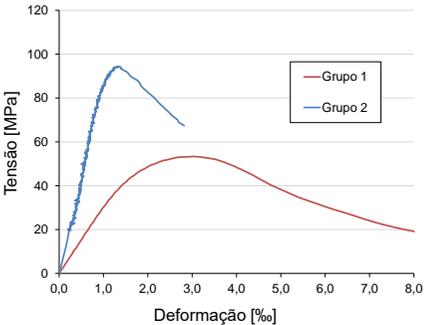
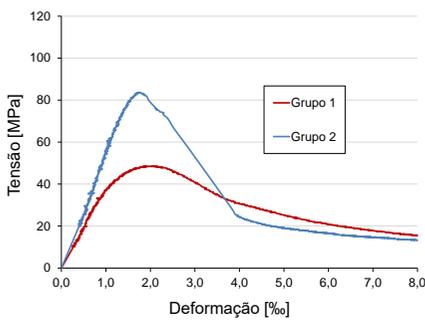
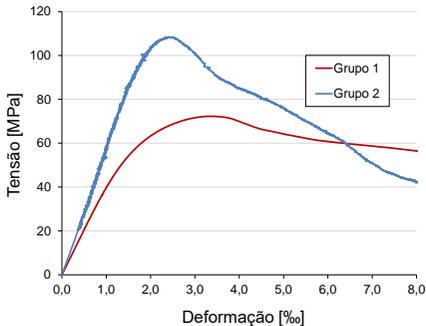
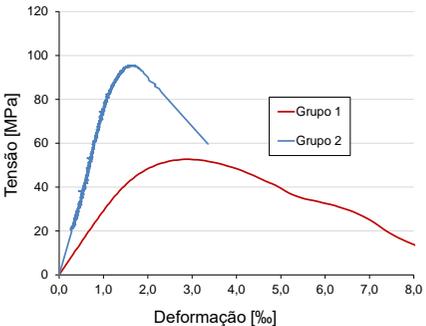
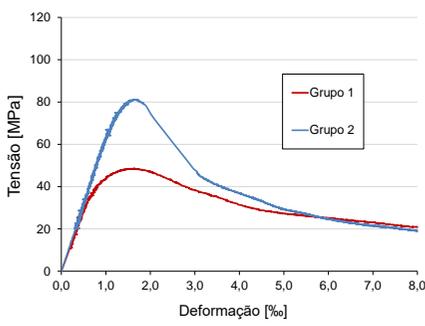


Tabela 29. Comparação entre curvas tensão-deformação dos concretos dos Grupos 1 e 2.

	Fibra de aço com gancho	Fibra de vidro em filamento	Fibra polimérica em monofilamento
$V_f = 0,50\%$			
$V_f = 0,75\%$			
$V_f = 1,00\%$			

Fonte: Autoria própria.

5.3 MODELOS CONSTITUTIVOS

Os resultados experimentais do Grupo 1 foram utilizados para ajustar um modelo constitutivo na compressão existente na literatura para o concreto reforçado por diferentes tipos de fibras. Optou-se por não considerar os resultados do Grupo 2 para a elaboração do modelo constitutivo em virtude da instabilidade do ensaio na região do pós-pico de alguns traços. O objetivo do modelo constitutivo é auxiliar no projeto e dimensionamento de elementos estruturais de concreto reforçado com fibras submetidos à compressão.

O modelo constitutivo de Carreira e Chu (1985), utilizado por diversos autores da literatura (Tabela 7), possui a vantagem de ser uma formulação simples capaz de traçar a curva completa tensão-deformação, isto é, ambos os trechos ascendentes (até a tensão de pico) e descendente, motivos pelos quais foi utilizada, na presente pesquisa, para a elaboração do modelo constitutivo.

Em sua pesquisa publicada em 1985 para concreto convencional (sem fibras), os autores destacam as condições necessárias para o desenvolvimento de um novo modelo constitutivo:

- a equação deve estar em conformidade com os dados experimentais favoravelmente;
- os trechos ascendente e descendente devem ser contemplados pela equação;
- a equação deve ser baseada em parâmetros com significados físicos que podem ser determinados experimentalmente: no ponto de origem, $\frac{d(\sigma)}{d\varepsilon} = E_{it}$, em que σ e ε é a tensão e deformação do concreto, respectivamente, e E_{it} é o módulo elástico inicial.

Além das condições necessárias, os autores impuseram também as condições desejáveis para o modelo:

- a formulação matemática deve ser simples;
- uma única equação deve prever ambos os trechos ascendente e descendente da curva;
- as integrais devem ser resolvidas facilmente.

O modelo proposto pelos autores é definido pelas Equações (5.3) e (5.4):

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{\beta(\varepsilon_c/\varepsilon_{c0})}{\beta - 1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_{c0})^\beta} \quad (5.3)$$

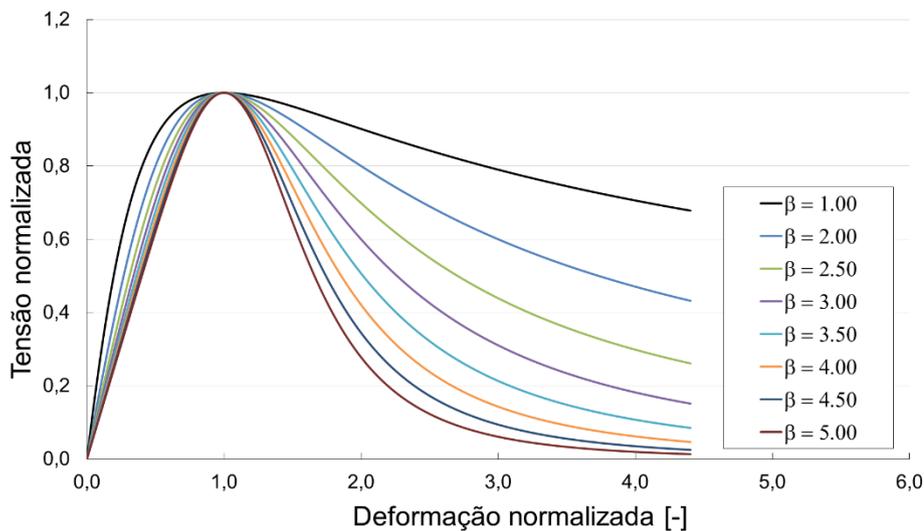
$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f_{cm}}{\varepsilon_{c0}E_{cm}}} \quad (5.4)$$

em que:

- f_{cm} é a resistência à compressão do concreto;
- ε_{c0} é a deformação de pico (associada à tensão máxima);
- E_{cm} é o módulo de elasticidade do concreto;
- σ_c é a tensão no concreto;
- ε_c é a deformação no concreto.

O parâmetro β controla o trecho descendente na região pós-pico da curva tensão-deformação, que é diretamente afetada pela adição de fibras ao concreto. Quanto menor o valor de β , menor a declividade do trecho, indicando um comportamento mais dúctil (Figura 118).

Figura 118. Influência do parâmetro β no modelo constitutivo de Carreira e Chu (1985).



Fonte: Autoria própria

Para que o modelo constitutivo dependesse da menor quantidade de variáveis possíveis e não apresentasse uma formulação complexa, a deformação de pico (ε_{c0}) e o parâmetro β são determinados por meio de expressões simples que envolvem

apenas o índice de reforço (RI – *reinforcing index*). Essas expressões foram obtidas por meio de regressões lineares a partir dos resultados experimentais e são apresentadas na Tabela 30. O parâmetro β foi definido de modo que a diferença entre a tenacidade calculada pelo modelo constitutivo e a tenacidade experimental fosse a mínima possível.

O conceito de índice de reforço foi utilizado para que os modelos constitutivos possam ser utilizados em fibras com diferentes geométricas (desde que seja o mesmo material). O índice de reforço é determinado de acordo com a Equação (5.5):

$$RI = V_f \frac{\phi_f}{l_f} \quad (5.5)$$

em que:

V_f é a fração volumétrica de fibra;

ϕ_f é o diâmetro da fibra;

l_f é o comprimento da fibra.

Tabela 30. Expressões para estimar a deformação de pico (ϵ_{co}) e o parâmetro β .

Tipo de fibra	ϵ_{co}	β
aço com gancho	1,40RI + 2,09	-0,26RI + 2,18
aço corrugada	4,75RI + 1,24	-1,31RI + 2,60
vidro em filamento	2,57RI + 1,40	-1,17RI + 3,72
vidro pultrudada	-0,51RI + 2,58	-1,32RI + 2,98
polimérica em monofilamento	-1,28RI + 2,69	-1,41RI + 3,25
polimérica torcida	-0,92RI + 2,75	-2,77RI + 4,63

Fonte: Autoria própria

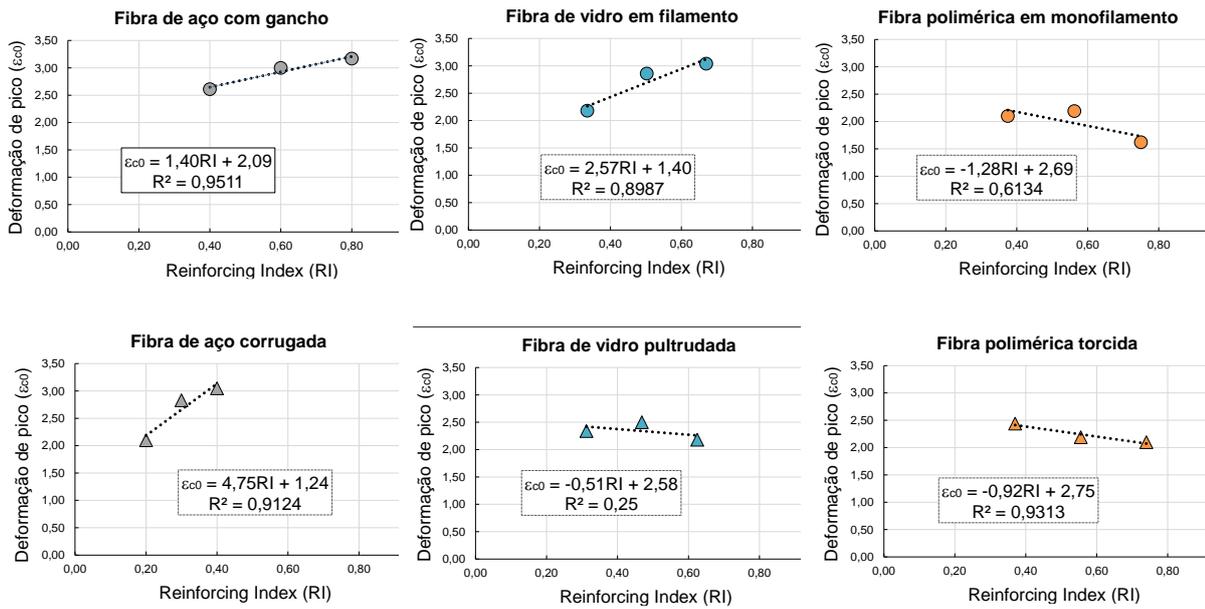
As regressões lineares da deformação de pico (ϵ_{co}) e do parâmetro β , para cada fibra, estão apresentadas na Figura 119 e na

Figura 120, respectivamente, nas quais se observa, na maioria dos traços, elevados coeficientes de determinação (R^2), indicando uma boa correlação entre as grandezas. As curvas obtidas com o modelo constitutivo foram confrontadas com as curvas

experimentais e estão ilustradas na Figura 121, na qual se observa uma boa concordância entre elas.

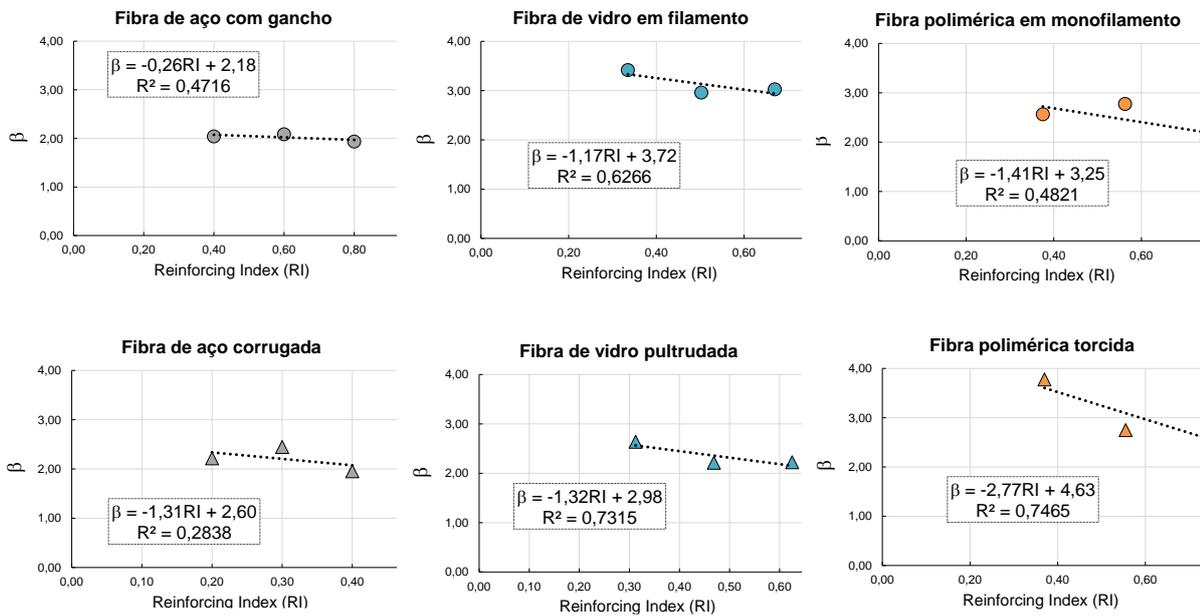
Figura 119. Análise de regressão linear para determinação da deformação de pico (ϵ_{c0}) em função de

RI.



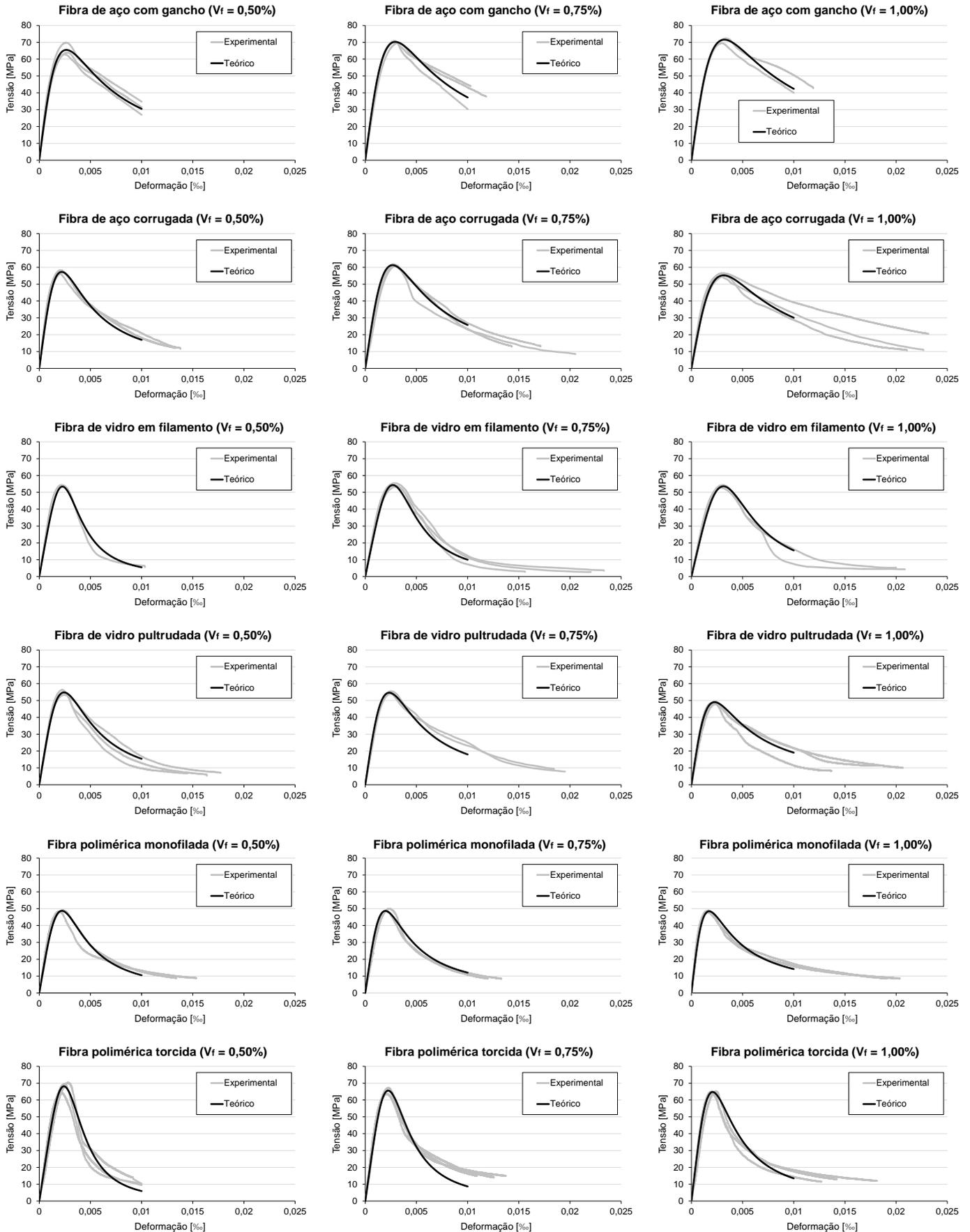
Fonte: Autoria própria

Figura 120. Análise de regressão linear para determinação do parâmetro β em função de RI.



Fonte: Autoria própria

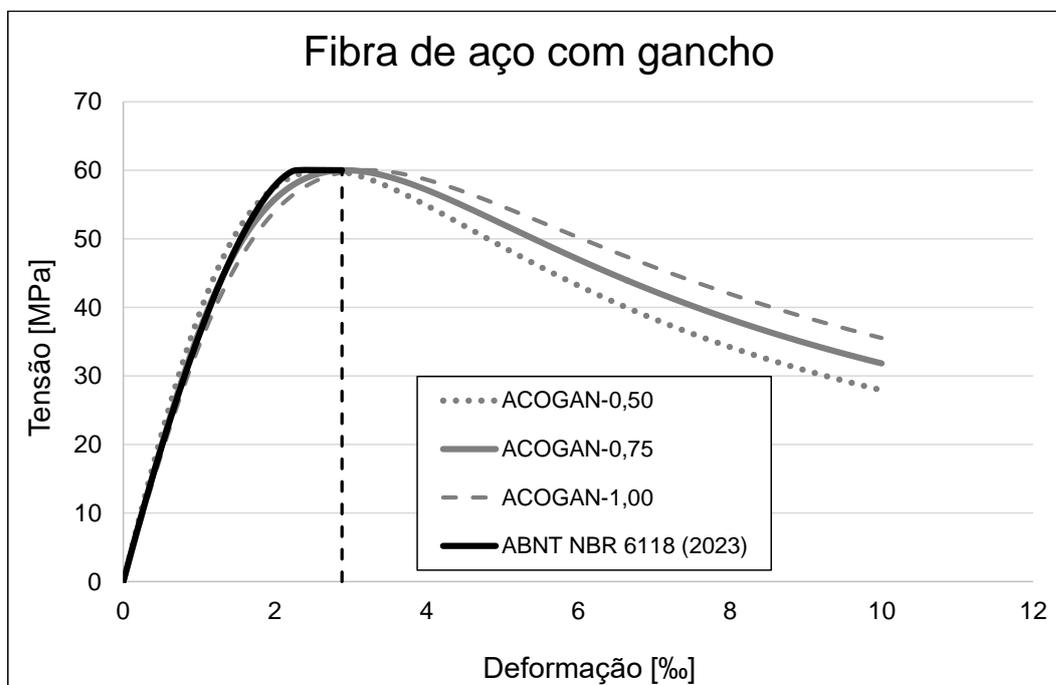
Figura 121. Comparação entre as curvas analíticas e experimentais.



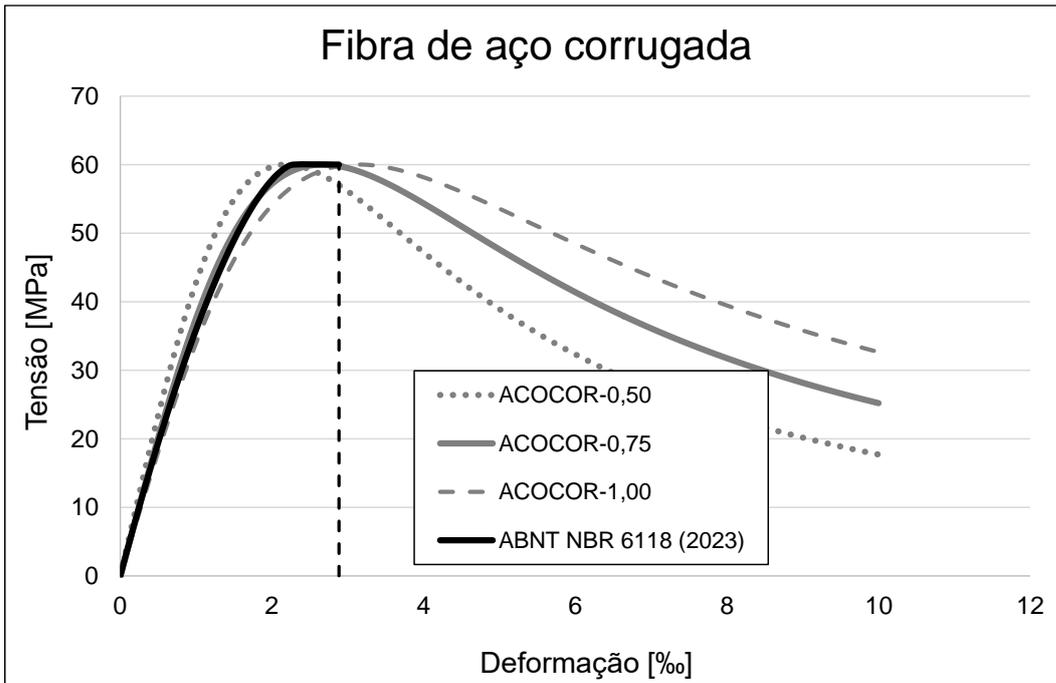
Fonte: Autoria própria

Na Figura 122, é apresentada uma comparação entre os modelos constitutivos ajustados ($f_{cm} = 60$ MPa) e o modelo constitutivo da norma técnica ABNT NBR 6118 (2023), na qual a linha pontilhada indica a deformação última do concreto determinada conforme a norma, igual a 2,88‰. Nota-se, claramente, para todos os tipos de fibra, o ganho de tenacidade na compressão que se obtém com a adição de fibras ao concreto. O efeito da fração volumétrica de fibra é mais pronunciado nos traços com fibras de aço corrugadas e fibras de vidro filamentadas, enquanto esse efeito quase não é visível em concretos reforçados com fibras de vidro pultrudadas e poliméricas.

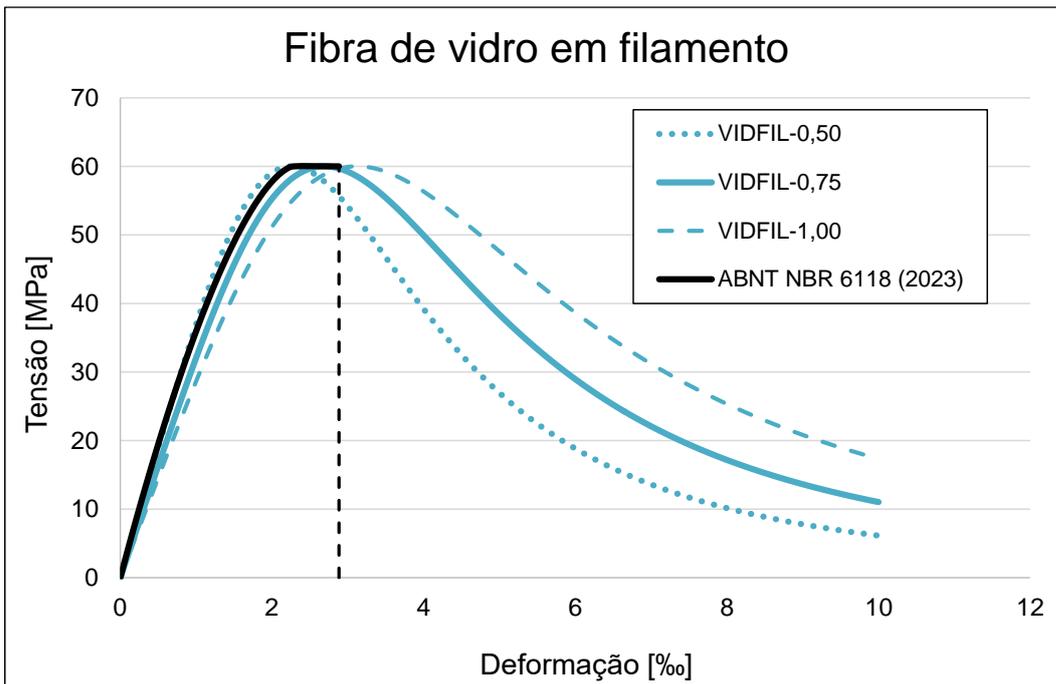
Figura 122. Comparação entre os modelos constitutivos ajustados ($f_c = 60$ MPa) e o modelo constitutivo da ABNT NBR 6118 (2023): (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.



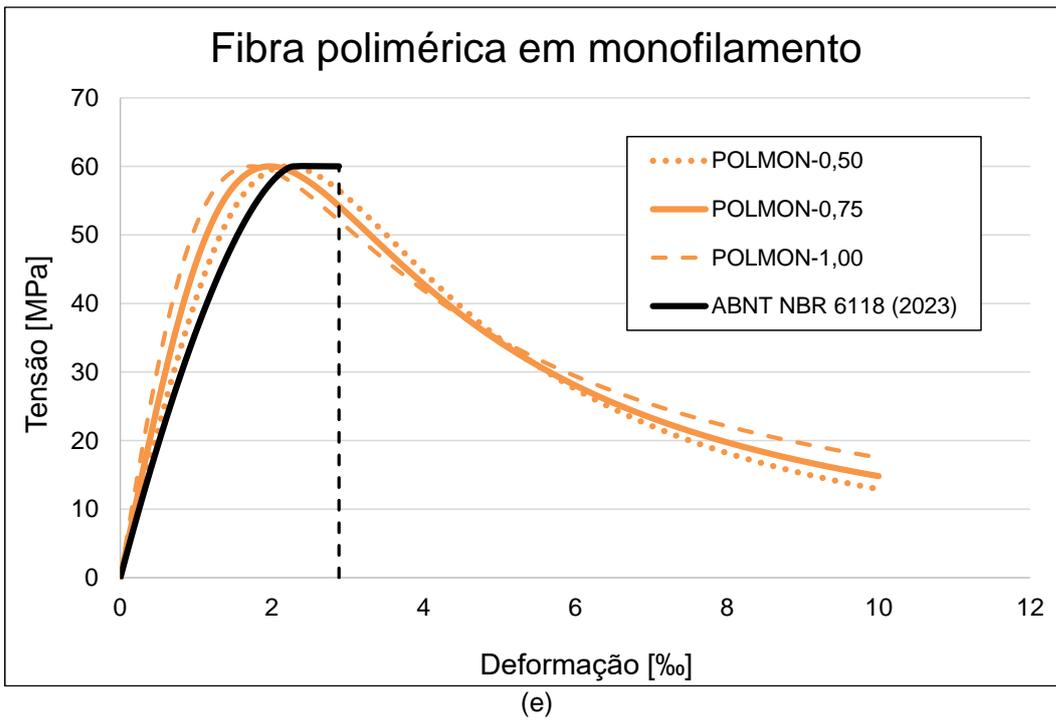
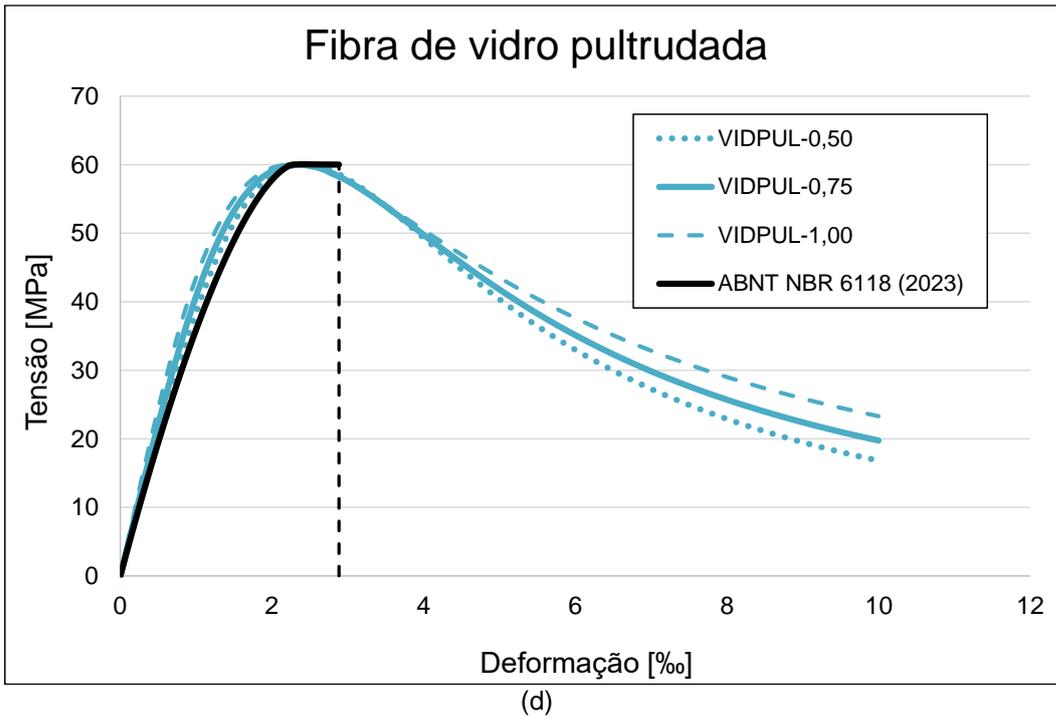
(a)

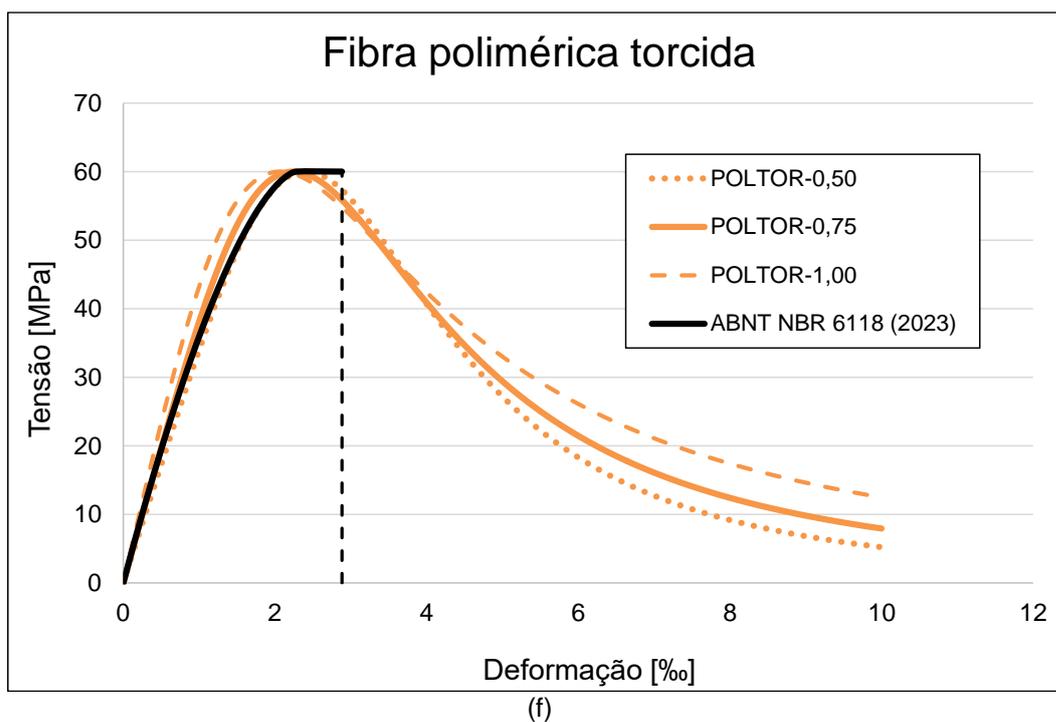


(b)



(c)





Fonte: Autoria própria.

5.3.1 Comparação com modelos constitutivos da literatura

Para fins de comparação, são apresentadas as curvas tensão-deformação obtidas a partir do modelo constitutivo ajustado e por modelos de diferentes autores da literatura (Figura 123, Figura 124, Figura 125). Ressalta-se que, conforme apresentado na Tabela 7, a maioria dos modelos constitutivos na compressão para o concreto reforçado com fibras foram desenvolvidos a partir de resultados experimentais com fibras de aço.

De todos os modelos analisados, o modelo ajustado é o que apresenta a maior concordância com os resultados experimentais, sendo capaz de representar, inclusive, o comportamento pós-pico para todas as fibras. Com exceção das fibras de aço, o modelo de Hsu e Hsu (1994) apresentou maiores valores de tenacidade e deformação de pico para o restante das fibras estudadas. O comportamento do concreto reforçado com fibra de aço corrugada foi o que mais se aproximou do modelo dos autores.

O modelo de Someh e Saeki (1994) destacou-se dentre todos os modelos por proporcionar a maior tenacidade, além de não representar corretamente o trecho

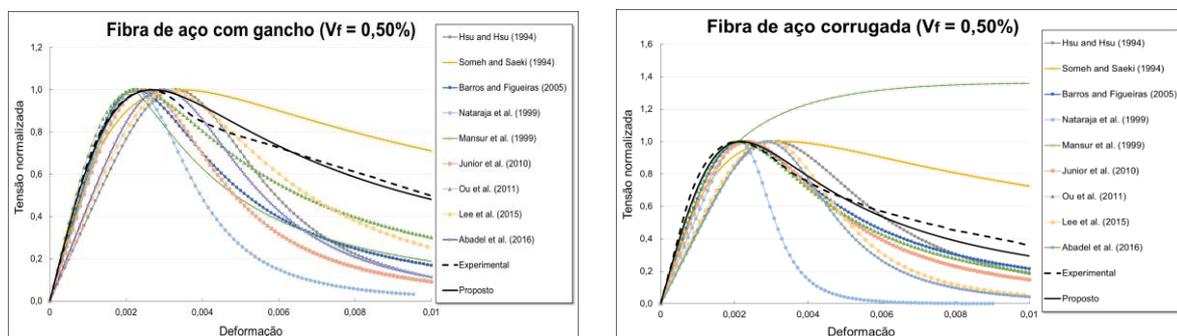
descendente da curva. O modelo de Barros e Figueiras (2005) subestimou a capacidade de absorção de energia, apresentando boa concordância apenas com as curvas do concreto reforçado com fibras poliméricas em monofilamento. De modo similar, o modelo de Nataraja *et al.* (1999) também subestimou a tenacidade do CRF, principalmente no concreto reforçado com fibra de aço corrugada.

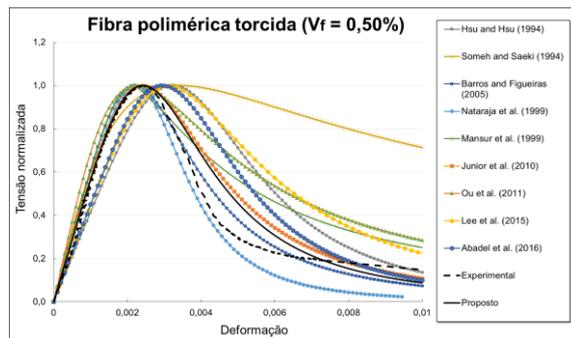
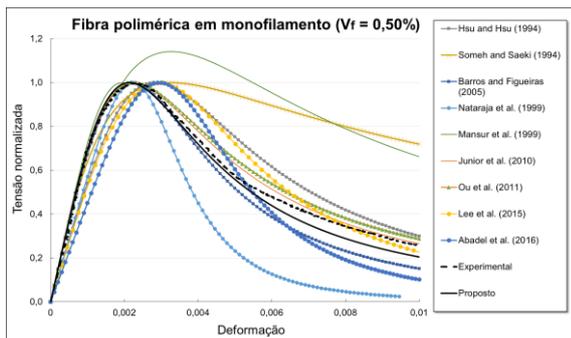
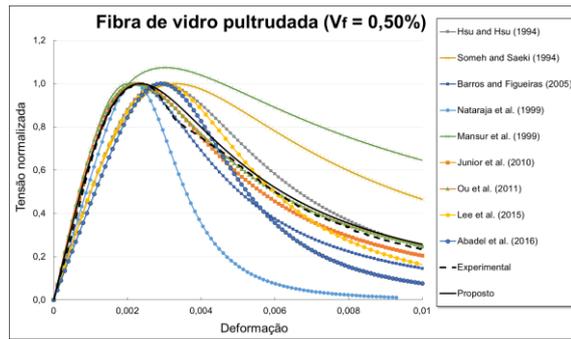
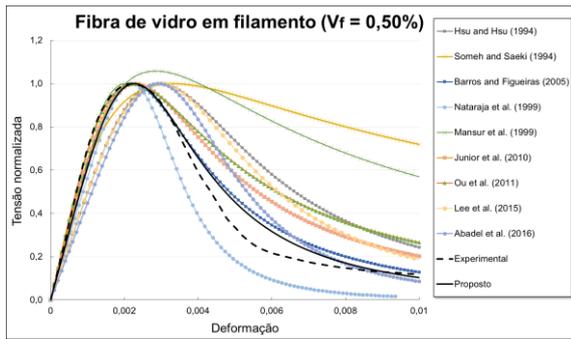
O modelo de Mansur *et al.* (1999) apresentou boa concordância apenas com os resultados experimentais com fibra de aço corrugada e fibra polimérica torcida. Como o modelo dos autores foi proposto para concretos de resistência à compressão entre 70 e 120 MPa, os valores de tensão ultrapassaram a tensão máxima normalizada em alguns traços.

O ramo ascendente dos modelos de Junior *et al.* (2010), Lee *et al.* (2015) e Abadel *et al.* (2016) não apresentou concordância com os resultados experimentais, simulando o comportamento de um material de menor rigidez. Além disso, o comportamento pós-pico desses modelos também não correspondera bem aos resultados experimentais.

O modelo de Ou *et al.* (2011), dentre todos da literatura citados, foi o que apresentou a melhor correspondência com as curvas experimentais, principalmente aqueles referentes ao concreto reforçado com fibras de vidro pultrudada. Apesar disso, o comportamento pós-pico dos concretos reforçados com fibras de aço e fibras poliméricas ficaram distantes dos seus análogos experimentais.

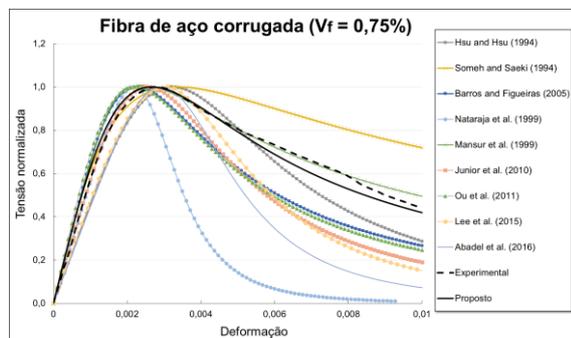
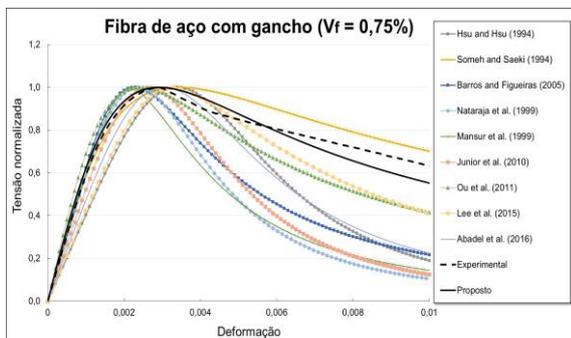
Figura 123. Comparação entre o modelo constitutivo ajustado e modelos da literatura ($V_f = 0,50\%$).

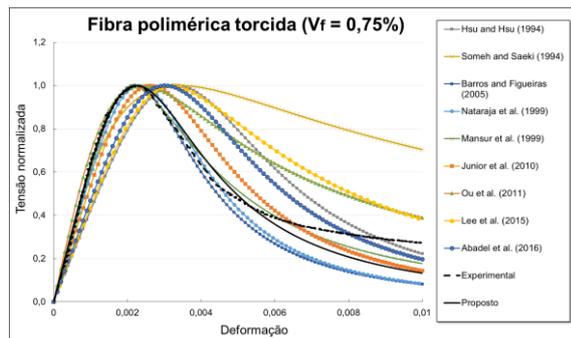
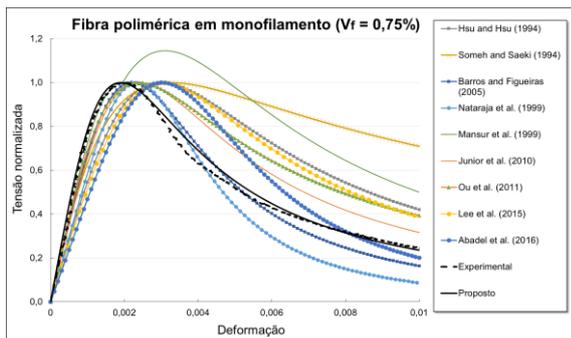
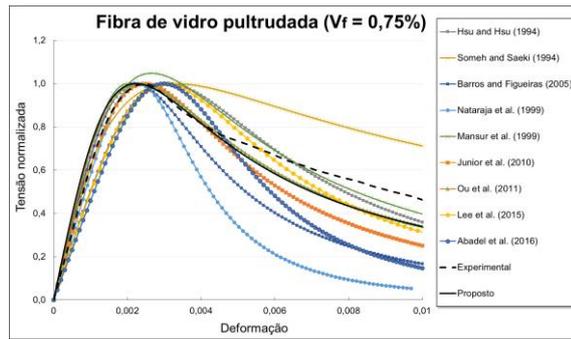
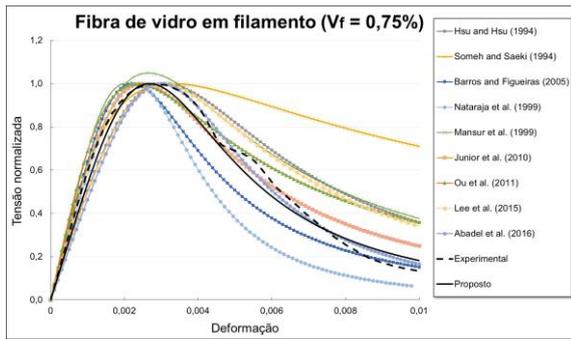




Fonte: Autoria própria

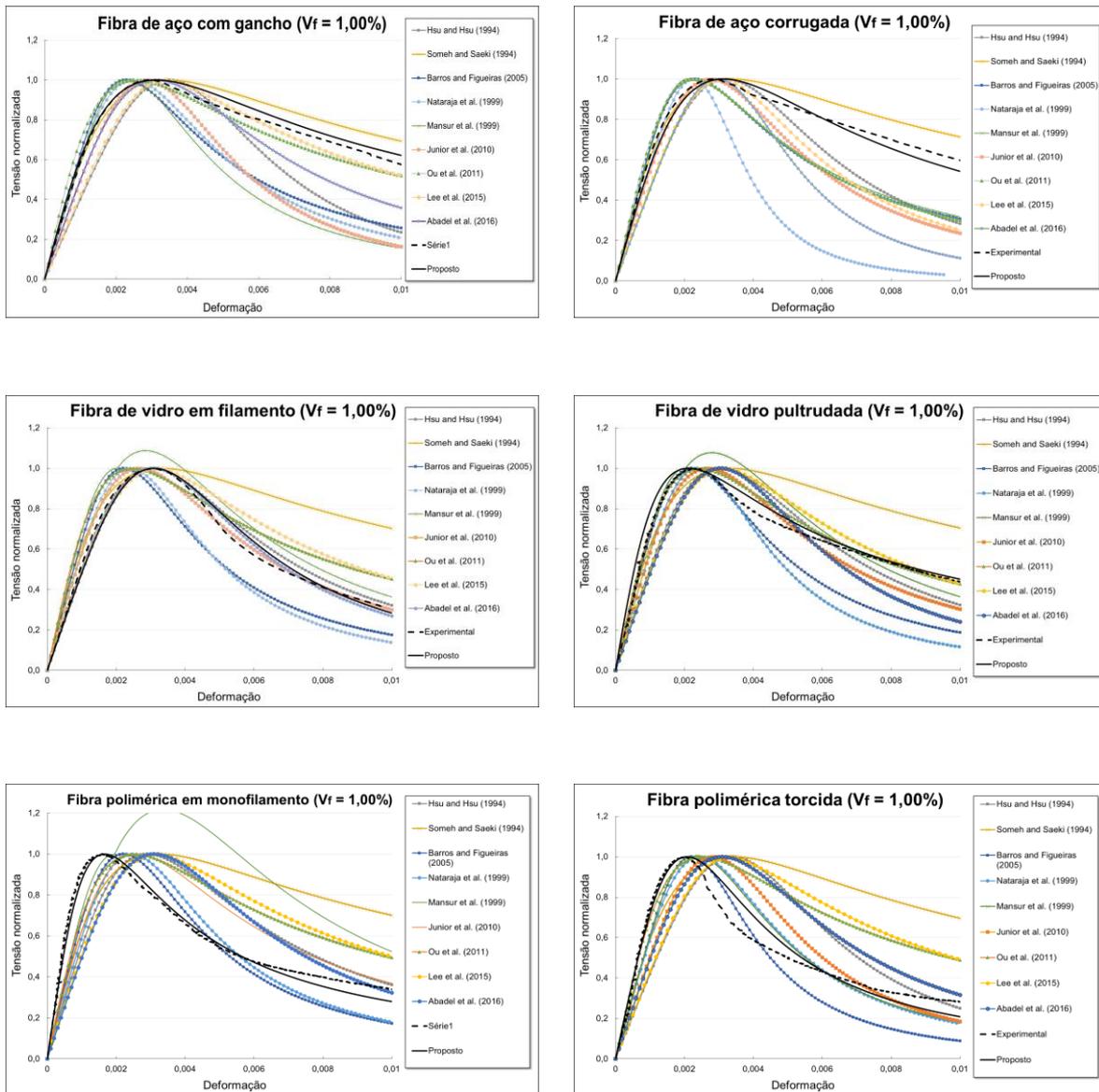
Figura 124. Comparação entre o modelo constitutivo ajustado e modelos da literatura ($V_f = 0,75\%$).





Fonte: Autoria própria

Figura 125. Comparação entre o modelo constitutivo ajustado e modelos da literatura ($V_f = 1,00\%$).



Fonte: Autoria própria

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo descreveu o comportamento do concreto de alta resistência reforçado com diferentes tipos de fibras na compressão, dividido em dois grupos: Grupo 1, com seis tipos de fibras e resistência à compressão entre 50 e 70 MPa; e Grupo 2, com seis tipos de fibra e resistência à compressão entre 80 e 100 MPa. Três frações volumétricas foram investigadas para cada tipo de fibra.

Os resultados indicaram que a adição de fibras ao concreto afeta, majoritariamente, a ductilidade e tenacidade do concreto. Propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e resistência à compressão são pouco influenciadas. Destaca-se, no entanto, que uma redução na resistência à compressão do concreto foi observada na maioria dos casos nos quais foram utilizadas fibras poliméricas. Nesse mesmo tipo de fibra, observou-se uma redução na deformação de pico com o aumento do teor de fibras no concreto.

A tenacidade é diretamente proporcional à quantidade de fibras que se adiciona ao concreto, isto é, quanto maior a fração volumétrica de fibras, maior é a tenacidade ou ductilidade. Mesmo na compressão, as fibras podem atuar como pontes de transferência de tensão entre as faces de fissuras que surgem no corpo de prova, principalmente devido ao efeito de Poisson. Esse aspecto pode conferir tenacidade e aumento da deformação de pico no concreto.

O comportamento pós-pico na compressão dos traços que contemplam o Grupo 2 não foi obtido com a metodologia de ensaio adotada devido à instabilidade do ensaio durante a aquisição de dados. Devido à elevada rigidez do concreto desse grupo, cuja resistência à compressão atingiu valores superiores a 100 MPa, o equipamento liberou parte da energia de deformação ao corpo de prova na tensão máxima, impedindo a aquisição precisa do trecho pós-pico. As fibras de aço com gancho, no entanto, conseguiram evitar uma queda abrupta da carga do corpo de prova, impedindo uma ruptura explosiva. As fibras poliméricas, por sua vez, evitaram parcialmente essa queda de carga, enquanto o concreto reforçado com fibras de vidro apresentou um comportamento frágil.

Modelos constitutivos na compressão foram ajustados a partir dos resultados experimentais utilizando o modelo inicialmente proposto por Carreira e Chu (1985). Nos modelos ajustados, a deformação de pico (ϵ_{c0}) e o parâmetro β são determinados por meio de regressões lineares, de forma que a diferença entre a tenacidade obtida nos ensaios e por meio do modelo constitutivo fosse mínima. As curvas constitutivas foram confrontadas com as curvas experimentais e apresentaram ótima concordância.

6

Comportamento do CARRF na flexão

Neste capítulo são apresentados a metodologia e os resultados dos ensaios de flexão em três pontos dos traços contemplados no programa experimental. As propriedades mecânicas como limite de proporcionalidade, resistências residuais, tenacidade e módulo de ruptura (tensão de flexão máxima pós-fissuração) são apresentadas e discutidas frente ao tipo e fração volumétrica de fibras de cada traço. A classificação do concreto reforçado com fibras e os modelos constitutivos em conformidade com o código modelo 2010 (FIB, 2011) são apresentados e as condições normativas exigidas para a utilização do concreto reforçado com fibras em aplicações estruturais são verificadas e discutidas.

6.1 METODOLOGIA DE ENSAIO

Os ensaios de flexão em três pontos foram realizados em uma máquina InterMetric com capacidade de 500 kN (Figura 126), conforme os procedimentos descritos na ABNT NBR 16940 (2021).

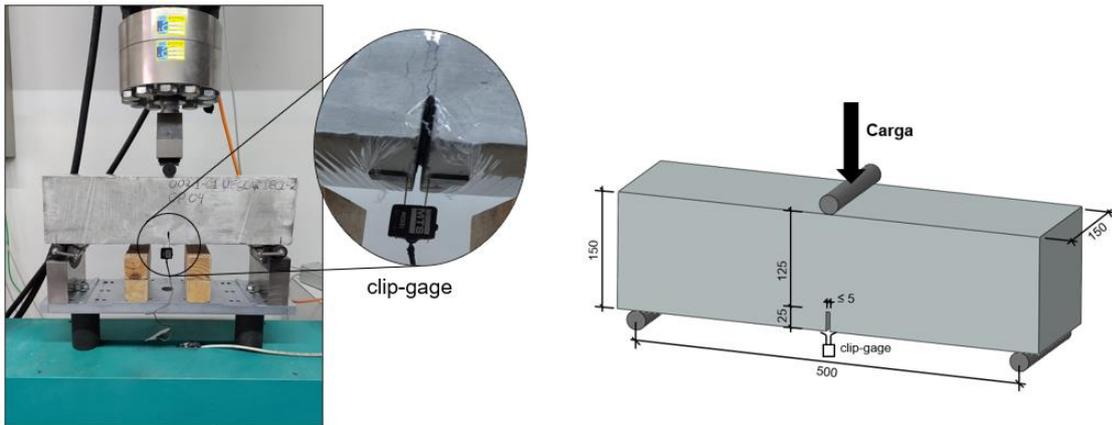
Figura 126. Máquina InterMetric utilizada nos ensaios de flexão em três pontos.



Fonte: Autoria própria

Nesse ensaio, o limite de proporcionalidade (LOP) e as resistências residuais (f_L , $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$) são determinadas por meio de ensaio de flexão em prismas entalhados, cujas dimensões típicas são apresentadas na Figura 127. Devido à configuração do ensaio (flexão em três pontos), essa metodologia é conhecida no âmbito internacional como 3PBT – *three point bending test*. O ensaio foi realizado em circuito fechado de controle de velocidade (*closed-loop*), no qual a variável de controle foi a abertura da fissura medida por um transdutor (*clip-gage*) posicionado no entalhe, conforme ilustrado na Figura 127. O carregamento é aplicado de forma que a abertura da fissura aumente a uma taxa constante de 0,05 mm/min até atingir uma abertura de 0,10 mm, a partir do qual a taxa é elevada para 0,20 mm/min e assim permanece até o final do ensaio.

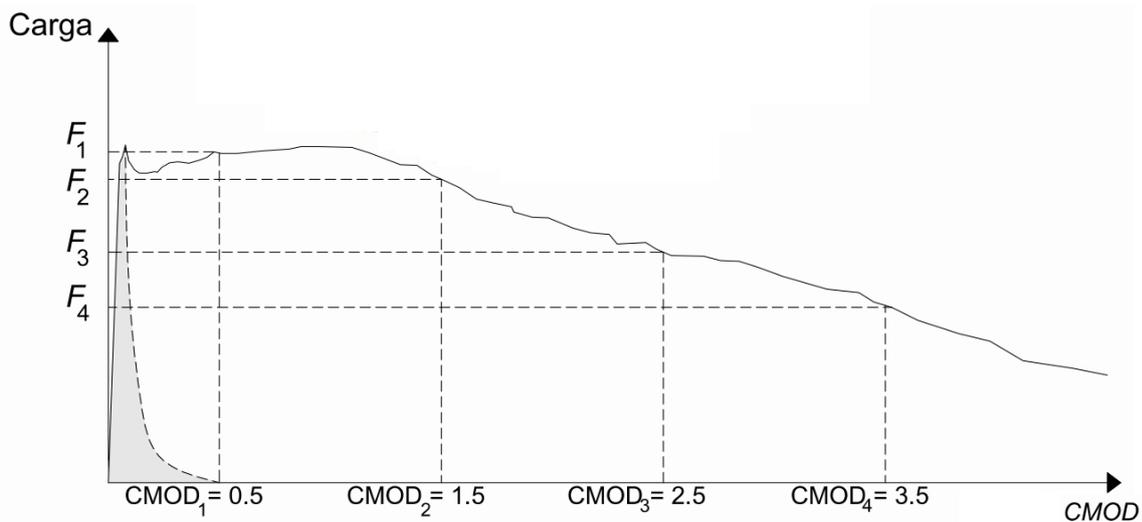
Figura 127. Detalhe do *clip-gage* para o ensaio de flexão em três pontos e dimensões dos prismas entalhados (em mm).



Fonte: Autoria própria.

Os resultados do ensaio são obtidos na forma de curvas carga-abertura de fissura, conforme ilustrado na Figura 128. Na língua inglesa, “CMOD” é a abreviação de *Crack Mouth Opening Displacement*, que corresponde à abertura da fissura.

Figura 128. Curva carga-abertura de fissura genérica obtida no ensaio de flexão de vigas.



Fonte: ABNT NBR 16935 (2021).

A partir da curva carga-abertura de fissura obtida no ensaio e considerando uma distribuição de tensão linear na seção transversal, calcula-se o limite de proporcionalidade (f_L) e as resistências residuais à tração na flexão ($f_{R,i}$) por meio das Equações (3.5) e (3.6), respectivamente:

$$f_L = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2} \quad (6.1)$$

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (6.2)$$

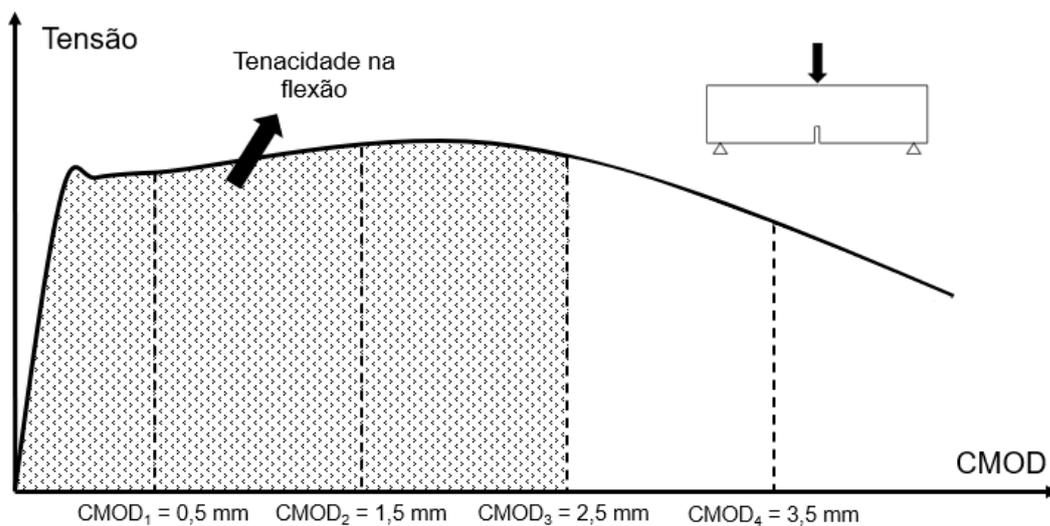
em que:

- f_L é o limite de proporcionalidade [MPa];
- $f_{R,j}$ é a resistência residual à tração na flexão correspondente ao $CMOD = CMOD_i$ ($j = 1, 2, 3, 4$) [MPa];
- F_j é a carga correspondente ao $CMOD = CMOD_i$ ($j = 1, 2, 3, 4$) [N];
- F_L é a carga correspondente ao limite de proporcionalidade [N];
- l é o comprimento do vão [mm];
- b é a largura do corpo de prova [mm];
- h_{sp} é a distância entre o topo do entalhe e o topo do corpo de prova [mm].

O valor de F_L corresponde à carga máxima obtida no ensaio até um deslocamento de 0,05 mm.

Outra importante propriedade avaliada a partir dos resultados experimentais foi a tenacidade na flexão, que representa a energia proporcionada pela adição de fibras ao concreto. Nesta pesquisa, a tenacidade foi calculada como a área sob a curva tensão-CMOD até a abertura de fissura de 2,5 mm (Figura 129), que é associada às verificações do estado-limite último (ELU) de acordo com a ABNT NBR 16940 (2021).

Figura 129. Tenacidade na flexão.



Fonte: Autoria própria.

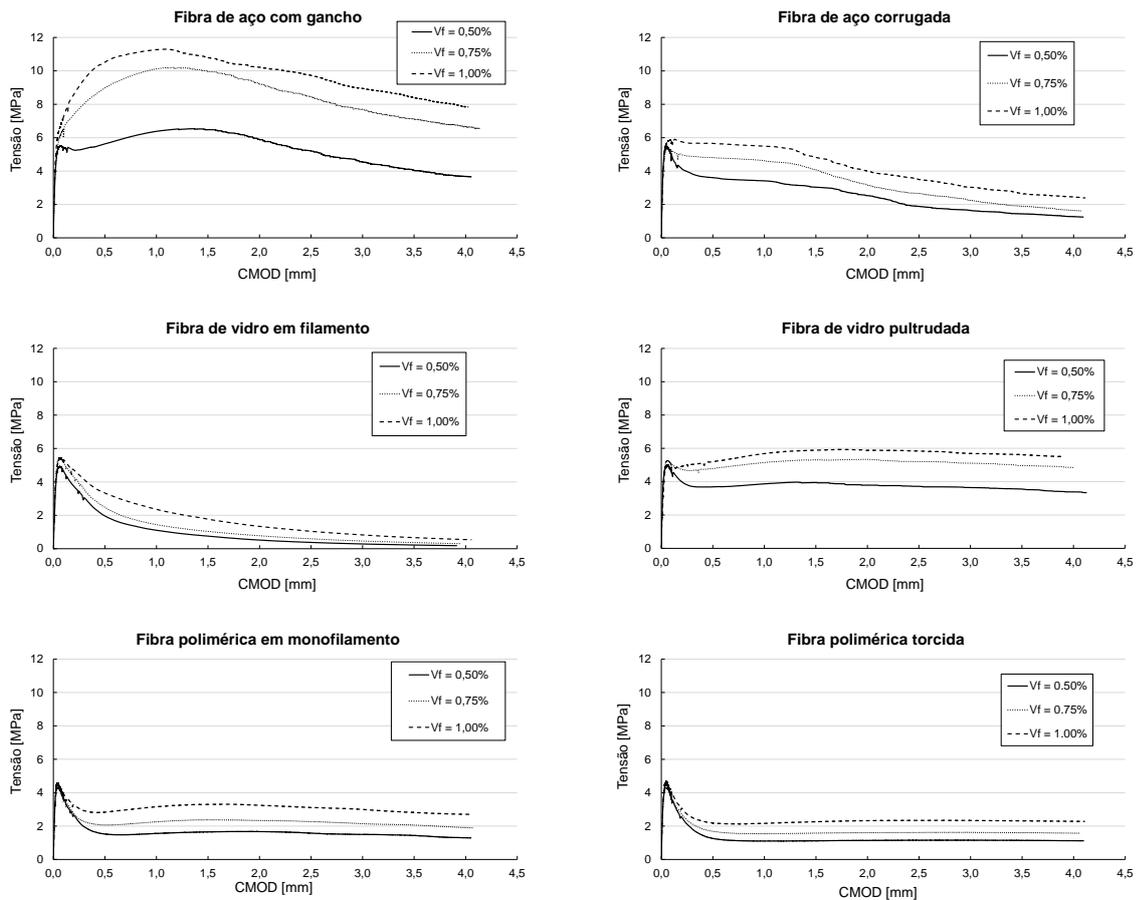
6.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.2.1 Grupo 1

Os resultados dos ensaios de flexão do Grupo 1 ($50 \leq f_c \leq 70$ MPa) estão apresentados na Tabela 31, que contemplam o limite de proporcionalidade (LOP), as resistências residuais ($f_{R,i}$) e a tenacidade na flexão (T_f). Ressalta-se que o valor de cada parâmetro corresponde à média de quatro corpos de prova ($n = 4$) e que a tenacidade na flexão foi determinada apenas para a curva média.

O efeito da fração volumétrica de fibras é claramente visível nas curvas tensão-CMOD apresentadas na Figura 130. De modo geral, quanto maior o teor de fibras no concreto, maiores são as resistências residuais, tenacidade e módulo de ruptura (tensão máxima de flexão pós-fissuração).

Figura 130. Curvas tensão-CMOD dos traços do Grupo 1.



Fonte: Autoria própria.

A fibra de aço com gancho foi a fibra que apresentou o melhor desempenho dentre todas as fibras estudadas, proporcionando as maiores resistências residuais e um comportamento *deflection-hardening* para as três frações volumétricas estudadas. Esse comportamento é presenciado até a fissura atingir um valor próximo de $CMOD_2 = 1,50$ mm, a partir do qual tem-se uma queda na resistência residual. As fibras de aço corrugada, por outro lado, apresentaram uma queda quase constante de resistência após a matriz de concreto atingir a resistência à tração.

Os traços que envolvem fibras de vidro apresentaram comportamentos muito diferentes entre si. Embora ambas as fibras possuam um módulo de elasticidade, no mínimo, igual ao módulo da matriz de concreto (no caso das fibras de vidro pultrudadas), nota-se um caimento contínuo na curva tensão-CMOD do concreto reforçado com fibras de vidro em filamento após o limite de proporcionalidade ser atingido. Particularmente, essa queda de tensão é mais pronunciada até a abertura de fissura $CMOD_1 = 0,50$ mm, a partir do qual a taxa de queda é reduzida. Na região de grandes deformações, isto é, $CMOD_3$ e $CMOD_4$, a resistência residual é praticamente nula nas frações volumétricas de 0,50% e 0,75%. A fibra de vidro pultrudada, por sua vez, proporcionou elevada tenacidade e resistências residuais ao concreto, caracterizando um comportamento *deflection-hardening*. O desempenho dessa fibra foi superior ao desempenho da fibra de aço corrugada. Nota-se também que o comportamento do concreto reforçado com fibra de vidro pultrudada é similar ao comportamento com fibras poliméricas, no qual a fibra é capaz de manter uma constância no nível de carga após o limite de proporcionalidade.

As curvas tensão-CMOD dos traços com fibras poliméricas (monofiladas e torcidas) apresentam uma rápida queda de tensão após atingir o limite de proporcionalidade. Segundo Nana *et al.* (2021), esse comportamento é atribuído ao baixo módulo de elasticidade das fibras poliméricas quando comparado ao módulo da matriz de concreto. Na medida em que se aumenta o teor de fibras no concreto, a magnitude dessa queda é reduzida, uma vez que a tensão em cada fibra é reduzida. Após a queda de tensão, as fibras poliméricas em monofilamento apresentam uma leve recuperação de resistência residual até a abertura de fissura atingir o valor de $CMOD_2 = 1,50$ mm, a partir do qual a resistência tende a reduzir novamente. Apesar disso, o nível de tensão é quase constante ao longo do restante do ensaio,

caracterizado por um trecho reto. Esse comportamento também foi observado por Garcez *et al.* (2019) em suas investigações com fibras poliméricas torcidas.

As curvas tensão-CMOD do Grupo 1 estão apresentadas novamente na Figura 131, na qual estão separadas de acordo com a fração volumétrica utilizada.

Tabela 31. Resultados médios dos ensaios de flexão do Grupo 1 (n = 4).

Traço	Propriedades mecânicas dos ensaios de flexão ¹					
	f _{L,m} [MPa]	f _{R1,m} [MPa]	f _{R2,m} [MPa]	f _{R3,m} [MPa]	f _{R4,m} [MPa]	T _{f,m} ² [N/mm]
60-ACOGAN-0,50	5,42 (0,12)	5,65 (0,99)	6,47 (1,00)	5,07 (0,99)	3,95 (0,70)	14,76
60-ACOGAN-0,75	5,81 (0,51)	9,03 (1,41)	9,95 (1,16)	8,29 (1,10)	7,02 (0,94)	22,81
60-ACOGAN-1,00	6,39 (0,32)	10,62 (1,36)	10,79 (1,26)	9,60 (0,94)	8,29 (1,11)	25,57
60-ACOCOR-0,50	5,59 (0,22)	3,57 (0,54)	3,01 (0,54)	1,84 (0,28)	1,42 (0,27)	7,90
60-ACOCOR-0,75	5,39 (0,42)	4,78 (0,89)	3,94 (0,40)	2,58 (0,49)	1,84 (0,45)	10,23
60-ACOCOR-1,00	5,65 (0,39)	5,65 (0,98)	4,78 (1,12)	3,44 (0,50)	2,59 (0,56)	12,26
60-VIDFIL-0,50	5,05 (0,27)	1,79 (0,22)	0,70 (0,08)	0,36 (0,02)	0,21 (0,02)	3,36
60-VIDFIL-0,75	5,46 (0,26)	2,3 (0,29)	1,00 (0,11)	0,57 (0,05)	0,35 (0,03)	4,23
60-VIDFIL-1,00	5,33 (0,52)	3,27 (0,56)	1,72 (0,29)	1,01 (0,15)	0,64 (0,08)	5,92
60-VIDPUL-0,50	4,99 (0,38)	3,69 (0,68)	3,93 (0,82)	3,69 (0,69)	3,52 (0,74)	9,64
60-VIDPUL-0,75	5,31 (0,22)	4,85 (0,88)	5,34 (1,03)	5,20 (1,03)	4,95 (0,86)	12,75
60-VIDPUL-1,00	5,07 (0,36)	5,14 (1,09)	5,89 (1,34)	5,83 (1,31)	5,59 (1,25)	13,95
60-POLMON-0,50	4,65 (0,21)	1,50 (0,25)	1,65 (0,37)	1,55 (0,32)	1,41 (0,26)	4,46
60-POLMON-0,75	4,32 (0,16)	2,052 (0,33)	2,37 (0,46)	2,25 (0,40)	2,03 (0,36)	5,92
60-POLMON-1,00	4,50 (0,08)	2,83 (0,34)	3,30 (0,51)	3,10 (0,38)	2,78 (0,36)	7,96
60-POLTOR-0,50	4,63 (0,09)	1,23 (0,17)	1,12 (0,20)	1,15 (0,21)	1,14 (0,21)	3,45
60-POLTOR-0,75	4,39 (0,25)	1,65 (0,20)	1,58 (0,17)	1,62 (0,16)	1,60 (0,16)	4,46
60-POLTOR-1,00	4,77 (0,27)	2,17 (0,38)	2,27 (0,38)	2,34 (0,40)	2,31 (0,39)	5,97

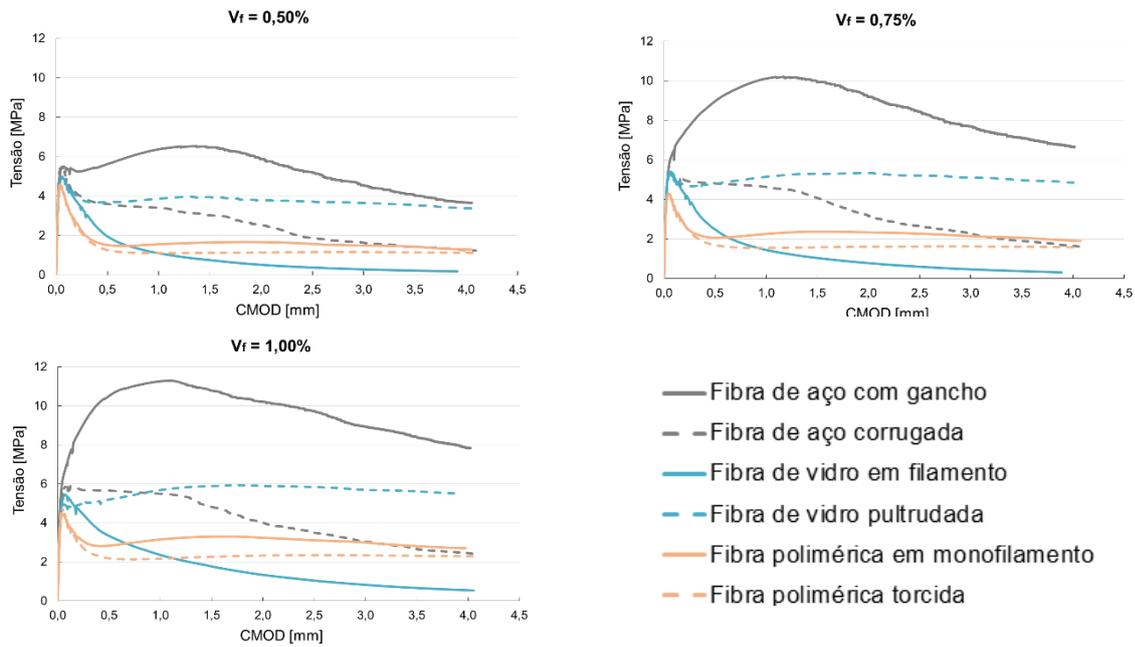
Notas

¹Desvio padrão entre parênteses

²Tenacidade da curva média

Fonte: Autoria própria.

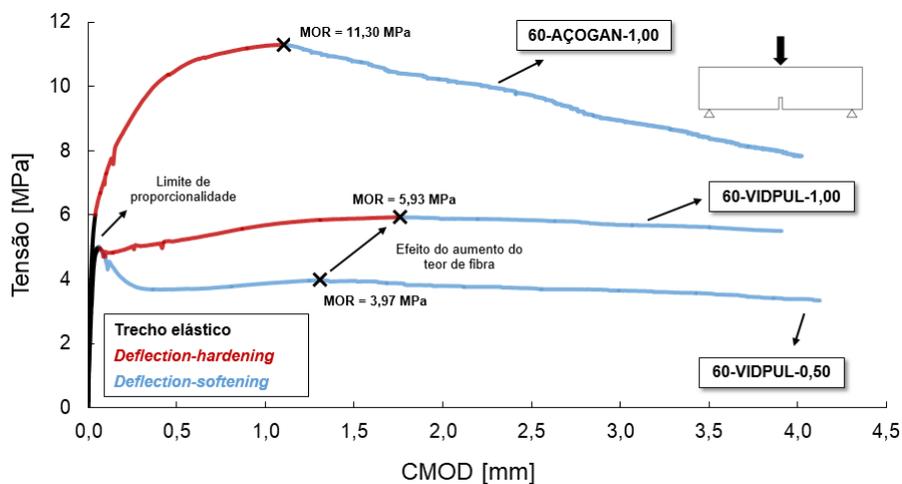
Figura 131. Curvas tensão-CMOD dos traços do Grupo 1 separados por fração volumétrica de fibra.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 132, é ilustrado o comportamento *deflection-hardening* observado no concreto reforçado com fibras de aço com gancho e com fibras de vidro pultrudada. Nota-se que, no caso da fibra de vidro pultrudada, houve uma alteração no comportamento de *deflection-softening* para *deflection-hardening* em função da fração volumétrica de fibras adotada, indicando que o volume crítico de fibras na flexão é um valor entre 0,50% e 1,00%. Além da alteração no comportamento e aumento nas resistências residuais, o módulo de ruptura (MOR – da sigla em inglês) também é diretamente afetado pelo aumento do teor de fibras no concreto.

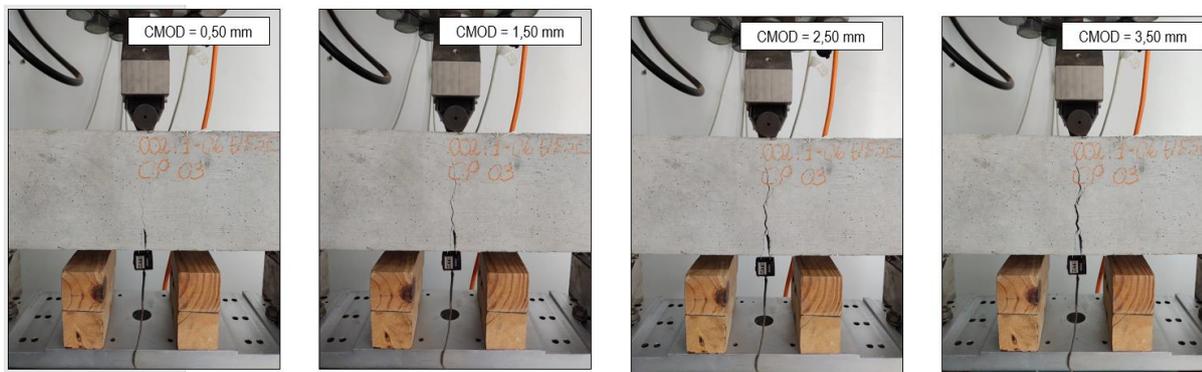
Figura 132. Comportamentos *deflection-hardening* e *deflection-softening* observados nos experimentos.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 133, é apresentado a evolução da fissuração alinhada com o entalhe durante a realização do ensaio do concreto reforçado com fibras poliméricas em monofilamento ($V_f = 0,75\%$). Em todos os ensaios, independentemente do tipo e do teor de fibra, o modo de fissuração seguiu esse padrão.

Figura 133. Evolução da fissuração ao longo do ensaio com o traço 60-POLMON-0,75.



Fonte: Autoria própria.

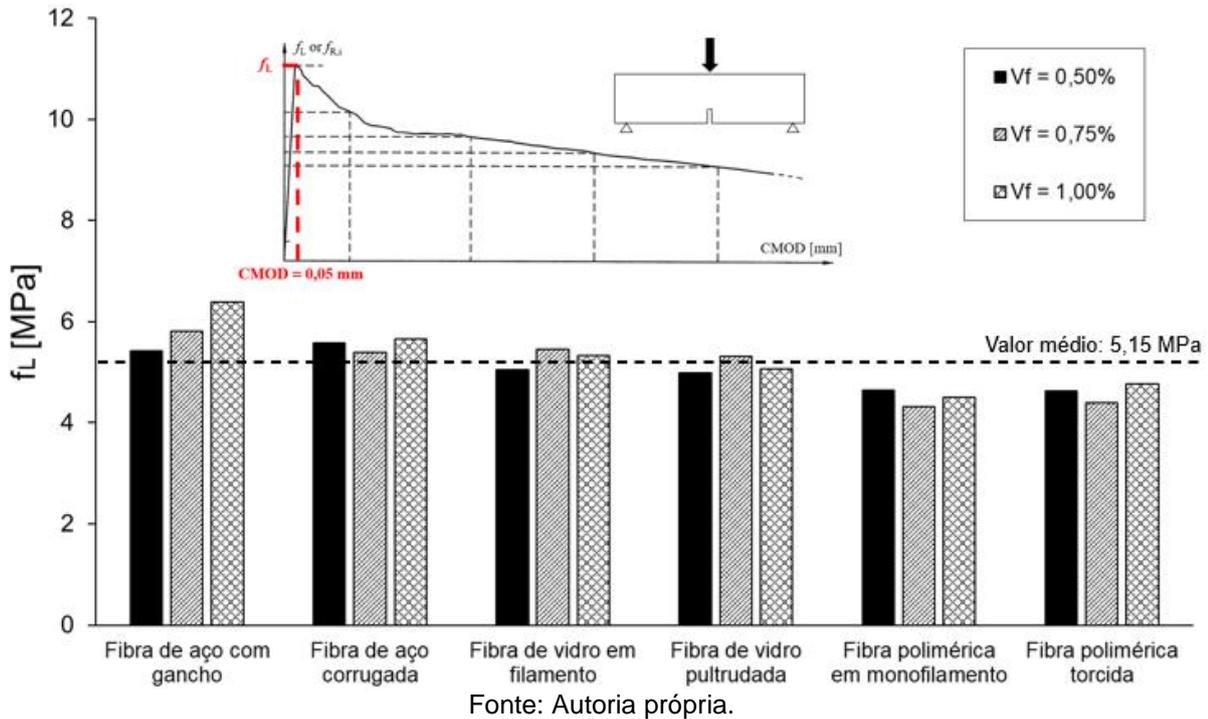
Na sequência, são discutidos e apresentados os resultados relacionados ao limite de proporcionalidade, resistências residuais e tenacidade na flexão.

6.2.1.1 Limite de proporcionalidade

O limite de proporcionalidade é definido como o ponto em que o carregamento é transferido da matriz de concreto para as fibras. Esse ponto também é definido na literatura como a tensão associada ao surgimento da primeira fissura (NAAMAN, 2008), a partir da qual o comportamento do concreto é governado pelas fibras na região pós-fissuração. Na hipótese de um concreto convencional (sem fibras), o comportamento pós-pico é praticamente inexistente, de modo que a tensão sofre uma queda abrupta, caracterizando a fragilidade do concreto. Diz-se, portanto, que a adição de fibras ao concreto não afeta o limite de proporcionalidade, uma vez que esse parâmetro depende majoritariamente da resistência à tração da matriz de concreto (CHEN *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2022).

De fato, observa-se na Figura 134 que o limite de proporcionalidade é pouco influenciado pelo tipo e fração volumétrica de fibras. Considerando os dezoito traços do Grupo 1, o coeficiente de variação médio encontrado para o limite de proporcionalidade foi de apenas 5,35%, contra coeficientes acima de 15% para as resistências residuais.

Figura 134. Limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 1.



De forma similar às análises realizadas com os resultados de resistência à compressão dos traços do Grupo 1, foi realizada uma análise estatística com os resultados do limite de proporcionalidade por meio do software OriginPro, que contemplam a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey. Uma explicação mais detalhada das análises estatísticas realizadas pode ser encontrada no item 5.2.1.1.

Inicialmente, foi verificada a normalidade dos valores por meio do teste de Shapiro-Wilk, cujos resultados estão apresentados na Figura 135 e indicam uma distribuição normal em quase todos os traços.

Figura 135. Resultados do teste de Shapiro-Wilk para verificação da distribuição normal do limite de proporcionalidade do Grupo 1.

*NormalityTest
Shapiro-Wilk*

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
60-ACOGAN-0,50	4,000	0,9030	0,4464	Can't reject normality
60-ACOGAN-0,75	4,000	0,7778	0,06798	Can't reject normality
60-ACOGAN-1,00	4,000	0,9706	0,8455	Can't reject normality
60-ACOCOR-0,50	4,000	0,9636	0,8017	Can't reject normality
60-ACOCOR-0,75	4,000	0,9578	0,7650	Can't reject normality
60-ACOCOR-1,00	4,000	0,9383	0,6437	Can't reject normality
60-VIDFIL-0,50	4,000	0,8919	0,3918	Can't reject normality
60-VIDFIL-0,75	4,000	0,7467	0,03593	Reject normality
60-VIDFIL-1,00	4,000	0,9074	0,4688	Can't reject normality
60-VIDPUL-0,50	4,000	0,9796	0,8996	Can't reject normality
60-VIDPUL-0,75	4,000	0,6589	0,003446	Reject normality
60-VIDPUL-1,00	4,000	0,8195	0,1421	Can't reject normality
60-POLMON-0,50	4,000	0,9125	0,4959	Can't reject normality
60-POLMON-0,75	4,000	0,8695	0,2957	Can't reject normality
60-POLMON-1,00	4,000	0,8153	0,1325	Can't reject normality
60-POLTOR-0,50	4,000	0,8943	0,4031	Can't reject normality
60-POLTOR-0,75	4,000	0,8688	0,2931	Can't reject normality
60-POLTOR-1,00	4,000	0,9123	0,4949	Can't reject normality

Fonte: Autoria própria.

Os resultados da análise de variância considerando um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) para avaliar a influência do teor de fibras sobre o limite de proporcionalidade estão apresentados na Figura 136.

Figura 136. Análise de variância do teor de fibras sobre o limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	1,89	0,95	7,57	0,01
Error	9,00	1,13	0,13		
Total	11,00	3,02			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(a)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	0,15	0,08	0,60	0,57
Error	9,00	1,13	0,13		
Total	11,00	1,28			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

(b)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	0,36	0,18	1,30	0,32
Error	9,00	1,24	0,14		
Total	11,00	1,59			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

(c)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	0,22	0,11	1,03	0,40
Error	9,00	0,96	0,11		
Total	11,00	1,18			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

(d)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	0,21	0,11	4,29	0,05
Error	9,00	0,22	0,02		
Total	11,00	0,44			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(e)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	0,29	0,15	3,13	0,09
Error	9,00	0,42	0,05		
Total	11,00	0,71			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

(f)

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que, dos seis tipos diferentes de fibra estudados, apenas os traços com fibras de aço com gancho e as fibras poliméricas monofiladas apresentaram diferenças significativas em pelo menos uma de suas médias, isto é, pelo menos um limite de proporcionalidade de determinada fração volumétrica é diferente dos outros dois. Para localizar essa diferença, foi realizado o teste de Tukey para um mesmo nível de significância ($\alpha = 0,05$), cujos resultados estão apresentados na Figura 137. Ressalta-se que, no teste de Tukey, letras iguais representam equivalência entre as médias e letras diferentes indicam diferenças significativas. Os resultados indicam que, no caso das fibras de aço com gancho, o limite de proporcionalidade obtido numa fração volumétrica de 0,50% é equivalente àquele obtido com $V_f = 0,75\%$ que, por sua vez, não apresenta diferença significativa em relação ao LOP do traço 60-ACOGAN-100. Por outro lado, nos traços com fibras poliméricas monofiladas, o limite de proporcionalidade associado à fração volumétrica de 0,50% é equivalente ao encontrado com $V_f = 1,00\%$.

Figura 137. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência do teor de fibras sobre o limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 1: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de aço corrugada; (c) fibra de vidro em filamento; (d) fibra de vidro pultrudada; (e) fibra polimérica em monofilamento; e (f) fibra polimérica torcida.

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOGAN-1,00	6,39	A
60-ACOGAN-0,75	5,81	A B
60-ACOGAN-0,50	5,42	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(a)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-ACOCOR-1,00	5,65	A
60-ACOCOR-0,50	5,58	A
60-ACOCOR-0,75	5,39	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(b)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-VIDFIL-0,75	5,46	A
60-VIDFIL-1,00	5,33	A
60-VIDFIL-0,50	5,05	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(c)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-VIDPUL-0,75	5,31	A
60-VIDPUL-1,00	5,07	A
60-VIDPUL-0,50	4,99	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(d)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-POLMON-0,50	4,65	A
60-POLMON-1,00	4,50	A B
60-POLMON-0,75	4,32	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(e)

Tukey Test

	Mean	Groups
60-POLTOR-1,00	4,77	A
60-POLTOR-0,50	4,63	A
60-POLTOR-0,75	4,39	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(f)

Fonte: A autoria própria.

A influência do tipo de fibra foi avaliada estatisticamente por meio das mesmas análises fixando as frações volumétricas. Na Figura 138, os resultados da ANOVA e do teste de Tukey estão apresentados para as três frações volumétricas investigadas: $V_f = 0,50\%$, $V_f = 0,75\%$ e $V_f = 1,00\%$.

Figura 138. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre o limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 1: (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; (c) $V_f = 1,00\%$.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	5,00	3,07	0,61	11,30	<0.0001
Error	18,00	0,98	0,05		
Total	23,00	4,04			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(a)

Tukey Test

	Mean	Groups		
60-ACOCOR-0,50	5,58	A		
60-ACOGAN-0,50	5,42	A	B	
60-VIDFIL-0,50	5,05		B	C
60-VIDPUL-0,50	4,99		B	C
60-POLMON-0,50	4,65			C
60-POLTOR-0,50	4,63			C

Means that do not share a letter are significantly different.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	5,00	7,47	1,49	14,15	<0.0001
Error	18,00	1,90	0,11		
Total	23,00	9,37			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(b)

Tukey Test

	Mean	Groups		
60-ACOGAN-0,75	5,81	A		
60-VIDFIL-0,75	5,46	A		
60-ACOCOR-0,75	5,39	A		
60-VIDPUL-0,75	5,31	A		
60-POLTOR-0,75	4,39		B	
60-POLMON-0,75	4,32		B	

Means that do not share a letter are significantly different.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	5,00	9,13	1,83	14,80	<0.0001
Error	18,00	2,22	0,12		
Total	23,00	11,35			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

(c)

Tukey Test

	Mean	Groups			
60-ACOGAN-1,00	6,39	A			
60-ACOCOR-1,00	5,65	A	B		
60-VIDFIL-1,00	5,33		B	C	
60-VIDPUL-1,00	5,07		B	C	D
60-POLTOR-1,00	4,77			C	D
60-POLMON-1,00	4,50				D

Fonte: Autoria própria.

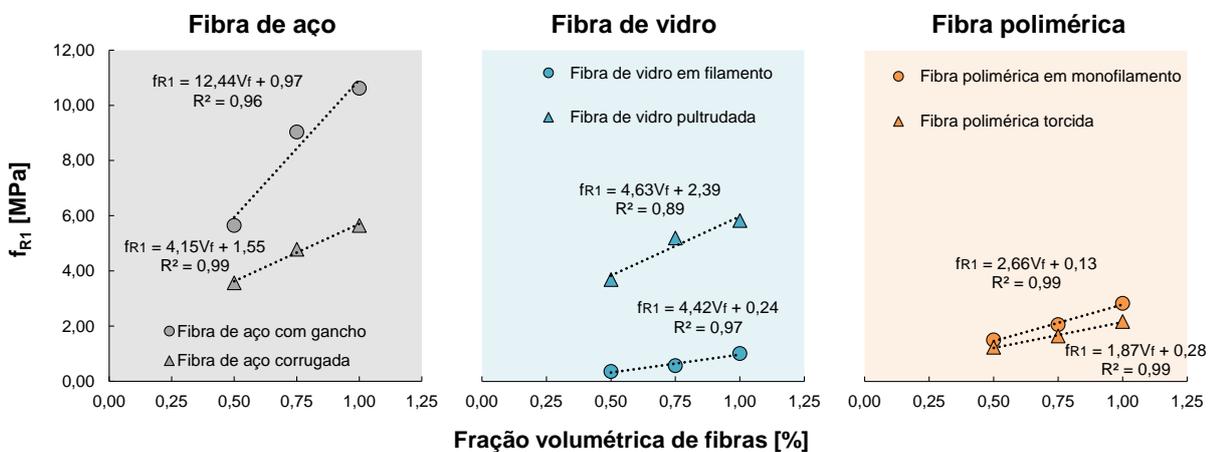
De acordo com os resultados, para uma fração volumétrica de 0,50%, as médias dos limites de proporcionalidade das fibras de aço são equivalentes, enquanto o mesmo ocorre entre as fibras de vidro e entre as fibras de vidro e poliméricas. No caso de $V_f = 0,75\%$, apenas dois grupos foram formados (A e B), indicando menor dispersão nos resultados. Nessa fração volumétrica, apenas os traços com fibras poliméricas apresentaram valores médios do limite de proporcionalidade com diferenças significativas dos demais. Aumentando-se a fração volumétrica de fibras para 1,00%, tem-se quatro grupos formados (A, B, C e D), nos quais se observa que fibras constituídas de mesmo material (aço, vidro ou polimérica) apresentaram equivalência entre si acerca do limite de proporcionalidade, de forma similar aos traços com $V_f = 0,50\%$. A maior diferença significativa nesse grupo pode estar associada à maior quantidade de fibras utilizada, que pode dificultar a mistura dos materiais, tornando a mistura não-uniforme.

6.2.1.2 Resistências residuais

As resistências residuais tendem a ser maiores quanto maior for o teor de fibra no concreto. De fato, maiores teores implicam maiores quantidades de fibra que cruzam o plano da fissura do concreto e retardam sua abertura, proporcionando maiores resistências residuais.

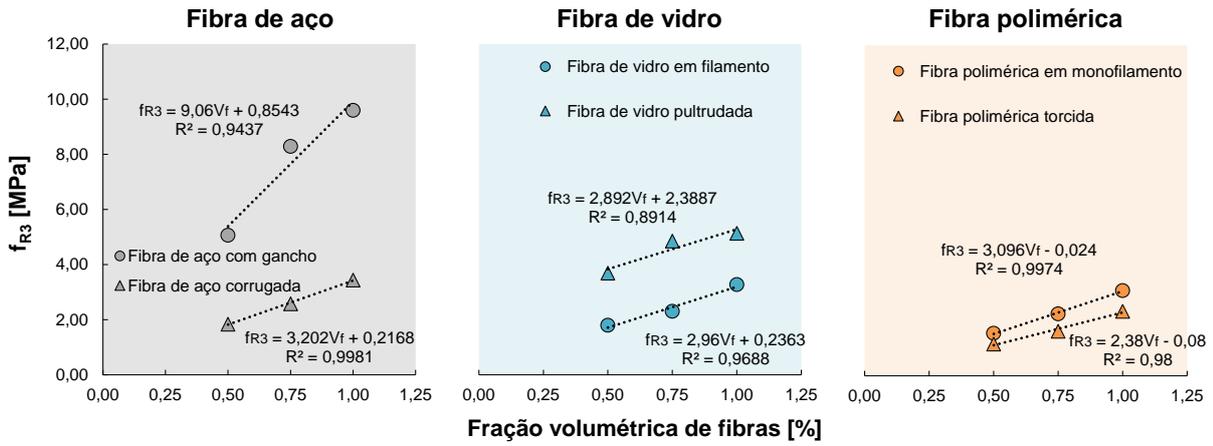
Na Figura 141, são apresentadas as resistências residuais (f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} e f_{R4}) em função do tipo e da fração volumétrica da fibra. Observa-se que, independentemente do formato e do material da fibra, o efeito do teor de fibras sobre a resistência residual é nítido. Regressões lineares com elevados coeficientes de determinação (R^2) são capazes de representar o crescimento da resistência residual em função da quantidade de fibras (Figura 139 e Figura 140). É importante destacar que essas curvas de dosagem são válidas para concretos reforçados com fibras em frações volumétricas entre 0,50% e 1,00% e cuja resistência à compressão média é em torno de 60 MPa.

Figura 139. Regressões lineares para estimar f_{R1} do Grupo 1.



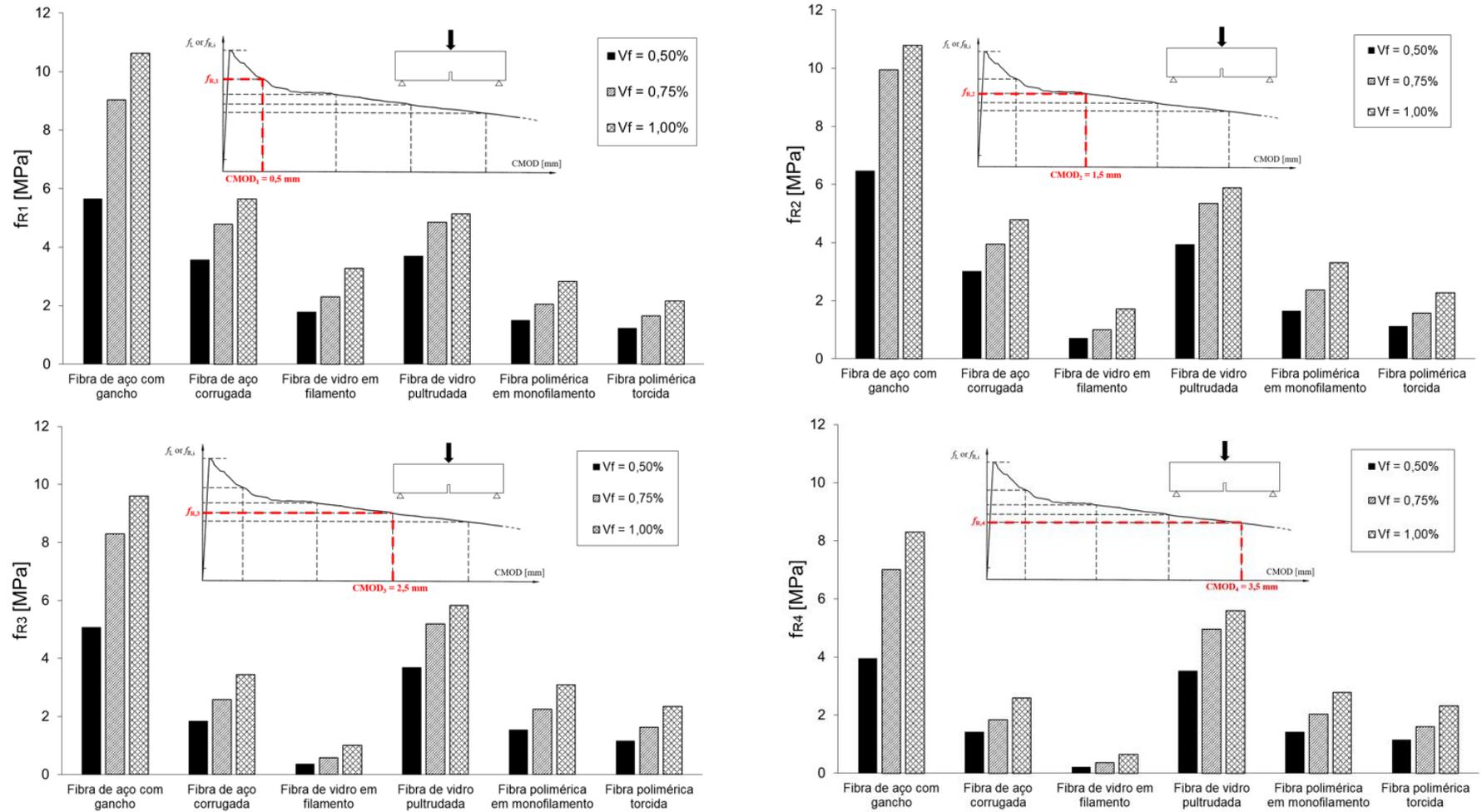
Fonte: Autoria própria.

Figura 140. Regressões lineares para estimar f_{R3} do Grupo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 141. Resistências residuais dos traços do Grupo 1.



Fonte: Autoria própria.

Outro aspecto que deve ser destacado é a taxa de crescimento da resistência residual em função do teor de fibras. Conforme os resultados apresentados na Tabela 31, as maiores taxas de crescimento são observadas entre as frações volumétricas de 0,50% e 0,75%. Isso ocorre, provavelmente, pela maior dificuldade de se obter uma mistura com uma distribuição homogênea de fibras em maiores quantidades ($V_f = 1,00\%$).

De modo similar às análises realizadas com os resultados do limite de proporcionalidade, foi realizada uma análise estatística com os resultados das resistências residuais f_{R1} e f_{R3} por estarem associadas às verificações do estado-limite serviço e estado-limite de último, respectivamente, para verificar a influência do tipo e quantidade de fibra sobre esses parâmetros. Para as duas resistências residuais analisadas, o teste de Shapiro-Wilk indicou que os dados seguem uma distribuição normal para que seja realizada a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey.

Os resultados da análise de variância para avaliar a influência do teor de fibras sobre as resistências residuais, considerando um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), são apresentados na Tabela 32. Diferente da forma como as análises acerca do limite de proporcionalidade foram apresentadas, as análises de variância estão apresentadas em conjunto na Tabela 32 para facilitar a leitura.

De acordo com a análise de variância apresentada, o teor de fibras não afetou o parâmetro f_{R1} da fibra de vidro pultrudada, uma vez que o p-valor = 0,11 é maior que o nível de significância ($\alpha = 0,05$). Para todas as outras fibras, pelo menos uma média difere para ambas as resistências residuais (f_{R1} e f_{R3}). Para identificar as diferenças, foi realizado o teste de Tukey, com o mesmo nível de significância, e cujos resultados estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 32. Análise de variância (ANOVA) do teor de fibras sobre as resistências residuais f_{R1} e f_{R3}

f_{R1}							f_{R3}						
Fibra	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	Fibra	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
AÇOĞAN	Model	2,00	51,67	25,84	16,15	0,00	AÇOĞAN	Model	2,00	43,48	21,74	21,27	0,00
	Error	9,00	14,39	1,60	-	-		Error	9,00	9,20	1,02	-	-
	Total	11,00	66,07	-	-	-		Total	11,00	52,68	-	-	-
AÇOCOR	Model	2,00	8,71	4,35	6,35	0,02	AÇOCOR	Model	2,00	5,14	2,57	13,57	0,00
	Error	9,00	6,17	0,69	-	-		Error	9,00	1,70	0,19	-	-
	Total	11,00	14,88	-	-	-		Total	11,00	6,84	-	-	-
VIDFIL	Model	2,00	4,52	2,26	15,20	0,00	VIDFIL	Model	2,00	0,88	0,44	52,02	<0.0001
	Error	9,00	1,34	0,15	-	-		Error	9,00	0,08	0,01	-	-
	Total	11,00	5,86	-	-	-		Total	11,00	0,96	-	-	-
VIDPUL	Model	2,00	4,69	2,34	2,89	0,11	VIDPUL	Model	2,00	9,70	4,85	4,49	0,04
	Error	9,00	7,29	0,81	-	-		Error	9,00	9,71	1,08	-	-
	Total	11,00	11,98	-	-	-		Total	11,00	19,41	-	-	-
POLMON	Model	2,00	3,57	1,78	18,77	0,00	POLMON	Model	2,00	4,81	2,41	17,65	0,00
	Error	9,00	0,85	0,09	-	-		Error	9,00	1,23	0,14	-	-
	Total	11,00	4,42	-	-	-		Total	11,00	6,04	-	-	-
POLTOR	Model	2,00	1,75	0,87	12,27	0,00	POLTOR	Model	2,00	2,87	1,43	18,88	0,00
	Error	9,00	0,64	0,07	-	-		Error	9,00	0,68	0,08	-	-
	Total	11,00	2,39	-	-	-		Total	11,00	3,55	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 33. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência do teor de fibra sobre as resistências residuais f_{R1} e f_{R3} .

f_{R1}				f_{R3}			
Traço	Mean	Groups		Traço	Mean	Groups	
60-ACOGAN-1,00	10,62	A		60-ACOGAN-1,00	9,60	A	
60-ACOGAN-0,75	9,03	A		60-ACOGAN-0,75	8,29	A	
60-ACOGAN-0,50	5,65		B	60-ACOGAN-0,50	5,07		B
60-ACOCOR-1,00	5,65	A		60-ACOCOR-1,00	3,44	A	
60-ACOCOR-0,75	4,78	A	B	60-ACOCOR-0,75	2,58		B
60-ACOCOR-0,50	3,57		B	60-ACOCOR-0,50	1,84		B
60-VIDFIL-1,00	3,27	A		60-VIDFIL-1,00	1,01	A	
60-VIDFIL-0,75	2,30		B	60-VIDFIL-0,75	0,57		B
60-VIDFIL-0,50	1,79		B	60-VIDFIL-0,50	0,36		C
60-VIDPUL-1,00	5,13	A		60-VIDPUL-1,00	5,83	A	
60-VIDPUL-0,75	4,85	A		60-VIDPUL-0,75	5,20	A	B
60-VIDPUL-0,50	3,69	A		60-VIDPUL-0,50	3,69		B
60-POLMON-1,00	2,83	A		60-POLMON-1,00	3,10	A	
60-POLMON-0,75	2,05		B	60-POLMON-0,75	2,25		B
60-POLMON-0,50	1,50		B	60-POLMON-0,50	1,55		B
60-POLTOR-1,00	2,17	A		60-POLTOR-1,00	2,34	A	
60-POLTOR-0,75	1,65	A	B	60-POLTOR-0,75	1,62		B
60-POLTOR-0,50	1,23		B	60-POLTOR-0,50	1,15		B

Fonte: Autoria própria.

Na resistência residual associada ao estado-limite de serviço (f_{R1}), dois grupos (A e B) foram formados pelo teste de Tukey em todas as fibras, com exceção da fibra de vidro pultrudada, conforme esperado. De acordo com os resultados, o aumento da fração volumétrica de fibras de 0,50% para 0,75% proporciona um aumento significativo em f_{R1} apenas para as fibras de aço com gancho. Em todos os outros traços, a resistência residual f_{R1} associada a $V_f = 0,75\%$ é equivalente ao f_{R1} obtido com $V_f = 0,50\%$. Além disso, diferenças significativas entre frações volumétricas de

0,75% e 1,00% foram observadas apenas nos traços com fibra de vidro filamentada e fibra polimérica em monofilamento.

Os resultados do teste de Tukey para a resistência residual f_{R3} mostraram que a influência do teor de fibra de aço com gancho e de fibra polimérica em monofilamento não sofreu alteração quando comparado aos resultados análogos associados a f_{R1} . Por outro lado, a fibra de vidro pultrudada apresentou diferenças significativas quando se aumenta o teor de fibras de 0,50% para 1,00%. A influência do teor de fibra sobre f_{R3} é mais pronunciada nos traços com fibra de vidro filamentada, nos quais diferenças significativas foram observadas entre os três teores analisados.

De forma análoga às análises realizadas com o limite de proporcionalidade, a influência do tipo de fibra sobre as resistências residuais f_{R1} e f_{R3} foi verificada para cada fração volumétrica estudada. Os resultados da análise de variância das resistências residuais f_{R1} e f_{R3} estão apresentados na Tabela 34 e na Tabela 35, respectivamente.

Tabela 34. Análise de variância (ANOVA) do tipo de fibra sobre as resistências residuais f_{R1}

f_{R1}						
V_f	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
0,50%	Model	5,00	58,30	11,66	37,20	<0.0001
	Error	18,00	5,64	0,31		
	Total	23,00	63,95			
0,75%	Model	5,00	155,09	31,02	49,09	<0.0001
	Error	18,00	11,37	0,63		
	Total	23,00	166,47			
1,00%	Model	5,00	191,03	38,21	50,30	<0.0001
	Error	18,00	13,67	0,76		
	Total	23,00	204,71			

Fonte: Autoria própria.

Tabela 35. Análise de variância (ANOVA) do tipo de fibra sobre as resistências residuais f_{R3}

f_{R3}						
V_f	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
0,50%	Model	5,00	61,75	12,35	43,91	<0.0001
	Error	18,00	5,06	0,28		
	Total	23,00	66,81			
0,75%	Model	5,00	161,10	32,22	72,14	<0.0001
	Error	18,00	8,04	0,45		
	Total	23,00	169,14			
1,00%	Model	5,00	188,80	37,76	71,57	<0.0001
	Error	18,00	9,50	0,53		
	Total	23,00	198,30			

Fonte: Autoria própria.

Para ambas as resistências e para as três frações volumétricas analisadas, observa-se que p-valor é menor que o nível de significância, indicando que pelo menos uma média é significativamente diferente das demais para uma mesma fração volumétrica. Dessa forma, foi realizado o teste de Tukey, cujos resultados estão apresentados na Tabela 43.

Tabela 36. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre as resistências residuais f_{R1} e f_{R3} .

f_{R1}						f_{R3}					
V_f	Traço	Mean	Groups			V_f	Traço	Mean	Groups		
0,50%	60-ACOGAN-0,50	5,65	A			0,50%	60-ACOGAN-0,50	5,07	A		
	60-VIDPUL-0,50	3,69		B			60-VIDPUL-0,50	3,69		B	
	60-ACOCOR-0,50	3,57		B			60-ACOCOR-0,50	1,84			C
	60-VIDFIL-0,50	1,79			C		60-POLMON-0,50	1,55			C D
	60-POLMON-0,50	1,50			C		60-POLTOR-0,50	1,15			C D
	60-POLTOR-0,50	1,23			C		60-VIDFIL-0,50	0,36			D
0,75%	60-ACOGAN-0,75	9,03	A			0,75%	60-ACOGAN-0,75	8,29	A		
	60-VIDPUL-0,75	4,85		B			60-VIDPUL-0,75	5,20		B	
	60-ACOCOR-0,75	4,78		B			60-ACOCOR-0,75	2,58			C
	60-VIDFIL-0,75	2,30			C		60-POLMON-0,75	2,25			C
	60-POLMON-0,75	2,05			C		60-POLTOR-0,75	1,62			C D
	60-POLTOR-0,75	1,65			C		60-VIDFIL-0,75	0,57			D
1,00%	60-ACOGAN-1,00	10,62	A			1,00%	60-ACOGAN-1,00	9,60	A		
	60-ACOCOR-1,00	5,65		B			60-ACOCOR-1,00	5,83		B	
	60-VIDPUL-1,00	5,13		B	C		60-VIDPUL-1,00	3,44			C
	60-VIDFIL-1,00	3,27			C D		60-POLMON-1,00	3,10			C
	60-POLMON-1,00	2,83			D		60-POLTOR-1,00	2,34			C D
	60-POLTOR-1,00	2,17			D		60-VIDFIL-1,00	1,01			D

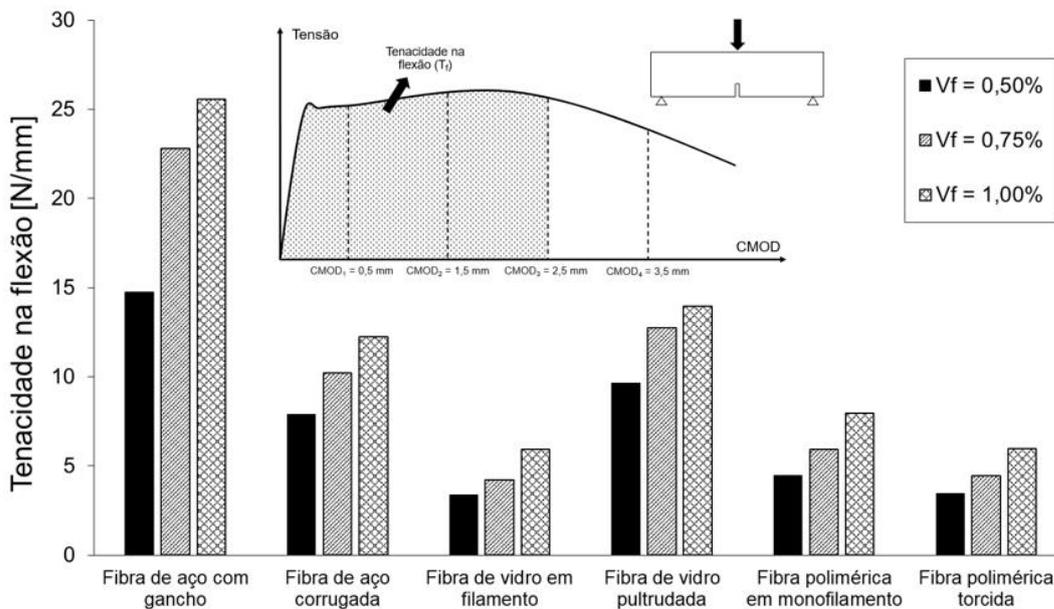
Fonte: Autoria própria.

Em ambas as resistências residuais, poucas diferenças foram observadas entre as frações volumétricas de fibras. De modo geral, os resultados mostram que a fibra de aço com gancho proporciona as maiores resistências residuais, com diferenças significativas para as demais fibras estudadas. Nas análises com f_{R1} , as fibras de vidro pultrudadas e de aço corrugadas não apresentaram diferenças significativas entre si, e as fibras poliméricas e de vidro filamentadas apresentaram desempenhos equivalentes. Os resultados do teste de Tukey demonstram ainda que a fibra de vidro pultrudada apresentou o maior valor de f_{R3} (resistência residual associada ao ELU) depois da fibra de aço com gancho, com diferenças significativas para as demais nas três frações volumétricas. Diferente do que ocorre com f_{R1} , a fibra de aço corrugada e as fibras poliméricas apresentaram desempenhos equivalentes para f_{R3} de acordo com o teste de Tukey, e os resultados da fibra de vidro filamentada não apresentaram diferenças significativas para os resultados das fibras poliméricas.

6.2.1.3 Tenacidade na flexão

De modo similar ao comportamento na compressão, a tenacidade na flexão é uma forma de avaliar a ductilidade e a energia dissipada pelo corpo de prova até atingir determinada abertura de fissura. Esse comportamento está intimamente associado ao processo de arrancamento da fibra da matriz de concreto, conforme explicado no Capítulo 3. Na Figura 142, observa-se que a tenacidade aumenta na medida em que se eleva o teor de fibra no concreto. As fibras de aço com gancho proporcionaram as maiores tenacidades ao concreto, seguidas pela fibra de vidro pultrudada e fibra de aço corrugada. As duas fibras poliméricas investigadas e a fibra de vidro filamentada apresentaram desempenhos próximos entre si.

Figura 142. Tenacidade na flexão dos traços do Grupo 1.



Fonte: Autoria própria.

6.2.2 Grupo 2

Os resultados dos ensaios de flexão do Grupo 2 ($80 \leq f_c \leq 100$ MPa) que contemplam concretos reforçados com fibras de aço com gancho, fibras de vidro filamentadas e fibras poliméricas em monofilamento estão apresentados na Tabela 37. De forma análoga ao Grupo 1, o valor de cada parâmetro corresponde à média de quatro corpos de prova ($n = 4$).

Tabela 37. Resultados dos ensaios de flexão dos traços do Grupo 2 (n = 4).

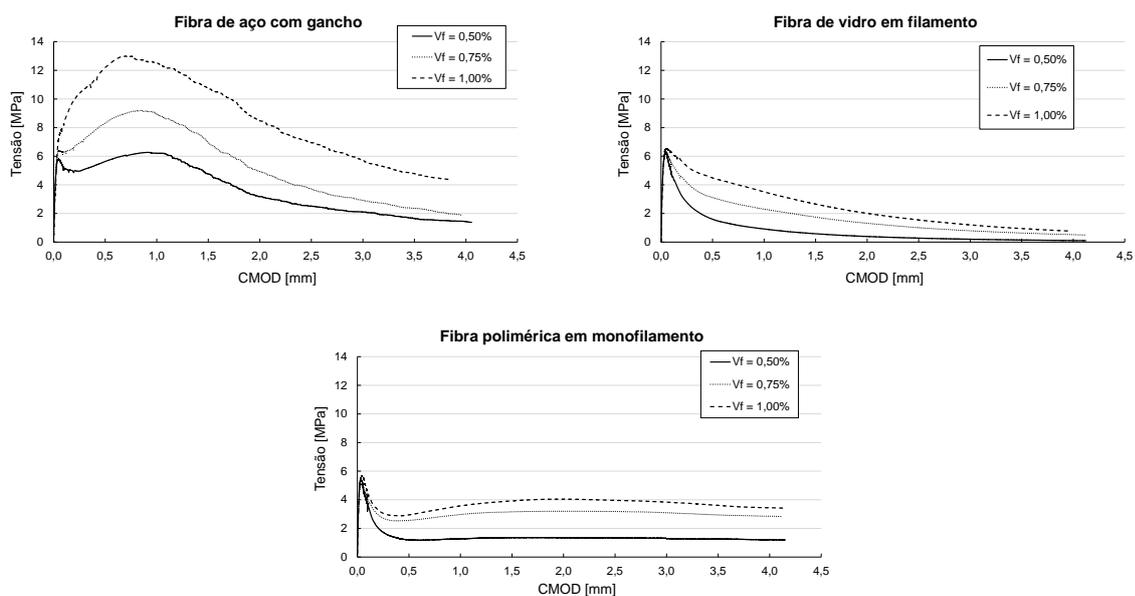
Traço	Propriedades mecânicas dos ensaios de flexão ¹					
	$f_{L,m}$ [MPa]	$f_{R1,m}$ [MPa]	$f_{R2,m}$ [MPa]	$f_{R3,m}$ [MPa]	$f_{R4,m}$ [MPa]	$T_{f,m}^2$ [N/mm]
90-ACOGAN-0,50	5,84 (0,35)	5,71 (0,72)	4,56 (0,69)	2,48 (0,45)	1,56 (0,38)	11,77
90-ACOGAN-0,75	6,50 (0,24)	8,61 (1,11)	6,78 (0,96)	3,53 (0,33)	2,20 (0,28)	17,04
90-ACOGAN-1,00	7,42 (0,47)	13,00 (1,48)	10,49 (1,27)	6,73 (0,81)	4,69 (1,12)	25,75
90-VIDFIL-0,50	6,33 (0,21)	1,56 (0,17)	0,56 (0,08)	0,26 (0,05)	0,14 (0,03)	2,95
90-VIDFIL-0,75	6,53 (0,41)	3,08 (0,52)	1,70 (0,20)	0,97 (0,08)	0,61 (0,05)	5,82
90-VIDFIL-1,00	6,66 (0,18)	4,44 (0,36)	2,58 (0,16)	1,49 (0,11)	0,90 (0,06)	8,20
90-POLMON-0,50	5,48 (0,15)	1,31 (0,23)	1,49 (0,29)	1,49 (0,31)	1,37 (0,26)	4,10
90-POLMON-0,75	5,18 (0,42)	2,58 (0,40)	3,17 (0,58)	3,17 (0,49)	2,92 (0,49)	7,67
90-POLMON-1,00	5,75 (0,36)	2,96 (0,24)	3,94 (0,37)	3,94 (0,31)	3,55 (0,23)	9,26

Notas¹Desvio padrão entre parênteses²Tenacidade da curva média

Fonte: Autoria própria.

As curvas tensão-CMOD do Grupo 2 estão apresentadas na Figura 143. De modo geral, o comportamento é bastante similar quando comparado aos traços do Grupo 1: fibras de aço com gancho proporcionando as maiores resistências residuais; fibras de vidro com uma queda contínua após o limite de proporcionalidade ser atingido; e a capacidade das fibras poliméricas em manter uma tensão constante até grandes aberturas de fissura. Apesar disso, algumas particularidades devem ser destacadas, como a taxa de redução da tensão do concreto reforçado com fibras de aço com gancho mais acentuada do que os traços homólogos do Grupo 1, e o maior distanciamento entre as curvas do concreto reforçado com fibras de vidro em filamento. Esses assuntos são discutidos posteriormente na realização de um comparativo do comportamento e das propriedades mecânicas entre os dois grupos.

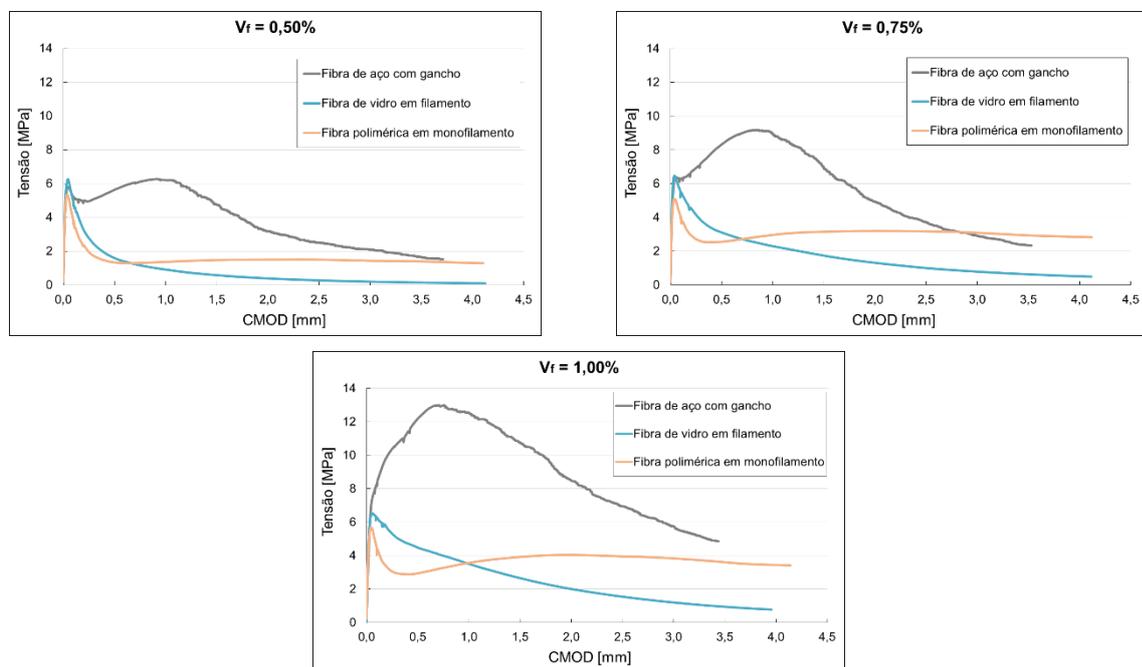
Figura 143. Curvas tensão-CMOD do Grupo 2.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 144, são apresentadas as mesmas curvas tensão-CMOD conforme o teor de fibra utilizado.

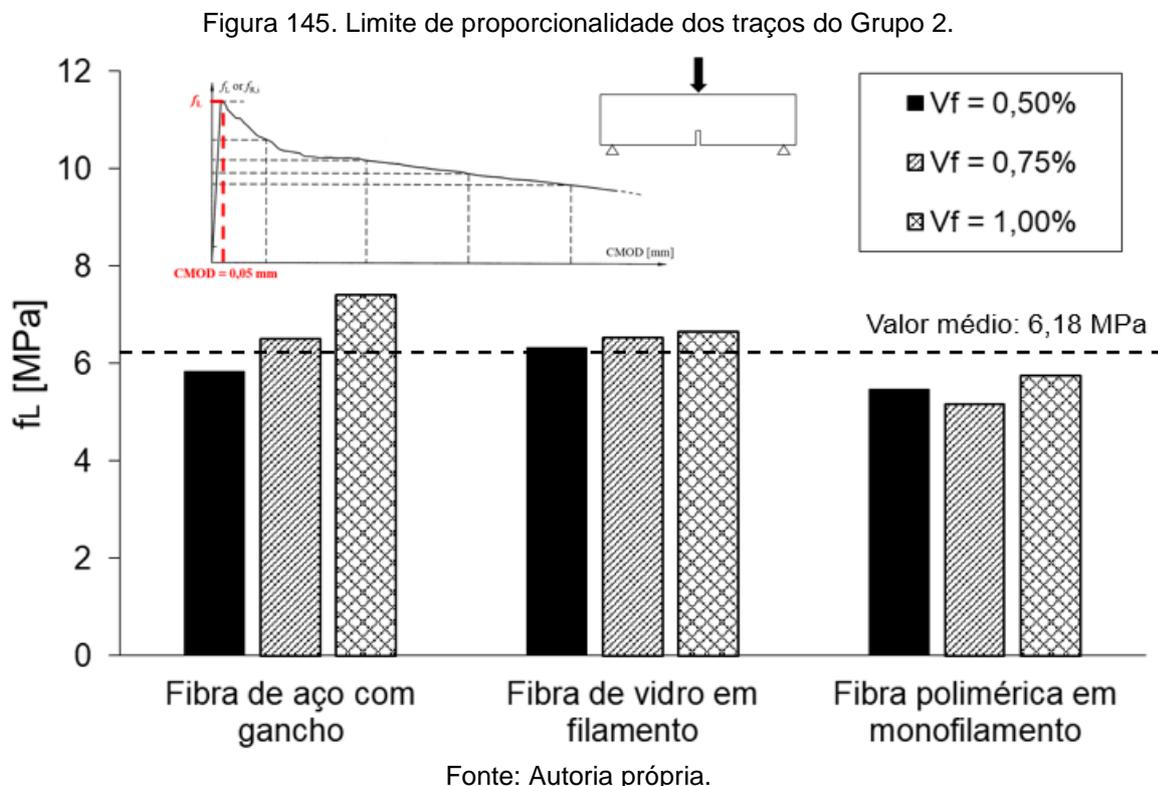
Figura 144. Curvas tensão-CMOD dos traços do Grupo 2 separados por fração volumétrica de fibra.



Fonte: Autoria própria.

6.2.2.1 Limite de proporcionalidade

O valor médio do limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 2 foi de 6,18 MPa, superior ao valor de 5,15 MPa do Grupo 1. Esse aumento decorre do aumento na resistência à compressão dos traços do Grupo 2, visto que o limite de proporcionalidade é influenciado, principalmente, pela resistência matriz de concreto. Esse fato é evidenciado na Figura 145, na qual se observa que a adição de fibras ao concreto não afeta esse parâmetro. No entanto, destaca-se que pequenos aumentos (em torno de 10% entre frações volumétricas) no limite de proporcionalidade foi observado no concreto reforçado com fibras de aço com gancho em ambos os grupos estudados em função do teor de fibras.



Os resultados do limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 2 foram analisados estatisticamente frente ao teor e tipo de fibra, de modo análogo aos resultados do Grupo 1.

Inicialmente, a distribuição normal dos valores médios do limite de proporcionalidade foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk, cujos resultados são apresentados na Figura 146.

Figura 146. Resultados do teste de Shapiro-Wilk para verificação da distribuição normal do limite de proporcionalidade do Grupo 2.

Normality Test

Shapiro-Wilk

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
90-ACOGAN-0,50	4,000	0,8956	0,4093	Can't reject normality
90-ACOGAN-0,75	4,000	0,9483	0,7056	Can't reject normality
90-ACOGAN-1,00	4,000	0,8733	0,3107	Can't reject normality
90-VIDFIL-0,50	4,000	0,9532	0,7363	Can't reject normality
90-VIDFIL-0,75	4,000	0,9766	0,8816	Can't reject normality
90-VIDFIL-1,00	4,000	0,9873	0,9433	Can't reject normality
90-POLMON-0,50	4,000	0,9582	0,7674	Can't reject normality
90-POLMON-0,75	4,000	0,9615	0,7881	Can't reject normality
90-POLMON-1,00	4,000	0,8609	0,2636	Can't reject normality

Fonte: Autoria própria.

Verificada a normalidade dos resultados, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) para cada tipo de fibra para identificar possíveis diferenças significativas entre os valores médios do limite de proporcionalidade para diferentes teores de fibra (Figura 145). Assim ocorreu no Grupo 1, o teor de fibras afetou o limite de proporcionalidade significativamente apenas nos traços com fibra de aço com gancho. Essa diferença foi observada apenas no traço com $V_f = 1,00\%$. Os limites de proporcionalidade associados às frações volumétricas de fibras de 0,50% e 0,75% apresentaram valores equivalentes. Por outro lado, o teor de fibra não influenciou significativamente o limite de proporcionalidade dos traços com fibra de vidro em filamento e fibra polimérica monofilada.

Figura 147. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do teor de fibra sobre o limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 2: (a) fibra de aço com gancho; (b) fibra de vidro em filamento; (c) fibra polimérica em monofilamento.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	5,00	2,50	18,63	0,00
Error	9,00	1,21	0,13		
Total	11,00	6,21			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups
90-ACOGAN-1,00	7,42	A
90-ACOGAN-0,75	6,50	B
90-ACOGAN-0,50	5,84	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(a)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	0,22	0,11	1,33	0,31
Error	9,00	0,75	0,08		
Total	11,00	0,97			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups
90-VIDFIL-1,00	6,66	A
90-VIDFIL-0,75	6,53	A
90-VIDFIL-0,50	6,33	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(b)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	0,65	0,33	2,94	0,10
Error	9,00	0,99	0,11		
Total	11,00	1,64			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups
90-POLMON-1,00	5,75	A
90-POLMON-0,50	5,48	A
90-POLMON-0,75	5,18	A

Means that do not share a letter are significantly different.

(c)

Fonte: Autoria própria.

A influência do tipo de fibra (aço com gancho, vidro filamentada e polimérica em monofilamento) sobre o limite de proporcionalidade também foi investigada estatisticamente, comparando-se os diferentes tipos para a mesma fração volumétrica de fibras. Os resultados da ANOVA e do teste de Tukey estão apresentados na Figura 151.

Figura 148. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre o limite de proporcionalidade dos traços do Grupo 2: (a) $V_f = 0,50\%$; (b) $V_f = 0,75\%$; (c) $V_f = 1,00\%$.

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	1,48	0,74	11,59	0,00
Error	9,00	0,58	0,06		
Total	11,00	2,06			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups
90-VIDFIL-0,50	6,33	A
90-ACOGAN-0,50	5,84	A B
90-POLMON-0,50	5,48	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(a)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	4,79	2,39	17,51	0,00
Error	9,00	1,23	0,14		
Total	11,00	6,01			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups
90-VIDFIL-0,75	6,53	A
90-ACOGAN-0,75	6,50	A
90-POLMON-0,75	5,18	B

Means that do not share a letter are significantly different.

(b)

ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2,00	5,60	2,80	22,04	0,00
Error	9,00	1,14	0,13		
Total	11,00	6,74			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Tukey Test

	Mean	Groups
90-ACOGAN-1,00	7,42	A
90-VIDFIL-1,00	6,66	B
90-POLMON-1,00	5,75	C

Means that do not share a letter are significantly different.

(c)

Fonte: Autoria própria.

Os resultados indicam que, para frações volumétricas de 0,50% e 0,75%, diferenças significativas foram observadas entre a fibra polimérica e os outros dois tipos de fibra (aço e vidro). Para os traços com $V_f = 1,00\%$, a influência do tipo de fibra foi mais pronunciada, com diferenças significativas entre as três fibras estudadas. Deve-se ressaltar que, para as três frações volumétricas, o traço com fibra polimérica

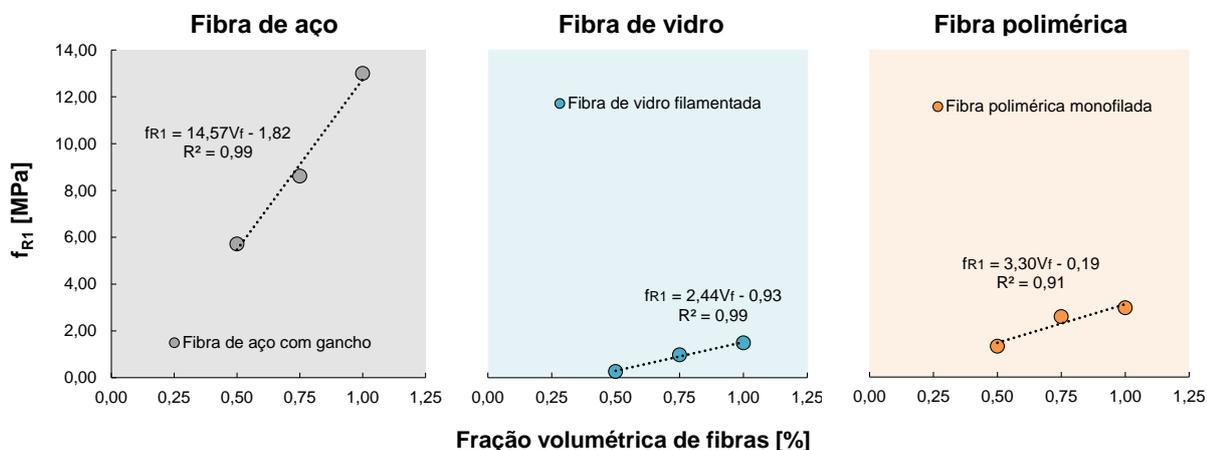
apresentou os menores valores do limite de proporcionalidade, fato que pode estar associado às menores resistências à compressão encontradas para esses traços quando comparado aos traços com fibra de vidro e de aço.

6.2.2.2 Resistências residuais

De forma similar ao Grupo 1, observa-se que, mesmo com resistência à compressão mais elevada, o efeito da fração volumétrica de fibras sobre o comportamento pós-fissuração do concreto reforçado com fibras é a mesmo: quanto maior o teor de fibras, maiores são as resistências residuais (Figura 151). Além disso, as resistências crescem linearmente com a fração volumétrica de fibras.

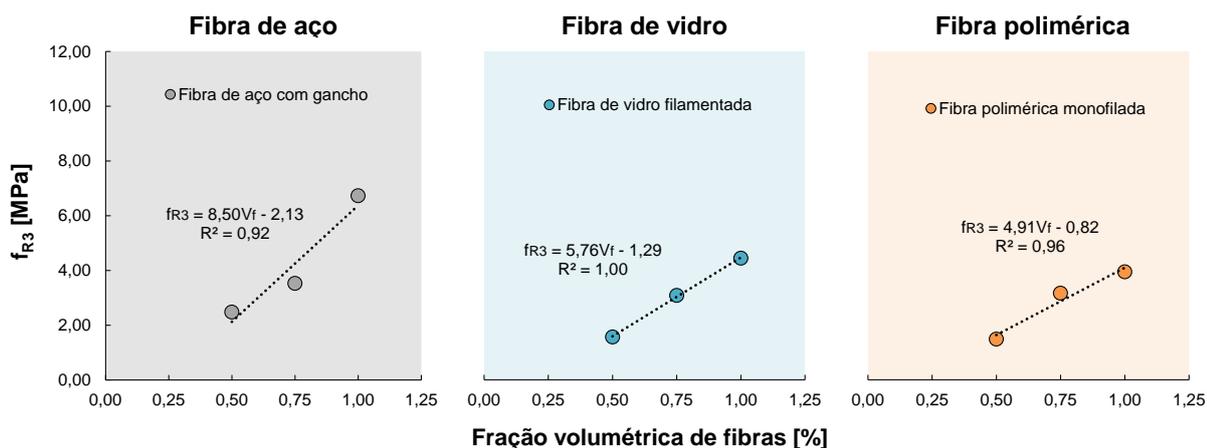
Regressões lineares com elevados coeficientes de determinação (R^2) também foram capazes de representar o crescimento da resistência residual em função da quantidade de fibras para o Grupo 2 (Figura 149 e Figura 150). É importante destacar que essas curvas de dosagem são válidas para concretos reforçados com fibras em frações volumétricas entre 0,50% e 1,00% e cuja resistência à compressão média é em torno de 90 MPa.

Figura 149. Regressões lineares para estimar f_{R1} do Grupo 2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 150. Regressões lineares para estimar f_{R3} do Grupo 2.



Fonte: Autoria própria.

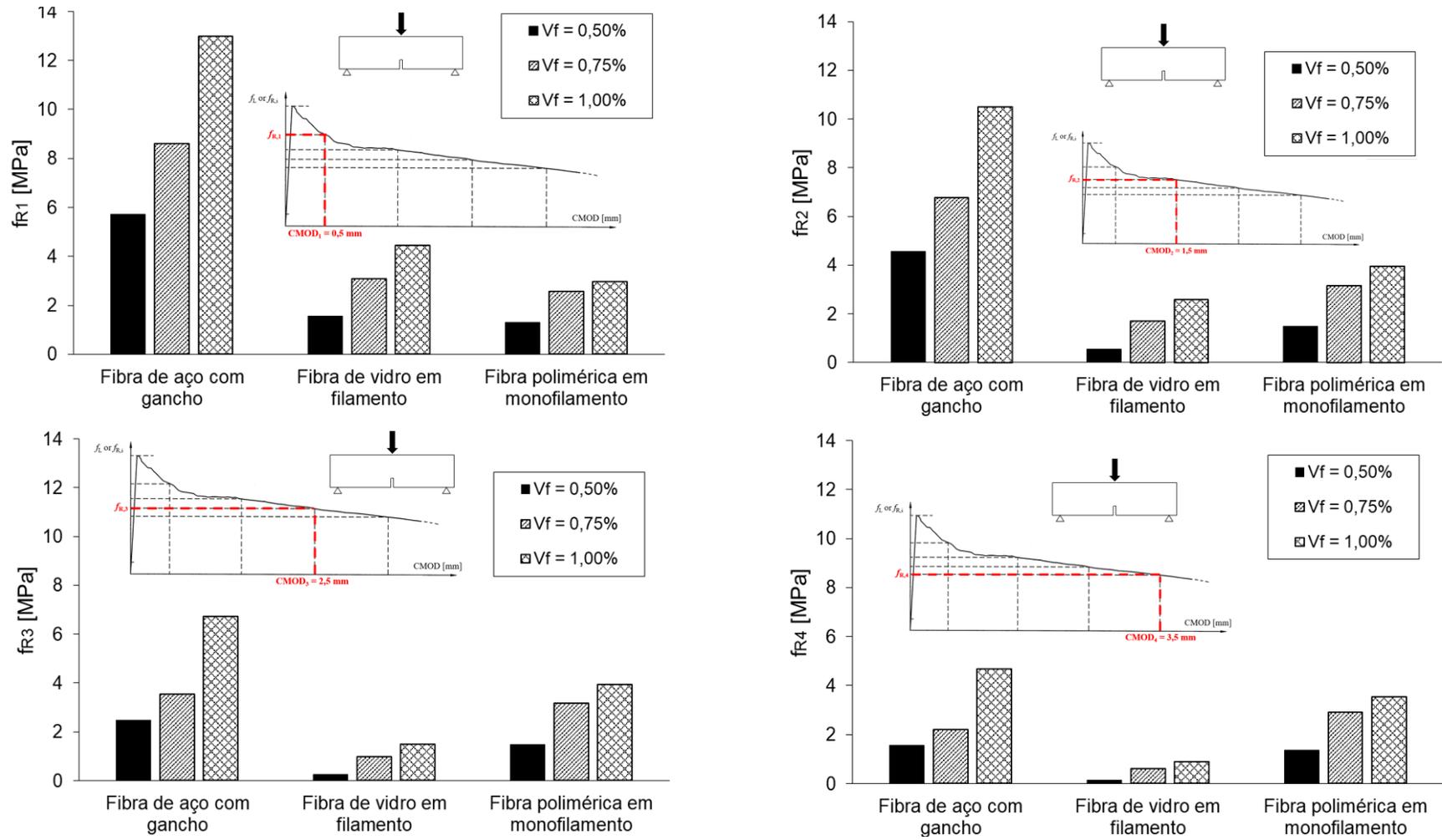
A análise de variância para avaliar a influência do teor de fibras sobre as resistências residuais, considerando um nível de significância de 5%, é apresentada na Tabela 38, para f_{R1} , e na Tabela 39, para f_{R3} .

Tabela 38. Análise de variância (ANOVA) do teor de fibras sobre a resistência residual f_{R1} dos traços do Grupo 2

f_{R1}						
Fibra	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
AÇOGAN	Model	2,00	107,71	53,85	40,85	<0.0001
	Error	9,00	11,86	1,32	-	-
	Total	11,00	119,57	-	-	-
VIDFIL	Model	2,00	16,59	8,29	57,67	<0.0001
	Error	9,00	1,29	0,14	-	-
	Total	11,00	17,88	-	-	-
POLMON	Model	2,00	5,95	2,97	33,71	<0.0001
	Error	9,00	0,79	0,09	-	-
	Total	11,00	6,74	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Figura 151. Resistências residuais dos traços do Grupo 2.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 39. Análise de variância (ANOVA) do teor de fibras sobre a resistência residual f_{R1} dos traços do Grupo 2

f_{R3}						
Fibra	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
AÇOGAN	Model	2,00	39,21	19,60	60,09	<0.0001
	Error	9,00	2,94	0,33	-	-
	Total	11,00	42,14	-	-	-
VIDFIL	Model	2,00	3,01	1,50	212,14	<0.0001
	Error	9,00	0,06	0,01	-	-
	Total	11,00	3,07	-	-	-
POLMON	Model	2,00	12,61	6,31	44,01	<0.0001
	Error	9,00	1,29	0,14	-	-
	Total	11,00	13,90	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Os resultados da ANOVA indicam que pelo menos um teor para cada tipo de fibra afeta significativamente as resistências residuais f_{R1} e f_{R3} . Dessa forma, o teste de Tukey foi realizado, com o mesmo nível de significância, para identificar essas diferenças (Tabela 40).

Tabela 40. Resultados do teste de Tukey para avaliar a influência do teor de fibra sobre as resistências residuais f_{R1} e f_{R3} dos traços do Grupo 2.

f_{R1}					f_{R3}				
Traço	Mean	Groups			Traço	Mean	Groups		
90-ACOGAN-1,00	13,00	A			90-ACOGAN-1,00	6,73	A		
90-ACOGAN-0,75	8,61		B		90-ACOGAN-0,75	3,53		B	
90-ACOGAN-0,50	5,71			C	90-ACOGAN-0,50	2,48		B	
90-VIDFIL-1,00	4,44	A			90-VIDFIL-1,00	1,48	A		
90-VIDFIL-0,75	3,08		B		90-VIDFIL-0,75	0,97		B	
90-VIDFIL-0,50	1,56			C	90-VIDFIL-0,50	0,26			C
90-POLMON-1,00	2,96	A			90-POLMON-1,00	3,94	A		
90-POLMON-0,75	2,58	A			90-POLMON-0,75	3,17		B	
90-POLMON-0,50	1,31		B		90-POLMON-0,50	1,49			C

Fonte: Autoria própria.

Os resultados do teste de Tukey evidenciam a nítida influência do teor de fibras sobre ambas as resistências residuais, criando-se três diferentes grupos (A, B e C) para as

três frações volumétricas analisadas na maioria dos casos, indicando diferenças significativas entre os resultados. Em todos os traços, maiores teores de fibra proporcionaram maiores resistências residuais. Uma exceção, contudo, é observada na análise de f_{R1} com os traços de fibras poliméricas, uma vez que diferenças significativas não foram detectadas entre as frações volumétricas de 0,75% e 1,00%.

A influência do tipo de fibra sobre as resistências residuais f_{R1} e f_{R3} também foram investigadas estatisticamente, e os resultados da ANOVA e do teste de Tukey (considerando um nível de significância de 5%) para f_{R1} e f_{R3} estão apresentados na Tabela 41 e na Tabela 42, respectivamente.

O efeito do tipo de fibra é mais pronunciado sobre a resistência residual f_{R3} , sobre a qual o teste de Tukey separou os resultados em três grupos distintos (A, B e C) para frações volumétricas de 0,50% e 1,00%, evidenciando uma diferença significativa em função do tipo de fibra. Por outro lado, os traços com fibras de vidro e fibras poliméricas apresentaram desempenhos equivalente de acordo com o teste de Tukey quando se trata da resistência residual f_{R1} , com diferenças significativas sendo observadas apenas no caso das fibras de aço com gancho.

Tabela 41. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre a resistência residual f_{R1} dos traços do Grupo 2.

Análise de variância - f_{R1}						
V_f	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
0,50%	Model	2,00	48,86	24,43	122,62	<0.0001
	Error	9,00	1,79	0,20		
	Total	11,00	50,65			
0,75%	Model	2,00	89,64	44,82	80,60	<0.0001
	Error	9,00	5,01	0,56		
	Total	11,00	94,65			
1,00%	Model	2,00	235,00	117,50	147,81	<0.0001
	Error	9,00	7,15	0,79		
	Total	11,00	242,15			

Fonte: A autoria própria.

Teste de Tukey (f_{R1})				
V_f	Traço	Mean	Groups	
0,50%	90-ACOGAN-0,50	5,71	A	
	90-VIDFIL-0,50	1,56		B
	90-POLMON-0,50	1,31		B
0,75%	90-ACOGAN-0,75	8,61	A	
	90-VIDFIL-0,75	3,08		B
	90-POLMON-0,75	2,58		B
1,00%	90-ACOGAN-1,00	13,00	A	
	90-VIDFIL-1,00	4,44		B
	90-POLMON-1,00	2,96		B

Tabela 42. Resultados da ANOVA e do teste de Tukey para avaliar a influência do tipo de fibra sobre a resistência residual f_{R3} dos traços do Grupo 2.

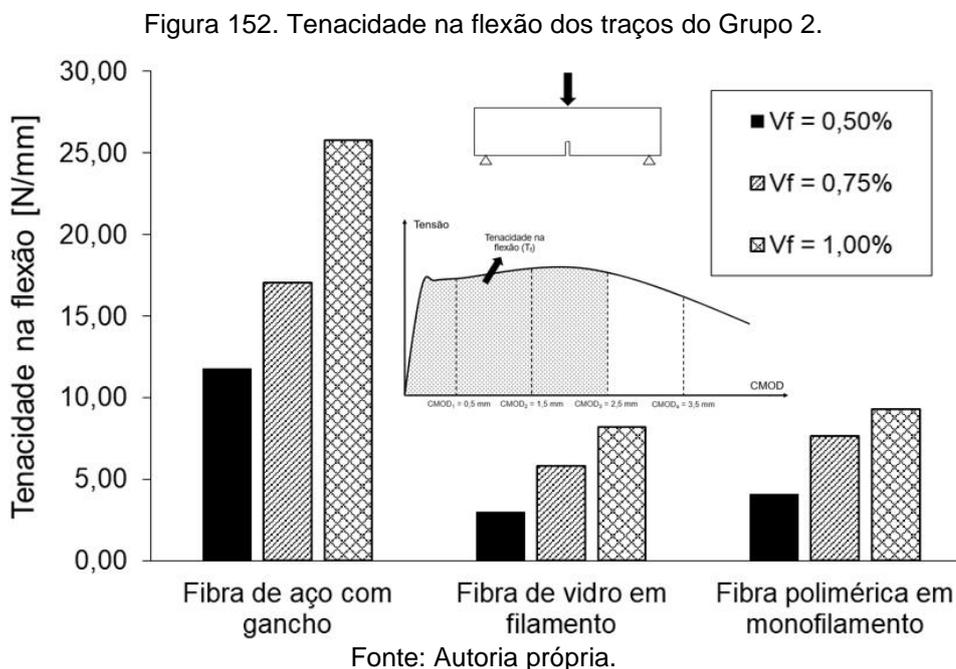
Análise de variância - f_{R3}						
V_f	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
0,50%	Model	2,00	9,87	4,93	48,72	<0.0001
	Error	9,00	0,91	0,10		
	Total	11,00	10,78			
0,75%	Model	2,00	15,39	7,70	64,66	<0.0001
	Error	9,00	1,07	0,12		
	Total	11,00	16,47			
1,00%	Model	2,00	55,13	27,56	107,53	<0.0001
	Error	9,00	2,31	0,26		
	Total	11,00	57,43			

Fonte: A autoria própria.

Teste de Tukey (f_{R3})				
V_f	Traço	Mean	Groups	
0,50%	90-ACOGAN-0,50	2,48	A	
	90-VIDFIL-0,50	1,49		B
	90-POLMON-0,50	0,26		C
0,75%	90-ACOGAN-0,75	3,53	A	
	90-VIDFIL-0,75	3,17	A	
	90-POLMON-0,75	0,97		B
1,00%	90-ACOGAN-1,00	6,73	A	
	90-VIDFIL-1,00	3,94		B
	90-POLMON-1,00	1,48		C

6.2.2.3 Tenacidade na flexão

A tenacidade na flexão determinada até $CMOD_3 = 2,50$ mm dos traços do Grupo 2 demonstra que, de forma similar ao Grupo 1, a energia dissipada ao longo do ensaio com fibras de vidro é ligeiramente inferior à energia dos traços com fibras poliméricas (Figura 152). Por outro lado, as resistências residuais encontradas com fibras poliméricas foram maiores do que com fibras de vidro. Caso a tenacidade seja determinada até $CMOD_4 = 3,50$ mm, essa diferença é ainda maior, visto as baixas (quase nulas) resistências residuais do concreto reforçado com fibras de vidro nessa abertura (f_{R4}).



6.2.3 Influência da resistência à compressão do concreto

Os comportamentos na flexão dos dois grupos analisados podem ser observados, em conjunto, na Figura 153. Conforme já pontuado anteriormente, observa-se um limite de proporcionalidade mais elevado nos traços do Grupo 2 em razão da maior resistência à compressão da matriz de concreto. Esse aspecto é mais pronunciado nos traços com fibras de vidro e fibras poliméricas e também pode ser verificado a partir dos valores dos parâmetros do Grupo 2 em relação ao Grupo 1, apresentados na Tabela 43.

Tabela 43. Propriedades mecânicas do Grupo 2 em relação ao Grupo 1.

Propriedades mecânicas relativas: Grupo 2 / Grupo 1						
Traço	f_L [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]	T_f [N/mm]
ACOGAN-0,50	1,08	1,01	0,70	0,49	0,39	0,80
ACOGAN-0,75	1,12	0,95	0,68	0,43	0,31	0,75
ACOGAN-1,00	1,16	1,22	0,97	0,70	0,57	1,01
VIDFIL-0,50	1,26	0,87	0,80	0,74	0,65	0,88
VIDFIL-0,75	1,20	1,34	1,69	1,69	1,73	1,38
VIDFIL-1,00	1,25	1,36	1,49	1,47	1,40	1,39
POLMON-0,50	1,18	0,88	0,90	0,96	0,98	0,92
POLMON-0,75	1,20	1,26	1,34	1,41	1,44	1,30
POLMON-1,00	1,28	1,05	1,19	1,27	1,28	1,16

Fonte: Autoria própria.

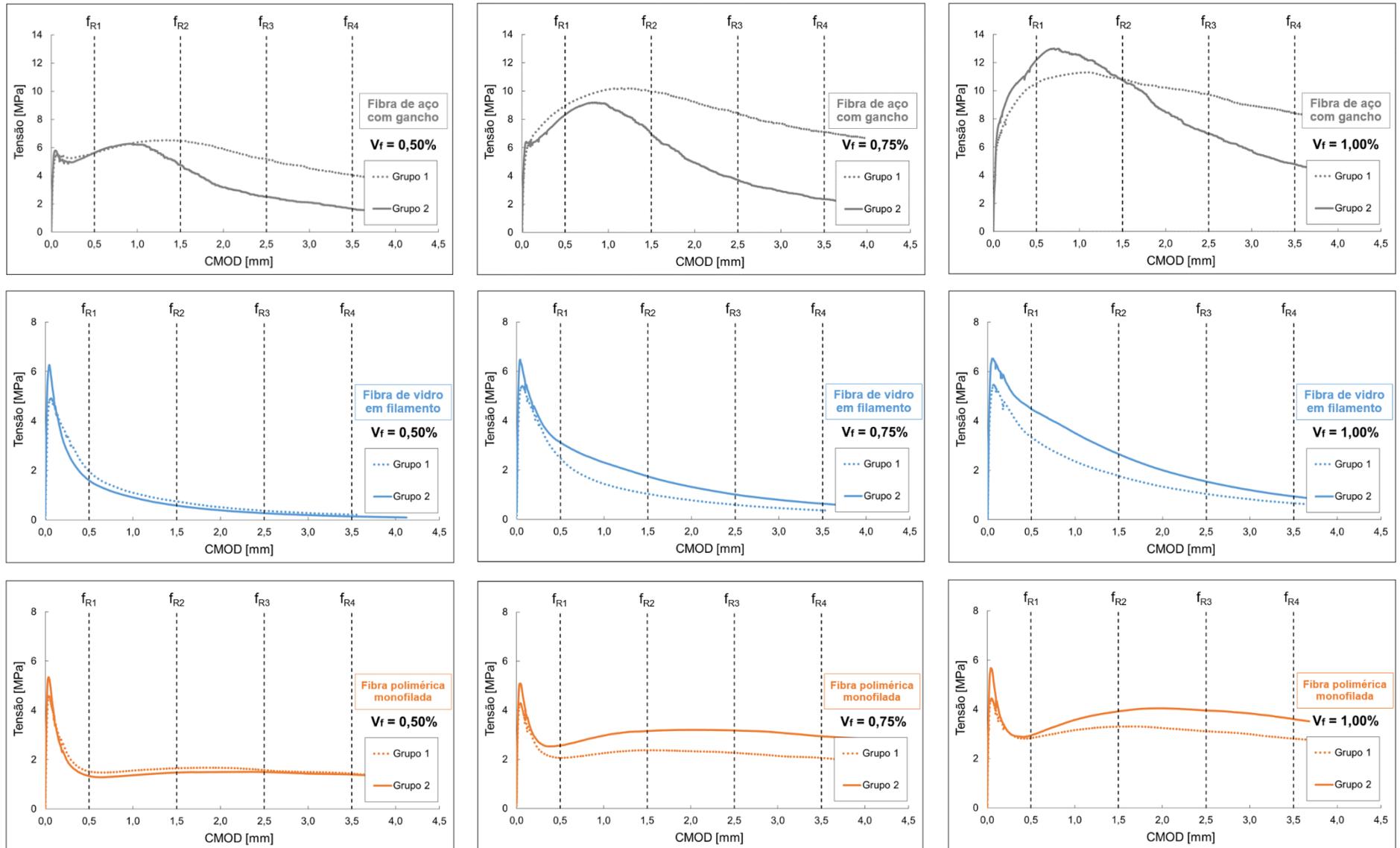
As resistências residuais do concreto do Grupo 2 reforçado com fibras de vidro e poliméricas são maiores que seus correspondentes do Grupo 1 para frações volumétricas de 0,75% e 1,00%. Embora o comportamento pós-fissuração do concreto no ensaio de flexão seja governado, entre outros fatores, mas principalmente pelas fibras, isso provavelmente ocorre devido à presença de sílica ativa na composição do concreto do Grupo 2. A presença de sílica pode provocar uma redução na porosidade do concreto, que afeta diretamente a resistência ao arrancamento da fibra. Como as resistências residuais e a dissipação de energia está diretamente associada ao efeito de arrancamento da fibra, tem-se maiores resistências residuais para matrizes diferentes com frações volumétricas iguais. Ainda em relação a esses traços, outro aspecto que deve ser ressaltado é a crescimento da diferença entre as resistências residuais dos Grupos 1 e 2 na medida em que se aumenta a abertura da fissura (CMOD): enquanto f_{R4} do Grupo 2 dos traços VIDFIL-0,75 e POLMON-0,75 é 73% e 44%, respectivamente, maior que o f_{R4} do Grupo 1, essa relação para o f_{R1} é de 34% (fibra de vidro) e 26% (fibra polimérica). Esses valores podem ser conferidos na Tabela 43.

As resistências residuais do concreto reforçado com fibra de aço com gancho do Grupo 2, por outro lado, foram inferiores às suas correspondentes no Grupo 1. Após

atingir a tensão máxima de flexão pós-fissuração (módulo de ruptura), as curvas do Grupo 2 apresentam uma rápida queda de resistência, superior à inclinação do respectivo trecho do Grupo 1. Dessa forma, na medida em que a carga é aplicada, há um distanciamento cada vez maior entre as curvas dos grupos 1 e 2. Com exceção de f_{R1} que possui um valor próximo dos dois grupos, as resistências residuais restantes do Grupo 2 são todas inferiores às resistências do Grupo 1. Para ambos os grupos, a tensão máxima de flexão foi atingida entre $CMOD_1 = 0,50$ mm e $CMOD_2 = 1,50$ mm. Isso pode ser atribuído à uma possível ruptura das fibras devido à elevada resistência de aderência na interface entre a fibra e a matriz. Ensaio de arrancamento podem ser realizados para confirmar essa hipótese.

Para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre os parâmetros da curva tensão-CMOD (LOP , f_{R1} e f_{R3}), os dados dos Grupos 1 e 2 foram analisados estatisticamente por meio da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey, considerando um nível de significância de 5%, de modo similar às análises apresentadas nos tópicos anteriores. Em todas as análises, a normalidade dos dados foi verificada previamente por meio do teste de Shapiro-Wilk. Na sequência, são apresentados os resultados das análises estatísticas para cada parâmetro analisado: limite de proporcionalidade e resistências residuais f_{R1} e f_{R3} .

Figura 153. Comparação entre as curvas tensão-CMOD dos Grupos 1 e 2.



Fonte: Autoria própria.

○ Limite de proporcionalidade

Os resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey dos traços com fibras de aço com gancho, fibra de vidro filamentada e fibra polimérica em monofilamento estão apresentados, respectivamente, na Tabela 44, na Tabela 45 e na Tabela 46. Com exceção da fração volumétrica de 0,50% da fibra de aço com gancho, em todos os traços o teste de Tukey indicou que há diferenças significativas entre os traços análogos dos Grupos 1 e 2, o que torna nítida a influência da resistência à compressão do concreto sobre o limite de proporcionalidade (LOP), fato também constatado por outros autores (CHEN *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2022).

Tabela 44. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre o limite de proporcionalidade das fibras de aço com gancho.

Análise de variância (LOP)							Teste de Tukey (LOP)			
Traço	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	Traço	Mean	Groups	
AÇOGAN-0,50	Model	1,00	0,35	0,35	5,07	0,07	90-ACOGAN-0,50	5,84	A	
	Error	6,00	0,42	0,07			60-ACOGAN-0,50	5,42	A	
	Total	7,00	0,77							
AÇOGAN-0,75	Model	1,00	0,96	0,96	6,10	0,05	90-ACOGAN-0,75	6,50	A	
	Error	6,00	0,95	0,16			60-ACOGAN-0,75	5,81		B
	Total	7,00	1,91							
AÇOGAN-1,00	Model	1,00	2,11	2,11	13,10	0,01	90-ACOGAN-1,00	7,42	A	
	Error	6,00	0,97	0,16			60-ACOGAN-1,00	6,39		B
	Total	7,00	3,08							

Fonte: Autoria própria.

Tabela 45. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre o limite de proporcionalidade das fibras de vidro filamentadas.

Análise de variância (LOP)							Teste de Tukey (LOP)			
Traço	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	Traço	Mean	Groups	
VIDFIL-0,50	Model	1,00	3,32	3,32	56,26	0,00	90-VIDFIL-0,50	6,33	A	
	Error	6,00	0,35	0,06			60-VIDFIL-0,50	5,05		B
	Total	7,00	3,67							
VIDFIL-0,75	Model	1,00	2,28	2,28	19,13	0,00	90-VIDFIL-0,75	6,53	A	
	Error	6,00	0,72	0,12			60-VIDFIL-0,75	5,46		B
	Total	7,00	3,00							
VIDFIL-1,00	Model	1,00	3,57	3,57	23,40	0,00	90-VIDFIL-1,00	6,66	A	
	Error	6,00	0,91	0,15			60-VIDFIL-1,00	5,33		B
	Total	7,00	4,48							

Fonte: Autoria própria.

Tabela 46. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre o limite de proporcionalidade das fibras poliméricas em monofilamento.

Análise de variância (LOP)							Teste de Tukey (LOP)			
Traço	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	Traço	Mean	Groups	
POLMON-0,50	Model	1,00	1,37	1,37	42,51	0,00	90-POLMON-0,50	5,48	A	
	Error	6,00	0,19	0,03			60-POLMON-0,50	4,65		B
	Total	7,00	1,57							
POLMON-0,75	Model	1,00	1,46	1,46	14,23	0,01	90-POLMON-0,75	5,18	A	
	Error	6,00	0,61	0,10			60-POLMON-0,75	4,32		B
	Total	7,00	2,07							
POLMON-1,00	Model	1,00	3,09	3,09	45,38	0,00	90-POLMON-1,00	5,75	A	
	Error	6,00	0,41	0,07			60-POLMON-1,00	4,50		B
	Total	7,00	3,50							

Fonte: Autoria própria.

○ Resistências residuais f_{R1} e f_{R3}

Os resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey dos traços com fibras de aço com gancho, fibra de vidro filamentada e fibra polimérica em monofilamento estão apresentados, respectivamente, na Tabela 47, na Tabela 48 e na Tabela 49, nas análises com f_{R1} , e na Tabela 50, na Tabela 51 e na Tabela 52, nas análises com f_{R3} .

Tabela 47. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R1} das fibras de aço com gancho.

Análise de variância (f_{R1})							Teste de Tukey (f_{R1})			
Traço	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	Traço	Mean	Groups	
AÇOGAN-0,50	Model	1,00	0,01	0,01	0,01	0,92	90-ACOGAN-0,50	5,71	A	
	Error	6,00	4,48	0,75			60-ACOGAN-0,50	5,65	A	
	Total	7,00	4,49							
AÇOGAN-0,75	Model	1,00	0,35	0,35	0,22	0,66	60-ACOGAN-0,75	9,03	A	
	Error	6,00	9,66	1,61			90-ACOGAN-0,75	8,61	A	
	Total	7,00	10,01							
AÇOGAN-1,00	Model	1,00	11,32	11,32	5,60	0,06	90-ACOGAN-1,00	13,00	A	
	Error	6,00	12,12	2,02			60-ACOGAN-1,00	10,62	A	
	Total	7,00	23,43							

Fonte: Autoria própria.

Tabela 48. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R1} das fibras de vidro filamentadas.

Análise de variância (f_{R1})							Teste de Tukey (f_{R1})			
Traço	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	Traço	Mean	Groups	
VIDFIL-0,50	Model	1,00	0,11	0,11	2,67	0,15	60-VIDFIL-0,50	1,79	A	
	Error	6,00	0,24	0,04			90-VIDFIL-0,50	1,56	A	
	Total	7,00	0,35				90-VIDFIL-0,75	3,08	A	
VIDFIL-0,75	Model	1,00	1,22	1,22	6,79	0,04	60-VIDFIL-0,75	2,30		B
	Error	6,00	1,08	0,18			90-VIDFIL-1,00	4,44	A	
	Total	7,00	2,29				60-VIDFIL-1,00	3,27		B
VIDFIL-1,00	Model	1,00	2,73	2,73	12,40	0,01				
	Error	6,00	1,32	0,22						
	Total	7,00	4,04							

Fonte: Autoria própria.

Tabela 49. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R1} das fibras poliméricas em monofilamento.

Análise de variância (f_{R1})							Teste de Tukey (f_{R1})			
Traço	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	Traço	Mean	Groups	
POLMON-0,50	Model	1,00	0,07	0,07	1,19	0,32	60-POLMON-0,50	1,50	A	
	Error	6,00	0,34	0,06			90-POLMON-0,50	1,31	A	
	Total	7,00	0,41				90-POLMON-0,75	2,58	A	
POLMON-0,75	Model	1,00	0,55	0,55	4,16	0,09	60-POLMON-0,75	2,05	A	
	Error	6,00	0,80	0,13			90-POLMON-1,00	2,96	A	
	Total	7,00	1,35				60-POLMON-1,00	2,83	A	
POLMON-1,00	Model	1,00	0,04	0,04	0,43	0,54				
	Error	6,00	0,51	0,09						
	Total	7,00	0,55							

Fonte: Autoria própria.

A resistência residual f_{R1} não apresentou diferenças significativas nos traços com fibra de aço com gancho e com fibra polimérica devido à variação da resistência à compressão do concreto. Por outro lado, diferenças significativas foram observadas em frações volumétricas de 0,75% e 1,00% para as fibras de vidro filamentadas.

Tabela 50. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R3} das fibras de aço com gancho.

Análise de variância (f_{R3})							Teste de Tukey (f_{R3})			
Traço	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	Traço	Mean	Groups	
AÇOGAN-0,50	Model	1,00	13,36	13,36	22,47	0,00	60-ACOGAN-0,50	5,07	A	
	Error	6,00	3,57	0,59	-	-	90-ACOGAN-0,50	2,48		B
	Total	7,00	16,93	-	-	-				
AÇOGAN-0,75	Model	1,00	45,20	45,20	68,91	0,00	60-ACOGAN-0,75	8,29	A	
	Error	6,00	3,94	0,66	-	-	90-ACOGAN-0,75	3,53		B
	Total	7,00	49,14	-	-	-				
AÇOGAN-1,00	Model	1,00	16,40	16,40	21,25	0,00	60-ACOGAN-1,00	9,60	A	
	Error	6,00	4,63	0,77	-	-	90-ACOGAN-1,00	6,73		B
	Total	7,00	21,03	-	-	-				

Fonte: Autoria própria.

Tabela 51. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R3} das fibras de vidro filamentadas.

Análise de variância (f_{R3})							Teste de Tukey (f_{R3})			
Traço	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	Traço	Mean	Groups	
VIDFIL-0,50	Model	1,00	0,02	0,02	10,82	0,02	60-VIDFIL-0,50	0,36	A	
	Error	6,00	0,01	0,00	-	-	90-VIDFIL-0,50	0,26		B
	Total	7,00	0,03	-	-	-				
VIDFIL-0,75	Model	1,00	0,32	0,32	66,90	0,00	90-VIDFIL-0,75	0,97	A	
	Error	6,00	0,03	0,00	-	-	60-VIDFIL-0,75	0,57		B
	Total	7,00	0,34	-	-	-				
VIDFIL-1,00	Model	1,00	0,45	0,45	26,68	0,00	90-VIDFIL-1,00	1,48	A	
	Error	6,00	0,10	0,02	-	-	60-VIDFIL-1,00	1,01		B
	Total	7,00	0,55	-	-	-				

Fonte: Autoria própria.

Tabela 52. Resultados da análise de variância (ANOVA) e do teste de Tukey para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto sobre a resistência residual f_{R3} das fibras poliméricas em monofilamento.

Análise de variância (f_{R3})							Teste de Tukey (f_{R3})			
Traço	-	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F	Traço	Mean	Groups	
POLMON-0,50	Model	1,00	0,01	0,01	0,07	0,80	60-POLMON-0,50	1,55	A	
	Error	6,00	0,60	0,10	-	-	90-POLMON-0,50	1,49	A	
	Total	7,00	0,61	-	-	-				
POLMON-0,75	Model	1,00	1,68	1,68	8,36	0,03	90-POLMON-0,75	3,17	A	
	Error	6,00	1,20	0,20	-	-	60-POLMON-0,75	2,25		B
	Total	7,00	2,88	-	-	-				
POLMON-1,00	Model	1,00	1,44	1,44	12,16	0,01	90-POLMON-1,00	3,94	A	
	Error	6,00	0,71	0,12	-	-	60-POLMON-1,00	3,10		B
	Total	7,00	2,15	-	-	-				

Fonte: Autoria própria.

Diferente do comportamento observado para a resistência residual f_{R1} , o teste de Tukey indicou diferenças significativas para todos os traços analisados, com exceção dos traços com fibras poliméricas com $V_f = 0,50\%$. Esses resultados revelam a forte influência da resistência à compressão do concreto sobre o parâmetro f_{R3} , associado às verificações no estado-limite último de acordo com a ABNT NBR 16935 (2021).

6.3 CLASSIFICAÇÃO DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

A propriedade mecânica do concreto mais influenciada pela adição das fibras é a resistência residual pós-fissuração, e isso representa um parâmetro de projeto importante para as estruturas de concreto reforçado com fibras (DI PRISCO; COLOMBO; DOZIO, 2013; DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009). Dessa forma, o código modelo 2010 (FIB, 2011) classifica o CRF com base nas resistências residuais pós-fissuração obtidas pelo ensaio da norma europeia EN 14651 (2007), cujo procedimento é análogo ao da norma brasileira ABNT NBR 16940 (2021). Deve-se ressaltar que a classificação proposta é válida apenas para concretos com resistência à compressão menor ou igual a 50 MPa. Apesar disso, devido à inexistência de uma classificação que contemple os concretos de alta resistência reforçados com fibras, a mesma metodologia foi aplicada à presente pesquisa.

A classificação do compósito é baseada nas resistências residuais características $f_{R1,k}$ e $f_{R3,k}$, que determinam o comportamento do material no estado-limite de serviço (ELS) e estado-limite último (ELU), respectivamente. O material é classificado utilizando dois parâmetros: (i) o número correspondente à classe de $f_{R1,k}$; (ii) a letra correspondente à relação $f_{R3,k}/f_{R1,k}$ (FIB, 2011; DI PRISCO *et al.*, 2013).

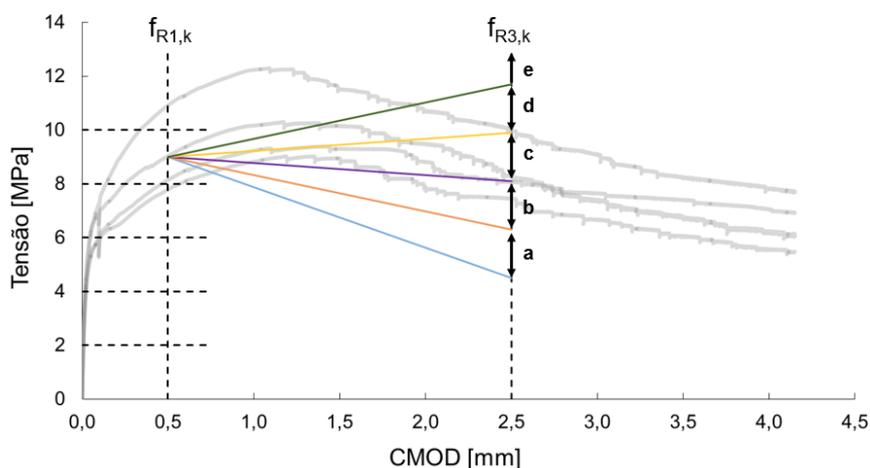
As classes de resistência de $f_{R1,k}$ variam de 1,0 a 8,0 MPa, da seguinte forma: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0. A relação $f_{R3,k}/f_{R1,k}$ é representada pelas letras 'a', 'b', 'c', 'd' e 'e', conforme identificado na Tabela 53, e determina o comportamento do CRF na fase pós-fissuração: *softening* ou *hardening* (Figura 154).

Tabela 53. Classificação do CRF em função da relação f_{R3k}/f_{R1k} .

Letra	Condição
a	$0,5 < f_{R3,k}/f_{R1,k} \leq 0,7$
b	$0,7 < f_{R3,k}/f_{R1,k} \leq 0,9$
c	$0,9 < f_{R3,k}/f_{R1,k} \leq 1,1$
d	$1,1 < f_{R3,k}/f_{R1,k} \leq 1,3$
e	$1,3 < f_{R3,k}/f_{R1,k}$

Fonte: FIB (2011).

Figura 154. Classificação do concreto reforçado com fibras.



Fonte: Autoria própria.

Os valores característicos das propriedades são determinados de acordo com a norma europeia EN 1990 (2002), conforme a Equação (6.3):

$$f_{Rj,k} = f_{Rj,m}(1 - k_N \cdot CV) \quad (6.3)$$

em que:

$f_{Rj,k}$ é a resistência residual à tração na flexão característica correspondente ao $CMOD = CMOD_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) [MPa];

$f_{Rj,m}$ é a resistência residual à tração na flexão média correspondente ao $CMOD = CMOD_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) [MPa];

k_N é um parâmetro que depende da quantidade de corpos de prova, definido no Anexo D da norma europeia EN 1990 (2002);

CV é o coeficiente de variação [%].

Em todos os traços, o parâmetro k_N foi adotado como 1,64, conforme recomendado pelo código modelo 2010 (FIB, 2011), e os valores dos coeficientes de variação dos Grupos 1 e 2 são apresentados na Tabela 54 e na Tabela 55, respectivamente. Os elevados coeficientes de variação nos resultados de resistência residual são atribuídos, principalmente, à variabilidade intrínseca das fibras associada à sua distribuição e orientação no concreto, observado também por outros autores da literatura (GŁODKOWSKA; LASKOWSKA-BURY, 2022).

Tabela 54. Coeficientes de variação dos traços do Grupo 1.

Traço	Coeficiente de variação [%]				
	f_L	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}
60-ACOGAN-0,50	2,24	17,53	15,42	19,61	17,72
60-ACOGAN-0,75	8,70	15,58	11,70	13,22	13,39
60-ACOGAN-1,00	5,07	12,77	11,65	9,78	13,35
60-ACOCOR-0,50	3,85	15,17	18,01	15,25	18,80
60-ACOCOR-0,75	7,80	18,66	10,03	19,00	24,73
60-ACOCOR-1,00	6,96	17,42	23,33	14,52	21,49
60-VIDFIL-0,50	5,32	12,50	11,15	6,03	7,78
60-VIDFIL-0,75	4,80	12,80	10,49	8,82	8,30
60-VIDFIL-1,00	9,78	16,99	17,09	14,83	12,06
60-VIDPUL-0,50	7,55	18,54	20,78	18,66	21,13
60-VIDPUL-0,75	4,10	18,20	19,36	19,72	17,45
60-VIDPUL-1,00	7,16	21,19	22,77	22,44	22,40
60-POLMON-0,50	4,48	16,36	22,14	20,72	18,60
60-POLMON-0,75	3,64	16,09	19,39	17,91	17,64
60-POLMON-1,00	1,79	12,04	15,32	12,24	13,01
60-POLTOR-0,50	1,89	14,16	17,90	18,50	18,38
60-POLTOR-0,75	5,63	12,36	10,48	9,68	10,07
60-POLTOR-1,00	5,59	17,38	16,75	16,95	17,01
Média:	5,35	15,87	16,32	15,44	16,29

Fonte: Autoria própria.

Tabela 55. Coeficientes de variação dos traços do Grupo 2.

Traço	Coeficiente de variação [%]				
	f_L	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}
90-ACOGAN-0,50	6,04	12,56	15,15	18,15	24,41
90-ACOGAN-0,75	3,76	12,93	14,24	9,48	12,74
90-ACOGAN-1,00	6,30	11,41	12,12	12,10	23,87
90-VIDFIL-0,50	3,38	10,99	13,95	20,08	25,50
90-VIDFIL-0,75	6,31	16,90	11,60	8,56	7,93
90-VIDFIL-1,00	2,74	8,13	6,05	7,24	6,24
90-POLMON-0,50	2,66	17,53	19,60	21,07	18,88
90-POLMON-0,75	8,20	15,33	18,26	15,40	16,82
90-POLMON-1,00	6,27	7,94	9,38	7,75	6,50
Média:	5,07	12,64	13,37	13,31	15,88

Fonte: Autoria própria.

A classificação de todos os traços investigados na pesquisa está apresentada na Tabela 56. Os traços 60-POLTOR-0,50 e 90-POLMON-0,50 não possuem uma classificação definida uma vez que o parâmetro $f_{R1,k}$ referente a esses traços são inferiores a 1,0.

Naaman (2018) define o comportamento *deflection-hardening* como aquele em que a tensão máxima pós-fissuração é maior que a tensão associada ao surgimento da primeira fissura ou limite de proporcionalidade, que foi o comportamento observado nos traços com fibras de aço com gancho e alguns traços com fibras de vidro pultrudada. De acordo com a classificação do código modelo 2010 (FIB, 2011) e apresentada na Tabela 56, o comportamento *deflection-hardening* é obtido nos concretos classificados em 'c', 'd' ou 'e' (Figura 154), que é o caso dos concretos reforçados com fibras poliméricas e de vidro pultrudadas. Segundo esse critério, as fibras de aço proporcionaram um comportamento *deflection-softening* ao concreto, uma vez que as resistências residuais f_{R3} são sempre inferiores às f_{R1} .

Tabela 56. Classificação do concreto reforçado com fibras.

Traço	Valores característicos					$f_{R3,k}/f_{R1,k}$	Classificação
	$f_{L,k}$	$f_{R1,k}$	$f_{R2,k}$	$f_{R3,k}$	$f_{R4,k}$		
60-ACOGAN-0,50	5,22	4,02	4,83	3,44	2,80	0,85	4b
60-ACOGAN-0,75	4,98	6,72	8,04	6,49	5,47	0,97	6b
60-ACOGAN-1,00	5,86	8,40	8,73	8,06	6,48	0,96	8b
60-ACOCOR-0,50	5,23	2,68	2,12	1,38	0,98	0,51	2,5a
60-ACOCOR-0,75	4,70	3,32	3,29	1,77	1,09	0,53	3a
60-ACOCOR-1,00	5,01	4,03	2,95	2,62	1,68	0,65	4a
60-VIDFIL-0,50	4,61	1,43	0,57	0,32	0,18	0,23	1a
60-VIDFIL-0,75	5,03	1,82	0,83	0,49	0,30	0,27	1,5a
60-VIDFIL-1,00	4,47	2,36	1,24	0,76	0,51	0,32	2a
60-VIDPUL-0,50	4,37	2,57	2,59	2,56	2,30	1,00	2,5c
60-VIDPUL-0,75	4,95	3,40	3,64	3,52	3,54	1,03	3c
60-VIDPUL-1,00	4,47	3,35	3,69	3,69	3,54	1,10	3d
60-POLMON-0,50	4,31	1,10	1,05	1,02	0,98	0,93	1c
60-POLMON-0,75	4,06	1,51	1,62	1,59	1,44	1,05	1,5c
60-POLMON-1,00	4,37	2,27	2,47	2,47	2,19	1,09	2c
60-POLTOR-0,50	4,48	0,95	0,79	0,80	0,79	0,85	-
60-POLTOR-0,75	3,98	1,31	1,31	1,36	1,34	1,04	1c
60-POLTOR-1,00	4,33	1,55	1,64	1,69	1,67	1,09	1,5c
90-ACOGAN-0,50	5,26	4,54	3,42	1,74	0,93	0,38	4a
90-ACOGAN-0,75	6,10	6,79	5,19	2,98	1,74	0,44	6a
90-ACOGAN-1,00	6,65	10,57	8,40	5,40	2,85	0,51	10a
90-VIDFIL-0,50	5,98	1,28	0,43	0,18	0,08	0,14	1a
90-VIDFIL-0,75	5,85	2,23	1,37	0,83	0,53	0,37	1,5a
90-VIDFIL-1,00	6,36	3,85	2,32	1,31	0,80	0,34	3a
90-POLMON-0,50	5,24	0,94	1,01	0,97	0,95	1,04	-
90-POLMON-0,75	4,48	1,93	2,22	2,37	2,11	1,23	1,5d
90-POLMON-1,00	5,15	2,58	3,34	3,44	3,17	1,34	2e

Fonte: Autoria própria.

6.4 CONDIÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DAS FIBRAS EM APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

Para garantir ductilidade aos elementos estruturais, a ABNT NBR 16935 (2021) estabelece condições mínimas para que as fibras possam substituir a armadura convencional nas peças de concreto dimensionadas no estado-limite último. Essas condições são expressas nas Equações (6.4) e (6.5):

$$f_{R1,k}/f_{L,k} \geq 0,4 \quad (6.4)$$

$$f_{R3,k}/f_{R1,k} \geq 0,5 \quad (6.5)$$

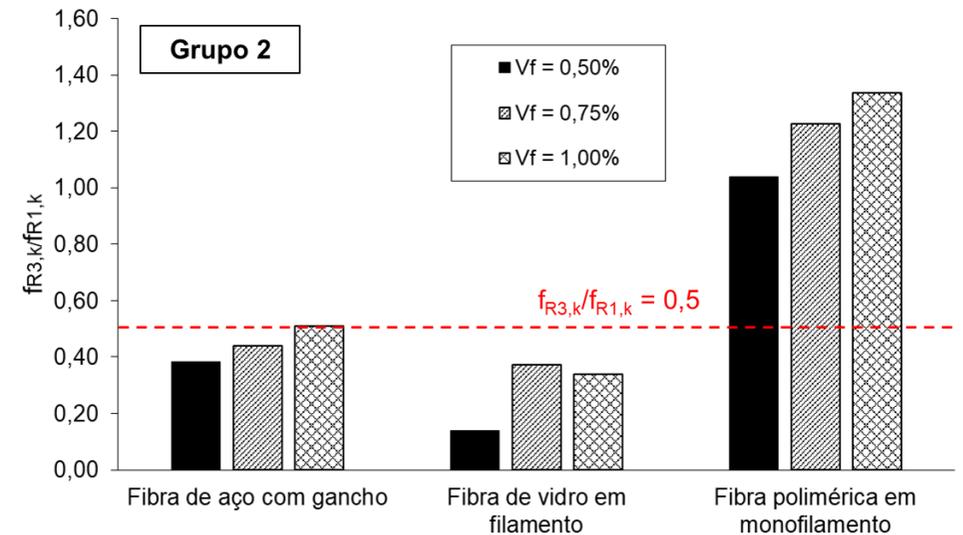
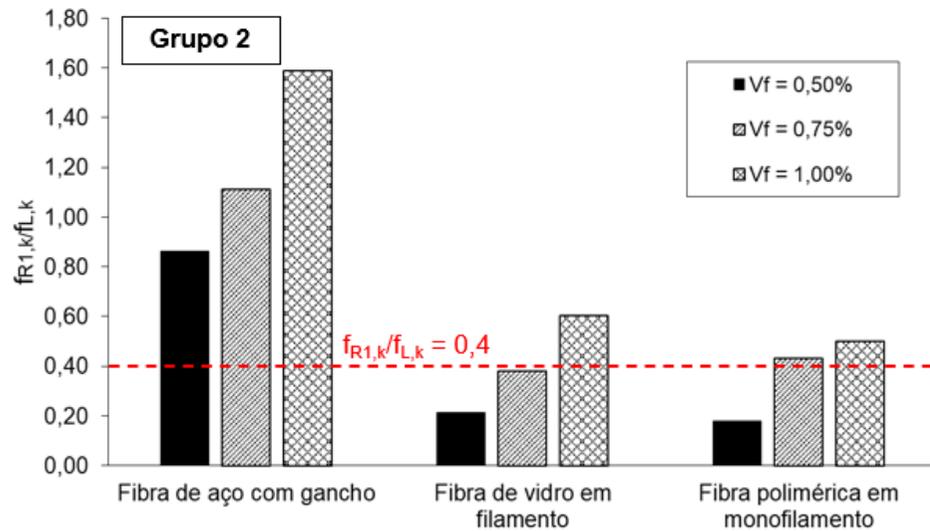
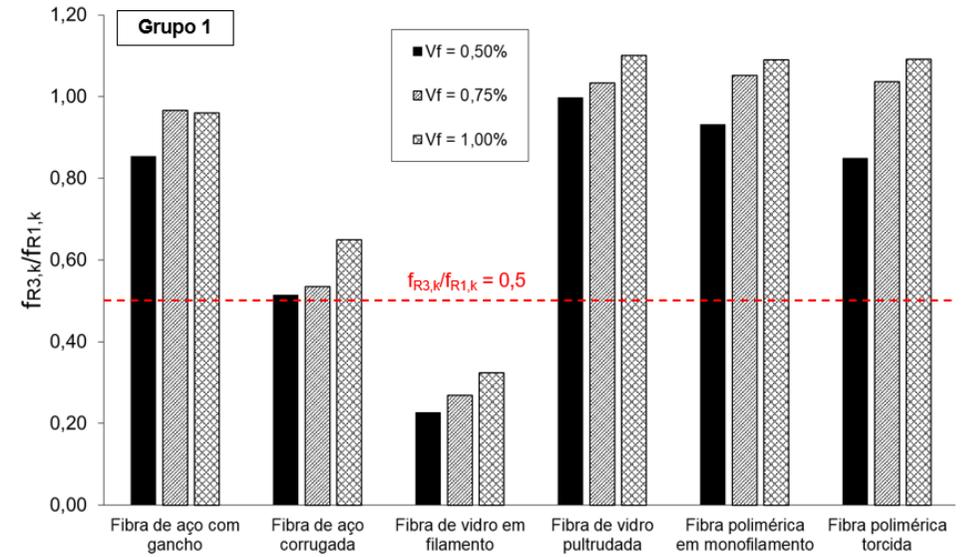
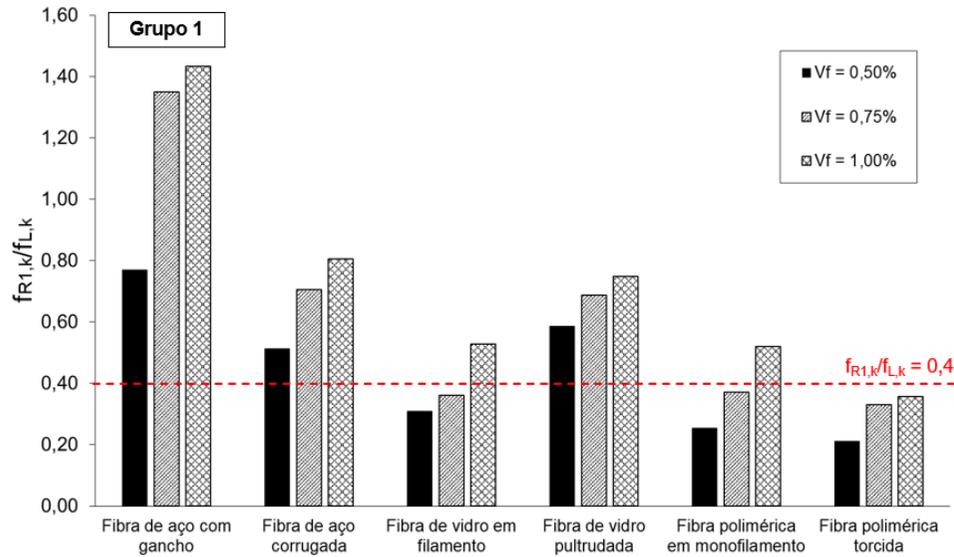
Essas condições foram verificadas para todos os traços a partir das resistências residuais características apresentadas na Tabela 56 e os resultados estão apresentados, para cada grupo, na Figura 155. Deve-se reiterar que essas condições são válidas para concretos de resistência à compressão até 50 MPa, em conformidade com a ABNT NBR 16935 (2021). No entanto, tais condições foram verificadas justamente para avaliar sua aplicabilidade em concretos de alta resistência.

No Grupo 1, apenas as fibras de aço, as fibras de vidro pultrudadas e as fibras poliméricas em monofilamento (essa última com $V_f = 1,00\%$) satisfazem as condições da norma técnica para serem utilizadas em aplicações estruturais. Particularmente, as fibras poliméricas não atendem à Equação (6.4) devido ao baixo módulo de elasticidade da fibra comparado ao módulo da matriz de concreto. Por outro lado, a capacidade da fibra em manter uma tensão quase constante até grandes aberturas faz com que esse tipo de fibra satisfaça a Equação (6.5) com facilidade. Nesse contexto, autores da literatura têm proposto diferentes critérios para utilização de fibras poliméricas em aplicações estruturais (NANA *et al.*, 2021).

O Grupo 2, que contempla concretos cuja resistência à compressão varia entre 80 e 100 MPa, apenas as fibras poliméricas em monofilamento satisfazem ambas as expressões definidas na norma brasileira. Devido à rápida queda no carregamento após a tensão máxima ser atingida nos ensaios com fibras de aço com gancho (Figura 143), a resistência residual f_{R3} é rapidamente reduzida, de forma que a Equação (6.5) não é atendida. Apesar disso, a energia dissipada (representada pela tenacidade) durante os ensaios de flexão pelo concreto reforçado com fibras de aço com gancho é expressivamente superior à energia dissipada pela adição de fibras poliméricas ao

concreto, com valores maiores que o dobro. Nesse contexto, tem-se a seguinte incoerência: as fibras de aço, que proporcionam as maiores tenacidade e ductilidade ao concreto, não podem ser utilizadas em aplicações estruturais pois não atendem as condições exigidas pela norma técnica; e as fibras poliméricas, cuja tenacidade proporcionada ao concreto é significativamente inferior, atende às exigências e pode ser utilizada em elementos estruturais. Portanto, sugere-se que tais condições possam ser revistas para o concreto de alta resistência reforçado com fibras.

Figura 155. Verificação das condições para uso de fibras em aplicações estruturais.

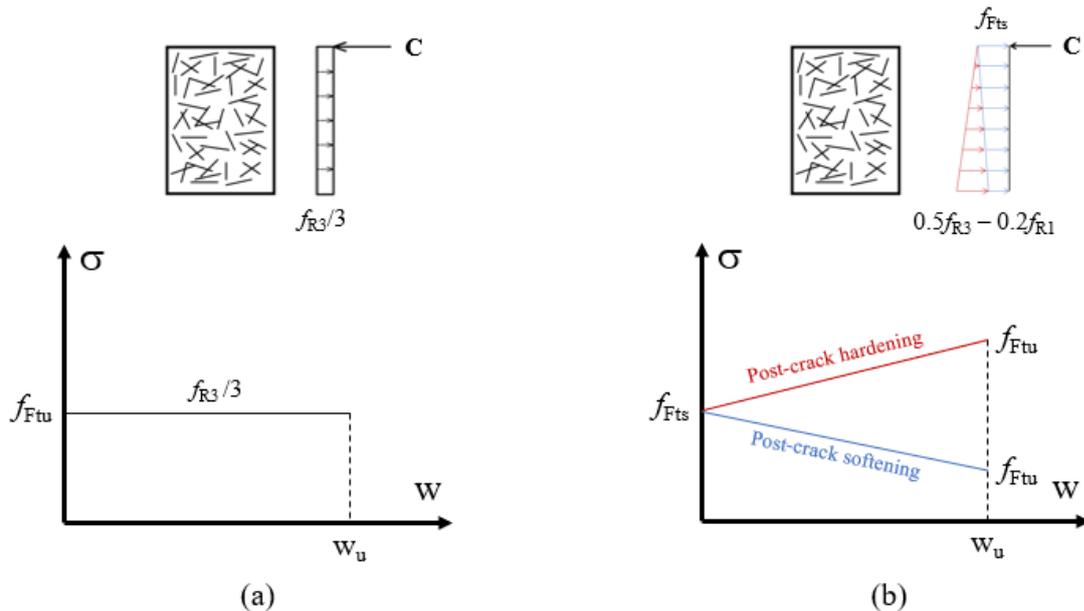


Fonte: Autoria própria.

6.5 MODELOS CONSTITUTIVOS

A norma brasileira ABNT NBR 16935 (2021) apresenta dois modelos constitutivos que podem ser utilizados para aplicação em seções solicitadas normalmente à tração: (i) modelo rígido-plástico e (ii) modelo linear. Nos dois modelos, o comportamento pós-fissuração pode ser caracterizado como *hardening* ou *softening* (Figura 156).

Figura 156. Modelos constitutivos: (a) rígido-plástico e (b) linear.



Fonte: ABNT NBR 16935 (2021).

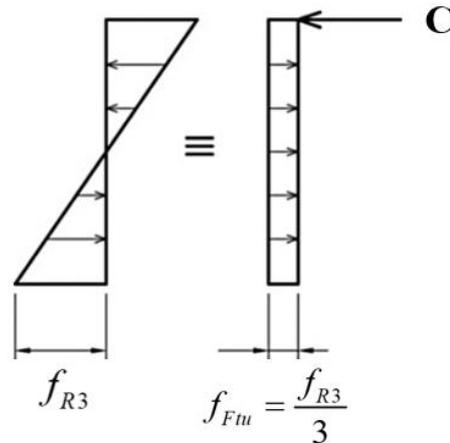
Os modelos são construídos a partir da resistência à tração direta de serviço (f_{Fts}) e última (f_{Ftu}), obtidos em ensaios de flexão de vigas.

O modelo rígido-plástico exige a identificação de apenas um parâmetro: f_{Ftu} . O valor de f_{Ftu} , definido pela Equação (6.6), resulta do pressuposto de que toda resistência à compressão é concentrada na fibra superior da seção, enquanto a tensão de tração residual pós-fissuração é uniformemente distribuída ao longo da seção, conforme ilustrado na Figura 157 (DI PRISCO *et al.*, 2013). O momento resistente da seção é definido pela Equação (6.7).

$$f_{Ftu} = \frac{f_{R3}}{3} \quad (6.6)$$

$$M_R = \frac{f_{R3}bh^2}{6} = \frac{f_{Ftu}bh^2}{2} \quad (6.7)$$

Figura 157. Distribuição de tensões ao longo da seção no modelo rígido-plástico.



Fonte: Adaptado de DI PRISCO *et al.* (2013).

O modelo linear utiliza dois valores de referências, determinados pelas Equações (6.8) e (6.9).

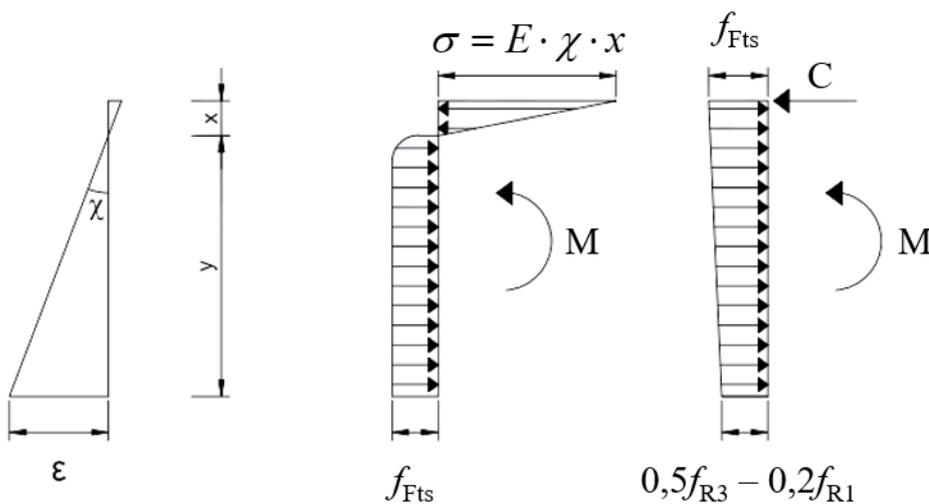
$$f_{Fts} = 0,45f_{R1} \quad (6.8)$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0,5f_{R3} + 0,2f_{R1}) \geq 0 \quad (6.9)$$

em que w_u corresponde à abertura máxima da fissura admitida em projeto (ELU).

No modelo linear, o momento resistente com $w_u = CMOD_3$ é obtido a partir da distribuição de tensões ao longo da seção conforme ilustrado na Figura 158.

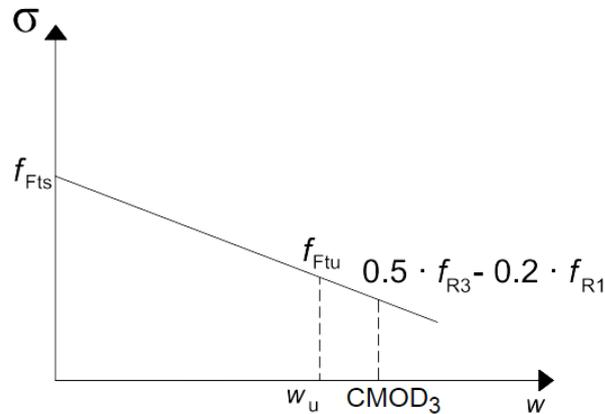
Figura 158. Distribuição de tensões no modelo linear, em que $w_u = CMOD_3$.



Fonte: ABNT NBR 16935 (2021).

Nos casos em que $w_u \neq CMOD_3$, a Equação (6.9) é uma reta, definida no intervalo das abscissas entre $CMOD_1$ e $CMOD_3$ (Figura 159).

Figura 159. Modelo constitutivo linear pós-fissuração.



Fonte: ABNT NBR 16935 (2021).

Os modelos constitutivos rígido-plástico e linear dos traços do Grupo 1 estão apresentados na Figura 162 e na Figura 161, respectivamente. Observa-se que o modelo rígido-plástico apresenta pequenas diferenças quando aplicado às fibras poliméricas e às fibras de aço corrugadas. Conforme esperado, as fibras de vidro filamentadas apresentam tensões quase nulas no modelo rígido-plástico.

A tenacidade (área sob o gráfico) determinada a partir dos dois modelos constitutivos propostos pela norma brasileira demonstra que, em todos os casos, o modelo rígido-plástico é mais conservador, com valores menores de tenacidade. No entanto, nos traços com fibra de aço com gancho, fibra de vidro pultrudada e fibras poliméricas (ambos os formatos), a tenacidade proporcionada pelo modelo linear é um valor entre 10% e 15% maior que seus correspondentes no modelo rígido-plástico (Tabela 57). Para esses tipos de fibras e nessas faixas de resistências à compressão analisadas, a utilização do modelo rígido-plástico pode ser interessante do ponto de vista de dimensionamento devido à sua simplicidade, uma vez que a diferença de tenacidade entre os modelos não foi expressiva. Por outro lado, a magnitude dessa diferença é ampliada com as fibras de vidro filamentadas e aço corrugadas, com valores de 128% e 43%, respectivamente.

Tabela 57. Tenacidade na flexão dos modelos constitutivos dos traços do Grupo 1.

Tenacidade na flexão [N/mm] – Grupo 1												
V _f [%]	AÇOGAN		AÇOCOR		VIDFIL		VIDPUL		POLMON		POLTOR	
	RP*	Linear										
0,50	4,22	4,93	1,53	2,26	0,30	0,78	3,07	3,46	1,29	1,44	0,96	1,11
0,75	6,91	8,00	2,15	3,11	0,48	1,08	4,33	4,76	1,88	2,05	1,35	1,53
1,00	8,00	9,32	2,87	3,91	0,84	1,65	4,86	5,25	2,58	2,82	1,95	2,14

*RP: rígido-plástico

Fonte: Autoria própria.

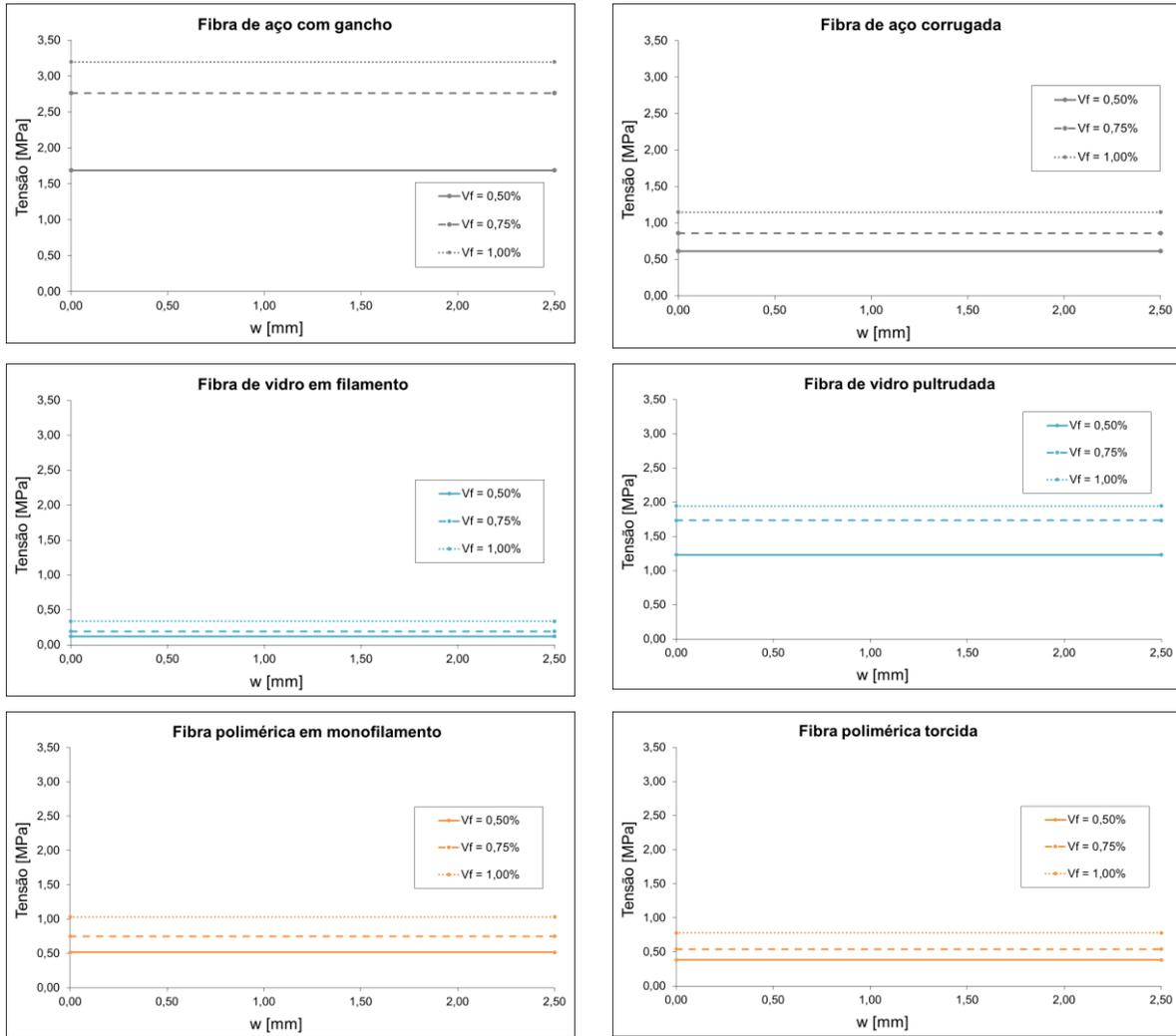
A influência da fração volumétrica de fibras no concreto é evidente nos modelos constitutivos, refletindo diretamente na tenacidade e nos maiores valores de tensão. A redução de resistência que se tem com o modelo linear é mais pronunciada nos traços com fibras de aço e fibras de vidro devido à capacidade das fibras poliméricas em manter uma tensão constante até grandes aberturas de fissura. Esse aspecto também pode ser observado na Tabela 58, na qual é apresentada a relação entre os valores obtidos para a resistência à tração direta última (f_{Ftu}) entre os modelos linear e rígido-plástico.

Tabela 58. Relação $f_{Ftu,linear} / f_{Ftu,RP}$ dos traços do Grupo 1.

Relação $f_{Ftu,linear} / f_{Ftu,RP}$ – Grupo 1						
V _f [%]	AÇOGAN	AÇOCOR	VIDFIL	VIDPUL	POLMON	POLTOR
0,50	0,83	0,33	-	0,90	0,92	0,86
0,75	0,85	0,39	-	0,94	0,95	0,89
1,00	0,84	0,52	-	0,97	0,95	0,94

Fonte: Autoria própria.

Figura 160. Modelo constitutivo rígido-plástico dos traços do Grupo 1.



Fonte: Autoria própria.

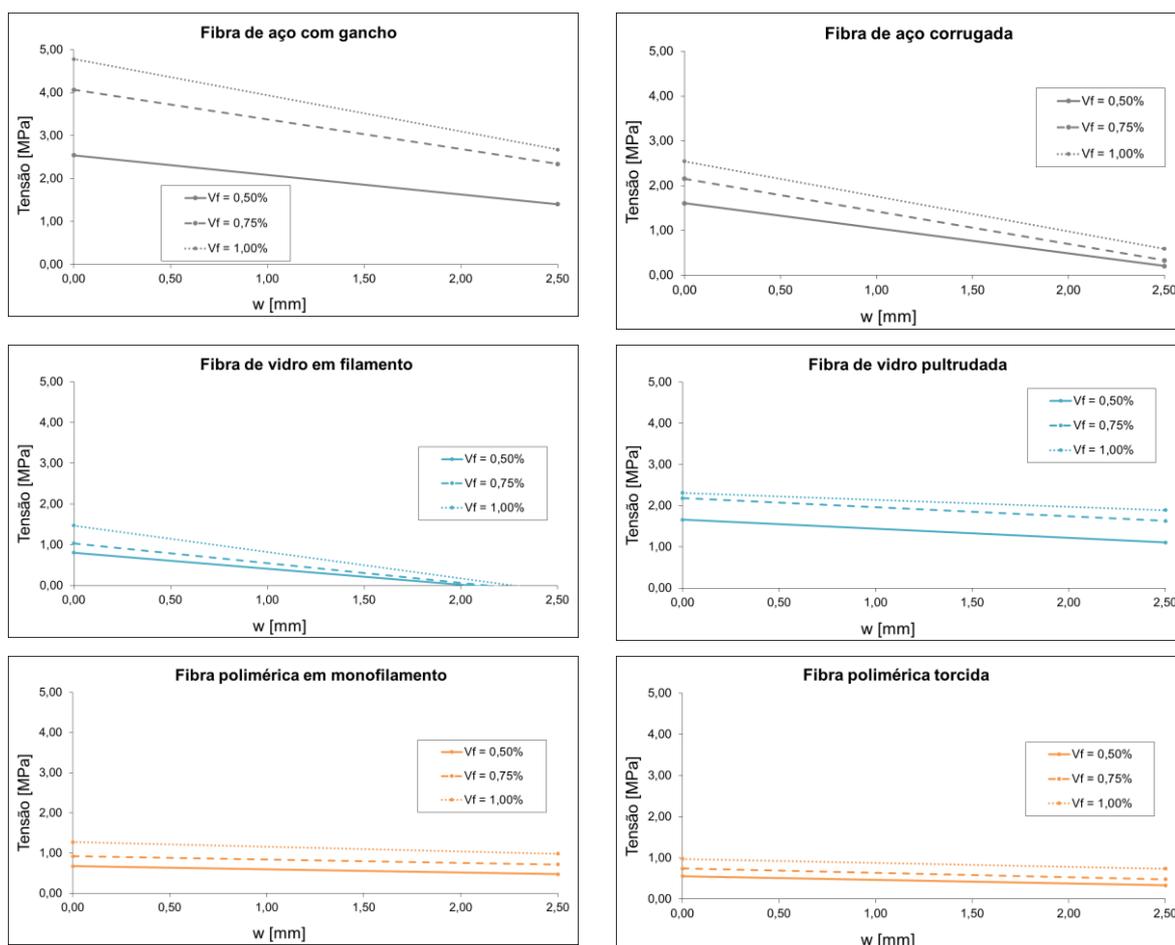
Os modelos linear e rígido-plástico dos traços do Grupo 2, que envolvem concretos com resistência à compressão entre 80 e 100 MPa, estão apresentados na Figura 162, dentre os quais se destaca a maior declividade do modelo linear referente ao concreto reforçado com fibras de aço com gancho, principalmente quando comparado ao Grupo 1 (Tabela 59). Esse comportamento é facilmente observado na Figura 163, na qual é apresentada uma comparação dos modelos constitutivos lineares entre os Grupos 1 e 2.

Tabela 59. Relação $f_{Ftu,linear} / f_{Ftu,RP}$ dos traços do Grupo 2.

V_f [%]	Relação $f_{Ftu,linear} / f_{Ftu,RP}$ – Grupo 2		
	AÇOGAN	VIDFIL	POLMON
0,50	0,12	-	0,97
0,75	0,04	-	1,01
1,00	0,34	-	1,05

Fonte: Autoria própria.

Figura 161. Modelo constitutivo linear dos traços do Grupo 1.

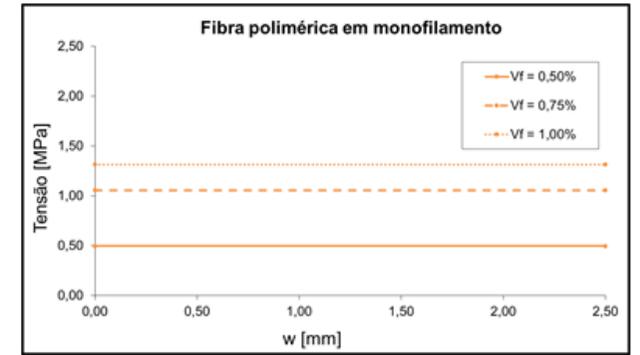
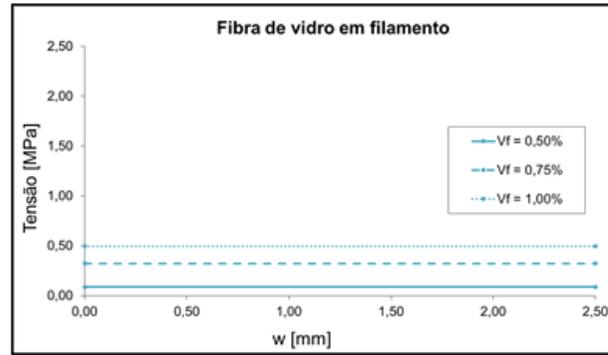
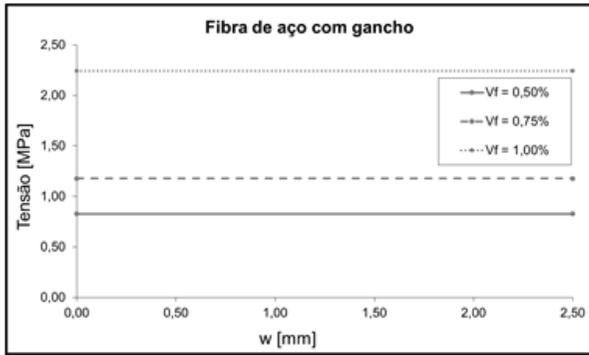


Fonte: Autoria própria.

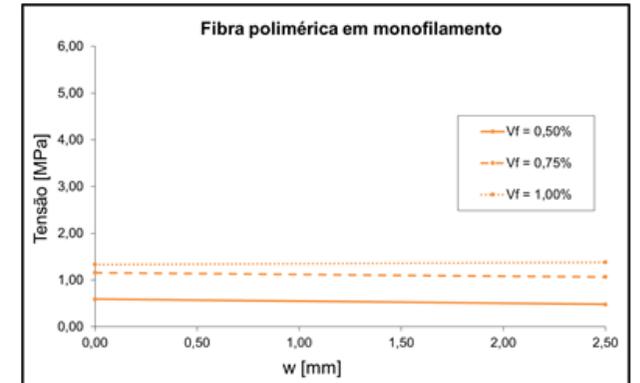
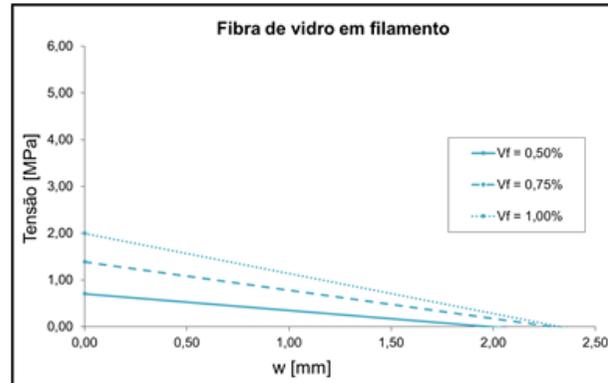
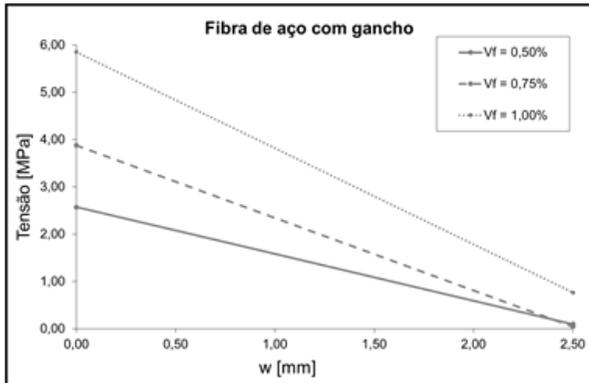
Outro aspecto que deve ser ressaltado é o modelo constitutivo linear das fibras poliméricas do Grupo 2. Dentre todos os traços estudados, apenas os concretos do Grupo 2 reforçados com fibra polimérica em monofilamento numa fração volumétrica de 1,00% apresentou um comportamento de *hardening* com o modelo linear. Todos os outros traços analisados no programa experimental apresentaram uma queda de tensão com o aumento da abertura de fissura, caracterizando um comportamento de *softening*.

Figura 162. Modelos constitutivos do Grupo 2: rígido-plástico e linear.

Modelo rígido-plástico

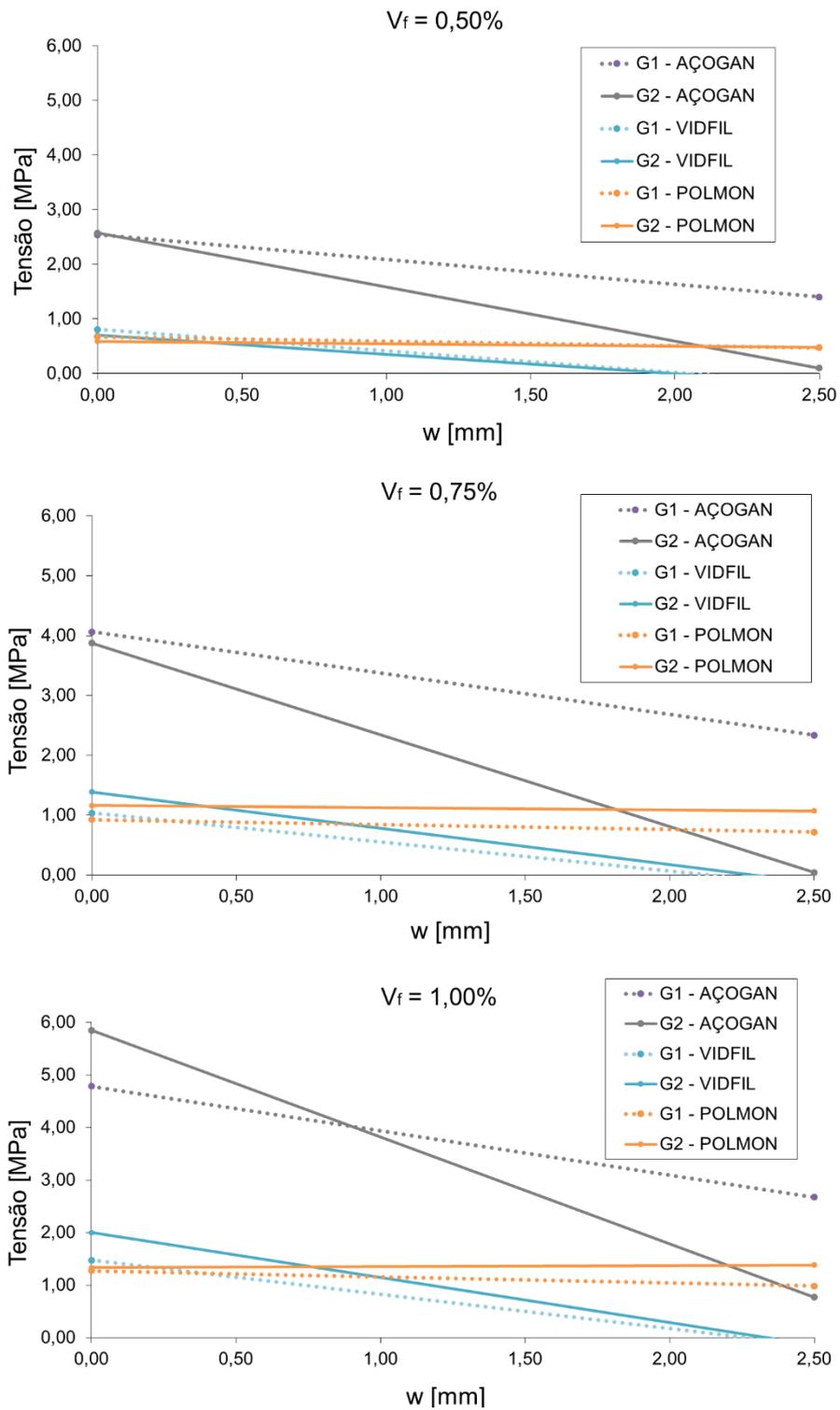


Modelo linear



Fonte: Autoria própria.

Figura 163. Comparação entre os modelos lineares dos Grupos 1 e 2.



Fonte: Autoria própria.

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, os resultados dos ensaios de flexão em três pontos foram apresentados e discutidos frente ao tipo e à fração volumétrica de fibras. Independentemente do material da fibra, os resultados indicaram que as resistências residuais e tenacidade são maiores quanto maior for a quantidade de fibras adicionadas ao concreto. Esse comportamento foi observado em todos os traços investigados, isso é, em concretos cuja resistência à compressão varia entre 50 e 100 MPa. Além de maiores resistências residuais, o aumento do teor de fibra pode proporcionar um comportamento *deflection-hardening* ao concreto, observado com as fibras de aço com gancho e fibras de vidro pultrudadas.

As fibras de aço apresentaram as maiores resistências residuais, seguidas pelas fibras de vidro pultrudadas, fibras poliméricas (ambos os tipos) e fibras de vidro filamentadas. Essas últimas, particularmente, apresentaram resistências residuais quase nulas a partir do $CMOD_3 = 2,50$ mm.

O limite de proporcionalidade não é afetado pela adição de fibras ao concreto. Esse é um parâmetro governado, principalmente, pela resistência à tração da matriz de concreto, uma vez que ele também é definido como a tensão associada ao surgimento da primeira fissura. O comportamento pós-fissuração, por outro lado, é controlado majoritariamente pelas fibras.

A resistência à compressão mais elevada do concreto afetou, principalmente, o limite de proporcionalidade de todos os traços e o comportamento pós-fissuração do concreto reforçado com fibras de aço com gancho, que apresentou uma rápida queda de resistência após atingir a tensão de flexão máxima.

A classificação do concreto reforçado com fibras, bem como as condições exigidas para utilizadas em aplicações estruturais e os modelos constitutivos simplificados da norma brasileira foram apresentados e discutidos. Nesse contexto, foi verificado que tais condições não são coerentes com os resultados experimentais observados e devem ser revisadas para o concreto de alta resistência reforçado com fibras.

7

Comportamento do CARRF por meio de análise inversa

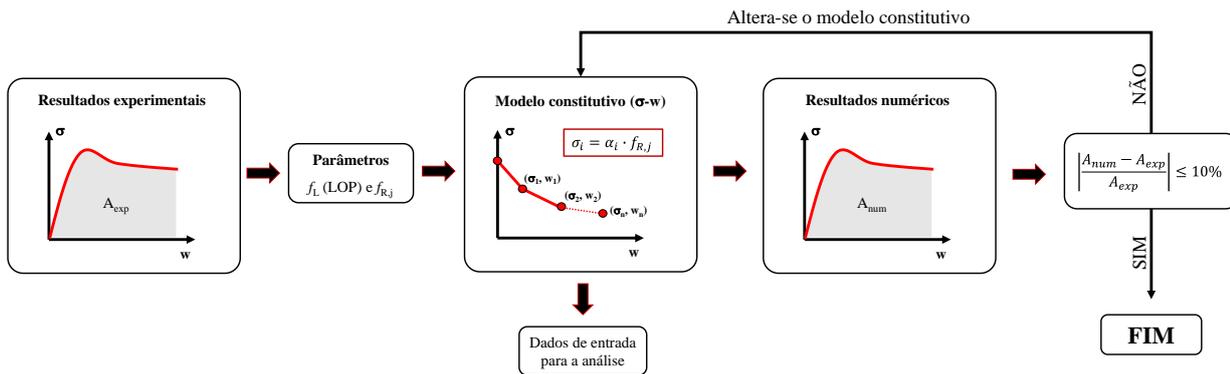
Neste capítulo são apresentados os aspectos e artifícios utilizados na modelagem numérica via elementos finitos para a obtenção do modelo constitutivo à tração do concreto de alta resistência reforçado com fibras. O objetivo foi desenvolver um modelo numérico que representasse os ensaios de flexão realizados no programa experimental e cujos resultados foram apresentados no capítulo anterior para, por meio de uma análise inversa, propor um modelo constitutivo na tração para o concreto reforçado com as fibras estudadas. A validação dos modelos desenvolvidos ocorreu comparando-se a tenacidade experimental e numérica, e seus resultados apresentam ótima concordância com os resultados experimentais.

7.1 METODOLOGIA DA ANÁLISE INVERSA

No contexto do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras, a análise inversa é comumente utilizada para a obtenção das curvas tensão-deformação ou tensão-abertura de fissuras (CMOD) na tração (BLASI; LEONE, 2022; GAO *et al.*, 2021; GUO; WANG; GU, 2022; MATOS *et al.*, 2021; MOBASHER; BAKHSHI; BARSBY, 2014; STEPHEN *et al.*, 2019). A análise inversa é um artifício utilizado devido às dificuldades associadas ao ensaio de tração direta, como a falta de alinhamento do corpo de prova e a exigência de dispositivos especiais para a fixação do corpo de prova à prensa da máquina (BUTTIGNOL *et al.*, 2018), já discutidas no item 3.2.1.

Neste trabalho, a análise inversa para a obtenção do modelo constitutivo foi realizada por meio de modelagem numérica via elementos finitos com o auxílio do software ABAQUS, estratégia adotada por diferentes autores da literatura para investigar o comportamento do concreto reforçado com fibras (ABBASS; IQBAL KHAN, 2022; ABDULHAMEED *et al.*, 2022; ALHASSAN *et al.*, 2022; LAKAVATH; SURIYA PRAKASH; DIRAR, 2021). A metodologia para a obtenção do modelo constitutivo é resumida no fluxograma da Figura 164. A partir dos resultados de flexão apresentados no Capítulo 6, o limite de proporcionalidade (LOP) e as resistências residuais ($f_{R,i}$) são determinados. Esses parâmetros são utilizados como referência para determinação dos dados de entrada no modelo numérico e que correspondem aos pontos do modelo constitutivo a ser proposto. Após a análise numérica, a curva tensão-CMOD é extraída e sua tenacidade comparada com a tenacidade da curva experimental. Caso essa diferença, seja inferior a 10%, considera-se o modelo numérico validado e uma relação constitutiva é proposta. Caso contrário, altera-se o modelo constitutivo e a análise é refeita. Esse processo se repete até que a diferença entre as tenacidades seja inferior a 10%.

Figura 164. Fluxograma adotado para a obtenção do modelo constitutivo à tração por análise inversa.



Fonte: Autoria própria.

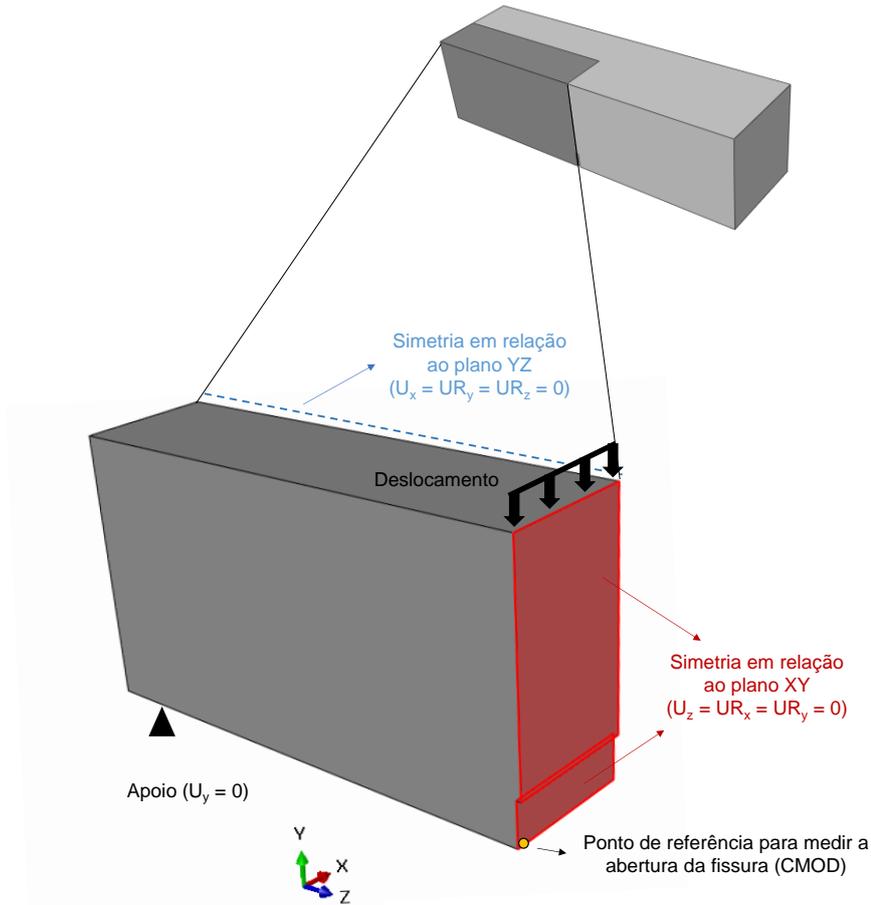
7.2 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O desenvolvimento do modelo numérico se deu frente aos ensaios de flexão realizados no programa experimental. As dimensões do corpo de prova e as condições de contorno, portanto, foram adotadas conforme os experimentos. Na sequência, são apresentadas todas as condições e artifícios utilizados para o desenvolvimento e validação do modelo numérico.

7.2.1 Geometria, condições de contorno e carregamento

Em função da dupla simetria, apenas um quarto do corpo de prova foi modelado para reduzir o tempo e custo de processamento. As simetrias foram aplicadas em relação aos planos XY e YZ, e o deslocamento foi aplicado no centro do vão, ao longo do eixo y (Figura 165). Assim como ocorreu nos experimentos, a abertura de fissura (CMOD) no modelo numérico foi determinada na região próxima à face inferior do corpo de prova, no entalhe.

Figura 165. Geometria e condições de contorno do modelo numérico.

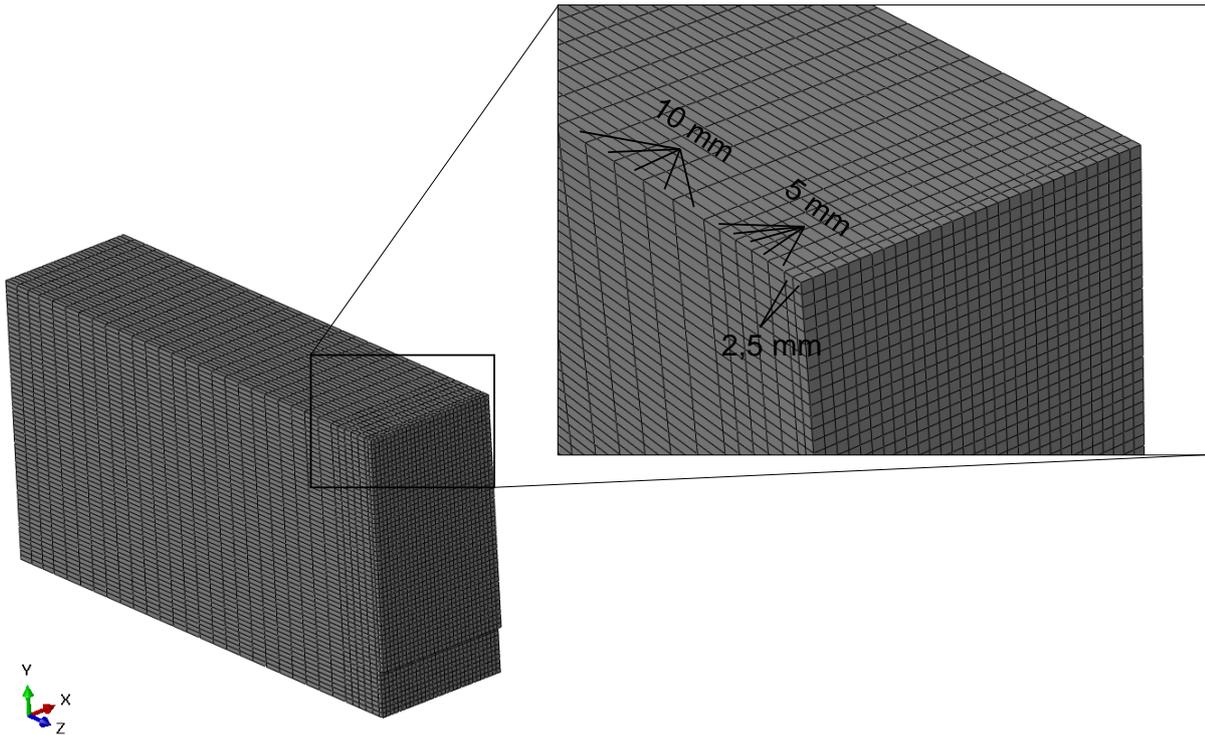


Fonte: Autoria própria.

7.2.2 Malha dos elementos finitos

O prisma de concreto reforçado com fibras foi modelado com elementos sólidos de oito nós e integração reduzida (elemento C3D8R da biblioteca do ABAQUS), uma vez que esse elemento é o mais apropriado para a realização de análises dinâmicas explícitas (SIMULIA, 2012). O tamanho dos elementos variou entre 2,50 mm na região do entalhe até 10 mm nas regiões mais distantes, conforme ilustrado na Figura 166. Na direção transversal ao eixo do prisma, o tamanho do elemento foi fixado em 2,50 mm.

Figura 166. Malha dos elementos.

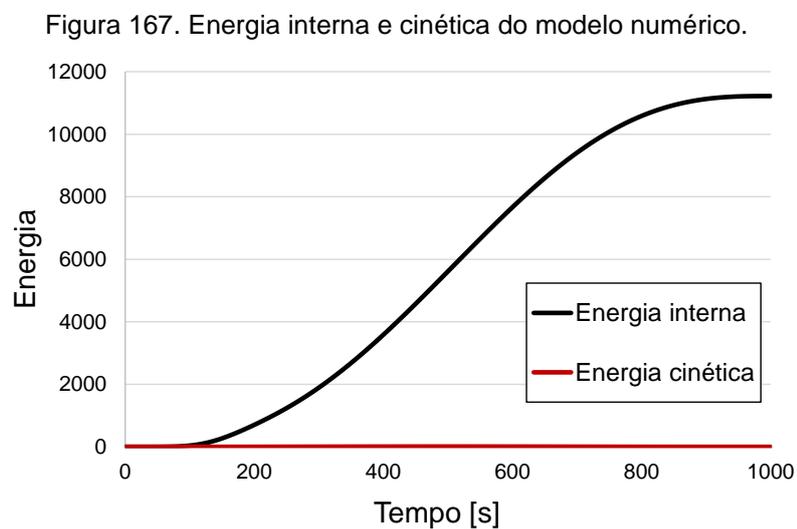


Fonte: Autoria própria.

7.2.3 Método de análise

As simulações numéricas foram realizadas por meio de uma análise dinâmica explícita, recomendada em situações com grandes deformações. Diferente dos métodos numéricos usuais, como Newton-Raphson, a análise explícita baseia-se no equilíbrio dinâmico, no qual as matrizes globais de massa e de rigidez não precisam ser alocadas e invertidas resultando em menos esforço computacional quando comparado com a análise implícita (ALMEIDA *et al.*, 2023). Esse tipo de análise geralmente é usado para modelar eventos denominados “quase-estáticos”, nos quais a taxa de carregamento adotada é suficientemente pequena para que as forças de inércia sejam desprezíveis, tendo sido utilizado com sucesso por outros autores para investigar o comportamento do concreto reforçado com fibras (ABDULHAMEED *et al.*, 2022; NANA *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2020). O método *mass scaling*, disponibilizado pelo ABAQUS, foi utilizado para reduzir o tempo de processamento da análise, com um incremento de tempo desejado de 0,005s, determinado a partir de análises preliminares para se obter uma solução economicamente viável. Esse método, no entanto, pode aumentar as forças de inércia no modelo numérico, levando

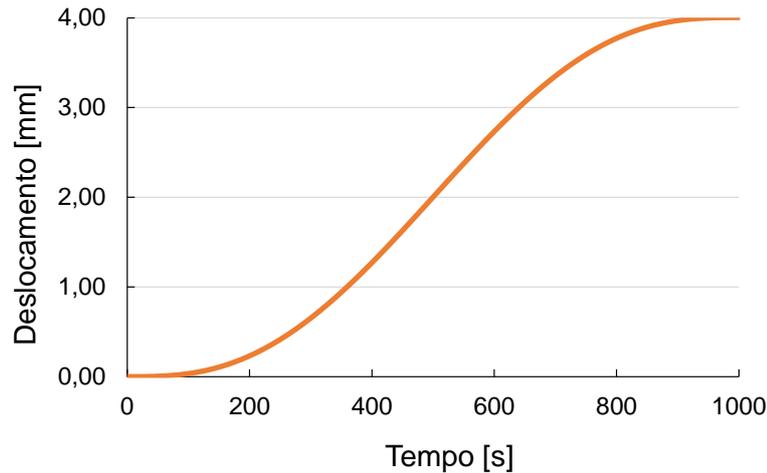
a resultados algumas vezes irreais. Por isso, deve-se encontrar a relação ideal entre o tempo de processamento e a qualidade dos resultados da análise, para que as análises sejam realizadas com os menores recursos computacionais possíveis e as forças de inércia ainda sejam insignificantes (SIMULIA, 2012). A análise é considerada quase-estática quando a energia cinética do modelo não supera uma pequena fração (da ordem de 1-10%) da energia interna ao longo da maior parte da análise. Em outras palavras, o trabalho realizado pelas forças externas deve ser aproximadamente igual à energia interna do sistema (ALMEIDA *et al.*, 2023; SIMULIA, 2012). Na Figura 167 são apresentadas as energias interna e cinética do modelo extraídas do software após a realização de uma das análises, na qual se observa a energia cinética praticamente desprezível quando comparada à energia interna do modelo.



Fonte: Autoria própria.

O deslocamento foi aplicado segundo uma curva suave (“*smooth step*”) para diminuir as forças de inércia, em que o ABAQUS cria um polinômio de transição de quinta-ordem entre dois valores extremos de forma que a primeira e segunda derivadas são nulas no início e no fim da transição (Figura 168). A taxa de deslocamento adotada foi de 0,004 mm/s, próxima à taxa real utilizada nos experimentos.

Figura 168. Função do deslocamento aplicado no modelo numérico.

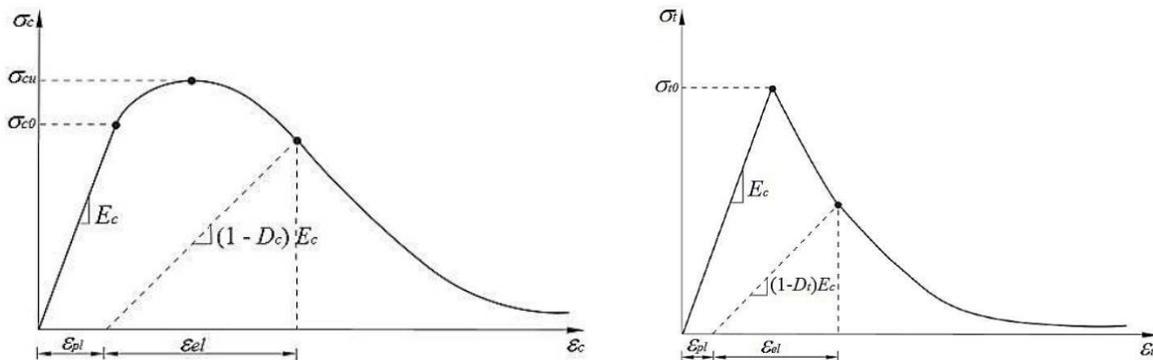


Fonte: Autoria própria.

7.2.4 Propriedades dos materiais

O comportamento não-linear do concreto foi simulado por meio do modelo *Concrete Damaged Plasticity* (CDP), implementado na biblioteca do ABAQUS e amplamente utilizado por diferentes autores da literatura para estudar o comportamento mecânico do concreto, inclusive do concreto reforçado com fibras (ABBASS; IQBAL KHAN, 2022; ABDULHAMEED *et al.*, 2022; ALHASSAN *et al.*, 2022; HASHIM; HEJAZI; LEI, 2020; LAKAVATH; SURIYA PRAKASH; DIRAR, 2021). Segundo o manual do software, o modelo foi formulado a partir da teoria da plasticidade e utiliza o conceito de dano para representar a perda de rigidez do concreto quando solicitado. A degradação da rigidez do material ocorre em função do surgimento de fissuras no concreto, conforme ilustrado na Figura 169a para o concreto comprimido e na Figura 169b para o concreto tracionado.

Figura 169. Dano no concreto comprimido (a) e tracionado (b).



(a)

Fonte: SIMULIA (2012).

(b)

No modelo numérico, as variáveis de dano na compressão e na tração foram estimadas por meio das equações (7.1) e (7.2), respectivamente:

$$D_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_{cm}} \quad (7.1)$$

$$D_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_{ctm}} \quad (7.2)$$

onde σ_c e σ_t representam as tensões de compressão e tração no concreto, e f_{cm} e f_{ctm} as resistências médias à compressão e à tração do concreto, respectivamente.

O CDP é definido por um critério de plastificação do concreto que envolve os seguintes parâmetros: ângulo de dilação (ψ); excentricidade (ϵ); relação entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial (f_{b0}/f_{c0}); fator de forma (K) e o parâmetro de viscosidade (μ).

O ângulo de dilação e a excentricidade são parâmetros que afetam a função do fluxo plástico, que governa a evolução das deformações inelásticas ao longo do processo de fissuração do concreto. De modo geral, valores pequenos do ângulo de dilação (em torno de 10°) estão relacionados a um comportamento mais frágil, enquanto valores elevados (em torno de 40°) representam um comportamento dúctil do material. A excentricidade é distância entre o vértice da hipérbole de Drucker-Prager e a assíntota que a define, variando entre zero para uma linha reta e 0,1 para a superfície hiperbólica (MALM, 2006; PETRAUSKI, 2016).

O fator de forma define o formato da superfície da falha do concreto, variando entre 0,50 (que representa o critério de falha de Rankine) a 1,0 (que representa o critério de falha de Drucker-Prager). O valor padrão do ABAQUS de $2/3$, por sua vez, representa uma superfície intermediária entre um triângulo (Rankine) e um círculo (Drucker-Prager), próxima à superfície de falha proposta por Mohr-Coulomb (PETRAUSKI, 2016).

O parâmetro de viscosidade pode ser utilizado para facilitar o processo de convergência dos modelos numéricos, sendo recomendado adotar valores entre 0 e 10^{-4} .

Os valores adotados para a excentricidade (ϵ), relação entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial (f_{b0}/f_{c0}), fator de forma (K) e parâmetro de viscosidade (μ) correspondem aos valores padrão recomendado pelo ABAQUS (Tabela 60). O valor do ângulo de dilação (ψ) variou conforme o material da fibra (aço, vidro e polimérica).

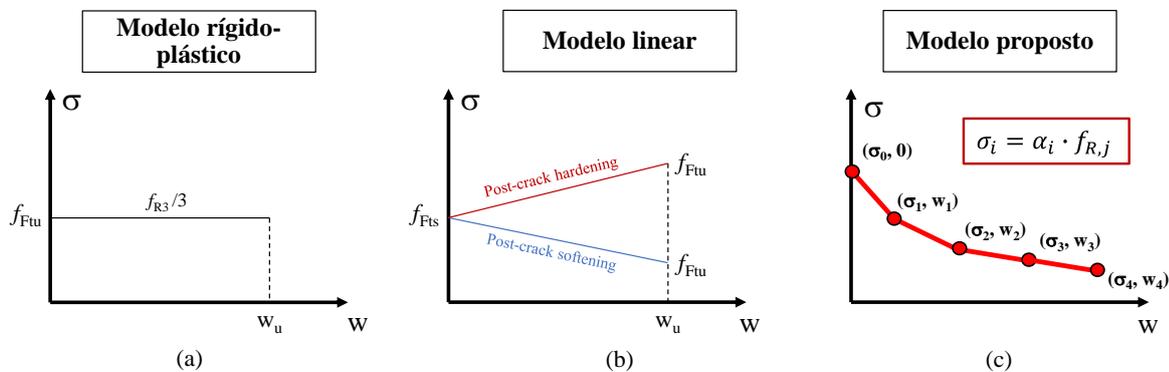
Tabela 60. Parâmetros adotados para o CDP.

Tipo de fibra	Concrete Damaged Plasticity				
	ψ	ϵ	f_{b0}/f_{c0}	K	μ
Fibra de aço	36°	0,10	1,16	0,67	0,0001
Fibra de vidro	33°	0,10	1,16	0,67	0,0001
Fibra polimérica	30°	0,10	1,16	0,67	0,0001

Fonte: Autoria própria.

O comportamento do concreto na compressão foi simulado a partir dos resultados dos ensaios de compressão apresentados no Capítulo 5. O comportamento do concreto na tração foi simulado por meio de três modelos constitutivos: os modelos rígido-plástico e linear apresentados na ABNT NBR 16935 (2021), e o modelo constitutivo proposto, quando for o caso. Os modelos são formados por diagramas tensão-abertura de fissuras multilineares, conforme ilustrado na Figura 170.

Figura 170. Modelos constitutivos utilizados para o concreto tracionado: (a) modelo rígido-plástico; (b) modelo linear e (c) modelo proposto.



Fonte: Autoria própria.

No modelo proposto, as tensões são obtidas a partir das resistências residuais determinadas nos ensaios de flexão ($f_{R,i}$) e os valores de 'w' correspondem aos respectivos $CMOD_i$, com exceção de f_{R1} . Os modelos constitutivos são apresentados na Tabela 61 para as fibras de aço corrugada, fibras de vidro e poliméricas. O modelo rígido-plástico apresentou boa concordância com os resultados experimentais do concreto reforçado com fibras de aço com gancho do Grupo 1, motivo pelo qual um novo modelo não foi proposto para esse tipo de fibra, conforme será apresentado nos resultados.

Tabela 61. Modelos constitutivos adotados para tração (curvas tensão-abertura de fissura).

Fibra de aço corrugada	
σ [MPa]	w [mm]
$0,42 \cdot f_L$	0,00
$0,25 \cdot f_{R1}$	0,05
$0,15 \cdot f_{R2}$	1,50
$0,10 \cdot f_{R3}$	2,50
$0,05 \cdot f_{R4}$	3,50

Fibra de vidro em filamento	
σ [MPa]	w [mm]
$0,50 \cdot f_L$	0,00
$0,20 \cdot f_{R1}$	0,05
$0,15 \cdot f_{R2}$	1,50
$0,10 \cdot f_{R3}$	2,50
$0,05 \cdot f_{R4}$	3,50

Fibra de vidro pultrudada	
σ [MPa]	w [mm]
$0,44 \cdot f_L$	0,00
$0,30 \cdot f_{R1}$	0,05
$0,35 \cdot f_{R2}$	1,50
$0,25 \cdot f_{R3}$	2,50
$0,15 \cdot f_{R4}$	3,50

Fibra de polimérica em monofilamento	
σ [MPa]	w [mm]
$0,44 \cdot f_L$	0,00
$0,30 \cdot f_{R1}$	0,05
$0,35 \cdot f_{R2}$	1,50
$0,38 \cdot f_{R3}$	2,50
$0,40 \cdot f_{R4}$	3,50

Fibra polimérica torcida	
σ [MPa]	w [mm]
$0,52 \cdot f_L$	0,00
$0,30 \cdot f_{R1}$	0,05
$0,35 \cdot f_{R2}$	1,50
$0,38 \cdot f_{R3}$	2,50
$0,40 \cdot f_{R4}$	3,50

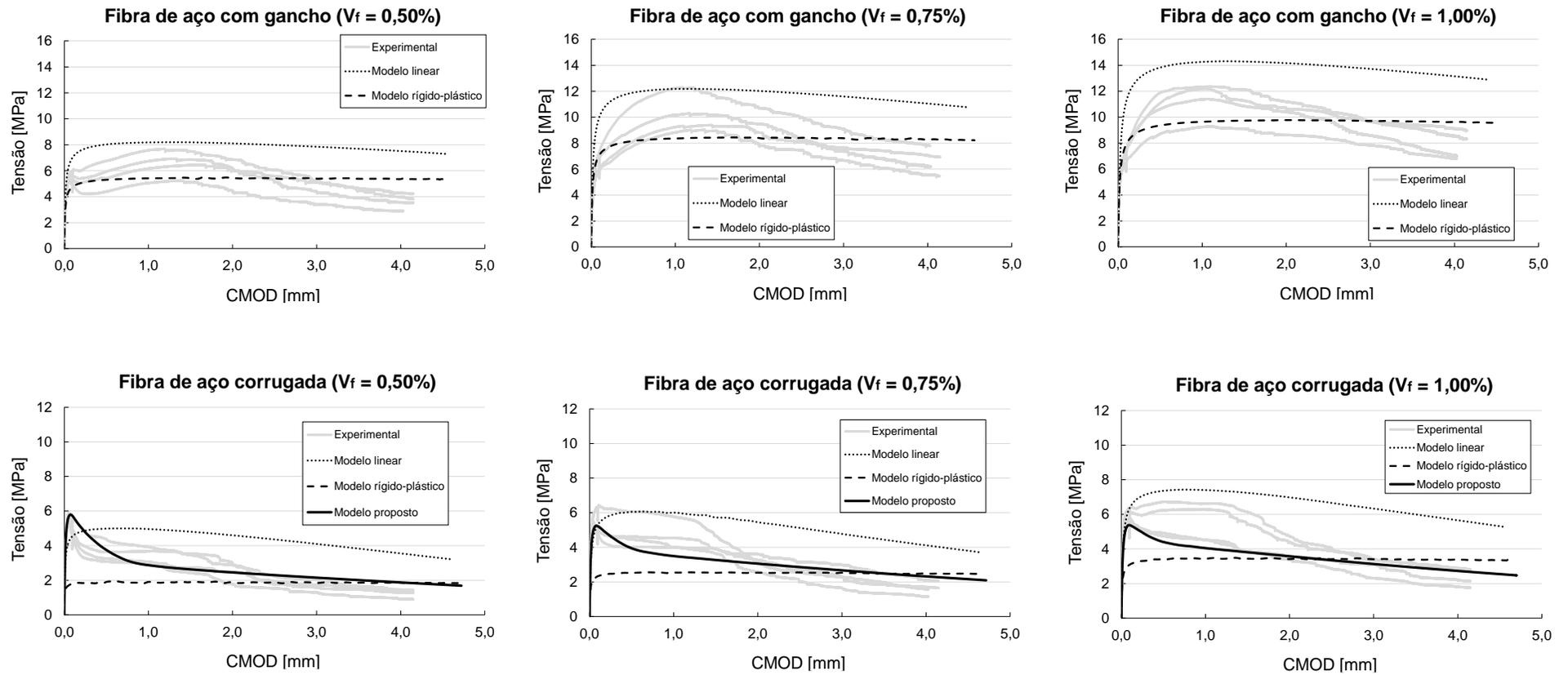
Fonte: Autoria própria.

7.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.3.1 Grupo 1

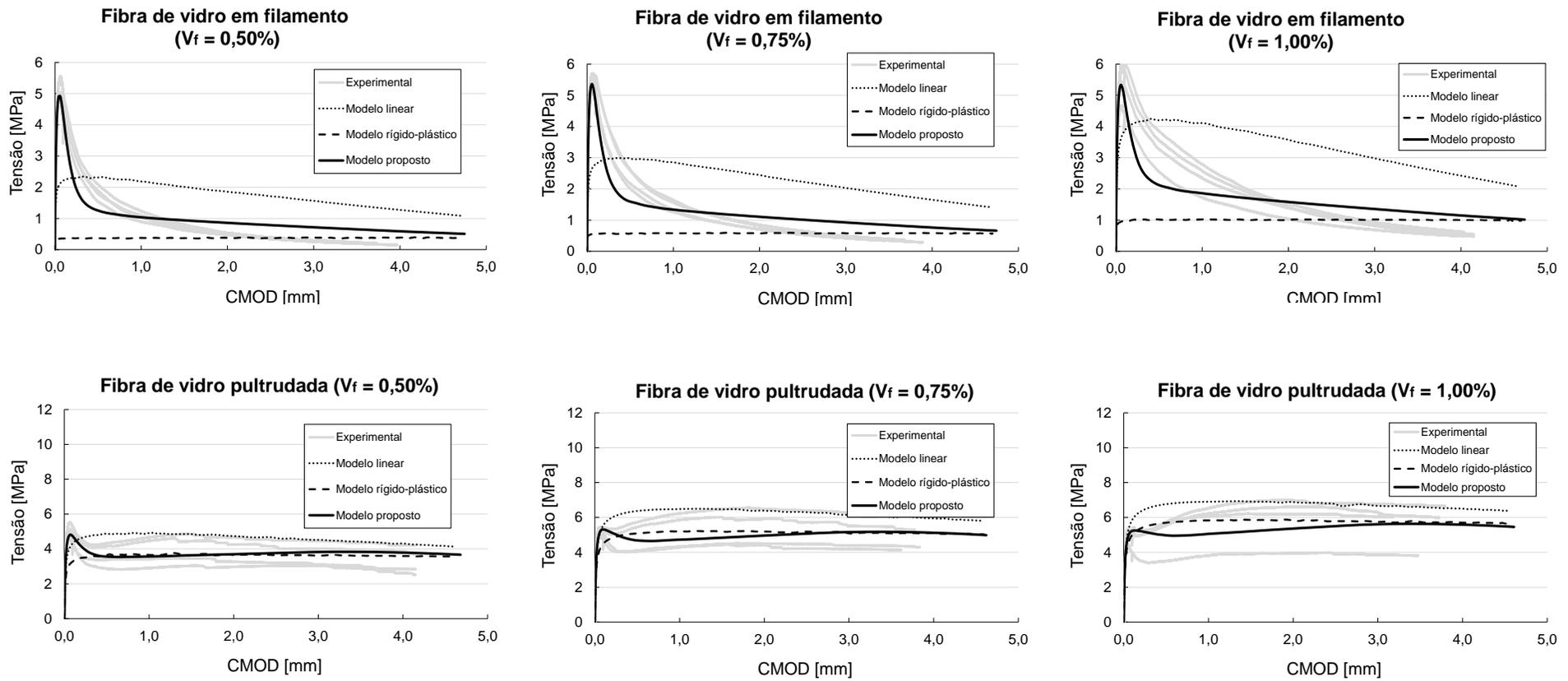
As curvas tensão-CMOD obtidas com a modelagem numérica dos traços do Grupo 1 estão apresentadas na Figura 171 para os concretos reforçados com fibras de aço, na Figura 172 para os concretos reforçados com fibras de vidro e na Figura 173 para os concretos reforçados com fibras poliméricas.

Figura 171. Curvas numéricas tensão-CMOD dos concretos reforçados com fibras de aço do Grupo 1.



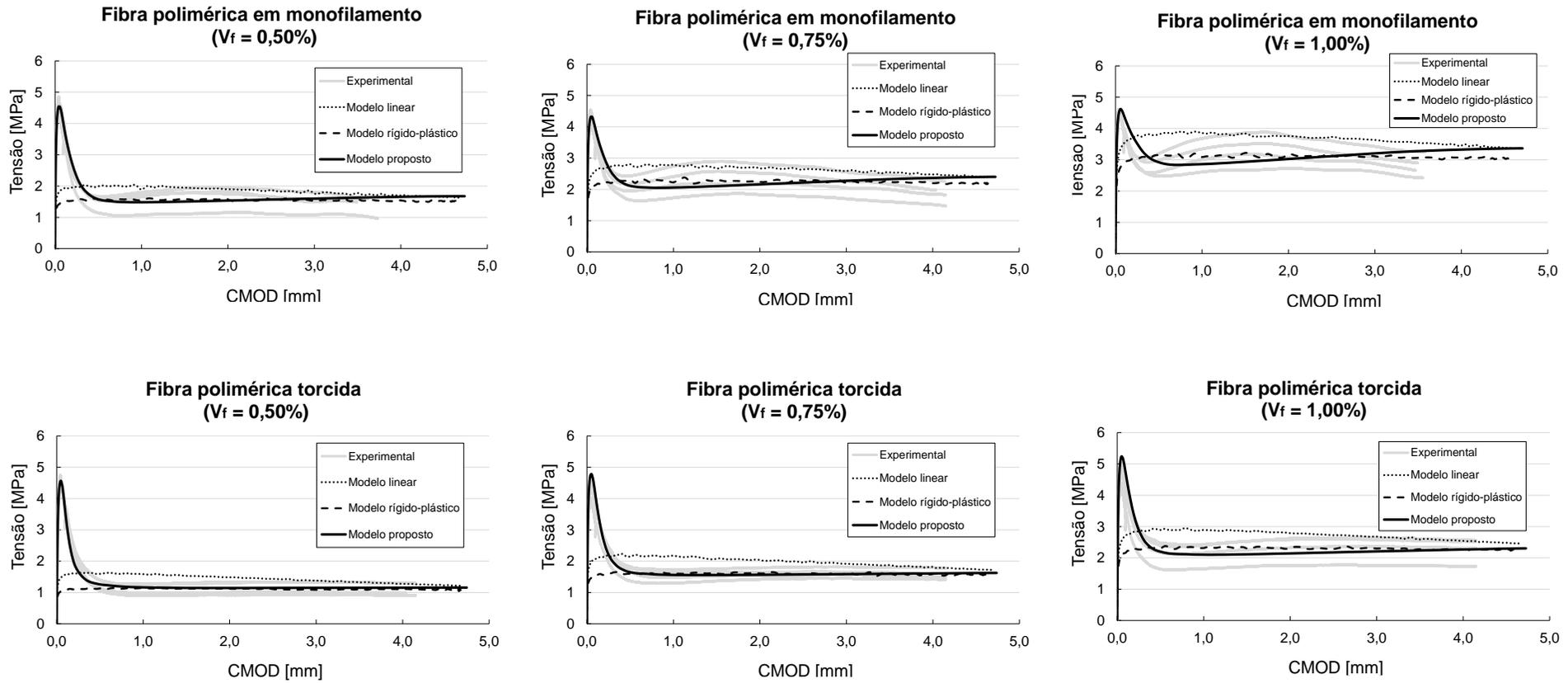
Fonte: Autoria própria.

Figura 172. Curvas numéricas tensão-CMOD dos concretos reforçados com fibras de vidro do Grupo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 173. Curvas numéricas tensão-CMOD dos concretos reforçados com fibras poliméricas do Grupo 1.



Fonte: Autoria própria.

Nas curvas apresentadas, nota-se que apenas os concretos reforçados com fibras de aço com gancho e com fibras de vidro pultrudadas apresentam boa concordância com o modelo simplificado rígido-plástico da norma ABNT NBR 16935 (2021). Particularmente para o caso do concreto com fibras de aço com gancho, não foi necessária a proposição de um novo modelo constitutivo devido à proximidade entre as tenacidades proporcionadas pelo modelo rígido-plástico e experimental, indicada na Tabela 62, na qual são apresentados os resultados das tenacidades obtidos na modelagem numérica com os três modelos constitutivos analisados: rígido-plástico, linear e o proposto. O erro apresentado na Tabela 62 foi determinado em relação à tenacidade experimental, conforme a equação (7.3):

$$Erro = \left| \frac{A_{exp} - A_{num}}{A_{exp}} \right| \cdot 100 \quad (7.3)$$

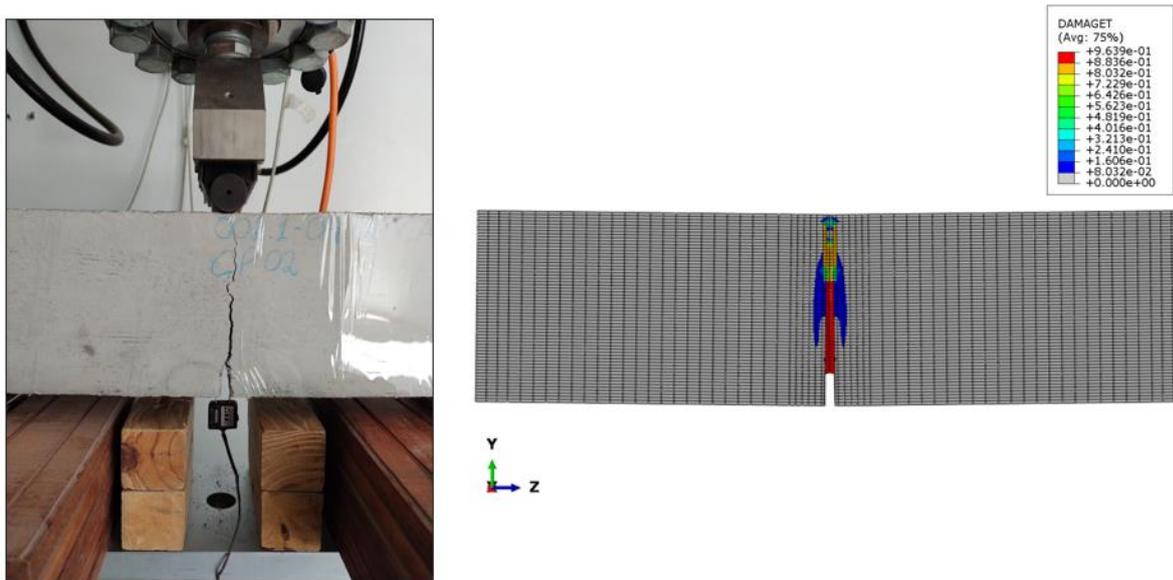
No caso dos traços com fibras de aço corrugadas, os modelos constitutivos rígido-plástico e linear superestimaram, em média, 27% e 60%, respectivamente, a tenacidade do material quando comparados com a tenacidade obtida nos ensaios. Para o concreto reforçado com fibras de vidro filamentadas, esses valores são ainda maiores, de 55% e 85% para os modelos rígido-plástico e linear, respectivamente.

Para o concreto reforçado com fibras poliméricas de ambos os tipos, os modelos constitutivos da norma ABNT NBR 16935 (2021) – linear e rígido-plástico – mostraram-se coerentes apenas no trecho após a queda de carga observada quando o limite de proporcionalidade é atingido. Em outras palavras, os modelos normatizados não acompanham o trecho ascendente inicial até o limite de proporcionalidade ser atingido nos traços com fibras poliméricas, subestimando a tenacidade do concreto em alguns casos.

Em geral, o modelo linear superestimou (com erros maiores que 10%) a tenacidade do concreto de todos os traços investigados, enquanto o modelo rígido-plástico subestimou a tenacidade dos traços com fibras de aço corrugadas e de vidro filamentada, fatos que podem levar a dimensionamentos errôneos e não confiáveis de elementos estruturais. Essas observações sugerem que os modelos constitutivos da norma técnica não são adequados, em alguns casos, para o concreto reforçado com fibras investigado no escopo dessa pesquisa.

O modelo proposto apresentou ótima concordância com os resultados experimentais para todas as fibras, nas três frações volumétricas estudadas. Particularmente nos traços com fibras de vidro filamentadas e poliméricas (torcidas e monofiladas), o modelo proposto acompanhou, inclusive, a queda de carga após o limite de proporcionalidade ser atingido. Na Figura 174, é apresentado o aspecto de fissuração nos experimentos e no modelo numérico por meio da variável de dano.

Figura 174. Aspecto da fissuração experimental e numérico (CMOD₄ = 3,50 mm).



Fonte: Autoria própria.

Com exceção do traço 60-ACOCOR-1,00, os erros associados ao modelo constitutivo proposto foram inferiores a 10%. Os menores erros correspondem aos traços com fibras poliméricas, cuja magnitude não atinge 2%, e os maiores erros são referentes aos traços com fibras de aço corrugada e fibra de vidro filamentada. Em geral, infere-se que o comportamento do concreto reforçado com fibras obtido no modelo numérico apresentou boa concordância com o comportamento observado durante os experimentos.

Tabela 62. Comparação entre as tenacidades dos modelos do Grupo 1.

Traço	A_{exp} [N/mm]	$A_{num,RP}$ [N/mm]	Erro	$A_{num,linear}$ [N/mm]	Erro	$A_{num,proposto}$ [N/mm]	Erro
60-ACOGAN-0,50	19,34	18,95	2,01%	27,92	44,39%	-	-
60-ACOGAN-0,75	30,49	29,15	4,42%	41,36	35,63%	-	-
60-ACOGAN-1,00	34,57	33,89	1,96%	48,51	40,31%	-	-
60-ACOCOR-0,50	9,54	6,53	31,60%	16,22	69,93%	9,98	4,54%
60-ACOCOR-0,75	12,48	8,91	28,66%	19,01	52,30%	11,56	7,38%
60-ACOCOR-1,00	15,32	11,93	22,15%	24,21	57,95%	13,38	12,71%
60-VIDFIL-0,50	3,66	1,32	63,91%	6,74	84,43%	3,90	6,62%
60-VIDFIL-0,75	4,70	2,04	56,67%	8,84	88,24%	4,87	3,59%
60-VIDFIL-1,00	6,75	3,55	47,41%	12,69	87,94%	6,49	3,90%
60-VIDPUL-0,50	13,28	12,91	2,82%	16,66	25,38%	13,31	0,21%
60-VIDPUL-0,75	17,86	18,15	1,64%	22,11	23,81%	17,30	3,15%
60-VIDPUL-1,00	19,67	20,26	3,05%	23,58	19,89%	18,89	3,94%
60-POLMON-0,50	5,96	5,56	6,72%	6,77	13,59%	6,02	1,11%
60-POLMON-0,75	8,07	7,97	1,32%	9,46	17,15%	8,04	0,41%
60-POLMON-1,00	10,94	10,86	0,77%	13,19	20,53%	10,94	0,02%
60-POLTOR-0,50	4,60	3,92	14,97%	5,25	14,09%	4,62	0,27%
60-POLTOR-0,75	6,08	5,71	5,98%	7,14	17,52%	6,13	0,80%
60-POLTOR-1,00	8,31	8,18	1,53%	9,85	18,64%	8,16	1,77%

Notas:

A_{exp} : tenacidade experimental

$A_{num,RP}$: tenacidade numérica correspondente ao modelo rígido-plástico

$A_{num,linear}$: tenacidade numérica correspondente ao modelo linear

$A_{num,proposto}$: tenacidade numérica correspondente ao modelo proposto

Fonte: Autoria própria.

7.3.2 Grupo 2

De forma análoga ao Grupo 1, as curvas tensão-CMOD obtidas com a modelagem numérica dos traços do Grupo 2 estão apresentadas na Figura 175 para o concreto reforçado com fibras de aço com gancho, na Figura 176 para o concreto reforçado com fibras de vidro filamentadas e na Figura 177 para o concreto reforçado com fibras

poliméricas monofiladas. Os valores das tenacidades obtidos com cada modelo constitutivo para cada traço do grupo 2 estão apresentados na Tabela 63.

Tabela 63. Comparação entre as tenacidades dos modelos do Grupo 2.

Traço	A_{exp} [N/mm]	$A_{num,RP}$ [N/mm]	Erro	$A_{num,linear}$ [N/mm]	Erro	$A_{num,proposto}$ [N/mm]	Erro
90-ACOGAN-0,50	13,85	8,59	37,94%	21,33	54,03%	-	-
90-ACOGAN-0,75	19,98	12,17	39,07%	33,43	67,33%	-	-
90-ACOGAN-1,00	31,50	22,65	28,12%	50,27	59,56%	-	-
90-VIDFIL-0,50	3,66	1,32	63,91%	6,74	84,43%	3,90	6,62%
90-VIDFIL-0,75	4,70	2,04	56,67%	8,84	88,24%	4,87	3,59%
90-VIDFIL-1,00	6,75	3,55	47,41%	12,69	87,94%	6,49	3,90%
90-POLMON-0,50	5,54	5,30	4,39%	6,04	8,99%	5,70	2,94%
90-POLMON-0,75	10,75	11,30	5,13%	12,26	14,03%	10,45	2,83%
90-POLMON-1,00	13,08	13,86	5,92%	13,60	3,97%	11,82	9,67%

Notas:

A_{exp} : tenacidade experimental

$A_{num,RP}$: tenacidade numérica correspondente ao modelo rígido-plástico

$A_{num,linear}$: tenacidade numérica correspondente ao modelo linear

$A_{num,proposto}$: tenacidade numérica correspondente ao modelo proposto

Fonte: Autoria própria.

Os modelos constitutivos propostos para o concreto reforçado com fibras de vidro em filamento e com fibras poliméricas monofiladas apresentaram bons resultados com o Grupo 2, com diferenças de tenacidade inferiores a 10% em relação ao experimental. Deve-se destacar que o modelo rígido-plástico também proporcionou tenacidades levemente diferentes daquelas obtidas nos experimentos para as três frações volumétricas analisadas. O modelo linear, por outro lado, superestimou consideravelmente a tenacidade proporcionada pelas fibras, principalmente nos traços com fibras de vidro.

Figura 175. Curvas numéricas tensão-CMOD do concreto reforçado com fibras de aço com gancho do Grupo 2.

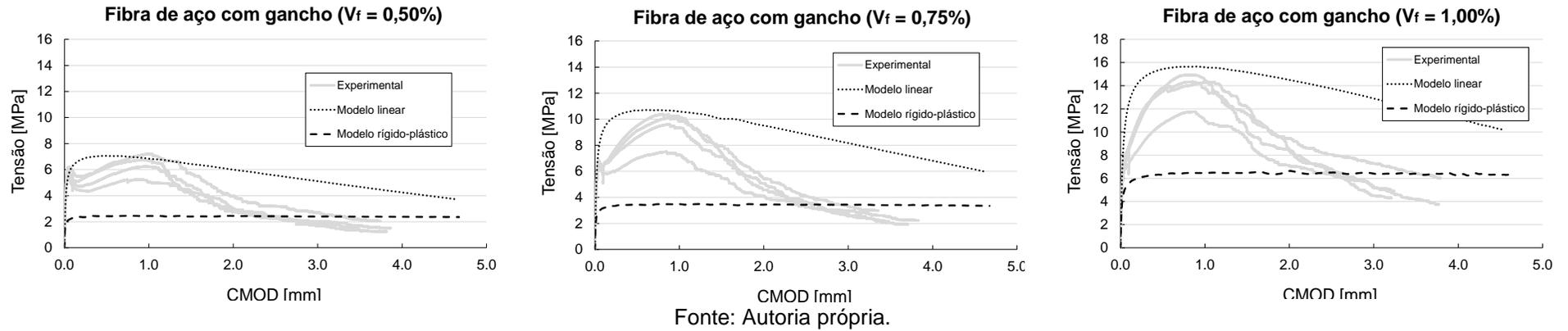


Figura 176. Curvas numéricas tensão-CMOD do concreto reforçado com fibras de vidro filantadas do Grupo 2.

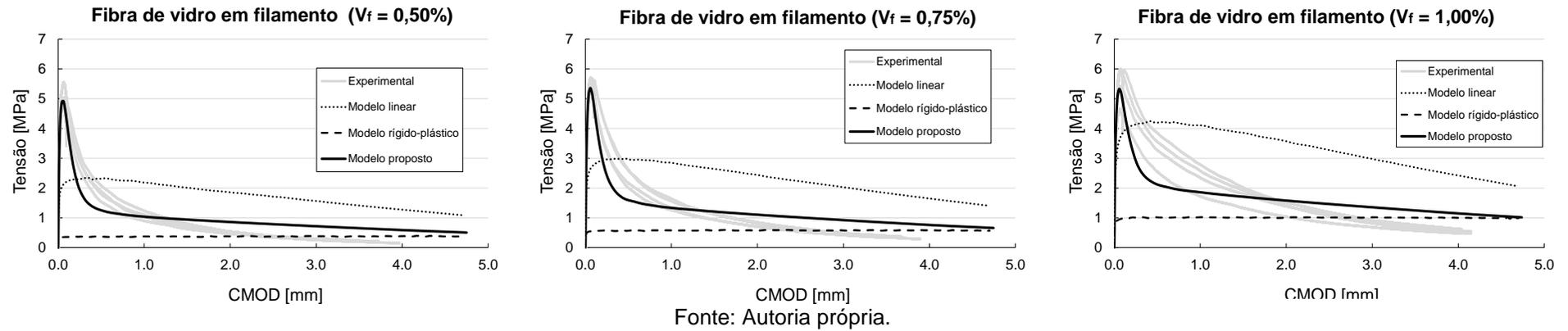
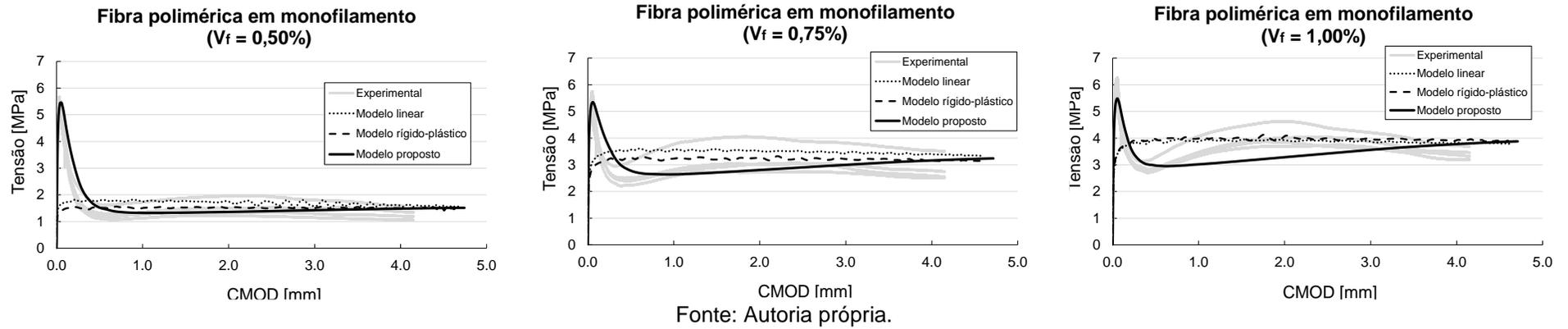
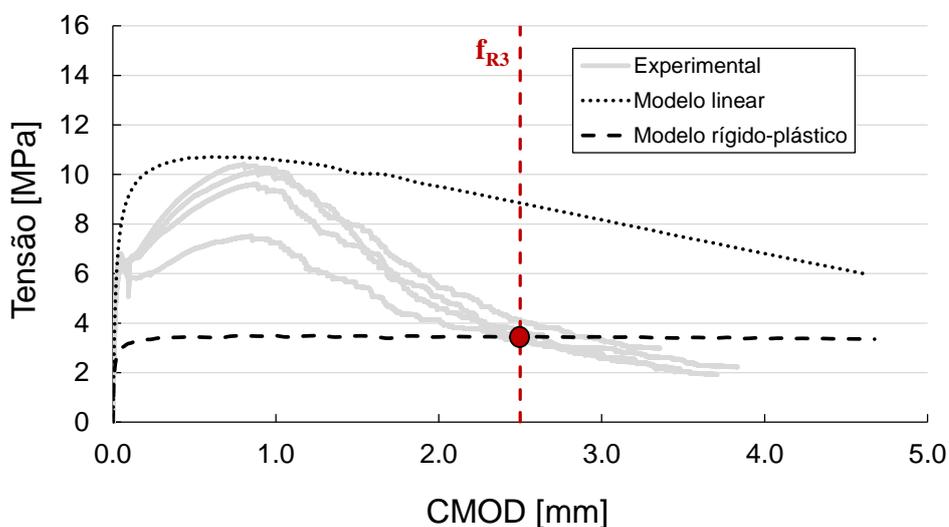


Figura 177. Curvas numéricas tensão-CMOD do concreto reforçado com fibras poliméricas monofiladas do Grupo 2.



Diferentemente do comportamento observado no Grupo 1, o modelo rígido-plástico apresentou grandes diferenças de tenacidade em relação ao observado nos experimentos nos traços com fibras de aço com gancho, com diferenças que atingem valores próximos de 40%. Esse comportamento ocorre devido à rápida queda de resistência observada nos ensaios após o corpo de prova atingir a tensão máxima pós-fissuração, que ocorre em torno de uma abertura de fissura próxima de $CMOD_1 = 1,50$ mm. Uma vez que o modelo rígido-plástico é definido apenas em função de f_{R3} , tem-se uma redução significativa na tenacidade proporcionada por esse modelo. Esse comportamento pode ser observado na Figura 178, na qual é apresentada a interseção entre o modelo rígido-plástico e os resultados experimentais na região de $CMOD_3 = 2,50$ mm, demonstrando a coerência do modelo numérico desenvolvido. Conforme dito anteriormente, uma possível explicação para esse comportamento é a probabilidade de ruptura das fibras em uma matriz de alta resistência. No entanto, ensaios de arrancamento devem ser realizados para verificar essa hipótese.

Figura 178. Interseção entre os resultados experimentais e o modelo rígido-plástico (traço 90-ACOGAN-0,75).



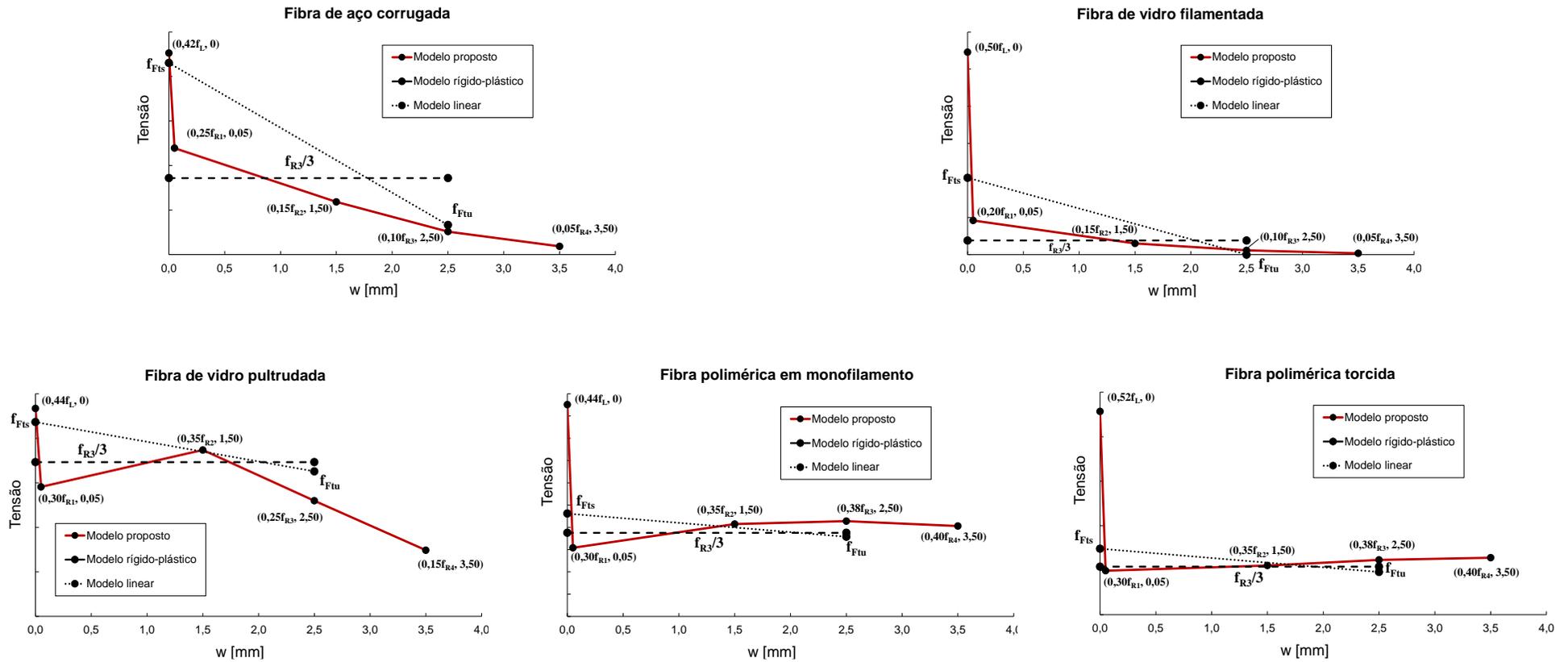
Fonte: Autoria própria.

7.4 MODELOS CONSTITUTIVOS

Os resultados e discussões apontados no item anterior sugerem que os modelos constitutivos da ABNT NBR 16935 (2021) não são adequados para o concreto de alta resistência reforçado com diferentes tipos de fibra, uma vez que a tenacidade numérica obtida com esses modelos foi significativamente diferente da tenacidade

obtida nos experimentos. Nesse sentido, modelos constitutivos mais fiéis aos comportamentos observados nos experimentos são propostos para representar o comportamento pós-fissuração do CARRF. A validação do modelo numérico para ambos os grupos analisados no contexto dessa pesquisa (Grupo 1 e Grupo 2) sugere que o modelo constitutivo à tração do concreto reforçado com fibras deve ser definido em função do tipo de fibra utilizada como reforço. Os modelos constitutivos propostos são apresentados na Figura 179. Em cada uma delas, é apresentado também os modelos constitutivos rígido-plástico e linear para comparação.

Figura 179. Modelos constitutivos propostos na tração para cada tipo de fibra.



Fonte: Autoria própria.

7.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento de um modelo numérico em elementos finitos para obter a curva tensão-abertura de fissuras na tração por análise inversa para o concreto de alta resistência reforçado com fibras. O modelo numérico desenvolvido foi validado frente aos resultados experimentais dos ensaios de flexão, apresentando boa concordância.

Em geral, a diferença entre a tenacidade obtida nos experimentos e pelo modelo numérico foi inferior a 10% e modelos constitutivos foram propostos para o concreto reforçado com fibras de aço corrugadas, fibras de vidro pultrudada e filamentadas, e fibras poliméricas monofiladas e torcidas. No caso da fibra de aço com gancho, o modelo rígido-plástico apresentou boa concordância com os resultados experimentais no caso do Grupo 1, em que a resistência à compressão do concreto é próxima de 60 MPa. Para os concretos mais resistentes do Grupo 2, o mesmo modelo apresentou diferenças significativas, não sendo recomendado sua utilização.

O modelo linear superestimou a tenacidade em todos os traços analisados, e o modelo rígido-plástico proporcionou tenacidade próxima a experimental dos traços com fibras poliméricas, embora o modelo não seja capaz de representar adequadamente o comportamento pós-fissuração do concreto reforçado com este tipo de fibra.

Vista a baixa representatividade dos modelos constitutivos da ABNT NBR 16935 (2021) para o concreto de alta resistência reforçado com fibras analisadas nessa pesquisa, novos modelos constitutivos foram propostos para representar o comportamento pós-fissuração do material, apresentando ótima concordância com os resultados experimentais.

8

Conclusões finais

8.1 CONCLUSÕES GERAIS

Esta pesquisa apresentou o comportamento mecânico do concreto de alta resistência reforçado com diferentes tipos de fibra divididos em dois grupos: Grupo 1 ($f_c \approx 60$ MPa) e Grupo 2 ($f_c \approx 90$ MPa). O Grupo 1 contempla seis tipos diferentes de fibra, divididos em três categorias conforme o material da fibra: fibra de aço com gancho, fibra de aço corrugada, fibra de vidro filamentada, fibra de vidro pultrudada, fibra polimérica monofilada e fibra polimérica torcida. O Grupo 2, por sua vez, contempla apenas três tipos de fibra: fibra de aço com gancho, fibra de vidro filamentada e fibra polimérica monofilada. Cada uma dessas fibras foi estudada em três frações volumétricas (V_f) diferentes (0,50%, 0,75% e 1,00%), totalizando 29 traços no programa experimental (incluindo os traços de referência – sem fibras). Esse delineamento permitiu, portanto, avaliar a influência do tipo e do teor de fibra sobre o CARRF.

O comportamento mecânico do concreto de alta resistência reforçado com fibras, no âmbito desta pesquisa, abrangeu solicitações de compressão e tração na flexão.

O comportamento na compressão foi avaliado por meio de ensaios de compressão por controle de deslocamento para a obtenção da curva tensão-deformação completa, enquanto o comportamento na flexão foi investigado a partir de ensaios de flexão em três pontos para a determinação das resistências residuais em conformidade com a ABNT NBR 16940 (2021). Os resultados experimentais dos ensaios de flexão foram utilizados para o desenvolvimento de um modelo numérico em elementos finitos para a obtenção do modelo constitutivo à tração por análise inversa.

As conclusões obtidas a partir de cada objetivo definido nesta pesquisa são apresentadas e discutidas separadamente.

- ✓ **Determinar a influência do teor e do tipo de fibra sobre o comportamento mecânico do concreto de alta resistência submetido à compressão e suas propriedades, como resistência, módulo de elasticidade, deformação de pico, tenacidade e resistência residual.**

A influência do teor e do tipo de fibra sobre o comportamento mecânico na compressão é apresentada no Capítulo 5. Devido à elevada rigidez necessária para a máquina para a obtenção do comportamento pós-pico dos traços do Grupo 2, que contemplou corpos de prova com resistência à compressão superando 100 MPa, não foi possível analisar o comportamento pós-pico com precisão para esse grupo. Logo, propriedades como tenacidade e resistência residual são discutidas apenas para o Grupo 1.

No caso do Grupo 1, a adição de fibras de aço com gancho ao concreto aumentou a resistência à compressão do material a partir da fração volumétrica de 0,75%, enquanto fibras de aço corrugadas reduziram a resistência nas frações volumétricas de 0,50% e 1,00%. As fibras de vidro filamentadas e pultrudadas e as fibras poliméricas em monofilamento também reduziram significativamente a resistência à compressão do concreto. No entanto, para esses três tipos de fibra, não foram observadas diferenças significativas (estatisticamente) entre os traços com diferentes teores de fibra. A adição de fibras poliméricas torcidas aumentou significativamente a resistência à compressão do material nos três teores analisados. Conclui-se, portanto, que a adição de fibras de aço com gancho e

polimérica torcida aumentam a resistência à compressão do concreto, enquanto as fibras de vidro filamentadas e pultrudadas, de aço corrugadas e poliméricas monofiladas reduzem a resistência à compressão. Um comportamento muito similar também foi observado para os traços do Grupo 2, que contemplam fibras de aço com gancho, fibras de vidro filamentadas e fibras poliméricas monofiladas.

Em geral, a adição de fibras não afetou expressivamente o módulo de elasticidade quando comparado ao concreto sem fibras para o Grupo 1. Além disso, para um mesmo tipo de fibra, o módulo de elasticidade do concreto sofreu pequenas variações, evidenciando uma pequena (senão desprezível) influência da fração volumétrica da fibra sobre esse parâmetro. Comparando-se os resultados experimentais e teóricos estimados pela expressão da ABNT NBR 6118 (2023), a maioria dos resultados experimentais permaneceram dentro de uma faixa de variação de 15% em relação ao valor teórico, com a maioria sendo superestimados pela norma brasileira. No caso do Grupo 2, o efeito da adição de fibras sobre o módulo de elasticidade do concreto foi mais expressivo para as três fibras investigadas. Em todos os casos, o módulo de elasticidade do CARRF foi maior que o traço de referência. Ótimas correspondências entre os valores teóricos determinados pela ABNT NBR 6118 (2023) e os valores experimentais foram observados para o concreto reforçado com fibras de aço e de vidro.

No Grupo 1, com exceção do caso das fibras poliméricas, a adição de fibras ao concreto aumentou a deformação de pico (deformação associada à tensão máxima no corpo de prova) quando comparado ao concreto sem fibras, com destaque para as fibras de aço e de vidro filamentadas, com valores maiores correspondentes às maiores frações volumétricas. Fibras de vidro pultrudadas e fibras poliméricas, por outro lado, reduziram a deformação de pico, com valores menores correspondentes às maiores frações volumétricas. Para o Grupo 2, a adição de fibras aumentou a deformação de pico, independentemente do tipo de fibra, com as maiores deformações observadas para as fibras de aço com gancho.

A tenacidade na compressão, definida como a área sob a curva tensão-deformação até a curva atingir a deformação de 1,0%, é claramente influenciada

pela adição de fibras. Em geral, quanto maior a fração volumétrica de fibras, maior é a tenacidade do concreto, independentemente do tipo de fibra. As maiores tenacidade foram observadas para as fibras de aço, seguidas pelas fibras de vidro e fibras poliméricas.

De modo similar à tenacidade, a resistência residual na compressão (determinada no contexto desta pesquisa como a resistência associada à deformação de 1,0%) é diretamente proporcional ao teor de fibras: quanto maior o teor, maior a resistência residual. As fibras de aço proporcionaram as maiores resistências residuais, seguidas pelas fibras de vidro e fibras poliméricas. No entanto, deve-se destacar que a fibra de vidro filamentada e a fibra polimérica torcida, numa fração volumétrica de 0,50%, proporcionaram uma resistência residual menor quando comparada à resistência residual do concreto sem fibras.

- ✓ **Determinar a influência do teor e do tipo de fibra sobre o comportamento mecânico do concreto de alta resistência na flexão e suas propriedades, como limite de proporcionalidade e resistências residuais.**

A influência do teor e do tipo de fibra sobre o comportamento do concreto de alta resistência reforçado com fibras é apresentada no Capítulo 6. O limite de proporcionalidade (f_L) é pouco influenciado pela fração volumétrica de fibras, com diferenças significativas (estatisticamente) observadas entre frações volumétricas de fibras de aço com gancho e fibras poliméricas monofiladas, no caso do Grupo 1. Para o Grupo 2, apenas o teor de fibras de aço com gancho afetou significativamente o limite de proporcionalidade. As análises estatísticas também indicaram diferenças significativas entre os traços com diferentes tipos de fibra para a mesma fração volumétrica sobre o limite de proporcionalidade: para $V_f = 1,00\%$, por exemplo, as fibras de aço apresentaram os maiores valores para o limite de proporcionalidade, seguidas pelas fibras de vidro e fibras poliméricas, sendo estatisticamente equivalentes o limite de proporcionalidade das fibras de mesmo material. Dessa forma, infere-se que a adição de fibras pode afetar o limite de proporcionalidade.

As resistências residuais ($f_{R,i}$) são diretamente proporcionais à fração volumétrica de fibras, independentemente do material e tipo de fibra. As maiores resistências residuais foram observadas para as fibras de aço com gancho, seguidas pelas fibras de vidro pultrudadas e fibras de aço corrugadas, fibras poliméricas e fibras de vidro filamentadas. Estatisticamente, a influência do teor de fibra é mais pronunciada para o Grupo 2, onde diferenças significativas foram observadas pelo teste de Tukey. A tenacidade determinada como a área sob a curva tensão-CMOD aumenta conforme se eleva a fração volumétrica de fibras. Esse comportamento foi observado para ambos os grupos estudados. Além disso, foi observado que as condições exigidas pela norma técnica para a utilização de fibras em aplicações estruturais devem ser revistas para o concreto de alta resistência reforçado com fibras.

- ✓ **Propor modelos constitutivos que representem o comportamento do concreto de alta resistência reforçado com fibra na compressão para cada fibra utilizada.**

O modelo constitutivo para cada tipo de fibra estudada do Grupo 1, apresentado no Capítulo 5, foi elaborado a partir do modelo de Carreira e Chu, no qual a deformação de pico (ϵ_{c0}) e o parâmetro β que controla o ramo pós-pico da curva tensão-deformação foram calibrados por meio do índice de reforço (RI). O modelo ajustado apresentou ótima concordância com os resultados experimentais e pode ser utilizado com bastante relevância para estimar a ductilidade e tenacidade do concreto de alta resistência reforçado com diferentes tipos de fibras para a faixa de resistência à compressão investigada.

- ✓ **Propor modelos constitutivos que representem o comportamento do concreto de alta resistência reforçado com fibra na tração por meio de análise inversa, validados por modelagem numérica.**

Os modelos constitutivos na tração para cada tipo de fibra foram propostos no Capítulo 7 por meio de uma análise inversa realizada com modelagem numérica.

O modelo numérico desenvolvido apresentou boa concordância com os resultados experimentais em termos de tenacidade e se mostrou como uma ferramenta útil para simulações numéricas do concreto reforçado com fibras. Os modelos constitutivos propostos são modelos multilineares e simples de serem utilizados para fins de dimensionamento. As análises realizadas também demonstraram que os modelos simplificados da norma técnica podem superestimar (no caso do modelo linear) ou subestimar (no caso do modelo rígido-plástico) a tenacidade CARRF, e que não representam o comportamento do concreto reforçado com diferentes tipos de fibra, como de vidro e poliméricas.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade à pesquisa acerca do concreto de alta resistência reforçado com fibras (CARRF) e preencher lacunas observadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- avaliar a aplicabilidade dos modelos constitutivos propostos na tração e compressão comparando-os com resultados experimentais da literatura;
- realizar ensaios de arrancamento (ensaios do tipo *pull-out*) das fibras analisadas em matrizes de concreto de alta resistência para investigar o processo de arrancamento de fibras, possibilitando a modelagem numérica da interface fibra-matriz;
- revisar as condições exigidas pela norma ABNT NBR 16935 (2021) para a utilização de fibras em aplicações estruturais no concreto de alta resistência reforçado com fibras;
- realizar ensaios de compressão com deformação controlada em circuito fechado (*closed-loop*) para comparar os resultados com a metodologia de ensaio utilizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABADEL, A. *et al.* Mechanical properties of hybrid fibre-reinforced concrete - Analytical modelling and experimental behavior. **Magazine of Concrete Research**, v. 68, n. 16, p. 823–843, 1 ago. 2016.

ABBAS, Y. M.; HUSSAIN, L. A.; KHAN, M. I. Constitutive Compressive Stress–Strain Behavior of Hybrid Steel-PVA High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 1, 2022.

ABBASS, W.; IQBAL KHAN, M. Experimental and numerical investigation of flexural behavior of hybrid fiber reinforced high strength incorporating binary and ternary blend of ultra fines. **Structures**, v. 42, n. June, p. 53–64, 2022.

ABDULHAMEED, A. A. *et al.* The Behavior of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Elements: A New Stress-Strain Model Using an Evolutionary Approach. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 12, n. 4, 2022.

AFSHOON, I.; MIRI, M.; MOUSAVI, S. R. Evaluating the flexural behavior of green copper slag-contained steel fiber reinforced SCC beams with/without initial notches. **Construction and Building Materials**, v. 395, n. January, p. 132316, 2023.

ALGUHI, H. A.; ELSAIGH, W. A. Development of tensile stress-strain relationship for high-strength steel fiber reinforced concrete. **International Journal of Civil Engineering and Environmental Engineering**, v. 10, n. 2, p. 190–196, 2016.

ALHASSAN, M. *et al.* Estimation of the fracture parameters of macro fiber-reinforced concrete based on nonlinear elastic fracture mechanics simulations. **Results in Engineering**, v. 15, n. June, p. 100539, 2022.

ALMEIDA, R. L. J. DE *et al.* Assessing the bearing capacity of Crestbond shear connectors to concrete pry-out. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 16, n. 1, p. 1–19, 2023.

ALMEIDA, R. L. J. DE; PARSEKIAN, G.; CARNIO, M. A. Concreto reforçado com fibras: projeto de fibras no ELU. **CONCRETO & Construções**, v. XLIX, n. 105, p. 90–97, 2022.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Report on fiber-reinforced concrete (ACI 544.1R-96)**. ACI Committee 544. Farmington Hills, USA, 2009.

_____. **Report on high-strength concrete (ACI 363.R-10)**. ACI Committee 363. Farmington Hills, USA, 2010.

_____. **Report on measuring mechanical properties of hardened fiber-reinforced concrete (ACI 544.9R-17)**. ACI Committee 544. Farmington Hills, USA, 2017.

_____. **State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (ACI 440R-96)**. ACI Committee 440. Farmington Hills, USA, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1399**: Standard test method for obtaining average residual-strength of fiber-reinforced concrete. Philadelphia, 2015. 6p.

_____. **ASTM C1550**: Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel). Philadelphia, 2020. 14p.

_____. **ASTM C1609**: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). Philadelphia, 2019. 9p.

AMIN, A. *et al.* Material characterisation of macro synthetic fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 124–133, 2017.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE 83515**: hormigones con fibras – determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción – método Barcelona. España, 2010. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023. 242p.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017. 20p.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015. 3p.

_____. **NBR 16935**: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento. Rio de Janeiro, 2021. 27p.

_____. **NBR 16938**: Concreto reforçado com fibras - Controle da qualidade. Rio de Janeiro, 2021. 12p.

_____. **NBR 16939**: Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à fissuração e residuais à tração por duplo puncionamento - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021. 6p.

_____. **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. 11p.

_____. **NBR 16941**: Fibras de vidro álcali-resistentes (AR) para concreto e argamassa - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021. 17p.

_____. **NBR 16942**: Fibras poliméricas para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021. 20p.

AYUB, T.; SHAFIQ, N.; KHAN, S. U. Compressive Stress-Strain Behavior of HSFRC Reinforced with Basalt Fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 4, abr. 2016.

- AZMEE, N. M.; SHAFIQ, N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 9, 2018.
- BABAFEMI, A. J.; BOSHOFF, W. P. Pull-out response of macro synthetic fibre from concrete matrix: Effect of loading rate and embedment length. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 590–599, 2017.
- BARROS, J. A. O. *et al.* Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 38, n. 275, p. 47–56, 2005.
- BARROS, J. A. O.; FIGUEIRAS, J. A. Flexural Behavior of SFRC: Testing and Modeling. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 11, n. 4, p. 331–339, nov. 1999.
- BERNARD, E. S. Influence of test machine control method on flexural performance of fiber reinforced concrete beams. **Journal of ASTM International**, v. 6, 2009.
- BENCARDINO, F. *et al.* Stress-Strain Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete in Compression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 20, n. 3, p. 255–263, 2008.
- BENTUR, A. .; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. [s.l.] Taylor & Francis, 2007.
- BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.
- BHARGAVA, P.; SHARMA, U. K.; KAUSHIK, S. K. **Compressive Stress-Strain Behavior of Small Scale Steel Fibre Reinforced High Strength Concrete Cylinders***Journal of Advanced Concrete Technology*. [s.l: s.n.].
- BLANCO, A. *et al.* Application of constitutive models in European codes to RC-FRC. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 246–259, 2013.
- BLASI, G.; LEONE, M. Inverse analysis-based model for the tensile behaviour of fibre-reinforced concrete with manufactured and waste tyres recovered fibres. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, n. June, p. e01297, 2022.
- BLAZY, J.; DROBIEC, Ł.; WOLKA, P. Flexural tensile strength of concrete with synthetic fibers. **Materials**, v. 14, n. 16, 2021.
- BONNET-MASIMBERT, P. A. *et al.* Study of modifications on the chemical and mechanical compatibility between cement matrix and oil palm fibres. **Results in Engineering**, v. 7, n. July, p. 100150, 2020.
- BRANDT, A. M. **Cement-based composites: materials, mechanical properties and performance**. 2. ed. [s.l.] Taylor & Francis, 2009.
- BUTTIGNOL, T. E. T. *et al.* Design of reinforced concrete beams with steel fibers in the ultimate limit state. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 5, p.

997–1024, 2018.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: an introduction**. 10. ed. Hogoken: [s.n.].

CAMPIONE, B.; MINDESS, S.; ZINGONE, G. Compressive stress-strain behavior of normal and high-strength carbon-fiber concrete reinforced with steel spirals. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 1, p. 27–34, 1999.

CARNEIRO, J. A. *et al.* Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 46, p. 65–72, 2014.

CARNIO, M. A. **Propagação de Trinca por Fadiga do Concreto Reforçado com Baixos Teores de Fibra - Carnio**. [s.l: s.n.].

CARNOVALE, D.; VECCHIO, F. J. Effect of fiber material and loading history on shear behavior of fiber-reinforced concrete. **ACI Structural Journal**, v. 111, n. 5, p. 1235–1244, 2014.

CARREIRA, D. J.; CHU, K.-H. Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression. **ACI Journal**, 1985.

CARRILLO, J.; VARGAS, J. D.; ALCO CER, S. M. Model for estimating the flexural performance of concrete reinforced with hooked end steel fibers using three-point bending tests. **Structural Concrete**, v. 22, n. 3, p. 1760–1783, 2021.

CHEN, G. *et al.* Effects of novel multiple hooked-end steel fibres on flexural tensile behaviour of notched concrete beams with various strength grades. **Structures**, v. 33, n. May, p. 3644–3654, 2021.

CHEN, G. *et al.* Flexural Tensile Behavior of Single and Novel Multiple Hooked-End Steel Fiber-Reinforced Notched Concrete Beams. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 34, n. 6, p. 1–15, 2022.

CHENG, C. *et al.* Study on the time-dependent mechanical properties of glass fiber reinforced cement (GRC) with fly ash or slag. **Construction and Building Materials**, v. 217, p. 128–136, 2019.

Comisión Permanente del Hormigón (Ministerio de Fomento). **EHE-08: Instrucción del Hormigón Estructural**. 2008.

CONFORTI, A. *et al.* Comparing test methods for the mechanical characterization of fiber reinforced concrete. **Structural Concrete**, v. 19, n. 3, p. 656–669, 2018.

CONFORTI, A.; PLIZZARI, G. A.; ZERBINO, R. Vibrated and self-compacting fibre reinforced concrete: Experimental investigation on the fibre orientation. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 246, n. 1, 2017.

CUENCA, E. *et al.* A material-performance-based database for FRC and RC elements under shear loading. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 1, 2018.

DE LA FUENTE, A. *et al.* Design of Steel Fibre Reinforced Concrete Structures According to the Annex L of the Eurocode-2 2023. **Hormigón y Acero**, v. 74, p. 169–186, 2023.

DEL SAVIO, A. A. *et al.* Influence of Synthetic Fibers on the Flexural Properties of Concrete: Prediction of Toughness as a Function of Volume, Slenderness Ratio and Elastic Modulus of Fibers. **Polymers**, v. 15, n. 4, 2023.

DENG, F. *et al.* The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling. **Composite Structures**, v. 206, n. June, p. 693–712, 2018.

DENG, Z. *et al.* Characterisation of macro polyolefin fibre reinforcement in concrete through round determinate panel test. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 229–235, 2016.

DEUTSCHER BETON- UND BAUTECHNIK-VEREIN E.V – DBV. **Guide to Good Practice: Steel Fibre Concrete**. Berlin, Germany, 2001.

DI PRISCO, M. *et al.* **Eurocode 2 – Annex L –European Harmonized Standard for Steel Fibre Reinforced Concrete**. (Springer, Ed.)X RILEM-fib International Symposium on Fibre Reinforced Concrete. **Anais...**2021.

DI PRISCO, M.; COLOMBO, M.; DOZIO, D. Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: Principles, models and test validation. **Structural Concrete**, v. 14, n. 4, p. 342–361, 2013.

DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: New design perspectives. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 9, p. 1261–1281, 2009.

DOPKO, M. *et al.* Flexural performance evaluation of fiber-reinforced concrete incorporating multiple macro-synthetic fibers. **Transportation Research Record**, v. 2672, n. 27, p. 1–12, 2018.

DOYON-BARBANT, J.; CHARRON, J. P. Impact of fibre orientation on tensile, bending and shear behaviors of a steel fibre reinforced concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 6, p. 1–16, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651**: Test method for metallic fiber-reinforced concrete – Measuring the flexural tensile strength (limite of proporcionality (LOP), residual), CEN, London, 2007. 15p.

EZELDIN, A. S.; BALAGURU, P. N. Normal- and high-strength fiber-reinforced concrete under compression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 4, n. 170, p. 415–429, 1992.

FANELLA, D. A.; NAAMAN, A. E. Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 82, n. 4, p. 475–483, 1985.

FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DO BETÃO (FIB). **Model Code 2010: final draft**. Lausanne, Switzerland, 2011. 656p.

FENG, H. *et al.* Mechanical behaviour of micro-fine steel fibre reinforced sulphoaluminate cement composite. **Construction and Building Materials**, v. 170, p. 91–100, 2018.

FENG, J. *et al.* Uniaxial compressive behavior of hook-end steel and macro-polypropylene hybrid fibers reinforced recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 304, 18 out. 2021.

FIGUEIREDO A. D.; CECCATO M. R. Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. **Materials Research**, v. 18, n. 6, p. 1284-1290, 2015

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2011.

GALEOTE, E. *et al.* Statistical analysis of an experimental database on residual flexural strengths of fiber reinforced concretes: Performance-based equations. **Structural Concrete**, v. 23, n. 5, p. 3140–3153, 2022.

GAO, D. *et al.* An inverse analysis method for multi-linear tensile stress-crack opening relationship of 3D/4D/5D steel fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 309, n. 97, p. 125074, 2021.

GAO, D.; ZHANG, L. Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 126–136, 2018.

GARCEZ, E. O.; KABIR, M. I.; MACLEOD, A. Self-Compacting Concrete Reinforced with Twisted-Bundle Macro-Synthetic Fiber. **Applied Sciences**, p. 16, 2019.

GŁODKOWSKA, W.; LASKOWSKA-BURY, J. Proposition for Determining the Residual Strength of Fiber-Reinforced Cement Composite. **Materials**, v. 15, p. 18, 2022.

GOMES, R. F.; DIAS, D. P.; SILVA, F. DE A. Determination of the fracture parameters of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 107, n. March, p. 102568, 2020.

GONDOKUSUMO, G. S. *et al.* Unified equations to predict residual flexural tensile strength of lightweight steel fiber-reinforced concrete. **Structural Concrete**, v. 22, n. 4, p. 2202–2222, 2021.

GRAYBEAL, B. A. *et al.* Advancing Ultra-High- Performance Concrete. **Concrete International**, v. 41, n. 4, p. 41–45, 2019.

GUERRERO, P.; NAAMAN, A. E. Effect of mortar fineness and adhesive agents on the pull-out response of steel fibers. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 1, p. 12-20, 2000.

GULER, S.; ÖKER, B.; AKBULUT, Z. F. Workability, strength and toughness properties

of different types of fiber-reinforced wet-mix shotcrete. **Structures**, v. 31, n. October 2020, p. 781–791, 2021.

GUO, Y. Q.; WANG, J. Y.; GU, J. BEN. Nonlinear Inverse Analysis for Predicting the Tensile Properties of Strain-Softening and Strain-Hardening UHPFRC. **Materials**, v. 15, n. 9, p. 1–20, 2022.

HALVAEI, M.; JAMSHIDI, M.; LATIFI, M. Investigation on pullout behavior of different polymeric fibers from fine aggregates concrete. **Journal of Industrial Textiles**, v. 45, n. 5, p. 995–1008, 2016.

HASHIM, D. T.; HEJAZI, F.; LEI, V. Y. Simplified Constitutive and Damage Plasticity Models for UHPFRC with Different Types of Fiber. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 14, n. 1, 2020.

HE, S.; YANG, E. H. Non-normal distribution of residual flexural strengths of steel fiber reinforced concretes and its impacts on design and conformity assessment. **Cement and Concrete Composites**, v. 123, n. March, p. 104207, 2021.

HSU, L. S.; HSU, C.-T. T. Stress-strain behavior of steel-fiber high-strength concrete under compression. **ACI Structural Journal**, v. 91, n. 4, p. 448–457, 1994.

HU, H. *et al.* Mechanical properties of SFRC using blended Recycled Tyre Steel Cords (RTSC) and Recycled Tyre Steel Fibres (RTSF). **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 553–564, 2018.

JOHNSTON, C. D. **Fiber-reinforced cements and concretes**. New York: [s.n.].

JUNIOR, J. *et al.* Workability and flexural properties of fibre-reinforced geopolymer using different mono and hybrid fibres. **Materials**, v. 14, n. 16, 2021.

KIM, D. J.; EL-TAWIL, S.; NAAMAN, A. E. **Correlation between single fiber pullout behavior and tensile response of FRC composites with high strength steel fiber**. Fifth international symposium on high performance fiber reinforced cementitious composites. **Anais...**2007.

KOENIG, A. *et al.* Flexural behaviour of steel and macro-PP fibre reinforced concretes based on alkali-activated binders. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 583–593, 2019.

KRAHL, P. A.; PEREIRA, M. F.; DALFRE, G. M.; SIQUEIRA, G. H. A novel approach to characterize the direct shear pullout behavior of single hooked steel fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 113, 2020.

LAKAVATH, C.; SURIYA PRAKASH, S.; DIRAR, S. Experimental and numerical studies on shear behaviour of macro-synthetic fibre reinforced prestressed concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 291, p. 123313, 2021.

LANTSOGHT, E. O. L. Database of shear experiments on steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. **Materials**, v. 16, n. 6, p. 1–36, 2019.

LARSEN, I. L.; THORSTENSEN, R. T. The influence of steel fibres on compressive

and tensile strength of ultra high performance concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 256, p. 119459, 2020.

LEE, H. P. *et al.* Derivation of complete stress-strain curve for SFTT-confined high-strength concrete in compression. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 46, n. 1, 2018a.

LEE, S. C.; OH, J. H.; CHO, J. Y. Compressive behavior of fiber-reinforced concrete with end-hooked steel fibers. **Materials**, v. 8, n. 4, p. 1442–1458, 2015.

LEE, S. J. *et al.* Effect of steel fibres on fracture parameters of cementitious composites. **Composite Structures**, v. 204, n. August, p. 658–663, 2018b.

LEE, S. J.; KIM, S. H.; WON, J. P. Bond-flexural behaviour of structural nano-synthetic fibre-reinforced cementitious composites. **Composite Structures**, v. 152, p. 20–33, 2016.

LEITE, A. M. **Avaliação do uso da macrofibra na composição de concreto para fins estruturais**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2018.

LEITE, A. M.; CASTRO, A. L. DE. Influence of the cementitious matrix on the behavior of fiber reinforced concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 3, p. 543–562, 2020.

LERCH, J. O. *et al.* The effect of mixing on the performance of macro synthetic fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 130–139, 2018.

LEUTBECHER, T.; REBLING, J. Predicting the postcracking strength of ultra-high performance fiber reinforced concrete by means of three-point bending tests according to EN 14651. **Structural Concrete**, v. 20, n. 6, p. 2081–2095, 2019.

LI, J. *et al.* Comparison of flexural property between high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete and steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 729–736, 2017.

LI, J. *et al.* Flexural toughness and evaluation method of steel fiber reinforced self-compacting lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122297, 2021.

LI, V. C. Large Volume, High-Performance Applications of Fibers in Civil Engineering. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 83, p. 660–686, 2002.

LIAO, W. C.; PERCEKA, W.; LIU, E. J. Compressive stress-strain relationship of high strength steel fiber reinforced concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 13, n. 8, p. 379–392, 1 ago. 2015.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; MELO FILHO, J. A. Compressive stress-strain behaviour of cement mortar-composites reinforced with short sisal fibre. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 38–46, 2014.

LÖFGREN, I. **Fibre-reinforced concrete for industrial construction - A fracture mechanics approach to material testing and structural analysis**. [s.l.] Chalmers

University of Technology, 2005.

LÖFGREN, I.; STANG, H.; OLESEN, J. F. Fracture properties of FRC determined through inverse analysis of wedge splitting and three-point bending tests. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 3, n. 3, p. 423–434, 2005.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

MALLICK, P. K. **Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

MALM, R. **Shear cracks in concrete structures subjected to in-plane stresses**. [s.l.] Royal Institute of Technology, 2006.

MANFREDI, R. P.; DE ANDRADE SILVA, F. Test Methods for the Characterization of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete: A Comparative Analysis. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 24, n. 3, p. 856–866, 2020.

MANFREDI, R. P.; DE ANDRADE SILVA, F.; CARDOSO, D. C. T. On Punching Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Slabs-on-Ground. **ACI Structural Journal**, v. 119, n. 4, p. 185–196, 2022.

MANSUR, M. A.; CHIN, M. S.; WEE, T. H. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 11, n. February, p. 21–29, 1999.

MANSUR, M. A.; WEE, T. H.; CHIN, M. S. **Derivation of the complete stress-strain curves for concrete in compression**. [s.l.: s.n.].

MARAHLA, R. H. AL; GARCIA-TAENGUA, E. Sensitivity of the Flexural Performance of Glass and Synthetic FRC to Fibre Dosage and Water / Cement Ratio . In: **RILEM Bookseries**. [s.l.: s.n.].

MARAR, K.; EREN, Ö.; YITMENA, I. Compression specific toughness of normal strength steel fiber reinforced concrete (NSSFRC) and high strength steel fiber reinforced concrete (HSSFRC). **Materials Research**, v. 14, n. 2, p. 239–247, 2011.

MARKOVIC, I. **High-Performance Hybrid-Fibre Concrete: Development and Utilisation**. [s.l.] Universiteit van Belgrado, 2006.

MATOS, L. M. P. *et al.* A new inverse analysis approach for predicting the fracture mode I parameters of fibre reinforced concrete. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 246, n. October 2020, p. 107613, 2021.

MEBARKIA, S.; VIPULANANDAN, C. Compressive behavior of glass-fiber-reinforced polymer concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 4, p. 91–105, 1992.

MEDEGHINI, F. *et al.* Steered fiber orientation: correlating orientation and residual tensile strength parameters of SFRC. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 55, n. 10, p. 1–18, 2022.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. [s.l.: s.n.].

MINEIRO, M. L. R. **Comportamento ao arrancamento de fibras de aço: ensaios experimentais, previsões analíticas e modelagem numérica**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2022.

MINEIRO, M. L. R.; MONTE, R.; MANZOLI, O. L.; BITENCOURT JUNIOR, L. A. G. An integrated experimental and multiscale numerical methodology for modeling pullout of hooked-end steel fiber from cementitious matrix. **Construction and Building Materials**, v. 344, 2022.

MOBASHER, B. **Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites**. Boca Raton: CRC Press, 2012.

MOBASHER, B.; BAKHSHI, M.; BARSBY, C. Backcalculation of residual tensile strength of regular and high performance fiber reinforced concrete from flexural tests. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 243–253, 2014.

MONETTI, D. H. *et al.* Long-term behavior of cracked fiber reinforced concrete under service conditions. **Construction and Building Materials**, v. 196, p. 649–658, 2019.

MONTE, R. **Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos**. Universidade de São Paulo, 2015.

MONTE, R. *et al.* Barcelona test as an alternative method to control and design fiber-reinforced concrete pipes. **ACI Structural Journal**, v. 113, n. 6, p. 1175–1184, 2016.

MONTE, R.; TOALDO, G. S.; DE FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. **Revista Materia**, v. 19, n. 2, p. 132–149, 2014.

NAAMAN, A. E. **Fibers with slip-hardening bond**. Third International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. **Anais...**1999.

NAAMAN, A. E. **Fiber reinforcements for concrete: looking back, looking ahead. Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB' 2000**, 2000.

NAAMAN, 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, 2003.

NAAMAN, A. E. Deflection-Softening and Deflection-Hardening FRC Composites: Characterization and Modeling. **ACI Special Publication**, v. 248, p. 53–66, 2007.

NAAMAN, A. E. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. In: **High-Performance Construction Materials: Science and Applications**. 1. ed. [s.l.] World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2008. p. 91–154.

NAAMAN, A. E. **Fiber Reinforced Cement and Concrete Composites**. First ed. [s.l.] Techno Press 3000, 2018.

NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 39, n. 5, p. 547–555, 2006.

NANA, W. S. A. *et al.* Behaviour of macro-synthetic fibers reinforced concrete: Experimental, numerical and design code investigations. **Structures**, v. 32, n. December 2020, p. 1271–1286, 2021.

NATARAJA, M. C.; DHANG, N.; GUPTA, A. P. Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, p. 383–390, 1999.

NINCE, A. A.; FIGUEIREDO, A. D.; BITTENCOURT, T. N. **Absorção e índice de vazios em concreto reforçado com fibra de polipropileno exposto a 400 graus C e 600 graus C**. V Simpósio da EPUSP sobre estruturas de concreto. **Anais...São Paulo**: 2003. Disponível em: <<https://bdpi.usp.br/item/001369892>>

NOUSHINI, A. *et al.* Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 454–475, 2018.

OETTEL, V.; SCHULZ, M.; HAIST, M. Empirical approach for the residual flexural tensile strength of steel fiber-reinforced concrete based on notched three-point bending tests. **Structural Concrete**, v. 23, n. 2, p. 993–1004, 2022.

OLIVEIRA, C. O. **Estudo numérico e experimental da distribuição das fibras de aço em vigas de UHPFRC**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2019.

OLIVEIRA JÚNIOR, L. A. **Ligação viga-pilar em elementos pré-moldados de concreto solidarizados por concreto reforçado com fibras de aço: análises estatística e dinâmica**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

OLIVEIRA JÚNIOR, L. Á. *et al.* Stress-strain curves for steel fiberreinforced concrete in compression. **Revista Matéria**, v. 15, n. 2, p. 260–266, 2010.

OTTER, D. E.; NAAMAN, A. E. Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete under Cyclic Loading. **ACI Materials Journal**, 1988.

OU, Y.-C. *et al.* Compressive Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete with a High Reinforcing Index. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 2, p. 207–215, fev. 2012.

OUYANG, X. *et al.* A critical review on compressive behavior and empirical constitutive models of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 323, n. February, p. 126572, 2022.

PAKRAVAN, H. R.; OZBAKKALOGLU, T. **Synthetic fibers for cementitious**

composites: A critical and in-depth review of recent advances. Construction and Building Materials Elsevier Ltd, , 20 maio 2019.

PEREIRA, M. M. **Avaliação da eficiência do ensaio barcelona para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras.** [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

PETRAUSKI, M. C. **Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto com conectores Crestbond.** [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2016.

POURBABA, M. *et al.* Effect of age on the compressive strength of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 402–410, 2018.

QIAN, S.; LI, V. C. Simplified inverse method for determining the tensile strain capacity of strain hardening cementitious composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 5, n. 2, p. 235–246, 2007.

RAMEZANI, A.; ESFAHANI, M. R. Effect of fiber hybridization on energy absorption and synergy in concrete. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 13, n. 6, p. 1338–1349, 2019.

RILEM TC 148-SSC. RILEM TC 148-SSC: Test methods for the strain-softening response of concrete - Strain softening of concret in uniaxial tension. v. 30, n. 30, p. 195–209, 1997.

ROSSI, P.; ACKER, P.; MALIER, Y. Effect of steel fibres at two stages: the material and the structure. **Materials and Structures**, v. 20, p. 436-439, 1987.

RUIZ, G. *et al.* Model for the compressive stress–strain relationship of steel fiber-reinforced concrete for non-linear structural analysis. **Hormigón y Acero**, v. 69, n. S1, p. 75–80, dez. 2018.

RYABCHIKOV, A. *et al.* The experimental investigation of the mechanical properties of steel fibre-reinforced concrete according to different testing standards. **Agronomy Research**, v. 18, n. Special Issue 1, p. 969–979, 2020.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras.** [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

SALVADOR, R. P.; DE FIGUEIREDO, A. D. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Revista Materia**, v. 18, n. 2, p. 1273–1285, 2013.

SALVADOR, R. P.; FERNANDES, J. F.; DE FIGUEIREDO, A. D. Avaliação do concreto reforçado com baixos teores de fibras para fins estruturais segundo a norma EN 14651-2007. **Revista Materia**, v. 20, n. 4, p. 961–974, 2015.

SANTOS, L. C. D. *et al.* Inverse analysis of constitutive models applied to steel fiber

reinforced concrete. **CILAMCE 2020. Proceedings of the XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC.**, p. 16–19, 2020.

SARZALEJO, A. G. *et al.* **Fibras como Elemento Estrutural para Reforço de Concreto.** , 2021.

SCHMIDT, M.; FEHLING, E. Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe, **Proceedings for International Symposium on Ultra-High Performance Concrete**, Kassel, Germany, 2004.

SENGUN, E. *et al.* The impact of specimen size and alteration of fiber configuration on the flexural performance of high-performance concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 68, n. February, p. 106142, 2023.

SHAFEI, B. *et al.* **State-of-the-art review of capabilities and limitations of polymer and glass fibers used for fiber-reinforced concrete.** **Materials**MDPI AG, , 2 jan. 2021.

SHAH, S. P. *et al.* Test method for measurement of the strain-softening behaviour of concrete under uniaxial compression Recommendations 1 . INTRODUCTION AND SCOPE RILEM TECHNICAL COMMITTEES RILEM TC 148-SSC: STRAIN SOFTENING OF CONCRETE - TEST METHODS FOR. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, v. 33, n. July 2000, p. 347–351, 2000.

SHAH, S. P.; CHOI, S.; JANSEN, D. C. Strain Softening of Concrete in Compression. **Proc. Fract. Mech. Concr. Struct**, v. 3, p. 1827–1841, 1994.

SHAO, Y.; BILLINGTON, S. L. Flexural performance of steel-reinforced engineered cementitious composites with different reinforcing ratios and steel types. **Construction and Building Materials**, v. 231, 20 jan. 2020.

SHI, X. *et al.* Constitutive behaviors of steel fiber reinforced concrete under uniaxial compression and tension. **Construction and Building Materials**, v. 233, 10 fev. 2020.

SHIN, J. **Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Precast Segmental Bridges: Flexural Behaviour and Joint Design.** [s.l: s.n.].

SIMULIA. **ABAQUS analysis user's manual.** Providence, USA, 2012.

SINGH, H. **Steel Fiber Reinforced Concrete Behavior, Modelling and Design.** [s.l: s.n.].

SKADINS, U.; CERVENKA, J. Lessons learnt from blind competition of shear behavior of fiber-reinforced concrete T-beam. **Structural Concrete**, p. 1–20, 2023.

SOMEH, A. K.; SAEKI, N. **Prediction for the stress-strain curve of steel fiber reinforced concrete.** [s.l: s.n.].

SOUSA, J. L. A. O.; GETTU, R. Determining the Tensile Stress-Crack Opening Curve of Concrete by Inverse Analysis. **Journal of Engineering Mechanics**, p. 141–148, 2006.

STEPHEN, S. J. *et al.* Determination of the tensile constitutive relations of fiber reinforced concrete using inverse analysis. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 405–414, 2019.

SUN, L. *et al.* Stress strain behavior of hybrid steel-PVA fiber reinforced cementitious composites under uniaxial compression. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 349–360, 2018.

SUTA, M.; LUKASENOKS, A.; CEPURITIS, R. Determination of material design values for steel fibre reinforced self-stressing concrete (SFRSSC) structures. **Engineering for Rural Development**, v. 19, p. 631–637, 2020.

SWAMY R.N.; MANGAT P.S. Influence of fiber geometry on the properties of steel fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 4, n. 3, p. 451-465, 1974. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(74\)90110-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(74)90110-0).

TAERWE, L. R. Influence of Steel Fibers on Strain-Softening of High-Strength Concrete. **ACI Structural Journal**, v. 89, n. 1, p. 54–60, 1993.

TAN, K. H. *et al.* Correlations among notched beam tests, double punch tests and round panel tests for a high performance fibre concrete cast at site. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, n. May, p. 104138, 2021.

THE JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4**: Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. Concrete library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. 1984. n. 3, p. 58-61.

TIBERTI, G. *et al.* An overview of the flexural post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete. **Structural Concrete**, v. 19, n. 3, p. 695–718, 2018.

TRINDADE, Y. T. *et al.* Design of SFRC members aided by a multiscale model: Part I – Predicting the post-cracking parameters. **Composite Structures**, v. 241, n. January, p. 112078, 2020.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. [s.l.] IBRACON, 2011. p. 439–471.

VANDEVYVERE, B. *et al.* Effect of Glass Fibres on the Mechanical Behaviour of Concrete with Recycled Concrete Aggregates (RCAs). **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 290, n. 1, 2019.

VANDEWALLE, L. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 36, n. 262, p. 560–567, 2003.

VENKATESHWARAN, A.; TAN, K. H.; LI, Y. Residual flexural strengths of steel fiber reinforced concrete with multiple hooked-end fibers. **Structural Concrete**, v. 19, n. 2, p. 352–365, 2018.

VRIJDAGHS, R. *et al.* Experimental study into the location of the neutral axis in fiber-reinforced concrete prisms. **Structural Concrete**, v. 22, n. 1, p. 285–297, 2021.

VRIJDAGHS, R.; DI PRISCO, M.; VANDEWALLE, L. Uniaxial tensile creep of a cracked polypropylene fiber reinforced concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 1, p. 1–12, 2018.

WAFI, F. F.; ASHOUR, S. A. Mechanical Properties of High-strength Fiber Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 5, p. 449–455, 1992.

WANG, Z. *et al.* Stress-strain behaviour of hybrid-fibre engineered cementitious composite in compression. **Advances in Cement Research**, v. 32, n. 2, p. 53–65, 1 fev. 2020.

XU, L. *et al.* Experimental Investigation on Damage Behavior of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete under Compression. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, n. 1, 2018.

YOO, D. Y.; BANTHIA, N.; YOON, Y. S. Predicting the flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 74, p. 71–87, 2016.

YOO, D. Y.; KANG, S. T.; YOON, Y. S. Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 67–81, 2014.

YOO, D. Y.; KIM, S. W.; PARK, J. J. Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 219–229, 2017.

YOO, D. Y.; PARK, J. J.; KIM, S. W. Fiber pullout behavior of HPFRCC: Effects of matrix strength and fiber type. **Composite Structures**, v. 174, p. 263–276, 2017.

YOO, D. Y.; YOON, Y. S. A Review on Structural Behavior, Design, and Application of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 2, p. 125–142, 2016.

YOO, D.; YOON, Y. Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. **Engineering Structures**, v. 102, p. 409–423, 2015.

YUN, H. DO; CHOI, K. B.; CHOI, W. C. Comparative Evaluation of Flexural Toughness of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams. **Materials**, v. 16, n. 10, 2023.

ZENG, Y.; TANG, A. Comparison of effects of basalt and polyacrylonitrile fibers on toughness behaviors of lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 282, p. 122572, 2021.

ZHAO, J. *et al.* Study on mechanical properties of macro-synthetic fiber-reinforced iron ore tailings concrete. **Structural Concrete**, v. 23, n. 1, p. 423–440, 2022.

ZHAO, J. *et al.* Influence of macro-synthetic fiber on the mechanical properties of iron ore tailing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 367, n. June 2022, p.

130293, 2023.

ZHENG, Z.; FELDMAN, D. Synthetic fibre-reinforced concrete. **Progress in Polymer Science**, v. 20, p. 185-210, 1995.

ZHOU, J. *et al.* Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Engineered Cementitious Composites in Uniaxial Compression. **J. Mater. Civ. Eng**, v. 27, n. 1, p. 04014111, 2015.

ZHOU, J.; PAN, J.; LEUNG, C. K. Y. Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Engineered Cementitious Composites in Uniaxial Compression. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 1, p. 04014111, 2015.

ZHU, D. *et al.* Investigation on the flexural toughness evaluation method and surface cracks fractal characteristics of polypropylene fiber reinforced cement-based composites. **Journal of Building Engineering**, v. 43, n. April, p. 103045, 2021.

APÊNDICE A: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO

As propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de compressão de cada corpo de prova, utilizadas nas análises estatísticas, estão apresentadas na Tabela A.1 para cada tipo de traço do Grupo 1.

Tabela A.1 Propriedades mecânicas dos ensaios de compressão do Grupo 1.

Traço	CP	f_c [MPa]	E_c [MPa]	ε_{c0} [-]	TI [J/m³]
60-ACOGAN-0,50	CP1	62,80	52940	2,45	7030
	CP2	63,93	42642	2,76	7171
	CP3	69,76	48372	2,61	7091
60-ACOGAN-0,75	CP1	69,68	39335	3,27	7527
	CP2	70,81	43679	2,93	7594
	CP3	70,73	43607	2,80	6848
60-ACOGAN-1,00	CP1	69,48	42283	2,96	7502
	CP2	72,90	40964	3,38	7856
	CP3	72,26	-	-	-
60-ACOCOR-0,50	CP1	57,31	44075	2,32	6094
	CP2	58,30	49555	2,11	6271
	CP3	56,20	51708	1,87	6251
60-ACOCOR-0,75	CP1	60,80	34588	2,75	6948
	CP2	61,15	30021	3,03	6631
	CP3	61,89	34247	2,71	6191
60-ACOCOR-1,00	CP1	54,69	31930	3,27	7159
	CP2	56,48	39595	3,07	8079
	CP3	54,59	35269	2,80	7628
60-VIDFIL-0,50	CP1	51,60	38403	2,18	4319
	CP2	54,24	-	-	-
	CP3	54,42	-	-	-
60-VIDFIL-0,75	CP1	54,21	33083	2,80	5592
	CP2	55,43	33797	2,78	6057
	CP3	53,33	30667	3,01	5958
60-VIDFIL-1,00	CP1	54,38	30083	3,13	5296
	CP2	54,41	28541	3,08	6078
	CP3	52,74	29753	2,91	5786
60-VIDPUL-0,50	CP1	54,74	34095	2,37	5585
	CP2	53,48	36308	2,38	6460
	CP3	56,30	37153	2,28	5074
60-VIDPUL-0,75	CP1	54,50	34077	2,56	6566
	CP2	55,51	34075	2,45	6744

Traço	CP	f_c [MPa]	E_c [MPa]	ϵ_{c0} [-]	TI [J/m ³]
	CP3	53,96			
60-VIDPUL-1,00	CP1	48,03	32469	2,32	5486
	CP2	48,69	37806	2,02	6842
	CP3	49,37	34425	2,21	6646
60-POLMON-0,50	CP1	49,12	33191	2,32	5627
	CP2	48,32	39631	1,89	5243
	CP3	47,63	37617	2,06	5354
60-POLMON-0,75	CP2	48,49	31872	2,32	5113
	CP3	49,94	-	-	-
60-POLMON-1,00	CP1	48,96	57218	1,65	5689
	CP2	47,96	55503	1,60	5849
	CP3	48,50	56774	1,62	6009
60-POLTOR-0,50	CP1	69,53	34445	2,43	4082
	CP2	64,57	41722	2,09	4446
	CP3	70,27	32322	2,81	4582
60-POLTOR-0,75	CP1	63,69	46753	2,13	5443
	CP2	67,30	40748	2,25	5119
	CP3	65,72	42432	2,18	5236
60-POLTOR-1,00	CP1	63,88	47463	1,93	4892
	CP2	65,21	46084	2,02	5247
	CP3	65,15	36908	2,35	5206

Fonte: Aatoria própria.

APÊNDICE B: RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO

As propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de flexão de cada corpo de prova, utilizadas nas análises estatísticas, estão apresentadas nas tabelas abaixo para cada tipo de traço do **Grupo 1**.

Tabela B.1 Propriedades mecânicas dos ensaios de flexão dos traços com fibras de aço com gancho do Grupo 1.

Fibra de aço com gancho						
Traço	CP	f _L [MPa]	f _{R1} [MPa]	f _{R2} [MPa]	f _{R3} [MPa]	f _{R4} [MPa]
60-ACOGAN-0,50	CP1	5,50	6,78	7,47	6,02	4,36
	CP2	5,26	5,43	6,44	5,56	4,59
	CP3	5,40	4,41	5,12	3,73	3,02
	CP4	5,52	5,96	6,85	4,95	3,83
60-ACOGAN-0,75	CP1	5,38	7,85	8,85	7,18	5,94
	CP2	6,29	9,09	10,14	8,18	6,69
	CP3	6,20	10,99	11,50	9,80	8,16
	CP4	5,37	8,20	9,30	7,99	7,27
60-ACOGAN-1,00	CP1	6,38	11,15	11,21	10,16	9,39
	CP2	6,44	10,66	10,80	9,58	7,58
	CP3	5,97	8,74	9,09	8,28	7,12
	CP4	6,76	11,93	12,09	10,36	9,07

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.2 Propriedades mecânicas dos ensaios de flexão dos traços com fibras de aço corrugada do Grupo 1.

Fibra de aço corrugada						
Traço	CP	f_L [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
60-ACOCOR-0,50	CP1	5,37	3,64	3,43	2,18	1,64
	CP2	5,47	3,08	2,71	1,75	1,44
	CP3	5,64	3,26	2,40	1,51	1,04
	CP4	5,86	4,30	3,51	1,91	1,55
60-ACOCOR-0,75	CP1	5,21	4,01	3,83	3,14	2,42
	CP2	5,96	6,07	4,51	2,50	1,83
	CP3	4,97	4,45	3,59	1,96	1,31
	CP4	5,42	4,61	3,84	2,71	1,79
60-ACOCOR-1,00	CP1	6,06	6,23	5,37	3,84	3,08
	CP2	5,90	6,72	6,06	3,83	3,02
	CP3	5,20	4,90	3,84	3,29	2,34
	CP4	5,46	4,73	3,85	2,80	1,93

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.3 Propriedades mecânicas dos ensaios de flexão dos traços com fibras de vidro filamentada do Grupo 1.

Fibra de vidro filamentada						
Traço	CP	f_L [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
60-VIDFIL-0,50	CP1	5,42	1,76	0,77	0,37	0,20
	CP2	4,79	1,86	0,67	0,35	0,22
	CP3	4,99	2,05	0,77	0,38	0,23
	CP4	4,98	1,51	0,61	0,33	0,19
60-VIDFIL-0,75	CP1	5,58	2,13	0,91	0,54	0,33
	CP2	5,55	2,54	1,11	0,62	0,38
	CP3	5,07	1,97	0,91	0,52	0,32
	CP4	5,63	2,56	1,08	0,60	0,38
60-VIDFIL-1,00	CP1	5,78	3,52	1,87	1,01	0,60
	CP2	5,65	3,81	1,96	1,15	0,73
	CP3	4,62	2,52	1,30	0,80	0,56
	CP4	5,27	3,24	1,76	1,07	0,67

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.4 Propriedades mecânicas dos ensaios de flexão dos traços com fibras de vidro pultrudada do Grupo 1.

Fibra de vidro pultrudada						
Traço	CP	f_L [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
60-VIDPUL-0,50	CP1	5,45	4,33	4,77	4,50	4,35
	CP2	5,12	4,16	4,45	4,02	3,93
	CP3	4,59	3,39	3,46	3,20	2,94
	CP4	4,80	2,87	3,04	3,04	2,84
60-VIDPUL-0,75	CP1	5,42	5,46	5,94	5,72	5,32
	CP2	5,42	4,07	4,45	4,21	4,13
	CP3	5,41	5,75	6,48	6,38	6,00
	CP4	4,98	4,11	4,48	4,48	4,36
60-VIDPUL-1,00	CP1	4,54	3,51	3,93	3,92	3,78
	CP2	5,24	5,58	6,52	6,52	6,03
	CP3	5,34	5,67	6,20	6,10	5,87
	CP4	5,15	5,78	6,91	6,79	6,67

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.5 Propriedades mecânicas dos ensaios de flexão dos traços com fibras poliméricas monofiladas do Grupo 1.

Fibra polimérica monofilada						
Traço	CP	f_L [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
60-POLMON-0,50	CP1	4,69	1,14	1,11	1,10	1,03
	CP2	4,68	1,67	1,93	1,86	1,60
	CP3	4,86	1,53	1,78	1,57	1,46
	CP4	4,36	1,65	1,78	1,65	1,55
60-POLMON-0,75	CP1	4,20	1,66	1,84	1,77	1,58
	CP2	4,54	2,43	2,89	2,72	2,44
	CP3	4,32	2,17	2,57	2,39	2,13
	CP4	4,23	1,95	2,17	2,13	1,96
60-POLMON-1,00	CP1	4,48	2,47	2,67	2,67	2,41
	CP2	4,62	3,21	3,86	3,56	3,25
	CP3	4,44	2,63	3,18	2,95	2,61
	CP4	4,46	3,00	3,50	3,19	2,85

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.6 Propriedades mecânicas dos ensaios de flexão dos traços com fibras poliméricas torcidas do Grupo 1.

Fibra polimérica torcida						
Traço	CP	f_L [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
60-POLTOR-0,50	CP1	4,54	1,38	1,28	1,33	1,32
	CP2	4,75	1,13	0,99	1,01	1,00
	CP3	4,61	1,04	0,91	0,93	0,92
	CP4	4,61	1,39	1,31	1,34	1,31
60-POLTOR-0,75	CP1	4,04	1,36	1,38	1,45	1,43
	CP2	4,53	1,81	1,76	1,82	1,81
	CP3	4,59	1,77	1,66	1,66	1,64
	CP4	4,41	1,65	1,52	1,55	1,53
60-POLTOR-1,00	CP1	4,75	2,39	2,54	2,63	2,60
	CP2	5,00	2,47	2,54	2,60	2,55
	CP3	4,92	2,17	2,27	2,36	2,34
	CP4	4,40	1,64	1,73	1,78	1,75

Fonte: Autoria própria.

As propriedades mecânicas dos ensaios de flexão de cada corpo de prova, utilizadas nas análises estatísticas, estão apresentadas nas tabelas abaixo para cada tipo de traço do **Grupo 2**.

Tabela B.7 Propriedades mecânicas dos ensaios de flexão dos traços com fibras de aço com gancho do Grupo 2.

Fibra de aço com gancho						
Traço	CP	f _L [MPa]	f _{R1} [MPa]	f _{R2} [MPa]	f _{R3} [MPa]	f _{R4} [MPa]
90-ACOGAN-0,50	CP1	5,34	4,80	4,21	2,27	1,57
	CP2	5,90	5,50	3,93	2,19	1,28
	CP3	6,17	6,19	4,57	2,30	1,28
	CP4	5,96	6,37	5,51	3,15	2,09
90-ACOGAN-0,75	CP1	6,81	8,67	7,05	3,20	1,97
	CP2	6,50	9,18	6,88	3,40	1,99
	CP3	6,49	9,56	7,74	3,99	2,56
	CP4	6,21	7,03	5,44	3,54	2,28
90-ACOGAN-1,00	CP1	7,79	13,57	11,25	7,93	6,31
	CP2	7,82	13,86	9,79	6,52	4,07
	CP3	7,21	13,79	11,84	6,31	3,83
	CP4	6,86	10,78	9,09	6,16	4,55

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.8 Propriedades mecânicas dos ensaios de flexão dos traços com fibras de vidro filamentada do Grupo 2.

Fibra de vidro filamentada						
Traço	CP	f_L [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
90-VIDFIL-0,50	CP1	6,32	1,66	0,64	0,33	0,18
	CP2	6,08	1,38	0,50	0,23	0,13
	CP3	6,60	1,75	0,61	0,28	0,14
	CP4	6,33	1,46	0,49	0,21	0,10
90-VIDFIL-0,75	CP1	6,33	2,97	1,74	0,95	0,58
	CP2	6,71	3,31	1,69	0,96	0,59
	CP3	6,07	2,41	1,44	0,89	0,58
	CP4	7,00	3,63	1,92	1,08	0,68
90-VIDFIL-1,00	CP1	6,90	4,96	2,76	1,59	0,94
	CP2	6,60	4,12	2,39	1,40	0,87
	CP3	6,46	4,32	2,63	1,57	0,95
	CP4	6,69	4,36	2,52	1,39	0,83

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.9 Propriedades mecânicas dos ensaios de flexão dos traços com fibras poliméricas monofiladas do Grupo 2.

Fibra polimérica monofilada						
Traço	CP	f_L [MPa]	f_{R1} [MPa]	f_{R2} [MPa]	f_{R3} [MPa]	f_{R4} [MPa]
90-POLMON-0,50	CP1	5,50	1,11	1,22	1,19	1,09
	CP2	5,33	1,64	1,89	1,91	1,69
	CP3	5,67	1,31	1,48	1,52	1,47
	CP4	5,40	1,20	1,36	1,33	1,25
90-POLMON-0,75	CP1	4,71	2,25	2,72	2,73	2,55
	CP2	5,08	2,40	2,91	3,03	2,65
	CP3	5,74	2,51	3,02	3,05	2,82
	CP4	5,17	3,15	4,01	3,87	3,63
90-POLMON-1,00	CP1	6,23	3,31	4,47	4,35	3,88
	CP2	5,80	2,85	3,63	3,74	3,47
	CP3	5,47	2,90	3,88	4,01	3,54
	CP4	5,48	2,79	3,79	3,67	3,33

Fonte: Autoria própria.