

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VIVIANE VISNARDI VAZ

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS NO
COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE
CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA

São Carlos/SP

2026

VIVIANE VISNARDI VAZ

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS NO
COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE
CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA**

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

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Laguardia
Justen de Almeida

São Carlos/SP

2026



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 da candidata Viviane Visnardi Vaz, realizada em 27/01/2026.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian (UFSCar)

Prof. Dr. Thomás Lima de Resende (UERJ)

Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima (UEFS)

Prof. Dr. Thomaz Eduardo Teixeira Buttignol (UNICAMP)

Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

A Miguel e Mateus, que enchem
meus dias de sentido e me motivam
a buscar sempre o melhor de mim.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian, meu orientador, pela confiança, orientação precisa e pela dedicação ao longo desta jornada.

Ao Prof. Dr. Ricardo Laguardia Justen de Almeida, meu co-orientador, pelas valiosas contribuições e pelo apoio constante.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Carnio, que desde 2009 tem sido uma referência e exemplo em minha trajetória, pela amizade, pela parceria profissional e pelos ensinamentos constantes.

Aos colegas Guilherme Sumitomo, Isabela Duarte e Ana Beatriz Santos, pelo apoio essencial na produção e execução dos ensaios, bem como nas análises realizadas.

À Evolução Engenharia, pela realização de parte dos ensaios e pelo custeio de insumos necessários, e à Comptest Engenharia, pelo apoio no fornecimento de materiais.

À PUC-Campinas, que possibilitou a realização de todo o programa experimental no Laboratório de Materiais, e aos técnicos Mateus, Igor, Diogo, Anderson e Moisés, da maquetaria e dos laboratórios, pelo auxílio fundamental em cada etapa prática.

À Profa. Nádia Forti, pelo apoio direto na realização dos ensaios, pelas conversas enriquecedoras ao longo do percurso e, juntamente com o Prof. Paulo Roberto, pelas valiosas contribuições como membros da banca de qualificação, que trouxeram importantes direcionamentos para o desenvolvimento deste trabalho.

À Profa. Ana Elizabete, pelas reflexões e diálogos acadêmicos que ampliaram minha visão durante a pesquisa.

À minha mãe, Dora, pelo amor incondicional e pela dedicação em cuidar dos meus filhos e da minha casa por longos períodos, permitindo que eu pudesse me dedicar integralmente a esta pesquisa.

Ao meu irmão, Igor, pela disposição em sempre buscar soluções e ferramentas que me ajudaram a superar os desafios.

Ao meu marido Rodrigo, pela parceria incondicional e pelo incentivo ao longo dos últimos 24 anos, que tornaram possível não apenas este trabalho, mas toda a trajetória que nos trouxe até aqui.

Resumo

A compreensão do cisalhamento em vigas de concreto armado é um tema relevante da engenharia estrutural, especialmente com a introdução de fibras na matriz cimentícia, que aumenta a complexidade dos mecanismos resistentes, mas proporciona ganhos em ductilidade, resistência residual e controle da fissuração. As pesquisas concentram-se majoritariamente em concretos de resistência convencional, deixando lacunas quanto ao desempenho de concretos de alta resistência (C55–C90) com diferentes tipos e teores de fibras e seu comportamento em vigas sem estribos. Este trabalho investigou a contribuição das fibras na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto de alta resistência reforçado com fibras (CARRF) sem armadura transversal, bem como realizou uma avaliação crítica da aplicação das equações da ABNT NBR 16935 (2021) para a estimativa da capacidade resistente dessas vigas, atualmente não contempladas pela referida norma. Os resultados foram comparados com diretrizes recentes do Eurocode 2 (2023) (EC2) e do *fib* Model Code 2020 (2024) (MC2020). O programa experimental contemplou a caracterização mecânica de concretos C55, C70 e C90 com fibras de aço e macrofibras poliméricas (0,5% e 1,0%), incluindo ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistências residuais à tração na flexão e resistência ao cisalhamento direto pelos métodos JSCE-SF6 e tipo *Push-off*. Vigas sem armadura transversal de CARRF foram ensaiadas para avaliar a influência da resistência do concreto, do tipo e do teor de fibras no comportamento ao cisalhamento. Empregou-se a correlação de imagem digital (CID) para análise do processo de fissuração em alguns ensaios. Os resultados mostraram que a adição de fibras aumentou a carga de fissuração, controlou a abertura das fissuras e elevou a capacidade resistente ao cisalhamento, sobretudo no caso das fibras de aço. Os métodos de ensaio de cisalhamento direto apresentam variações significativas em seus resultados, indicando a necessidade de padronização. A análise revelou que a ABNT NBR 16935 (2021) tende a superestimar a capacidade resistente ao cisalhamento das vigas de CARRF, enquanto as formulações do EC2 e do MC2020 mostraram-se mais conservadoras. Foi proposta uma calibração das equações do EC2, com resultado mais ajustado aos resultados experimentais e de menor dispersão. O resultado permitiu uma contribuição relevante para a normalização brasileira, alinhada às evidências experimentais e às tendências internacionais, permitindo o uso seguro e econômico do CRF em elementos estruturais.

Palavras-chave: cisalhamento, concreto de alta resistência reforçado com fibras (CARRF), viga sem armadura transversal, fibras de aço, macrofibras poliméricas

Abstract

The understanding of shear behavior in reinforced concrete beams is a relevant topic in structural engineering, especially with the introduction of fibers into the cementitious matrix, which increases the complexity of the resisting mechanisms but provides gains in ductility, residual strength, and crack control. Research has focused on conventional-strength concretes, leaving gaps regarding the performance of high-strength concretes (C55–C90) with diverse types and dosages of fibers and their behavior in beams without transverse reinforcement. This study investigated the contribution of fibers to the shear resistance of high-strength fiber-reinforced concrete (HSFRC) beams without stirrups and conducted a critical assessment of the applicability of the design equations of ABNT NBR 16935 (2021) for estimating the shear capacity of these beams, which are currently not addressed by the standard. The results were compared with recent international guidelines from Eurocode 2 (2023) (EC2) and the fib Model Code 2020 (2024) (MC2020). The experimental program included the mechanical characterization of C55, C70, and C90 concrete reinforced with steel fibers and macro-synthetic fibers (0.5% and 1.0%), comprising compressive strength, elastic modulus, residual flexural tensile strength, and direct shear strength tests using the JSCE-SF6 and push-off methods. HSFRC beams without transverse reinforcement were evaluated to evaluate the influence of concrete strength, fiber type, and fiber dosage on shear behavior. Digital image correlation (DIC) was employed in selected tests to analyze the cracking process. The results showed that fiber addition increased the cracking load, controlled crack opening, and enhanced shear resistance, particularly in the case of steel fibers. The direct shear test methods exhibited significant variability in their results, indicating the need for standardization. The analysis revealed that ABNT NBR 16935 (2021) tends to overestimate the shear capacity of HSFRC beams, whereas the EC2 and MC2020 formulations proved to be more conservative. A calibration of the EC2 equations was proposed, resulting in improved agreement with the experimental results and reduced dispersion. These findings provide a relevant contribution to Brazilian standardization, aligned with experimental evidence and international trends, enabling the safe and economical use of fiber-reinforced concrete in structural elements.

Keywords: shear behavior, high-strength fiber-reinforced concrete (HSFRC), beams without stirrups, steel fibers, polymeric fibers

Lista de Figuras

Figura 1. Distribuição dos parâmetros do banco de dados de Lantsoght (2019a):	19
Figura 2. Esquema de concentração de tensões para (a) concreto simples e (b) concreto com reforço de fibras	28
Figura 3. Principais diferenças entre concreto simples e concreto reforçado com fibras com resistência convencional (CC) e alta resistência (CAR) sob compressão uniaxial	29
Figura 4. Comportamento do CRF sob tração direta	29
Figura 5. Esquema de ensaio para determinação das resistências residuais à tração segundo ABNT NBR 16940 (2021)	30
Figura 6. Curva força x CMOD obtida a partir do ensaio	30
Figura 7. Métodos de ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento:	36
Figura 8. Configuração dos corpos de prova dos ensaios do tipo <i>Push-off</i>	37
Figura 9. Configuração dos corpos de prova dos ensaios segundo a JSCE-SF6 (1990)	39
Figura 10. Vão de cisalhamento de viga de concreto sem armadura transversal	42
Figura 11. Transferência de cisalhamento através de uma fissura inclinada em uma viga sem estribos	43
Figura 12. Mecanismos de transferência de cisalhamento em vigas de CRFA	44
Figura 13. Resultados obtidos nos ensaios do tipo <i>Push-off</i> para concreto C30 (a) e C70 (b)	59
Figura 14. Deslocamento ao longo da fissura no plano de cisalhamento	59
Figura 15. Corpo de prova para o ensaio de Luong	61
Figura 16. Fluxograma do programa experimental da pesquisa	70
Figura 17. Fibras metálicas	72
Figura 18. Macrofibras poliméricas	72
Figura 19. Separação dos materiais utilizados na produção dos concretos	75
Figura 20. Sequência de colocação dos materiais na betoneira	76
Figura 21. Produção dos concretos:	77
Figura 22. Execução dos entalhes nos corpos de prova prismáticos	78
Figura 23. Padrão de nomenclatura para os corpos de prova	78
Figura 24. Preparação dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento do tipo <i>Push-off</i>	79
Figura 25. Ensaio de (a) resistência à compressão e (b) e módulo de elasticidade	80
Figura 26. Ensaio de resistência à tração na flexão	80
Figura 27. Curva carga x CMOD obtida no ensaio de flexão	81
Figura 28. Tenacidade na flexão	82

Figura 29. Ensaio de cisalhamento segundo JSCE-SF6.....	83
Figura 30. Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento segundo JSCE-SF6 (1990).....	83
Figura 31. Dimensões e armação do corpo de prova para ensaio de cisalhamento do tipo <i>Push-off</i>	85
Figura 32. Fôrma preparada e corpo de prova moldado para ensaio de cisalhamento do tipo <i>Push-off</i>	85
Figura 33. Instrumentação dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento do tipo <i>Push-off</i>	86
Figura 34. Esquema geral do ensaio de cisalhamento do tipo <i>Push-off</i>	86
Figura 35. Detalhamento da armadura de flexão utilizada nas vigas	89
Figura 36. Aplicação dos extensômetros nas barras:.....	90
Figura 37. Fôrma com armadura longitudinal posicionada.....	90
Figura 38. Procedimento de cura para as vigas	91
Figura 39. Preparação das superfícies das vigas para CID	91
Figura 40. Curvas tensão x deformação barras de aço: (a) 10mm e (b) 16 mm.....	92
Figura 41. Ensaio adicionais: massa específica e teor de ar incorporado	93
Figura 42. Instrumentação e ensaio das vigas	94
Figura 43. Composição granulométrica do agregado miúdo	96
Figura 44. Composição granulométrica do agregado graúdo.....	96
Figura 45. Análise estatística baseada no teste de Fischer para resistência à compressão:	101
Figura 46. Curvas tensão x CMOD – Concreto Referência (sem fibras)	102
Figura 47. Curvas tensão x CMOD – CRFA.....	103
Figura 48. Curvas tensão x CMOD – CRFP.....	104
Figura 49. Análise estatística baseada no teste de Fischer para resistência à tração no limite de proporcionalidade (f _L):	107
Figura 50. Tenacidade à flexão.....	108
Figura 51. Curvas características de tensão x CMOD (classe de resistência do concreto)	109
Figura 52. Curvas características de tensão x CMOD separadas por tipo e teor de fibras.	111
Figura 53. Tensão de cisalhamento x deslocamento vertical segundo método da norma japonesa JSCE-SF6 (1990)	112
Figura 54. Tensão de cisalhamento x deslocamento vertical tipo <i>Push-off</i>	113
Figura 55. Curvas características tensão de cisalhamento vs deslocamento vertical (δ) - Ensaio JSCE-SF6: (a) C55, (b) C70 e (c) C90 e Ensaio tipo <i>Push-off</i> : (d) C55, (e) C70 e (f) C90.....	114

Figura 56. Análise da superfície de ruptura dos corpos-de-prova do ensaio JSCE-SF6: (a) C55-P-0,5-2E, (b) C55-P-0,5-2D, (c) C70-P-0,5-3E, (d) C70-P-0,5-3D, (e) C90-P-0,5-2E e (f) C90-P-0,5-2D	118
Figura 57. Verificação da rotação relativa nos corpos de prova do ensaio <i>Push-off</i>	120
Figura 58. Ensaio tipo <i>Push-off</i> – Curvas características tensão de cisalhamento vs deslocamento horizontal (ω): (a) C55, (b) C70 e (c) C90 e deslocamento vertical (δ) vs deslocamento horizontal (ω) (d) C55, (e) C70 e (f) C90	121
Figura 59. Análise estatística baseada no teste de Fischer para tensão máxima de cisalhamento – Ensaio JSCE-SF6: avaliação da influência (a) da resistência à compressão, (b) do teor de fibras de aço e (c) do teor de macrofibras poliméricas.....	124
Figura 60. Análise estatística baseada no teste de Fischer para tensão máxima de cisalhamento – Ensaio tipo <i>Push-off</i> : avaliação da influência (a) da resistência à compressão, (b) do teor de fibras de aço e (c) do teor de macrofibras poliméricas.....	125
Figura 61. Relação entre resistências residuais à tração e ao cisalhamento	126
Figura 62. Comparação dos resultados de resistência à compressão	129
Figura 63. Ajuste nas curvas força vs deslocamento	130
Figura 64. Força x Deslocamento vertical: (a) C90-R, (b) C90-A-0,5, (c) C90-A-1,0, (d) C90-P-0,5, (e) C90-P-1,0, (f) C55-P-1,0 e (g) C70-P-1,0.....	131
Figura 65. Força x Deformação específica da armadura longitudinal: (a) C90-R, (b) C90-A-0,5, (c) C90-A-1,0, (d) C90-P-0,5, (e) C90-P-1,0, (f) C55-P-1,0 e (g) C70-P-1,0.....	134
Figura 66. Campo de deslocamento das vigas	135
Figura 67. Formação da fissura diagonal - Vigas C90-R.....	136
Figura 68. Formação da fissura diagonal - Vigas C90-A-0,5.....	136
Figura 69. Formação da fissura diagonal - Vigas C90-A-1,0.....	136
Figura 70. Formação da fissura diagonal - Vigas C90-P-0,5.....	137
Figura 71. Formação da fissura diagonal - Vigas C90-P-1,0.....	137
Figura 72. Formação da fissura diagonal - Vigas C55-P-1,0.....	137
Figura 73. Formação da fissura diagonal - Vigas C70-P-1,0.....	138
Figura 74. Leitura de abertura de fissura por meio da técnica de correlação de imagem digital (CID).....	138
Figura 75. Força x Abertura de fissura: (a) C90-R, (b) C90-A-0,5, (c) C90-A-1,0, (d) C90-P-0,5, (e) C90-P-1,0, (f) C55-P-1,0 e (g) C70-P-1,0	140
Figura 76. Deslocamento vertical x Abertura de fissura: (a) C90-R, (b) C90-A-0,5, (c) C90-A-1,0, (d) C90-P-0,5, (e) C90-P-1,0, (f) C55-P-1,0 e (g) C70-P-1,0	141
Figura 77. Comparativo das curvas Força x Deslocamento vertical das vigas	142
Figura 78. Detalhe das fibras na fissura da viga C70-P-1,0-2	145

Figura 79. Comparativo das curvas Força x Abertura de fissura das vigas	147
Figura 80. Comparativo das curvas Deslocamento x Abertura de fissura das vigas	148
Figura 81. Avaliação das equações propostas na literatura para tensão máxima de cisalhamento (JSCE-SF6): (a) CRFA e (b) CRFP	151
Figura 82. Avaliação das equações propostas na literatura para tensão máxima de cisalhamento (<i>Push-off</i>): (a) CRFA e (b) CRFP	152
Figura 83. Correlação entre tensão máxima de cisalhamento e resistência à compressão do concreto sem fibras	153
Figura 84. Contribuição das fibras na resistência ao cisalhamento: (a) CRFA e (b) CRFP	154
Figura 85. Avaliação da equação proposta para os resultados da literatura (ensaio JSCE-SF6)	155
Figura 86. Avaliação da equação proposta considerando o coeficiente $\beta=0,70$ para os resultados obtidos no ensaio tipo <i>Push-off</i>	155
Figura 87. Correlação entre resultados empíricos e resultados experimentais no ensaio tipo <i>Push-off</i>	156
Figura 88. Avaliação da equação proposta considerando o coeficiente $\beta=0,70$ para os resultados da literatura – ensaio tipo <i>Push-off</i>	156
Figura 89. Relação entre a resistência experimental e a calculada ($V_{u,exp}/V_{u,calc}$) em função da resistência à tração residual média (f_{R3m}), conforme os modelos normativos ABNT NBR 16935, Eurocode 2:2020 e <i>fib</i> Model Code 2020.	159
Figura 90. Distribuição estatística da razão $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ para os modelos normativos avaliados.	160
Figura 91. Variação do coeficiente η_{cF} em função da resistência residual f_{R3m} conforme equação do EC2-2020	167
Figura 92. Relação $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ obtida pela ABNT NBR 16935 e pela equação proposta	172
Figura 93. Distribuição estatística da razão $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ obtida pela ABNT NBR 16935 e pela equação proposta	173

Lista de Tabelas

Tabela 1. Levantamento bibliográfico realizado	20
Tabela 2. Dimensões dos corpos de prova utilizados em ensaios do tipo <i>Push-off</i>	38
Tabela 3. Dimensões dos corpos de prova utilizados em ensaios segundo a JSCE-SF6 (1990)	39
Tabela 4. Características das fibras de aço com ganchos nas extremidades	72
Tabela 5. Características da fibra polimérica em monofilamento	73
Tabela 6. Ensaios para caracterização dos agregados.....	74
Tabela 7. Traços dos concretos sem fibras.....	74
Tabela 8. Dosagens dos concretos (com e sem fibras).....	74
Tabela 9. Consumo de fibras para cada teor (kg/m^3)	75
Tabela 10. Relação de ensaios e corpos de prova para caracterização dos concretos.....	77
Tabela 11. Planejamento experimental para as vigas	88
Tabela 12. Dimensionamento da armadura de flexão das vigas	89
Tabela 13. Propriedades das barras de aço	92
Tabela 14. Relação de ensaios e corpos de prova para controle da resistência à compressão dos concretos – Etapa 2	93
Tabela 15. Propriedade dos agregados	96
Tabela 16. Abatimento (<i>slump test</i>)	97
Tabela 17. Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade	99
Tabela 18. Resultados dos ensaios de resistência à tração.....	105
Tabela 19. Resultados dos ensaios de cisalhamento direto.....	115
Tabela 20. Resistência à compressão	128
Tabela 21. Resultados de ensaios adicionais de resistência à compressão, massa específica e teor de ar incorporado.....	128
Tabela 22. Resultados dos ensaios em vigas	143
Tabela 23. Equações para previsão da resistência ao cisalhamento direto	150
Tabela 24. Coeficiente k_f	154
Tabela 25. Verificação das equações de previsão de resistência ao cisalhamento segundo as normas NBR 16935, MC 2020 e EC2 2020	158
Tabela 26. Verificação das equações de previsão de resistência ao cisalhamento segundo as normas ABNT NBR 16935, MC 2020 e EC2 2020, considerando o tipo de fibra.....	161
Tabela 27. Versão adaptada da <i>Demerit Points Classification</i> (DPC)	164

Tabela 28. Classificação dos resultados de $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ segundo o método DPC modificado para ABNT NBR 16935, MC2020 e EC2-2020.....	165
Tabela 29. Resultados da calibração do modelo.....	168
Tabela 30. Resultados da verificação de $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ para a ABNT NBR 16935 e para a equação proposta calibrada.....	171

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	16
1.2 JUSTIFICATIVA E DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	17
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	22
2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS.....	23
2.1 MATRIZ, FIBRA E INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ	24
2.2 PROPRIEDADES DO CRF	26
2.3 CRF E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	31
2.3.1 <i>Efeito das fibras na resistência ao cisalhamento e modo de falha</i>	<i>31</i>
2.3.2 <i>Ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento do CRF.....</i>	<i>33</i>
3. CISALHAMENTO EM VIGAS DE CRF	41
3.1 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇO POR CISALHAMENTO	41
3.1.1 <i>Vigas de concreto sem estribos.....</i>	<i>41</i>
3.1.2 <i>Vigas de CRFA sem estribos.....</i>	<i>44</i>
3.2 MODELOS PARA PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CRF	46
3.3.1 <i>Teoria do Campo de Compressão Modificado (MCFT).....</i>	<i>47</i>
3.3.2 <i>Diretrizes normativas para dimensionamento da capacidade resistente ao cisalhamento de elementos de CRF sem estribos</i>	<i>48</i>
3.3.2.1 Eurocode 2 – 2020 (2023).....	48
3.3.2.2 Código Modelo da fib MC 2020 (2024).....	49
3.3.2.3 ABNT NBR 16935 (2021).....	52
3.3.2.4 Norma Espanhola (2021)	53
3.3.2.6 Verificação das equações normativas	54
3.3 ESTUDOS A PARTIR DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS	57
3.4 USO DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL (CID)	66
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
4.1 MATERIAIS.....	71
4.1.1 <i>Concreto.....</i>	<i>71</i>
4.1.2 <i>Fibras</i>	<i>71</i>
4.1.2.1 Fibras metálicas	71

4.1.2.2 Fibras poliméricas	72
4.2 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CARRF E INVESTIGAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS PARA A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	73
4.2.1 Parâmetros avaliados	73
4.2.2 Ensaios de caracterização dos agregados	73
4.2.3 Caracterização e produção do concreto referência (sem fibra) e com fibra (CRF)	74
4.2.4 Correlação de Imagem Digital (CID)	78
4.2.5 Ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade	79
4.2.6 Ensaio de resistência à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais)	80
4.2.7 Ensaio de resistência ao cisalhamento segundo a JSCE-SF6 (1990)	82
4.2.8 Ensaio de resistência ao cisalhamento do tipo Push-off	84
4.3 ETAPA 2: INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE VIGAS ESBELTAS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS SEM ESTRIBOS	87
4.3.1 Parâmetros avaliados e produção das vigas para ensaio de flexão	87
4.3.1.1 Ensaios de caracterização das barras de aço	92
4.3.1.2 Resistência à compressão, massa específica e teor de ar incorporado	93
4.3.1.3 Ensaio de flexão em três pontos	94
5. RESULTADOS ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	95
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	95
5.2 CONSISTÊNCIA E ABATIMENTO	97
5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE	97
5.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (LIMITE DE PROPORCIONALIDADE E RESISTÊNCIAS RESIDUAIS)	101
5.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO	111
5.6 RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA RESIDUAL À TRAÇÃO E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO	125
6. RESULTADOS ETAPA 2: VIGAS	127
6.1 CONTROLE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	127
6.2 ENSAIO DE FLEXÃO DAS VIGAS	129
7. EQUAÇÕES DE PREVISÃO DE CAPACIDADE RESISTENTE AO CISALHAMENTO	149

7.1 VERIFICAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO	149
7.1.1 <i>Proposta de modelo de previsão de tensão máxima resistente ao cisalhamento</i>	152
7.2 VERIFICAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM VIGAS	157
7.3 PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DA EQUAÇÃO DA NORMA BRASILEIRA PARA PREVISÃO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM VIGAS	165
7.3.1 <i>Resultados da calibração do modelo</i>	167
7.3.2 <i>Equações propostas a partir da calibração do modelo</i>	169
7.3.3 <i>Verificação do modelo proposto</i>	170
8. CONCLUSÕES	174
8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	178
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	180

1. INTRODUÇÃO

O comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado é investigado há muitas décadas, mas, devido à sua complexidade, continua sendo um tema desafiador ainda explorado pelos pesquisadores. A dificuldade decorre da interação de múltiplos mecanismos resistentes, como a biela inclinada do banzo comprimido, o engrenamento de agregados nas fissuras e o efeito pino das barras longitudinais.

Quando fibras são incorporadas à matriz cimentícia, o problema torna-se ainda mais complexo. As fibras alteram os mecanismos tradicionais de transferência de esforços ao atuarem como pontes de transferência das tensões entre as superfícies das fissuras, retardando sua abertura e modificando a forma como a energia é absorvida pelo sistema. Essa contribuição adicional, embora comprovada experimentalmente, não é trivial de ser quantificada, sobretudo em vigas, nas quais coexistem diferentes modos de ruptura e diversas variáveis geométricas e mecânicas que influenciam o comportamento resistente (VISSER; BOSHOF, 2021; RESENDE *et al.*, 2021; ZARRINPOUR; CHAO, 2017).

A aplicação do concreto reforçado com fibras (CRF) como substituto parcial ou total dos estribos tem despertado grande interesse, pois permite simplificar a execução reduzindo, ou até mesmo eliminando, a quantidade de armadura transversal (YUAN *et al.*, 2020; SUK; FERRARI, 2024). Essa possibilidade é especialmente vantajosa em projetos com elevada densidade de estribos ou em situações em que o controle de fissuração é crítico (CUENCA, 2012). Para a indústria de elementos pré-fabricados em concreto, a ausência ou diminuição das armaduras melhora o processo de fabricação dando mais rapidez. Isso impacta diretamente na eficiência e eficácia das fábricas.

No entanto, para que essa solução seja adotada em projeto, é necessário compreender e quantificar a contribuição das fibras na resistência ao cisalhamento. Nesse sentido, pesquisadores vêm buscando incorporar avanços experimentais e teóricos na formulação de modelos de dimensionamento.

Nos últimos anos, normas nacionais e internacionais avançaram na regulamentação do CRF. No Brasil, a ABNT publicou em 2021 a série ABNT NBR 16935 a ABNT NBR 16942, introduzindo critérios de projeto, qualificação e ensaio. Em especial, a ABNT NBR 16935 estabeleceu requisitos para o projeto de elementos estruturais em CRF, ainda que limitada a concretos de até 50 MPa de resistência à compressão. No cenário internacional, tanto o Eurocode 2 (2023) quanto o *fib* Model Code 2020 (2024) revisaram suas formulações de cisalhamento em vigas de CRF, incorporando novos modelos calibrados a partir de extensas

bases de dados experimentais. Essas revisões levaram em consideração a Teoria do Campo de Compressão modificado, do inglês: *Modified Compression Field Theory* (MCFT), que passou a embasar a modelagem do cisalhamento em vigas de CRF, refletindo a relevância do tema e a necessidade de atualização dos modelos teóricos.

Apesar do avanço das pesquisas e da evolução das normas, permanecem questões em aberto: quais são as parcelas correspondentes a cada mecanismo de resistência ao cisalhamento em vigas de CRF? Como as variáveis (tipo e teor volumétrico de fibras, resistência à compressão do concreto, fator de forma das vigas e taxa de armadura longitudinal) influenciam a contribuição das fibras? Em que medida os modelos especificados em normas conseguem representar o comportamento observado experimentalmente, e onde ainda apresentam limitações? (LANTSOGHT, 2019b).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo investigar o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras, analisando a contribuição das fibras e avaliando criticamente as formulações de dimensionamento propostas pela norma brasileira ABNT NBR 16935 (2021) em comparação com códigos internacionais recentes, como o Eurocode 2 (2023) e o *fib* Model Code 2020 (2024). Dessa forma, este trabalho busca aprofundar o conhecimento sobre o comportamento ao cisalhamento de vigas de CRF e fornecer subsídios técnicos para a calibração de modelos de cálculo aplicáveis ao projeto estrutural, e possível incorporação dessas recomendações em normas brasileiras.

1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa teve como objetivo principal analisar a influência da adição de fibras na capacidade resistente ao esforço cortante em vigas de concreto com classe de resistência à compressão no intervalo C55 a C90 com o intuito de compreender o comportamento dos elementos de CRF sem armadura transversal.

Para atingir o objetivo principal foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a. Determinar características mecânicas quanto ao comportamento em relação ao cisalhamento do concreto reforçado com fibras, com resistência à compressão entre 55 MPa e 90 MPa e fibras de aço e macrofibras poliméricas;
- b. Determinar, por meio de análise experimental, a influência de diferentes variáveis no comportamento das vigas de CRF sem estribos;
- c. Aferir e propor melhorias nos modelos propostos na normalização brasileira para previsão da capacidade resistente ao cisalhamento das vigas de CRF sem estribos com resistência à compressão entre 55 MPa e 90 MPa;

- d. Contribuir para uma proposta de revisão da norma brasileira ABNT NBR 16935 (2021) a fim de que o concreto de alta resistência reforçado com fibras possa ser considerado uma opção de projeto.

1.2 JUSTIFICATIVA E DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A investigação do cisalhamento em vigas de CRF é necessária para permitir o uso desse material como substituto total ou parcial da armadura transversal. Estudos realizados nas últimas décadas demonstraram ganhos significativos de resistência, ductilidade e controle de fissuração com a adição de fibras. Essas características viabilizam a aplicação do CRF em elementos estruturais, possibilitando a substituição total ou parcial de armaduras transversais por fibras, gerando ganho de produtividade, redução de custos com material e mão-de-obra e concepção de estruturas mais esbeltas em comparação à solução convencional em concreto armado. Contudo, ainda existem lacunas quanto à quantificação da contribuição das fibras em diferentes condições de projeto.

Lantsoght (2019a) realizou um dos levantamentos mais abrangentes sobre vigas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), compilando 488 resultados experimentais e comparando-os com modelos empíricos e especificações de normas. A autora realizou uma análise do intervalo dos parâmetros dos experimentos do banco de dados de sua pesquisa, conforme apresentado na Figura 1. Com relação à dimensão das vigas ensaiadas, observa-se na Figura 1(a) uma aglomeração na faixa de pequenas alturas efetivas (altura útil d). O vão de cisalhamento (a/d) dos experimentos estão distribuídos entre 0 e 4,5 (Figura 1(b)), sendo que a faixa mais utilizada de a/d foi de 3,0 a 3,5. Em termos de resistência à compressão do concreto, a Figura 1(c) mostra que os resultados no banco de dados estão concentrados na faixa de resistência normal do concreto, com alguns valores atípicos para concreto de alta e ultra-alta resistência. Para a taxa de armadura longitudinal observa-se na Figura 1(d) que a maioria das vigas possui grandes quantidades de armadura longitudinal, como é típico para experimentos de cisalhamento onde são utilizadas armaduras de tração extra para evitar uma ruptura por flexão e os experimentos são distribuídos uniformemente na faixa de 1,5 a 3,5% de reforço. A Figura 1(e) mostra que concentração do teor de fibras na faixa de 0,5 a 1,5%, o que é esperado, pois esses teores são valores práticos que resultam em misturas com boa trabalhabilidade e aplicados para substituir parcialmente (e não totalmente) o reforço de armadura transversal. Da mesma forma, para o fator da fibra F , a Figura 1(f) reflete considerações práticas e trabalhabilidade do CRFA. Em resumo, a distribuição dos principais parâmetros investigados nesse banco de dados evidencia algumas concentrações:

predominância de concretos de resistência convencional (até 50 MPa), teores de fibras entre 0,5% e 1,5% e uso majoritário de fibras de aço com ancoragem nas extremidades. Isso indica que há pouco conhecimento acumulado sobre concretos de alta resistência (50–90 MPa), sobre o uso de diferentes tipos de fibras e sobre a caracterização completa do material em relação à compressão, tração e cisalhamento.

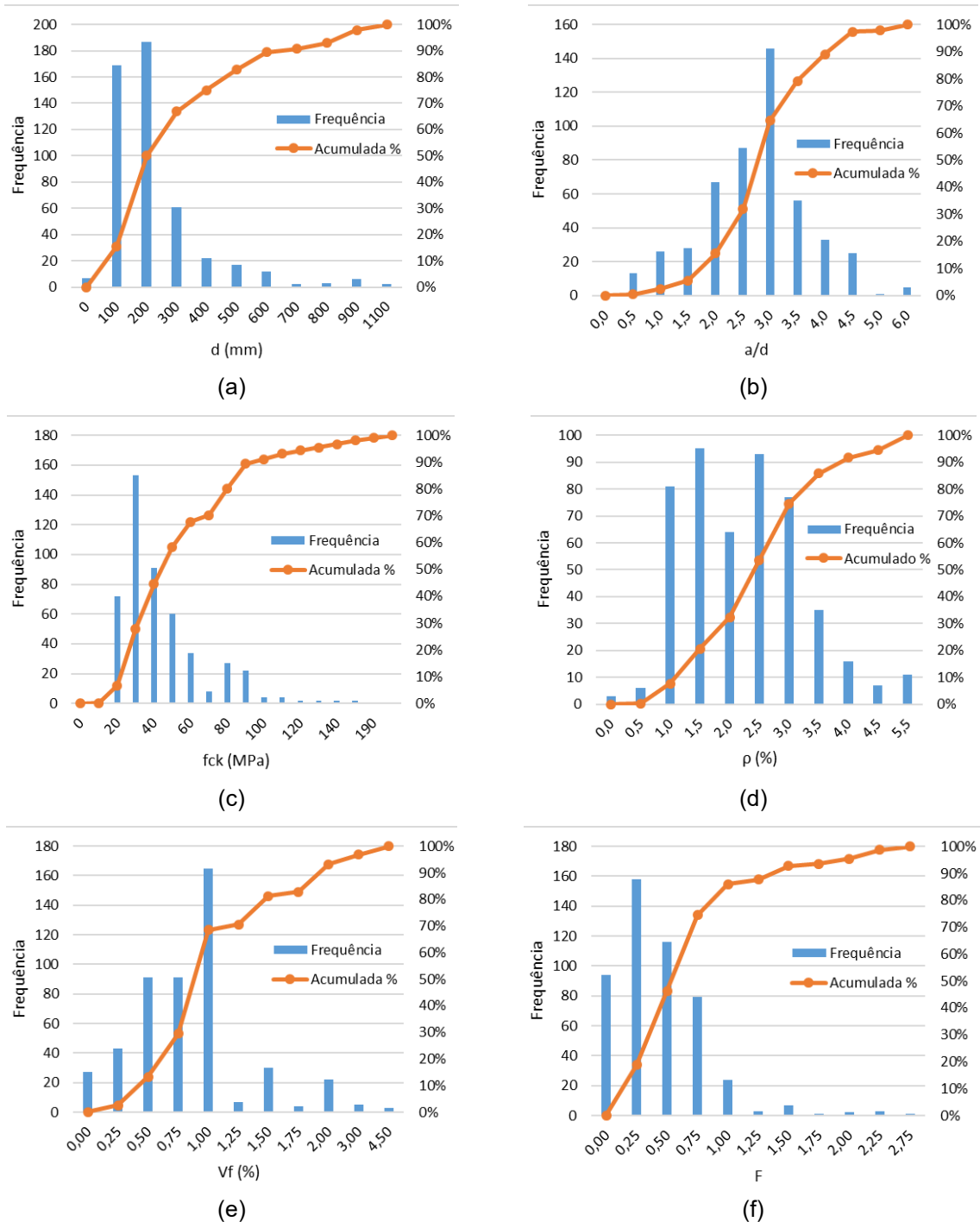
Esse cenário foi confirmado pelo levantamento bibliográfico adicional realizado nesta pesquisa, apresentado na Tabela 1. Esse levantamento foi conduzido por meio da busca integrada do Portal de Periódicos CAPES, acessado via CAFE, com consultas complementares às bases *Scopus* e *Web of Science*. As buscas utilizaram combinações das palavras-chave “cisalhamento”, “concreto reforçado com fibras” e “vigas”, caracterizando uma pesquisa direcionada, e não uma revisão sistemática. Observa-se que a maioria dos estudos em vigas concentra-se em concretos de até 50 MPa e em baixos teores de fibras, além de dar maior ênfase a ensaios de flexão em quatro pontos do que à caracterização completa do CRF (compressão, tração e cisalhamento direto). São raros os trabalhos que correlacionam propriedades mecânicas do material com o desempenho estrutural ao cisalhamento, o que dificulta a calibração de modelos normativos.

Diante desse contexto, esta pesquisa se justifica pela necessidade de explorar parâmetros ainda pouco estudados, envolvendo o uso de concretos de alta resistência (C55 a C90), diferentes tipos e teores de fibras e a caracterização mecânica do concreto de alta resistência reforçado com fibras (CARRF) associada a ensaios em vigas sem armadura transversal. Além da fibra de aço, optou-se também pelo uso de macrofibras poliméricas, considerando a carência de resultados experimentais disponíveis na literatura para esse tipo de reforço, em comparação com as fibras metálicas, que vêm sendo estudadas há mais tempo e contam com um volume significativamente maior de pesquisas publicadas. Assim, este trabalho buscou ampliar o banco de dados experimental sobre o comportamento em relação ao cisalhamento do CARRF, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre o comportamento mecânico desse material.

Como principal inovação, o trabalho propôs a calibração de uma formulação, baseada em resultados experimentais, para a previsão da capacidade resistente ao cisalhamento de vigas de CARRF, contribuindo para a compreensão do comportamento ao cisalhamento desses elementos e fornecendo subsídios para o aprimoramento das formulações para dimensionamento.

Figura 1. Distribuição dos parâmetros do banco de dados de Lantsoght (2019a):

(a) altura útil; (b) vão de cisalhamento; (c) resistência à compressão; (d) taxa de armadura longitudinal; (e) teor de fibra e (f) fator da fibra F



Fonte: Adaptado de Lantsoght (2019a)

Tabela 1. Levantamento bibliográfico realizado

Referência	Fibra		Concreto f _{ck} (MPa)	Ensaio						
	Tipo	Teor		Caracterização				Vigas		
				CA	TP	TC	CS	3PT	4PT	a/d
Barragán <i>et al.</i> (2006)	Aço	0, 0,25 e 0,5%	30 70	X			X			
Kragh-Poulsen <i>et al.</i> (2010)	Aço e sintética	0 e 0,5%	30	X		X		X		
Moreno e Vedoato (2011)	Aço	0 e 0,5%	40 60 80	X		X			X	4
Khanlou <i>et al.</i> (2013)	Aço	0, 0,25, 0,5, 0,75 e 1%	35 60	X			X			
Araújo <i>et al.</i> (2014)	Aço	0, 1 e 2%	50	X	X		X		X	2,5
Amin e Foster (2016)	Aço	0, 0,25 e 0,5%	40	X	X	X			X	2,5
Blanco <i>et al.</i> (2017)	Aço e Sintética	0, 0,5 e 0,75%	40	X			X			
Li <i>et al.</i> (2017)	Aço e Sintética	0, 0,5 e 1,5%	70	X			X			
Patil e Sangle (2017)	Aço	0 e 1,5%	40	X				X	X	3,0
Doyon-Barbant e Charron (2018)	Aço	0 e 1%	105	X			X			
Leone <i>et al.</i> (2018)	Aço	0 e 0,5%	35	X	X	X	X			
Vitor <i>et al.</i> (2018)	Aço	0, 0,5 e 0,75 %	20 40	X		X			X	2,5
Navas <i>et al.</i> (2018)	Sintética	0 e 1%	40	X	X			X		
Picazo <i>et al.</i> (2018)	Sintética	0, 0,5, 0,75 e 1%	20 50	X	X		X			
Zhao <i>et al.</i> (2018)	Aço	0, 0,5, 1, 1,5 e 2%	35	X		X			X	2,0
Costa <i>et al.</i> (2019)	Aço	0, 0,5 e 1%	40	X		X	X			
Gali e Subramaniam (2019)	Aço	0, 0,5 e 0,75 %	40	X				X	X	2,5
Ismail e Hassan (2019)	Aço e sintética	2%	55	X		X			X	2,5

Referência	Fibra		Concreto f _{ck} (MPa)	Ensaio						
	Tipo	Teor		Caracterização				Vigas		
				CA	TP	TC	CS	3PT	4PT	a/d
Perceka <i>et al.</i> (2019)	Aço	1,5%	70	X					X	2 a 4
Torres e Lantsoght (2019)	Aço	0, 0,3, 0,6, 0,9 e 1,2%	30	X	X				X	2,85
Cuenca <i>et al.</i> (2020)	Aço e Sintética	0, 0,3 e 0,5%	40	X	X		X			
Qasim (2020)	Aço	0, 1 e 2%	40 80	X			X			
Yuan <i>et al.</i> (2020)	Aço	0 e 0,75%	70	X	X		X		X	3,0
Ibrahim <i>et al.</i> (2021)	Aço	0, 0,5, 1, 1,5%	30	X					X	2,5
Xu <i>et al.</i> (2020)	Sintéticas	0 a 1%	50	X			X			
Araújo <i>et al.</i> (2021)	Aço	0, 0,5 e 1,5%	70	X			X			
Karimipour e Ghalehnovi (2021)	Aço e sintética	0, 1 e 2%	35	X		X			X	2,5
Resende (2020)	Aço	0, 0,5 e 1%	40	X	X		X		X	2,5
Shoaib e Lubell (2021)	Aço	0, 0,5 e 1%	45 105	X	X		X			
Trindade <i>et al.</i> (2021)	Aço	0, 0,5 e 1%	30	X		X	X			
Visser e Boshoff (2021)	Aço	0, 0,6 e 1%	45	X	X			X		
Zhang e Deng (2021)	Sintética	0, 1 e 2%	60	X			X			

Legenda:

CA – Ensaio para determinação da resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos ou cúbicos

TP - Ensaio para determinação da resistência residual à tração compressão em corpos de prova prismáticos

TC - Ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral

CS – Ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento direto

3PT – Ensaio de flexão em 3 pontos em vigas

4PT – Ensaio de flexão em 4 pontos em vigas

a/d – Vão de cisalhamento

Fonte: Autoria própria

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Neste Capítulo 1 constam a introdução, objetivos e justificativa, com demais capítulos descritos a seguir.

No Capítulo 2 estão apresentados os conceitos e fundamentos sobre o concreto reforçados com fibras, uma breve discussão sobre o efeito das fibras na resistência ao cisalhamento do CRF, as recomendações de normas sobre o dimensionamento ao cisalhamento de elementos em CRF e uma revisão sobre os ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento do CRF.

No Capítulo 3 estão apresentados os mecanismos de transferência de tensões por cisalhamento em vigas sem estribos, os fatores que afetam a resistência ao cisalhamento de vigas de CRF sem estribos e modelos para previsão da resistência ao cisalhamento de vigas de CRF além de uma descrição de alguns estudos de vigas de CRF a partir de ensaios experimentais.

No Capítulo 4 estão apresentados os materiais, equipamentos e métodos utilizados no desenvolvimento do programa experimental deste estudo.

No Capítulo 5 estão apresentados os resultados da Etapa 1 do programa experimental referente à caracterização mecânica do CRF.

No Capítulo 6 estão apresentados os resultados da Etapa 2 do programa experimental referente aos ensaios em vigas esbeltas de CRF.

No Capítulo 7 estão reunidas a verificação de equações para previsão da resistência ao cisalhamento direta e a verificação das formulações de normas para previsão da resistência ao cisalhamento em vigas sem armadura transversal, e a calibração de um modelo alternativo para a ABNT NBR 16935 (2021), fundamentado no EC2-2020 (2023) e ajustado aos resultados experimentais desta pesquisa.

E, finalmente, no Capítulo 8 estão apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

O *fib* Model Code 2020 (2024), a norma americana ACI 544.3R-18 (2018) e a norma brasileira ABNT NBR 16935 (2021) apresentam uma definição muito similar para o concreto reforçado com fibras (CRF): um material compósito, caracterizado por uma matriz cimentícia com fibras descontínuas estáveis em meio alcalino.

Segundo MacGregor e Wight (2012), o CRF refere-se ao concreto reforçado com fibras curtas e orientadas aleatoriamente. De acordo com o tipo de material, as fibras podem ser divididas em quatro grandes grupos: fibras de aço (metálicas), fibras de vidro (cerâmicas), fibras sintéticas e fibras naturais. A quantidade de fibras adicionadas ao concreto depende do tipo de fibra e do desempenho desejado, mas considerações práticas limitam a dosagem de fibra em elementos estruturais a aproximadamente 1,5 % em volume.

As aplicações tradicionais de concreto reforçado com fibras incluem lajes apoiadas sobre o solo (pisos e radiers), revestimentos de túneis e elementos arquitetônicos, onde as fibras têm sido usadas principalmente como substituição de reforço mínimo para controle de fissuração e, em menor grau, substituição de reforço mínimo de cisalhamento e/ou flexão (MACGREGOR E WIGHT, 2012). Picazo *et al.* (2021) também citam a utilização do CRF em passarelas de pedestre e estruturas de coberturas.

As aplicações de concreto reforçado com fibras em estruturas de edifícios, por outro lado, têm sido bastante limitadas. Isso se deve principalmente a pesquisas experimentais limitadas sobre o comportamento de elementos estruturais e, conseqüentemente, à falta de disposições de projeto nas normas. Somente na edição de 2008, o concreto reforçado com fibras foi reconhecido como um material estrutural no Código ACI 318 (MACGREGOR E WIGHT, 2012).

As pesquisas sobre aplicações estruturais do concreto reforçado com fibras têm se concentrado principalmente em seu uso como reforço de cisalhamento em vigas e placas planas, e como reforço de cisalhamento e/ou confinamento em elementos sujeitos a elevadas tensões de cisalhamento reversas (*high shear reversals*), como ligações viga-pilar, paredes estruturais e vigas de acoplamento de estruturas resistentes a terremotos (MACGREGOR E WIGHT, 2012).

Em 2008 o Código ACI 318 permitiu pela primeira vez o uso de fibras de aço deformadas como armadura mínima de cisalhamento em vigas. A fim de levar em conta as diferenças de desempenho entre várias fibras, bem como os teores de fibras, os critérios de

desempenho são usados para aceitação do concreto reforçado com fibras, com base em testes de flexão conforme ASTM 1609 (MACGREGOR E WIGHT, 2012).

2.1 MATRIZ, FIBRA E INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

Para uma completa descrição do CRF é necessário descrever toda a estrutura que compõem o material, ou seja, a matriz, as fibras e a interação fibra-matriz (BENTUR E MINDESS, 2007).

De acordo com Bentur e Mindess (2007) a matriz cimentícia pode ser dividida em dois tipos, dependendo da sua composição: pasta ou argamassa (mistura de cimento, areia e água) e concreto (mistura de cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água). As pastas ou argamassas de cimento reforçado com fibras são geralmente aplicadas em elementos de chapas finas, como cimentos reforçados com celulose e fibra de vidro, que são usados principalmente para revestimento. Nessas aplicações, as fibras atuam como reforço principal e seu teor geralmente está na faixa de 5 a 15% em volume. Nos concretos reforçados com fibras, o volume de fibras é muito menor, geralmente em teores menores que 2% em volume, e as fibras atuam como reforço secundário, principalmente para fins de controle de fissuras e a produção de tais concretos é realizada por meios convencionais. Teores mais altos de fibras podem ser incorporados por tecnologias de mistura relativamente simples, mas usando formulações de matriz avançadas que são baseadas em controle sofisticado da reologia e microestrutura da mistura.

Segundo Figueiredo (2011b) as fibras são componentes descontínuos, cujo comprimento é bem maior que as dimensões da seção transversal. Pode-se dividir as fibras de acordo com seu material de origem: metal, cerâmicos e poliméricos sintéticos ou naturais.

No grupo das fibras metálicas as mais comuns são as fibras de aço. Essas normalmente possuem ganchos nas suas extremidades para aumentar a ancoragem da fibra na matriz e comprimento variando entre 25mm (fibras curtas) e 60mm (fibras longas). As fibras de aço podem ser fornecidas soltas ou coladas em pentes, o que facilita o processo de mistura e homogeneização do material (FIGUEIREDO, 2011b).

No grupo das fibras cerâmicas, também conhecidas como fibras minerais, estão as fibras de vidro, carbono e asbesto. As fibras de vidro geralmente são produzidas na forma de 'cachos', fios compostos de centenas de filamentos individuais. O diâmetro dos filamentos individuais depende das propriedades do vidro, tamanho do furo por onde são extrusados e velocidade de extrusão, sendo da ordem de 10 µm. Existem fibras produzidas a partir do vidro tipo E (*Electrical*) que são atacadas pelos álcalis presentes nos materiais baseados em

cimento Portland, e fibras tipo AR (*Álcali Resistente*) que apresentam resistência ao meio alcalino e por isso têm sido utilizadas com sucesso nas matrizes cimentícias a base de cimento Portland (CARNIO, 2009).

As fibras de carbono são as mais novas e promissoras fibras no desenvolvimento de materiais compósitos, baseados na resistência das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono. Essas fibras podem ser classificadas como: fibras de alta resistência (2400 MPa) com módulo de elasticidade de 240 GPa e fibras de alto módulo (420 GPa) com resistência à tração de 2100 MPa.

As fibras de asbestos ou amianto possuem resistência à tração média de 1000 MPa, módulo de elasticidade de aproximadamente 160 GPa e diâmetro muito pequeno, aproximadamente 1 µm, sendo este um dos fatores que justificam a ótima aderência das fibras com a matriz cimentícia. Essas fibras são mais tradicionais do que as demais devido sua ocorrência natural, entretanto, estatísticas demonstram um acelerado decréscimo no uso de placas de cimento amianto devido, principalmente, aos danos que o amianto causa à saúde (CARNIO, 2009).

As fibras poliméricas podem ser divididas em sintéticas e naturais. As poliméricas sintéticas mais utilizadas são as fibras de polipropileno, poliéster, polietileno e poliamida. As fibras de poliéster têm aparência similar às fibras de polipropileno, mas são mais densas, mais rígidas e mais resistentes. Elas podem ser usadas para as mesmas aplicações que as de polipropileno. Um dos poliésteres mais conhecidos é o polietileno tereftalato (PET). As fibras de polietileno, de peso molecular normal, têm um módulo de elasticidade baixo, são fracamente aderidas à matriz cimentícia e são altamente resistentes aos álcalis. As fibras de poliamida ou Kevlar, a fibra orgânica comercial de maior sucesso, são constituídas de um polímero denominado de poliamida (CARNIO, 2009).

As fibras poliméricas naturais, também conhecidas como fibras vegetais, são de uso do homem há milênios. As fibras vegetais são utilizadas na formação de diversos compostos, mas também podem ser degradadas pela ação de fungos e micro-organismos. A produção de materiais de cimento Portland comum reforçados com fibras vegetais não teve sucesso devido à rápida degradação dos compostos ocasionada pela elevada alcalinidade da água presente nos poros da matriz do cimento. O uso de fibras vegetais em países em desenvolvimento visa, geralmente, o emprego de matéria-prima barata para a confecção de placas, painéis e paredes. As fibras vegetais utilizadas em materiais compósitos podem ser de bambu, juta, capim elefante, coco, piaçava, linho, cana-de-açúcar, sisal, malva e bananeira (CARNIO, 2009).

Segundo Bentur e Mindess (2007), os compósitos cimentícios são caracterizados por uma zona de transição interfacial nas proximidades da inclusão de reforço, na qual a

microestrutura da matriz da pasta é consideravelmente diferente da longe da interface. A natureza e o tamanho desta zona de transição dependem do tipo de fibra e a tecnologia de produção; e em alguns casos, pode mudar consideravelmente com o tempo. Essas características da interface fibra-matriz exercem vários efeitos que devem ser levados em consideração, especialmente no que diz respeito à ligação fibra-matriz e ao processo de descolamento na interface.

A microestrutura especial da zona de transição em compósitos cimentícios está intimamente relacionada à natureza particulada da matriz. A matriz consiste em partículas discretas de cimento que variam em diâmetro entre 1 e 100 μm (com um tamanho médio em torno de 10 μm) na mistura fresca, que na hidratação reagem para formar principalmente partículas coloidais de CSH (silicato de cálcio hidratado) e cristais maiores de CH (hidróxido de cálcio). A natureza particulada da mistura fresca exerce uma influência importante na zona de transição, pois leva à formação de espaços cheios de água ao redor das fibras devido aos efeitos de aprisionamento de água ao redor do reforço e empacotamento ineficiente dos grãos de cimentos ao redor da superfície da fibra (BENTUR E MINDESS, 2007).

Assim, a matriz na vizinhança da fibra é muito mais porosa do que a matriz da pasta, e isso se reflete no desenvolvimento da microestrutura à medida que a hidratação avança: a zona de transição inicialmente preenchida com água não desenvolve a microestrutura densa típica da matriz em massa, e contém um volume considerável de cristais de CH, que tendem a se depositar em grandes cavidades. Ao considerar o desenvolvimento da microestrutura na zona de transição, deve ser feita uma distinção entre fibras monofilamentares discretas separadas umas das outras (por exemplo, aço) e filamentos agrupados (por exemplo, vidro). Com fibras monofilamentares, toda a superfície da fibra pode estar em contato direto com a matriz; com filamentos agrupados apenas os filamentos externos tendem a ter acesso direto à matriz (BENTUR E MINDESS, 2007).

2.2 PROPRIEDADES DO CRF

As fibras são utilizadas principalmente por sua capacidade de resistência à tração pós-fissuração do concreto. Portanto, para avaliar o comportamento à compressão do concreto reforçado com fibras, o comportamento à tração do CRF também deve ser avaliado. A adição de fibras ao concreto em dosagens baixas a moderadas (menor que 1,5 % em volume) não afeta significativamente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. No entanto são observadas melhorias no comportamento pós-pico, caracterizadas por uma maior capacidade de deformação na compressão e tenacidade. Em tração, a capacidade das fibras

de melhorar o comportamento pós-fissuração do CRF depende principalmente da resistência da fibra, da rigidez da fibra e da ligação com a matriz de concreto circundante. Ao contrário das barras de reforço, que são projetadas para serem ancoradas no concreto de modo que sua resistência ao escoamento possa ser desenvolvida, as fibras são projetadas para serem arrancadas da matriz de concreto antes de atingir sua resistência. O comportamento do CRF é altamente dependente da capacidade das fibras manterem uma boa aderência com o concreto até o arrancamento (MACGREGOR E WIGHT, 2012).

Fissuras estão inerentemente presentes no concreto, e a rápida propagação das mesmas provoca a baixa resistência à tração do material. Segundo Mehta e Monteiro (2014), estudos experimentais mostram que a adição de fibras ao concreto e argamassas convencionais, em teores usuais considerados “convenientemente” para aplicações práticas — tipicamente entre 0,25% e 1,0% em volume — não oferece melhora significativa na resistência do material em comparação às correspondentes misturas sem fibras. Por outro lado, os pesquisadores observaram considerável melhora no comportamento pós-fissuração dos concretos reforçados com fibras, ou seja, apesar das resistências últimas à tração não aumentarem consideravelmente, as deformações de tração na ruptura aumentaram.

Assim, quando comparado ao concreto convencional, o concreto reforçado com fibras possui maior tenacidade e maior resistência ao impacto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Salvador e Figueiredo (2013) reportam que a adição de fibras ao concreto proporciona uma melhora significativa em várias propriedades mecânicas do material, principalmente na tenacidade à flexão e na resistência à fadiga e ao impacto. A principal função das fibras segundo os autores é aumentar a capacidade de absorção de energia, pois elas reduzem a abertura, propagação e expansão das fissuras, uma vez que atuam como pontes de transferência de tensões através dessas.

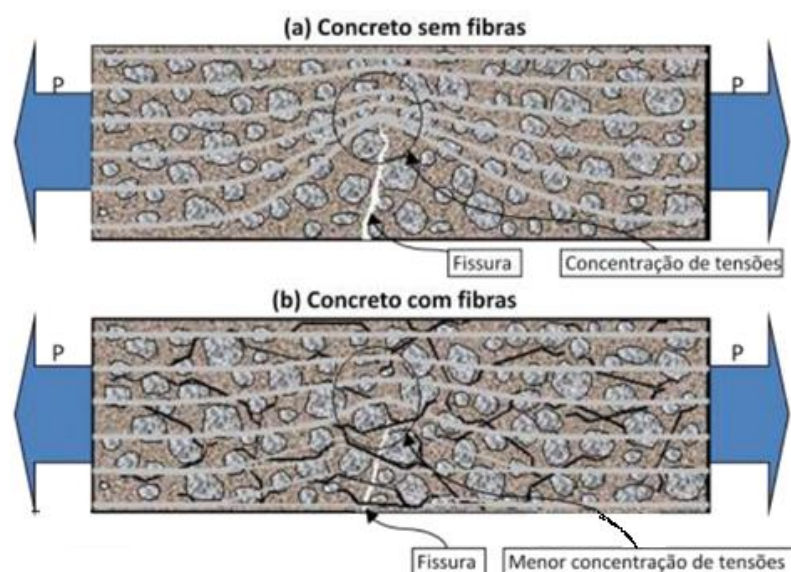
O concreto reforçado com fibras possui maior ductilidade em relação ao concreto simples, que tem sua capacidade resistente diminuída após a formação da primeira fissura. Portanto, as fibras, quando adicionadas em certas porcentagens ao concreto melhoram as propriedades de deformação assim como a resistência às fissuras, a ductilidade, a resistência à flexão e a tenacidade do material (CHAWLA e TEKWANI, 2013).

Na Figura 2 está representado o esquema da concentração de tensões para o concreto simples e para o concreto reforçado com fibras.

No concreto simples, Figura 2(a), a fissura representa uma barreira à propagação das tensões, representadas de maneira simplificada pelas linhas de tensões. Em função deste desvio das linhas de tensão há uma concentração de tensões na extremidade da fissura e ocorrerá a ruptura quando essa tensão superar a capacidade resistente do material, caracterizando o comportamento frágil do concreto.

As fibras, quando adicionadas ao concreto num teor adequado, atuam como pontes de transferência de tensões através das fissuras, diminuindo a concentração das mesmas nas extremidades das fissuras (Figura 2(b)) e reduzindo consideravelmente a velocidade de propagação das fissuras no material, que passa a ter um comportamento não frágil, preservando a resistência mecânica das seções (Figueiredo, 2011a).

Figura 2. Esquema de concentração de tensões para (a) concreto simples e (b) concreto com reforço de fibras



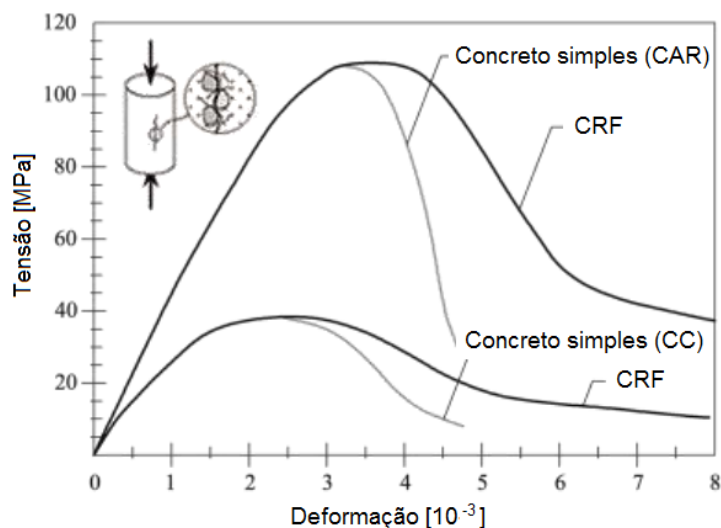
Fonte: Figueiredo (2011)

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a trabalhabilidade do concreto é reduzida com a adição de qualquer tipo de fibra à mistura e essa redução é proporcional ao volume de fibras adicionadas. O aumento da resistência e tenacidade do concreto reforçado com fibras é proporcional ao teor de fibra utilizado, e os maiores ganhos nestas propriedades são conseguidos com elevados teores de fibras, o que reduz significativamente a trabalhabilidade da mistura.

Para aplicações estruturais com concreto convencional e de alta resistência, a classificação do material é baseada na resistência residual pós-fissuração. Para uso estrutural, deve ser garantido um desempenho mecânico mínimo do CRF. As fibras podem ser usadas para melhorar o comportamento no ELS, pois podem reduzir o espaçamento e a largura das fissuras, melhorando assim a durabilidade. As fibras também podem ser utilizadas para melhorar o comportamento no ELU, substituindo parcial ou totalmente o reforço transversal (estribos). As propriedades mecânicas de uma matriz cimentícia são modificadas quando as fibras são adicionadas. No entanto, as propriedades elásticas e a resistência à

compressão (Figura 3) não são significativamente afetadas pelas fibras, a menos que uma alta porcentagem de fibras seja usada (CUENCA, 2012).

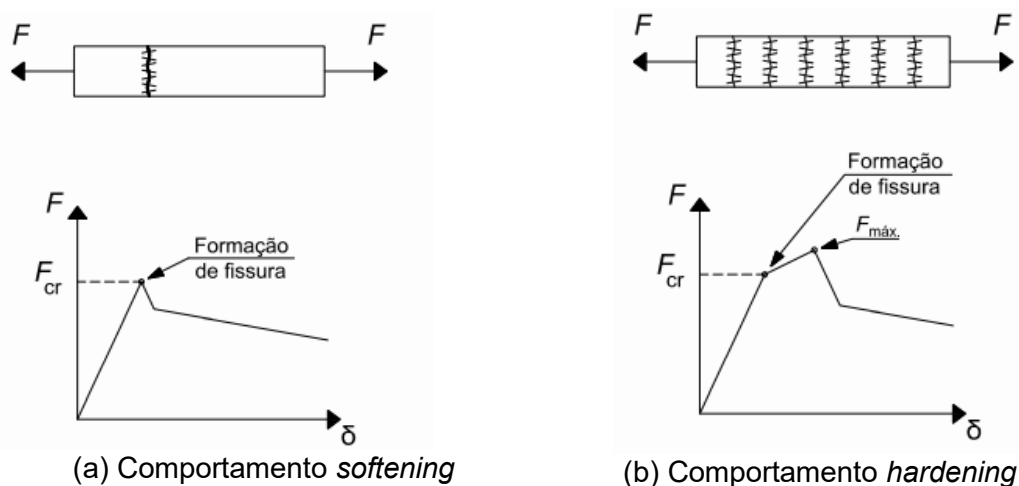
Figura 3. Principais diferenças entre concreto simples e concreto reforçado com fibras com resistência convencional (CC) e alta resistência (CAR) sob compressão uniaxial



Fonte: Cuenca (2012)

Dependendo de sua composição, o comportamento mecânico pós-fissuração do CRF submetido à tração direta pode se apresentar de dois tipos, conforme apresentado na Figura 4: (a) amolecimento (*softening*) ou (b) endurecimento (*hardening*). No caso do comportamento *de amolecimento* as deformações localizam-se em uma fissura e há redução gradual dos valores de força abaixo da força crítica (F_{cr}). No caso de comportamento *de endurecimento*, ocorrem múltiplas fissuras antes de atingir a força máxima ($F_{máx}$) e há o aumento inicial dos valores de força (F) (ABNT NBR 16935, 2021).

Figura 4. Comportamento do CRF sob tração direta



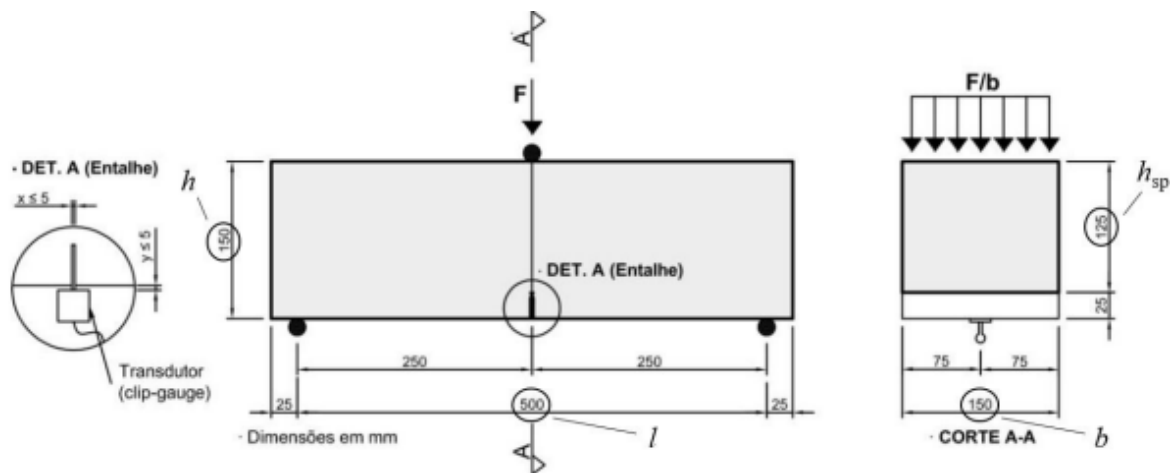
(a) Comportamento *softening*

(b) Comportamento *hardening*

Fonte: ABNT NBR 16935 (2021)

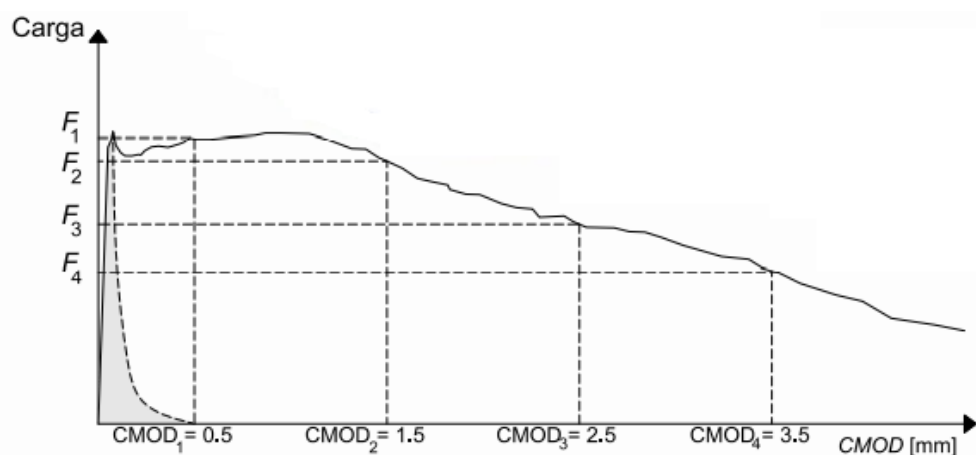
Para determinar o comportamento pós-fissuração do CRF, que é a sua característica mais importante, a ABNT NBR 16935 (2021) indica o ensaio de flexão em corpos de prova com entalhe conforme a ABNT NBR 16940 (2021), que segue os mesmos procedimentos da norma europeia EN 14651 (2007). O ensaio de flexão em 3 pontos é realizado em corpo de prova prismático com entalhe (Figura 5) e a partir dele são determinadas as resistências residuais (f_L , $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, e $f_{R,4}$) e é obtido o diagrama força vs abertura da fissura (CMOD, do inglês *crack mouth opening displacement*) conforme apresentado na Figura 6.

Figura 5. Esquema de ensaio para determinação das resistências residuais à tração segundo ABNT NBR 16940 (2021)



Fonte: Carnio (2018)

Figura 6. Curva força x CMOD obtida a partir do ensaio



Fonte: ABNT NBR 16935 (2021)

2.3 CRF E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A distribuição e orientação aleatórias das fibras proporcionam um reforço em pequenos espaçamentos nas três dimensões, algo impossível de se obter com as armaduras convencionais (barras). Esse mecanismo promove uma capacidade de tração mais homogênea em todo o volume do concreto, reduzindo concentrações de tensões localizadas e aumentando a uniformidade na resposta mecânica do material. Dessa forma, as fibras interceptam e transferem tensões através das fissuras formadas em diferentes direções, o que melhora o desempenho pós-fissuração do concreto e eleva a resistência global do elemento estrutural à tração e ao cisalhamento. Por essas razões, as fibras podem contribuir significativamente para a resistência do concreto submetido a esforços cortantes (ARAÚJO *et al.*, 2014).

A resistência ao cisalhamento está fortemente relacionada à resistência à tração do concreto. Nesse sentido, como as fibras de aço melhoram a resposta pós-fissuração à tração, também podem aumentar a capacidade resistente ao cisalhamento de vigas de concreto (VISSER; BOSHOF, 2021).

A adição de fibras contribui não apenas para a resposta à tração, mas também para o comportamento ao cisalhamento do material. Por um lado, atuam como pequenas barras de reforço distribuídas, costurando as fissuras e restringindo os deslocamentos de cisalhamento (ponte de transferência de tensões). Por outro, limitam a abertura das fissuras por dilatação, gerando tensões normais de confinamento que mantêm o intertravamento dos agregados (BLANCO *et al.*, 2017).

Além disso, as fibras aumentam a eficiência dos mecanismos resistentes ao cisalhamento, como o intertravamento dos agregados e o efeito pino. Outra vantagem de sua utilização é a elevação da ductilidade e a redução da fissuração por retração plástica (VISSER; BOSHOF, 2021).

Por outro lado, a presença das fibras pode afetar negativamente as propriedades reológicas do concreto, sendo que teores elevados (acima de 2%) representam uma preocupação em relação à trabalhabilidade (VISSER; BOSHOF, 2021).

2.3.1 Efeito das fibras na resistência ao cisalhamento e modo de falha

A ruptura por cisalhamento frágil e catastrófica do concreto pode ser mitigada pela adição de fibras de aço. Pesquisas realizadas têm demonstrado que as fibras de aço melhoraram o desempenho ao cisalhamento tanto do concreto convencional quanto dos concretos de alta resistência (MIRSAYAH; BANTHIA, 2002; NARAYANAN; DARWISH, 1987).

O principal efeito das fibras de aço está relacionado ao aumento da capacidade resistente ao cisalhamento da viga e ao aumento da carga de primeira fissuração, correspondente ao início da fissura de cisalhamento. A adição de fibras de aço ao concreto permite, assim, um aumento substancial da resistência ao cisalhamento. A eficácia desse reforço depende de diversos fatores, incluindo propriedades da matriz, propriedades da fibra (propriedades dos materiais, proporção e forma), teor de fibra e o comportamento de aderência na interface fibra-matriz (CUENCA, 2012).

Resultados dos ensaios de cisalhamento em vigas de concreto armado com fibras (de aço e poliméricas) e sem estribos, mostram que a adição de 0,5% de volume de fibra de aço ou 0,5% de volume de fibra poliméricas aumenta resistência ao cisalhamento e altera o modo de falha de cisalhamento, tornando-o mais dúctil do que o modo de falha das vigas de concreto convencionais (KRAGH-POULSEN; HOANG; GOLTERMANN, 2010).

A partir dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto, Araújo *et al.* (2014) verificaram que a adição das fibras de aço aumenta a resistência ao cisalhamento do concreto. A adição de 1% de fibras aumentou em 87% a resistência última ao cisalhamento enquanto a adição de 2% proporcionou um aumento de 99%. Nas vigas com adição de 1% e 2%, as fibras causaram uma diminuição na abertura da fissura de cisalhamento e nas vigas com 2% de fibras e baixa taxa de armadura transversal elas foram capazes de modificar o modo de ruptura, de cisalhamento para flexão.

Vitor *et al.* (2017) realizaram ensaios em vigas de concreto reforçado com fibras de aço e verificaram aumento na capacidade resistente ao cisalhamento e ductilidade das vigas de CRFA em comparação às vigas sem fibras. Os autores observaram uma mudança no padrão de fissuração e modo de ruptura das vigas: as vigas sem fibras romperam por cisalhamento sem aviso, com uma única fissura diagonal enquanto as vigas com fibras romperam por cisalhamento com múltiplas fissuras e alargamento da fissura antes da ruptura (com aviso) ou sofreram ruptura por solicitação combinada (cortante e flexão) apresentando um número significativo de fissuras diagonais e de flexão antes da ruptura.

Ensaio em vigas de CRFA, com e sem protensão, mostraram que a capacidade de carga das vigas de CRFA foi maior que a das vigas de concreto simples em aproximadamente 30 a 50% para as vigas sem protensão e 30 a 90% para as vigas protendidas de CRFA. Verificou-se que o uso de fibras de aço aumentou a resistência à fissuração das vigas que apresentaram falhas dúcteis, ao contrário das vigas sem fibras que apresentaram ruptura frágil. As vigas protendidas de CRFA tiveram maiores resistência ao cisalhamento, a resistência à flexão e a resistência à fissuração (PATIL; SANGLE, 2017).

Os resultados de Yuan *et al.* (2020) demonstram de forma clara o potencial das fibras de aço na substituição da armadura mínima de cisalhamento em elementos de concreto de

alta resistência. A viga de referência, sem estribos e sem fibras, apresentou a menor capacidade resistente, enquanto a introdução de estribos mínimos elevou a carga última em cerca de 72%. Já a viga reforçada exclusivamente com 0,75% de fibras de aço apresentou um aumento de aproximadamente 82% em relação à viga sem reforço, além de uma capacidade cerca de 13% superior à da viga com armadura mínima transversal. Esses resultados mostram que, nesse teor, as fibras podem cumprir a função de armadura mínima de cisalhamento.

Ensaio realizados em vigas pré-moldadas de CRFA e seção transversal do tipo V realizados por Visser e Boshoff (2021) corroboram esse comportamento e detalham os mecanismos associados. Verificou-se que a resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento do teor de fibras e que 0,75% de fibras podem substituir a armadura mínima de cisalhamento. As fibras elevam a capacidade de carga após a fissuração por cisalhamento e permitem que as vigas resistam a cargas mais altas com maiores aberturas de fissura, além de restringirem a fissuração sob cargas baixas, aspecto relevante para durabilidade. Além disso, as fibras têm o potencial de transformar a ruptura por cisalhamento, tipicamente frágil, em um modo semi-dúctil, oferecendo sinais de advertência antes da falha. Entretanto, Visser e Boshoff (2021) observaram que, quando o aumento de resistência ao cisalhamento proporcionado pelas fibras é muito elevado, a falha pode voltar a apresentar comportamento frágil. Isso ocorre porque o reforço por fibras atua predominantemente na zona tracionada, aumentando substancialmente a capacidade da biela tracionada; com isso, o ponto crítico de ruptura migra para a zona comprimida, levando ao esmagamento da biela de compressão ou do concreto sob o ponto de aplicação da carga — mecanismos intrinsecamente frágeis e sem capacidade de advertência.

2.3.2 Ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento do CRF

Em vista das vantagens do CRF, muitas normas e recomendações técnicas têm formulações propostas para considerar a contribuição das fibras no projeto de elementos sujeito ao cisalhamento. No entanto, o parâmetro que explica tal contribuição depende apenas da resistência à tração residual do CRF obtida por meio de um teste de flexão em pequena escala (BLANCO *et al.*, 2017; PICAZO *et al.*, 2021). Embora esse ensaio seja conveniente para derivar a curva constitutiva de tração para o projeto de vigas de CRF submetidas à flexão, seu uso para verificação da capacidade à força de cisalhamento em projeto pode ser considerado questionável. A distribuição de tensões e a contribuição das fibras em uma fissura devido à flexão tendem a diferir consideravelmente da observada em uma fissura por cisalhamento. Apesar de haver relação entre os comportamentos de cisalhamento e flexão,

esta pode ser uma aproximação muito imprecisa da realidade com possível repercussão negativa em termos de segurança estrutural ou otimização do consumo de material. Da mesma forma, o uso do ensaio de flexão para o controle de qualidade indireto do comportamento de cisalhamento também é questionável, especialmente em um material cuja resposta é fortemente dependente da distribuição das fibras. A falta de um método simples e normalizado para caracterização e controle de qualidade do CRF é a principal razão para esse cenário (BLANCO *et al.*, 2017).

Segundo Picazo *et al.* (2021), considerando que os mecanismos de resistência ao cisalhamento são diferentes dos mecanismos de tração, seria benéfico expandir a pesquisa sobre a resposta do CRF às tensões de cisalhamento. Além disso, segundo os autores existem diversas pesquisas que salientam que não existe um critério unânime quanto ao uso de tensões residuais de flexão para o projeto estrutural sob carga de cisalhamento. Consequentemente, e devido às diferentes conclusões encontradas nas pesquisas, uma visão mais aprofundada nesta questão é altamente recomendada, especialmente quando são empregadas fibras sintéticas em vez de fibras de aço.

Os ensaios de caracterização precisam ter uma execução simples, de fácil reprodução, aplicada com praticidade e confiável, fornecendo resultados que possam ser facilmente processados. Apesar de fornecer relevantes informações sobre o comportamento ao cisalhamento do CRF, os ensaios de vigas em escala não cumprem esses requisitos devido sua alta complexidade, alto peso dos elementos e alto custo. Portanto, estes ensaios não parecem uma solução adequada para uma avaliação sistemática do comportamento ao cisalhamento do CRF (BLANCO *et al.*, 2017).

O conhecimento do modo de falha e tenacidade ao cisalhamento do CRFA é essencial para a introdução dos parâmetros de ductilidade e tenacidade em projetos estruturais relevantes. Se esses parâmetros puderem ser obtidos em ensaios simples eles provavelmente podem ser usados em projetos incluindo chaves de cisalhamento, transferência de tensão alma-mesa (*web-flange*) e resistência à punção (*punching shear resistance*). Além disso, a validação de um método de ensaio simples facilitará a comparação dos diferentes tipos de CRFA dentro da engenharia de materiais destinados a melhorar a transferência de cisalhamento em aplicações como lajes e revestimentos de túneis (BARRAGÁN *et al.*, 2006).

Segundo Picazo *et al.* (2021), a pesquisa sobre o comportamento ao cisalhamento de elementos de CRFA tem sido predominantemente avaliada usando elementos submetidos simultaneamente à tensão de flexão e cisalhamento. Esses estudos poderiam ser considerados para os casos em que o elemento estrutural é submetido a tais situações, sendo de aplicação questionável em balanços curtos ou avaliando a aderência entre elementos de

concreto vazado em momentos diferentes. Os autores também ressaltam que o único teste padronizado disponível, JSCE-SF6 (1990), tem várias desvantagens que causam uma dificuldade para comparar resultados experimentais entre vários tipos de fibras e autores.

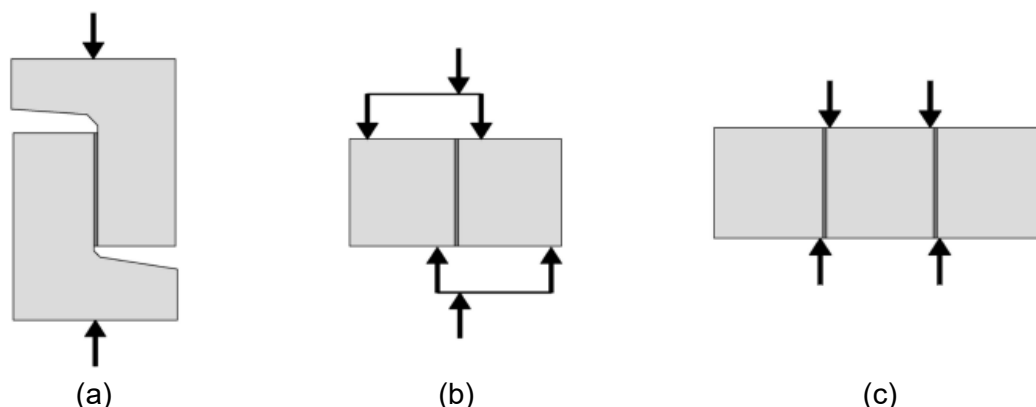
Cuenca *et al.* (2020) e Picazo *et al.* (2021) citam três métodos de ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento direto que têm sido aplicados nas pesquisas sobre o comportamento ao cisalhamento do CRF. A seguir descreve-se esses métodos de ensaio.

Ensaio *Push-off* em forma de Z, também chamado de *Push-off double L* (Figura 7 (a)): este ensaio foi adotado pela primeira vez por Anderson (1960) e posteriormente adotado por Hofbeck *et al.* (1969) e Walraven (1978) (*apud* CUENCA *et al.*, 2020). É o ensaio mais comumente adotado para estudar o intertravamento agregado tanto no caso do concreto simples quanto no caso do CRF. No ensaio, um espécime em forma de Z, com dois entalhes horizontais que formam a seção vertical de ligação, é submetido a uma carga de compressão que provoca uma tensão de cisalhamento na seção resistente (plano de cisalhamento) (CUENCA *et al.*, 2020; PICAZO *et al.*, 2021). Vários estudos foram realizados utilizando este tipo de ensaio, com ou sem barras de reforço interno e CRF ou utilizando corpos de prova pré-fissurados (aproveitamento de corpos-de-prova após realização do ensaio de flexão em 3 pontos). Para melhor compreensão, a Figura 8 mostra um esquema dos espécimes utilizados no ensaio de *Push-off*. Picazo *et al.* (2021) ressaltam que o ensaio produz uma tensão de cisalhamento pura na seção de ligação, embora também possam ser observados efeitos secundários de flexão mínimos nos balanços superior e inferior. Para evitar momentos fletores em ensaios de *Push-off* e obter ensaios de cisalhamento puro, é comum o reforço do corpo de prova por meio de estribos ou reforço externo com de fibra de carbono que podem estar sujeitas à flexão.

Ensaio de cisalhamento padrão FIP (Figura 7 (b)): o ensaio é realizado em um prisma de concreto entalhado e a carga é aplicada próximo ao plano de deslizamento.

Ensaio modificado de cisalhamento segundo a norma japonesa JSCE-SF6 (1990) (Figura 7 (c)): o ensaio de cisalhamento é realizado em prismas de concreto entalhado caracterizados por dois planos de deslizamento simétricos e a carga é aplicada próxima a eles. Este teste é baseado no padrão japonês JSCE-SF6 (1990), que sugere este teste para analisar o comportamento de cisalhamento direto do CRFA. No entanto, é chamado de “modificado”, pois difere do JSCE-SF6 (1990) por causa do entalhe. Alguns autores também tentaram variar os suportes de apoio nos blocos externos em relação ao *Modified JSCE-SF6* para evitar rotações (CUENCA *et al.*, 2020; PICAZO *et al.*, 2021).

Figura 7. Métodos de ensaio para determinação da resistência ao cisalhamento:
(a) Ensaio *Push-off* em forma de Z, (b) Ensaio de cisalhamento padrão FIP e (c) Ensaio modificado de cisalhamento segundo a norma japonesa JSCE-SF6



Fonte: Cuenca *et al.* (2020)

Segundo Mirsayah e Banthia (2002), no ensaio do tipo *Push-off* as condições de tensões se desviam significativamente além do plano de cisalhamento e por isso o ensaio não simula cisalhamento puro, por isso os autores utilizaram em sua pesquisa o método da norma JSCE-G 553 (1999), que é um método modificado da versão JSCE-SF6 (1990). Barragán *et al.* (2006) mencionaram que o corpo de prova com entalhes nos dois lados e a armadura de reforço podem interferir na distribuição das fibras.

Picazo *et al.* (2021) destacaram que todos os tipos de ensaio de cisalhamento introduzem predominantemente tensões cortantes no material, mas ressaltaram que, em alguns casos, surgem tensões de flexão espúrias capazes de influenciar os resultados. No ensaio segundo a JSCE-SF6 (1990), por exemplo, é reconhecida a ocorrência de tensões de flexão nas regiões externas das amostras, o que leva ao reforço dessas zonas e pode alterar a distribuição interna de tensões. O ensaio de duplo cisalhamento apresenta semelhança com o *Push-off*, porém, como as cargas não são aplicadas no mesmo plano, surgem tensões de flexão relevantes. No teste de *Push-off*, por sua vez, as cargas são aplicadas no mesmo plano da seção de ligação, mas o método apresenta limitações práticas: a transferência de esforços ocorre por meio de prismas de aço de alta resistência que induzem flexão nos balanços superior e inferior. A redução das dimensões desses prismas não elimina o problema, podendo inclusive introduzir novos efeitos indesejados, como o esmagamento local do concreto devido às elevadas forças de compressão (PICAZO *et al.*, 2021).

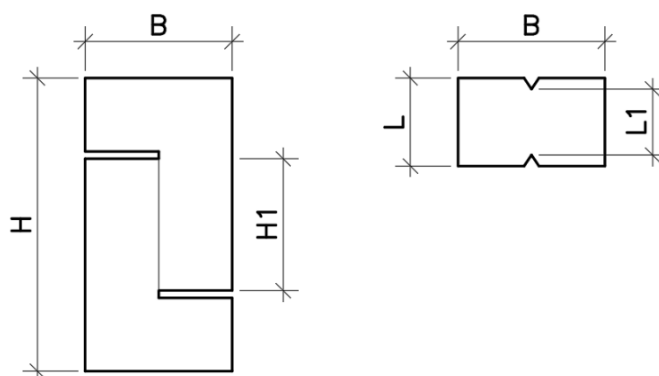
Segundo Cuenca *et al.* (2020), os fatores que podem afetar todos os ensaios, especialmente no caso de CRF, são o atrito no ponto de carregamento (especialmente no caso do teste de cisalhamento padrão FIP e JSCE-SF6 Modificado devido à direção dos campos de compressão), rotação possível do plano de fissuração e da distribuição das fibras.

No entanto, todos esses fatores geralmente não são considerados ou discutidos nos programas experimentais relatados na literatura.

Segundo Picazo *et al.* (2021), para estudar o comportamento de cisalhamento do CRF deve-se considerar o fenômeno de deslizamento de cisalhamento que ocorre na seção fissurada em conexão com a cinemática da fissura. Ao analisar esse comportamento, deve-se considerar que a teoria do atrito de cisalhamento sugere dois principais mecanismos de resistência causados pelo atrito entre as duas superfícies fissuradas. Esses mecanismos são conhecidos como intertravamento agregado e ação de pino. O intertravamento agregado é desenvolvido pelo atrito das superfícies rugosas em contato nos dois lados de uma fissura submetida a tensões tangenciais. Este é o principal mecanismo acionado na presença de qualquer componente que atravesse a fissura, como é o caso dos estribos convencionais ou das fibras. No caso de fissuras por cisalhamento, a ação de pino dos componentes de reforço impede a separação livre das superfícies em contato. Após o início da fissura, ocorre um movimento relativo dos dois lados da fissura na direção da carga. Então, a fissura cresce perpendicularmente à direção da tensão de tração principal. Assim, o crescimento da fissura provoca tensão de tração nas barras ou fibras e, conseqüentemente, comprime ambas as faces da superfície fissurada, produzindo o chamado mecanismo de atrito de cisalhamento. Em relação à ação do pino em estribos ou fibras, o mecanismo mostrou ter uma pequena contribuição para as tensões tangenciais totais. Por esse motivo, esse mecanismo é negligenciado pela maioria dos pesquisadores (PICAZO *et al.*, 2021).

Por se tratar de um método de ensaio não padronizado, são adotados pelos pesquisadores diferentes tamanhos e configurações para os corpos de prova do ensaio de cisalhamento do tipo *Push-off* (Figura 8). Na Tabela 2 estão apresentadas as dimensões adotadas em algumas pesquisas que investigaram o comportamento ao cisalhamento do CRF.

Figura 8. Configuração dos corpos de prova dos ensaios do tipo *Push-off*



Fonte: Autoria própria

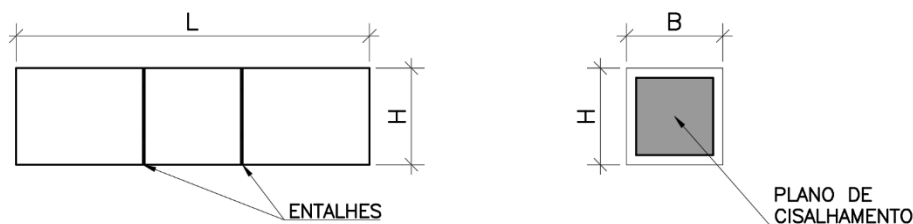
Tabela 2. Dimensões dos corpos de prova utilizados em ensaios do tipo *Push-off*

Autor	f _{cm} (MPa)	Material da fibra	H (mm)	H1 (mm)	B (mm)	L (mm)	L1 (mm)	Entalhe	Armadura de Reforço
			(ver notação na Figura 8)						
Barragán <i>et al.</i> (2006)	30 e 70	Aço	260	60	150	150	150	Não	Não
Kim <i>et al.</i> (2010) (concreto sem fibras)	90	-	660	305	400	152	126	Sim	Sim, Aço
Blanco <i>et al.</i> (2017)	40	Aço e polipropileno	440	200	200	100	100	Não	Não
Picazo <i>et al.</i> (2021)	20 e 40	Poliolefina	270	75	150	150	150	Não	Não
Qasim (2020)	40 e 80	Aço	340	100	200	100	100	Não	Não
Resende <i>et al.</i> (2021)	40	Aço	670	260	400	120	100	Sim	Sim, Aço
Trindade <i>et al.</i> (2021)	30	Aço	450	210	200	120	100	Sim	Sim, Aço
Carrillo <i>et al.</i> (2024)	50	Aço	440	200	200	200	160	Sim	Sim, CFRP

Fonte: Autoria própria

O método de ensaio segundo a norma japonesa JSCE-SF6 (1990) (Figura 9) determina apenas a proporção entre as dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento, definindo que os espaços entre os planos de cisalhamento (entalhes) devem ter a mesma dimensão da altura do corpo de prova. Dessa forma também são adotados pelos pesquisadores diferentes tamanhos para os corpos de prova. Na Tabela 3, estão apresentadas as dimensões adotadas em algumas pesquisas que investigaram o comportamento ao cisalhamento do CRF.

Figura 9. Configuração dos corpos de prova dos ensaios segundo a JSCE-SF6 (1990)



Fonte: Autoria própria

Tabela 3. Dimensões dos corpos de prova utilizados em ensaios segundo a JSCE-SF6 (1990)

Autor	Resistencia à compressão (MPa)	Material da fibra	H (mm)	B (mm)	L (mm)	Entalhe
			(ver notação na Erro! Fonte de referência não encontrada.)			
Boulekbache <i>et al.</i> (2012)	30, 60 e 80	Aço	100	100	350	Sim
Araújo <i>et al.</i> (2014)	50	Aço	150	150	600	Sim
Li <i>et al.</i> (2017)	70	Aço, Basalto e Polipropileno	100	100	300	Sim
Gao <i>et al.</i> (2017)	30, 45 e 60	Aço	100	100	300	Não
Doyon-Barbant e Charron (2018)	105	Aço	150	150	600	Sim
Leone <i>et al.</i> (2018)	35	Aço	100	100	400	Sim
Moghadam e Izadifard (2019)	20, 40 e 80	Aço	100	100	350	Sim
Costa <i>et al.</i> (2019)	40	Aço	150	150	500	Sim
Cuenca <i>et al.</i> (2020)	40	Aço e Polipropileno	150	150	450	Sim
Xu <i>et al.</i> (2020)	50	Celulose, PVA e Poliolefina	100	100	300	Sim
Zhang e Deng (2021)	60	PVA	100	100	300	Sim
Shoaib <i>et al.</i> (2021)	45	Aço	100	100	400	Sim
Carrillo <i>et al.</i> (2024)	50	Aço	150	150	600	Sim

Fonte: Autoria própria

O concreto reforçado com fibras (CRF) tem se consolidado como uma solução promissora para aprimorar o desempenho mecânico de elementos estruturais de concreto, especialmente quanto ao aumento da tenacidade, da ductilidade e da resistência ao cisalhamento. A interação entre a matriz cimentícia e as fibras, bem como a distribuição e o tipo de fibra empregada, são fatores determinantes para o comportamento pós-fissuração e a resposta estrutural do material. Embora as fibras não substituam integralmente o reforço convencional em todas as situações, os estudos demonstram seu potencial para contribuir de forma significativa na resistência ao cisalhamento e na mitigação de modos de falha frágeis. Contudo, a inexistência de métodos padronizados e confiáveis para a caracterização direta da resistência ao cisalhamento do CRF ainda representa uma limitação importante, dificultando sua incorporação plena nas normas de projeto. Diante disso, torna-se evidente a necessidade de avanços na compreensão dos mecanismos de transferência de tensões nas fissuras e no desenvolvimento de métodos de ensaio que representem adequadamente o comportamento do CRF em situações reais de carregamento.

3. CISALHAMENTO EM VIGAS DE CRF

Ao longo das últimas décadas, houve uma difusão do uso de CRF na indústria da construção civil. Os engenheiros estão encontrando uma variedade de aplicações para as propriedades de tração e resistência aprimoradas do CRF. Para a maioria dos pisos industriais e em algumas outras aplicações estruturais, o CRF com uma fração de volume mínima de fibras de 0,5% tem sido usado para substituir a necessidade de armadura mínima de retração e temperatura, conforme especificado na norma americana ACI 318 (2019). O comitê ACI 544 também investigou outras aplicações estruturais para CRF (MACGREGOR E WIGHT, 2012).

Segundo MacGregor e Wight (2012), um grande banco de dados foi coletado para avaliar a capacidade do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) em aumentar a resistência ao cisalhamento e a capacidade de deformação de vigas de concreto que não possuem armadura de cisalhamento normal. As fibras de aço, que normalmente são onduladas ou com ganchos nas extremidades, tendem a aumentar a capacidade de cisalhamento, fornecendo resistência à tração pós-fissuração através de uma fissura inclinada, resultando em forças de intertravamento de agregados mais altas de maneira semelhante à observada para vigas com armadura de cisalhamento normal do tipo estribos. O uso do CRFA também leva à formação de múltiplas fissuras inclinadas e a uma ruptura por cisalhamento menos abrupta do que comumente se observa em ensaios de vigas de concreto sem armadura de cisalhamento.

Conforme indicado no capítulo anterior, a capacidade resistente ao cisalhamento é um fenômeno complexo que consiste em múltiplos mecanismos independentes que contribuem para a resistência ao cisalhamento: a capacidade do concreto na zona de compressão, o intertravamento dos agregados, o efeito pino da armadura longitudinal e, para o caso de vigas, inclui-se ainda o fator de forma (VISSER; BOSHOF, 2021).

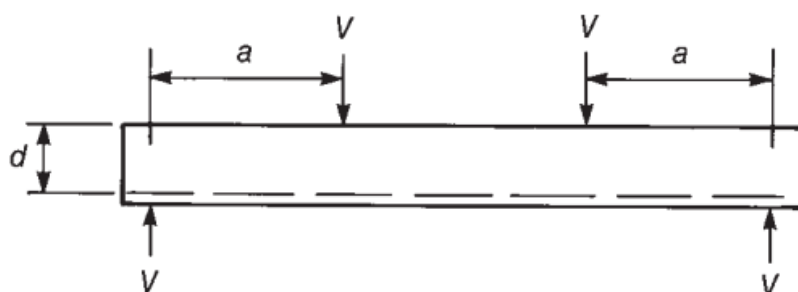
3.1 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE ESFORÇO POR CISALHAMENTO

3.1.1 Vigas de concreto sem estribos

O comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto sem armadura transversal está diretamente relacionado à razão entre o vão de cisalhamento e a altura útil da seção (a/d) (Figura 10). De acordo com MacGregor e Wight (2012), quatro faixas principais de

comportamento podem ser identificadas. Em vigas com vãos muito curtos, em que a/d é inferior a 1, o mecanismo resistente é dominado pela ação de arco, na qual a armadura longitudinal atua como tirante, sendo a falha mais comum a perda de ancoragem desse componente. Nos vãos curtos, entre 1 e 2,5, há ainda contribuição parcial da ação de arco, mas a ruptura tende a ocorrer por falha de aderência ou pelo esmagamento da zona de compressão acima da fissura. Já nas vigas esbeltas, com a/d entre 2,5 e 6, a falha acontece de forma brusca logo após a formação da fissura inclinada, quando os mecanismos de transferência de cisalhamento entram em colapso. Por fim, em vigas muito esbeltas, com a/d superior a 6, a ruptura é governada pela flexão antes mesmo do surgimento de fissuras inclinadas.

Figura 10. Vão de cisalhamento de viga de concreto sem armadura transversal

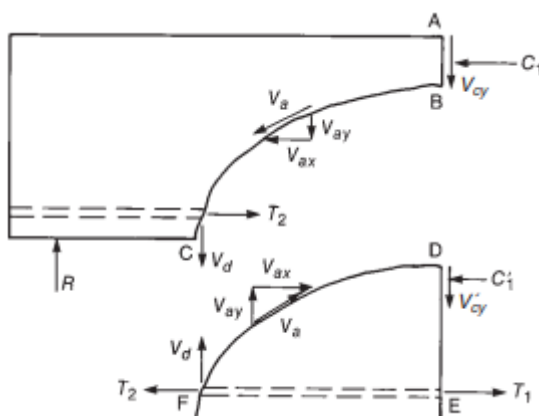


Fonte: MacGregor e Wight (2012)

Segundo MacGregor e Wight (2012), a ocorrência de fissuras inclinadas é condição necessária para que haja ruptura por cisalhamento em vigas sem estribos. Essas fissuras podem se formar basicamente de duas maneiras. Quando a relação a/d é pequena, surgem fissuras de cisalhamento diretamente na alma da viga, unindo a região de carga ao apoio. Na maioria das situações, porém, as fissuras de flexão aparecem primeiro e se desenvolvem verticalmente a partir da zona tracionada. Esse processo altera o estado de tensões na viga, concentrando esforços próximos ao topo da fissura. Com a progressão do carregamento, essas fissuras de flexão podem evoluir em direção inclinada, transformando-se em fissuras de cisalhamento por flexão, ou ainda gerar novas fissuras inclinadas que se estendem para a região não fissurada acima delas.

Independentemente da relação a/d , a ruptura por cisalhamento ocorre apenas após a formação de fissuras inclinadas. Nessas condições, a transferência de esforços acontece por meio da combinação de três mecanismos principais: o cisalhamento na zona de compressão (V_{cy}), o intertravamento dos agregados ao longo das fissuras (V_a) e a ação de pino da armadura longitudinal (V_d) (Figura 11). A participação relativa de cada um varia conforme a abertura da fissura, sendo progressivamente reduzida até a falha repentina da viga.

Figura 11. Transferência de cisalhamento através de uma fissura inclinada em uma viga sem estribos



Fonte: MacGregor e Wight (2012)

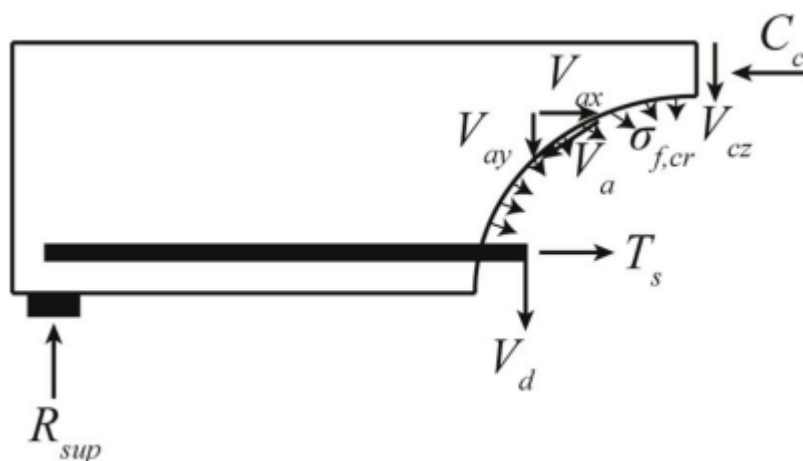
A carga de fissuração inclinada e a resistência ao cisalhamento das vigas sem estribos são influenciadas por diversos fatores. A resistência à tração do concreto tem papel direto, uma vez que a formação da fissura inclinada está associada à sua capacidade de suportar tensões principais. A taxa de armadura longitudinal também é determinante: valores reduzidos favorecem maior abertura de fissuras e comprometem a transferência de esforços por intertravamento de agregados e ação de pino. O vão de cisalhamento exerce influência sobretudo quando a/d é inferior a 2, situação em que a ação de arco se torna significativa. Além disso, o tipo de concreto pode alterar a resistência, sendo que concretos com agregado leve apresentam menor capacidade de cisalhamento em razão da baixa resistência à tração. O tamanho da seção da viga é outro aspecto relevante, já que o aumento da altura implica maior espaçamento e abertura de fissuras, reduzindo a eficiência do intertravamento. Forças axiais também modificam o comportamento: enquanto a tração diminui a resistência ao cisalhamento, a compressão — seja por carga externa ou pela protensão — tende a aumentá-la. Por fim, o diâmetro do agregado graúdo pode melhorar o intertravamento, embora, em concretos de alta resistência, as fissuras frequentemente atravessem os agregados, resultando em superfícies mais lisas e de menor capacidade de transferência.

A compreensão desses mecanismos e fatores é fundamental para interpretar o comportamento das vigas de concreto sem armadura transversal e serve de base para a análise dos mecanismos de transferência de cisalhamento em vigas de concreto reforçado com fibras, abordados na sequência.

3.1.2 Vigas de CRFA sem estribos

Segundo Lantsoght (2019b), os mecanismos de transferência de cisalhamento em vigas de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) são semelhantes aos observados em vigas de concreto armado sem estribos, mas apresentam diferenças significativas em função da presença das fibras. Como ilustrado na Figura 12, a resistência ao cisalhamento decorre da combinação da zona de compressão do concreto (V_{cz}), da ação de pino da armadura longitudinal (V_d), do intertravamento dos agregados (V_a) e, de forma distinta em relação ao concreto simples, da contribuição da resistência à tração residual fornecida pelas fibras que atravessam a fissura ($\sigma_{f,cr}$).

Figura 12. Mecanismos de transferência de cisalhamento em vigas de CRFA



Fonte: Lantsoght (2019)

Na zona de compressão, as fibras não alteram diretamente a resistência do concreto, mas influenciam o equilíbrio horizontal da seção, aumentando a altura da região comprimida e, portanto, a capacidade resistente. Além disso, contribuem com tensões de tração pós-fissuração, retardando a perda desse mecanismo quando a fissura crítica se propaga (LANTSOGHT, 2019b).

O mecanismo de transferência de esforços através da fissura, pouco relevante em concreto simples, é desempenhado no CRFA pelas fibras que atuam como pontes de transferência. Sua eficácia depende da aderência fibra-matriz, da geometria e fator de forma, do teor e da orientação das fibras, sendo mais efetivas aquelas posicionadas perpendicularmente ao plano da fissura (LANTSOGHT, 2019b).

A ação de pino da armadura longitudinal também é favorecida, já que a presença das fibras aumenta a aderência entre aço e concreto e reduz a abertura das fissuras, ampliando a contribuição desse mecanismo. Ensaios com correlação de imagem digital apontaram

participação entre 10% e 35% da resistência ao cisalhamento por esse mecanismo (LANTSOGHT, 2019b).

No caso do intertravamento dos agregados, a adição de fibras reduz a abertura e o espaçamento das fissuras, o que possibilita maior transferência de esforços por esse mecanismo em comparação ao concreto armado convencional. Contudo, a relevância dessa contribuição não é consenso: alguns estudos apontam sua redução em vigas com a/d reduzidos, nas quais a ação de arco predomina (LANTSOGHT, 2019b).

A ação de arco é intensificada no CRFA, sobretudo em vigas com pequenos vãos de cisalhamento. As fibras fornecem compressão adicional através da fissura, reduzem o amolecimento da diagonal comprimida e melhoram a resposta pós-fissuração (LANTSOGHT, 2019b).

Além dos mecanismos acima, a resistência ao cisalhamento do CRFA sem estribos é influenciada por diferentes fatores. A resistência à compressão do concreto pode modificar a contribuição da zona de compressão e das fibras: em concretos de alta resistência, as fissuras tendem a ser mais lisas (uma vez que a ruptura atravessa os agregados, reduzindo a rugosidade da superfície da fissura), o que reduz o intertravamento, mas a zona de tensão e a participação das fibras em tração aumentam (LANTSOGHT, 2019b).

A taxa de armadura longitudinal também exerce influência. No CRFA, além de melhorar a ação de pino, maiores taxas mantêm as fissuras mais estreitas, aumentando a contribuição das fibras que cruzam a fissura e a da zona de compressão. Assim, a influência da armadura de flexão é potencializada em relação ao concreto sem fibras (LANTSOGHT, 2019b).

O vão de cisalhamento (a/d) usualmente define o modo de ruptura. Em vigas de CRFA, a presença de fibras pode deslocar a fronteira crítica entre ruptura por cisalhamento ou por flexão, fazendo com que, mesmo para valores de a/d inferiores a 2,5, a ruptura ocorra por flexão em vez de cisalhamento. A influência direta das fibras é, portanto, mais marcante nos casos em que a ação de arco é significativa (LANTSOGHT, 2019b).

Quanto ao efeito do tamanho da seção, não há consenso na literatura. Alguns estudos relatam pouca ou nenhuma influência, atribuída à maior ductilidade do CRFA; outros apontam redução da resistência em vigas mais altas devido ao aumento da abertura das fissuras, que limita a contribuição das fibras. De forma geral, Lantsoght (2019b) conclui que, enquanto as fissuras permanecem estreitas o suficiente para permitir a atuação das fibras, o efeito de tamanho tende a ser menor no CRFA do que no concreto simples.

As propriedades e a quantidade de fibras também têm papel decisivo. Geometria, tipo, ancoragem e fator de forma influenciam o mecanismo de ponte nas fissuras. Em termos de teor, volumes entre 0,5% e 1,0% são geralmente eficazes no controle da fissuração, podendo

substituir a armadura transversal mínima. Entretanto, incrementos acima de 1,0% nem sempre resultam em ganhos proporcionais e podem alterar o modo de falha (LANTSOGHT, 2019b).

Em síntese, conforme Lantsoght (2019b), os mecanismos fundamentais de transferência de cisalhamento são mantidos no CRFA, mas a adição de fibras introduz um novo caminho de resistência e modifica a intensidade relativa dos demais mecanismos. Além disso, variáveis como resistência do concreto, taxa de armadura longitudinal, relação a/d , altura do elemento e propriedades das fibras influenciam diretamente a capacidade final. Esses aspectos sustentam a necessidade de modelos específicos para vigas de CRFA, tema do próximo item.

3.2 MODELOS PARA PREVISÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CRF

Diversos modelos empíricos, semiempíricos e analíticos foram desenvolvidos para prever a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras (CRF). A maioria deles é uma adaptação de modelos propostos originalmente para vigas de concreto armado convencional, modificados de modo a considerar a contribuição das fibras como um mecanismo adicional de resistência ao cisalhamento (VISSER; BOSHOF, 2021).

Entre as teorias mais relevantes, destacam-se a Teoria do Campo de Compressão Modificado (MCFT, do inglês *Modified Compression Field Theory*), proposta por Vecchio e Collins (1986), baseada nas condições de equilíbrio, compatibilidade e relações tensão–deformação, e a Teoria do Deslocamento de Fissura Crítica (CSDT, do inglês *Critical Shear Displacement Theory*), que incorpora mecanismos como intertravamento dos agregados, ação de pino da armadura e contribuição do concreto comprimido (YANG; DEN UIJL; WALRAVEN, 2016). O CSDT foi posteriormente estendido para considerar a transferência de tensões pelas fibras de aço (ABAD; LANTSOGHT; YANG, 2019). Também se destacam o Modelo de Capacidade Potencial Duplo (DPCM, do inglês *Dual Potential Capacity Model*) (LEE *et al.*, 2016), adaptado para o CRFA, e o Modelo de Transferência Direta de Força de Tração (DTFTM, do inglês *Direct Tension Force Transfer Model*) (KIM *et al.*, 2012; LEE *et al.*, 2016), que considera a distribuição aleatória e a resistência ao arrancamento das fibras.

O MCFT ocupa posição central nesse contexto, sendo a base para as equações de cisalhamento presentes em normas de referência, como o *fib Model Code 2020* (2024). Diversos autores propuseram adaptações do MCFT para o CRFA, seja substituindo os constitutivos originais por relações específicas para concreto com fibras (Zhang *et al.*, 2016),

considerando hipóteses de fissuração distribuída (LEE; CHO; VECCHIO, 2016; VECCHIO, 2000; MINELLI; VECCHIO, 2006), ou derivando novas equações a partir de ensaios de painel (SUSETYO; GAUVREAU; VECCHIO, 2013).

Segundo Lantsoght (2019b), um modelo mecânico adequado para vigas de CRFA sem estribos deve contemplar de forma conjunta todos os mecanismos de cisalhamento: a capacidade do concreto na zona de compressão, o intertravamento dos agregados, o efeito pino, a transferência de tensão pelas fibras através das fissuras e a ação do arco (em elementos com pequena relação a/d). A influência das fibras se manifesta de forma diferenciada em cada mecanismo: modificam a altura da zona comprimida, aumentam a transferência de tensões nas fissuras, reduzem abertura e espaçamento de fissuras, potencializam a ação de pino pela maior resistência à tração e podem contribuir para intensificar a ação do arco.

Embora muitos modelos tenham sido propostos, ainda não há consenso sobre um modelo mecânico capaz de captar toda a complexidade do comportamento ao cisalhamento em vigas de CRF (Lantsoght, 2019b).

3.3.1 Teoria do Campo de Compressão Modificado (MCFT)

O MCFT foi originalmente formulado por Vecchio e Collins (1986) para descrever o comportamento de elementos de concreto armado fissurados submetidos a tensões planas. Trata-se de um modelo de fissuras distribuídas, em que o concreto é representado como material ortotrópico com propriedades distintas em tração e compressão. As relações constitutivas incorporam o amolecimento do concreto comprimido devido à fissuração transversal e o efeito de enrijecimento por tração entre fissuras. O modelo foi calibrado a partir de uma extensa série de ensaios de painéis.

O MCFT assume a coincidência entre as direções de tensões e deformações principais médias no concreto e, a partir disso, estabelece equações de equilíbrio, compatibilidade e leis constitutivas para determinar as tensões de cisalhamento resistentes. Ao longo dos anos, o modelo foi implementado em procedimentos de projeto (como no Código Canadense CSA, 1994) e em algoritmos de elementos finitos, apresentando previsões consistentes de resistência, resposta carga-deformação e modos de ruptura em diferentes tipos de elementos estruturais (VECCHIO, 2000; BENTZ; VECCHIO; COLLINS, 2006).

Entretanto, limitações foram observadas em casos específicos, como em elementos pouco armados ou sem armadura transversal, nos quais o modelo pode superestimar a ductilidade ou subestimar/superestimar a resistência. Para contornar essas deficiências, foram propostas extensões como o *Disturbed Stress Field Model* (DSFM), que introduz

explicitamente o deslizamento ao longo das fissuras e dissocia as direções de tensões e deformações principais (VECCHIO, 2000).

No caso do concreto com fibras, adaptações adicionais foram desenvolvidas. Minelli e Vecchio (2006) propuseram modificações no MCFT e no DSFM para incluir o efeito das fibras, por meio de novas leis constitutivas de amolecimento em tração e compressão, obtidas a partir de ensaios em painéis de CRFA. Esses ajustes permitiram representar adequadamente a contribuição das fibras para o cisalhamento, refletindo ganhos em resistência, rigidez e ductilidade em elementos sem estribos.

Assim, o MCFT, em suas diferentes versões, constitui a base do *fib* Model Code 2020, sendo adaptado para contemplar o efeito das fibras como componente adicional nos mecanismos de transferência de cisalhamento (VECCHIO E COLLINS, 1986; VECCHIO, 2000; BENTZ; VECCHIO; COLLINS, 2006; MINELLI E VECCHIO, 2006).

3.3.2 Diretrizes normativas para dimensionamento da capacidade resistente ao cisalhamento de elementos de CRF sem estribos

A substituição da armadura transversal por fibras pode reduzir significativamente o tempo e custo da construção e pode ser usado idealmente em locais onde a mão de obra é escassa ou de custo elevado. Estudos apontam que a utilização de 0,75% (do volume) de fibras de aço podem substituir a armadura mínima de cisalhamento (VISSER; BOSHOF, 2021; YUAN *et al.*, 2020).

Várias normas já consideram o uso do CRF em projetos estruturais se certos requisitos forem atendidos. Em elementos estruturais submetidos à flexão, o uso do CRF pode substituir parte do tradicional reforço com barras de aço (estribos). E em elementos estruturais ou seções submetidas a tensões de cisalhamento, as fibras podem substituir o tradicional reforço com estribos (PICAZO *et al.*, 2021).

Nem todas as normas para projeto de estruturas de concreto prescrevem disposições que incluem o efeito de aumento de resistência ao cisalhamento devido a adição de fibras. A seguir estão apresentadas uma visão geral das formulações disponíveis em algumas das normas e diretrizes atuais. Destaca-se que essas expressões que estimam a resistência ao cisalhamento apresentam um certo grau de empirismo (RUIZ *et al.*, 2023).

3.3.2.1 Eurocode 2 – 2020 (2023)

Segundo Ruiz *et al.* (2023), a formulação presente no Eurocode 2-2020 (2023) constitui uma adaptação do EC2-2010 para o dimensionamento de vigas convencionais sem

estribos. As equações (Eq. 3.1 a Eq. 3.5), apresentadas no EC2-2020 (2023) e descritas a seguir, baseiam-se na expressão de König e Fischer (1995) e resultam de um ajuste empírico obtido a partir de um banco de dados composto por vigas de concreto convencionais sem estribos. Importante destacar que a referida proposta normativa se aplica exclusivamente a concretos com resistência à compressão de até 100 MPa e à utilização de fibras de aço, não contemplando outros tipos de fibras.

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,F} \quad \text{Eq. 3.1}$$

$$V_{Rd,c} = \eta_{CF} \cdot \left[\frac{0,66}{\gamma_v} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d} \right)^{1/3} \right] \cdot z_v \cdot b_w \geq V_{Rd,min} \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$V_{Rd,F} = \eta_F \cdot \frac{f_{FTUk}}{\gamma_F} \cdot z_v \cdot b_w \quad \text{Eq. 3.3}$$

$$V_{Rd,min} = \frac{11}{\gamma_v} \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{f_{yd}} \cdot \frac{d_{dg}}{d}} \quad \text{Eq. 3.4}$$

$$\eta_{CF} = \max\{1,2 - 0,5 \cdot f_{FTUk}; 0,4\} \leq 1,0 \quad \text{Eq. 3.5}$$

$$f_{FTUk} = \frac{f_{R3k}}{3} \quad \text{Eq. 3.6}$$

$$d_{dg} \begin{cases} f_{ck} \leq 60 \text{ MPa} \rightarrow 16 \text{ mm} + D_{lower} \leq 40 \text{ mm} \\ f_{ck} > 60 \text{ MPa} \rightarrow 16 \text{ mm} + D_{lower} \cdot \left(\frac{60}{f_{ck}} \right)^2 \leq 40 \text{ mm} \end{cases} \quad \text{Eq. 3.7}$$

Onde ρ_l é a taxa de armadura longitudinal; d_{dg} é um parâmetro que descreve a rugosidade da zona de ruptura e que depende do tipo de concreto e das propriedades dos agregados, calculado conforme Eq. 3.7; D_{lower} é o menor valor do tamanho da peneira superior D em um agregado para a fração mais grossa de agregados no concreto permitida pela especificação do concreto e pode ser assumido igual ao diâmetro máximo do agregado graúdo; b_w é a largura da seção transversal e z_v é a profundidade efetiva de cisalhamento que pode ser assumida igual a $0,9 \cdot d$; f_{FTUk} é o valor característico da resistência à tração residual para o CRFA, em MPa, calculado conforme a Eq. 3.6; e para η_F é assumido o valor igual a 1,0.

3.3.2.2 Código Modelo da fib MC 2020 (2024)

No *fib Model Code 2010* (2013) eram apresentadas duas abordagens para a determinação da resistência ao cisalhamento de elementos de CRFA: a primeira baseada em uma modificação do modelo do Eurocode 2 (EC2-2010); e a segunda fundamentada no *Simplified Modified Compression Field Theory* (SMCFT), uma versão simplificada do *Modified*

Compression Field Theory (MCFT). A simplificação que origina o SMCFT resulta de uma solução proposta para o sistema de equações do MCFT, permitindo que sua aplicação seja feita de forma preliminar, com cálculos simples e rápidos. Essa solução foi obtida por meio de uma análise paramétrica do MCFT com casos convencionais, envolvendo elementos com e sem estribos, o que levou ao desenvolvimento de formulações específicas para cada situação. O *fib* Model Code 2020 (2024) adota uma abordagem semelhante à do MC2010, mas introduz um novo coeficiente para o fator de deformação (Eq. 3.12). Todas essas formulações para o cisalhamento consideram diversos parâmetros, como a taxa de armadura longitudinal, as resistências à compressão e à tração, a influência do fator de forma e do tamanho dos agregados, entre outros (RUIZ *et al.*, 2023).

O *fib* Model Code 2020 (2024) adota essa abordagem em três níveis de aproximação. Devido à interação entre a contribuição do concreto ($V_{Rd,c}$) e a contribuição da resistência residual à tração proporcionada pelas fibras ($V_{Rd,FRC}$), ambos os termos devem ser determinados com base na deformação do elemento.

O Nível I pode ser utilizado para elementos sem carga axial significativa, com resistência característica à compressão menor ou igual a 70 MPa e altura útil (cisalhamento) limitada a 800 mm. Nesse nível, são adotadas aproximações para o cálculo das deformações. O Nível II mantém a restrição quanto à altura útil dos elementos (menor ou igual a 800 mm), mas adota critérios mais refinados para a avaliação das deformações. Já o Nível III apresenta uma abordagem mais avançada, sem restrições quanto à altura e limitando a resistência à compressão do concreto em 120 MPa.

Cabe destacar que o *fib* Model Code 2010 (2013) contemplava apenas fibras de aço. Já o *fib* Model Code 2020 (2024) (MC2020) amplia a aplicação para concretos reforçados com fibras de aço, poliméricas, de carbono, de vidro ou naturais. No caso do dimensionamento ao cisalhamento, o MC2020 ressalta que as equações são baseadas em parâmetros mecânicos e podem ser aplicadas a diferentes tipos de fibras, mas como a validação experimental foi realizada apenas com fibras de aço, recomenda-se fortemente a realização de verificações preliminares quando forem utilizados outros tipos de fibras.

Considerando a utilização de concretos de alta resistência neste trabalho, será adotada a abordagem do Nível II do MC2020, conforme apresentado a seguir.

A resistência ao cisalhamento de cálculo V_{Rd} é obtida pela Eq. 3.8.

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,FRC} \quad \text{Eq. 3.8}$$

Sendo $V_{Rd,c}$ a contribuição da matriz de concreto sem armadura transversal e $V_{Rd,FRC}$ a contribuição das fibras para o cisalhamento. Onde:

$$V_{Rd,c} = k_{v,FRC} \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z_v \cdot b_w \quad \text{Eq. 3.9}$$

$$V_{Rd,FRC} = \frac{k_s \cdot f_{FTUk}}{\gamma_F} \cdot \cot \theta_F \cdot z_v \cdot b_w \quad \text{Eq. 3.10}$$

O parâmetro k_s pode ser adotado igual a 0,64 e consiste na multiplicação de dois componentes: o primeiro leva em conta o comportamento das fissuras ao encontrar os caminhos de menor resistência e ao redor das extremidades das fibras (esse é o k_f na abordagem segundo o MCFT no *fib* Model Code 2010). Quando o caminho não é fixado por condições de contorno ou entalhes, o valor de k_f pode ser considerado igual a 0,8. O segundo componente leva em conta as diferenças na orientação das fibras entre os corpos de provas ensaiados de acordo com a norma EN 14651 (2007) em relação à falha por cisalhamento, é denotado como k_0 e pode ser considerado igual a 0,8.

Na Eq. 3.9, $k_{v,FRC}$ é calculado conforme Eq. 3.11 e na Eq. 3.10, θ_F é a inclinação do campo de tensão de compressão do CRFA calculado com a Eq. 3.13 para o nível de aproximação II; o coeficiente ζ , calculado conforme Eq. 3.12, é referente a redução do componente de concreto devido ao aumento da largura da fissura que ocorre na presença de fibras no estado limite último; b_w é a largura da seção transversal e z_v é a profundidade efetiva de cisalhamento que pode ser assumida igual a $0,9 \cdot d$; f_{FTUk} é o valor característico da resistência à tração residual para o CRFA em MPa, calculado conforme a Eq. 3.14, limitado à resistência à tração característica inferior do concreto sem fibras (Eq. 3.15); ε_x é a deformação longitudinal na metade da profundidade efetiva de cisalhamento e k_{dg} é referente à rugosidade da fissura crítica de cisalhamento, conforme definido na Eq. 3.16 para concretos com resistência à compressão menor ou igual a 70 MPa ou igual a 2,0 para concretos com resistência à compressão maior que 70 MPa, onde d_g é o diâmetro máximo do agregado em mm.

Para elementos com tensão axial significativa, a contribuição das fibras para a resistência ao cisalhamento do elemento deve ser desconsiderada ($V_{Rd,FRC} = 0$).

$$k_{v,FRC} = \frac{0,4}{(1+1500 \cdot \varepsilon_x) + \zeta} \cdot \frac{1300}{1000 + k_{dg} \cdot z_v} \quad \text{Eq. 3.11}$$

$$\zeta = (20 - 14000 \cdot \varepsilon_x) \cdot \frac{f_{FTUk}}{f_{ck}} \geq 0 \quad \text{Eq. 3.12}$$

$$\theta_F = 29^\circ + 7000 \cdot \varepsilon_x \quad \text{Eq. 3.13}$$

$$f_{FTUk} = \frac{f_{R3k}}{3} \quad \text{Eq. 3.14}$$

$$f_{FTUk} \leq 0,7 \cdot 0,6 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{Eq. 3.15}$$

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 \quad \text{Eq. 3.16}$$

Para o cálculo da resistência ao cisalhamento, é necessário considerar o estado de deformação do elemento. No contexto de uma análise da seção transversal, a deformação longitudinal é determinada na metade da profundidade efetiva de cisalhamento, conforme a Eq. 3.17.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2 \cdot E_s \cdot A_s} \cdot \left(\frac{M_{Ed}}{z_v} + V_{Ed} + N_{Ed} \cdot \left(\frac{1}{2} \mp \frac{\Delta_e}{z_v} \right) \right) \geq 0 \quad \text{Eq. 3.17}$$

Onde M_{Ed} , V_{Ed} e N_{Ed} são, respectivamente, o momento fletor, a força cortante e a força normal solicitantes (valores de cálculo) resultantes da análise da seção; e E_s e A_s são respectivamente o módulo de elasticidade e a área de aço da armadura de flexão.

3.3.2.3 ABNT NBR 16935 (2021)

A norma brasileira para projeto de estruturas de concreto armado, ABNT NBR 6118 (2023), não apresenta recomendações para o uso de fibras em elementos estruturais. No entanto, foi publicada recentemente uma norma específica para projetos de estruturas de concreto reforçado com fibras, a ABNT NBR 16935 (2021). Essa norma estabelece, para o dimensionamento de elementos lineares submetidos à força cortante, com armadura longitudinal e sem armadura transversal, as condições expressas nas Eq. 3.18 a Eq. 20.

$$V_{Rd,F} = \left[\frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho \cdot \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad \text{Eq. 3.18}$$

$$V_{Rd,F} \geq V_{Rd,Fmin}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad \text{Eq. 3.19}$$

$$V_{Rd,Fmin} = \left[\left(0,035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}} \right) + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad \text{Eq. 3.20}$$

Onde k é o fator que considera o fator de forma da seção transversal, ρ é a taxa de armadura longitudinal, f_{Ftuk} é o valor característico da resistência à tração residual para o CRF em MPa, valor último, considerando a abertura de fissura (w_u) de 1,5 mm e f_{ctk} é a resistência característica do concreto à tração direta, σ_{cp} é a tensão média na seção transversal de concreto por ação de força axial de protensão e f_{ck} é a resistência à compressão do concreto.

A norma brasileira baseou-se no *fib Model Code 2010* (fib, 2013) para a definição de suas diretrizes. Enquanto o MC2010 restringia sua aplicação ao concreto reforçado com fibras de aço, a ABNT NBR 16935 (2021) não estabelece limitação quanto ao tipo de fibra empregada. Por outro lado, a norma brasileira permite a aplicação de suas diretrizes apenas para os concretos do grupo I de resistência (entre 20 e 50 MPa), enquanto o *fib Model Code 2010* (2013) permite a aplicação para concretos com resistência superiores a 50 MPa. Cabe destacar que, conforme discutido anteriormente, a versão mais recente, o *fib Model Code 2020* (2024), não restringe mais a utilização a fibras de aço, contemplando concretos reforçados com diferentes tipos de fibras.

3.3.2.4 Norma Espanhola (2021)

O Código Estrutural Espanhol (2021) é baseado nos modelos propostos pelo EC2, incorporando também as recomendações finais da RILEM TC 162-TDF. Para o dimensionamento de elementos lineares sem estribos, a norma estabelece as equações a seguir, restringindo sua aplicação à utilização de fibras de aço e a concretos com resistência característica à compressão de até 90 MPa.

$$V_{Rd} = V_{cd} + V_{Fd} \quad \text{Eq. 3.21}$$

$$V_{cd} = \left[\frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot [100 \cdot \rho \cdot f_{ck}]^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad \text{Eq. 3.22}$$

$$V_{Fd} = 0,7 \cdot k \cdot \tau_{fd} \cdot b_w \cdot d \quad \text{Eq. 3.23}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad \text{Eq. 3.24}$$

$$\tau_{fd} = 0,5 \cdot f_{ctR,d} \quad \text{Eq. 3.25}$$

$$f_{ctR,d} = 0,33 \cdot f_{R3,d} \quad \text{Eq. 3.26}$$

Onde k é o fator que considera o fator de forma da seção transversal (Eq. 3.24), ρ é a taxa de armadura longitudinal, $f_{R3,d}$ é o valor de cálculo da resistência à tração residual para o CRF em MPa, valor último, considerando a abertura de fissura (w_u) de 1,5 mm.

3.3.2.6 Verificação das equações normativas

Suk e Ferrari (2024) investigaram a aplicação de equações normativas para a previsão da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras. O estudo utilizou fibras de aço com ganchos nas extremidades em teores de 40, 60 e 80 kg/m³. As fibras foram incorporadas em concretos de classe C30 e C45.

As equações consideradas incluíram modelos teóricos amplamente citados na literatura, além das prescrições normativas da ABNT NBR 16935 (2021) e da RILEM TC-162 (2003). Os resultados experimentais foram comparados com as previsões teóricas de onze modelos distintos, incluindo formulações teóricas da literatura e prescrições normativas. Observou-se que, dentre todas as formulações, os modelos da ABNT NBR 16935 (2021) e da RILEM TC-162 (2003) apresentaram os melhores níveis de concordância para os grupos de concreto classe C30, com desvios inferiores a 5% entre os valores previstos e os obtidos experimentalmente. Para os grupos C45, contudo, observou-se aumento progressivo do afastamento entre previsões da ABNT NBR 16935 (2021) e resultados experimentais com o incremento do teor de fibras, evidenciando tendência à superestimação da contribuição das fibras em concretos de maior resistência. Ainda assim, mesmo diante do aumento do afastamento observado para a classe C45, os modelos analisados apresentaram, de forma consistente, relações $V_{u,exp}/V_{u,teor}$ superiores a 1,0, indicando que as equações foram capazes de estimar a resistência ao cisalhamento com nível adequado de segurança.

Ruiz *et al.* (2023) apresentaram um estudo voltado à avaliação da precisão de expressões normativas para a previsão da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto protendido com fibras de aço sem armadura transversal. O trabalho se baseia na construção de um banco de dados contendo 80 ensaios experimentais extraídos de 13 fontes distintas, com foco exclusivo em vigas submetidas a carregamentos pontuais. Todas as vigas analisadas foram produzidas com concreto de alto desempenho reforçado com fibras de aço. As resistências à compressão do concreto dos ensaios variaram entre 42 MPa e 175 MPa, sendo observada uma proporção significativa de concretos com resistência superior a 90 MPa. Os teores de fibra variaram entre 0,3% e 2,5% em volume, com maior frequência de uso em torno de 1% (aproximadamente 80 kg/m³). A geometria predominante das vigas foi a seção transversal do tipo "I", com alturas entre 270 mm e 1092 mm, sendo que 93% dos ensaios foram conduzidos com carregamento de três pontos.

Os autores analisaram as equações normativas de quatro referências: o Eurocode 2 2020 (versão preliminar), o *fib* Model Code 2010, o *fib* Model Code 2020 (versão preliminar) e o Código Estrutural Espanhol (2021). Essas equações foram aplicadas aos dados experimentais com o objetivo de avaliar seu conservadorismo e precisão, por meio do cálculo de um fator de segurança do modelo (γ_{mod}), definido como a razão entre a força de cisalhamento experimental e a resistência calculada. A equação principal do Model Code 2010 apresentou o valor médio mais elevado para o fator de segurança ($\gamma_{\text{mod}} \geq 3,39$), com alta dispersão dos dados, enquanto a equação do Eurocode 2 (draft 2022) demonstrou melhor desempenho estatístico, com menor variabilidade e valor médio de γ_{mod} igual a 1,54. Os modelos baseados na Teoria do Campo de Compressão Modificada Simplificada (SMCFT), presente nos comentários do MC2010 e no MC2020, também foram analisados e demonstraram potencial de melhoria ao se considerar mais fortemente a influência da taxa de armadura longitudinal protendida (ρ_{pw}) e do nível médio de compressão (σ_{cp}), uma vez que essas variáveis apresentaram correlação direta com γ_{mod} .

Além disso, Ruiz *et al.* (2023) compararam os resultados obtidos com o banco de dados de vigas protendidas àqueles de dois bancos de dados compostos por vigas não protendidas de concreto reforçado com fibras. Os resultados indicaram que as equações normativas tendem a ser ainda mais conservadoras quando aplicadas a vigas protendidas, com aumento significativo dos valores médios do fator de segurança do modelo (γ_{mod}), especialmente nas expressões do *fib* Model Code 2010 e *fib* Model Code 2020. Para essa análise, os autores utilizaram o banco de dados de Lantsoght (2019a), o qual não apresenta os valores experimentais das resistências residuais f_{R1} e f_{R3} . Dessa forma, foram aplicadas duas equações de regressão propostas por Faccin (2022) e por Bairán *et al.* (2021), com base nos parâmetros de tipo, volume e fator de forma das fibras, para estimar os valores de f_{R3} e possibilitar a aplicação das equações normativas de previsão. Os resultados obtidos com ambas as abordagens foram semelhantes; no entanto, a aplicação da regressão de Bairán *et al.* (2021) resultou em um valor médio de γ_{mod} aproximadamente 12% inferior ao obtido com a regressão de Faccin (2022). Ainda assim, os autores destacam que, quando são utilizados os valores experimentais de f_{R1} e f_{R3} , o γ_{mod} tende a ser ainda mais baixo, com uma elevada proporção de resultados abaixo do limite de segurança ($\gamma_{\text{mod}}=1$).

Cuenca *et al.* (2015) conduziram um programa experimental com 12 vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço, variando-se tanto a resistência da matriz (concretos de média e alta resistência) quanto o tipo de fibra utilizada (diferentes geometrias e fatores de forma). O estudo teve como objetivo avaliar a influência conjunta da matriz e das fibras no comportamento ao cisalhamento e confrontar os resultados obtidos com as

equações de dimensionamento normativo do EC2-2010 e do MC2010. Os autores observaram que ambas as equações apresentaram tendência de superestimar a resistência experimental, conduzindo a previsões contra a segurança. Outro ponto destacado foi que o parâmetro residual f_{R3} , utilizado pelas normas como referência, não é suficiente para caracterizar de forma abrangente o cisalhamento, uma vez que vigas com valores semelhantes de f_{R3} apresentaram respostas bastante distintas em função do tipo de fibra empregada. Os achados reforçaram a necessidade de revisões normativas, de modo a considerar não apenas a resistência residual, mas também a influência do tipo de fibra e da matriz na capacidade ao cisalhamento.

Cuenca *et al.* (2018) desenvolveram uma base de dados voltada à análise do comportamento ao cisalhamento de elementos estruturais de CRF com o objetivo de avaliar o desempenho de equações normativas em função de diferentes tipos de reforço e configurações estruturais. O estudo reuniu 301 ensaios experimentais com vigas submetidas à ação de cisalhamento, dos quais 167 correspondem a elementos sem estribos transversais, sendo este subconjunto o foco da análise comparativa entre modelos teóricos. As vigas incluídas no banco de dados apresentam ampla diversidade de geometrias, resistências do concreto e tipos de fibra, permitindo uma avaliação abrangente das principais variáveis que influenciam a resistência ao cisalhamento. O banco de dados contempla ensaios em concretos com resistência à compressão variando entre 20 MPa a 130 MPa. No que diz respeito às fibras, o estudo contempla majoritariamente o uso de fibras metálicas, com diversas formas geométricas (gancho, entalhadas, retas) e dosagens entre 0,25% e 1,5% em volume, embora também sejam incluídas fibras poliméricas em menor proporção.

As equações normativas consideradas na análise foram aquelas propostas pelo *fib* Model Code 2010 (2013), incluindo tanto o modelo empírico quanto o modelo baseado na Teoria do Campo de Compressão Modificada (MCFT). A validação dos modelos foi realizada por meio da comparação entre os valores experimentais de carga última e os valores estimados pelas equações. Os autores observaram que ambos os modelos de previsão da resistência ao cisalhamento do *fib* Model Code 2010 (2013), aplicados a elementos reforçados exclusivamente com fibras (sem estribos), apresentam redução no nível de segurança à medida que o valor de f_{R3} aumenta. Especificamente, quando f_{R3} supera 3 MPa, o fator de segurança do modelo tende a se aproximar de 1, ou mesmo assumir valores inferiores, indicando previsões menos conservadoras em comparação com aquelas obtidas para vigas com f_{R3} inferior a 3 MPa. Os autores também ressaltam a escassez de estudos experimentais que apresentem simultaneamente os resultados de caracterização do CRF (incluindo f_{R1} e f_{R3}) e os resultados de ensaios em vigas, o que dificulta a calibração direta e a aplicação prática de modelos normativos baseados em parâmetros de materiais. O estudo, portanto, reforça a

necessidade de considerar adequadamente os parâmetros de tenacidade e resistência residual nas equações de projeto, especialmente em elementos estruturais sem estribos, bem como a importância de integrar resultados de material e estrutura nos programas experimentais futuros (CUENCA *et al.*, 2018).

Bahniuk *et al.* (2022) realizaram uma pesquisa analítica com base em publicações de ensaios experimentais de vigas de concreto reforçado com fibras de aço, contendo armadura longitudinal e sem estribos transversais. O estudo teve como objetivo comparar os resultados experimentais disponíveis com as previsões de capacidade resistente ao cisalhamento fornecidas por diferentes modelos normativos internacionais e pela norma brasileira. Para essa finalidade, foram aplicadas as equações da ABNT NBR 16935 (2021), do *fib* Model Code 2010, da RILEM TC 162-TDF e da norma alemã DAfStb – *Richtlinie Stahlfaserbeton* (2012). Foram selecionadas oito vigas provenientes de quatro artigos distintos, todas apresentando os dados necessários para a realização do dimensionamento segundo os modelos considerados. As vigas avaliadas eram reforçadas com fibras de aço, predominantemente com seção transversal retangular, e apresentavam concretos com resistência à compressão variando entre 34 MPa e 120 MPa. O volume de fibras variou entre 0,3% e 1%, enquanto a relação a/d situou-se entre 2,55 e 2,86.

Além da verificação comparativa entre os modelos normativos e os resultados experimentais, os autores realizaram uma análise paramétrica com o objetivo de avaliar a influência de três parâmetros principais na previsão da resistência ao cisalhamento: largura da seção (b_w), altura útil (d) e taxa de armadura longitudinal. Os resultados indicaram que, para vigas com comportamento do tipo *hardening*, os valores de resistência calculados foram superiores aos valores observados experimentalmente. Já para vigas com comportamento *softening*, os valores experimentais superaram as resistências previstas pelas equações normativas. As diferenças entre as previsões das normas foram mais acentuadas com o aumento do volume de fibras e da altura útil das vigas, sendo maior na norma alemã (DEUTSCHER, 2012) e na RILEM, onde a contribuição do concreto e das fibras é separada. A análise paramétrica evidenciou ainda que a taxa de armadura longitudinal exerce influência significativa sobre a resistência ao cisalhamento.

3.3 ESTUDOS A PARTIR DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

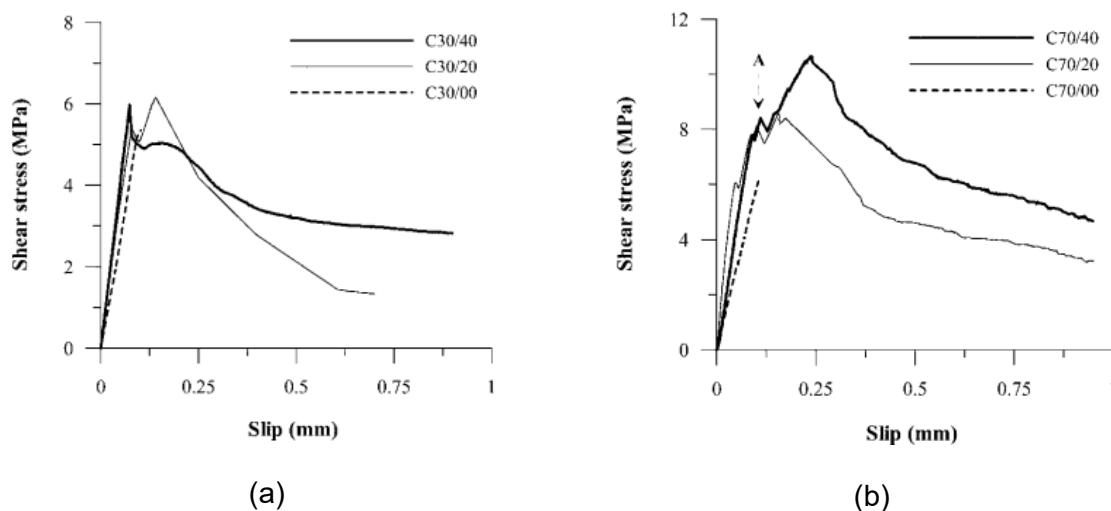
A compreensão do comportamento dos materiais e elementos estruturais depende de uma extensiva investigação experimental para que seja possível o desenvolvimento de metodologias e processos para o seu emprego em projetos.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos em estudos que contemplam programa experimentais que investigaram o comportamento ao cisalhamento do concreto reforçado com fibras. Foram considerados estudos utilizando diversos tipos e teores de fibras e diferentes concretos (convencional, autoadensável, de alta resistência) e sua aplicação em vigas.

Barragán *et al.* (2006) realizaram um estudo experimental com o objetivo de caracterizar o modo de falha e tenacidade do CRFA submetido a cargas de cisalhamento direto. Os autores realizaram ensaios do tipo *Push-off* com duplo entalhe para quantificar o comportamento tensão-deslocamento do CRFA. Os resultados obtidos no ensaio podem ser usados para calcular a tenacidade e empregados no projeto estrutural. O espécime do ensaio de cisalhamento do tipo *Push-off* foi obtido do corpo-de-prova utilizado no ensaio de tração por flexão. O comprimento adotado para o espécime foi de 260mm e dois entalhes de 75mm de comprimento foram realizados, resultando em um espécime de 260 x 150 x 150 mm. Foram estudadas duas classes de resistência do concreto, C30 e C70. Em cada mistura foram adicionadas fibras de aço nas dosagens de 0,25 e 0,50% (20 e 40 kg/m³).

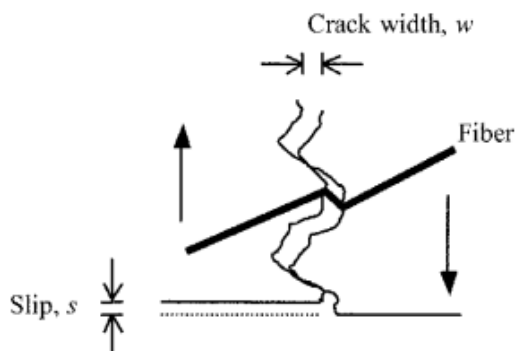
Na Figura 13 estão apresentadas as curvas tensão de cisalhamento-escorregamento obtidos nos ensaios de cisalhamento do tipo *Push-off*, os autores observaram que para os concretos sem fibra o comportamento é praticamente linear até a ruptura. Já para o CRFA o comportamento é significativamente diferente, com um comportamento linear até a primeira fissura (indicado pelo pico de tensão), seguindo de um comportamento não linear. Após o pico, para o concreto C30, a carga tende a diminuir gradativamente, indicando que as fibras não afetam a carga máxima, mas alteram significativamente o comportamento pós-fissuração (tenacidade). Para o concreto C70 com a maior dosagem de fibra há um aumento da tensão após o primeiro pico seguido por uma diminuição gradativa com uma significativa resistência residual. Segundo Barragán *et al.* (2006), a tenacidade observada nos ensaios de cisalhamento é resultado da ação de arrancamento e ação de pino das fibras durante a fissura de cisalhamento. A resistência ao arrancamento da fibra (*pull-out*) tende a fechar a fissura enquanto as forças de cisalhamento tendem a abri-la devido à irregularidade das faces da fissura e intertravamento dos agregados, conforme ilustrado na Figura 14. Isso produz um efeito de confinamento, que junto com a ação de pino das fibras e o atrito entre as faces da fissura, são capazes de aumentar a resistência ao cisalhamento e/ou a tenacidade pós-pico, especialmente quando a densidade de fibras é alta e existe uma melhor aderência fibra-matriz.

Figura 13. Resultados obtidos nos ensaios do tipo *Push-off* para concreto C30 (a) e C70 (b)



Fonte: Barragán *et al.* (2006)

Figura 14. Deslocamento ao longo da fissura no plano de cisalhamento



Fonte: Barragán *et al.* (2006)

Os autores concluíram que os testes de cisalhamento do tipo *Push-off* foram capazes de demonstrar a capacidade de dissipação de energia do CRFA no regime pós-fissuração. A incorporação das fibras de aço no concreto submetido ao cisalhamento leva a uma melhor integridade mecânica durante a falha. A resistência ao arrancamento e a ação de pino das fibras podem levar a uma capacidade de carga residual em falha por cisalhamento. Melhoras significativas na ductilidade do concreto durante a ruptura por cisalhamento e aumento na resistência ao cisalhamento são alcançados através da incorporação das fibras de aço tanto no concreto de resistência convencional (C30) quanto no concreto de alta resistência (C70). O conhecimento da tensão de cisalhamento que pode ser transferida através da fissura é de grande importância para as abordagens de projeto baseadas na mecânica da fratura, onde a resistência residual e/ou a resistência ao cisalhamento podem ser integradas ao longo da seção dos elementos estruturais para calcular a capacidade de carga ao cisalhamento. E por

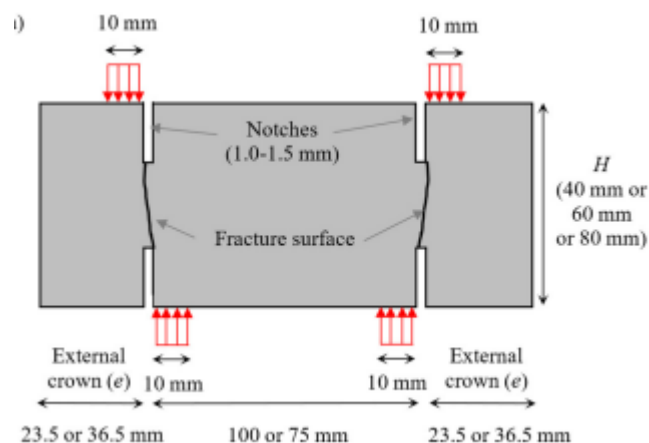
fim, o ensaio de cisalhamento do tipo *Push-off* é um teste simples e que pode ser utilizado para avaliar a resistência ao cisalhamento do CRFA.

Araújo *et al.* (2014) realizaram um estudo experimental com o objetivo de avaliar a influência de grandes dosagens de fibras de aço (1 e 2%) na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras, com vão de cisalhamento (a/d) menor que 3. Além disso, os autores verificaram a precisão de vários modelos empíricos da literatura para a previsão da resistência ao cisalhamento. Foram realizados ensaios em corpos-de-prova cilíndricos para determinação da resistência à compressão e em corpos-de-prova prismáticos para determinação da resistência à tração. Ensaio de cisalhamento direto em corpos-de-prova prismáticos foram realizados baseados no trabalho de Mirsayah e Banthia (2002), que por sua vez utilizou o método de ensaio da norma japonesa JSCE-SF6-1984. Também foram realizados ensaios de flexão em quatro pontos em vigas de seção retangular, com e sem estribos. A partir dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto os autores verificaram que a adição das fibras de aço aumenta a resistência ao cisalhamento do concreto, a adição de 1% de fibras aumentou em 87% a resistência última ao cisalhamento enquanto a adição de 2% proporcionou um aumento de 99%. As fibras causaram uma diminuição na largura da fissura de cisalhamento e nas vigas com 2% de fibras e baixa taxa de armadura transversal elas foram capazes de modificar o modo de ruptura, de cisalhamento para flexão. Segundo os autores, as recomendações de projeto propostas no RILEM TC TDF-162 (2003) são conservadoras para avaliar a resistência ao cisalhamento de vigas com quantidade elevada de fibras quando o concreto apresenta comportamento *hardening* na curva tensão-deformação. Também foi observado diferença significativa na resistência ao cisalhamento encontradas através das equações empíricas. As equações propostas por Narayanan e Darwish (1987) e Ashour *et al.* (1992) se mostraram mais adequadas para avaliar a resistência ao cisalhamento das vigas de CRFA testadas pelos autores.

Blanco *et al.* (2017) realizaram um programa experimental com o objetivo de propor um método simples e confiável para caracterização do comportamento ao cisalhamento do CRF. Os autores fizeram uma comparação entre os resultados obtidos através de ensaios de cisalhamento seguindo uma metodologia adaptada de Luong (1990) e ensaios de cisalhamento do tipo *Push-off*. Foram moldados espécimes utilizando concreto com resistência à compressão em torno de 40 MPa, com adição de um tipo de fibra de aço e dois tipos de macrofibras sintéticas (polipropileno e polipropileno/polietileno), nos teores de 40 e 60 kg/m³ para as fibras de aço e 5 e 7 kg/m³ para as macrofibras sintéticas. Para o ensaio de Luong foram moldados corpos de prova cilíndricos de 150mm de diâmetro e altura variável e entalhe de 10mm (Figura 15) e para o ensaio do tipo *Push-off* foram moldados espécimes cujas dimensões estão indicadas na Figura 8 e Tabela 2.

Nos ensaios do tipo *Push-off*, a carga aplicada gera tensões de cisalhamento entre os entalhes que é resistida principalmente pela matriz cimentícia. Quando a resistência ao cisalhamento da matriz é alcançada, as fissuras principais se formam, iniciando na ponta de um entalhe e se propagando até a ponta do outro entalhe. A partir deste ponto, o intertravamento dos agregados é responsável por transmitir as tensões de cisalhamento. No caso dos espécimes com fibra, a ação de ponte das fibras também contribui para tensão resistente ao cisalhamento em conjunto com o intertravamento dos agregados. À medida que o deslocamento vertical adicional é aplicado, a abertura da fissura aumenta por causa da dilatação gerada pelos agregados, induzindo um deslocamento horizontal entre as duas partes do espécime em forma de Z. Pouco depois, as duas partes do corpo de prova em forma de Z com concreto simples são separadas devido ao deslocamento limitado do mecanismo de intertravamento dos agregados e da mudança na distribuição de carga no ensaio. Por outro lado, o ensaio dos espécimes com fibras continua devido à contribuição benéfica das fibras. Os incrementos de deslocamento vertical causam deslocamentos horizontais que induzem momentos fletores no corte transversal. Em estágios posteriores do ensaio, esses momentos fletores induzem a formação de fissuras secundárias perpendiculares às fissuras formadas inicialmente. Este mecanismo de falha foi representativo em todas as amostras ensaiadas no programa experimental (BLANCO *et al.*, 2017). A análise das curvas tensão-deslocamento mostrou que para as misturas com alto teor de fibras poliméricas tiveram uma redução pronunciada da tensão de cisalhamento em comparação às misturas com alto teor de fibras de aço, o que pode ser atribuído ao baixo módulo de elasticidade das fibras poliméricas, que requerem maiores deslocamentos para ‘mobilizar’ a ação de ponte das fibras. Os autores concluíram que a resistência ao cisalhamento obtidas com o ensaio de Luong são similares às resistências obtidas com o ensaio do tipo *Push-off*.

Figura 15. Corpo de prova para o ensaio de Luong



Fonte: Blanco *et al.* (2017)

Picazo *et al.* (2021) realizaram um estudo experimental com o objetivo de avaliar a contribuição das fibras na resistência ao cisalhamento de diferentes concretos utilizando macrofibras sintéticas e fibras de aço. Para abranger as principais aplicações estruturais do CRF, os autores produziram quatro tipos de matrizes de concreto com as seguintes dosagens de fibras: concreto de resistência moderada à compressão (20 MPa) com 6 e 7,5 kg/m³ de fibras de poliolefina (macrofibra sintética), concreto de média resistência à compressão (40 MPa) com 10 kg/m³ de fibras de poliolefina, concreto autoadensável com 10 kg/m³ de fibras de poliolefina e resistência à compressão de 50 MPa e outro concreto autoadensável com 50 e 70 kg/m³ de fibras de aço e 60 MPa de resistência à compressão. Os testes foram realizados usando as metades restantes dos corpos de prova de flexão. Os resultados dos ensaios de flexão mostraram que todos os tipos de concreto atenderam aos requisitos da MC2010 para considerar as contribuições das fibras no projeto estrutural. Cada metade do corpo de prova foi usada para obter um corpo de prova com duplo entalhe, criando uma superfície de contato único para garantir a falha sob tensões de cisalhamento. Os resultados do teste de *Push-off* mostraram informações relevantes sobre o comportamento, mecanismos de fissuração e resistências residuais dos tipos de concretos mencionados anteriormente. Além disso, o uso da correlação de imagem digital (CID) permitiu a comparação dos resultados experimentais com a teoria de cisalhamento por meio do modelo de Walraven (1980, *apud* Picazo *et al.*, 2021). Os autores concluíram que os valores das máximas resistências ao cisalhamento estão ligados principalmente às propriedades da matriz no caso dos concretos reforçados com macrofibras sintéticas, enquanto para o concreto reforçado com fibras de aço foi notado influência das fibras no aumento da capacidade resistente. O comportamento do CRF sob tensões de cisalhamento mostrou que os processos de fratura aumentaram a ductilidade do concreto e os valores da energia de fratura, em todos os casos, foram superiores aos de um concreto simples. Em estudos anteriores realizados pelos autores foi demonstrado que existe certa ambiguidade quanto à adequação do uso da resistência à flexão do CRF como parâmetro de entrada para avaliar a resistência ao cisalhamento de elementos estruturais. Esta contribuição aprofundou-se no estudo em questão e com base nos resultados obtidos os autores afirmam que a valores reduzidos de deslocamento (0,5 mm) a utilização da resistência residual à flexão subestima a capacidade de carga do elemento estrutural. Por outro lado, para valores de deslocamentos iguais a 2,5 mm o uso de f_{R3} como parâmetro de entrada parece se encaixar com os resultados experimentais. Além disso, em algumas das formulações analisadas utilizando este valor da resistência residual à flexão supõe-se uma superestimação próxima a 90%. O emprego do CID permitiu a análise dos deslocamentos relativos na fissura na superfície de cisalhamento nos ensaios de *Push-off*. A partir desta análise os autores concluíram que a relação entre o deslocamento de cisalhamento e a

abertura de fissura dependem da matriz de concreto e da dosagem de fibras. Quanto maior a resistência à compressão da matriz de concreto, menor a abertura de fissuras para um dado deslizamento. Isso também foi observado para a dosagem de fibras: menores aberturas de fissuras foram observadas em espécimes de concreto com maiores quantidades de fibras. A análise dos processos de fissuração por meio do CID permitiu a correlação do processo de iniciação e crescimento da fissura com a tensão de cisalhamento. Usando técnicas CID, mapas de deformação foram gerados para cada instante do teste. Assim, os mecanismos de fratura foram encontrados. A análise CID também foi aplicada para avaliar a adequação do modelo de comportamento ao cisalhamento desenvolvido por Walraven (1980, *apud* Picazo *et al.*, 2021), aplicado originalmente ao concreto armado. Os dados de largura da fissura e deslocamento foram obtidos a partir das imagens do ensaio, economizando tempo e usando uma configuração de ensaio mais simples. As relações encontradas entre a abertura da fissura e o deslocamento mostraram que o modelo desenvolvido por Walraven (1980, *apud* Picazo *et al.*, 2021) foi capaz de prever com notável precisão a relação entre os dois parâmetros mencionados anteriormente. Como ponto final, os autores destacam que o uso de técnicas CID permitiu a avaliação de todos esses padrões de fissuras e revelou o aparecimento das fissuras por meio do software antes que elas fossem visíveis, fornecendo informações muito interessantes. Além disso, as informações obtidas por meio do CID são significativas para a futura modelagem do comportamento ao cisalhamento do concreto reforçado com fibras.

Costa, Savaris e Balestra (2019) realizaram um estudo comparativo da resistência ao cisalhamento de concreto convencional e concreto reforçado com fibras de aço, avaliando também a trabalhabilidade e a resistências à tração e à compressão. Os autores desenvolveram três misturas de concreto variando a dosagem de fibras de aço (0, 0,5 e 1%). Para cada mistura foram realizados ensaios em corpos-de-prova cilíndricos para avaliar a resistência à compressão segundo a norma ABNT NBR 5739 (2018) e a resistência à tração por compressão diametral segundo a norma ABNT NBR 7222 (2011), e ensaios em corpos-de-prova prismáticos para avaliar a resistência ao cisalhamento direto segundo a norma JSCE-SF6 (1990). Os autores observaram redução na resistência à compressão nas misturas com adição de 1% de fibras de aço devido à redução na trabalhabilidade e compacidade do material, em função do volume de fibras adicionado. A resistência à tração do concreto reforçado com fibras só apresentou aumento significativo para o volume de 1%. A partir da análise dos deslocamentos verticais medidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento direto, foi observado que a adição das fibras, além de aumentar a resistência ao cisalhamento, evitou a ruptura abrupta do corpo-de-prova.

Cuenca *et al.* (2020) realizaram um trabalho experimental com o objetivo melhorar o ensaio JSCE-SF6 (1990) – JSCE-SF6 Modificado – para evitar atrito nos pontos de carregamento e controlar possíveis rotações. Os autores escolheram o ensaio JSCE-SF6 Modificado para ter a mesma distribuição e orientação das fibras das vigas pequenas usadas para a caracterização mecânica do CRF. Os autores estudaram o CRF sob ações de cisalhamento direto considerando diferentes tipos (aço e poliméricas) e quantidades de fibras. O comportamento ao cisalhamento direto do concreto autoadensável (CAA) reforçado com fibras de aço também foi comparado com o do concreto comum. Foram então moldados e ensaiados corpos de prova prismáticos com dimensões de 150 x 150 x 450 mm³ e entalhe de 20mm criando os dois planos de cisalhamento. Foram utilizadas fibras de aço com ganchos nas extremidades nos teores de 25 kg/m³ e 40 kg/m³ para fibras com 50 mm de comprimento e no teor de 40 kg/m³ para fibras com 30 mm de comprimento e macrofibras sintéticas nos teores de 2,9 kg/m³ e 4,6 kg/m³. No ensaio os autores utilizaram uma camada de 1mm de politetrafluoretileno (Teflon) para reduzir o atrito nos pontos de carregamento e elementos de chapa de aço fixados nos blocos externos para controlar e reduzir possíveis rotações. Os autores concluíram que ensaio de cisalhamento direto adotado (com as referidas modificações para melhorias no controle de atrito, carregamento e rotação) foi adequado para avaliar a transferência de cisalhamento através de uma trinca para o CRF e que as rotações e cargas nas barras verticais não foram significativas para os valores típicos de abertura de fissuras usados nos estados limites de serviço e últimos. Os autores verificaram que para uma dada abertura de fissura, existe uma forte relação logarítmica entre a transferência de tensão de cisalhamento através da fissura e as resistências residuais pós-fissuração avaliadas de acordo com a norma EN 14651 (2007) para estados limites de serviço e últimos. A transferência de cisalhamento através da fissura depende principalmente da tenacidade do CRF e não do tipo de fibra (rígida ou não rígida). Consequentemente, tanto no CRFA quanto no concreto reforçado com fibras poliméricas (CRFP) as forças de cisalhamento parecem ser principalmente transferidas pelo intertravamento agregado aprimorado em vez de mecanismos de ação de pino promovidos pelas fibras. Os autores ainda sugerem que ensaios adicionais devem ser realizados variando o tamanho e distribuição do agregado, resistência à compressão, tipo de fibra e nível de força axial para obter mais dados, o que permitirá desenvolver um modelo que possa prever o comportamento sob cisalhamento direto do CRF, que também deve ser usado para definir novas equações físicas para estimar a resistência ao cisalhamento de elementos de CRF.

Visser e Boshoff (2021) realizaram um trabalho experimental utilizando vigas de concreto reforçado com fibras de aço e seção transversal V para investigar o comportamento ao cisalhamento das vigas considerando a contribuição das abas (flanges) da seção para a

resistência ao cisalhamento. As variáveis do estudo experimental foram: geometria (dimensão e forma) da seção transversal, dosagem de fibras (0, 0,6 e 1%). Foram realizados ensaios de resistência à compressão (EN 12390-3 (2019)) e resistência à tração (EN 14651-A1 (2007)) para caracterização do CFRA no estado endurecido. Na sequência foram moldadas 4 vigas sem armadura transversal e estas foram submetidas a ensaios assimétricos de flexão em três pontos. Os autores verificaram que o formato e área da seção transversal influenciam na resistência ao cisalhamento das vigas (a resistência aumenta com o aumento da seção transversal); a resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento da dosagem das fibras; A dosagem de 0,75% de fibras de aço pode substituir a armadura mínima de cisalhamento; as fibras aumentam a capacidade de carga após a fissuração por cisalhamento e permitem que as vigas resistam a cargas mais altas com aberturas de fissuras maiores. Com cargas baixas, as fibras têm a capacidade de restringir as fissuras, o que é um aspecto significativo do ponto de vista da durabilidade; as fibras têm o potencial de mudar o modo de ruptura de cisalhamento frágil para cisalhamento semi-dúctil (mais desejável), permitindo sinais de aviso distintos antes da ruptura, no entanto, nos casos em que as fibras aumentam significativamente a capacidade de cisalhamento é provável que ocorram rupturas frágeis; o modelo de previsão de capacidade resistente ao cisalhamento (analítico) baseado na mecânica proposto pelos autores prevê forças de cisalhamento precisas e ligeiramente conservadoras para vigas V.

Shoaib e Lubell (2021) realizaram um estudo piloto para examinar a correlação entre as propriedades mecânicas do CRFA, sob compressão, flexão e cisalhamento direto, para utilização das propriedades em futuros estudos com elementos em escala. Os autores buscaram avaliar a influência da variação da resistência à compressão do concreto (convencional e de alta resistência, 45 e 105 MPa, respectivamente), da densidade do concreto (convencional e leve, 2390 e 1910 kg/m³) e da dosagem das fibras de aço (0, 0,5 e 1%), mantendo os demais parâmetros constantes. Também desenvolveram uma nova relação para a resistência à tração residual normalizada versus abertura de fissuras. Foram realizados os ensaios de resistência à compressão em corpos-de-prova cilíndricos segundo a norma ASTM C39 (2020), ensaios de resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos com entalhe segundo a norma ASTM C1609 (2019) e ensaios de cisalhamento direto em corpos-de-prova prismáticos utilizando um procedimento modificado da norma JSCE-G 553 (1999). Os autores verificaram que as fibras de aço foram mais eficazes na resistência ao cisalhamento para o concreto de resistência e densidade normais e atribuíram isso ao fato de que a ruptura no corpo-de-prova aconteceu em um caminho que ‘contornou’ os agregados enquanto nas outras duas misturas (concreto leve e concreto de alta resistência) houve a ruptura do agregado graúdo. Além disso foi observado um aumento no módulo de ruptura e na resistência à flexão para todas as misturas, sendo esse aumento mais pronunciado para o

concreto leve. O modelo bilinear proposto pelos autores para expressar a relação entre a abertura da fissura (CMOD) e a tensão de tração uniforme equivalente transmitida pelas fibras de aço demonstrou boa concordância com os resultados experimentais para todas as misturas, independente da densidade, resistência à compressão ou dosagem de fibras.

Em síntese, os estudos revisados convergem para a ideia de que as fibras elevam a tenacidade e a capacidade de transferência de esforços após a fissuração, mas apresentam respostas distintas conforme o método de ensaio, a resistência da matriz e o tipo e teor de fibra. Ensaio de cisalhamento direto evidenciam que o ganho de desempenho decorre sobretudo da maior tenacidade do compósito e do intertravamento de agregados reforçado pela ação de ponte das fibras, enquanto a contribuição do pino e do arrancamento varia com a rigidez da fibra e a rugosidade da fissura. Em concretos de alta resistência, parte dos ganhos pode ser mitigada, pois a fissura tende a atravessar os agregados graúdos, reduzindo o efeito de intertravamento que potencializa a ação das fibras; já dosagens elevadas de fibras de aço podem até alterar o modo de falha e substituir armadura mínima, embora demandem cautela quanto a rupturas frágeis em níveis altos de sollicitação. Persistem, contudo, incertezas relevantes: (i) a comparabilidade entre os métodos empregados para a determinação da resistência ao cisalhamento (JSCE-SF6, *Push-off*, entre outros), (ii) a validade do uso direto de parâmetros de resistência residual à flexão (f_{R3}) para prever cisalhamento, sobretudo em pequenas aberturas de fissura, e (iii) a forte sensibilidade a variáveis da matriz e dos agregados. De forma crítica, os resultados sugerem que o avanço no dimensionamento passa pela vinculação da resistência ao cisalhamento a leis tensão-abertura de fissura obtidas em ensaios com controle da abertura de fissuras, idealmente complementadas por técnicas de correlação de imagem digital (CID), e integradas a modelos de bielas e ao campo de compressão em conformidade com os estados-limite de serviço e último.

3.4 USO DA CORRELAÇÃO DE IMAGEM DIGITAL (CID)

Técnicas complementares, como a correlação de imagem digital (CID), fibras sensíveis e emissão acústica, têm se mostrado relevantes para esclarecer o processo de fratura de materiais frágeis sob tensões de cisalhamento. A CID permite avaliar o campo de deformações durante o ensaio de forma não invasiva, sem interferir nas condições de contorno e sem contato com os corpos de prova. Dessa maneira, torna-se possível identificar a geração das fissuras, acompanhar seu crescimento, direções e modos de falha (PICAZO *et al.*, 2021).

A técnica consiste no registro e rastreamento de imagens de uma superfície previamente preparada com um padrão aleatório de pontos. A comparação entre a imagem de referência (estado inicial) e as imagens obtidas durante o carregamento permite mapear deslocamentos e deformações a partir da variação do posicionamento dos pontos, resultando em campos completos de deslocamento e deformação (RESENDE, 2020).

Nos últimos anos, diversos estudos aplicaram a CID na investigação da resistência ao cisalhamento direto ou em vigas, explorando diferentes grandezas que a técnica pode medir com alta resolução. Entre essas grandezas, destacam-se a abertura de fissura (w) e o deslizamento relativo (Δ), que aparecem de forma associada na descrição da fratura por cisalhamento. Picazo *et al.* (2021) obtiveram curvas experimentais w - Δ para diferentes concretos reforçados com fibras, demonstrando que a relação entre essas grandezas depende tanto da resistência da matriz quanto da dosagem e do tipo de fibra. Gali e Subramaniam (2019) utilizaram w e Δ para caracterizar o comportamento dilatante da fissura, evidenciando que a abertura aumenta continuamente à medida que ocorre o deslizamento. Resultados semelhantes foram relatados por Zarrinpour e Chao (2017), que mediram ambas as grandezas ao longo do traçado da fissura crítica para estimar as tensões de intertravamento dos agregados. Em vigas esbeltas, Resende (2020) empregou medições ponto a ponto de w e Δ ao longo da fissura diagonal crítica para calcular explicitamente as parcelas resistentes ao cisalhamento, como o efeito pino e o engrenamento dos agregados. Já Guo *et al.* (2025) utilizaram a abertura medida via CID para identificar o instante de fissuração e relacioná-lo ao comportamento pós-pico, confirmando que a evolução das deformações no plano de cisalhamento está diretamente vinculada à relação intrínseca entre abertura e deslizamento. Esses estudos demonstram que a CID, ao permitir medir w e Δ com elevada precisão espacial e temporal, constitui uma ferramenta fundamental para descrever, com precisão, a evolução da fissuração sob tensões de cisalhamento.

Além da medição de w e Δ , a CID tem sido amplamente utilizada para caracterizar a formação e a propagação das fissuras. Guo *et al.* (2025) capturaram o momento exato de fissuração no ensaio *Push-off*, observando a abertura quase simultânea ao longo de toda a superfície de cisalhamento. Resende *et al.* (2021) monitoraram a evolução da fissura em ensaios *Push-off*, identificando inclusive fissuras formadas fora da região entalhada, e reconstruíram posteriormente a topografia da superfície fissurada por meio de fotogrametria tridimensional. Em estudos com vigas, Gali e Subramaniam (2019) detectaram a fissura antes de ela ser visível a olho nu, enquanto Zarrinpour e Chao (2017) acompanharam sua propagação até a zona comprimida. Picazo *et al.* (2021) também registraram a coalescência das fissuras entre os entalhes ao longo do carregamento.

A capacidade da CID de gerar campos completos de deformação constitui outra contribuição relevante. Resende *et al.* (2021) mapearam deformações horizontais no ensaio *Push-off*, identificando regiões críticas relacionadas à formação das fissuras. De forma semelhante, Gali e Subramaniam (2019) utilizaram esses mapas para localizar o painel onde a fissura crítica se formaria, enquanto Zarrinpour e Chao (2017) analisaram campos de deformação que permitiram avaliar a profundidade da zona comprimida e a distribuição de tensões na alma da viga durante o carregamento.

A medição da rotação relativa entre partes do corpo de prova no ensaio *Push-off* foi realizada com o auxílio da CID por Guo *et al.* (2025), que compararam deslocamentos obtidos entre pares de pontos e verificaram que a rotação relativa entre os blocos do corpo de prova era desprezível, reforçando que a abertura da fissura era predominantemente controlada pelo deslocamento normal ao plano de cisalhamento.

Alguns estudos também exploraram a aplicação tridimensional da técnica. Resende *et al.* (2021) utilizaram fotogrametria 3D para reconstruir a topografia da superfície fissurada, permitindo obter o ângulo de contato (Ω) associado ao intertravamento dos agregados e ampliando o nível de detalhamento possível nas análises pós-ruptura.

O conjunto desses trabalhos demonstra que a CID permite capturar a iniciação da fissura, medir abertura e deslizamento com precisão micrométrica, acompanhar a propagação da trinca, mapear campos completos de deformação, reconstruir superfícies fissuradas em 3D e apoiar a decomposição dos mecanismos resistentes ao cisalhamento. Diante dessas vantagens, a técnica foi incorporada neste trabalho tanto nos ensaios de cisalhamento do tipo *Push-off* quanto nos ensaios em vigas, de modo a complementar medições convencionais e fornecer uma caracterização mais detalhada da formação e evolução das fissuras sob esforços cortantes.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

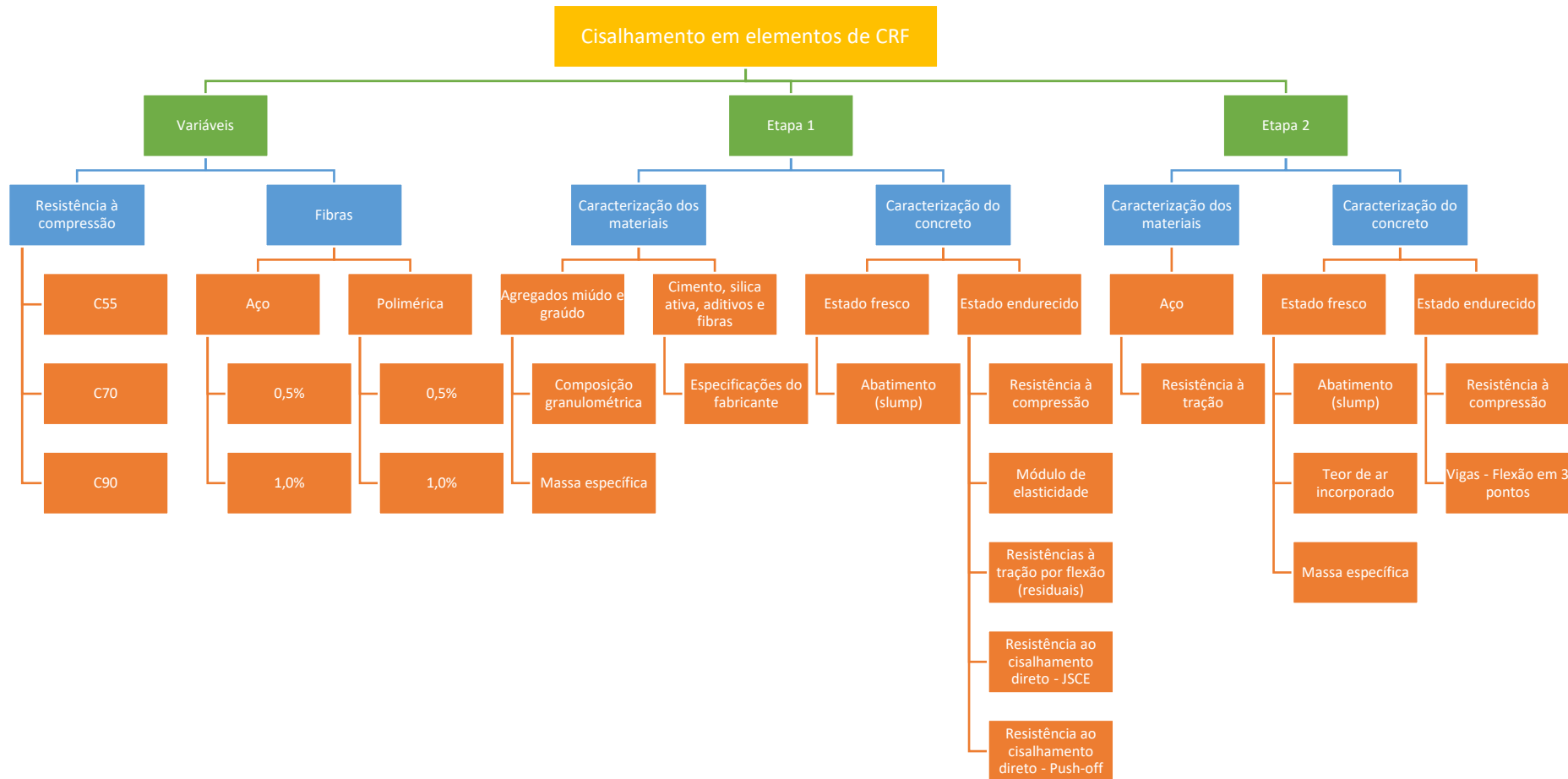
Este capítulo descreve o programa experimental desenvolvido nesta pesquisa, que teve como objetivo analisar a influência da adição de fibras na capacidade resistente ao cisalhamento de vigas de concreto sem armadura transversal.

O programa foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, realizou-se a caracterização mecânica dos concretos e a investigação da contribuição das fibras nos mecanismos de transferência de esforço cortante. Para isso, foram conduzidos ensaios de compressão axial em corpos de prova cilíndricos, ensaios de tração na flexão em corpos prismáticos entalhados (ensaio de flexão em três pontos), ensaios de cisalhamento direto conforme a norma japonesa JSCE-SF6 (1990) e ensaios de cisalhamento do tipo *Push-off*.

Na segunda etapa, foi investigada a influência da resistência à compressão, do tipo e do teor de fibras no comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras, por meio de ensaios de flexão em vigas sem armadura transversal. Essa etapa envolveu uma nova moldagem dos concretos. Foram realizados novamente ensaios de caracterização, incluindo resistência à compressão, determinação do teor de ar incorporado e caracterização das barras de aço utilizadas na armadura longitudinal, a fim de verificar a uniformidade e qualidade dos materiais empregados.

A Figura 16 apresenta o fluxograma geral do programa experimental adotado neste estudo. Na sequência, são detalhados os materiais, procedimentos e metodologias utilizados em cada etapa.

Figura 16. Fluxograma do programa experimental da pesquisa



4.1 MATERIAIS

4.1.1 Concreto

Foram produzidos e caracterizados concretos com resistência à compressão pertencentes ao grupo II segundo classificação da ABNT NBR 8953 (2015). Foram escolhidas as classes C55, C70 e C90.

Para a produção do concreto foi utilizado cimento CPV ARI da marca CAUE, areia (agregado miúdo), brita (agregado graúdo), sílica ativa da marca Tecnosil, água e aditivo superplastificante.

Os agregados foram obtidos de um mesmo fornecedor para a produção dos concretos utilizados em todos os traços, em sacos de 20 kg. Foi realizada a correção da quantidade de água em todas as misturas em função da umidade da areia e da brita.

Foi utilizado o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 4001 da MC Bauchemie, recomendado para produção de concretos com quantidades de água extremamente baixas, a fim de proporcionar trabalhabilidade à mistura.

4.1.2 Fibras

Para o concreto reforçado com fibras foram utilizadas fibras de aço e macrofibras poliméricas. As características e propriedades de cada fibra, fornecidas pelos fabricantes, estão apresentadas a seguir.

4.1.2.1 Fibras metálicas

As fibras com ganchos nas extremidades, patenteadas pelo nome DRAMIX®3D 80/60BG, foram fornecidas pela BEKAERT. Estas fibras são fabricadas a partir de fios de aço trefilados, em pentes, com as fibras coladas entre si por uma cola hidrossolúvel (Figura 17). No processo de fabricação do concreto, as fibras se dispersam na matriz quando entram em contato com a água da mistura. Essa fibra pertence ao grupo I, do Tipo A (ancoragem), segundo classificação da ABNT NBR 15530 (2019). Na Tabela 4 estão apresentadas as características da fibra com ganchos nas extremidades.

Figura 17. Fibras metálicas



Fonte: Autoria própria

Tabela 4. Características das fibras de aço com ganchos nas extremidades

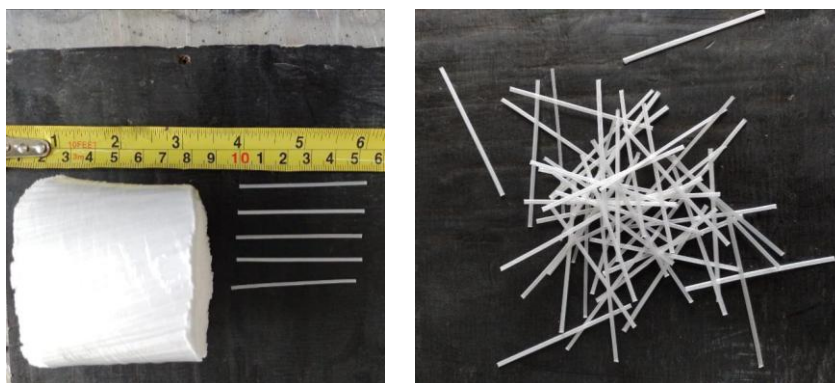
Resistência à tração (MPa)	1225
Módulo de elasticidade (GPa)	200
Densidade (g/cm ³)	7,85
Comprimento (mm)	60
Diâmetro (mm)	0,75
Fator de forma	80

Fonte: Catálogo do fabricante

4.1.2.2 Fibras poliméricas

As macrofibras poliméricas em monofilamento designadas KraTos®, são fabricadas pela KORDSA (Figura 18), a partir do polímero-base polipropileno. Na Tabela 5 estão apresentadas as características dessa fibra.

Figura 18. Macrofibras poliméricas



Fonte: Autoria própria

Tabela 5. Características da fibra polimérica em monofilamento

Resistência à tração (MPa)	550
Módulo de elasticidade (GPa)	8,5
Densidade (g/cm³)	0,91
Comprimento (mm)	54
Diâmetro do filamento (mm)	0,72
Polímero-base	Polipropileno

Fonte: Catálogo do fabricante

4.2 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CARRF E INVESTIGAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS PARA A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

4.2.1 Parâmetros avaliados

A influência da fibra sobre o comportamento ao cisalhamento do concreto foi avaliada considerando as seguintes variáveis: resistência à compressão do concreto, tipo e dosagem das fibras. Para a resistência à compressão foram adotados concretos das classes C55, C70 e C90.

Com relação às fibras, foram utilizados dois tipos: fibras de aço e macrofibras poliméricas, em dois teores volumétricos: 0,5% e 1,0%. A escolha desses teores se justifica por diferentes critérios. Primeiramente, são os valores mais frequentemente empregados em pesquisas experimentais, como evidenciado por Lantsoght (2019a) em sua revisão de ensaios com vigas de concreto reforçado com fibras, bem como pelo levantamento bibliográfico realizado nesta tese (Tabela 1), que confirma a predominância de dosagens de 0,5% e 1,0%. Além disso, Figueiredo e Ceccato (2015) verificaram que, a partir de 1,0%, o abatimento tende a se tornar nulo e a trabalhabilidade do concreto é significativamente reduzida, o que dificulta a aplicação prática sem modificações adicionais no traço.

4.2.2 Ensaios de caracterização dos agregados

A caracterização dos agregados foi realizada de acordo com as normas apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Ensaios para caracterização dos agregados

Propriedades	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Massa unitária	-	ABNT NBR 16972:2021
Densidade e absorção de água	ABNT NBR 16917:2021	-
Composição granulométrica	ABNT NBR 17054:2022	ABNT NBR 17054:2022

Fonte: Autoria própria

4.2.3 Caracterização e produção do concreto referência (sem fibra) e com fibra (CRF)

Os traços utilizados na produção dos concretos foram baseados no estudo de Almeida (2023). Foi realizado um programa piloto com o objetivo de aferir a resistência à compressão para as três classes de resistências desejadas neste trabalho: C55, C70 e C90.

A partir dos resultados do programa piloto, foram realizados os ajustes necessários e os traços unitários em massa que foram utilizados para os concretos estão apresentados na Tabela 7. Na Tabela 8 estão apresentadas as quantidades de cada material para a produção de 1 m³ de concreto e na Tabela 9 estão apresentados os consumos de fibras para cada teor estudado.

Tabela 7. Traços dos concretos sem fibras

Concreto	Traço (em massa: cimento: sílica: areia: brita: água)
C55	1:0:1,5:2:0,40
C70	1:0:1,5:2:0,37
C90	1:0,1:1,5:2:0,33

Fonte: Autoria própria

Tabela 8. Dosagens dos concretos (com e sem fibras)

Concreto	Cimento (kg/m ³)	Sílica (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Agregados (kg/m ³)		Aditivo (kg/m ³)
				Areia	Brita	
C55	450	-	185	680	950	0,90
C70	500	-	175	750	950	3,50
C90	500	50	165	750	950	4,50

Fonte: Autoria própria

Tabela 9. Consumo de fibras para cada teor (kg/m³)

Fibra	Teor de fibra (% em volume)	
	0,50	1,00
Aço	40,00	80,00
Polimérica	4,50	9,00

Fonte: Autoria própria

Todos os materiais foram previamente separados e pesados e mantidos em sacos fechados até a data da produção dos concretos (Figura 19).

Figura 19. Separação dos materiais utilizados na produção dos concretos



Fonte: Autoria própria

O processo de mistura dos concretos foi realizado em uma betoneira intermitente de eixo inclinado, com capacidade nominal de 400 litros e volume útil de 150 litros por betonada. A disposição dos materiais na betoneira foi realizada de acordo com um procedimento padronizado, conforme descrito a seguir. A Figura 20 apresenta as três etapas do processo de mistura.

Inicialmente o agregado graúdo foi adicionado, seguido pela incorporação de um terço do volume total de água, com um tempo de mistura de 2 minutos. Na sequência, o cimento (e a sílica, no caso do concreto C90) foi adicionado, juntamente com um terço adicional do volume de água, mantendo também um tempo de mistura de 2 minutos. Na etapa subsequente, todo o agregado miúdo foi incorporado, acompanhado do restante da água, com mais 2 minutos de mistura. Após esta fase, o aditivo superplastificante foi adicionado em quantidade específica para cada mistura, determinada com base na trabalhabilidade desejada. O tempo de mistura foi ajustado conforme a quantidade de aditivo utilizada, visando o ajuste do abatimento (buscando manter entre 160 mm e 200 mm antes da incorporação das fibras). Finalmente, as fibras foram adicionadas de maneira uniforme, completando o processo de mistura com um tempo total de 7 minutos, o que garantiu a distribuição homogênea dos componentes no concreto.

Figura 20. Sequência de colocação dos materiais na betoneira



Fonte: Autoria própria

Após a mistura, a consistência do concreto foi verificada por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone e foram moldados corpos de prova para cada traço para caracterização dos concretos com e sem fibras, conforme apresentado na Tabela 10 e Figura 21.

Foram utilizadas fôrmas metálicas para os corpos de prova cilíndricos e prismáticos e fôrmas de madeira de compensado naval para os modelos do ensaio de cisalhamento do tipo *Push-off*. Nas fôrmas foi aplicada uma camada de óleo mineral para auxiliar a desmoldagem. O adensamento foi realizado em mesa vibratória (Figura 21(b)), com o objetivo de eliminar os vazios, conforme especificado pela ABNT NBR 5738 (2015). Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e submetidos ao procedimento de cura em câmara úmida, com temperatura e umidade controladas, até a data dos ensaios que foram realizados aos 28 dias.

Tabela 10. Relação de ensaios e corpos de prova para caracterização dos concretos

Ensaio	Norma	Nº de corpos de prova	Tipo e dimensões dos corpos de prova
Consistência pelo abatimento de tronco de cone	ABNT NBR 16889:2020	-	-
Resistência à compressão	ABNT NBR 5739:2018	3	Cilíndrico (10 x 20 cm)
Módulo de elasticidade	ABNT NBR 8522:2017	3	Cilíndrico (10 x 20 cm)
Resistência à tração por flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais)	ABNT NBR 16940:2021	3	Prismático (15 x 15 x 55 cm)
Resistência ao cisalhamento direto	JSCE-SF6 (1990)	3	Prismático (15 x 15 x 55 cm)
Resistência ao cisalhamento <i>Push-off</i>	-	3	Prismático (12 x 20 x 40 cm)

Fonte: Autoria própria

Figura 21. Produção dos concretos:

(a) verificação da consistência, (b) vibração e adensamento e (c) moldagem dos corpos de prova



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria

Os entalhes nos corpos de prova para os ensaios de resistência à tração e resistência ao cisalhamento foram realizados na véspera da data do ensaio, utilizando serra mármore (Figura 22). Os corpos de prova cilíndricos foram retificados para garantir a planicidade das extremidades para o ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

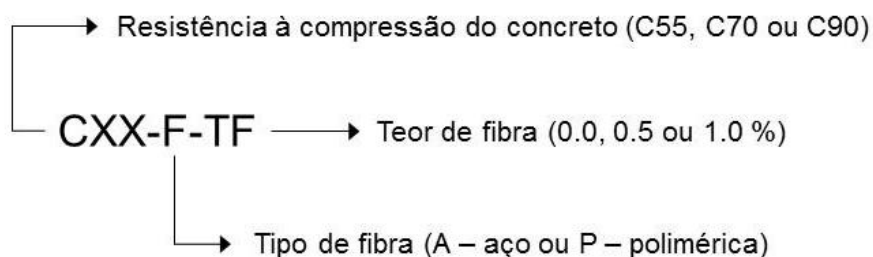
Figura 22. Execução dos entalhes nos corpos de prova prismáticos



Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova foram devidamente identificados para garantir o total controle e rastreabilidade das peças, identificadas com nome, traço e data da moldagem. O padrão adotado para nomenclatura está ilustrado na Figura 23.

Figura 23. Padrão de nomenclatura para os corpos de prova



Fonte: Autoria própria

4.2.4 Correlação de Imagem Digital (CID)

A técnica CID foi empregada nos ensaios de cisalhamento direto do tipo *Push-off* para medição da abertura de fissura e do deslizamento no plano de cisalhamento dos corpos de prova. A superfície frontal dos corpos de prova recebeu uma pintura com tinta branca fosca e posteriormente foram pintados com tinta preta fosca os pontos utilizando-se uma escova em formato de espiral (Figura 24).

Figura 24. Preparação dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento do tipo *Push-off*



Fonte: Autoria própria

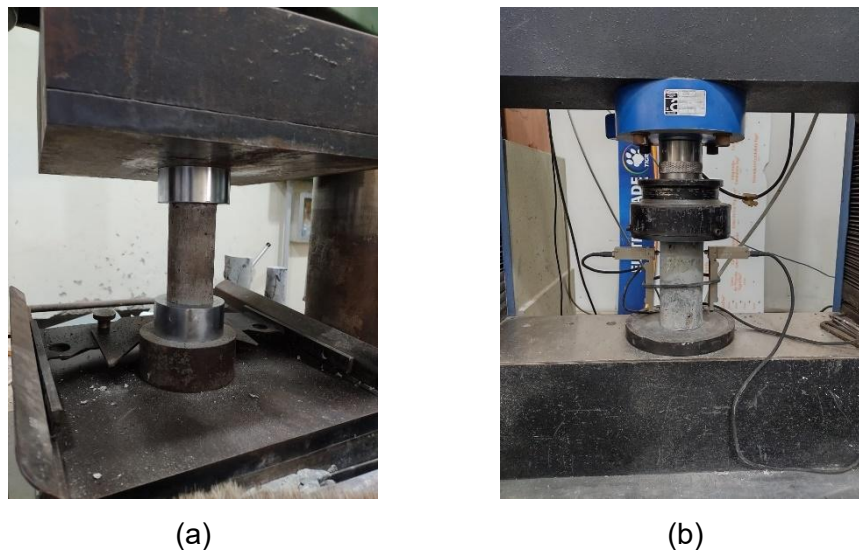
Para obtenção das imagens foram utilizados celulares com câmeras de 12 MP de resolução. Para controle da velocidade de captura das fotos foi utilizado o aplicativo *Lens Buddy*. As imagens foram capturadas com um intervalo de um segundo. A análise das imagens foi realizada com o software *GOM Correlate*. Para garantir uma adequada aquisição de dados foram tomados os devidos cuidados com o controle da exposição da superfície à luz, por meio de um refletor cobertura com tecido TNT (promovendo a luz difusa necessária) e o posicionamento da câmera ortogonalmente à superfície de análise.

4.2.5 Ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade

Os ensaios para determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto reforçado com fibras foram realizados conforme prescrições da ABNT NBR 5739:2018 e ABNT NBR 8522-1:2021, respectivamente.

Foram produzidos 6 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 x 20 cm, para cada um dos traços. Foram ensaiados três corpos de prova para obtenção da resistência à compressão e três corpos de prova para obtenção do módulo de elasticidade. Os ensaios foram realizados aos 28 dias, no Laboratório de Materiais da PUC-Campinas, em prensa hidráulica EMIC DL3000F com capacidade de 300 kN (Figura 25). A medição da variação de comprimento no ensaio do módulo de elasticidade foi realizada por meio de dois transdutores de deslocamentos (extensômetros).

Figura 25. Ensaio de (a) resistência à compressão e (b) e módulo de elasticidade



Fonte: Autoria própria

4.2.6 Ensaio de resistência à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais)

Os ensaios para determinação da resistência à tração do concreto foram realizados conforme a ABNT NBR 16940:2021 (Figura 26). Foram ensaiados 3 corpos de prova prismáticos com dimensões de 15 x 15 x 55 cm e entalhe no centro com 5 mm de espessura e 25 mm de altura, para cada um dos traços. Os ensaios foram realizados aos 28 dias, no Laboratório de Materiais da Evolução Engenharia. Trata-se de um ensaio de resistência à tração, com dois pontos de apoio e um ponto de aplicação de carga.

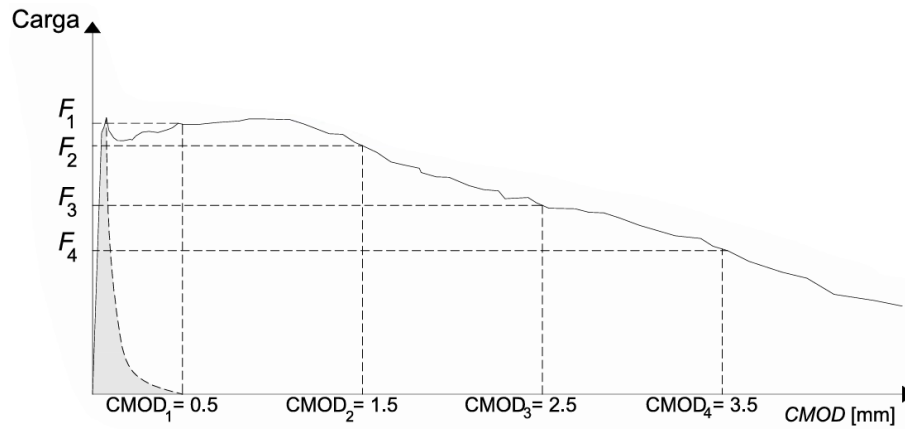
Figura 26. Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Autoria própria

No ensaio é posicionado um transdutor de deslocamento (*clip gauge*) no entalhe que mede a abertura da fissura (CMOD – *crack mouth opening displacement*). O carregamento é aplicado por meio de um pistão hidráulico em sistema de controle em malha fechada (*closed-loop*), sendo o ensaio conduzido sob controle de deslocamento. Para realização do ensaio foi utilizado uma prensa hidráulica INTERMETRIC IM750SRV com capacidade de 500 kN. No equipamento de ensaio é controlado a taxa de aumento de CMOD, que é operado de modo que o CMOD aumente a taxa constante de 0,05 mm/min até CMOD igual a 0,1 mm. Após atingir essa abertura no entalhe, o equipamento é operado de modo que o CMOD aumente a uma taxa constante de 0,2 mm/min até a finalização do ensaio, que ocorre quando o CMOD atinge 4 mm. Desse ensaio foram obtidas curvas de carga x CMOD, conforme ilustrado na Figura 27. A partir das curvas calcula-se com a Eq. 4.1 e Eq. 4.2, o limite de proporcionalidade (f_L) e as resistências residuais à tração na flexão (f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} e f_{R4}).

Figura 27. Curva carga x CMOD obtida no ensaio de flexão



Fonte: ABNT NBR 16940 (2021)

$$f_L = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad \text{Eq. 4.1}$$

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad \text{Eq. 4.2}$$

Onde:

f_L é o limite de proporcionalidade (MPa);

$f_{R,j}$ é a resistência à tração residual correspondente ao CMOD_j (j=1, 2, 3 e 4) (MPa);

F_L é a carga correspondente ao limite de proporcionalidade – máxima carga obtida no ensaio até um deslocamento de 0,05 mm (N);

F_j é a carga correspondente ao CMOD_j (j = 1, 2, 3 e 4) (N);

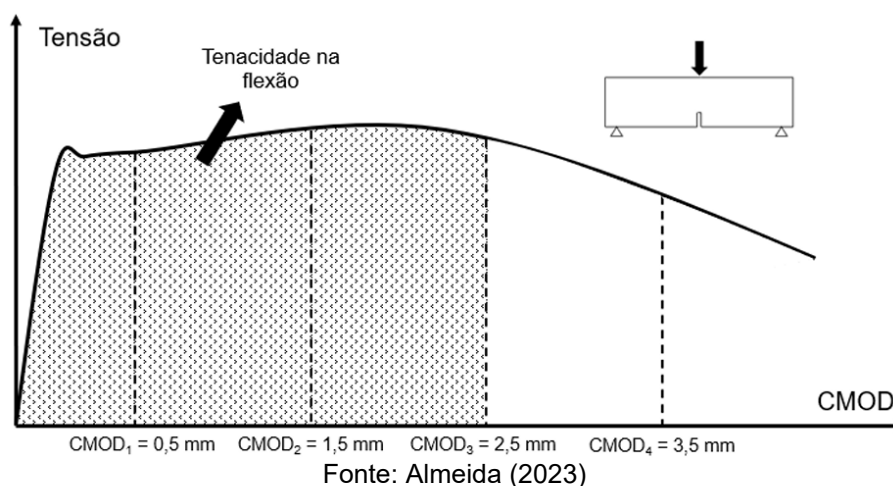
l é o comprimento do vão (mm);

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).

A partir dos resultados dos ensaios de resistências residuais à tração também foi determinada a tenacidade à flexão, uma importante propriedade do CRF, que representa o ganho de energia proporcionado pela adição de fibras ao concreto. A tenacidade foi calculada seguindo o mesmo procedimento de Almeida (2023), que considerou a tenacidade sendo a área sob a curva tensão x CMOD até a abertura de fissura de 2,5 mm (Figura 28), que está associada às verificações de estado-limite último (ELU) de acordo com ABNT NBR 16935 (2021).

Figura 28. Tenacidade na flexão



4.2.7 Ensaio de resistência ao cisalhamento segundo a JSCE-SF6 (1990)

A resistência ao cisalhamento direta foi determinada seguindo uma metodologia baseada nas recomendações da norma japonesa SF6 (JSCE-SF6, 1990).

Conforme apresentado no item 2.3.2, diferentes dimensões são adotadas para os corpos de prova nos estudos analisados. Nesta pesquisa, foram moldados 3 corpos de prova prismáticos de dimensões 15 x 15 x 55 cm, para cada um dos traços. Essa dimensão foi escolhida para possibilitar a utilização das mesmas fôrmas e aparatos da prensa utilizados nos ensaios de resistência à tração na flexão.

Os ensaios foram realizados aos 28 dias, no Laboratório da Evolução Engenharia (Figura 29). O carregamento foi aplicado de forma contínua, a uma taxa de 0,3 mm/min até a ruptura ou um deslocamento máximo de 4 mm, utilizando uma prensa hidráulica INTERMETRIC IM750SRV com capacidade de 500 kN, em sistema de controle fechado

(*closed-loop*). Para induzir a ruptura no plano de cisalhamento, a seção transversal do corpo de prova foi reduzida para 12 x 12 cm, por meio da execução de entalhes com 2,5 mm de espessura e 15 mm de profundidade, distantes 19,75 cm das extremidades, conforme ilustrado na Figura 30. Para os corpos de prova do concreto C90 com adição de fibras de aço (C90-A-0,5 e C90-A-1,0) foi necessário reduzir a seção transversal para 10 x 10 cm, através da execução de entalhes com 2,5 mm de espessura e 25 mm de profundidade, em função da limitação da capacidade de carga da prensa utilizada, que seria superada nestes casos.

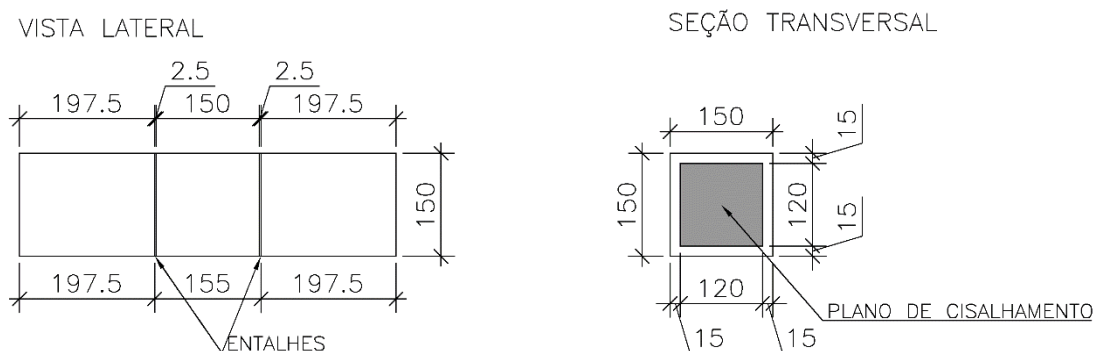
O deslocamento foi medido por meio de um sensor de deslocamento variável (transdutores lineares de deslocamento variável – LVDTs) fixado na superfície do terço central do corpo de prova para medir a variação do deslocamento vertical conforme a aplicação da tensão. A resistência ao cisalhamento foi calculada com a Eq. 4.3.

Figura 29. Ensaio de cisalhamento segundo JSCE-SF6



Fonte: Autoria própria

Figura 30. Dimensões do corpo de prova para ensaio de cisalhamento segundo JSCE-SF6 (1990)



(Dimensões em mm)

Fonte: Autoria própria

$$f_s = \frac{F_{max}}{2 \cdot b \cdot h} \quad \text{Eq. 4.3}$$

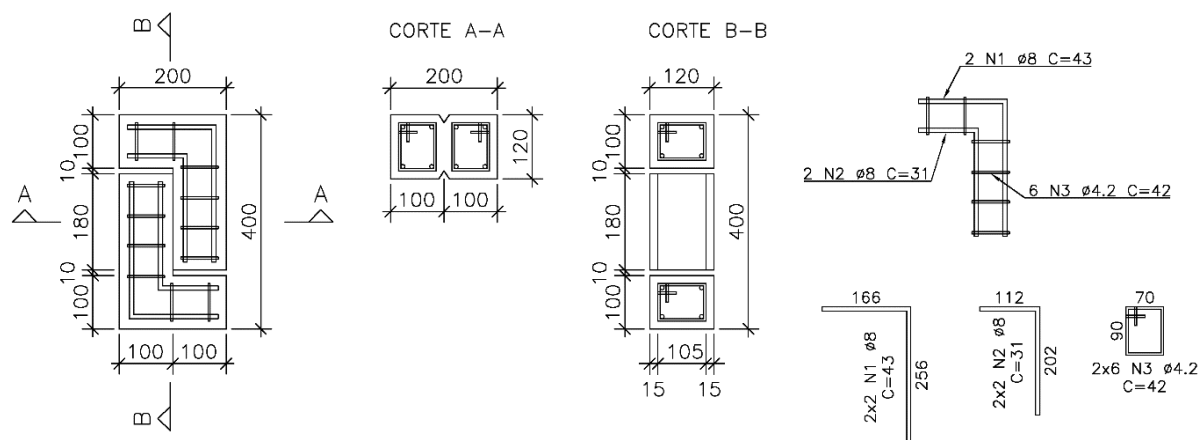
Onde f_s é a resistência direta ao cisalhamento (MPa), F_{max} é a máxima carga obtida no ensaio (N), b e h são, respectivamente, a largura e altura do corpo de prova no plano de ruptura (mm).

4.2.8 Ensaio de resistência ao cisalhamento do tipo *Push-off*

A influência da fibra e a parcela de engrenamento dos agregados na capacidade resistente ao esforço cortante de vigas de concreto reforçado com fibras foram investigados também através de ensaios do tipo *Push-off*. Esse ensaio permite a obtenção da tensão tangencial e dos deslocamentos nas direções normal e tangencial ao plano de cisalhamento. Embora esse ensaio seja muito utilizado pelos pesquisadores, ele não é um ensaio normatizado e por isso são adotadas diferentes dimensões e configurações (entalhe e armadura). No item 2.3.2 foram apresentados os resultados de alguns estudos que realizaram o ensaio do tipo *Push-off* e as dimensões e configurações que foram adotadas nesta pesquisa estão baseadas nesses dados.

Foram moldados 3 corpos de prova do tipo Z, para cada um dos traços, com dimensões de 20 x 12 x 40 cm (comprimento, largura e altura, respectivamente), com plano de cisalhamento medindo 18 x 10 cm e um entalhe de 1 x 1 cm nas duas faces laterais opostas contornando a seção de cisalhamento. Para evitar rupturas por flexão durante o ensaio, os corpos de prova foram armados com barras de diâmetro de 8 mm no contorno e estribos de diâmetro de 4,2 mm. Na Figura 31 e Figura 32, estão apresentadas a geometria, armação e fôrma dos corpos de prova desse ensaio.

Figura 31. Dimensões e armação do corpo de prova para ensaio de cisalhamento do tipo *Push-off*



(Dimensões em mm)

Fonte: Autoria própria

Figura 32. Fôrma preparada e corpo de prova moldado para ensaio de cisalhamento do tipo *Push-off*



Fonte: Autoria própria

Os deslocamentos verticais e horizontais foram medidos por meio de dois transdutores lineares de deslocamento (LVDTs), um em cada direção, além da captura dos dados através da técnica de correlação de imagem digital, conforme descrito no item 4.2.4. Os LVDTs foram fixados através de suportes metálicos fixados nas faces lateral e posterior dos corpos de prova, em parafusos que foram fixados na fôrma antes da moldagem (Figura 33).

Figura 33. Instrumentação dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento do tipo *Push-off*



Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova foram ensaiados em uma prensa hidráulica EMIC DL3000F com capacidade de 300 kN (Figura 25), onde foi aplicado um carregamento contínuo a uma taxa controlada de 0,75 mm/min. Na Figura 34 está apresentado o esquema geral do ensaio.

Figura 34. Esquema geral do ensaio de cisalhamento do tipo *Push-off*



Fonte: Autoria própria

A tensão resistente ao cisalhamento foi calculada com a Eq. 4.4.

$$\tau_u = \frac{F_{max}}{b \cdot h} \quad \text{Eq. 4.4}$$

Onde τ_u é a tensão última ao cisalhamento (MPa), F_{max} é a máxima carga obtida no ensaio (N), b e h são, respectivamente, a largura e altura do corpo de prova no plano de cisalhamento (mm).

4.3 ETAPA 2: INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE VIGAS ESBELTAS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS SEM ESTRIBOS

Para investigação do comportamento ao cisalhamento, vigas esbeltas de CRF foram dimensionadas, moldadas e ensaiadas para se verificar o comportamento dos elementos de CRF sem armadura transversal, a influência das fibras e da resistência à compressão do concreto nos diferentes mecanismos de cisalhamento. Foram analisados os resultados para deslocamento, deformação da armadura longitudinal e padrão de fissuração (CID).

As vigas foram dimensionadas de modo que a ruptura ocorresse sempre por cisalhamento e foi moldado um conjunto de 14 vigas com armadura longitudinal e sem armadura transversal.

As vigas foram moldadas e ensaiadas no Laboratório de Materiais da PUC-Campinas e foram produzidas com os mesmos traços e procedimentos utilizados na moldagem dos corpos de prova dos ensaios de caracterização mecânica, conforme descrito no item 4.2.

4.3.1 Parâmetros avaliados e produção das vigas para ensaio de flexão

Nesta etapa do estudo, o objetivo foi verificar a influência da resistência à compressão do concreto e do tipo e teor das fibras no comportamento ao cisalhamento das vigas de CRF sem estribos.

Para verificar a influência do tipo e teor de fibras foi adotada a resistência à compressão da classe C90, caracterizando os concretos de alta resistência. Foram moldadas duas vigas para cada combinação de resistência (C90), tipo de fibra (aço e macrofibra polimérica) e teor de fibra (0,5% e 1,0%).

Para avaliar a influência da resistência à compressão do concreto no comportamento ao cisalhamento das vigas, foram moldadas duas vigas com concreto de resistência da classe C55 e C70, com macrofibras poliméricas no teor de 1,0%.

As vigas possuem seção transversal com 15 cm de largura e 20 cm de altura e comprimento de 120 cm. A aplicação do carregamento foi feita a 43 cm de distância do apoio de modo que a relação entre a altura útil da viga e o vão de cisalhamento (a/d) foi de aproximadamente 2,68, para obter comportamento de viga esbelta e garantir ruptura por cisalhamento. O cenário completo das vigas moldadas e ensaiadas estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Planejamento experimental para as vigas

Identificação	Concreto	Fibra		Dimensão da viga (cm)			Vão de cisalhamento (a/d)	Quantidade de vigas
		Tipo	Teor	b	h	l		
C90-R	C90	sem	0	15	20	120	2,68	2
C90-A-0,5	C90	aço	0,5	15	20	120	2,68	2
C90-A-1,0	C90	aço	1,0	15	20	120	2,68	2
C90-P-0,5	C90	polimérica	0,5	15	20	120	2,68	2
C90-P-1,0	C90	polimérica	1,0	15	20	120	2,68	2
C55-P-1,0	C55	polimérica	1,0	15	20	120	2,68	2
C70-P-1,0	C70	polimérica	1,0	15	20	120	2,68	2

Fonte: Autoria própria

As vigas foram devidamente identificadas para garantir o total controle e rastreabilidade das peças, identificadas com nome, traço e data da moldagem, seguindo o mesmo padrão de nomenclatura adotadas na etapa de caracterização.

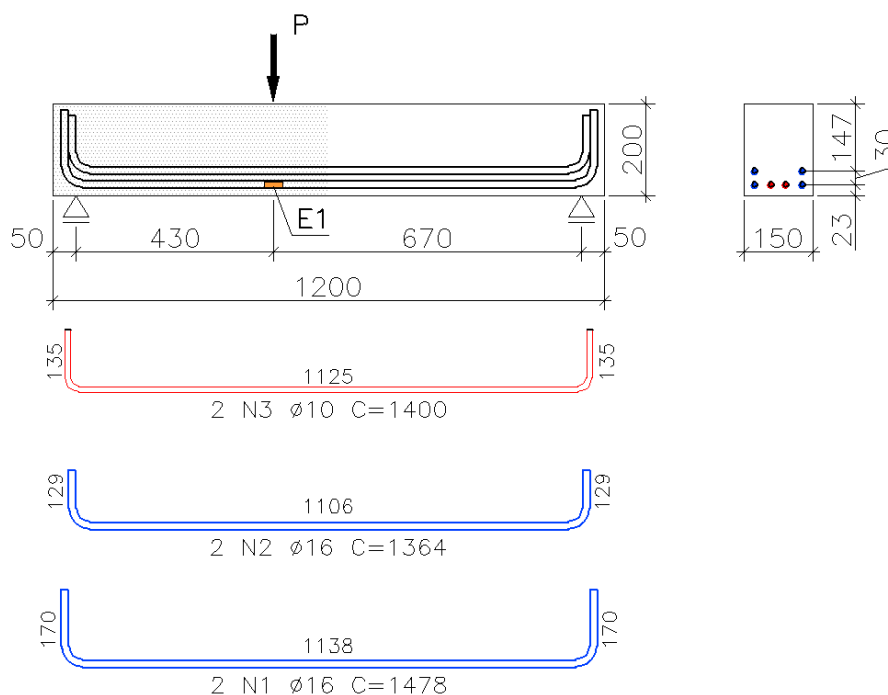
Para a determinação da armadura longitudinal das vigas, foi realizado o dimensionamento da força cortante resistente considerando as formulações da norma ABNT NBR 16935 (2021), conforme equações apresentadas no item 3.3.2. No cálculo da força cortante resistente foram utilizadas a resistência à compressão e as resistências residuais obtidas na etapa de caracterização dos concretos reforçados com fibras (CRF), conforme Tabela 17 e Tabela 18, apresentadas no Capítulo 5, adotando-se os valores médios e desconsiderando os coeficientes de ponderação dos materiais. Com base na força cortante resistente, foi então determinada a força máxima correspondente, o momento fletor associado e, por fim, a área de armadura longitudinal necessária, utilizando os procedimentos de dimensionamento à flexão previstos na ABNT NBR 6118 (2023). Para o detalhamento da armadura longitudinal, com o objetivo de assegurar que a ruptura das vigas ocorresse por cisalhamento e não por flexão, foram adotadas áreas de armadura entre 25% e 100% superiores à área calculada. Essa escolha corresponde à aplicação prática de um fator de segurança variável entre 1,25 e 2,0, que garante o superdimensionamento da armadura longitudinal e promove a ocorrência da ruptura por cisalhamento nos ensaios. Os cálculos realizados para a definição da armadura longitudinal estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Dimensionamento da armadura de flexão das vigas

Identificação	CRF				Carga			Armadura	
	f_{cm} (MPa)	f_{R1m} (Mpa)	f_{R3m} (MPa)	$V_{Rd,F}$ (kN)	P_{est} (kN)	FS	P_{adot} (kN)	M_{max} (kN.m)	A_{sl} (cm ²)
C90-A-0,5	103	6,48	3,18	91,79	150,69	1,50	226,04	59,20	9,36
C90-A-1,0	100	13,46	7,04	110,26	181,02	1,25	226,28	59,26	9,32
C90-P-0,5	93	1,91	2,72	82,87	136,06	1,50	204,09	53,45	8,17
C90-P-1,0	87	3,52	5,26	93,97	154,28	1,50	231,42	60,61	9,70

Optou-se por padronizar a armação longitudinal para todas as vigas considerando a situação mais desfavorável, de modo a manter constante a taxa de armadura longitudinal e não considerar esta como mais uma variável, uma vez que o efeito pino da armadura de flexão é uma das componentes de resistência ao cisalhamento nas vigas. Assim, foi adotado um arranjo com 2 barras de 10 mm e 4 barras de 16 mm, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35. Detalhamento da armadura de flexão utilizada nas vigas



(Dimensões em mm)

Fonte: Autoria própria

A sigla E1 na Figura 35 indica os extensômetros aplicados nas duas barras longitudinais centrais (10 mm). Os extensômetros ficaram localizados na direção do ponto de aplicação de carga e são do modelo PA-06 125BA-120-L. Para a fixação dos extensômetros,

inicialmente foi necessário lixar a região de contato de modo a obter uma superfície plana e lisa. Após lixada, a região de contato foi higienizada com álcool isopropílico e preparada com aplicação de removedor (para remover oleosidade), condicionador (para remover pequenas oxidações) e neutralizador (para neutralizar a ação do condicionador). Posteriormente o extensômetro foi fixado com cola. Este procedimento pode ser observado na Figura 36.

Figura 36. Aplicação dos extensômetros nas barras:

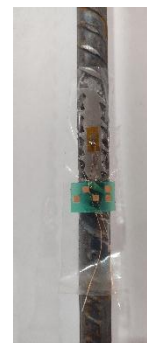
(a) superfície sendo lixada; (b) preparação da superfície e (c) colagem do extensômetro



(a)



(b)

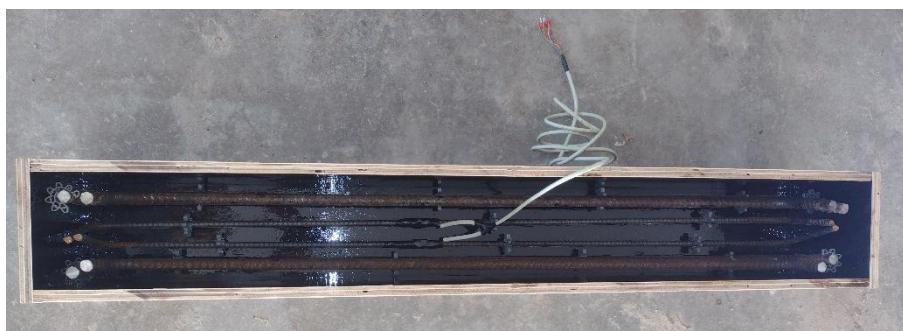


(c)

Fonte: Autoria própria

Os extensômetros foram utilizados para medição da deformação das armaduras longitudinais e foram conectadas a um cabo manga de seis vias. Para as fôrmas foram utilizadas chapas de madeira de compensado naval, onde foi aplicada uma camada de óleo mineral para auxiliar a desmoldagem. Na Figura 37 está apresentada a armação da viga já montada na fôrma pronta para a moldagem.

Figura 37. Fôrma com armadura longitudinal posicionada



Fonte: Autoria própria

A produção do concreto seguiu o mesmo procedimento utilizado na Etapa 1 (conforme descrito em 4.2). O adensamento do concreto das vigas foi realizado em mesa vibratória, com

o objetivo de eliminar os vazios. As vigas foram desmoldadas 24 horas após a concretagem e mantidas submersas até a data dos ensaios que foram realizados aos 28 dias (Figura 38).

Figura 38. Procedimento de cura para as vigas



Fonte: Autoria própria

Um dia antes da realização do ensaio, as vigas foram retiradas do tanque e as superfícies da região de interesse foram preparadas para captura das imagens para análise de Correlação de Imagem Digital (CID). Como as vigas foram dimensionadas para romperem por cisalhamento, a área de interesse corresponde à superfície delimitada pelo cutelo de apoio e o ponto de aplicação de carga. As superfícies de interesse receberam uma pintura com tinta branca fosca e posteriormente foram pintados com tinta preta fosca os pontos utilizando-se uma escova em formato de espiral (Figura 39).

Figura 39. Preparação das superfícies das vigas para CID



Fonte: Autoria própria

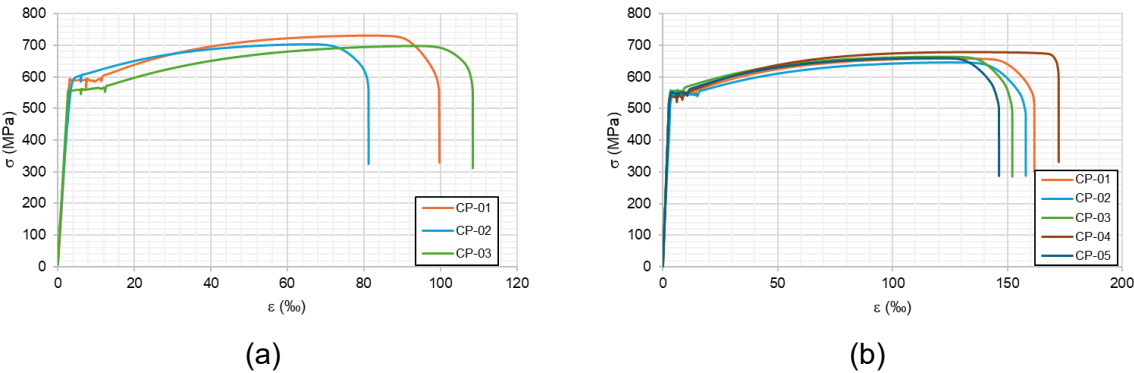
4.3.1.1 Ensaios de caracterização das barras de aço

Para caracterização das barras de aço utilizadas nas armaduras das vigas, foram ensaiados 3 corpos de prova das barras de aço de 10 mm e 5 corpos de prova para as barras de 16 mm de diâmetro, seguindo as recomendações da ABNT NBR ISO 6892 (2024). O ensaio foi conduzido em uma prensa hidráulica EMIC DL3000F com capacidade de 300 kN. Para monitoramento da deformação foi utilizado um transdutor de deslocamento (*clip gauge*). As amostras romperam na região de medição e atenderam aos requisitos da ABNT NBR 7480 (2024). Na Tabela 13 estão resumidas as propriedades obtidas nos ensaios e na Figura 40 estão apresentadas as curvas tensão – deformação barras ensaiadas.

Tabela 13. Propriedades das barras de aço

Ø (mm)	CP	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_u (‰)	E_s (GPa)
10	CP-01	589,37	730,40	81,63	188,55
	CP-02	601,88	703,03	64,77	187,07
	CP-03	558,30	697,60	92,87	202,78
	Média	583,18	710,34	79,75	192,80
16	CP-01	546,85	658,44	126,122	194,13
	CP-02	543,11	646,12	125,90	139,66
	CP-03	555,98	663,99	120,54	192,05
	CP-04	537,12	678,67	136,54	195,48
	CP-05	549,56	659,84	118,23	189,60
	Média	546,52	661,42	125,47	182,19

Figura 40. Curvas tensão x deformação barras de aço: (a) 10mm e (b) 16 mm



4.3.1.2 Resistência à compressão, massa específica e teor de ar incorporado

Durante o processo de produção do concreto para moldagem das vigas também foram realizados ensaios para determinação da densidade do concreto, conforme ABNT NBR 9833 (2009); determinação do teor de ar incorporado, conforme ABNT NBR 16887 (2020); e novos ensaios para determinação da resistência à compressão (ABNT NBR 5739 (2018)) (Figura 41). Os ensaios e o número de corpos de prova produzidos estão resumidos na Tabela 14. A etapa 2a se refere à moldagem das vigas e a etapa 2b se refere à realização de ensaios realizados posteriormente com o objetivo de confirmar a resistência à compressão dos concretos utilizados para moldagem das vigas, uma vez que, a quantidade e os fornecedores dos materiais empregados foram os mesmos da etapa de caracterização, porém adquiridos em datas diferentes. Assim, houve variação do lote do cimento, areia, brita e aditivo, o que influenciou na resistência à compressão do concreto.

Tabela 14. Relação de ensaios e corpos de prova para controle da resistência à compressão dos concretos – Etapa 2

Etapa	Ensaio	Norma	Nº de corpos de prova	Tipo e dimensões dos corpos de prova
Etapa 2a / 2b	Consistência pelo abatimento de tronco de cone	ABNT NBR 16889:2020	-	-
Etapa 2a	Resistência à compressão	ABNT NBR 5739:2018	4	Cilíndrico (10 x 20 cm)
Etapa 2b	Resistência à compressão	ABNT NBR 5739:2018	6	Cilíndrico (10 x 20 cm)
Etapa 2b	Massa específica	ABNT NBR 9833:2009	-	-
Etapa 2b	Teor de ar incorporado	ABNT NBR 16887:2020	-	-

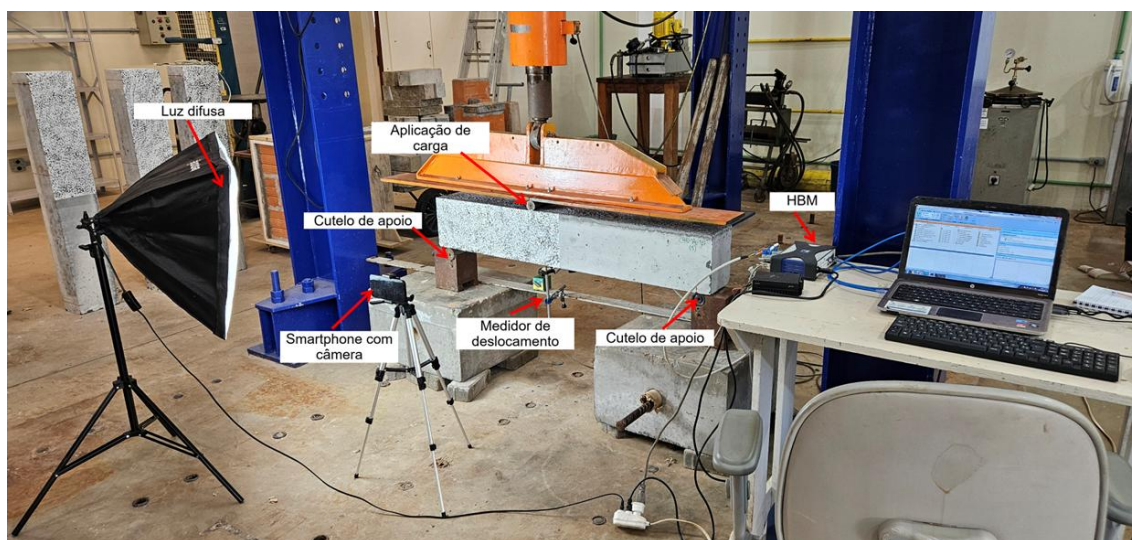
Figura 41. Ensaios adicionais: massa específica e teor de ar incorporado



4.3.1.3 Ensaio de flexão em três pontos

As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão em três pontos. A instrumentação das vigas contou com um transdutor linear de deslocamento variável (LVDT) para medição do deslocamento vertical, posicionado no alinhamento do ponto de aplicação de carga; extensômetros posicionados nas barras de armadura longitudinal para medição do alongamento da armadura; e captura das imagens na região de interesse para realização da análise da abertura e propagação da fissura crítica diagonal empregando a técnica de correlação de imagem digital. O cabo do extensômetro e o LVDT foram conectados no sistema de aquisição de dados Quantum X (DAQ), da HBM, e leitura dos resultados obtidos foi feita por meio do programa CatmanEasy. Os ensaios foram realizados em um pórtico com capacidade de carga de 500 kN, localizado no Laboratório de Materiais da PUC-Campinas. O transdutor de deslocamento utilizado para medição do deslocamento é do modelo WA-50mm-T, da HBM. O esquema do ensaio está apresentado na Figura 42, onde pode ser observado o posicionamento da viga e da instrumentação utilizada.

Figura 42. Instrumentação e ensaio das vigas



Fonte: Autoria própria

5. RESULTADOS ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos na Etapa 1 do programa experimental. Foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais e ensaios para determinação da resistência à compressão, do módulo de elasticidade, de resistências residuais e resistência ao cisalhamento direto segundo os métodos *Push-off* e JSCE-SF6.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Foi utilizado como agregado miúdo a areia natural de módulo de finura igual a 1,01 e dimensão máxima característica de 0,60 mm. Para o agregado graúdo foi utilizado a pedra britada com malha entre 4,8 e 9,5 mm (conhecida como brita 0 ou pedrisco), de módulo de finura de 5,83 e dimensão máxima característica de 9,5 mm.

A composição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo estão apresentadas na Figura 43 e Figura 44, respectivamente. No caso da areia natural, observa-se uma granulometria predominantemente fina, com a curva posicionada abaixo dos limites inferiores da faixa utilizável recomendada, caracterizando um material com elevado teor de partículas finas e baixo módulo de finura. Essa condição está associada à dimensão máxima característica de 0,60 mm e é coerente com o valor de módulo de finura obtido. Para o agregado graúdo (brita 0), a distribuição granulométrica concentra-se no intervalo entre 4,75 mm e 9,5 mm, apresentando curva contínua e sem descontinuidades relevantes, o que indica boa uniformidade granulométrica do material. A apresentação dessas distribuições permite caracterizar adequadamente os agregados empregados nas misturas, assegurando a rastreabilidade e a reprodutibilidade dos materiais utilizados ao longo do programa experimental. Na Tabela 15 estão apresentadas as demais propriedades dos agregados, determinadas por meio de ensaios, conforme descrito no item 4.2.2.

Figura 43. Composição granulométrica do agregado miúdo

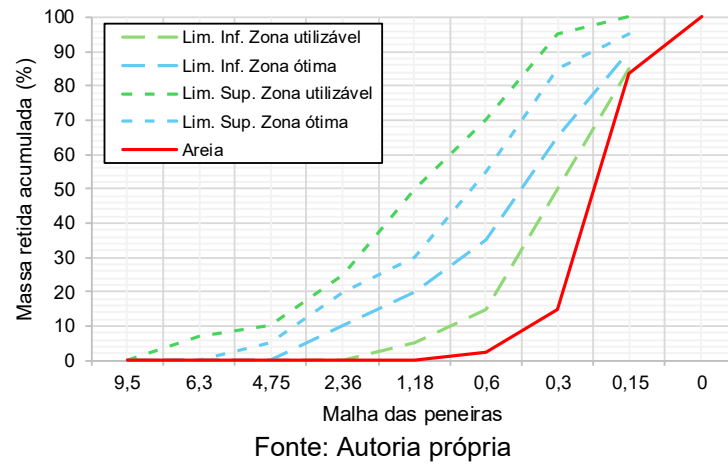


Figura 44. Composição granulométrica do agregado graúdo

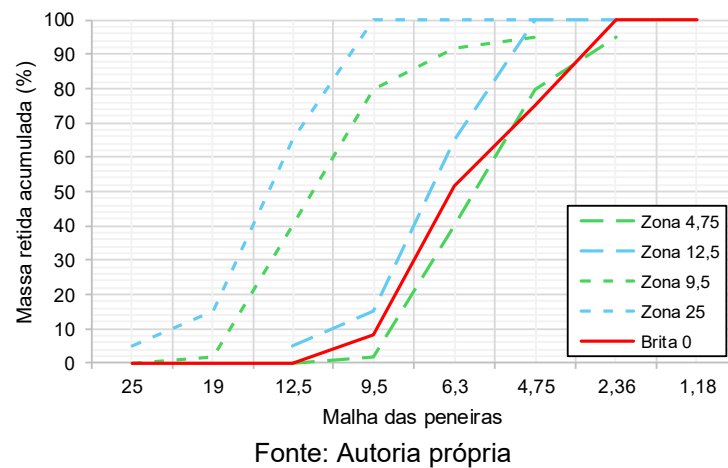


Tabela 15. Propriedade dos agregados

Propriedade	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Massa específica (g/cm³)	2,66	-
Densidade na condição seca (g/cm³)	-	2,76
Densidade na condição saturada (g/cm³)	-	2,79
Absorção de água (%)	-	1,04

Fonte: Autoria própria

5.2 CONSISTÊNCIA E ABATIMENTO

A consistência do concreto é avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*). A incorporação de fibras influencia de maneira significativa a consistência e a trabalhabilidade do material, reduzindo sua fluidez. Em geral, o aumento do teor de fibras resulta em diminuição progressiva do abatimento, efeito diretamente associado à restrição do movimento relativo dos agregados proporcionada pelas fibras. Ensaio realizado por Figueiredo e Ceccato (2015) demonstraram experimentalmente essa tendência de perda de abatimento com o aumento da fração volumétrica de fibras de aço, confirmando a influência direta da incorporação das fibras sobre a trabalhabilidade do concreto.

No entanto, os valores obtidos neste estudo (Tabela 16), oscilando entre 10 e 22 cm, não apresentam uma relação direta entre abatimento, tipo de fibra ou teor volumétrico. Essa ausência de padrão não significa que o efeito das fibras não tenha ocorrido, mas sim que ele foi compensado pela variação controlada da dosagem de superplastificante adotada em cada mistura para garantir condições adequadas de moldagem. Assim, o abatimento medido reflete não apenas a presença das fibras, mas sobretudo o ajuste reológico promovido pelo aditivo. É importante destacar que a trabalhabilidade não depende exclusivamente do valor de slump, mas do conjunto de características reológicas necessárias para viabilizar o adensamento e a moldagem, as quais foram asseguradas em todas as misturas.

Tabela 16. Abatimento (*slump test*)

Traço	Slump (cm)	Traço	Slump (cm)	Traço	Slump (cm)
C55-R	20,0	C70-R	20,0	C90-R	18,0
C55-A-0,5	11,0	C70-A-0,5	13,5	C90-A-0,5	17,5
C55-A-1,0	16,0	C70-A-1,0	13,5	C90-A-1,0	15,5
C55-P-0,5	20,5	C70-P-0,5	14,0	C90-P-0,5	21,5
C55-P-1,0	12,0	C70-P-1,0	10,0	C90-P-1,0	19,5

Fonte: Autoria própria

5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

Na Tabela 17 estão apresentadas as resistências à compressão e módulo de elasticidade para todos os traços estudados.

A resistência à compressão média obtida para os concretos de referência foi de 63,91 MPa, 71,71 MPa e 100,08 MPa e atendeu às classes C55, C70 e C90, respectivamente,

conforme proposto inicialmente no planejamento experimental.

Para o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), observou-se um ligeiro aumento na resistência à compressão, em torno de 8% para o C55, 4% para o C70 e 3% para o C90. Nota-se que, com a incorporação das fibras de aço, houve aumento da resistência à compressão em todas as classes de concreto, ao contrário do observado no concreto reforçado com macrofibras poliméricas (CRFP) que tende a apresentar uma pequena diminuição na resistência à compressão, em torno de 4% para o C55, 8% para o C70 e 12% para o C90. Almeida (2023) obteve resultados semelhantes, com aumento da resistência à compressão para o concreto reforçado com fibras de aço e diminuição (cerca de 22%) da resistência à compressão para o concreto reforçado com fibras poliméricas, em comparação ao concreto referência. Essa diferença pode estar associada às propriedades intrínsecas das fibras: as fibras de aço possuem maior resistência mecânica, módulo de elasticidade elevado e ancoragem nas extremidades, o que favorece a interação com a matriz; já as macrofibras poliméricas apresentam menor resistência e rigidez, não possuem ganchos para ancoragem e estão presentes em maior número, podendo gerar descontinuidades que não contribuem de forma significativa para a contenção das microfissuras iniciais.

Ezeldin e Balaguru (1992), a partir de um trabalho experimental para investigar o comportamento à compressão de concretos convencionais e de alta resistência com adição de fibras de aço, observaram um aumento marginal na resistência à compressão para os concretos reforçados com fibras em comparação ao concreto referência. Os autores também verificaram que o aumento no teor de sílica ativa tornou o concreto reforçado com fibras mais quebradiço em comparação ao concreto sem sílica ativa (o ramo descendente da curva tensão-deformação é mais íngreme). Isso também foi observado neste trabalho para o concreto C90, que continha sílica ativa e apresentou uma ruptura explosiva, com estilhaçamento do material. Após o pico de carga aplicada, o concreto rompeu-se abruptamente, evidenciando um comportamento mais frágil e menos controlado, mesmo com a adição de fibras. Além disso, a adição de fibras ao concreto reduz a trabalhabilidade, dificultando o adensamento, sendo necessário o aumento da quantidade de aditivo para garantir condições de moldagem. Consequentemente, há o aumento da incorporação de ar no concreto, o que reduz a resistência à compressão da matriz. Conforme esperado, observou-se que os concretos da classe C55 apresentaram ruptura menos frágil em comparação aos concretos das classes C70 e C90. Com relação ao módulo de elasticidade não foram observadas diferenças significativas entre as classes C55, C70 e C90.

Tabela 17. Resultados dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade

Traço	Resistência à compressão				Módulo de elasticidade		
	f_{cm} (MPa)	s	CV (%)	f_{ck} (MPa)	E_{cm} (GPa)	s	CV (%)
C55-R	63,91	3,22	5,04	58,59	36,60	0,96	2,62
C55-A-0,5	60,99	0,12	0,19	60,80	38,50	0,89	2,30
C55-A-1,0	68,95	1,69	2,45	66,16	39,72	0,51	1,28
C55-P-0,5	61,38	1,87	3,05	58,29	38,29	1,77	4,63
C55-P-1,0	61,09	1,70	2,79	58,28	38,55	0,92	2,38
C70-R	71,71	1,54	2,15	69,17	37,41	0,74	1,99
C70-A-0,5	76,63	1,95	2,54	73,41	44,82	1,43	3,18
C70-A-1,0	74,54	2,70	3,62	70,09	46,02	3,10	6,74
C70-P-0,5	70,70	0,15	0,21	70,46	38,58	1,29	3,35
C70-P-1,0	65,89	2,45	3,72	61,85	39,16	1,03	2,63
C90-R	100,08	3,15	3,14	94,89	45,13	1,04	2,30
C90-A-0,5	102,90	3,38	3,29	97,32	45,90	1,79	3,90
C90-A-1,0	100,36	9,43	9,40	84,79	45,19	1,48	3,28
C90-P-0,5	93,44	4,34	4,65	86,27	43,49	1,18	2,72
C90-P-1,0	87,68	3,75	4,27	81,49	41,26	1,11	2,70

f_{cm} : resistência à compressão média (3 corpos de prova)

f_{ck} : resistência à compressão característica

E_c : módulo de elasticidade

s: desvio padrão

CV: coeficiente de variação

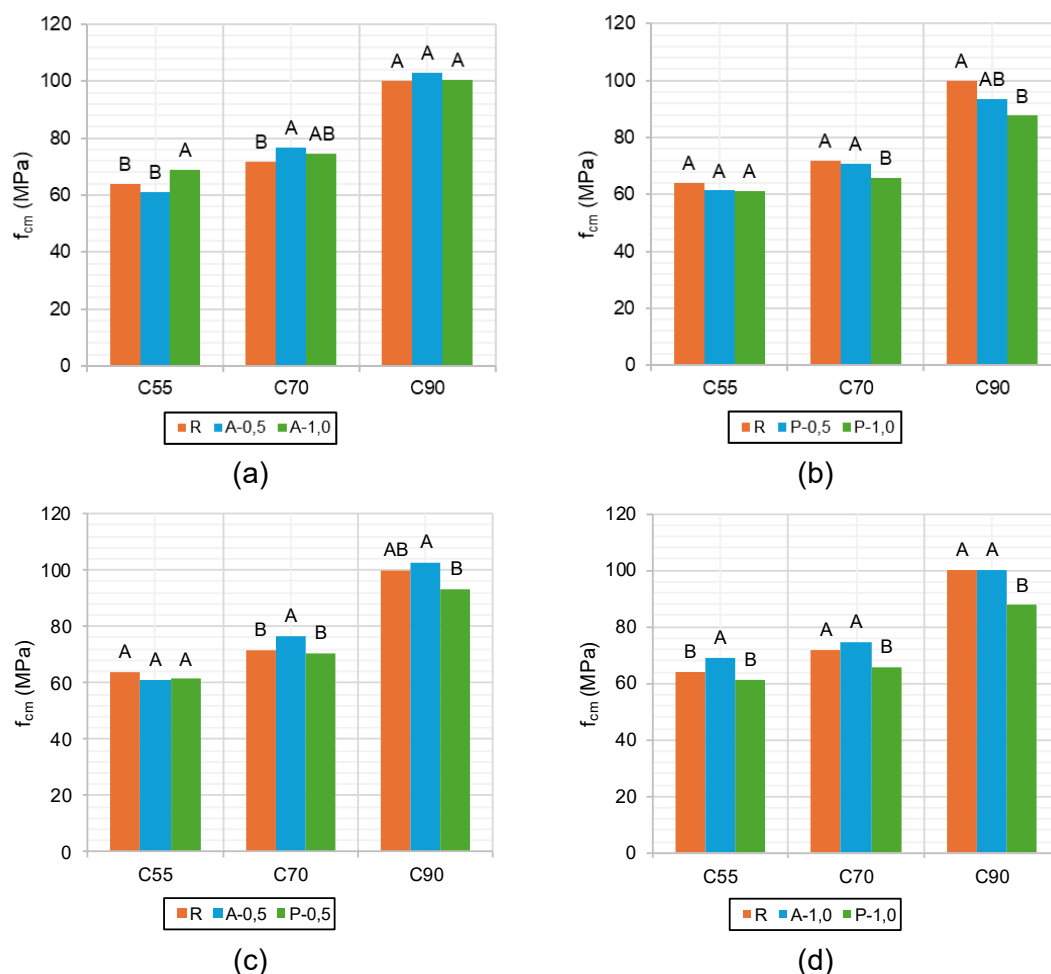
Fonte: Autoria própria

A influência das variáveis tipo e teor de fibras na resistência à compressão do concreto foram avaliadas por meio de análises de variância (ANOVA) e teste de Fischer com nível de significância de 95% ($\alpha=0,5\%$) e os resultados estão apresentados na Figura 45, em que os traços estão indicados nas colunas com os respectivos valores de resistência à compressão obtidas nos ensaios e as letras A, B e C indicam o grupo de cada traço segundo o teste de Fischer. Para as colunas com as mesmas letras ou que compartilham letras, conclui-se que não há diferença estatisticamente significativa entre os resultados e que, portanto, a variável não exerce influência significativa na resistência à compressão do concreto.

A partir da análise da Figura 45, observa-se que o efeito da adição de fibras sobre a resistência à compressão depende simultaneamente do tipo de fibra e da classe de resistência do concreto. Na análise por teor de fibras (Figura 45(a)), verifica-se que as fibras de aço

aumentam significativamente a resistência à compressão apenas em situações específicas: no C55, o teor de 1,0% promove incremento significativo, enquanto no C70 o resultado mais favorável ocorre com 0,5%, indicando que o aumento do volume de fibras de aço nem sempre se traduz em ganho de resistência à compressão. No C90, as variações permanecem estatisticamente indiferenciadas, sugerindo que matrizes de maior resistência tendem a neutralizar a influência das fibras de aço quando se avalia a resistência à compressão. Para as fibras poliméricas (Figura 45(b)), observa-se tendência oposta: tanto no C70 quanto no C90, o teor de 1,0% resulta em redução significativa da resistência à compressão, comportamento já antecipado pelos valores experimentais e confirmado pelos agrupamentos estatísticos, enquanto no C55 suas variações permanecem estatisticamente equivalentes ao traço de referência. Essa tendência se reforça na comparação entre tipos de fibra para um mesmo teor: para 0,5% (Figura 45(c)), a fibra de aço apresenta desempenho superior apenas no C70, enquanto a macrofibra polimérica mantém-se equivalente ao traço de referência no C55 e C70, mas reduz significativamente a resistência no C90. Para o teor de 1,0% (Figura 45(d)), o padrão se acentua: a fibra aço produz aumento significativo no C55 e mantém desempenho similar ao de referência no C70 e C90, enquanto a macrofibra polimérica resulta em quedas significativas no C70 e C90. Assim, no contexto específico da resistência à compressão, as fibras de aço se mostram mais compatíveis com concretos de diferentes classes de resistência à compressão, enquanto as macrofibras poliméricas apresentam redução progressiva de eficiência — e, em teores mais elevados, efeito negativo — nas matrizes de maior resistência.

Figura 45. Análise estatística baseada no teste de Fischer para resistência à compressão: avaliação da influência do teor de fibras (a) de aço e (b) poliméricas e do tipo de fibra (c) com teor de 0,5% e (d) com teor de 1,0%



5.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (LIMITE DE PROPORCIONALIDADE E RESISTÊNCIAS RESIDUAIS)

A seguir estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração, cujo objetivo foi determinar a resistência à tração (limite de proporcionalidade) e as resistências residuais, segundo a ABNT NBR 16940 (2021).

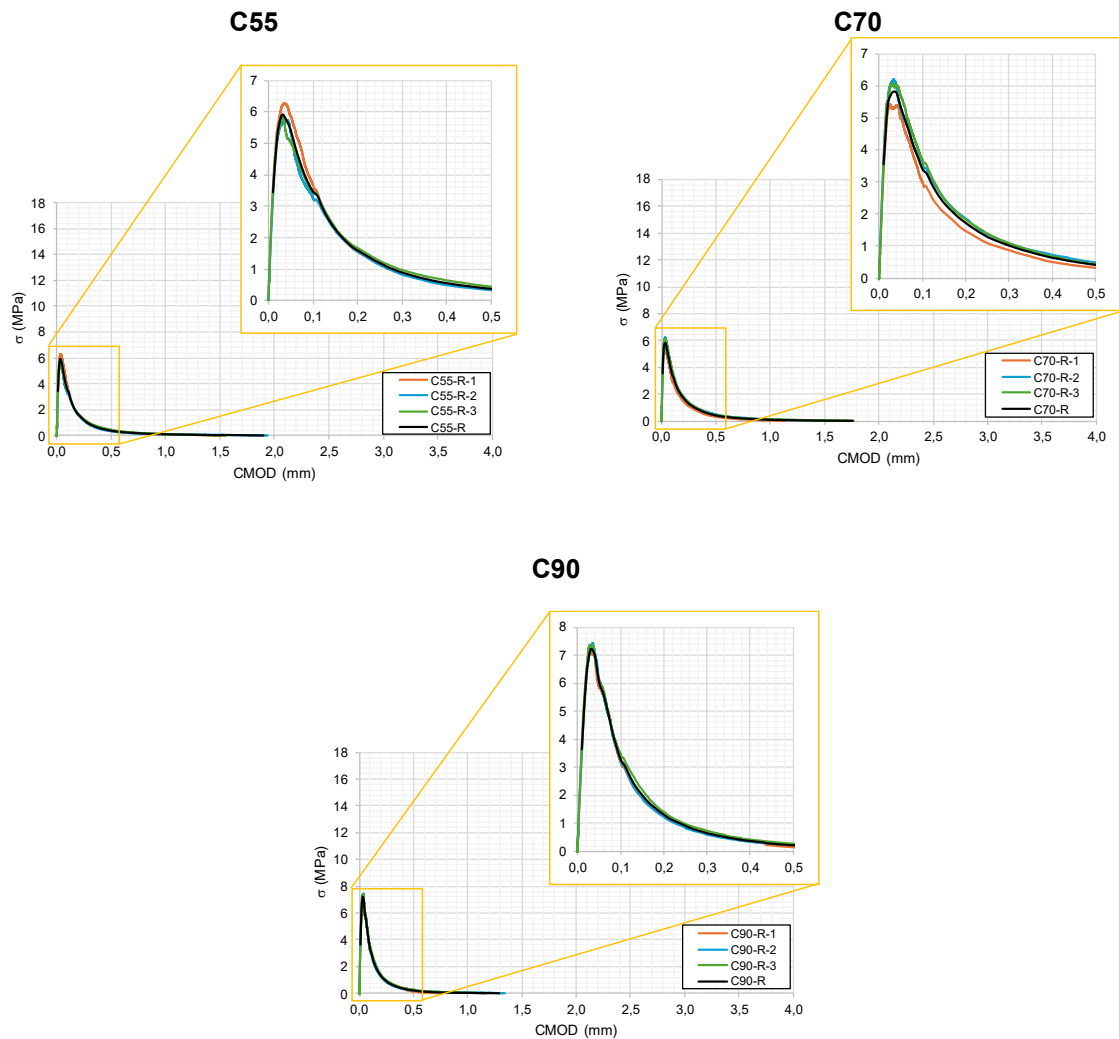
Na Figura 46, na Figura 47 e na Figura 48 estão apresentadas, respectivamente, as curvas tensão x CMOD para os concretos de referência (sem fibras), concretos reforçados com fibras de aço (CRFA) e concretos reforçados com macrofibras poliméricas (CRFP).

Como esperado, verifica-se que as fibras alteram o comportamento pós-fissuração da matriz, conferindo ao concreto aumento da resistência residual à tração e da tenacidade, para todas as fibras e teores estudados.

Para a análise dos resultados em função de cada variável — resistência à compressão,

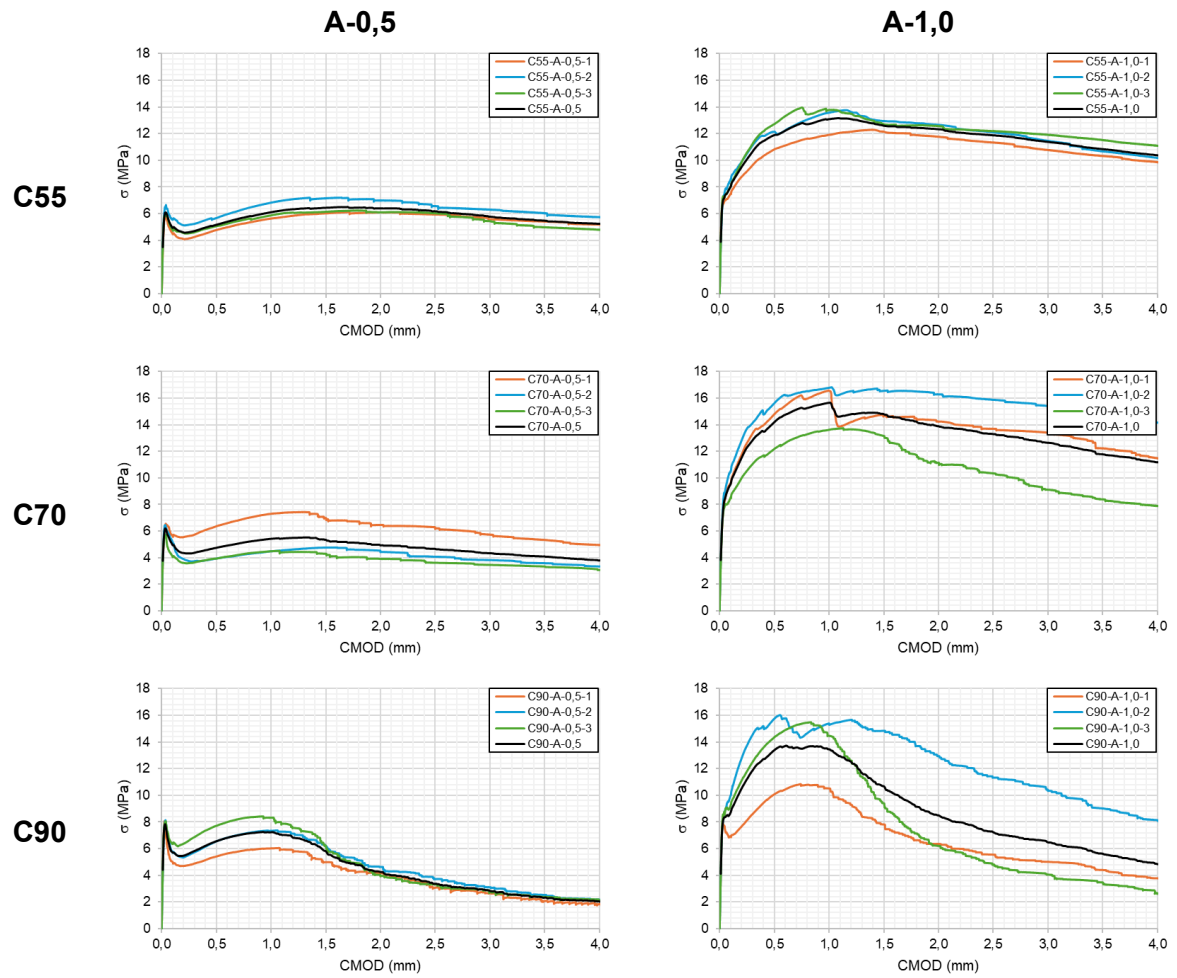
tipo de fibras e teor de fibras — foram definidas curvas médias. Essas curvas são representadas pelos valores médios das tensões correspondentes aos respectivos valores de CMOD. Essa abordagem permite uma avaliação sistemática da influência de cada variável nas propriedades mecânicas do concreto, facilitando a interpretação dos dados obtidos nos ensaios.

Figura 46. Curvas tensão x CMOD – Concreto Referência (sem fibras)



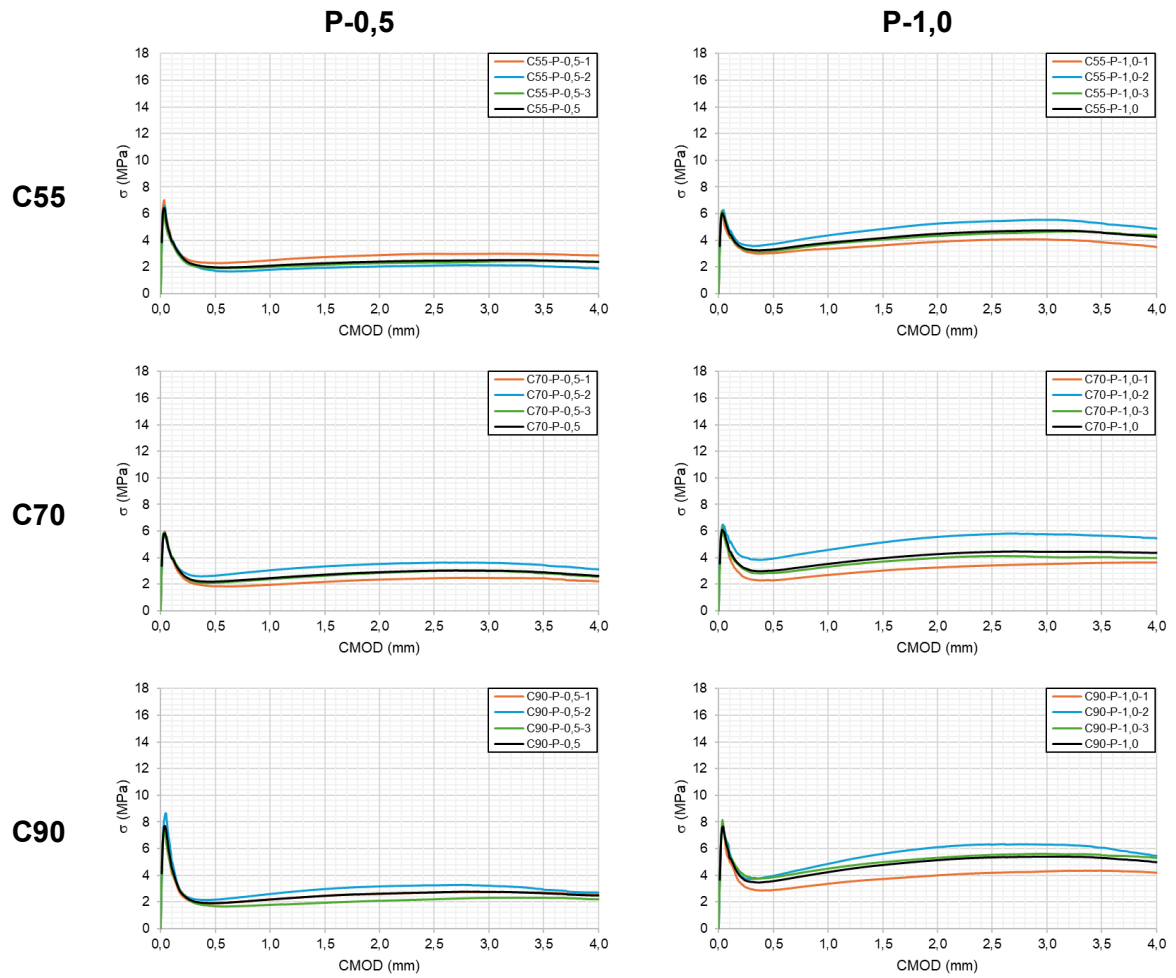
Fonte: Autoria própria

Figura 47. Curvas tensão x CMOD – CRFA



Fonte: Autoria própria

Figura 48. Curvas tensão x CMOD – CRFP



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 18 estão apresentados os valores médios da resistência à tração no limite de proporcionalidade ($f_{L,m}$) e as resistências residuais ($f_{R1,m}$, $f_{R2,m}$, $f_{R3,m}$ e $f_{R4,m}$), referentes à média dos três exemplares para cada traço estudado. Também foi determinada a tenacidade ($T_{f,m}$), a qual foi calculada como a área sob a curva característica até a abertura de fissura de 2,5 mm.

Tabela 18. Resultados dos ensaios de resistência à tração

Traço	f_{L,m} (MPa)	f_{R1,m} (MPa)	f_{R2,m} (MPa)	f_{R3,m} (MPa)	f_{R4,m} (MPa)	T_{f,m} (J)
C55-R	5,89	0,35	0,03	-	-	3,35
S / CV (%)	0,16 / 2,68	0,06 / 16,52	0,02 / 87,63	-	-	
C55-A-0,5	6,24	5,23	6,5	6,15	5,43	64,47
S / CV (%)	0,42 / 6,77	0,49 / 9,37	0,66 / 10,10	0,30 / 4,93	0,50 / 9,23	
C55-A-1,0	7,42	11,89	12,54	11,81	10,74	128,95
S / CV (%)	0,42 / 5,69	1,09 / 9,18	0,54 / 4,31	0,58 / 4,94	0,70 / 6,52	
C55-P-0,5	6,67	1,98	2,31	2,50	2,48	26,47
S / CV (%)	0,36 / 5,47	0,30 / 15,17	0,42 / 18,11	0,45 / 18,01	0,47 / 18,72	
C55-P-1,0	6,07	3,27	4,14	4,60	4,43	46,38
S / CV (%)	0,16 / 2,59	0,38 / 11,50	0,65 / 15,72	0,73 / 15,79	0,72 / 16,17	
C70-R	5,79	0,38	0,03	-	-	3,40
S / CV (%)	0,39 / 6,77	0,08 / 20,55	0,02 / 73,71	-	-	
C70-A-0,5	6,23	4,76	5,20	4,58	4,00	52,91
S / CV (%)	0,47 / 7,55	1,45 / 30,48	1,44 / 27,77	1,38 / 30,09	1,12 / 27,91	
C70-A-1,0	8,49	14,22	14,52	13,12	11,59	147,87
S / CV (%)	0,50 / 5,89	1,80 / 12,69	1,81 / 12,44	2,78 / 21,19	3,18 / 27,40	
C70-P-0,5	5,88	2,19	2,72	3,01	2,82	30,83
S / CV (%)	0,05 / 0,84	0,41 / 18,73	0,58 / 21,43	0,58 / 19,17	0,48 / 17,04	
C70-P-1,0	6,17	2,99	3,93	4,37	4,35	43,83
S / CV (%)	0,17 / 2,82	0,79 / 26,50	1,03 / 26,26	1,14 / 26,12	0,99 / 22,77	
C90-R	7,21	0,20	-	-	-	2,93
S / CV (%)	0,09 / 1,30	0,06 / 32,24	-	-	-	
C90-A-0,5	7,94	6,48	5,40	3,18	2,18	53,11
S / CV (%)	0,09 / 1,17	1,13 / 17,48	0,47 / 8,69	0,35 / 10,96	0,23 / 10,77	
C90-A-1,0	8,63	13,46	10,32	7,04	5,45	104,02
S / CV (%)	0,46 / 5,36	2,94 / 21,87	3,89 / 37,74	3,63 / 51,56	2,99 / 54,89	
C90-P-0,5	7,90	1,91	2,47	2,72	2,61	28,41
S / CV (%)	0,62 / 7,88	0,25 / 13,17	0,51 / 20,73	0,51 / 18,73	0,29 / 11,09	
C90-P-1,0	7,64	3,52	4,72	5,26	5,15	52,62
S / CV (%)	0,41 / 5,38	0,61 / 17,30	0,98 / 20,79	1,08 / 20,50	0,85 / 16,50	

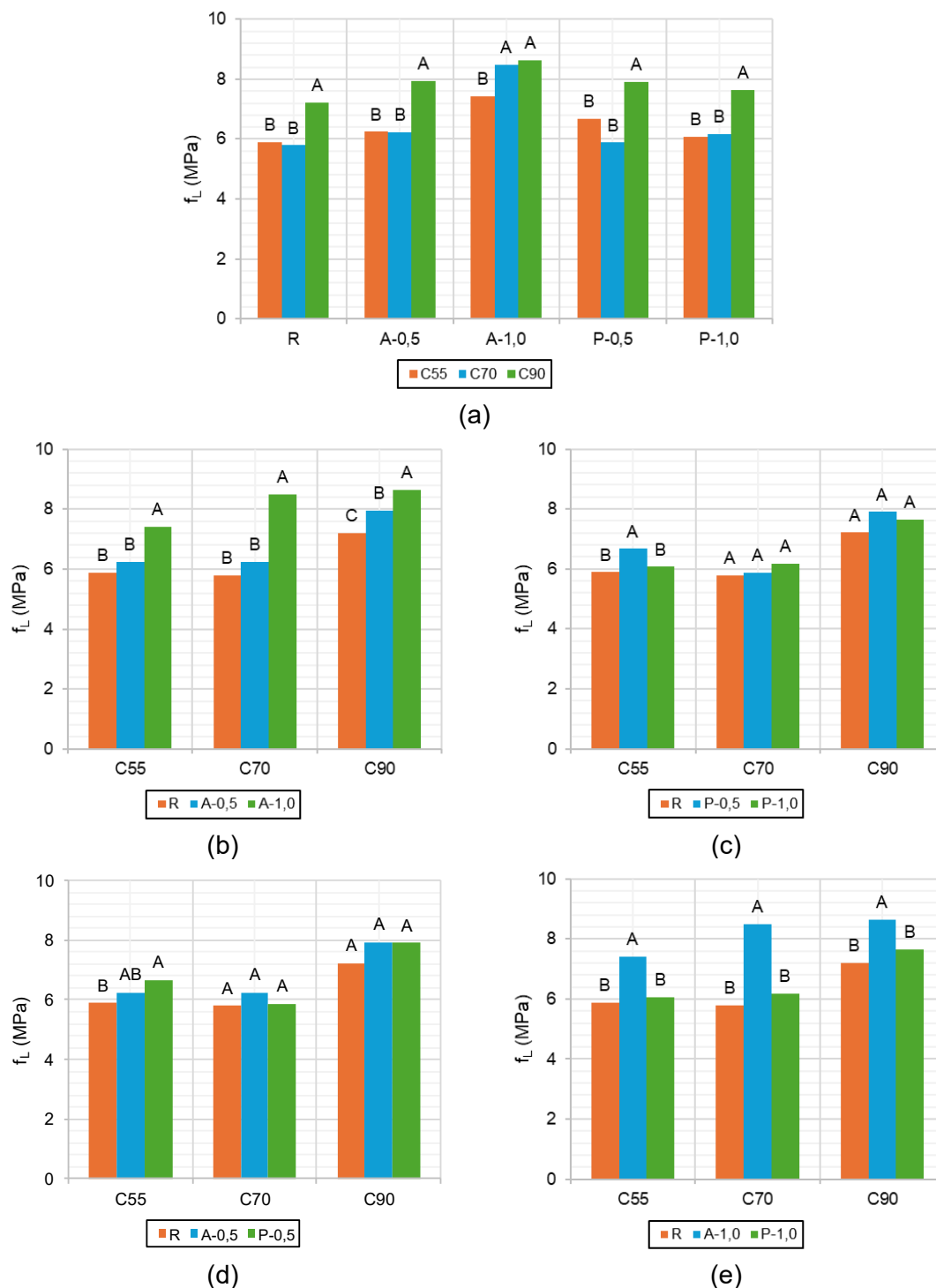
Fonte: Autoria própria

A influência das variáveis resistência à compressão, tipo e teor de fibras na resistência à tração no limite de proporcionalidade (f_L) foram avaliadas por meio de análises de variância (ANOVA) e teste de Fischer com nível de significância de 95% ($\alpha=0,5\%$) e os resultados estão apresentados na Figura 49, em que os traços estão indicados nas colunas com os respectivos valores de resistência à compressão obtidas nos ensaios e as letras A, B e C indicam o grupo de cada traço segundo o teste de Fischer. Para as colunas com as mesmas letras ou que compartilham letras, conclui-se que não há diferença estatisticamente significativa entre os resultados e que, portanto, a variável não exerce influência significativa na resistência à compressão do concreto.

A análise estatística apresentada na Figura 49(a) mostra que a resistência à compressão exerce influência direta sobre o f_L , uma vez que o C90 apresenta desempenho superior em todos os traços avaliados, enquanto C55 e C70 permanecem estatisticamente equivalentes na maior parte das combinações, exceto no traço A-1,0, no qual o C70 iguala o C90. O aumento do teor de fibras de aço (Figura 49(b)) promove um avanço sistemático e progressivo no f_L , com efeitos mais pronunciados no C90, onde a sequência $C \rightarrow B \rightarrow A$ evidencia um incremento consistente associado ao acréscimo do teor. Para as macrofibras poliméricas (Figura 49(c)), contudo, esse comportamento não se repete: apenas o C55 apresenta uma elevação pontual com 0,5%, enquanto no C70 e no C90 o f_L permanece estatisticamente inalterado mesmo quando o teor é elevado de 0,5% para 1,0%, mantendo-se no mesmo nível do traço de referência. A comparação entre tipos de fibra indica que, para 0,5% (Figura 49(d)), apenas o C55 apresenta distinção, com desempenho superior das macrofibras poliméricas; já para 1,0% (Figura 49(e)), as fibras de aço se destacam em todas as classes, enquanto as poliméricas continuam sem produzir alteração significativa no f_L . Esses resultados mostram que o f_L é influenciado pela classe de resistência da matriz e pelo uso de fibras de aço, especialmente em teores mais elevados, ao passo que o teor de macrofibras poliméricas não exerce impacto significativo sobre esse parâmetro nas matrizes avaliadas.

Figura 49. Análise estatística baseada no teste de Fischer para resistência à tração no limite de proporcionalidade (f_L):

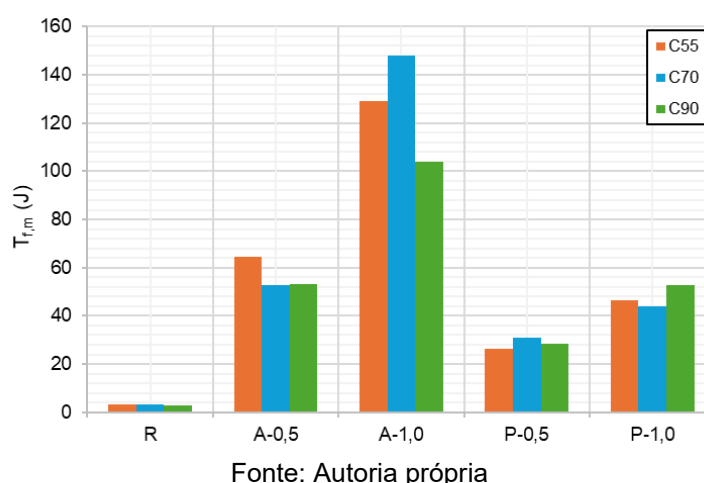
avaliação da influência (a) da resistência à compressão, (b) do teor de fibras de aço, (c) do teor de macrofibras poliméricas, (d) do tipo de fibra para o teor de 0,5% e (e) do tipo de fibra para o teor de 1,0%



Como evidenciado na Figura 50, a tenacidade à flexão do concreto apresenta um aumento significativo com a incorporação de fibras. Destaca-se que as fibras de aço exercem

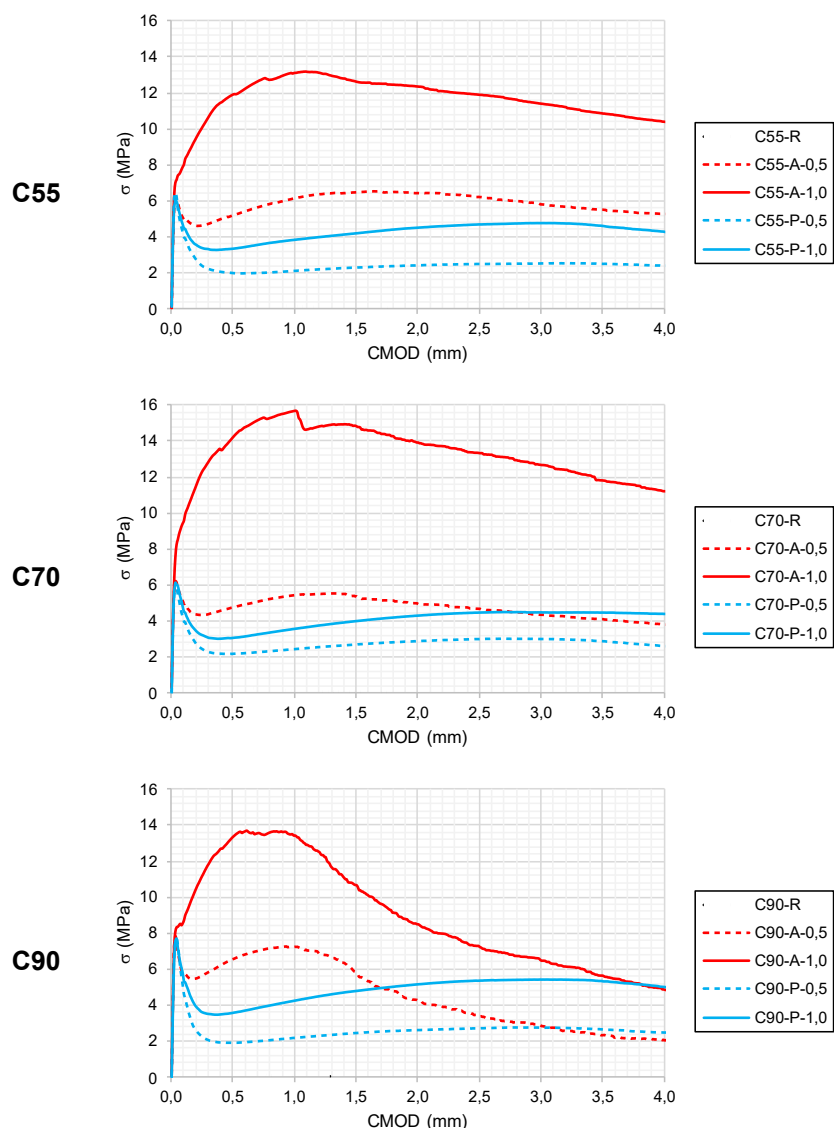
uma influência superior na tenacidade em comparação às macrofibras poliméricas, quando utilizadas em igual teor. Em relação à resistência à compressão, observa-se a ausência de uma correlação direta entre o incremento da resistência à compressão do concreto e o aumento da tenacidade. Tal constatação sugere que o comportamento pós-fissuração da matriz está intrinsecamente ligado às características das fibras, tanto em termos de material quanto de teor, e não está diretamente relacionado a resistência à compressão do concreto.

Figura 50. Tenacidade à flexão



Na Figura 51 estão apresentadas as curvas médias de tensão em função de CMOD organizadas pelas classes de resistência à compressão do concreto, tipo e dosagem de fibras. Conforme discutido anteriormente, os resultados indicam que o f_L é controlado principalmente pela resistência da matriz e pelas características mecânicas das fibras. Nesse contexto, apenas as fibras de aço — sobretudo quando empregadas em maiores teores — promovem aumentos mensuráveis nessa propriedade, enquanto o incremento do teor de macrofibras poliméricas não produz alterações significativas em relação ao traço de referência. No entanto, para as resistências residuais, observa-se uma influência significativa das fibras. Os concretos com adição de fibras metálicas apresentaram maior resistência residual em comparação com os concretos com adição de macrofibras poliméricas. Além disso, verifica-se que a resistência residual tende a aumentar com o incremento no teor de fibras. Observa-se que os concretos com adição de fibras de aço no teor de 1% apresentam comportamento de endurecimento (*hardening*), caracterizado pelo aumento inicial dos valores de tensão com múltipla fissuração antes de se atingir a tensão máxima, enquanto os demais concretos apresentaram comportamento de amolecimento (*softening*), caracterizado pela redução gradual dos valores de tensão abaixo da tensão máxima. Esse comportamento pode ser observado claramente na Figura 51.

Figura 51. Curvas características de tensão x CMOD (classe de resistência do concreto)



Fonte: Autoria própria

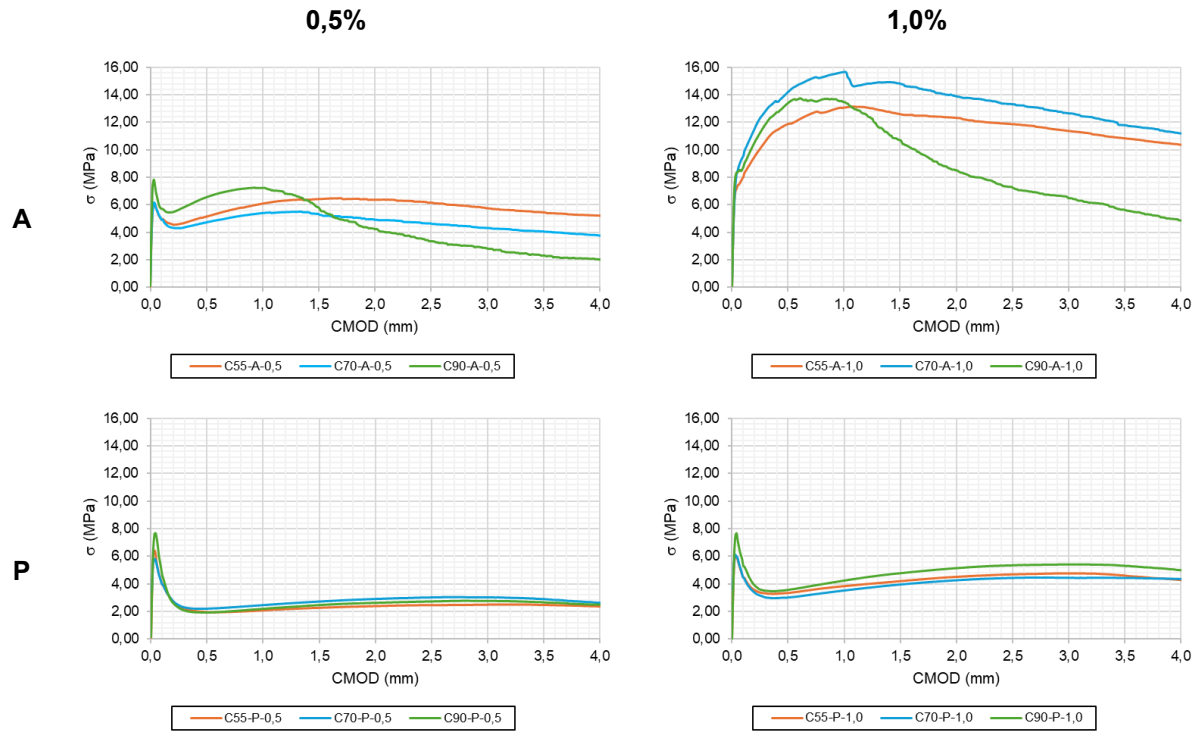
Na Figura 52, são apresentadas as curvas características de tensão versus CMOD, organizadas de acordo com o tipo e o teor de fibras. Observa-se que a resistência à compressão do concreto exerce maior influência sobre o CRFA. Para o teor de 0,5%, o concreto C90 apresenta uma resistência à tração no limite de proporcionalidade f_L , 27,2% e 27,4% superior à observada nos concretos C55 e C70, respectivamente, os quais apresentaram valores de resistência à tração no limite de proporcionalidade praticamente iguais (6,24 MPa e 6,23 MPa). Esse comportamento já havia sido identificado previamente na Figura 49(a), na qual se observa que C55 e C70 formam grupos estatisticamente equivalentes, enquanto o C90 se destaca com valores superiores de f_L . Pelo fato de as resistências médias das classes C55 e C70 serem muito próximas, a resposta inicial em tração permanece

praticamente invariável entre elas. Além disso, embora haja uma variação na resistência residual em função da resistência à compressão do concreto, não se pode concluir que a resistência residual aumenta concomitantemente com o incremento da resistência à compressão. Isto é evidenciado pelo fato de que o concreto C70 apresenta resistências residuais inferiores às do concreto C55. Esse comportamento foi o mesmo observado por Almeida *et al.* (2024) e pode ser atribuído à ruptura das fibras que estão incorporadas em uma matriz mais resistente.

Para o CRFP observou-se um aumento de 18,4% e 34,4% na resistência à tração no limite de proporcionalidade f_L para o concreto C90 com adição de 0,5% de macrofibras poliméricas em comparação aos concretos C55 e C70, respectivamente. Além disso, conforme observado na Figura 52, as curvas após o pico estão próximas, indicando valores de resistências residuais semelhantes para os teores de 0,5% e 1% de macrofibras poliméricas para os concretos das três classes de resistência à compressão, o que indica que o aumento da resistência à compressão do concreto não resulta em um incremento correspondente na resistência residual e na tenacidade dos concretos reforçados com macrofibras poliméricas.

Conforme Figura 52, nos concretos com adição de fibra de aço no teor de 1%, observa-se um aumento significativo na resistência residual até a abertura do CMOD de 1 mm, seguido por uma redução progressiva nos concretos das classes C55 e C70. Para o concreto da classe C90, essa redução ocorre de forma mais pronunciada entre as aberturas de CMOD de 1 mm e 2 mm. Esse comportamento indica que, para concretos com maior resistência à compressão, há uma melhora na ancoragem das fibras na matriz do concreto, resultando na ruptura das fibras, em vez de falhas na interface entre a fibra e a matriz. Esse fato também foi corroborado durante os ensaios experimentais, nos quais foram audíveis os "estalos" das fibras rompendo, com maior intensidade nos concretos da classe C90 com 1% de fibra de aço. Esse comportamento também foi observado por Almeida *et al.* (2024).

Figura 52. Curvas características de tensão x CMOD separadas por tipo e teor de fibras



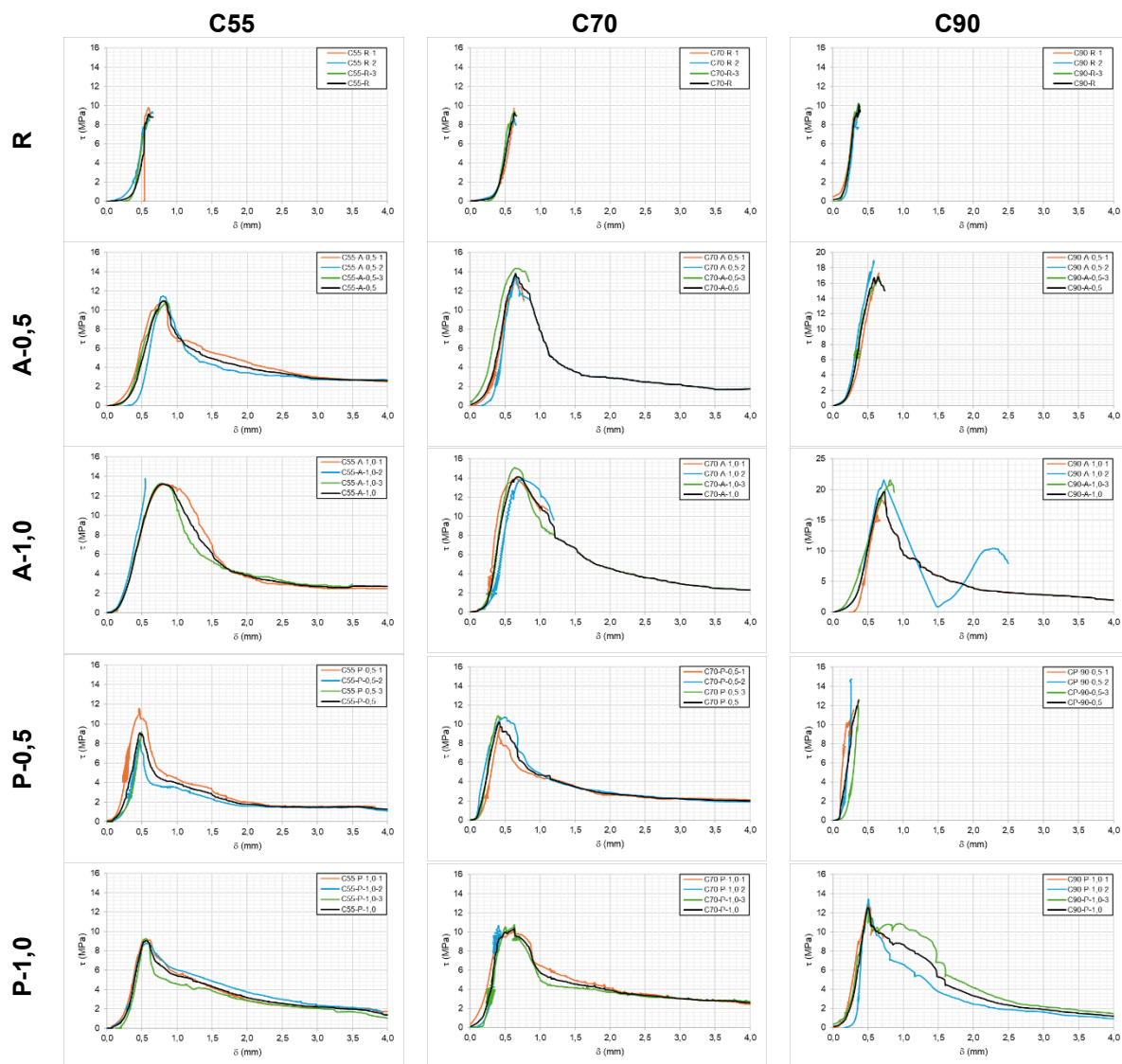
Fonte: Autoria própria

5.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO

Na Figura 53 estão apresentadas as curvas tensão (τ) versus deslocamento vertical (δ), resultantes dos ensaios de cisalhamento direto realizados segundo método modificado da norma japonesa JSCE-SF6 (1990).

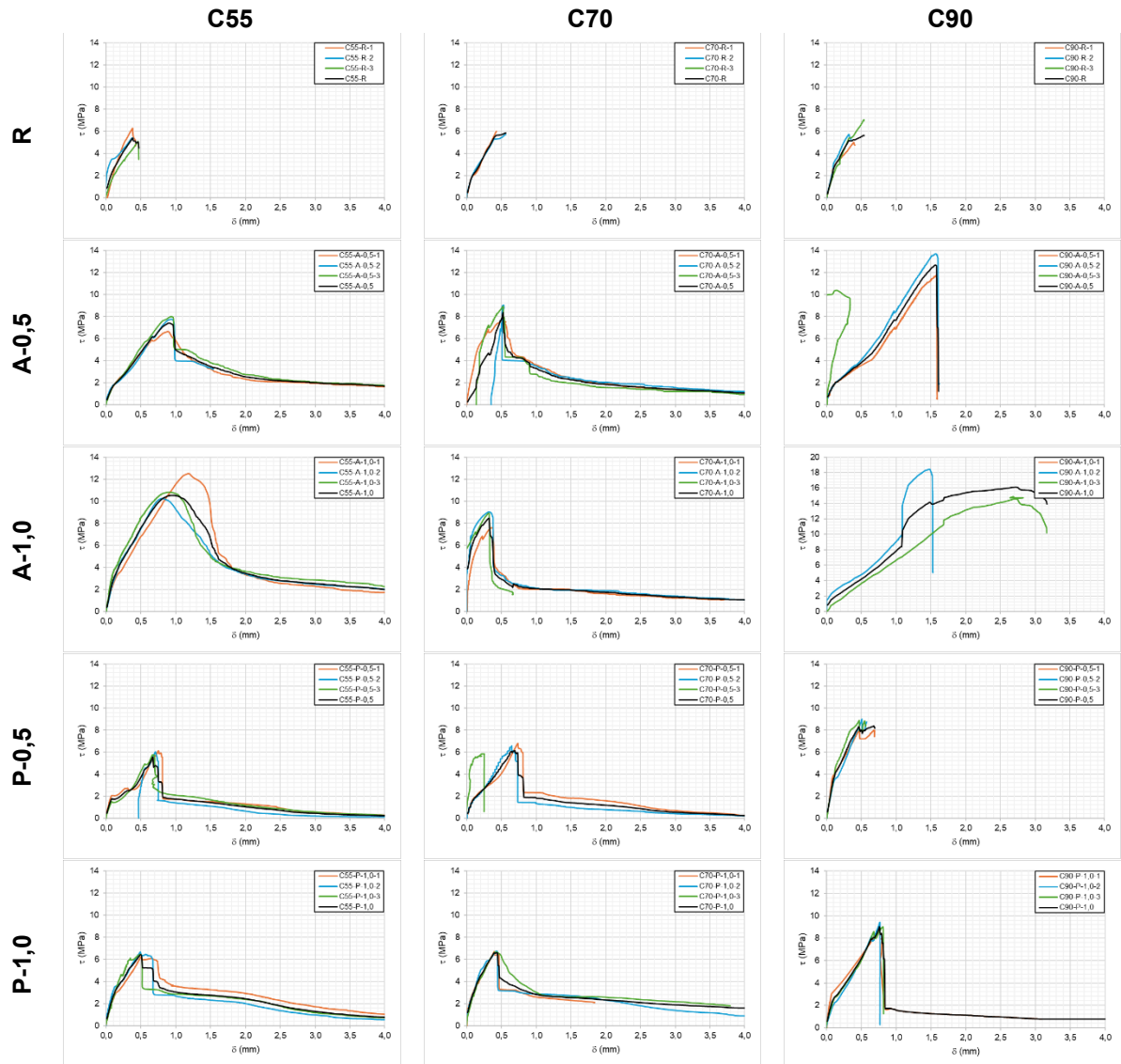
Na Figura 54 estão apresentadas as curvas tensão (τ) versus deslocamento vertical (δ), resultantes dos ensaios de cisalhamento tipo *Push-off*.

Figura 53. Tensão de cisalhamento x deslocamento vertical segundo método da norma japonesa JSCE-SF6 (1990)



Fonte: Autoria própria

Figura 54. Tensão de cisalhamento x deslocamento vertical tipo *Push-off*



Fonte: Autoria própria

Assim como foi feito para os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão, para a análise dos resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento segundo a JSCE-SF6 (1990) e tipo *Push-off* foram definidas curvas médias das tensões correspondentes aos respectivos valores de deslizamento. Para corrigir o trecho inicial das curvas obtidas nos ensaios segundo a JSCE-SF6 (1990), em função da acomodação inicial do ensaio, foi realizado o ajuste considerando a equação da reta para o trecho ascendente linear com a origem no ponto (0,0). Para isso foi necessário aplicar pequenos ajustes na posição lateral das curvas em relação ao eixo do deslocamento (δ). Na Figura 55, estão apresentadas as curvas características de tensão de cisalhamento (τ) versus deslocamento vertical (δ).

Na Tabela 19, estão resumidos os valores de tensão de cisalhamento de fissuração da matriz (τ_{cr}) e tensão máxima de cisalhamento (τ_{max}) obtidos em ambos os ensaios. Para a tensão τ_{cr} foi adotado o valor referente ao primeiro pico de carga ou, no caso das curvas em que não foi possível identificar o primeiro pico, foi adotado o valor do ponto referente à mudança de direção do trecho linear ascendente da curva.

Figura 55. Curvas características tensão de cisalhamento vs deslocamento vertical (δ) - Ensaio JSCE-SF6: (a) C55, (b) C70 e (c) C90 e Ensaio tipo *Push-off*: (d) C55, (e) C70 e (f) C90

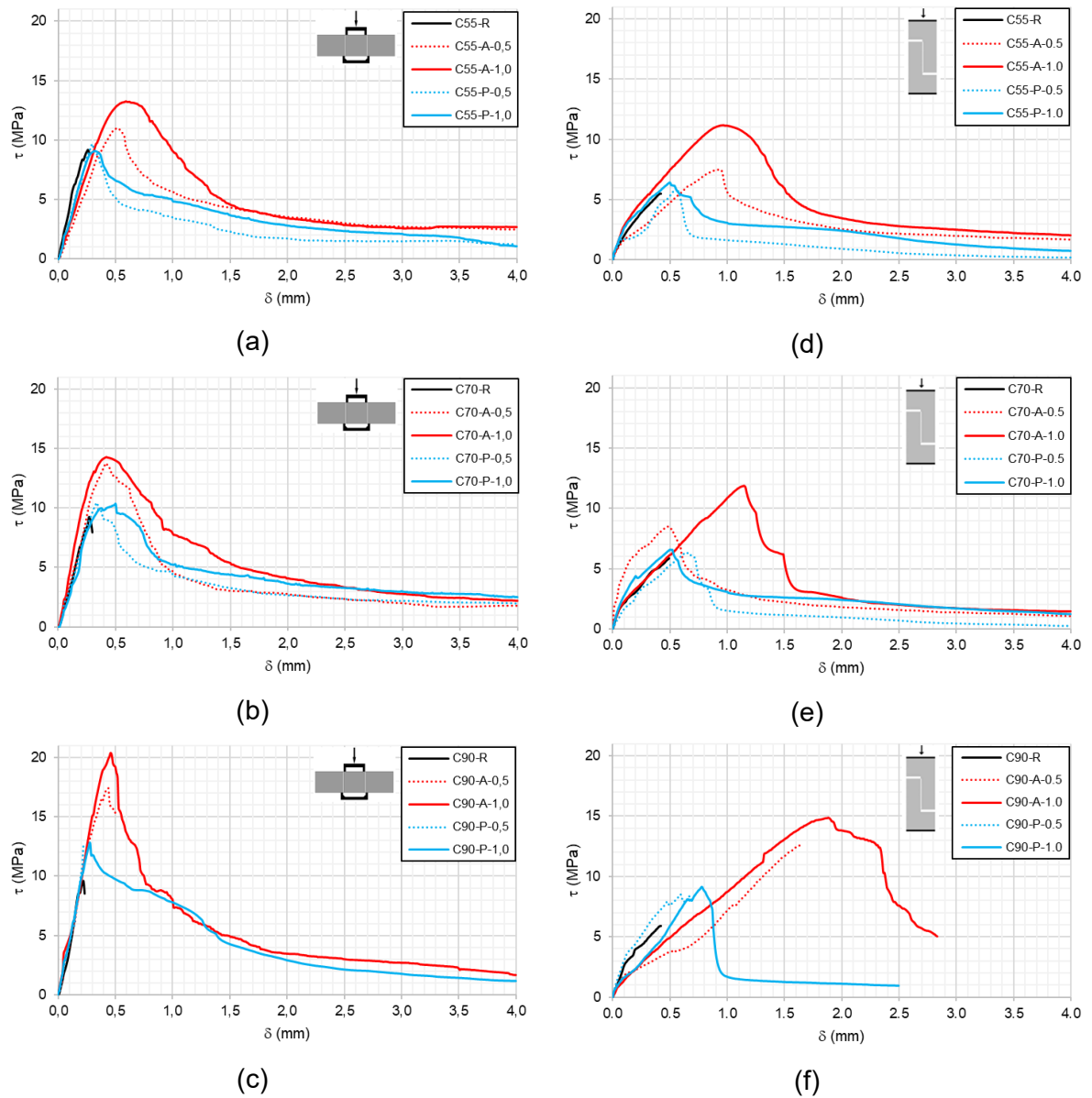


Tabela 19. Resultados dos ensaios de cisalhamento direto

TRAÇO	JSCE				Tipo <i>Push-off</i>				$\Delta\tau_{cr3}$	$\Delta\tau_{max3}$
	τ_{cr}	τ_{max}	$\Delta\tau_{cr1}$	$\Delta\tau_{max2}$	τ_{cr}	τ_{max}	$\Delta\tau_{cr1}$	$\Delta\tau_{max2}$		
C55-R S / CV	7,87 0,23 / 3	9,17 0,23 / 3	-	-	5,48 0,75 / 14	5,48 0,75 / 14	-	-	-30%	-40%
C55-A-0,5 S / CV	9,76 0,49 / 5	11,04 0,37 / 3	+24%	+20%	5,92 0,25 / 4	7,46 0,73 / 10	+8%	+36%	-39%	-32%
C55-A-1,0 S / CV	10,21 0,28 / 3	13,26 0,03 / 0	+30%	+45%	4,04 0,53 / 13	11,19 1,17 / 10	-26%	+104%	-60%	-16%
C55-P-0,5 S / CV	8,74 2,74 / 31	9,95 2,29 / 23	+11%	+9%	2,75 1,70 / 62	5,96 0,19 / 3	-50%	+9%	-69%	-40%
C55-P-1,0 S / CV	8,22 0,83 / 10	9,07 0,25 / 3	+4%	-1%	3,72 0,82 / 22	6,44 0,21 / 3	-32%	+18%	-55%	-29%
C70-R S / CV	8,07 0,17 / 2	9,26 0,56 / 6	-	-	5,84 0,18 / 3	5,84 0,18 / 3	-	-	-28%	-37%
C70-A-0,5 S / CV	11,98 0,75 / 6	13,80 0,55 / 4	+48%	+49%	6,22 0,73 / 12	8,51 0,80 / 9	+7%	+46%	-48%	-38%
C70-A-1,0 S / CV	11,85 1,00 / 8	14,30 0,70 / 5	+47%	+54%	8,12 5,06 / 62	11,87 1,95 / 16	+39%	+103%	-31%	-17%
C70-P-0,5 S / CV	8,00 0,74 / 9	10,42 0,67 / 6	-1%	+13%	4,96 2,16 / 44	6,38 0,48 / 8	-15%	+9%	-38%	-39%
C70-P-1,0 S / CV	8,73 0,13 / 2	10,42 0,47 / 5	+8%	+13%	5,64 1,20 / 21	6,69 0,04 / 1	-3%	+15%	-35%	-36%
C90-R S / CV	9,09 0,28 / 3	9,57 0,66 / 7	-	-	5,91 1,04 / 18	5,91 1,04 / 18	-	-	-35%	-38%
C90-A-0,5 S / CV	11,49 0,91 / 8	17,57 1,28 / 7	+26%	+84%	3,76 0,30 / 8	12,68 1,41 / 11	-36%	+115%	-67%	-28%
C90-A-1,0 S / CV	18,68 1,56 / 8	20,47 1,88 / 9	+106%	+114%	4,78 1,59 / 33	16,66 2,52 / 15	-19%	+182%	-74%	-19%
C90-P-0,5 S / CV	11,38 2,46 / 22	12,71 1,78 / 14	+25%	+33%	4,19 0,87 / 21	8,61 0,56 / 7	-29%	+46%	-63%	-32%
C90-P-1,0 S / CV	8,89 1,21 / 14	12,78 0,69 / 5	-2%	+34%	7,86 0,35 / 4	9,16 0,23 / 3	+33%	+55%	-12%	-28%

τ_{cr} : tensão de cisalhamento da matriz de concreto (fissuração) (MPa)

τ_{max} : tensão máxima de cisalhamento (MPa)

$\Delta\tau_{cr1}$: variação da tensão de cisalhamento da matriz de concreto em relação ao concreto de referência (sem fibras)

$\Delta\tau_{max2}$: variação da tensão máxima de cisalhamento em relação ao concreto de referência (sem fibras)

$\Delta\tau_{cr3}$: variação da tensão de cisalhamento da matriz de concreto (fissuração) entre ensaio JSCE-SF6 e tipo *Push-off* para o mesmo traço

$\Delta\tau_{max3}$: variação da tensão máxima de cisalhamento entre ensaio JSCE-SF6 e tipo *Push-off* para o mesmo traço

S: desvio padrão

CV: coeficiente de variação (%)

Conforme pode ser observado nas curvas da Figura 55, enquanto todos os corpos de prova dos concretos de referência (sem fibras) apresentaram ruptura abrupta imediatamente após a carga de pico, os concretos com adição de fibras, de modo geral, demonstraram significativa capacidade de deformação após a abertura da fissura e a carga de pico.

As curvas obtidas nos ensaios realizados conforme a norma JSCE-SF6 (1990) apresentaram comportamento semelhante para todos os traços. Nas curvas tensão versus deslocamento vertical (δ), observa-se um trecho ascendente aproximadamente linear até a carga de pico, momento em que ocorre a fissuração da matriz de concreto, para um deslocamento em torno de 0,50 mm nos concretos com fibras de aço (CRFA) e 0,35 mm nos concretos com fibras poliméricas (CRFP). Após a fissuração da matriz, as tensões passam a ser transferidas para as fibras, que atuam como pontes de transferência entre as fissuras. Nesse estágio, observa-se uma progressiva redução da carga entre os deslocamentos de 0,5 mm e 2 mm, seguida por um decréscimo mais lento, permitindo grandes deslocamentos sem que ocorra a ruptura total do corpo de prova.

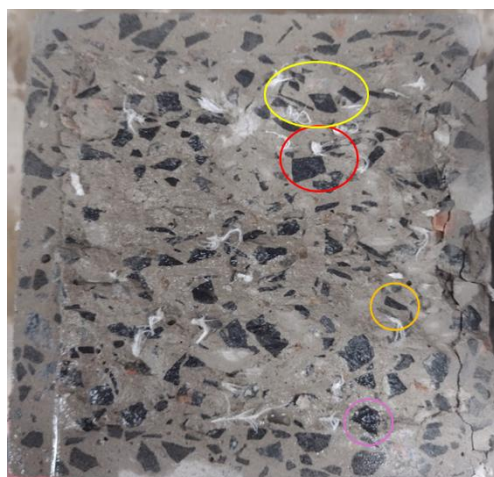
Esse comportamento foi observado em todos os traços de concreto, exceto no C90 com adição de 0,5% de fibras de aço e de macrofibras poliméricas (C90-A-0,5 e C90-P-0,5), que romperam bruscamente logo após a carga de pico, sem apresentar resistência residual. Uma das características do concreto de alta resistência é sua ruptura abrupta sob tensões de compressão. A adição de fibras a esse tipo de concreto resulta em uma transferência súbita das tensões para as fibras após a fissuração da matriz. Além disso, o aumento da resistência à compressão do concreto potencializa a ancoragem das fibras na matriz. Nos concretos C90 com 0,5% de fibras, após a fissuração, as fibras foram submetidas a tensões elevadas, o que resultou em sua ruptura logo após o início da fissuração. Por outro lado, o aumento da dosagem de fibras para 1% foi suficiente para mitigar esse efeito, de modo que os concretos C90 com 1% de fibras apresentaram resistência residual equivalente à dos demais traços. Esse comportamento indica que, em concretos de alta resistência, é necessário o uso de fibras com desempenho superior ou em dosagens mais elevadas, de forma a maximizar a resistência residual ao cisalhamento e promover um comportamento mais dúctil do material — característica desejável para as estruturas.

Em todos os corpos de prova, a ruptura ocorreu em um dos planos de cisalhamento. Nos concretos sem fibras, observou-se a separação completa ao longo da superfície de ruptura. Por outro lado, nos concretos com fibras, em geral, não houve separação total entre as partes, uma vez que as fibras mantiveram a ligação entre os lados do corpo de prova após a fissuração.

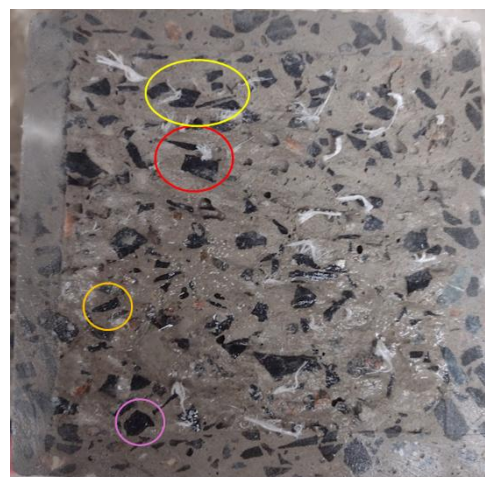
Com o objetivo de possibilitar uma avaliação da superfície de ruptura, os corpos de prova foram novamente posicionados na prensa, onde se aplicou um carregamento adicional

com a finalidade de romper completamente o corpo de prova. Foi realizada uma análise visual das superfícies de ruptura, a partir da qual foi possível observar se a fratura ocorreu predominantemente na matriz ou nos agregados graúdos. Observou-se uma maior densidade de pontos com ruptura dos agregados nos corpos de prova de concretos com maior resistência (Figura 56). No entanto, com relação à distribuição ou forma de ruptura das fibras, não foi possível tirar conclusões. Como foi necessário aplicar uma carga adicional para a abertura completa dos corpos de prova, não se pode afirmar se a ruptura das fibras ocorreu durante o ensaio principal ou apenas no momento da aplicação dessa carga complementar.

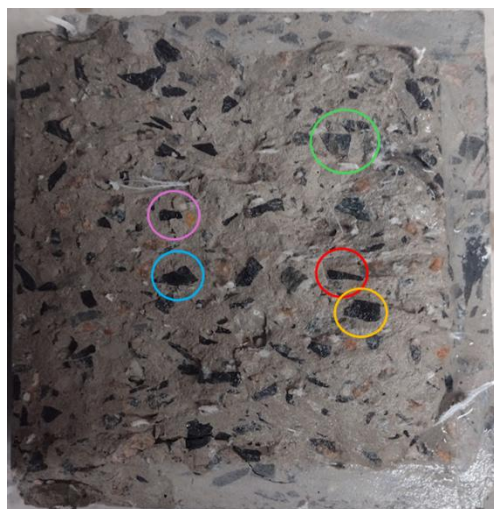
Figura 56. Análise da superfície de ruptura dos corpos-de-prova do ensaio JSCE-SF6: (a) C55-P-0,5-2E, (b) C55-P-0,5-2D, (c) C70-P-0,5-3E, (d) C70-P-0,5-3D, (e) C90-P-0,5-2E e (f) C90-P-0,5-2D



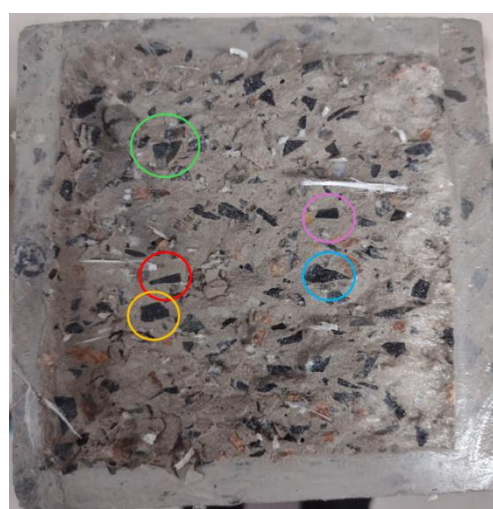
C55-P-0,5-2E (a)



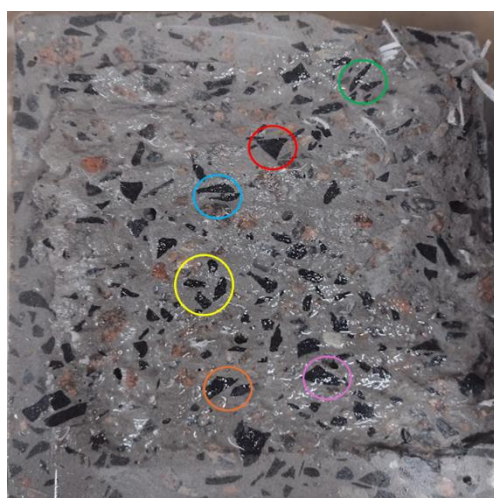
C55-P-0,5-2D (b)



C70-P-0,5-3E (c)



C70-P-0,5-3D (d)



C90-P-0,5-2E (e)



C90-P-0,5-2D (f)

No ensaio realizado segundo o método JSCE-SF6, os corpos de prova não foram instrumentados para o monitoramento da abertura da fissura, ou seja, não houve medição do deslocamento horizontal. Além disso, não foram utilizados dispositivos para restringir a rotação das extremidades dos corpos de prova. Soetens e Matthys (2017) chamam a atenção para a necessidade de se verificar os efeitos secundários decorrentes da flexão que pode ocorrer antes da tensão máxima de cisalhamento ser atingida. A presença de flexão induz compressão na parte superior do corpo de prova, alterando o comportamento estrutural e, consequentemente, fazendo com que a ruptura não ocorra por cisalhamento puro. Em ensaios realizados segundo a JSCE-SF6, alguns autores empregam dispositivos com a finalidade de restringir a rotação dos corpos de prova (BOULEKBACHE *et al.*, 2012; MOGHADAM; IZAFARD, 2019; LI *et al.*, 2017; DOYAN-BARBANT; CHARRON, 2018; LEONE *et al.*, 2018) ou de introduzir tensões de confinamento (SOETENS; MATTHYS, 2017). Nenhum desses dispositivos foi utilizado no presente estudo.

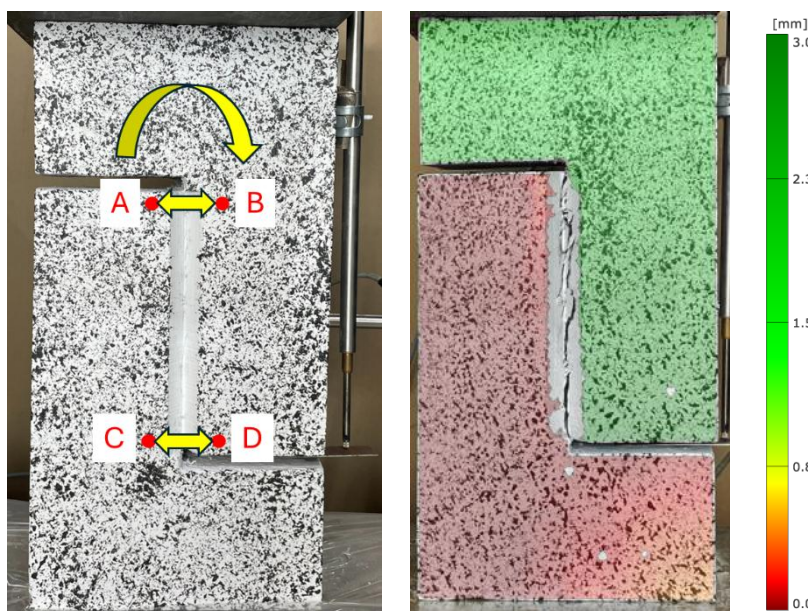
Nos ensaios tipo *Push-off*, foram observadas variações no comportamento das curvas em comparação àquelas obtidas segundo a metodologia JSCE-SF6, atribuídas às distintas configurações de cada ensaio (equipamento utilizado, tipo e velocidade de carregamento, número de planos de cisalhamento). De forma geral, as curvas apresentaram comportamento aproximadamente linear até a abertura da fissura. Após a fissuração, verificou-se uma mudança de inclinação e um crescimento ainda aproximadamente linear até a tensão máxima. Na sequência, houve uma queda de tensão, sucedida por uma redução mais gradual à medida que o deslocamento vertical aumentava.

A tensão máxima, assim como nos ensaios realizados conforme a JSCE-SF6, ocorreu para deslocamentos verticais em torno de 0,5 mm no CRFP. Para o CRFA, a carga de pico foi atingida em deslocamentos maiores: aproximadamente 1,0 mm para os traços C55 e C70, e entre 1,5 mm e 2,0 mm para o traço C90. Assim como nos ensaios da JSCE-SF6, os traços C90-A-0,5 e C90-P-0,5 não apresentaram resistência residual, com ruptura abrupta logo após o pico de tensão.

No ensaio *Push-off*, também foi medida a abertura da fissura (deslocamento horizontal). Uma análise de correlação de imagem digital (CID) foi conduzida para monitorar os deslocamentos horizontais no topo (distância entre pontos A e B, conforme ilustrado na Figura 57) e na base do entalhe (distância entre pontos C e D na mesma figura). O objetivo dessa avaliação foi verificar a possível rotação relativa entre as superfícies da fissura, conforme esquematizado na Figura 57. Até o início da fissuração, o deslocamento diferencial foi extremamente pequeno em todos os corpos de prova, com média de 0,02 mm. Entre a abertura da fissura e o pico de tensão de cisalhamento, essa diferença aumentou ligeiramente, mas permaneceu insignificante (média de 0,06 mm). Ao final dos ensaios, a

rotação relativa entre as superfícies das fissuras permaneceu pequena em todos os corpos de prova, com ângulo médio de $0,25^\circ$. Portanto, essas rotações podem ser desprezadas sem comprometer a confiabilidade dos resultados, conforme discutido por GUO *et al.* (2025).

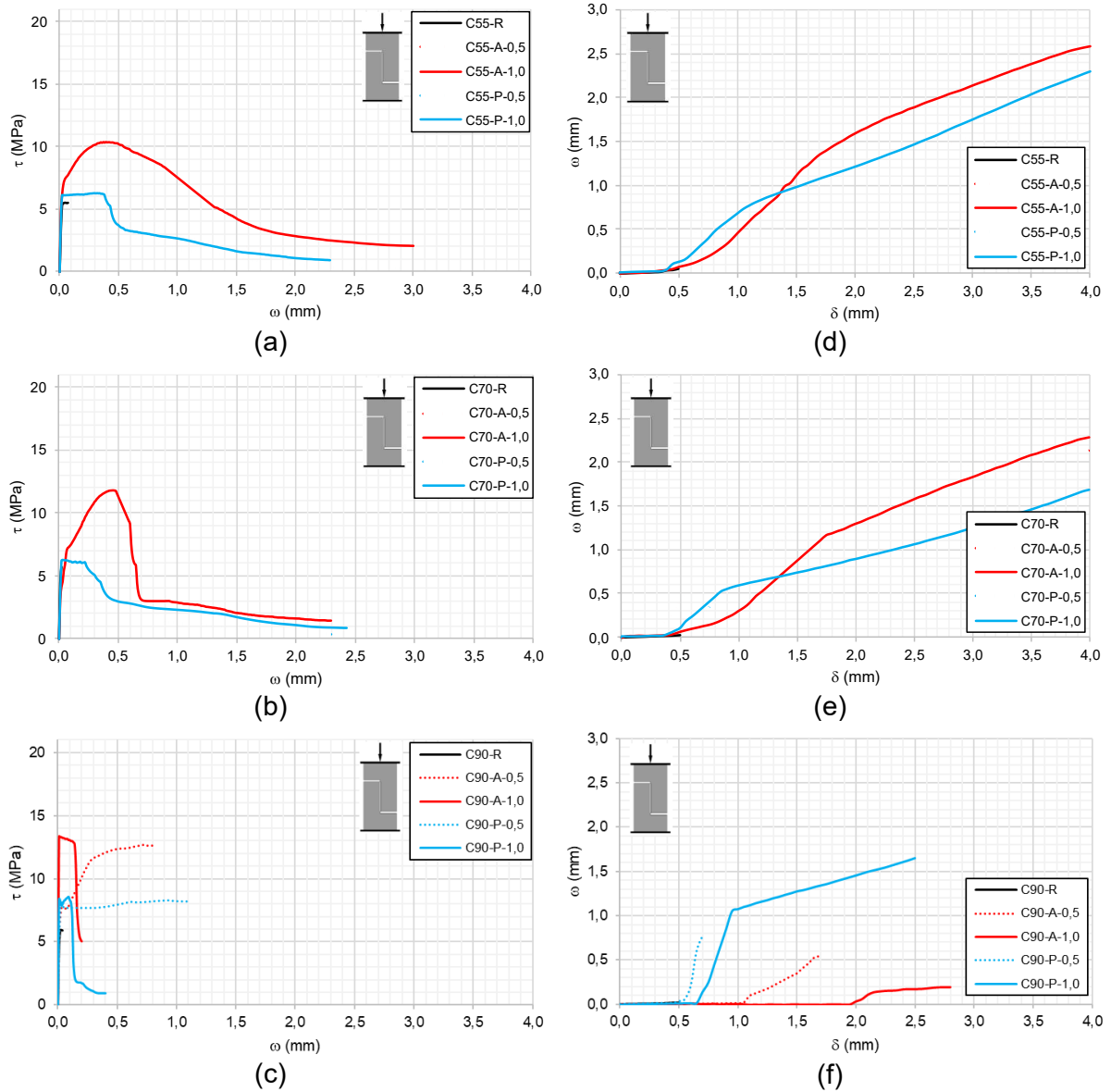
Figura 57. Verificação da rotação relativa nos corpos de prova do ensaio *Push-off*



Os gráficos de tensão de cisalhamento versus abertura de fissura, bem como a relação entre abertura de fissura e deslocamento vertical obtida no ensaio *Push-off*, estão apresentados na Figura 58. Observa-se que essa relação apresenta um padrão de comportamento em dois estágios: no primeiro, até aproximadamente 0,5 mm de deslocamento vertical, a abertura da fissura é insignificante; no segundo, ocorre um aumento proporcional entre a abertura da fissura e o deslocamento vertical. A exceção a esse padrão está nos traços do concreto C90. A curva para o traço com 1% de fibra de aço demonstra a capacidade da fibra em controlar a abertura da fissura, mantendo-a inferior a 0,25 mm até o final do ensaio. Já para os traços C90 com adição de 0,5% de fibras — tanto de aço quanto poliméricas —, conforme já discutido anteriormente, não foi observada resistência residual significativa, com ruptura abrupta após o pico de tensão. No traço C90 com 0,5% de macrofibra polimérica, a abertura final da fissura foi de 0,80 mm, enquanto no traço com 0,5% de fibra de aço foi de 0,55 mm, indicando diferenças no controle da abertura de fissuras para um mesmo teor de incorporação de fibras. Para o traço C90 com 1% de macrofibra polimérica, observou-se comportamento semelhante ao dos traços C55 e C70, com aumento proporcional da abertura da fissura em função do deslocamento vertical após a tensão máxima. Esses resultados indicam que, para concretos de maior resistência, é necessário empregar fibras

com desempenho mais eficaz ou em teores adequados, a fim de garantir o controle eficiente da fissuração e uma contribuição efetiva na fase pós-pico.

Figura 58. Ensaio tipo *Push-off* – Curvas características tensão de cisalhamento vs deslocamento horizontal (ω): (a) C55, (b) C70 e (c) C90 e deslocamento vertical (δ) vs deslocamento horizontal (ω) (d) C55, (e) C70 e (f) C90



Ao analisar a variação da resistência ao cisalhamento direto em função da resistência à compressão, observou-se que, no concreto sem fibras, não houve um aumento significativo na resistência ao cisalhamento com o incremento da resistência à compressão. Em contrapartida, para os concretos com fibras, foi identificado um aumento consistente na resistência ao cisalhamento direto com o aumento da resistência à compressão entre os traços C55, C70 e C90. Além disso, verificou-se um incremento na resistência ao

cisalhamento com o aumento da dosagem de fibras.

De maneira geral, os concretos com fibras de aço apresentaram uma resistência ao cisalhamento direto superior em comparação aos concretos com macrofibras poliméricas, quando considerada a mesma dosagem de fibras.

Considerando os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento segundo a JSCE-SF6, para a adição de 0,5% de fibras, a resistência ao cisalhamento do concreto C90 apresentou um aumento de 59% para fibras de aço e 28% para macrofibras poliméricas, quando comparado ao concreto C55. Para a dosagem de 1% de fibras, o aumento da resistência ao cisalhamento foi semelhante, com incrementos de 54% para fibras de aço e 41% para macrofibras poliméricas, para o concreto C90 em comparação ao C55. No trabalho de Boulekbache *et al.* (2012), foram analisados concretos com três classes de resistência diferentes (29,3 MPa, 61,3 MPa e 82,6 MPa) e os autores verificaram um aumento da resistência ao cisalhamento do concreto com resistência à compressão de 82,6 MPa de 56% para adição de 0,5% de fibras de aço e de 68% para adição de 1% de fibras de aço em comparação ao concreto de resistência à compressão de 61,3 MPa.

Ao analisar o ganho de resistência ao cisalhamento direto em função do aumento da dosagem de fibras, verificou-se que, para o concreto C90, a adição de 0,5% e 1% de fibras de aço resultou em aumentos de 84% e 114%, respectivamente, em comparação com o concreto sem fibras. Para as macrofibras poliméricas, o incremento na resistência ao cisalhamento direto foi de 33% e 34% para as dosagens de 0,5% e 1%, respectivamente. Esses resultados evidenciam que a adição de fibras contribui de maneira significativa para o aumento da resistência ao cisalhamento do concreto, sendo o ganho de resistência mais expressivo para as fibras de aço em comparação com as macrofibras poliméricas, no mesmo teor de incorporação.

Para os resultados obtidos nos ensaios tipo *Push-off*, verificou-se também um ganho na resistência ao cisalhamento direto em função do aumento da resistência à compressão, em magnitudes semelhantes às observadas nos ensaios segundo a metodologia da JSCE-SF6. No entanto, as resistências obtidas com o ensaio tipo *Push-off* foram em média 30% menores às observadas nos ensaios da JSCE-SF6.

A utilização de armadura nos corpos de prova tipo *Push-off*, com o intuito de prevenir a ruptura por flexão, dificulta a moldagem e o processo de adensamento do concreto com fibras, reduzindo a resistência da matriz. Além disso, no ensaio tipo *Push-off*, o carregamento é distribuído na superfície do corpo de prova, que possui um plano de cisalhamento, ao contrário do ensaio da JSCE-SF6, que aplica cargas concentradas em dois pontos do corpo, que possui dois planos de cisalhamento. Tais diferenças nos métodos de ensaio podem influenciar o desempenho do material e ajudam a explicar as diferenças observadas nos

resultados entre as duas metodologias.

Na última coluna da Tabela 19 estão apresentadas as diferenças para a tensão máxima obtidas com o ensaio tipo *Push-off* em comparação ao ensaio segundo a JSCE-SF6. Este comportamento também foi relatado por Carrillo *et al.* (2024), que obteve resultados 28% maiores para os ensaios segundo a JSCE-SF6 em comparação aos realizados com o ensaio tipo *Push-off*.

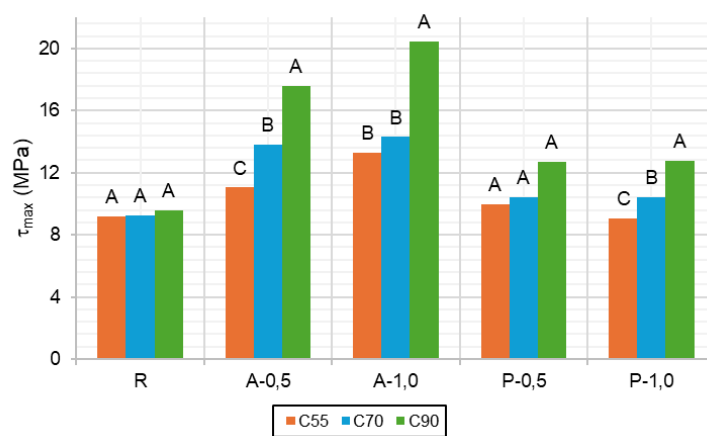
A influência das variáveis resistência à compressão do concreto, tipo e teor de fibras na resistência ao cisalhamento direto foram avaliadas por meio de análises de variância (ANOVA) e teste de Fischer com nível de significância de 95% ($\alpha=0,5\%$) e os resultados estão apresentados na Figura 59 (ensaio segundo JSCE-SF6) e Figura 60 (ensaio tipo *Push-off*), em que os traços estão indicados nas colunas com os respectivos valores de tensão máxima de cisalhamento obtidas nos ensaios e as letras A, B e C indicam o grupo de cada traço segundo o teste de Fischer. Para as colunas com as mesmas letras ou que compartilham letras, conclui-se que não há diferença estatisticamente significativa entre os resultados e que, portanto, a variável não exerce influência significativa na resistência ao cisalhamento direto.

Para os ensaios realizados segundo a metodologia JSCE-SF6, verificou-se que, no concreto sem fibras, não houve diferença estatisticamente significativa entre as classes de resistência C55, C70 e C90. Para o traço com 0,5% de fibras de aço (A-0,5), observou-se diferença significativa entre as três classes. No caso de 1,0% de fibras de aço (A-1,0), não houve diferença entre os concretos C55 e C70, mas foi identificada diferença significativa em relação ao C90. Para os traços com fibras poliméricas, os resultados mostraram que, para o teor de 0,5% (P-0,5), não há diferença significativa entre as classes, enquanto para o teor de 1,0% (P-1,0), observou-se diferença estatística entre os três níveis de resistência à compressão.

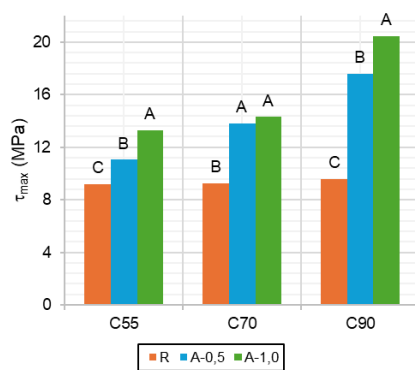
Nos ensaios do tipo *Push-off*, o comportamento observado foi semelhante para o concreto sem fibras, com ausência de diferenças significativas entre C55, C70 e C90. Para todos os traços com fibras (A-0,5, A-1,0, P-0,5 e P-1,0), verificou-se que não houve diferença estatística entre os concretos C55 e C70, mas foi identificada diferença significativa em relação ao concreto de maior resistência (C90). Esses resultados indicam que a influência da resistência à compressão na resistência ao cisalhamento torna-se mais evidente nos traços com fibras, sobretudo para o concreto C90, enquanto para os concretos sem fibras o efeito da classe de resistência é menos relevante.

Considerando a influência da dosagem de fibras, verifica-se diferença significativa para as fibras de aço, entre os concretos sem e com fibras, nas duas dosagens. Já para os concretos com macrofibras poliméricas, verifica-se diferença significativa apenas para o concreto C90 com 1% de fibras.

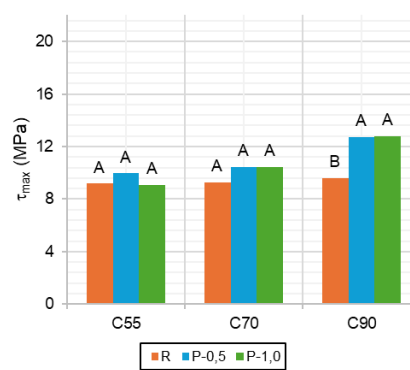
Figura 59. Análise estatística baseada no teste de Fischer para tensão máxima de cisalhamento – Ensaio JSCE-SF6: avaliação da influência (a) da resistência à compressão, (b) do teor de fibras de aço e (c) do teor de macrofibras poliméricas



(a)

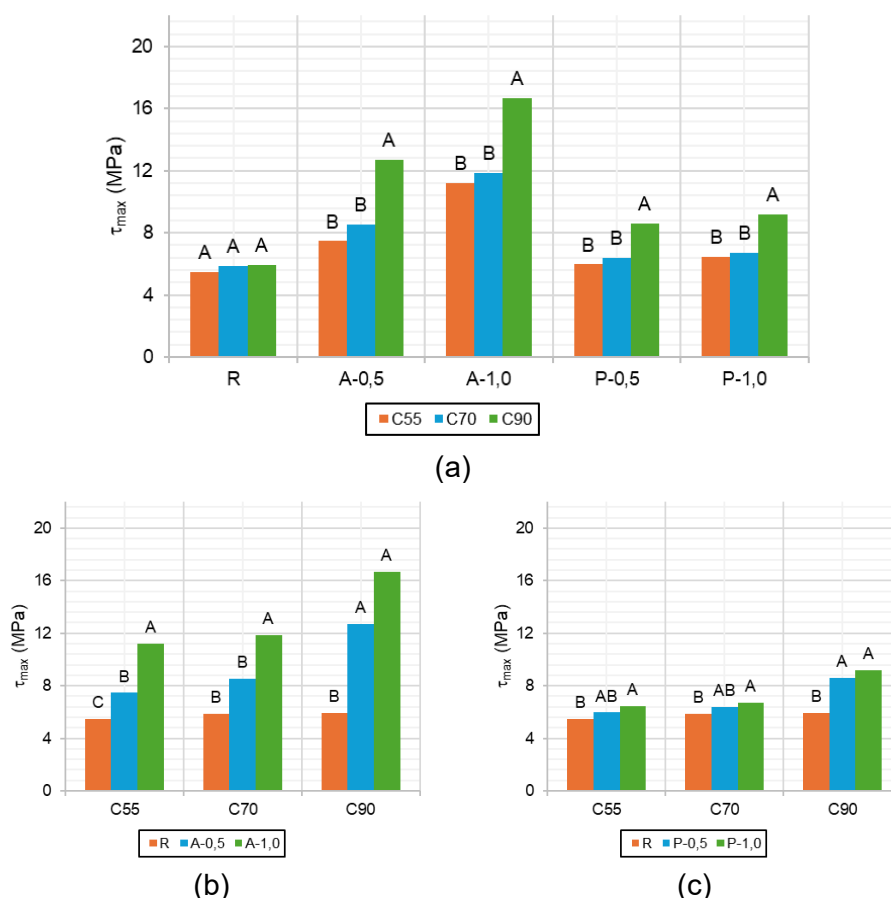


(b)



(c)

Figura 60. Análise estatística baseada no teste de Fischer para tensão máxima de cisalhamento – Ensaio tipo *Push-off*: avaliação da influência (a) da resistência à compressão, (b) do teor de fibras de aço e (c) do teor de macrofibras poliméricas



5.6 RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA RESIDUAL À TRAÇÃO E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO

No gráfico da Figura 61 são apresentadas as relações entre a tensão resistente de cisalhamento e as resistências residuais à tração por flexão, com o objetivo de avaliar a influência do comportamento pós-fissuração do concreto reforçado com fibras na capacidade resistente ao cisalhamento. Foram consideradas duas condições distintas: a tensão resistente de cisalhamento correspondente à abertura de fissura de 0,36 mm, associada ao Estado Limite de Serviço (ELS), e a correspondente à abertura de 1,92 mm, associada ao Estado Limite Último (ELU), ambos referentes aos resultados dos ensaios de cisalhamento do tipo *Push-off*.

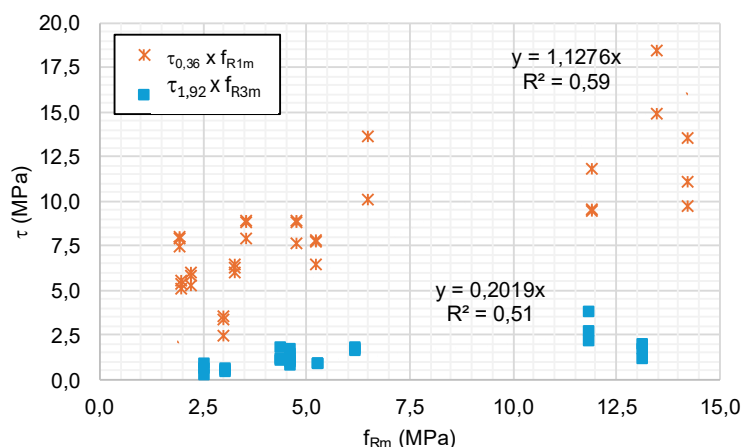
As tensões resistentes ao cisalhamento $\tau_{0,36}$ e $\tau_{1,92}$ foram determinadas com base nessas aberturas de fissura, conforme abordagem adotada por Guo *et al.* (2025). Essa correspondência está alinhada com o *fib Model Code 2020* (2024), no qual f_{R1} e f_{R3}

representam, respectivamente, as resistências residuais à tração por flexão para ELS (CMOD igual a 0,5 mm) e ELU (CMOD igual a 2,5 mm). De acordo com Conforti *et al.* (2018), as aberturas de fissura associadas a esses valores de CMOD são, respectivamente, 0,36 mm e 1,92 mm. Essa correspondência foi obtida experimentalmente pelos autores por meio de medições simultâneas de CMOD e abertura da fissura em vigas ensaiadas segundo EN 14651. Essa equivalência foi adotada neste trabalho para estabelecer uma correspondência direta entre os parâmetros de tração residual e os estados limites de projeto considerados na análise do cisalhamento.

A análise da relação entre a resistência à tração residual média f_{R3m} e a tensão resistente de cisalhamento $\tau_{1,92}$ revela uma correlação linear positiva, ainda que moderada. A regressão linear apresenta um coeficiente de determinação $R^2=0,51$, indicando uma dispersão significativa dos resultados experimentais em torno da tendência média. Esse comportamento sugere que, embora o parâmetro f_{R3m} esteja associado ao desempenho ao cisalhamento, sua influência isolada é limitada, refletindo a atuação concomitante de outros mecanismos resistentes além da contribuição residual das fibras no pós-fissuração. O coeficiente angular relativamente baixo da reta de regressão reforça essa interpretação, indicando que incrementos em f_{R3m} resultam em aumentos modestos da tensão resistente ao cisalhamento.

No caso da relação entre a resistência à tração na fissuração (f_{R1m}) e a tensão resistente de cisalhamento ($\tau_{0,36}$), observa-se um coeficiente angular significativamente mais elevado, indicando que variações em f_{R1m} resultam em incrementos mais expressivos da resistência ao cisalhamento. O coeficiente de determinação obtido ($R^2=0,59$) também é moderado, ainda que ligeiramente superior ao verificado para f_{R3m} . Apesar da dispersão dos dados, esse resultado sugere que os parâmetros relacionados à fase de pré-pico e à fissuração inicial exercem influência mais direta na capacidade resistente ao cisalhamento do que aqueles associados exclusivamente ao comportamento residual pós-fissuração.

Figura 61. Relação entre resistências residuais à tração e ao cisalhamento



6. RESULTADOS ETAPA 2: VIGAS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos na Etapa 2 do programa experimental, dedicada à investigação da capacidade resistente ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras sem armadura transversal. São descritos os procedimentos de ensaio, a instrumentação utilizada, as variáveis experimentais avaliadas e o comportamento observado em termos de formação e propagação da fissura diagonal, abertura de fissuras, deslocamentos e cargas últimas. Os resultados obtidos permitem avaliar a influência simultânea da resistência à compressão, do tipo de fibra e do teor volumétrico no desempenho estrutural das vigas ensaiadas.

6.1 CONTROLE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Durante a moldagem das vigas também foram moldados e ensaiados corpos de prova cilíndricos para verificação da resistência à compressão do concreto. Na Tabela 20 estão apresentados os resultados obtidos.

Verificou-se uma redução na resistência à compressão em relação aos resultados obtidos na etapa de caracterização mecânica (Etapa 1) em torno de 10% para os traços C55-P-1,0, C70-P-1,0, C90-R, C90-A-0,5 e C90-A-1,0, que pode ser justificada pela variação nas características do cimento e aditivo (foram utilizados os mesmos materiais, mas de lotes diferentes). Para os traços C90-P-0,5 e C90-P-1,0 a redução da resistência à compressão foi maior, 29% e 18%, respectivamente.

A redução na resistência à compressão dos concretos com adição de macrofibra polimérica já era esperada (XU *et al.*, 2020; ALMEIDA, 2023; BABAALI *et al.*, 2024), porém, como a redução observada foi elevada, foi realizada moldagem de seis novos corpos de prova cilíndricos para ensaios de resistência à compressão, e de ensaios para determinação da massa específica e do teor de ar incorporado para os traços com adição de fibras. Os resultados estão apresentados na Tabela 21 e Figura 62, identificados como Etapa 2b.

Tabela 20. Resistência à compressão

Traço	Etapa 1 – Caracterização				Etapa 2a - Vigas				Δ (%)
	f_{cm} (MPa)	s	CV (%)	f_{ck} (MPa)	f_{cm} (MPa)	s	CV (%)	f_{ck} (MPa)	
C55-P-1,0	61,09	1,70	2,79	58,28	55,39	0,87	1,57	53,95	-9%
C70-P-1,0	65,89	2,45	3,72	61,85	60,45	1,56	2,58	57,88	-8%
C90-R	100,08	3,15	3,14	94,89	91,68	2,13	2,32	88,17	-8%
C90-A-0,5	102,90	3,38	3,29	97,32	92,26	2,54	2,76	88,06	-10%
C90-A-1,0	100,36	9,43	9,40	84,79	89,54	5,82	6,50	79,93	-11%
C90-P-0,5	93,44	4,34	4,65	86,27	66,20	3,07	4,63	61,14	-29%
C90-P-1,0	87,68	3,75	4,27	81,49	71,99	1,66	2,30	69,25	-18%

f_{cm} : resistência à compressão média

f_{ck} : resistência à compressão característica

s: desvio padrão

CV: coeficiente de variação

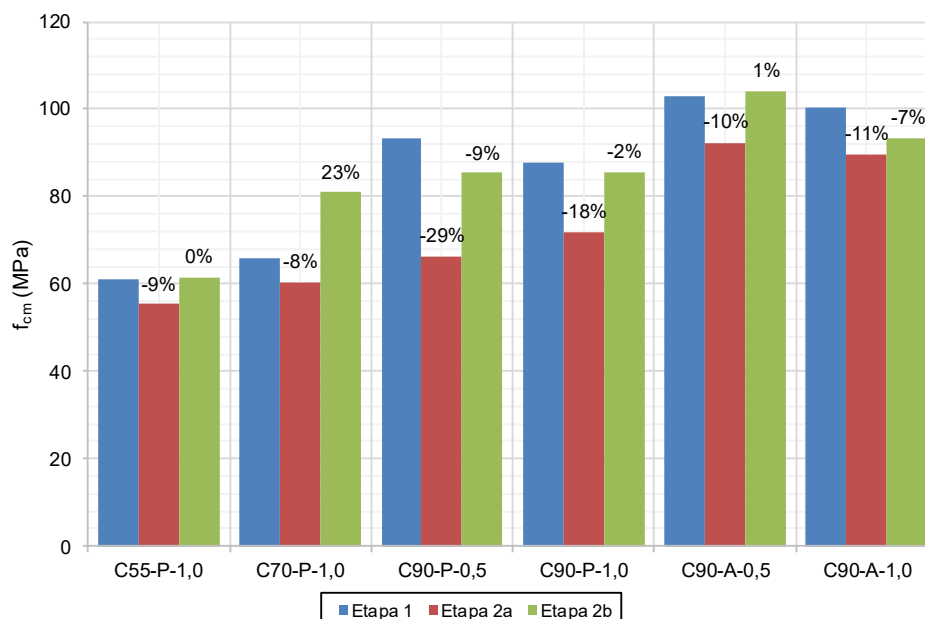
Tabela 21. Resultados de ensaios adicionais de resistência à compressão, massa específica e teor de ar incorporado

Traço	f_{cm} (MPa)	s	CV (%)	f_{ck} (MPa)	Δ (%)	Massa específica (kg/m³)	Teor de ar (%)
C55-P-1,0	61,36	2,60	4,24	57,06	0	2404,7	1,8
C70-P-1,0	80,98	3,03	3,74	75,98	+23%	2433,3	1,1
C90-A-0,5	104,16	5,58	5,36	94,94	+1%	2515,9	1,6
C90-A-1,0	93,48	8,57	9,17	79,33	-7%	2521,6	1,1
C90-P-0,5	85,39	11,79	13,81	65,94	-9%	2458,2	1,8
C90-P-1,0	85,59	8,21	9,59	72,04	-2%	2403,1	1,3

Na Figura 62 está apresentada a comparação dos resultados de resistência à compressão, onde é possível observar que a resistência à compressão atingiu valores coerentes com os resultados iniciais (Etapa 1) com variação entre redução de 29% (C90-P-0,5) até aumento de 23% (C70-P-1,0), indicando a variabilidade já esperada para as resistências entre as moldagens em função da variação das características dos materiais (principalmente cimento e aditivo) e também do próprio processo de mistura, moldagem e ensaio.

Os resultados dos ensaios de teor de ar incorporado apresentaram valores entre 1,1% e 1,8%, que não justificam a maior redução de resistência à compressão para os concretos com adição de macrofibras poliméricas.

Figura 62. Comparação dos resultados de resistência à compressão



Assim, os resultados para as resistências à compressão obtidas na Etapa 2a foram considerados aceitos e serão levados em conta nas análises dos resultados para os ensaios de flexão das vigas, apresentados a seguir.

6.2 ENSAIO DE FLEXÃO DAS VIGAS

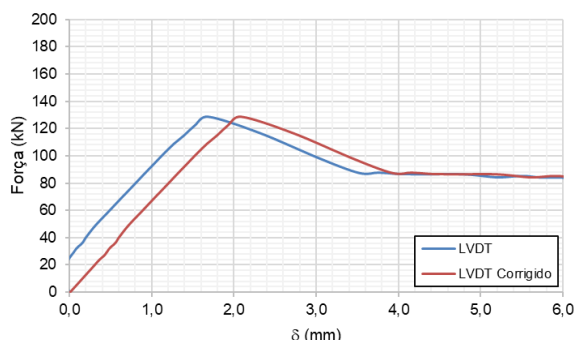
Em todas as vigas ensaiadas houve ruptura por força cortante sem escoamento da armadura longitudinal.

Para a análise dos ensaios de flexão em vigas, foram plotadas as curvas força versus deslocamento vertical a partir dos dados aquisitados pelo transdutor de deslocamento linear (LVDT) (Figura 64).

Inicialmente, considerando os dados aquisitados com o LVDT, observou-se que o deslocamento permaneceu constante no início do ensaio enquanto a força aumentava, seguido por um comportamento aproximadamente linear até o início de formação da fissura de cisalhamento. Para melhor interpretação dos resultados, realizou-se um ajuste nos dados. Primeiramente, a equação da reta correspondente ao trecho linear foi determinada por meio de regressão linear. Em seguida, a curva foi transladada de modo que sua origem coincidisse com o ponto (0,0), garantindo uma representação mais adequada e eliminando o efeito da acomodação inicial dos deslocamentos no ensaio. Na Figura 63 está apresentada a curva obtida com os dados aquisitados e a curva corrigida com o procedimento descrito

anteriormente, para a viga C90-P-1,0-1. Esse procedimento foi adotado para todas as vigas.

Figura 63. Ajuste nas curvas força vs deslocamento



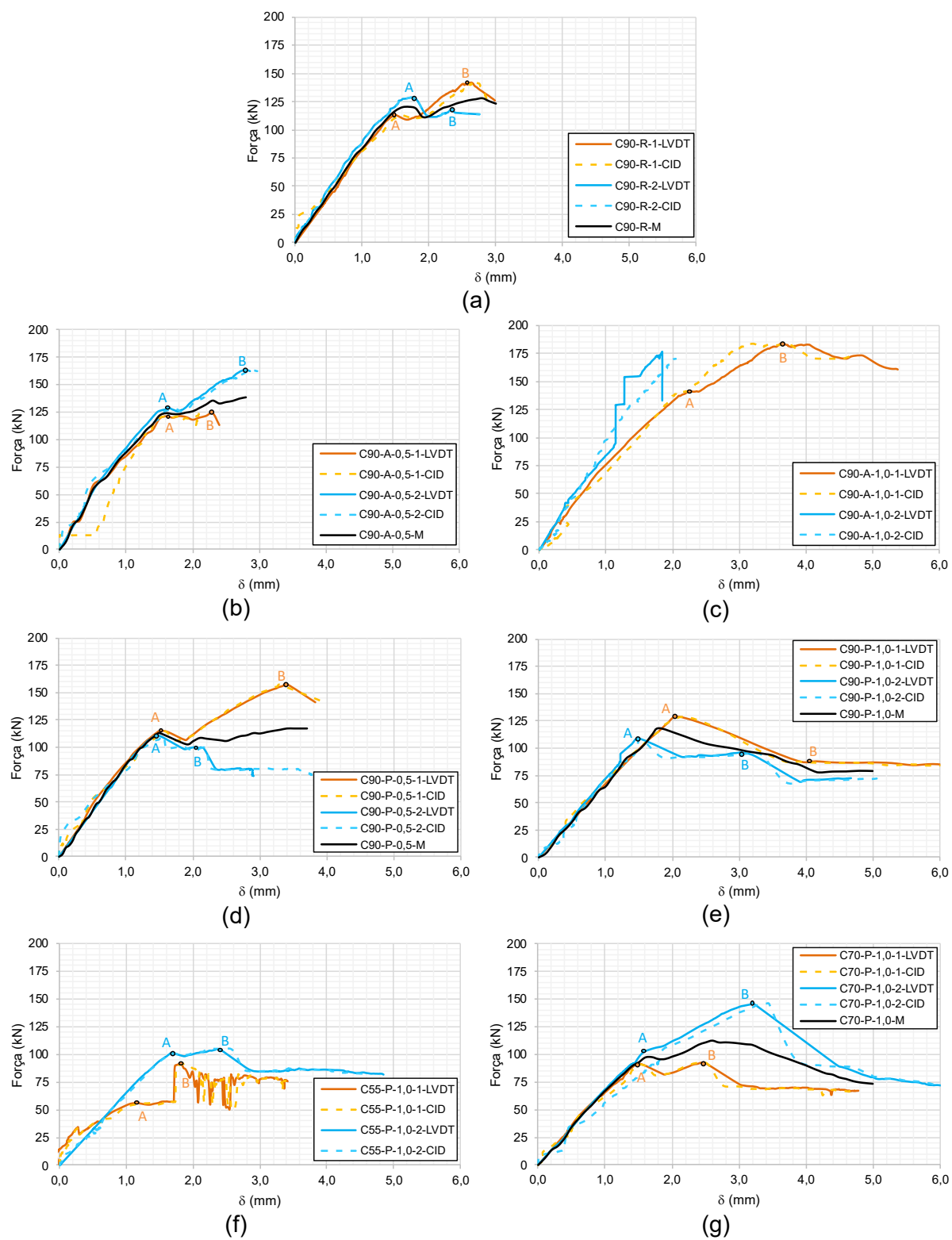
Na sequência, foram realizadas leituras adicionais dos deslocamentos utilizando a técnica de correlação de imagem digital (CID). Conforme ilustrado na Figura 64, verificou-se que, com exceção das vigas C90-A-0,5-1 e C70-P-1,0-2, todas as demais vigas analisadas apresentaram boa correspondência entre os deslocamentos obtidos pelo LVDT e aqueles determinados por meio de CID. No caso da viga C90-R-2, observou-se uma falha na leitura dos deslocamentos pelo LVDT, motivo pelo qual os deslocamentos medidos por meio do CID foram adotados para a análise desta viga.

Durante o ensaio da viga C90-A-0,5-1, ocorreu a falha do motor hidráulico do atuador no momento da aplicação da pré-carga, resultando na manutenção dessa condição por um período de 36 horas enquanto o motor era consertado. Após esse intervalo, o ensaio foi retomado normalmente. No entanto, os deslocamentos obtidos por meio da técnica de CID apresentaram valores anômalos, sendo essa viga a que demonstrou a maior discrepância entre os deslocamentos medidos pelo LVDT e pelo CID.

Nas curvas apresentadas na Figura 64, estão destacados os pontos A e B que se referem, respectivamente, ao início da formação da fissura diagonal de cisalhamento e ao máximo valor de carga obtida após a abertura da fissura.

Para a análise dos resultados em função de cada variável — resistência à compressão, tipo de fibras e teor de fibras — foram definidas curvas características. Essas curvas são representadas pelos valores médios das forças correspondentes aos respectivos valores de deslocamento. Essa abordagem permite uma avaliação sistemática da influência de cada variável nas propriedades mecânicas do concreto, facilitando a interpretação dos dados obtidos nos ensaios. As curvas características (M) para cada grupo de viga estão apresentadas na Figura 64.

Figura 64. Força x Deslocamento vertical: (a) C90-R, (b) C90-A-0,5, (c) C90-A-1,0, (d) C90-P-0,5, (e) C90-P-1,0, (f) C55-P-1,0 e (g) C70-P-1,0



Todas as vigas apresentaram comportamento inicial muito similar, com um trecho linear até a formação da primeira fissura diagonal de cisalhamento (ponto A), com variação na força e com deslocamentos entre 1,5 mm e 2,0 mm. A partir do ponto A verificou-se um comportamento distinto entre as vigas. Para o grupo de vigas de referência, sem adição de fibras (Figura 64(a)), a viga C90-R-1 apresentou um ganho de carga após a formação da fissura, atingindo a carga máxima no ponto B, com deslocamento próximo de 2,8 mm e a viga C90-R-2, ao contrário, apresentou um comportamento mais frágil, com queda de carga após a fissuração, mantendo a tendência de deslocamento e abertura da fissura até o fim do ensaio, sem ganho de capacidade resistente.

A viga C90-A-0,5-1 não apresentou aumento significativo de carga após o início da fissuração, mantendo um platô de resistência até alcançar a carga máxima, enquanto a viga C90-A-0,5-2 exibiu um aumento expressivo de carga após a formação da fissura (27,1%), atingindo a carga máxima no ponto B com um deslocamento superior (Figura 64(b)). Essa diferença pode ser atribuída a variabilidade associada ao comportamento pós-fissuração provavelmente em função da distribuição e orientação das fibras.

Durante o ensaio da viga C90-A-1,0-2, ocorreu um giro do suporte do atuador de carga, resultando na concentração da carga na face posterior da viga. Como consequência, não foi possível observar a formação da fissura na face frontal da amostra, o que comprometeu a leitura e a interpretação dos resultados. Devido a essa inconsistência, essa viga foi desconsiderada na análise. Para a viga C90-A-1,0-1 (Figura 64(c)), observa-se novamente o comportamento linear até a formação da primeira fissura diagonal de cisalhamento (ponto A), porém para um deslocamento maior que as demais vigas, de 2,26 mm. Após esse estágio, observa-se um aumento expressivo de carga após a formação da fissura (29,7%), atingindo a carga máxima no ponto B com um deslocamento superior e indicando um comportamento significativamente mais tenaz em comparação aos grupos anteriores.

A viga C90-P-0,5-1 apresentou um desempenho com ganho expressivo de carga após a fissuração (37,3%), atingindo valores acima do ponto de início da abertura da fissura. Em contrapartida, a viga C90-P-0,5-2 mostrou redução de carga logo após a fissuração, seguida por estabilização, sem recuperação de resistência (Figura 64(d)).

A Figura 64(e) apresenta as curvas para as vigas do grupo C90-P-1,0, reforçadas com 1,0% de macrofibras poliméricas, onde é possível observar um comportamento distinto em relação às vigas reforçadas com fibras de aço. Após o pico inicial de resistência e a formação da fissura (ponto A), as duas vigas apresentaram queda abrupta de carga, seguida por um patamar praticamente constante durante a abertura da fissura. Esse comportamento evidencia que, apesar do maior teor de fibras, a atuação das macrofibras poliméricas na contenção do avanço da fissura e no ganho de tenacidade é limitada quando comparada ao

desempenho das fibras metálicas.

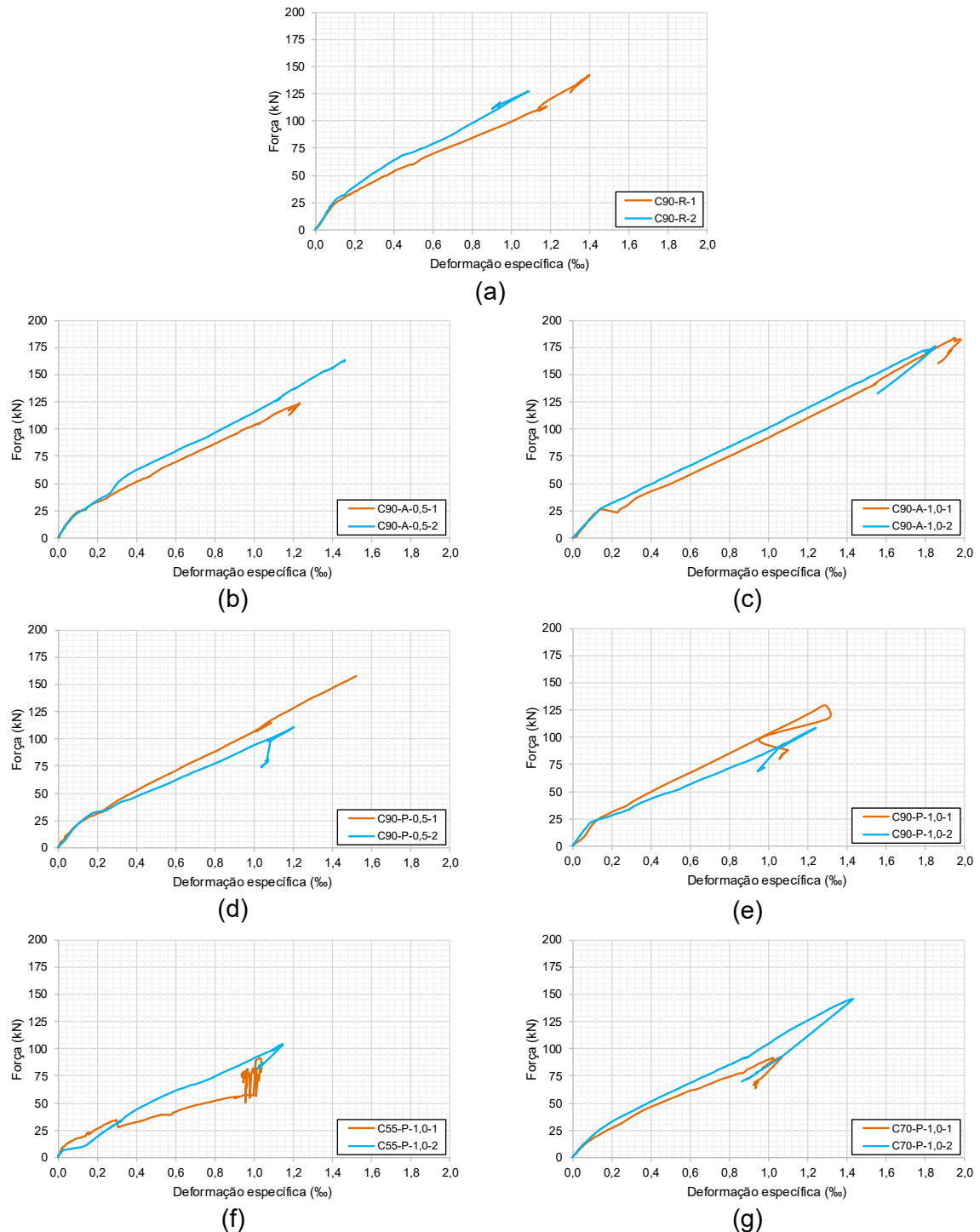
A Figura 64(f) apresenta as curvas força versus deslocamento vertical para as vigas do grupo C55-P-1,0, reforçadas com 1,0% de macrofibras poliméricas. Na viga C55-P-1,0-1, os valores da força aplicada apresentaram comportamento inconsistente, com variações não esperadas, onde a carga aumentava e diminuía ao longo do ensaio. Considera-se que essa irregularidade tenha sido causada por um problema no atuador de carga. Diante disso, essa viga também foi desconsiderada na análise dos resultados. Para a viga C55-P-1,0-2, observa-se o comportamento linear, constante em todas as vigas analisadas, até a formação da primeira fissura diagonal de cisalhamento (ponto A), que ocorreu para um deslocamento de 1,66 mm. Após esse estágio, observa-se um leve aumento de carga após a formação da fissura, atingindo a carga máxima no ponto B, seguido por uma queda da carga e na sequência um patamar praticamente constante durante a abertura da fissura.

Finalmente, na Figura 64(g), estão apresentadas as curvas para as vigas do grupo C70-P-1,0, também reforçadas com 1,0% de macrofibras poliméricas. Ambas as vigas apresentaram comportamento linear até a formação da primeira fissura diagonal de cisalhamento (ponto A), que ocorreu para forças semelhantes (91,06 kN e 102,65 kN) e deslocamentos em torno de 1,55mm. Após esse ponto, observaram-se diferenças no comportamento entre as vigas. A viga C70-P-1,0-2 obteve o maior desempenho, com aumento da carga, atingindo aproximadamente 145 kN antes de uma queda abrupta por volta de 3,2 mm de deslocamento. A viga C70-P-1,0-1, por sua vez, apresentou desempenho inferior, com carga de pico próxima a muito próxima à carga de fissuração (92,05 kN) e perda de resistência mais contínua.

De modo geral, as curvas força versus deslocamento mostram que, embora todas as vigas apresentem comportamento inicial semelhante, com trechos lineares até a formação da primeira fissura diagonal, o desempenho pós-fissuração varia entre os diferentes tipos e teores de fibras. As vigas de referência demonstraram respostas contrastantes, evidenciando a variabilidade natural do concreto sem reforço transversal. As vigas reforçadas com fibras de aço exibiram, em sua maioria, ganhos expressivos de capacidade resistente após a fissuração e maior tenacidade, sobretudo para o teor de 1,0%, destacando-se como o grupo de melhor desempenho pós-fissuração. Em contraste, as vigas reforçadas com macrofibras poliméricas apresentaram comportamento pós-fissuração mais limitado, caracterizado por quedas abruptas de carga e patamares estáveis, mesmo com teores elevados de fibras. No conjunto, os dados indicam que a contribuição das fibras de aço para o ganho de resistência pós-fissuração e aumento da tenacidade é superior à das macrofibras poliméricas, especialmente em concretos de alta resistência, enquanto a variabilidade entre amostras reforça a influência das variáveis no comportamento estrutural das vigas.

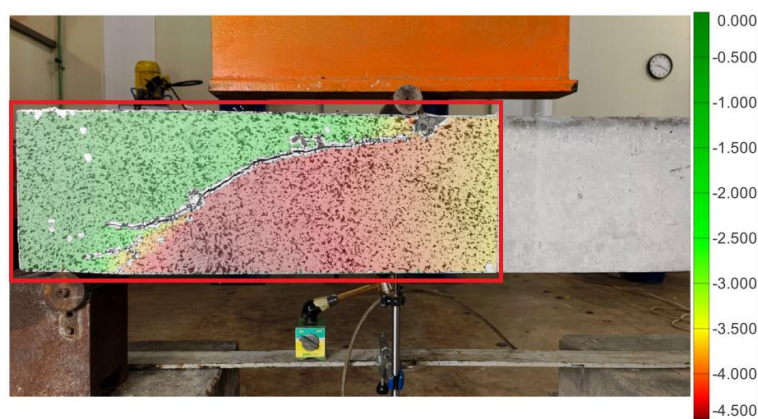
Na Figura 65, estão apresentadas as curvas força versus deformação específica da armadura, onde é possível verificar que em nenhuma das vigas ensaiadas ocorreu o escoamento da armadura longitudinal uma vez que os valores de deformação específica observados foram inferiores à deformação de escoamento do aço CA-50, cujo valor de referência é 2,07‰.

Figura 65. Força x Deformação específica da armadura longitudinal: (a) C90-R, (b) C90-A-0,5, (c) C90-A-1,0, (d) C90-P-0,5, (e) C90-P-1,0, (f) C55-P-1,0 e (g) C70-P-1,0



Os ensaios de flexão em três pontos realizados nas vigas de concreto reforçado com fibras tiveram como objetivo, além da verificação da força máxima suportada e do deslocamento correspondente, analisar a formação das fissuras de cisalhamento nas regiões críticas das peças. Para uma investigação mais aprofundada do processo de fissuração, a técnica de CID também foi utilizada para obter mapeamento do campo de deslocamento na direção vertical, por meio do software GOM Correlate. A partir das imagens capturadas durante os ensaios, foi possível gerar representações gráficas em escala de cores que possibilitam a verificação do padrão de fissuração das vigas e a tendência de deslocamento relativo entre as partes das vigas separadas pela fissura crítica, conforme ilustrado na Figura 66.

Figura 66. Campo de deslocamento das vigas



Para todas as vigas, as imagens analisadas foram selecionadas em dois momentos distintos: (A) no início da formação da fissura diagonal de cisalhamento e (B) na condição de carga máxima após a ocorrência da fissuração (conforme pontos destacados na Figura 64). Essas imagens estão apresentadas nas Figura 67 a Figura 73, onde foram destacadas as regiões de interesse (demarcadas em vermelho na Figura 66), para se obter uma melhor condição de visualização. As escalas referentes ao ponto A estão indicadas à esquerda e referentes ao ponto B estão indicadas à direita nas figuras. Observa-se que, em todas as vigas ensaiadas, a formação inicial da fissura diagonal ocorreu para deslocamentos verticais variando entre 1,5 mm e 2,0 mm, com exceção da viga C90-A-1,0-1, na qual a fissuração foi registrada a um deslocamento de 2,5 mm. Além disso, verificou-se que, em todas as vigas, a fissura diagonal se desenvolve conectando a região do apoio ao ponto de aplicação da carga, e que o aumento da carga aplicada resulta no aumento progressivo da abertura dessa fissura. O deslocamento correspondente ao ponto B (carga máxima) apresentou variação entre as vigas analisadas, alcançando valores de até 4,0 mm.

Figura 67. Formação da fissura diagonal - Vigas C90-R

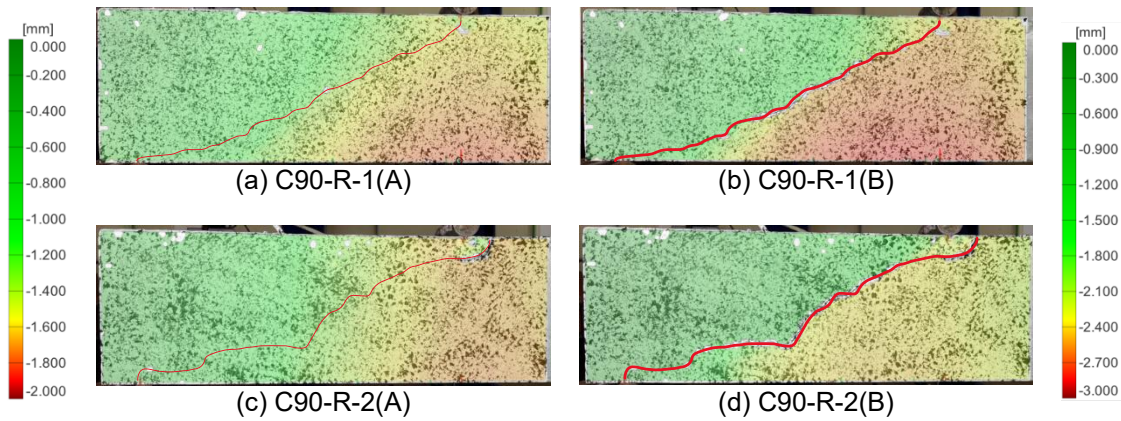


Figura 68. Formação da fissura diagonal - Vigas C90-A-0,5

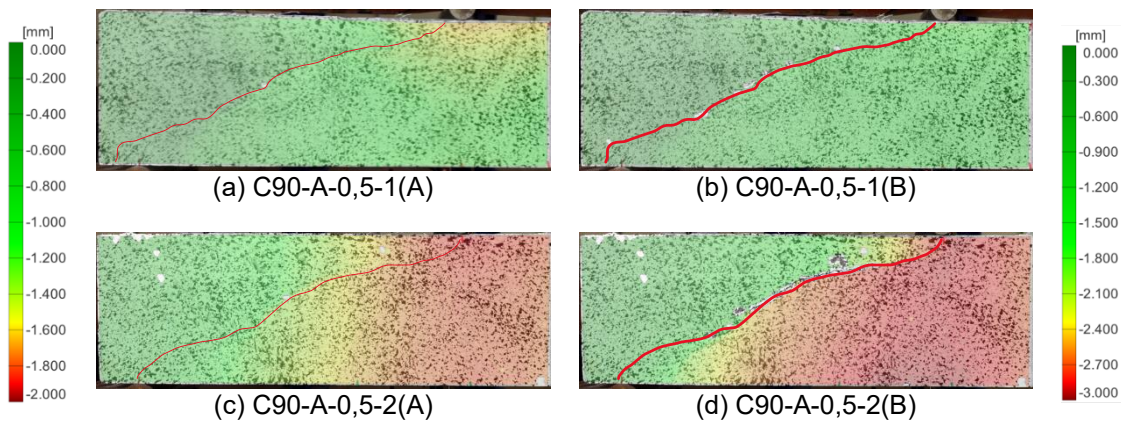
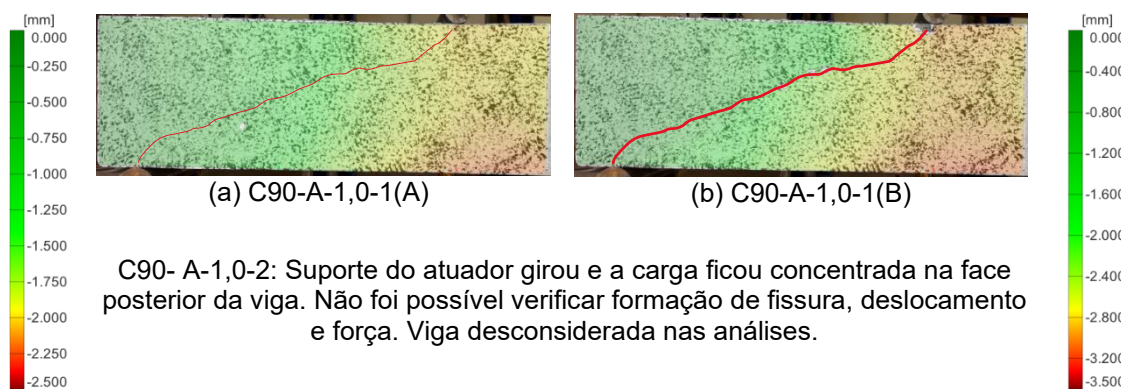


Figura 69. Formação da fissura diagonal - Vigas C90-A-1,0



C90- A-1,0-2: Suporte do atuador girou e a carga ficou concentrada na face posterior da viga. Não foi possível verificar formação de fissura, deslocamento e força. Viga desconsiderada nas análises.

Figura 70. Formação da fissura diagonal - Vigas C90-P-0,5

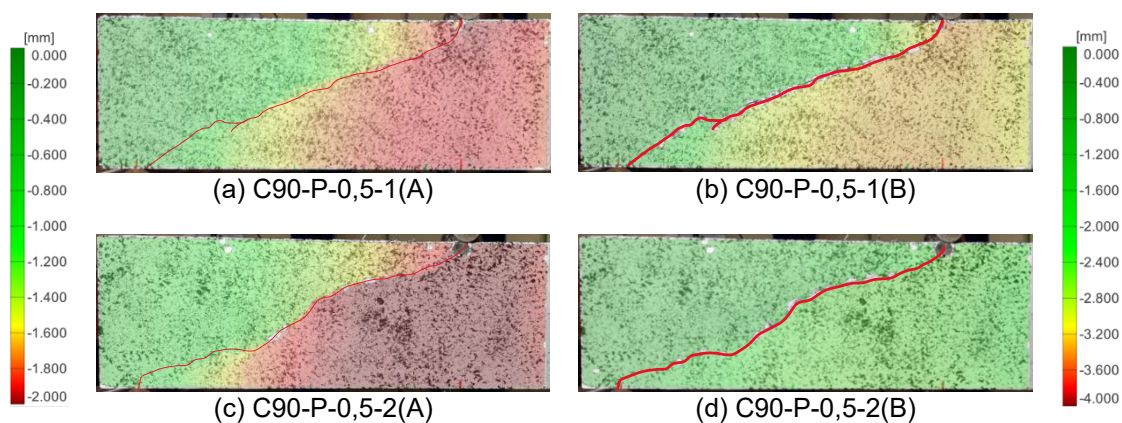


Figura 71. Formação da fissura diagonal - Vigas C90-P-1,0

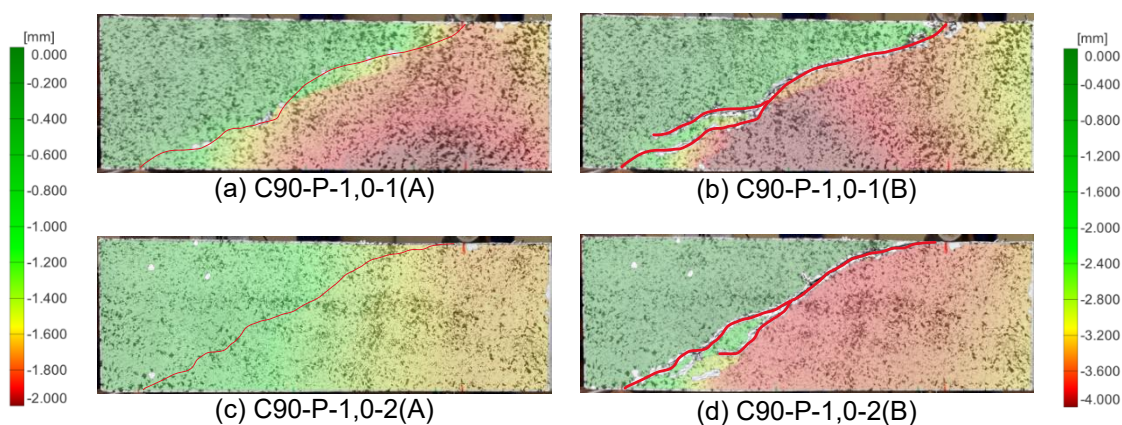


Figura 72. Formação da fissura diagonal - Vigas C55-P-1,0

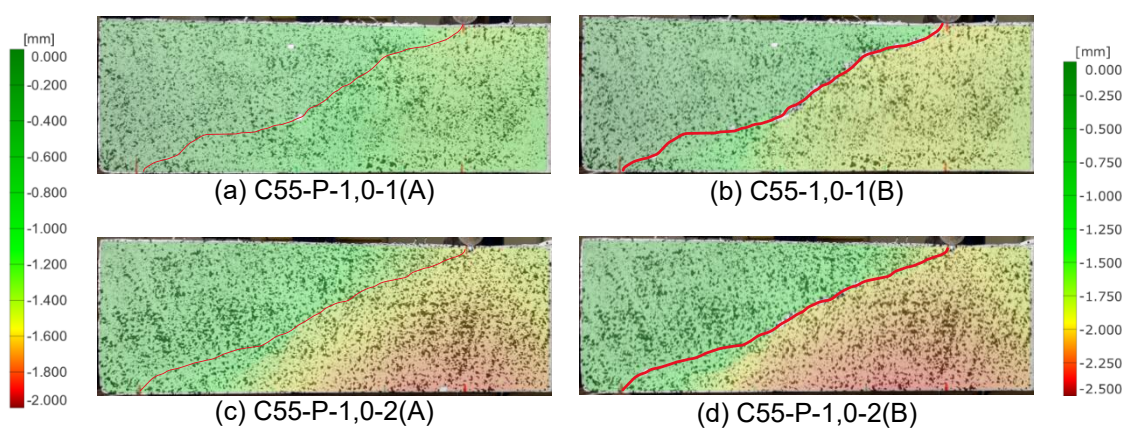
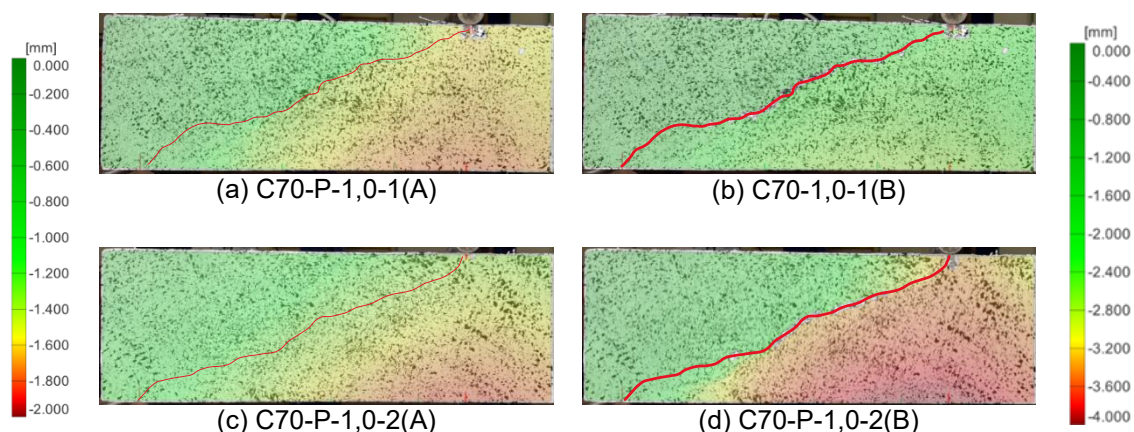
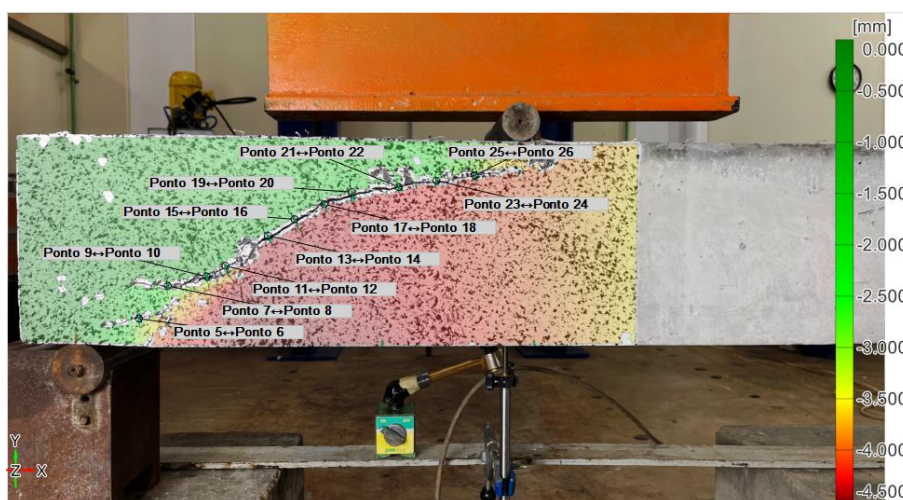


Figura 73. Formação da fissura diagonal - Vigas C70-P-1,0



Também por meio da CID, foram analisadas abertura da fissura diagonal de cisalhamento nas vigas. Foram definidos ao longo da fissura pelo menos 10 pontos para medição da abertura, conforme mostrado na Figura 74. Para construção da curva força versus abertura de fissura foi considerado o ponto com maior abertura. Na Figura 75 estão apresentadas as curvas força x abertura de fissura e na Figura 76 as curvas deslocamento vertical x abertura de fissura, para todas as vigas analisadas.

Figura 74. Leitura de abertura de fissura por meio da técnica de correlação de imagem digital (CID)



Com base nas curvas força $\times$ abertura de fissura apresentadas na Figura 75, é possível identificar diferentes comportamentos entre os grupos de vigas no que diz respeito à evolução das fissuras após o pico de carga. A análise demonstra que o tipo de fibra incorporada ao concreto exerce um papel importante na resposta pós-fissuração.

As vigas reforçadas com fibras de aço (C90-A-0,5 e C90-A-1,0), tanto em teores de 0,5% quanto de 1,0%, demonstraram claramente a capacidade da fibra em atuar no controle

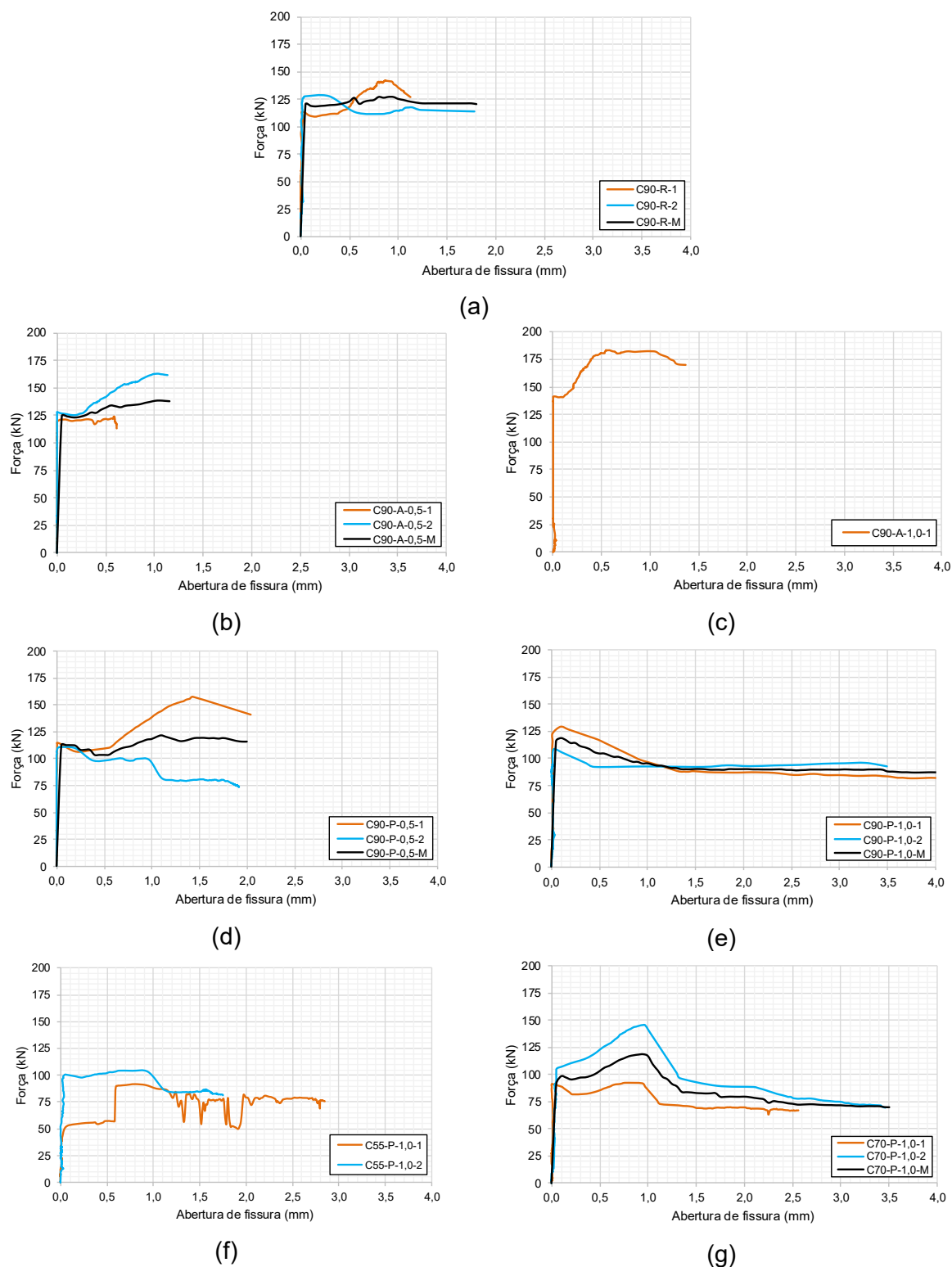
e propagação da fissura, conferindo à viga maior capacidade resistente ao cisalhamento, com expressivo ganho de resistência após a fissuração.

Em contraste, os grupos com macrofibras poliméricas (C90-P-0,5 e C90-P-1,0) apresentaram redução progressiva de carga após o pico, indicando menor eficácia na contenção da abertura da fissura. Além disso, nota-se que o aumento do teor de macrofibras poliméricas de 0,5% para 1,0% não resultou em melhora significativa na resposta pós-fissuração, sugerindo limitação na atuação desse tipo de fibra frente ao avanço das fissuras.

Além disso, mesmo com a elevação da resistência da matriz cimentícia (C55, C70 e C90), observou-se que a contribuição das macrofibras poliméricas para a tenacidade foi restrita, pois as curvas pós-pico continuaram a apresentar queda acentuada, ainda que com cargas máximas superiores. Esses resultados indicam que, para o controle efetivo da abertura de fissura e melhoria da resposta pós-fissuração, as fibras de aço apresentam desempenho superior, favorecendo a integridade estrutural dos elementos mesmo após a ocorrência de fissuração significativa.

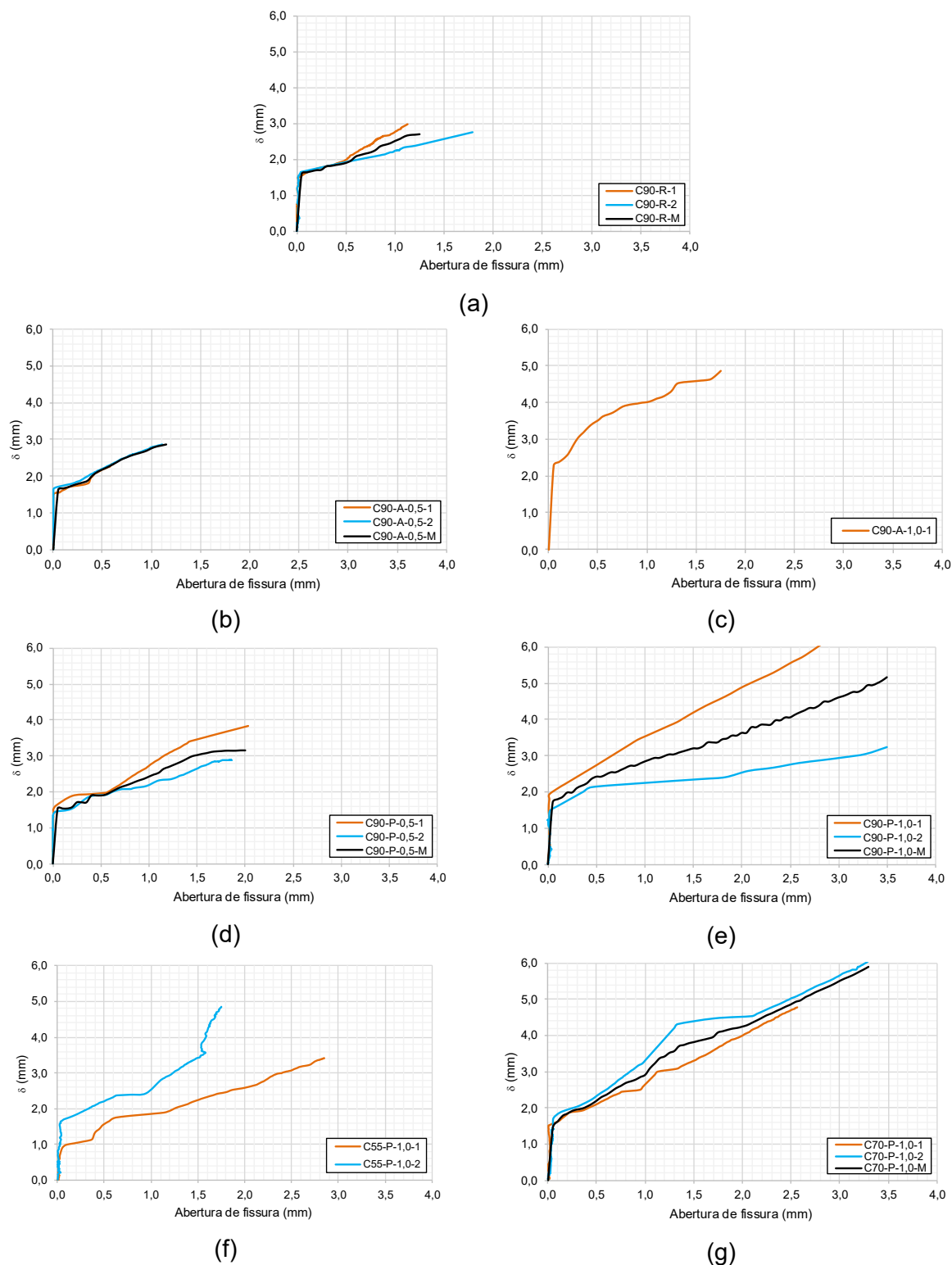
Em síntese, as fibras de aço, especialmente em teores mais elevados, mostraram-se mais eficazes na contenção da fissura e no aumento da tenacidade do concreto. Já as macrofibras poliméricas apresentaram desempenho mais variável, com limitações na capacidade de contenção da fissura, particularmente para o concreto C90. Esses resultados reforçam a importância de uma adequada escolha do tipo de fibra e controle de sua dispersão para garantir o desempenho esperado das estruturas de concreto reforçado com fibras.

Figura 75. Força x Abertura de fissura: (a) C90-R, (b) C90-A-0,5, (c) C90-A-1,0, (d) C90-P-0,5, (e) C90-P-1,0, (f) C55-P-1,0 e (g) C70-P-1,0



A análise da Figura 76 permite verificar que, após a formação da fissura, a relação entre a abertura da fissura e o deslocamento vertical é aproximadamente linear para todas as vigas analisadas.

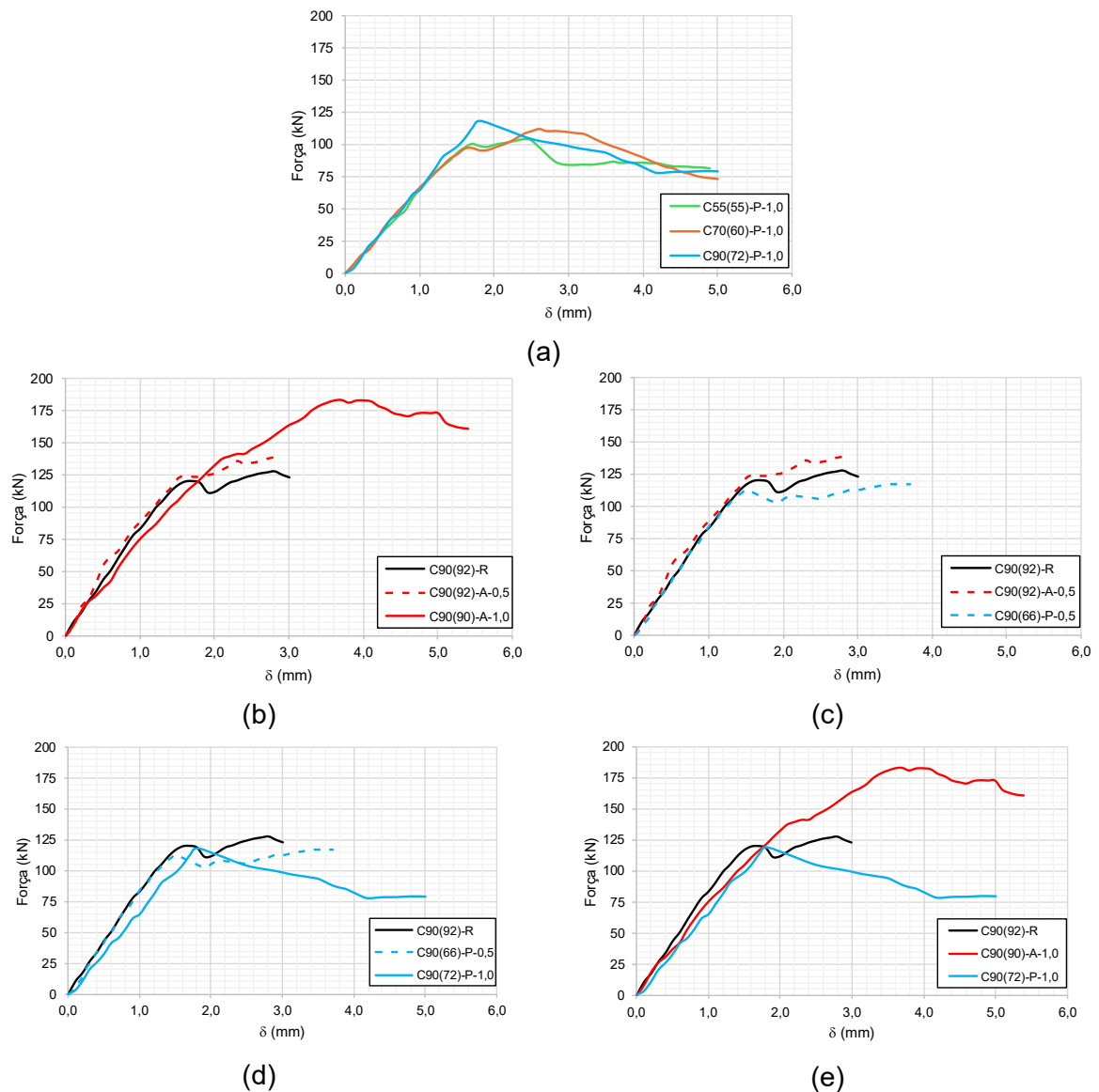
Figura 76. Deslocamento vertical x Abertura de fissura: (a) C90-R, (b) C90-A-0,5, (c) C90-A-1,0, (d) C90-P-0,5, (e) C90-P-1,0, (f) C55-P-1,0 e (g) C70-P-1,0



Na Figura 77 está apresentado um comparativo das curvas características (médias) para as vigas a fim de se analisar a influência da resistência à compressão do concreto, e do tipo e teor de fibras na capacidade resistente ao cisalhamento das vigas.

Figura 77. Comparativo das curvas Força x Deslocamento vertical das vigas

O valor entre parênteses na legenda das curvas corresponde à resistência média à compressão do concreto (f_{cm})



A fim de consolidar os principais resultados obtidos nos ensaios de flexão em vigas, a Tabela 22 apresenta os valores da força correspondente ao início da fissuração diagonal (F_{cr}), da força máxima atingida (F_{max}), bem como os respectivos deslocamentos verticais e a abertura máxima de fissura observada para cada viga ensaiada. Esses valores servem de base para as análises comparativas desenvolvidas na sequência, permitindo avaliar quantitativamente a influência da resistência à compressão, do tipo e do teor de fibras no comportamento ao cisalhamento das vigas.

Tabela 22. Resultados dos ensaios em vigas

Traço	Viga	F_{cr} (kN)	δ_{cr} (mm)	F_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	Abertura da fissura (mm)
C90-R	1	113,43	1,48	142,29	2,62	0,86
	2	127,43	1,80	117,27	2,36	1,15
	Média	120,43	1,64	127,90	2,80	-
C90-A-0,5	1	121,12	1,60	123,84	2,30	0,59
	2	128,40	1,63	163,25	2,81	1,05
	Média	124,76	1,62	138,71	2,80	-
C90-A-1,0	1	141,64	2,26	183,75	3,62	0,55
	Média	141,64	2,26	183,75	3,62	-
C90-P-0,5	1	114,81	1,50	157,67	3,40	1,43
	2	110,56	1,45	100,22	2,04	0,67
	Média	112,69	1,48	116,85	3,40	-
C90-P-1,0	1	128,95	2,09	88,01	4,16	1,48
	2	108,38	1,50	95,56	3,04	3,27
	Média	118,67	1,79	112,99	2,10	-
C55-P-1,0	2	100,98	1,66	104,60	2,36	0,63
	Média	100,98	1,66	104,60	2,36	-
C70-P-1,0	1	91,06	1,52	92,05	2,45	0,76
	2	102,65	1,58	145,70	3,19	0,94
	Média	96,85	1,55	112,04	2,60	-

F_{cr} : força na formação da primeira fissura diagonal de cisalhamento

F_{max} : força máxima registrada no ensaio

δ_{cr} : deslocamento vertical correspondente à F_{cr}

δ_{max} : deslocamento vertical correspondente à F_{max}

Abertura de fissura: correspondente à F_{max}

Ao comparar as vigas de concreto reforçado com fibras com fibras de aço (CRFA) e as vigas de referência, observa-se um aumento expressivo na capacidade resistente com a adição de 1,0% de fibras de aço. Especificamente, a carga de fissuração aumentou 17,6%, enquanto a carga última apresentou um incremento de 43,7%.

Esse desempenho está associado à atuação combinada de diferentes mecanismos resistentes influenciados pela presença das fibras. Após a fissuração da matriz, as fibras atuam como ponte de transferência de tensões ao longo das fissuras, contribuindo para o controle da abertura e propagação das fissuras. Esse mecanismo favorece o engrenamento

entre as superfícies da fissura, resultando em maior resistência residual à tração e maior mobilização dos mecanismos resistentes ao cisalhamento. Dessa forma, o incremento observado na carga última não decorre apenas do aumento da tenacidade, mas da interação desses mecanismos ao longo do processo de abertura e propagação das fissuras.

Com a adição de 0,5% de fibras de aço, observou-se um incremento de 3,6% na carga de fissuração e 8,5% na carga última. Embora o aumento não seja tão acentuado quanto no caso de 1,0% de fibras, esses resultados ainda indicam a eficácia das fibras metálicas, mesmo em menor quantidade, no controle da abertura e propagação da fissura e no aumento da capacidade resistente ao cisalhamento.

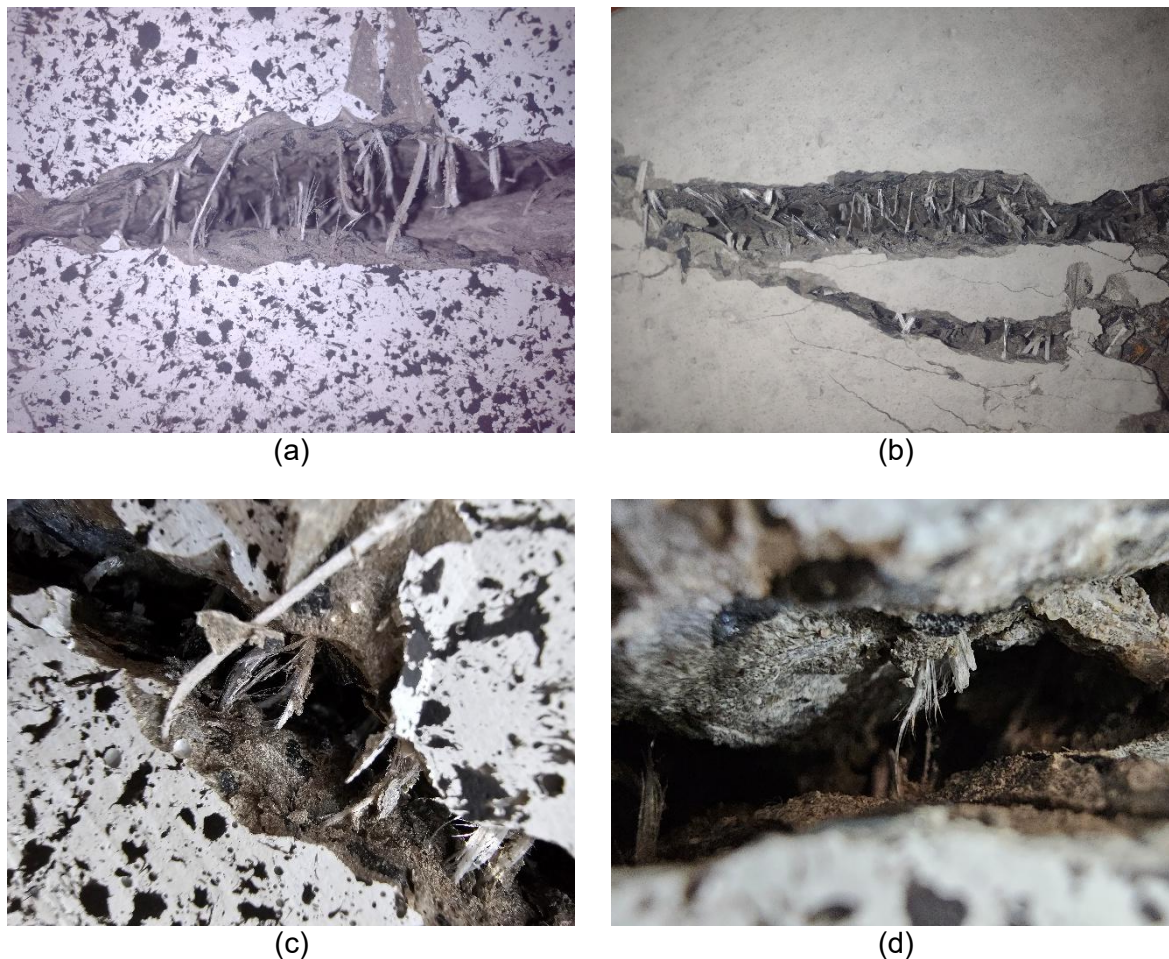
Por outro lado, as fibras poliméricas apresentaram resultados distintos. Para a adição de 0,5% de fibras poliméricas, foi observada uma redução de 6,4% na carga de fissuração e de 8,6% na carga última, enquanto a adição de 1,0% de fibras poliméricas resultou em uma redução de 1,5% na carga de fissuração e 11,7% na carga última.

Esses resultados sugerem que, nas condições experimentais analisadas, as fibras poliméricas não tiveram um efeito positivo significativo na capacidade resistente das vigas de CRFP em comparação às vigas de referência (sem fibras). Uma possível explicação para esse comportamento é que as fibras poliméricas podem reduzir a resistência à compressão do concreto, conforme observado nos resultados do controle de resistência à compressão dos concretos utilizados na produção das vigas. Isso ocorre porque a presença de fibras poliméricas e a utilização de quantidades elevadas de aditivos para os concretos de alta resistência podem alterar a microestrutura do concreto, resultando em um aumento da porosidade e comprometendo a resistência do material.

Além disso, em concretos de alta resistência, a liberação de energia associada à fissuração da matriz é significativa. Quando as fibras não estão presentes em quantidade suficiente para absorver essa energia, elas se rompem antes de dissipá-la de forma eficaz, o que impede um ganho maior no desempenho das vigas. A interação fibra-matriz também tende a ser aprimorada em concretos de alta resistência, favorecendo a ancoragem das fibras dentro da matriz, o que resulta em menores deformações e um controle mais eficiente da propagação das fissuras. No entanto, esse benefício só ocorre quando as fibras estão em quantidade adequada e possuem capacidade resistente suficiente para absorver a energia liberada na fissuração da matriz.

Na Figura 78 estão apresentadas imagens da fissura de cisalhamento da viga C70-P-1,0-2. Para esta viga, após o fim do ensaio e retirada da instrumentação, foi retomada a aplicação de carga, levando a viga próxima de sua ruptura total, a fim de aumentar a abertura da fissura e possibilitar a captura das imagens. É possível observar as fibras “costurando” a fissura (Figura 78(a) e (b)) e o destaque para as fibras que se romperam (Figura 78(c) e (d)).

Figura 78. Detalhe das fibras na fissura da viga C70-P-1,0-2



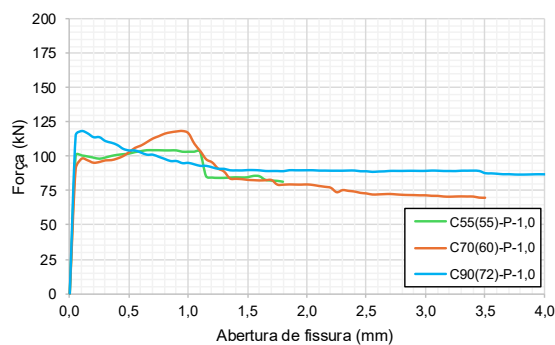
A variação da resistência à compressão do concreto demonstrou influência direta no desempenho das vigas reforçadas com fibras. Quando a resistência foi elevada de C55 para C70, observou-se uma redução de 4,1% na carga de fissuração e um aumento de 7,1% na carga última, resultado atribuído ao melhor comportamento do concreto em regime pós-fissuração, no qual a matriz mais resistente contribui para maior capacidade de transferência de esforços cortantes. Ao elevar a resistência de C55 para C90, verificaram-se aumentos de 17,5% na carga de fissuração e de 8% na carga última. Esse comportamento está alinhado com a literatura, que aponta que o aumento da resistência da matriz potencializa os principais mecanismos resistentes ao cisalhamento, tais como a contribuição do concreto não fissurado, a rigidez e a altura da zona comprimida, a resistência à tração da matriz e o intertravamento dos agregados (MACGREGOR; WIGHT, 2012; LANTSOGHT, 2019). A resistência à tração tem papel essencial na formação da fissura inclinada, pois controla a capacidade do concreto de suportar as tensões principais de tração; como a resistência à tração cresce proporcionalmente com a resistência à compressão, o aumento desta última resulta em maior carga de fissuração (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Além disso, a maior coesão da matriz

favorece o intertravamento dos agregados ao longo da fissura diagonal, mecanismo responsável por parcela significativa da transferência de cisalhamento (MACGREGOR; WIGHT, 2012). Dessa forma, o aumento da resistência à compressão fortalece simultaneamente os mecanismos complementares de resistência ao cisalhamento, resultando em uma elevação global da capacidade resistente das vigas.

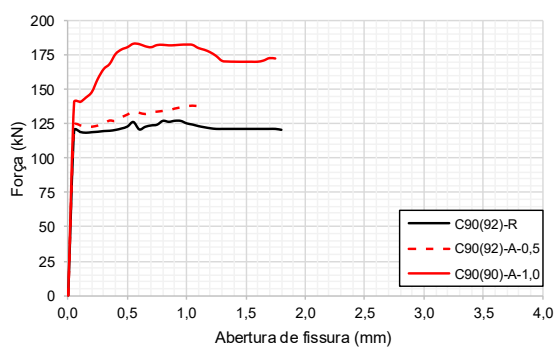
Embora as vigas reforçadas com macrofibras poliméricas apresentem uma capacidade resistente inferior às vigas reforçadas com fibras de aço, elas demonstraram maior deslocamento e abertura de fissuras (Figura 79 e Figura 80). Esse comportamento pode ser explicado pelas diferenças nas propriedades mecânicas dos dois tipos de fibras. As fibras de aço, com maior resistência e módulo de elasticidade, conferem maior rigidez às vigas, o que resulta em uma capacidade de suporte de carga superior, porém com menor deformabilidade. Em contrapartida, as fibras poliméricas possuem um módulo de elasticidade menor, o que favorece um maior deslocamento sob a ação do carregamento. Como resultado, as vigas reforçadas com fibras poliméricas apresentaram deslocamentos verticais e aberturas de fissuras superiores às das vigas reforçadas com fibras de aço, evidenciando uma maior capacidade de deslocamento e absorção de energia após a fissuração. Esse comportamento não só reflete a flexibilidade das fibras poliméricas, que contribuem para a dissipação de energia, mas também demonstra sua capacidade em alterar o modo de ruptura das vigas, de um comportamento frágil para um mais dúctil, comportamento desejável para esse elemento estrutural, principalmente no que diz respeito à ruptura por cisalhamento.

Figura 79. Comparativo das curvas Força x Abertura de fissura das vigas

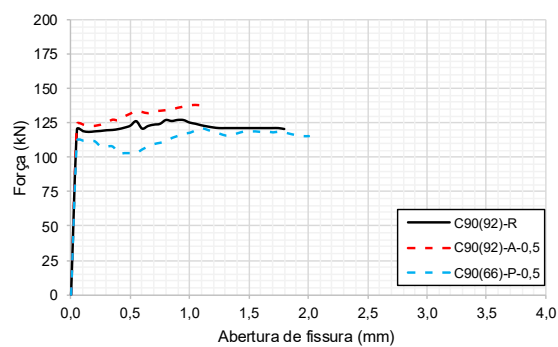
O valor entre parênteses na legenda das curvas corresponde à resistência média à compressão do concreto (f_{cm})



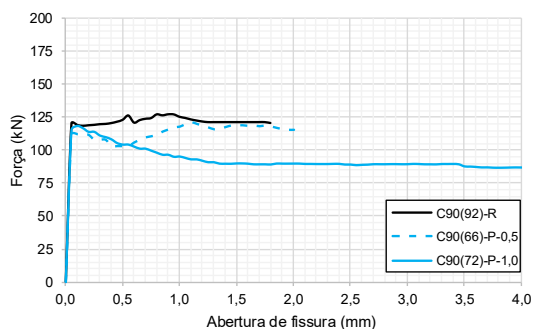
(a)



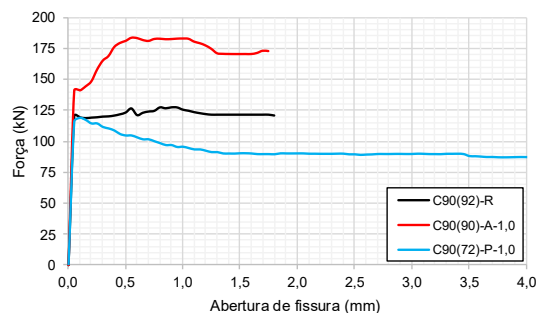
(b)



(c)

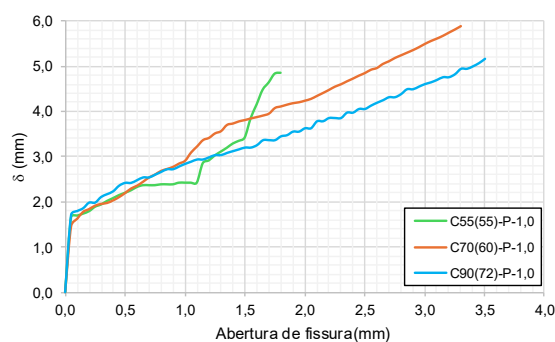


(d)

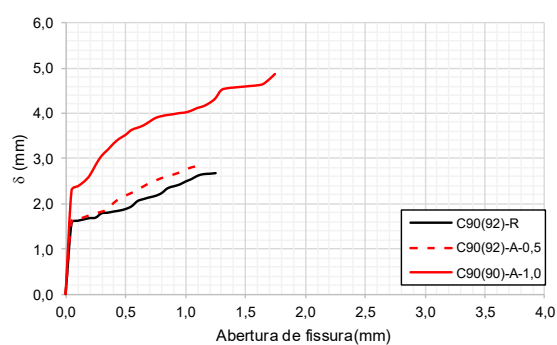


(e)

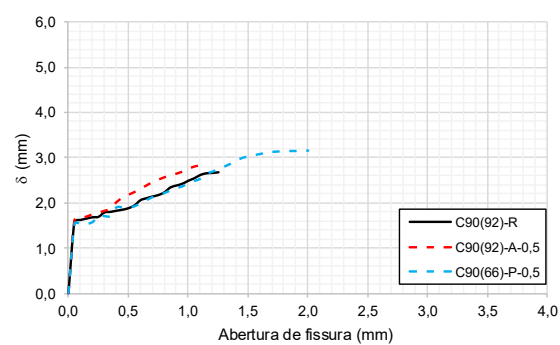
Figura 80. Comparativo das curvas Deslocamento x Abertura de fissura das vigas
O valor entre parênteses na legenda das curvas corresponde à resistência média à compressão do concreto (f_{cm})



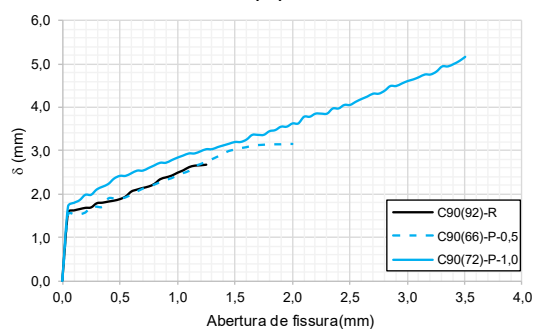
(a)



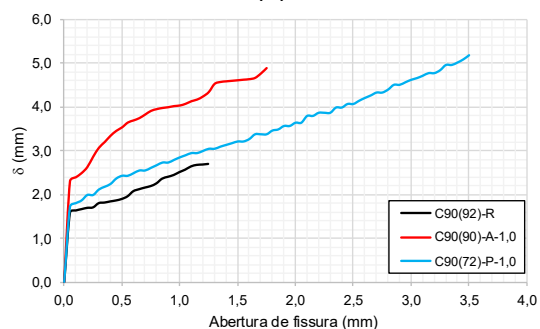
(b)



(c)



(d)



(e)

7. EQUAÇÕES DE PREVISÃO DE CAPACIDADE RESISTENTE AO CISALHAMENTO

Neste capítulo são avaliadas diferentes equações para previsão da capacidade resistente ao cisalhamento de concretos reforçados com fibras, abrangendo tanto modelos teóricos quanto formulações normativas. Inicialmente, são verificadas equações de previsão da resistência ao cisalhamento direto a partir dos resultados experimentais obtidos nesta pesquisa. Em seguida, são analisadas as formulações das normas ABNT NBR 16935 (2021), *fib* Model Code 2020 e Eurocode 2-2020 (2023) para elementos sem armadura transversal, comparando-se suas estimativas com os valores experimentais das vigas ensaiadas. Por fim, é apresentada a calibração de um modelo alternativo para a ABNT NBR 16935, fundamentado no EC2-2020 e ajustado aos resultados experimentais, visando aprimorar a precisão das previsões normativas para elementos de CRF sem estribos.

7.1 VERIFICAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO

Na literatura são encontrados diversos modelos propostos para a previsão da tensão máxima resistente ao cisalhamento direto do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA).

Soetens e Matthys (2017) fazem distinção entre dois conceitos de modelagem para prever a resistência ao cisalhamento: modelos de capacidade máxima e modelos de comportamento de atrito-cisalhamento. A maioria dos estudos usa o primeiro, concentrando-se na tensão máxima de cisalhamento como uma função da resistência à compressão do concreto e do teor e fator de forma da fibra (BOULEKBACHE *et al.*, 2012; GAO *et al.*, 2017; MOGHADAM; IZADIFARD, 2019; CARRILO *et al.*, 2024). Os modelos de comportamento de atrito-cisalhamento, por outro lado, visam descrever o comportamento geral de cisalhamento, considerando o efeito das fibras como pontes de transferência de tensões e sua influência sobre os mecanismos de intertravamento de agregados e o arrancamento de fibras (SOETENS; MATTHYS, 2017; RESENDE *et al.*, 2021; GUO *et al.*, 2025).

Considerando, a princípio, a primeira abordagem, foi realizada a verificação da aplicação de modelos de capacidade máxima para os diferentes tipos de fibras e métodos de ensaio. Quatro trabalhos de referência foram selecionados para análise com base na

similaridade das variáveis examinadas. Esses estudos investigaram concretos com resistências à compressão variando de 25 a 80 MPa, reforçados com fibras de aço em teores entre 0 e 2%, e testados pelo método JSCE-SF6. Os estudos selecionados incluem os de Boulekbache *et al.* (2012), Gao *et al.* (2017), Moghadam e Izadifard (2019) e Carrillo *et al.* (2024).

Os autores desses trabalhos propõem o cálculo da tensão máxima resistente ao cisalhamento como a soma de duas componentes: a resistência da matriz de concreto (τ_{cr}) e a contribuição das fibras (τ_f), conforme a Eq. 7.1. A tensão máxima de cisalhamento obtida experimentalmente foi comparada com o resultado da tensão calculada a partir das equações propostas pelos autores mencionados (Tabela 23). A análise foi realizada separadamente para os resultados obtidos com o ensaio segundo o método da JSCE-SF6 e do tipo *Push-off*, dado que foi observada uma grande diferença nos resultados da tensão máxima obtidas pelos dois métodos, não sendo, portanto, aplicável a comparação dos resultados. Além disso, com exceção de Carrillo *et al.* (2024), que utilizou resultados obtidos com os métodos da *tip* e tipo *Push-off*, os demais autores desenvolveram seus modelos com base nos resultados obtidos conforme o método da JSCE-SF6. A análise também foi conduzida separadamente para o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) e para o concreto reforçado com macrofibras poliméricas (CRFP), considerando que as diferentes propriedades das fibras, como resistência à tração, módulo de elasticidade, comprimento e diâmetro, influenciam a resistência ao cisalhamento. Portanto, é necessário estudar coeficientes distintos para cada tipo de fibra nas equações.

$$\tau_{max} = \tau_{cr} + \tau_f \quad \text{Eq. 7.1}$$

Tabela 23. Equações para previsão da resistência ao cisalhamento direto

Autor	Equação
Boulekbache <i>et al.</i> (2012)	$\tau_{max} = 0,72 \cdot f_c^{0,8} + 0,08 \cdot V_f \cdot (l_f/d_f)$
Gao <i>et al.</i> (2017)	$\tau_{max} = 0,8 \cdot f_{cu}^{0,55} \cdot (1 + 1,3 \cdot (V_f \cdot (l_f/d_f)))$
Moghadam and Izadifard (2019)	$\tau_{max} = 0,435 \cdot f_c^{0,807} + 2,45 \cdot V_f$
Carrillo <i>et al.</i> (2024)	$\tau_{max} = 0,59 \cdot \sqrt{f_c} \cdot (1 + 0,015 \cdot V_f \cdot (l_f/d_f))$

Sendo:

f_c : resistência à compressão (corpo de prova cilíndrico) (MPa)

f_{cu} : resistência à compressão (corpo de prova cúbico) (MPa)

V_f : volume de fibras

l_f/d_f : fator de forma da fibra (relação entre comprimento e diâmetro)

Os resultados da aplicação das formulações propostas na literatura podem ser observados na Figura 81, que mostram a relação entre a tensão máxima de cisalhamento calculada com as equações propostas ($\tau_{\max,cal}$) e a tensão máxima de cisalhamento obtida experimentalmente ($\tau_{\max,exp}$). Na Figura 81(a), é possível notar que as equações propostas por Gao *et al.* (2017) e Moghadam e Izadifard (2019) apresentaram melhor concordância com os resultados obtidos para o CRFA neste estudo, com a relação entre as tensões próxima de 1 e uma variação reduzida. Por outro lado, o modelo proposto por Boulekbache *et al.* (2012) superestimou a tensão resistente, com a relação entre as tensões superior a 1,5, enquanto o modelo de Carrillo *et al.* (2024) subestimou a tensão resistente, com a relação entre as tensões próxima de 0,5.

Para o concreto reforçado com fibras poliméricas (CRFP) (Figura 81(b)), no entanto, nenhum dos modelos se mostrou adequado para representar bem os resultados experimentais. O modelo de Boulekbache *et al.* (2012) obteve uma relação entre as tensões próxima de 2, enquanto os modelos de Gao *et al.* (2017) e Moghadam e Izadifard (2019) apresentaram uma relação entre as tensões de cerca de 1,5. O modelo de Carrillo *et al.* (2024) subestimou a tensão máxima resistente, com a relação entre as tensões próxima de 0,5.

Quando os valores obtidos com as equações dos modelos da Tabela 23 são comparados aos resultados obtidos nos ensaios do tipo *Push-off* as variações são ainda maiores e nenhum dos modelos representa bem os resultados experimentais obtidos neste estudo para o ensaio do tipo *Push-off*, tanto para os concretos reforçados com fibras de aço (Figura 82(a)) e quanto para os concretos reforçados com macrofibras poliméricas (Figura 82(b)).

Esses resultados reforçam a necessidade de adaptar os modelos, levando em consideração variáveis específicas para os diferentes tipos de fibras utilizadas e para os diferentes métodos de ensaio.

Figura 81. Avaliação das equações propostas na literatura para tensão máxima de cisalhamento (JSCE-SF6): (a) CRFA e (b) CRFP

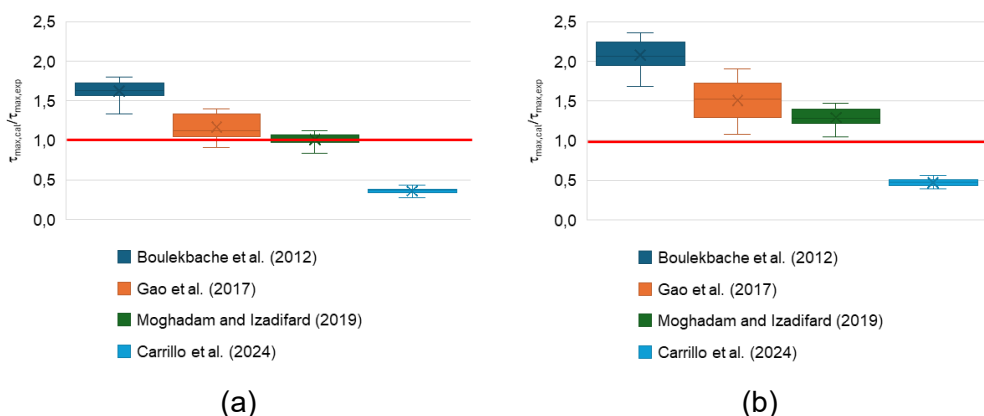
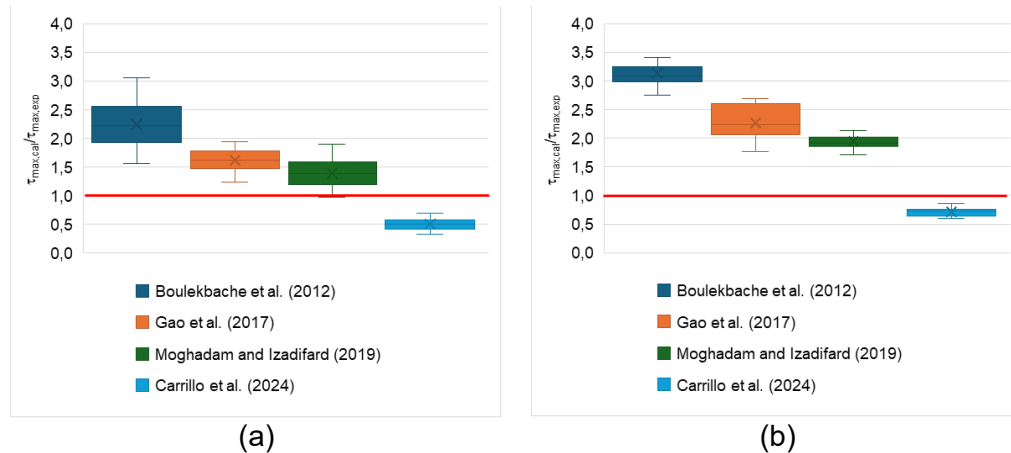


Figura 82. Avaliação das equações propostas na literatura para tensão máxima de cisalhamento (*Push-off*): (a) CRFA e (b) CRFP

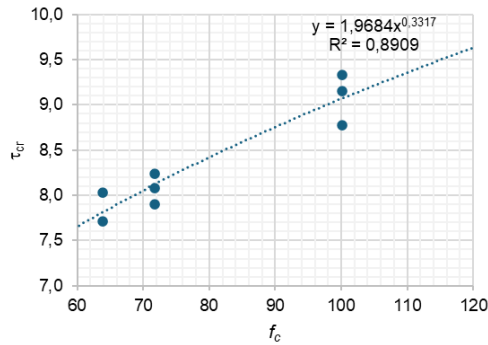


7.1.1 Proposta de modelo de previsão de tensão máxima resistente ao cisalhamento

A equação de previsão proposta por Gao *et al.* (2017) e Moghadam e Izadifard (2019) foram os modelos que apresentaram melhor concordância com os resultados deste estudo. Nos ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento direto realizados por Moghadam e Izadifard (2019) foram adotadas travas nas extremidades dos corpos de prova para impedir a rotação e garantir que apenas o cisalhamento ocorresse sem efeitos de flexão. Gao *et al.* (2017), ao contrário, não utilizaram as travas. Por isso, o modelo para previsão da tensão resistente ao cisalhamento proposto a seguir utilizou como referência o modelo de Gao *et al.* (2017), uma vez que o método de ensaio empregado neste trabalho também não utilizou travas nas extremidades do corpo de prova. A princípio, foram considerados apenas os resultados obtidos nos ensaios realizados segundo o método modificado da norma JSCE-SF6, mesmo procedimento utilizados pelos autores considerados.

Uma equação potência empírica (Eq. 7.2) para cálculo da tensão de cisalhamento referente à resistência da matriz concreto (τ_{cr}) foi determinada para o concreto de referência (sem fibras) por meio de uma análise de regressão, que relaciona a tensão máxima de cisalhamento com a resistência à compressão do corpo de prova (Figura 83). O coeficiente de determinação (R^2) desta relação é de 0,89 o que indica que há uma boa correlação entre a resistência à compressão e a resistência ao cisalhamento do concreto. Esta abordagem assume que a fissuração do corpo de prova depende potencialmente das características da matriz de concreto, permitindo que a tensão de fissuração seja determinada com base nas propriedades do concreto sem fibras.

Figura 83. Correlação entre tensão máxima de cisalhamento e resistência à compressão do concreto sem fibras



$$\tau_{cr} = 1,968 \cdot f_c^{0,332}$$

Eq. 7.2

A segunda parcela da equação, que considera a contribuição das fibras (τ_f), leva em consideração a quantidade de fibras (dosagem) e o fator de forma (relação entre comprimento e diâmetro das fibras), os quais influenciam a capacidade resistente ao cisalhamento do concreto reforçado com fibras. Esta parcela foi determinada por meio de análise de regressão linear, com base na relação entre a tensão máxima de cisalhamento do CRF (τ_{max}) e a tensão de cisalhamento do concreto de referência ($\tau_{cr,CR}$), em função de um índice de reforço (λ_f). Este índice de reforço, que relaciona o volume de fibras e o fator de forma, foi determinado por meio da Eq. 7.3 (BOULEKBACHE *et al.*, 2012; GAO *et al.*, 2017; CARRILLO *et al.*, 2024). Foram determinados diferentes coeficientes (k_f) para os concretos reforçados com fibras de aço (CRFA) e com fibras poliméricas (CRFP), conforme apresentado nas Figura 84(a) e Figura 84(b), respectivamente, levando em conta que as diferenças nas características de resistência à tração e módulo de elasticidade das fibras influenciam diretamente o desempenho do CRF. Os coeficientes k_f obtidos para cada um dos casos estão apresentados na Tabela 24.

$$\lambda_f = V_f \cdot (l_f/d_f)$$

Eq. 7.3

Figura 84. Contribuição das fibras na resistência ao cisalhamento: (a) CRFA e (b) CRFP

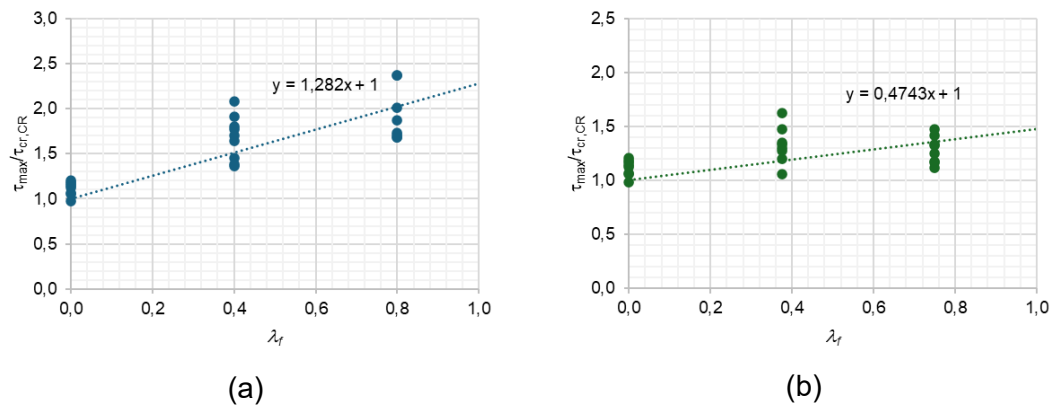


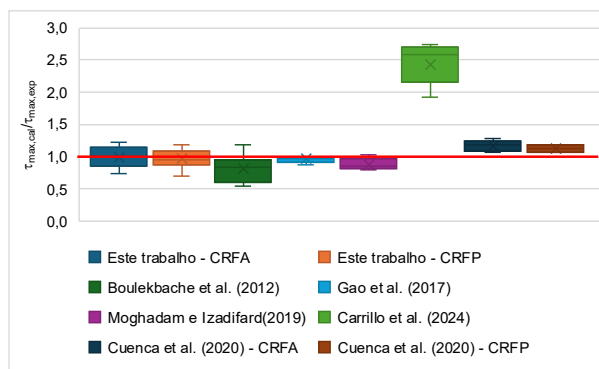
Tabela 24. Coeficiente k_f

Tipo de fibra	Coeficiente k_f
Aço com gancho na extremidade	1,282
Macrofibra polimérica monofilamento	0,474

Com base nessa metodologia, foi obtida a Eq. 7.4 para determinação da tensão máxima resistente ao cisalhamento direto do CRF. Na Figura 85 é possível verificar a relação entre a tensão calculada e a tensão experimental para os resultados desta pesquisa e para os resultados obtidos por Boulekbache *et al.* (2012), Gao *et al.* (2017), Moghadam e Izadifard (2019), Carrillo *et al.* (2024) e Cuenca *et al.* (2020). Observa-se uma boa correspondência entre a previsão empírica e os dados experimentais, com relação de valores próximos de 1 e coeficiente de variação de 16% e 14% para fibras de aço e macrofibras poliméricas, respectivamente. A única exceção foi para os dados de Carrillo *et al.* (2024), para os quais a equação superestimou os valores experimentais e não representou adequadamente os resultados.

$$\tau_{max} = \tau_{cr} \cdot (1 + k_f \cdot \lambda_f) \quad \text{Eq. 7.4}$$

Figura 85. Avaliação da equação proposta para os resultados da literatura (ensaio JSCE-SF6)



Quando os valores calculados com as equações 7.2, 7.3 e 7.4, são comparados com os resultados experimentais obtidos nos ensaios do tipo *Push-off*, verifica-se que a relação entre a resistência calculada empiricamente e os resultados obtidos experimentalmente ficam em torno de 1,5, tanto para o CRFA quanto para o CRFP (Figura 86), indicando que as equações determinadas com base nos resultados dos ensaios segundo a JSCE-SF6 não podem ser aplicadas diretamente para ensaios do tipo *Push-off*.

Com o objetivo de ajustar a discrepância e correlacionar os resultados obtidos nos dois tipos de ensaios (JSCE-SF6 e *Push-off*), foi determinada por meio de análise de regressão linear a necessidade de um coeficiente de correção, denominado coeficiente β , cujo valor obtido foi 0,70 (Figura 87). Esse coeficiente atua como um fator de redução aplicado aos valores calculados, de forma a compatibilizar as equações derivadas dos resultados dos ensaios segundo a JSCE-SF6 com os resultados dos ensaios tipo *Push-off*.

Na Figura 86 estão apresentados também os valores corrigidos pela aplicação do coeficiente β , evidenciando que, após essa calibração, as resistências calculadas apresentam boa correlação com os resultados experimentais.

Figura 86. Avaliação da equação proposta considerando o coeficiente $\beta=0,70$ para os resultados obtidos no ensaio tipo *Push-off*

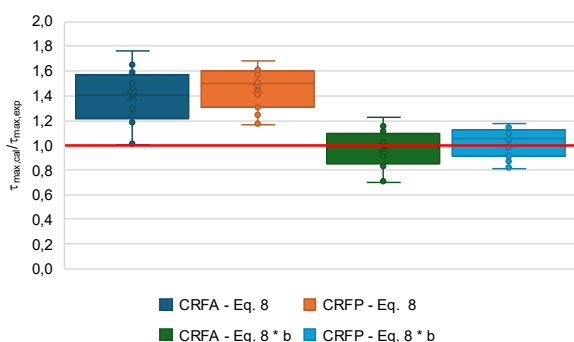
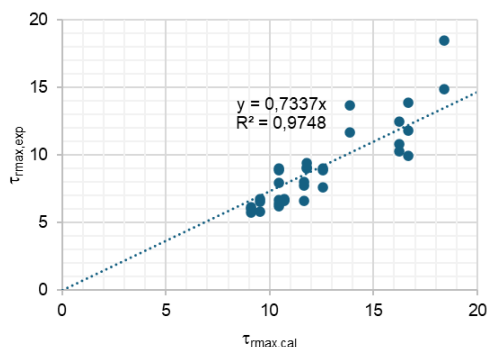
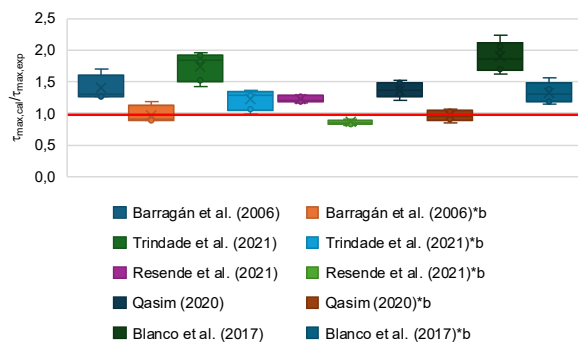


Figura 87. Correlação entre resultados empíricos e resultados experimentais no ensaio tipo *Push-off*



A fim de analisar a precisão do coeficiente β , foi verificado a relação entre as resistências calculadas empiricamente e a resistências obtidas experimentalmente considerando os resultados dos trabalhos de Barragán *et al.* (2006), Blanco *et al.* (2017), Trindade *et al.* (2021), Resende *et al.* (2021) e Qasim (2020). Os resultados estão apresentados na Figura 88 e verifica-se uma relação próxima de 1 quando se utiliza o coeficiente $\beta=0,70$ para os trabalhos de Barragán *et al.* (2006) e Qasim (2020). Para os trabalhos de Blanco *et al.* (2017) e Trindade *et al.* (2021), os resultados empíricos foram superestimados em relação aos resultados experimentais com coeficiente de relação de 1,2 e 1,3, respectivamente. E para os resultados obtidos por Resende *et al.* (2021), os resultados empíricos foram subestimados em relação aos resultados experimentais com coeficiente de relação de 0,86. Essa análise reforça a necessidade de padronização do ensaio em relação à dimensão do corpo de prova, presença de entalhe e tipo de reforço, para que seja possível alcançar coeficiente de correlação adequado entre os resultados.

Figura 88. Avaliação da equação proposta considerando o coeficiente $\beta=0,70$ para os resultados da literatura – ensaio tipo *Push-off*



7.2 VERIFICAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM VIGAS

Considerando os dados e resultados das vigas ensaiadas, foi realizada uma verificação das equações de previsão da capacidade resistente ao cisalhamento apresentadas nos códigos normativos ABNT NBR 16935 (2021), *fib* Model Code 2020 (2024) e Eurocode 2:2020 (2023), conforme apresentado no item 3.2.1.1. Cabe destacar que a formulação da ABNT NBR 16935 (2021) tem como base a versão anterior do *fib* Model Code (*fib*, 2013) e restringe sua aplicação a concretos pertencentes ao Grupo I, com classes de resistência à compressão entre C20 e C50.

Nesta pesquisa, entretanto, buscou-se avaliar o desempenho dessas equações quando aplicadas a concretos do Grupo II, com classe de resistência entre C55 e C90, ampliando o escopo originalmente previsto na norma. Para isso, além da ABNT NBR 16935, foram incluídas na análise comparativa as equações revisadas do *fib* Model Code 2020 (MC2020) e do Eurocode 2:2020 (EC2-2020), ambos publicados recentemente em 2023. Dessa forma, é possível avaliar não apenas o desempenho da norma brasileira frente aos resultados experimentais de vigas de concreto de alta resistência reforçado com fibras, mas também a evolução das recomendações internacionais atuais para esse tipo de material e aplicação estrutural.

Com o objetivo de ampliar a base experimental e conferir maior robustez à análise das equações normativas, os resultados obtidos nesta pesquisa foram combinados com dados provenientes do programa experimental conduzido por Cuenca (2012). Enquanto o presente estudo contempla resultados de 10 vigas ensaiadas, a incorporação dos dados de Cuenca (2012) permitiu aumentar o número de observações, possibilitando uma avaliação mais abrangente e estatisticamente representativa do desempenho das equações de previsão da resistência ao cisalhamento.

Para essa verificação, adotaram-se coeficientes de ponderação dos materiais iguais a 1,0, e as resistências dos materiais foram consideradas em seus valores médios. No caso da norma brasileira, a resistência à tração residual do CRF foi determinada com base no modelo rígido-plástico, conforme previsto na própria norma. A capacidade resistente obtida experimentalmente ($V_{u,exp}$) e os resultados obtidos por meio das equações normativas ($V_{u,cal}$) estão resumidos na Tabela 25.

Tabela 25. Verificação das equações de previsão de resistência ao cisalhamento segundo as normas NBR 16935, MC 2020 e EC2 2020

Viga		$V_{u,exp}$ (kN)	$V_{u,calc}$ (kN)			$V_{u,exp}/V_{u,calc}$		
			ABNT NBR 16935	MC 2020	EC2 2020	ABNT NBR 16935	MC 2020	EC2 2020
Esta pesquisa	C90-A-0,5-1	73,78	84,84	61,98	57,18	0,87	1,19	1,29
	C90-A-0,5-2	78,21	84,84	60,64	57,18	0,92	1,29	1,37
	C90-A-1,0-1	86,27	101,31	81,36	71,03	0,85	1,06	1,21
	C90-P-0,5-1	69,93	75,39	53,36	55,82	0,93	1,31	1,25
	C90-P-0,5-2	67,34	75,39	54,05	55,82	0,89	1,25	1,21
	C90-P-1,0-1	78,54	89,25	68,21	57,49	0,88	1,15	1,37
	C90-P-1,0-2	66,01	89,25	71,62	57,49	0,74	0,92	1,15
	C55-P-1,0-2	61,51	81,06	63,36	53,40	0,76	0,97	1,15
	C70-P-1,0-1	55,46	81,78	65,37	54,14	0,68	0,85	1,02
	C70-P-1,0-2	62,52	81,78	63,47	54,14	0,76	0,99	1,15
Cuenca (2012)	M-45/50BN	66,80	79,02	63,53	55,35	0,85	1,05	1,21
	M-65/40BN	74,80	84,77	67,00	56,61	0,88	1,12	1,32
	M-80/50BN	72,20	69,18	47,94	54,72	1,04	1,51	1,32
	M-80/30BP	92,70	88,94	75,80	74,47	1,04	1,22	1,24
	M-80/40BP	100,70	104,35	95,24	94,49	0,96	1,06	1,07
	H-45/50BN	68,90	96,27	83,93	66,55	0,72	0,82	1,04
	H-65/40BN	65,70	74,32	55,46	56,80	0,88	1,18	1,16
	H-80/50BN	62,90	78,66	60,82	56,98	0,80	1,03	1,10
	H-80/30BP	94,70	101,42	85,75	78,17	0,93	1,10	1,21
	H-80/40BP	111,60	113,32	103,56	104,41	0,98	1,08	1,07
Média						0,87	1,11	1,20
Desvio Padrão						0,10	0,16	0,10
Coeficiente de Variação (%)						12%	15%	9%

A Figura 89 apresenta os resultados da razão entre a resistência experimental ao cisalhamento ($V_{u,exp}$) e a resistência calculada ($V_{u,calc}$) em função da resistência à tração residual média (f_{R3m}), considerando o banco de dados unificado. Este parâmetro, obtido a partir dos ensaios de tração em flexão de corpos de prova entalhados, é adotado pelas três normas analisadas como referência para representar a contribuição das fibras ao cisalhamento. A aplicação das equações normativas revelou diferenças relevantes no desempenho preditivo entre os modelos considerados.

De modo geral, observa-se que a equação da ABNT NBR 16935 apresenta tendência à superestimação da resistência ao cisalhamento, resultando em valores de $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ menores que 1,0, o que caracteriza previsões contra a segurança. Por outro lado, as equações do EC2-2020 e do MC2020 tendem a subestimar a resistência, com valores de $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ maiores que 1,0, configurando estimativas mais conservadoras. Esse comportamento evidencia uma diferença sistemática entre a norma brasileira, fundamentada no *fib* Model Code 2010, e as formulações mais recentes, que incorporam avanços na modelagem da contribuição das fibras ao cisalhamento.

A Figura 90 apresenta a distribuição estatística da razão $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ para os três modelos normativos, considerando o conjunto total de dados. A avaliação estatística reforça as tendências previamente observadas e indica que a formulação da ABNT NBR 16935 apresenta comportamento não conservador quando aplicada a concretos de alta resistência reforçados com fibras. Esse resultado evidencia que a limitação atualmente imposta pela norma brasileira à aplicação em concretos do Grupo I constitui uma abordagem coerente e tecnicamente consistente com o seu domínio original de validade.

Nesse contexto, a eventual ampliação do campo de aplicação da ABNT NBR 16935 para concretos pertencentes ao Grupo II requer uma verificação criteriosa da equação de previsão da resistência ao cisalhamento, incluindo a reavaliação de seus coeficientes e dos parâmetros que representam a contribuição das fibras. Tal procedimento é essencial para assegurar níveis adequados de segurança e alinhamento com os avanços incorporados nas formulações normativas mais recentes.

Figura 89. Relação entre a resistência experimental e a calculada ($V_{u,exp}/V_{u,calc}$) em função da resistência à tração residual média (f_{R3m}), conforme os modelos normativos ABNT NBR 16935, Eurocode 2:2020 e *fib* Model Code 2020.

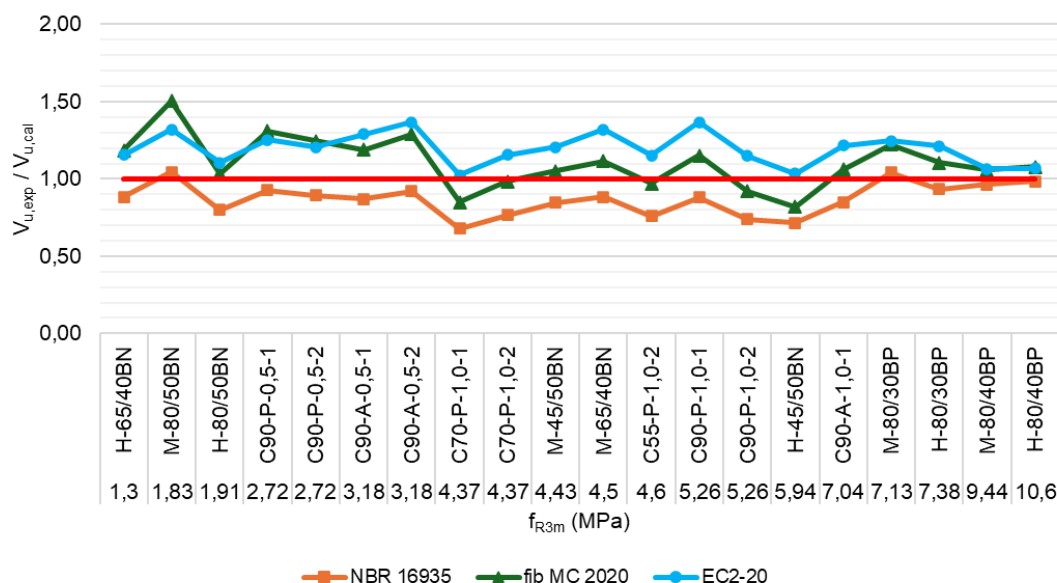
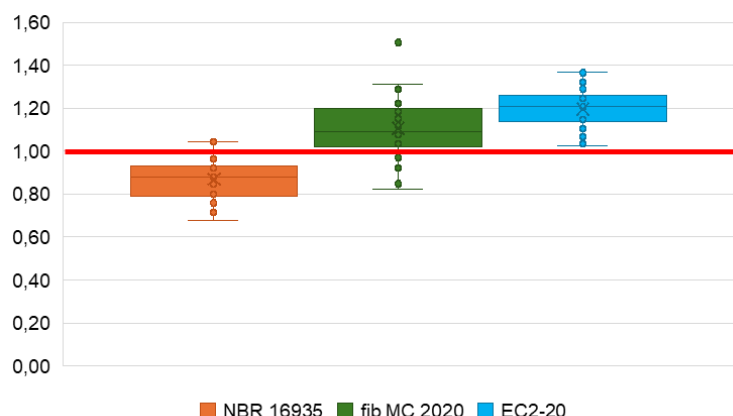


Figura 90. Distribuição estatística da razão $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ para os modelos normativos avaliados.



A distribuição estatística das razões $V_{u,exp}/V_{u,calc}$, apresentada na Tabela 26, foi verificada separadamente para vigas com fibras poliméricas e de aço, incluindo também os dados de Cuenca (2012). Nos três grupos analisados, observou-se a mesma tendência: a ABNT NBR 16935 apresentou valores médios inferiores a 1,0, indicando superestimação da resistência (contra a segurança), enquanto os modelos do MC2020 e EC2-2020 resultaram em médias superiores a 1,0, caracterizando subestimação conservadora. O coeficiente de variação calculado foi menor para as vigas com fibras de aço ensaiadas neste trabalho; contudo, esse resultado deve ser interpretado com cautela, uma vez que o conjunto contou apenas com três exemplares, o que limita a representatividade estatística. Já para as vigas com fibras poliméricas (sete exemplares) e para aquelas com fibras de aço de Cuenca (dez exemplares), os valores de dispersão ficaram próximos, fornecendo base mais consistente para comparação. Cabe destacar ainda que, para o cálculo de $V_{u,calc}$, as três normas analisadas consideram exclusivamente o parâmetro residual f_{R3m} , sem levar em conta diretamente propriedades geométricas ou mecânicas das fibras, nem o seu teor. Dessa forma, fibras de naturezas distintas podem resultar em valores semelhantes de f_{R3m} , desde que o teor seja ajustado, o que explica a proximidade de alguns resultados mesmo entre compósitos com fibras diferentes. Constata-se, portanto, que independentemente do tipo de fibra utilizado, os modelos normativos internacionais tendem a ser mais conservadores, enquanto a ABNT NBR 16935 mantém a tendência à superestimação.

Tabela 26. Verificação das equações de previsão de resistência ao cisalhamento segundo as normas ABNT NBR 16935, MC 2020 e EC2 2020, considerando o tipo de fibra

Referência	Fibra	Distribuição estatística	$V_{u,exp}/V_{u,calc}$		
			NBR 16935	MC 2020	EC2 2020
Esta pesquisa	Polimérica	Média	0,81	1,06	1,19
		Desvio padrão	0,09	0,17	0,11
		Coeficiente de variação	12%	16%	9%
Esta pesquisa	Aço	Média	0,88	1,18	1,29
		Desvio padrão	0,04	0,11	0,08
		Coeficiente de variação	4%	10%	6%
Cuenca (2012)	Aço	Média	0,91	1,12	1,17
		Desvio padrão	0,11	0,17	0,10
		Coeficiente de variação	12%	16%	9%

Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam diferenças importantes em relação à precisão das equações normativas de previsão da resistência ao cisalhamento em vigas de concreto reforçado com fibras. A equação da ABNT NBR 16935 (2021) apresentou tendência de superestimação sistemática ($V_{u,exp}/V_{u,calc}$ igual a 0,87 e coeficiente de variação (CV) de 12%), o que contrasta com os achados de Suk e Ferrari (2024), que observaram bons níveis de concordância (desvios < 5%) entre os valores previstos e experimentais para concretos de classe C30. A divergência pode ser atribuída, em parte, à diferença nas faixas de resistência dos concretos analisados, uma vez que os ensaios deste trabalho envolveram concretos com resistência à compressão maior que 50 MPa, fora do intervalo de aplicação da norma brasileira, o que também foi apontado como limitação relevante por Bahniuk *et al.* (2022). Além disso, a superestimação observada pode ser atribuída às premissas simplificadas da equação normativa, baseada em um modelo semiempírico que considera a contribuição das fibras apenas por meio da resistência residual à tração (f_{FTUK}), sem levar em conta fatores significativamente influenciados pela presença das fibras, como a rugosidade da fissura crítica, o estado de deformação dos elementos e a orientação das fibras no interior do concreto.

Quanto ao *fib* Model Code 2020, os resultados encontrados ($V_{u,exp}/V_{u,calc}$ igual a 1,11 e CV de 15%) confirmam a maior fidelidade do modelo quando comparado à norma brasileira, especialmente para concretos de alta resistência. Esse comportamento está de acordo com os apontamentos de Ruiz *et al.* (2023), que destacaram a capacidade do modelo baseado no SMCFT em considerar variáveis estruturais relevantes, como deformações e taxa de

armadura longitudinal. No entanto, tanto os presentes resultados quanto os de Ruiz *et al.* (2023) indicam elevada dispersão nas previsões, sugerindo sensibilidade significativa às características dos elementos avaliados. A tendência observada por Cuenca *et al.* (2018) de redução do nível de segurança com o aumento de f_{R3} também pode justificar a variabilidade identificada nesta pesquisa, considerando-se o desempenho mecânico das fibras empregadas.

O EC 2-2020 (2023) apresentou, nesta pesquisa, a maior subestimação da resistência ao cisalhamento, com relação média $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ igual a 1,20, ainda que com a menor dispersão entre os modelos analisados ($CV = 9\%$). Esse comportamento indica boa consistência estatística, mas também revela uma limitação do modelo em captar adequadamente as particularidades do concreto reforçado com fibras, especialmente em elementos com alta resistência à compressão. Esse resultado está em consonância com os achados de Ruiz *et al.* (2023), que observaram valores elevados para o fator de segurança médio ($\gamma_{mod} = 1,54$) nas análises com o EC2-2020 (2023), particularmente em vigas de concreto de alta resistência, apontando para previsões conservadoras.

De forma geral, os resultados indicam que nenhum dos modelos analisados apresentou perfeita aderência aos valores experimentais, sendo observadas estimativas tanto a favor da segurança (caso dos modelos europeus) quanto contra a segurança (caso da norma brasileira). O MC 2020, mais alinhado com a complexidade dos CRFA, apresentou maior compatibilidade com os dados experimentais, ainda que com maior dispersão nos resultados; enquanto o EC2-2020 revelou baixa variabilidade, porém com previsões menos representativas. A ABNT NBR 16935 (2021), por sua vez, resultou em valores calculados sistematicamente inferiores aos obtidos experimentalmente, o que, em situações de projeto, pode comprometer a segurança estrutural, contrariando os princípios de dimensionamento seguro. Além disso, destaca-se que a resistência à compressão dos concretos utilizados nos ensaios (acima de 50 MPa) encontra-se fora do intervalo de aplicação estabelecido pela norma brasileira, que se limita aos concretos do Grupo I (20 a 50 MPa).

Lantsoght (2019a), ao comparar diferentes equações normativas com um banco de dados composto por 488 experimentos, verificou que as expressões baseadas no Eurocode apresentaram desempenho ligeiramente conservador e menores coeficientes de variação em comparação com outros modelos. No entanto, é importante destacar que esse banco de dados não incluía valores experimentais das resistências residuais (f_{R1} e f_{R3}), tendo esses parâmetros sido estimados com base no volume e fator de forma das fibras, o que pode ter influenciado positivamente os resultados do Eurocode.

Cuenca *et al.* (2015) verificaram as equações do MC2010 e do EC2-2010 com base em resultados experimentais e observaram que ambas apresentavam tendência de

superestimar a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com diferentes tipos de fibras de aço, tanto para concretos de média quanto de alta resistência — o que representa uma condição contra a segurança. No presente trabalho, ao avaliar as equações da ABNT NBR 16935 (2021), que têm sua formulação baseada no MC2010, identificou-se a mesma tendência de superestimação. Por outro lado, a análise das versões mais recentes das equações, correspondentes ao MC2020 e ao EC2-2020, mostrou comportamento oposto: os modelos passaram a subestimar a resistência experimental, adotando uma postura mais conservadora, mas ainda com limitações em representar adequadamente o efeito das fibras. Ademais, Cuenca *et al.* (2015) salientaram que o uso de um único parâmetro residual, como f_{R3} , não é suficiente para caracterizar de forma abrangente o cisalhamento, já que diferentes geometrias e resistências de fibras podem produzir valores semelhantes de f_{R3} , mas respostas estruturais bastante distintas. Essas conclusões reforçam os achados desta pesquisa, indicando que ajustes paramétricos nas equações normativas — sejam das versões anteriores ou das mais recentes — são necessários para garantir previsões mais consistentes, especialmente em concretos de média a alta resistência e em compósitos com diferentes tipos de fibras.

Essas observações reforçam a importância de se considerar não apenas o grau de refinamento dos modelos normativos, especialmente quanto à forma de incorporar a contribuição das fibras nos mecanismos resistentes ao cisalhamento, mas também os limites formais de aplicação estabelecidos pelas normas. Tal consideração é especialmente crítica em contextos que envolvem o uso de concretos de média a alta resistência, cada vez mais frequentes em aplicações estruturais.

Seguindo a abordagem proposta por Barros e Foster (2018), a relação $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ foi avaliada por meio de uma adaptação do método *Demerit Points Classification* (DPC), originalmente proposto por Collins (1996, *apud* Barros e Foster, 2018). Nesse procedimento, faixas de valores da razão $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ recebem penalidades associadas, conforme apresentado na Tabela 27, sendo que o somatório das penalidades indica o desempenho de cada modelo teórico em relação aos resultados experimentais. A partir desse critério, foi possível comparar a adequação e o nível de segurança dos diferentes modelos analisados neste trabalho.

Tabela 27. Versão adaptada da *Demerit Points Classification* (DPC)

$V_{u,exp}/V_{u,calc}$	Classificação	Penalidade
$< 0,5$	Extremamente perigoso	10
$[0,5 - 0,7]$	Perigoso	5
$[0,7 - 0,85]$	Segurança reduzida	2
$[0,85 - 1,20]$	Segurança adequada	0
$[1,20 - 2,0]$	Conservador	1
$\geq 2,0$	Extremamente conservador	2

Fonte: adaptado de Collins (1996, apud Barros e Foster, 2018)

Os resultados obtidos a partir da aplicação do método DPC modificado são apresentados na Tabela 28. Observa-se que o modelo do MC 2020 apresentou o melhor desempenho, registrando apenas 9 pontos de penalidade, com a maioria dos valores de $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ concentrados na faixa de 0,85–1,20. O modelo do EC2-2020 obteve desempenho semelhante, com 11 pontos de penalidade, porém todos os resultados situados nas faixas de 0,85–1,20 e 1,20–2,0, o que indica tendência conservadora. Por outro lado, a ABNT NBR 16935 acumulou 17 pontos de penalidade, refletindo maior dispersão dos resultados nas faixas de 0,5–0,7 e 0,7–0,85, o que evidencia uma tendência à superestimação da resistência ao cisalhamento. Esses resultados indicam, portanto, que os modelos internacionais avaliados apresentaram desempenho superior ao modelo normativo brasileiro, seja pela maior proximidade dos resultados experimentais (*fib* MC 2020) ou pela postura conservadora em parte dos casos (EC2-2020).

Dessa forma, os resultados evidenciam a necessidade de revisão da equação de previsão da resistência ao cisalhamento adotada pela ABNT NBR 16935 quando aplicada a concretos de alta resistência, de modo a assegurar que o modelo normativo nacional forneça estimativas seguras da capacidade resistente. Nesse contexto, uma alternativa consiste na adoção de uma formulação baseada no modelo do EC-2 2020 que, embora apresente previsões mais conservadoras em comparação ao MC 2020, utiliza expressões mais simples e de aplicação direta. Essa característica é particularmente desejável em um contexto normativo, pois favorece a utilização prática por projetistas, conciliando segurança estrutural e facilidade de aplicação no dimensionamento. Com base nesses aspectos, a seguir é apresentada uma proposta de calibração das equações do EC2-2020, fundamentada nos resultados experimentais do banco de dados unificado, composto pelos ensaios realizados neste trabalho e pelos dados experimentais reportados por Cuenca (2012).

Tabela 28. Classificação dos resultados de $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ segundo o método DPC modificado para ABNT NBR 16935, MC2020 e EC2-2020

$V_{u,exp}/V_{u,calc}$	ABNT NBR 16935		MC 2020		EC2-2020	
	Nº CPs	PEN	Nº CPs	PEN	Nº CPs	PEN
< 0,5	0	0	0	0	0	0
[0,5 – 0,7]	1	5	0	0	0	0
[0,7 – 0,85]	6	12	2	4	0	0
[0,85 – 1,20]	13	0	13	0	9	0
[1,20 – 2,0]	0	0	5	5	11	11
≥ 2,0	0	0	0	0	0	0
Total	20	17	20	9	20	11

Nº CP: número de corpos de prova na faixa considerada

PEN: penalidades de acordo com pontuação da faixa considerada

7.3 PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DA EQUAÇÃO DA NORMA BRASILEIRA PARA PREVISÃO DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM VIGAS

Visando contribuir para a revisão da ABNT NBR 16935 (2021), de modo a propor uma equação de previsão mais adequada à realidade experimental de elementos de concreto de alta resistência reforçado com fibras (CARRF) sem armadura transversal, foi realizada uma calibração paramétrica das expressões propostas pelo EC2-2020 (2023). O procedimento consistiu em manter a forma funcional da equação normativa, mas tratando determinados coeficientes empíricos como variáveis ajustáveis, de forma a compatibilizar o modelo da normativa com os resultados experimentais do banco de dados unificado, composto pelos ensaios realizados neste trabalho e pelos dados experimentais reportados por Cuenca (2012).

A formulação normativa estabelece a resistência de cálculo ao cisalhamento (V_{Rd}) como a soma da contribuição do concreto ($V_{Rd,c}$) e da contribuição das fibras ($V_{Rd,F}$), conforme a Eq. 7.5. Nessa formulação, $V_{Rd,c}$ é definido pela Eq. 7.6 e $V_{Rd,F}$ pela Eq. 7.7.

O processo de calibração foi realizado por meio do método GRG Não Linear (*Generalized Reduced Gradient*). Essa escolha deve-se ao fato de o problema apresentar interações não lineares entre variáveis, sendo necessário um algoritmo iterativo baseado em gradientes para guiar a busca pela solução ótima. O objetivo da otimização foi minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre as resistências calculadas ($V_{u,calc}$) e as resistências obtidas experimentalmente ($V_{u,exp}$). Adicionalmente, estabeleceu-se como restrição de segurança que a razão $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ permanecesse no intervalo $0,85 \leq V_{u,exp}/V_{u,calc} \leq 1,20$. Essa

faixa foi definida com base no método *Demerit Points Classification* (DPC), no qual esse intervalo é interpretado como representativo de segurança adequada.

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,F} \quad \text{Eq. 7.5}$$

$$V_{Rd,c} = \eta_{CF} \cdot \left[\frac{0,66}{\gamma_v} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d} \right)^{1/3} \right] \cdot z_v \cdot b_w \geq V_{Rdc,min} \quad \text{Eq. 7.6}$$

$$V_{Rd,F} = \eta_F \cdot \frac{f_{FTUk}}{\gamma_F} \cdot z_v \cdot b_w \quad \text{Eq. 7.7}$$

$$V_{Rdc,min} = \frac{11}{\gamma_v} \cdot \sqrt{\frac{f_{ck}}{f_{yd}} \cdot \frac{d_{dg}}{d}} \quad \text{Eq. 7.8}$$

$$\eta_{CF} = \max\{1,2 - 0,5 \cdot f_{FTUk}; 0,4\} \leq 1,0 \quad \text{Eq. 7.9}$$

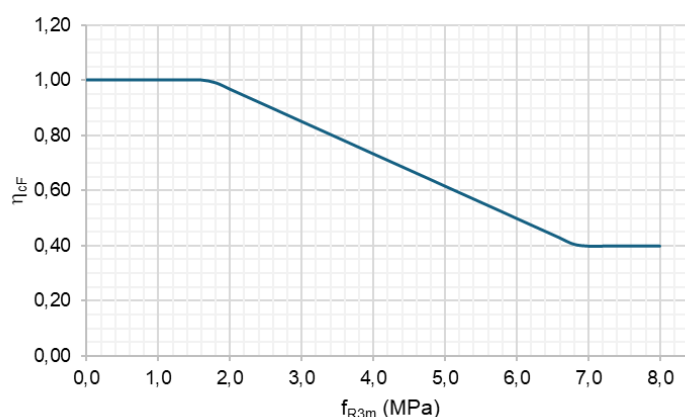
A calibração foi realizada considerando cinco cenários de variáveis ajustáveis. No cenário I, foram ajustadas apenas as constantes empíricas do modelo, correspondentes ao coeficiente 0,66 da Eq. 7.6, associado à contribuição do concreto, e ao coeficiente 11 da Eq. 7.8, referente ao valor mínimo de resistência ao cisalhamento. No cenário II, foram ajustados os coeficientes 1,2 e 0,5 da Eq. 7.9, responsáveis pelo cálculo de η_{CF} , além do coeficiente η_F . No cenário III, foi avaliado o ajuste simultâneo dos parâmetros dos cenários I e II. O cenário IV ampliou essa calibração ao incluir também o expoente 1/3 da Eq. 7.6 como variável. Por fim, no cenário V foram ajustados conjuntamente os coeficientes 0,66 da Eq. 7.6, 1,2 e 0,5 da Eq. 7.9 e o expoente 1/3 da Eq. 7.6.

Além disso, para o fator η_{CF} foram preservados os limites inferiores e superiores de acordo com o modelo normativo, variando entre 0,4 (associado a um f_{R3m} de 7 MPa) e 1,0 (associado a um f_{R3m} de 1,7 MPa). As correlações anteriores foram determinadas a partir da Eq. 7.9, considerando ainda a relação $f_{R3k} = 0,7 \cdot f_{R3m}$ entre valores médios e característicos da resistência residual à tração por flexão.

Cabe destacar que, na formulação do EC2-2020, o coeficiente η_{CF} assume papel relevante ao corrigir a parcela $V_{Rd,c}$. Observa-se que esse coeficiente diminui com o aumento da resistência residual à tração (f_{R3m}), de forma que quanto maior a contribuição das fibras, menor a parcela atribuída aos mecanismos clássicos de resistência ao cisalhamento (intertravamento dos agregados, efeito pino das armaduras longitudinais e compressão inclinada). Essa concepção pode, à primeira vista, parecer contraintuitiva. Nos ensaios de cisalhamento direto realizados nesta pesquisa — que avaliam de forma direta a contribuição combinada do engrenamento dos agregados e das fibras — verificou-se que a adição de fibras, em especial as de aço, aumenta a tensão de fissuração, retardando a transição entre a atuação predominante da matriz e a atuação das fibras. Esse resultado experimental indica

que as fibras, ao reduzir a abertura e controlar o processo de fissuração, tendem a favorecer, e não reduzir, os mecanismos resistentes clássicos. Ainda assim, a formulação normativa do EC2-2020 pode ser interpretada como uma tentativa de evitar dupla contagem da contribuição das fibras, uma vez que estas já são incorporadas explicitamente no termo adicional $V_{Rd,F}$. Assim, a diminuição de η_{cF} não deve ser interpretada como uma redução real da resistência estrutural, mas sim como uma redistribuição matemática da contribuição total, transferindo parte dos ganhos do concreto reforçado com fibras do termo $V_{Rd,c}$ para o termo $V_{Rd,F}$. Essa escolha metodológica garante a coerência do modelo e a separação clara entre os mecanismos atribuídos à matriz de concreto e os efeitos associados às fibras, ainda que não represente fielmente as interações observadas em ensaios experimentais. A Figura 91 ilustra graficamente a variação de η_{cF} em função do f_{R3m} , destacando a redução do coeficiente à medida que aumenta a resistência residual.

Figura 91. Variação do coeficiente η_{cF} em função da resistência residual f_{R3m} conforme equação do EC2-2020



7.3.1 Resultados da calibração do modelo

Os resultados da calibração dos diferentes cenários são apresentados na Tabela 29. Observa-se que, em todos os casos, as médias da razão $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ permaneceram próximas de 1,0 (um), indicando ausência de tendência sistemática relevante de superestimação ou subestimação da resistência ao cisalhamento. A comparação entre os cenários indica desempenho estatístico muito semelhante, com coeficientes de variação reduzidos e de mesma ordem de grandeza (8% a 9%), não sendo observadas diferenças relevantes quanto à dispersão dos resultados.

Tabela 29. Resultados da calibração do modelo

Viga		$V_{u,exp}/V_{u,calc}$				
		Cenário I	Cenário II	Cenário III	Cenário IV	Cenário V
Esta pesquisa	C90-A-0,5-1	1,04	1,08	1,06	1,08	1,10
	C90-A-0,5-2	1,10	1,15	1,13	1,15	1,17
	C90-A-1,0-1	1,09	1,08	1,06	1,08	1,09
	C90-P-0,5-1	0,99	1,06	1,02	1,06	1,06
	C90-P-0,5-2	0,95	1,02	0,99	1,02	1,02
	C90-P-1,0-1	1,20	1,20	1,19	1,20	1,20
	C90-P-1,0-2	1,01	1,01	1,00	1,01	1,01
	C55-P-1,0-2	1,00	0,95	0,99	0,96	0,95
	C70-P-1,0-1	0,88	0,85	0,87	0,85	0,85
	C70-P-1,0-2	0,99	0,96	0,98	0,96	0,96
Cuenca (2012)	M-45/50BN	1,06	1,00	1,03	1,02	0,98
	M-65/40BN	1,15	1,10	1,13	1,11	1,08
	M-80/50BN	1,02	1,16	1,06	1,13	1,07
	M-80/30BP	1,14	1,10	1,08	1,12	1,10
	M-80/40BP	0,99	0,93	0,93	0,96	0,97
	H-45/50BN	0,93	0,92	0,90	0,92	0,91
	H-65/40BN	0,87	1,11	0,97	0,99	0,95
	H-80/50BN	0,85	0,96	0,89	0,94	0,91
	H-80/30BP	1,11	1,07	1,06	1,09	1,08
	H-80/40BP	1,00	0,93	0,93	0,97	0,98
Média		1,02	1,03	1,01	1,03	1,02
Desvio padrão		0,10	0,09	0,09	0,09	0,09
Coeficiente de variação		9%	9%	8%	9%	9%

A análise comparativa dos cenários de calibração não evidenciou diferenças estatisticamente relevantes no desempenho global das equações calibradas, uma vez que todos os cenários apresentaram médias da razão $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ próximas da unidade e coeficientes de variação reduzidos e de ordem semelhante. Esse resultado indica que os diferentes níveis de complexidade adotados nas calibrações conduzem a desempenhos equivalentes no que se refere à aderência aos dados experimentais analisados.

Diante da ausência de diferenças significativas entre os cenários, optou-se pela adoção do Cenário III como referência, por se tratar do ajuste mais abrangente do ponto de vista paramétrico, no qual foram calibrados simultaneamente os coeficientes empíricos das

Eq. 7.6 e Eq. 7.7 e os fatores de eficiência η_{cF} e η_F . Ainda que essa escolha não represente uma superioridade estatística em relação aos demais cenários, ela permite avaliar de forma integrada a influência dos principais parâmetros do modelo, resultando em boa aderência aos dados experimentais e mantendo níveis adequados de dispersão.

Ressalta-se que a calibração apresentada neste capítulo foi realizada com base em um banco de dados experimental unificado, composto pelos resultados obtidos nesta pesquisa e pelos dados reportados por Cuenca (2012), contemplando diferentes faixas de resistência à compressão do concreto de alta resistência e variações quanto ao tipo e à dosagem de fibras. Embora esse conjunto experimental amplie a base de análise em relação a estudos individuais, ele permanece limitado frente à diversidade de concretos reforçados com fibras e configurações estruturais possíveis. Portanto, embora os coeficientes ajustados apresentem boa aderência aos resultados analisados, a validação plena das equações calibradas dependeria da incorporação de um banco de dados experimental mais abrangente, contemplando outras condições de resistência à compressão, tipos e dosagem de fibras e fator de forma das vigas.

Ainda assim, os resultados obtidos indicam tendências consistentes e fornecem subsídios concretos para futuras revisões normativas, demonstrando que ajustes paramétricos fundamentados em ensaios experimentais locais podem contribuir de forma significativa para o aprimoramento das equações de cisalhamento aplicáveis ao concreto reforçado com fibras no Brasil.

O ajuste paramétrico das equações do EC2-2020 demonstrou que a calibração conjunta de coeficientes empíricos e fatores de eficiência, conforme adotado no Cenário III, é suficiente para compatibilizar a equação normativa com os resultados experimentais de vigas de concreto de alta resistência reforçado com fibras sem armadura transversal. A preservação da forma funcional original da equação assegura aderência conceitual ao modelo europeu, enquanto a calibração numérica amplia sua representatividade frente à realidade experimental analisada. Esses resultados reforçam a relevância de revisões normativas baseadas em evidências experimentais, indicando que ajustes calibrados de constantes e fatores de eficiência podem assegurar maior confiabilidade no dimensionamento de elementos de CARRF sem estribos, conciliando segurança estrutural e racionalidade de projeto.

7.3.2 Equações propostas a partir da calibração do modelo

Com base nos resultados da calibração, verificou-se que os parâmetros mais sensíveis e representativos foram aqueles associados ao cálculo de η_{cF} e do coeficiente η_F , além do coeficiente 0,66 da Eq. 7.6. Assim, a proposta deste trabalho consiste em manter a forma

funcional das equações do EC2-2020, mas substituindo os coeficientes normativos originais pelos valores calibrados a partir do programa experimental analisado. As equações calibradas são apresentadas a seguir.

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,F} \quad \text{Eq. 7.8}$$

$$V_{Rd,c} = \eta_{CF} \cdot \left[\frac{0,80}{\gamma_V} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d} \right)^{1/3} \right] \cdot z_v \cdot b_w \geq V_{Rd,c,min} \quad \text{Eq. 7.9}$$

$$V_{Rd,F} = \eta_F \cdot \frac{f_{FTUK}}{\gamma_F} \cdot z_v \cdot b_w \quad \text{Eq. 7.10}$$

$$\eta_{CF} = \max\{1,30 - 0,60 \cdot f_{FTUK}; 0,4\} \leq 1,0 \quad \text{Eq. 7.11}$$

Onde a Eq. 7.11 para η_{CF} corresponde à relação calibrada nesta pesquisa para o fator de correção do termo $V_{Rd,c}$ e $\eta_F = 1,20$, coeficiente calibrado para ponderar a contribuição das fibras no termo $V_{Rd,F}$. Os demais termos mantêm a definição normativa do EC2-2020.

7.3.3 Verificação do modelo proposto

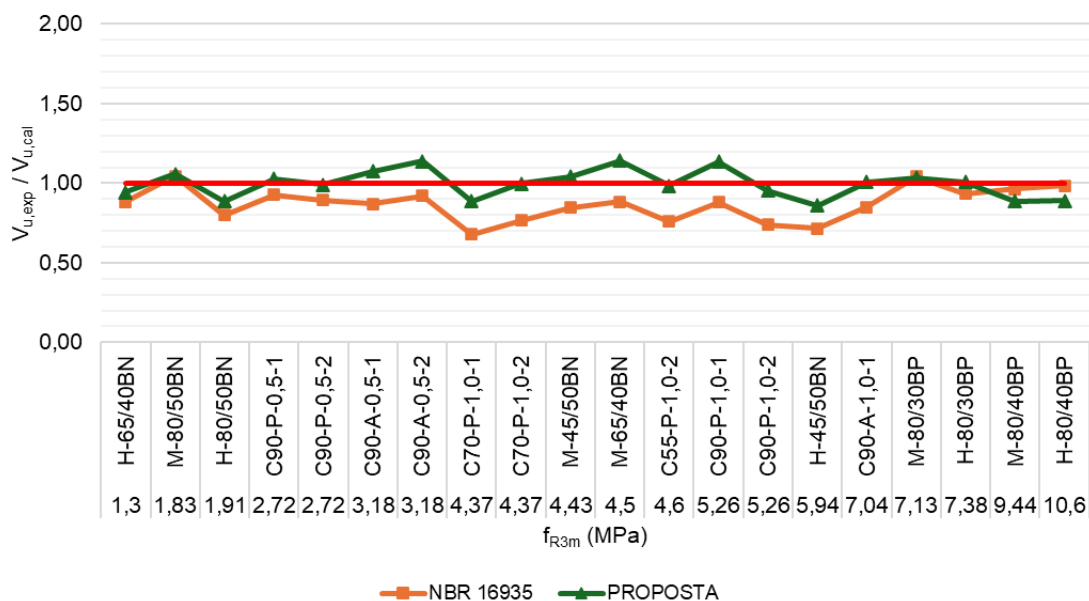
A Tabela 30 apresenta os valores individuais de $V_{u,exp}/V_{u,calc}$, bem como as estatísticas de síntese (média, desvio padrão e coeficiente de variação) obtidas com equações da ABNT NBR 16935 e para a equação proposta calibrada, composto pelos resultados desta pesquisa e pelos dados reportados por Cuenca (2012).

A Figura 92 apresenta a variação da razão $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ em função de f_{R3m} . Observa-se que a ABNT NBR 16935 tende a fornecer valores predominantemente inferiores a 1,0, indicando a superestimação da resistência ao cisalhamento quando aplicada a concretos de alta resistência reforçados com fibras. Em contraste, a equação proposta apresenta comportamento mais uniforme e distribuído em torno da unidade, demonstrando melhor compatibilidade com os resultados experimentais analisados.

Tabela 30. Resultados da verificação de $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ para a ABNT NBR 16935 e para a equação proposta calibrada

Viga		$V_{u,exp}/V_{u,calc}$	
		ABNT NBR 16935	PROPOSTA
Esta pesquisa	C90-A-0,5-1	0,87	1,07
	C90-A-0,5-2	0,92	1,14
	C90-A-1,0-1	0,85	1,01
	C90-P-0,5-1	0,93	1,03
	C90-P-0,5-2	0,89	0,99
	C90-P-1,0-1	0,88	1,13
	C90-P-1,0-2	0,74	0,95
	C55-P-1,0-2	0,76	0,99
	C70-P-1,0-1	0,68	0,89
	C70-P-1,0-2	0,76	1,00
Cuenca (2012)	M-45/50BN	0,85	1,04
	M-65/40BN	0,88	1,14
	M-80/50BN	1,04	1,06
	M-80/30BP	1,04	1,04
	M-80/40BP	0,96	0,89
	H-45/50BN	0,72	0,86
	H-65/40BN	0,88	0,94
	H-80/50BN	0,80	0,89
	H-80/30BP	0,93	1,01
	H-80/40BP	0,98	0,89
Média		0,87	1,00
Desvio padrão		0,10	0,09
Coeficiente de variação		12%	9%

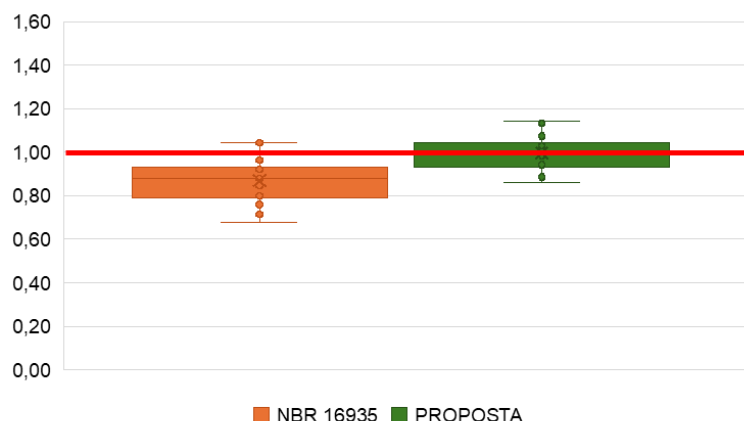
Figura 92. Relação $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ obtida pela ABNT NBR 16935 e pela equação proposta



A síntese estatística apresentada na Figura 93 confirma a tendência discutida anteriormente. A distribuição associada à ABNT NBR 16935 apresenta mediana inferior à unidade e concentração de valores abaixo de 1,0, evidenciando tendência sistemática de superestimação da resistência ao cisalhamento. Por sua vez, a equação proposta calibrada apresenta mediana praticamente coincidente com a unidade e menor deslocamento global em relação à linha de referência, indicando melhor equilíbrio entre estimativa normativa e resposta experimental.

Os resultados quantitativos da Tabela 30 reforçam essa interpretação: enquanto a ABNT NBR 16935 apresenta média igual a 0,87, desvio padrão de 0,10 e coeficiente de variação de 12%, a equação proposta apresenta média igual a 1,00, desvio padrão de 0,09 e coeficiente de variação de 9%. Esses indicadores evidenciam que a calibração realizada não apenas elimina a tendência sistemática observada na aplicação da norma brasileira a concretos de alta resistência, mas também mantém níveis de dispersão compatíveis — e ligeiramente inferiores — aos obtidos com o modelo normativo original.

Figura 93. Distribuição estatística da razão $V_{u,exp}/V_{u,cal}$ obtida pela ABNT NBR 16935 e pela equação proposta



De forma integrada, os resultados indicam que os coeficientes calibrados proporcionam ajuste mais equilibrado entre segurança e representatividade experimental para vigas esbeltas de concreto de alta resistência reforçado com fibras, sem alteração da forma funcional do modelo normativo original. Ressalta-se, contudo, que a calibração proposta está fundamentada em um banco de dados específico, composto por vigas sem armadura transversal, inseridas no intervalo de resistência à compressão correspondente ao Grupo II, com dosagem de fibras, de aço e poliméricas, de até 1%, além de tamanho amostral limitado.

Dessa forma, a consolidação da equação calibrada requer sua verificação em bancos de dados experimentais adicionais, contemplando outras configurações estruturais, níveis de esbeltez, faixas de resistência e tipologias de fibras, a fim de avaliar de maneira mais abrangente a eficácia e a robustez da proposta em diferentes contextos de aplicação.

8. CONCLUSÕES

O programa experimental desenvolvido nesta pesquisa abrangeu a caracterização mecânica de concretos de alta resistência reforçado com fibras (de aço e poliméricas), incluindo ensaios de tração na flexão, cisalhamento direto (JSCE-SF6 e *Push-off*) e vigas submetidas ao cisalhamento sem armadura transversal. A utilização da correlação de imagem digital (CID) complementou as medições convencionais, permitindo acompanhar a evolução da fissuração e a distribuição das deformações, fornecendo subsídios adicionais para compreender os mecanismos de transferência de esforços e a atuação das fibras.

A seguir apresentam-se as principais conclusões obtidas a partir dos objetivos específicos da pesquisa e dos resultados apresentados nos capítulos 5, 6 e 7.

➤ ***Determinar características mecânicas quanto ao comportamento em relação ao cisalhamento do concreto reforçado com fibras, com resistência à compressão entre 55 MPa e 90 MPa e fibras de aço e macrofibras poliméricas.***

A resistência à compressão apresentou comportamentos distintos conforme o tipo de fibra empregada. A adição de fibras de aço não alterou significativamente essa propriedade, mantendo valores próximos aos traços de referência, enquanto a incorporação de macrofibras poliméricas resultou em redução da resistência à compressão, especialmente nos concretos de maior resistência. No que se refere ao módulo de elasticidade, não foram observadas diferenças significativas entre as classes C55, C70 e C90, e a presença de fibras — tanto de aço quanto poliméricas — também não produziu variações relevantes.

A resistência à tração no limite de proporcionalidade (f_L) mostrou forte relação com a resistência à compressão da matriz, com o concreto C90 apresentando valores superiores em todas as combinações avaliadas, enquanto C55 e C70 permaneceram estatisticamente equivalentes. O f_L também foi influenciado pelo uso de fibras de aço, especialmente em teores mais elevados, ao passo que a incorporação de macrofibras poliméricas não produziu alterações significativas nesse parâmetro.

Em relação ao comportamento pós-fissuração, a incorporação de fibras aumentou de forma expressiva a tenacidade do concreto, sendo a contribuição das fibras de aço superior à das macrofibras poliméricas quando utilizados teores equivalentes, sem que houvesse correlação direta entre o aumento da resistência à compressão e o incremento da tenacidade. Para as resistências residuais, verificou-se influência marcante tanto do teor quanto do tipo de fibra: maiores conteúdos de fibra resultaram em maiores resistências residuais, e os

concretos com 1% de fibras de aço apresentaram comportamento de endurecimento (*hardening*), enquanto os demais apresentaram amolecimento (*softening*). Ademais, observou-se que matrizes de maior resistência à compressão proporcionam melhor ancoragem das fibras, levando à ruptura das fibras — e não à falha da interface fibra–matriz. Esse comportamento, corroborado pelos “estalos” audíveis durante os ensaios e especialmente marcante nos concretos C90 com 1% de fibra de aço, explica a queda mais abrupta da resistência residual após CMOD de 1 mm e a consequente redução da tenacidade devido à ruptura frágil das fibras.

Nos ensaios de cisalhamento direto, que possibilitaram avaliar de maneira isolada os mecanismos de engrenamento de agregados e transferência de esforços pelas fibras, verificou-se que a presença de fibras elevou a tensão de fissuração e contribuiu de forma significativa para o controle da abertura e propagação da fissuração, aumentando a tenacidade pós-fissura e mantendo a integridade da zona de fissuração. Esse comportamento indicou que, além da contribuição direta ao cisalhamento, as fibras favorecem mecanismos tradicionalmente atribuídos apenas à matriz de concreto, como o intertravamento dos agregados.

A resistência ao cisalhamento direto apresentou incrementos associados tanto à resistência da matriz quanto ao tipo e teor de fibras utilizados. Concretos de maior resistência mostraram tensões máximas de cisalhamento superiores, com os traços C90 registrando aumento de 59% para fibras de aço e 28% para macrofibras poliméricas em relação ao C55, evidenciando que matrizes mais resistentes mobilizam de forma mais eficiente os mecanismos de transferência de cisalhamento. A adição de fibras de aço promoveu ganhos expressivos: teores de 0,5% resultaram em incrementos entre 20% e 84%, enquanto o teor de 1% elevou a resistência residual em 45% a 114%, considerando o método JSCE-SF6, mais sensível à contribuição das fibras. As macrofibras poliméricas também aumentaram a resistência ao cisalhamento, embora de forma mais modesta, com incrementos entre 9% e 34%. Observou-se ainda que os concretos C90 com teores de fibra de 0,5% (tanto de aço quanto poliméricas) apresentaram resistência residual muito baixa ou praticamente nula nos ensaios de cisalhamento direto; entretanto, o aumento do teor de fibras para 1% foi suficiente para mitigar esse efeito, fazendo com que os CRF atingissem resistência residual equivalente à dos demais traços. Esse comportamento indica que, em concretos de alta resistência, é necessário empregar fibras com desempenho superior ou em dosagens mais elevadas, de forma a maximizar a resistência residual ao cisalhamento e promover um comportamento mais dúctil do material — característica desejável para aplicações estruturais.

A comparação entre os métodos para determinação da resistência ao cisalhamento direto mostrou diferenças sistemáticas e coerentes com a literatura. O ensaio *Push-off*, por

mobilizar um único plano de cisalhamento dominado por coesão da matriz e intertravamento dos agregados, resultou em tensões cerca de 30% menores, maior dispersão e menor sensibilidade ao tipo e ao teor de fibras. Já o método modificado da JSCE-SF6 apresentou curvas mais estáveis, valores superiores de resistência e distinção mais clara entre classes de resistência, fibras de aço e macrofibras poliméricas, evidenciando sua maior capacidade de captar a contribuição das fibras no pós-fissuração. Esses achados confirmam que os dois ensaios são complementares: o *Push-off* representa de forma mais fiel os mecanismos da matriz, enquanto o JSCE-SF6 caracteriza melhor a ação das fibras.

Entretanto, as diferenças geométricas, de instrumentação e de aplicação de carga entre os métodos — também apontadas por outros autores — dificultam a comparação direta dos resultados e a consolidação de bases de dados consistentes. Assim, torna-se essencial avançar na padronização das dimensões dos corpos de prova, da instrumentação e dos procedimentos de carregamento, permitindo maior reprodutibilidade, melhor comparabilidade entre pesquisas e maior confiabilidade na calibração de modelos normativos para o cisalhamento direto de concretos reforçados com fibras.

➤ ***Determinar, por meio de análise experimental, a influência de diferentes variáveis no comportamento das vigas de CRF sem estribos***

A influência das diferentes variáveis no comportamento das vigas de CRF sem estribos foi determinada a partir dos resultados experimentais e análises apresentados nos Capítulos 6 e 7. A resistência à compressão do concreto afetou o desempenho estrutural das vigas de forma diferenciada: os concretos C55 e C70 apresentaram respostas semelhantes em termos de rigidez inicial, carga de fissuração e carga última, indicando que, para esses níveis de resistência, o efeito da matriz não promoveu variações significativas. Já o concreto C90 mostrou incremento consistente tanto na carga de fissuração quanto na capacidade resistente, evidenciando contribuição mais expressiva somente para a matriz de maior resistência.

O tipo de fibra empregada apresentou papel determinante no comportamento pós-fissuração. As fibras de aço proporcionaram aumento substancial da capacidade resistente das vigas, com destaque para o teor de 1,0%, no qual a carga de fissuração aumentou 17,6% e a carga última apresentou acréscimo de 43,7% em relação às vigas de referência (C90). Além disso, as fibras de aço elevaram a rigidez após a formação da fissura diagonal, reduziram a queda pós-pico e favoreceram o intertravamento dos agregados, contribuindo para maior dissipação de energia e integridade estrutural mesmo sob aberturas de fissura significativas. Em contraste, as macrofibras poliméricas, embora tenham contribuído para o aumento da carga máxima, apresentaram capacidade limitada de

contenção da fissura e baixa eficiência na manutenção da resistência residual, especialmente nas vigas C90, onde o comportamento pós-pico permaneceu abrupto.

O teor de fibras também exerceu influência relevante nas respostas das vigas. Teores maiores de fibras de aço (1,0%) produziram melhorias claras na capacidade resistente, na rigidez pós-fissuração e na ductilidade, enquanto teores menores resultaram em desempenho inferior, particularmente em matrizes mais resistentes. Nas vigas reforçadas com macrofibras poliméricas, a variação de teor influenciou a abertura de fissuras e os deslocamentos, mas não foi suficiente para estabilizar o comportamento pós-fissuração de maneira comparável ao observado para as fibras de aço.

➤ ***Aferir e propor melhorias nos modelos propostos na normalização brasileira para previsão da capacidade resistente ao cisalhamento das vigas de CRF sem estribos com resistência à compressão entre 55 MPa e 90 MPa***

Com relação às equações normativas, os resultados experimentais possibilitaram uma análise crítica das principais formulações vigentes. Verificou-se que a ABNT NBR 16935 (2021), quando aplicada a vigas de concreto de alta resistência, apresentou tendência sistemática à superestimação da resistência ao cisalhamento, conduzindo a resultados contra a segurança — comportamento também relatado por Cuenca *et al.* (2015) em bases experimentais internacionais. Em sentido oposto, as equações mais recentes do MC2020 (2024) e do EC2-2020 (2023) mostraram-se conservadoras, subestimando a resistência obtida experimentalmente, ainda que com coeficientes de variação relativamente baixos, entre 8% e 15%. Esses modelos, apesar dos avanços conceituais, ainda não capturam de forma plenamente consistente a contribuição das fibras em diferentes contextos de aplicação, especialmente quando se consideram variações de tipo e teor das fibras e classe de resistência do concreto.

Diante dessas limitações, procedeu-se à calibração paramétrica do modelo do EC2-2020, mantendo sua forma funcional e ajustando os coeficientes de maior sensibilidade. As análises indicaram que modificações pontuais nos parâmetros associados a η_{cF} e η_F foram suficientes para eliminar a tendência sistemática identificada na aplicação da ABNT NBR 16935 (2021) e para centralizar a razão $V_{u,exp}/V_{u,calc}$ em torno da unidade, com média igual a 1,00 e o coeficiente de variação de 9%, frente à média de 0,87 e coeficiente de variação de 12% obtidos com a norma brasileira.

A proposta normativa resultante preserva a estrutura conceitual do EC2-2020 (2023), incorporando parâmetros calibrados a partir do banco de dados experimental unificado desta pesquisa e de Cuenca (2012), aplicável a vigas sem armadura transversal inseridas no

intervalo de resistência à compressão correspondente ao Grupo II. Dessa forma, a calibração confere maior representatividade às condições analisadas, mantendo coerência teórica com o modelo europeu e estabelecendo base técnica consistente para futuras validações em bancos de dados experimentais mais abrangentes.

➤ ***Contribuir para uma proposta de revisão da norma brasileira ABNT NBR 16935 (2021) a fim de que o concreto de alta resistência reforçado com fibras possa ser considerado uma opção de projeto***

Os resultados apresentados no Capítulo 7 permitem consolidar recomendações objetivas para a revisão da ABNT NBR 16935 (2021), de modo que o concreto de alta resistência reforçado com fibras possa ser incorporado de forma segura e tecnicamente fundamentada às opções de projeto. A análise comparativa demonstrou que a equação brasileira, ao superestimar sistematicamente a capacidade resistente ao cisalhamento de vigas de CRF — especialmente em matrizes de maior resistência — não representa adequadamente os mecanismos observados experimentalmente. Nesse contexto, torna-se essencial que a revisão normativa incorpore parâmetros derivados das resistências residuais à tração e propriedades da matriz, de modo a considerar a contribuição dos mecanismos resistentes de forma mais adequada. A adoção de modelos mais próximos dos mecanismos físicos, como aqueles presentes no *fib Model Code 2020* (2024) e no *Eurocode 2020* (2023), oferece um caminho consistente para a evolução normativa, proporcionando maior segurança ao projeto e ampliando a aplicabilidade do concreto de alta resistência reforçado com fibras no contexto brasileiro.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, sugerem-se as seguintes linhas para continuidade da pesquisa:

- ampliação do banco de dados experimental, incluindo vigas com diferentes classes de resistência, tipos e teores de fibras (metálicas, sintéticas, híbridas e recicladas);
- aprofundamento dos ensaios de cisalhamento direto, com padronização de geometrias e procedimentos, visando maior reprodutibilidade e refinamento da correlação com modelos normativos;
- aplicação das equações calibradas em elementos estruturais de maior escala, considerando também teores de fibra fora da faixa investigada neste estudo, de modo

a aproximar as análises das condições usuais de projeto e avaliar a generalização da formulação proposta;

- investigação de formulações alternativas que incorporem parâmetros adicionais de resistência residual, permitindo avaliar de forma mais abrangente a influência do tipo, geometria e propriedades das fibras no cisalhamento;
- consolidação de bases experimentais e analíticas que subsidiem revisões normativas futuras com maior robustez científica e aplicabilidade prática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAD, B. F.; LANTSOUGHT, E. O. L.; YANG, Y. Shear capacity of steel fibre reinforced concrete beams. In W. Derkowski, P. Gwozdziwicz, L. Hojdys, P. Krajewski, & M. Pantak (Eds.), Concrete Innovations in Materials, Design and Structures – Proceedings of the fib Symposium, Kraków (Poland), 27-29 May 2019. Lausanne: fib – The International Federation for Structural Concrete, 2019. p. 1710-1717.

ALMEIDA, R. L. J. Comportamento mecânico do concreto de alta resistência reforçado com fibras. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

ALMEIDA, R.L.J.; PARSEKIAN, G.A.; CARNIO, M.A. Investigation on the flexural behavior of high-strength fiber-reinforced concrete, Structural Concrete, v.26, p.365–384, 2024.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete – and Commentary. Farmington Hills, EUA, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544-4R-18: Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete. Farmington Hills, EUA, 2018.

AMIN, A.; FOSTER, S. J. Shear strength of steel fibre reinforced concrete beams with stirrups. Engineering Structures, v. 111, p. 323–332, 2016.

ARAÚJO, D. L.; NUNES, F. G. T.; TOLEDO FILHO, R. D.; ANDRADE, M. A. S. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams. Maringá Acta Scientiarum. Technology, 2014.

ARAÚJO, D. L.; LOBO, F. A.; MARTINS, B. G. A shear stress-slip relationship in steel fibre-reinforced concrete obtained from *Push-off* testing. Construction and Building Materials, v. 293, p. 123435, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9p.

_____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9p.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2023. 242p.

_____. NBR 7480: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos. Rio de Janeiro, 2024. 17p.

_____. 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 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009. 7p.

_____. NBR 15530: Fibras de aço para concreto — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2019. 38p.

_____. NBR 16887: Concreto — Determinação do teor de ar em concreto fresco — Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2020. 18p.

_____. NBR 16917: Agregado graúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021. 6p.

_____. NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020. 5p.

_____. 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.

_____. NBR 16972: Agregados — Determinação massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2022. 6p.

_____. NBR 17054: Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022. 5p.

BABAALI, A.; HADIANFARD, M. A.; JAHANGIRI, M. The influences of type, length, and volumetric fraction of fibers on the direct shear strength of the fiber-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, v. 428, 2024.

BAHNIUK, G. M. C.; BORÇATO, A. G.; PIERALISI, R. Dimensionamento ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras de aço sem estribos: uma análise paramétrica. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 371–386, out/dez. 2022.

BAIRÁN, J. M.; TOŠIĆ, N.; DE LA FUENTE, A. Reliability-based assessment of the partial factor for shear design of fibre reinforced concrete members without shear reinforcement. *Materials and Structures*, v. 54, p. 185, 2021.

BARRAGÁN, B.; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; ZERBINO, R. Shear failure of steel fiber-reinforced concrete based on *Push-off* tests. *ACI Materials Journal*, v. 103, n. 4, p. 251–257, 2006.

BARROS, J. A. O.; FOSTER, S. J. An integrated approach for predicting the shear capacity of fiber reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, [S.l.], v. 175, p. 424–442, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.071>.

BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre reinforced cementitious composites*. United Kingdom: Elsevier, 2007.

BENTZ, E. C.; VECCHIO, F. J.; COLLINS, M. P. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements. *ACI Structural Journal*, v. 103, n. 4, p. 614–624, 2006.

BLANCO, A.; AIRE, C.; PUJADAS, P.; CAVALARO, S. H. P. Luong test for the characterization of the shear post-cracking response of fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 207–217, 2017.

BOULEKBAACHE, B.; HAMRAT, M.; CHEMROUK, M.; AMZIANE, S. Influence of yield stress and compressive strength on direct shear behaviour of steel fibre-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, v.27, p.6-14, 2012.

CARNIO, M. A. Propagação de Trinca por Fadiga do Concreto Reforçado com Baixos Teores de Fibra. 2009. 145 p. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

CARNIO, M. A. *Concreto Reforçado Com Fibras: Perspectiva de futura norma*. Apresentação. Campinas, 2018.

CARRILLO, J.; SALCEDO, E.; ROJAS, F. Evaluating Direct Shear Performance of Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, v. 36, n. 2, 2024.

CEN – European Committee for Standardization. EN 14651:2007 – Test method for metallic fiber-reinforced concrete – Measuring the flexural tensile strength (limite of proportionality (LOP), residual). Brussels: CEN, 2007.

CEN – European Committee for Standardization. EN 1992-1-1:2023 – Eurocode 2 – Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels: CEN, 2023.

CHAWLA, K.; TEKWAN, B. Studies of glass fiber reinforced concrete composites. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, v. 2, n. 3, p. 176-182, Agosto, 2013.

CONFORTI, A.; MINELLI, F.; PLIZZARI, G. A.; TIBERTI, G. Comparing test methods for the mechanical characterization of fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*, v. 19, p. 656–669, 2018.

COSTA, J. D. M.; SAVARIS, G.; BALESTRA, C. E. T. Resistência ao cisalhamento direto do concreto reforçado com fibras de aço. *Revista de Engenharia Civil IMED*, v. 6, n. 2, p. 115, 1 dez. 2019.

CUENCA, E. On Shear Behavior of Structural Elements Made of Steel Fiber Reinforce Concrete. Tese (Doutorado). Departamento de Ingeniería de la Construcción y P.I.C. Universitat Politècnica de València, 2012. 422 p.

CUENCA, E.; ECHEGARAY-OVIEDO, J.; SERNA, P. Influence of concrete matrix and type of fiber on the shear behavior of self-compacting fiber reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, v. 75, p. 135–147, 2015.

CUENCA, E.; CONFORTI, A.; MINELLI, F. *et al.* A material-performance-based database for FRC and RC elements under shear loading. *Materials and Structures*, v.51, n. 11, 2018.

CUENCA, E.; CONFORTI, A.; MONFARDINI, L.; MINELLI, F. Shear transfer across a crack in ordinary and alkali activated concrete reinforced by different fibre types. *Materials and Structures*, v. 53:24, n. 2, p. 1–15, 2020.

DINH, H. H. *et al.* Shear Strength Model for Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement. n. October, 2011.

DINH, H. H.; PARRA-MONTESINOS, G. J.; WIGHT, J. K. Shear behavior of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrup reinforcement. *ACI Structural Journal*, v. 107, n. 5, p. 597–606, 2010.

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.

EZELDIN, A. S.; BALAGURU, P. N. Normal and high-strength fiber-reinforced concrete under compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.4, n. 4, p.415-429, 1992.

FACCIN, E. Experimental and analytical study on punching shear strength of steel fibre reinforced concrete flat slabs. *Università degli Studi di Brescia, Brescia*, 2022.

FIGUEIREDO, A. D. *Concreto com Fibras*. Ed. G. C. Isaia. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2011a, 2v. cap. 37, p.1327-1365.

FIGUEIREDO, A. D. *Concreto Reforçado com Fibras*. 2011. Tese (Livre docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011b. 248p.

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. 1285-1296, nov. 2015.

GALI, S.; SUBRAMANIAM, K. V. L. Efficiency of steel fibers in shear resistance of reinforced concrete beams without stirrups at different moment-to-shear ratios. *Engineering Structures*, v. 188, n. October 2018, p. 249–260, 2019.

GAO, D.; ZHANG, L.; NOKKEN, M. Mechanical behavior of recycled coarse aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear, *Cement and Concrete Composites*, v.79, p.1-8, 2017.

GOBIERNO DE ESPAÑA. Código Estructural. Real Decreto 470/2021. Madrid, 2021.

GUO, W.; DING, Y.; RANDL, N. Effect of macro polyoxymethylene fibers on shear transfer across a crack and crack surface topography of concrete, *Construction and Building Materials*, v. 464, 2025.

IBRAHIM, Y. E.; FAWZY, K.; FAROUK, M. A. Effect of steel fiber on the shear behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams. *Structural Concrete*, v. 22, n. 3, p. 1861–1872, 2021.

ISMAIL, M. K.; HASSAN, A. A. A. Influence of fibre type on the shear behaviour of engineered cementitious composite beams. v. 73, p. 464–475, 2019.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (*fib*). *fib* Model Code for Concrete Structures 2010, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2013.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (*fib*). *fib* Model Code for Concrete Structures 2020, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2023.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. JSCE-SF6: Method of test for shear strength of steel fiber reinforced concrete. Tokyo, 1990.

KARIMIPOUR, A.; GHALEHNOVI, M. Comparison of the effect of the steel and polypropylene fibres on the flexural behaviour of recycled aggregate concrete beams. Structures, v. 29, n. September 2020, p. 129–146, 2021.

KHANLOU, A.; MacRAE, G. A.; SCOTT, A. N.; HICKS, S. J.; CLIFTON, G. C. Shear Performance of Steel Fibre-Reinforced Concrete. Australasian Structural Engineering Conference, Perth, Australia, July 11-13th 2012, v. 1, n. 2006, p. 8, 2013.

KIM, Y. H.; HUESTE, M. B. D.; TREJO, D.; CLINE, D. B. H. Shear Characteristics and Design for High-Strength Self-Consolidating Concrete. Journal of Structural Engineering, v. 136, n. 8, p. 989–1000, 2010.

KIM, K. S.; LEE, D. H.; HWANG, J.H.; KUCHMA, D. A. Shear behavior model for steel fiber-reinforced concrete members without transverse reinforcements. Composites: Part B, v. 43, p. 2324–2334, 2012.

KRAGH-POULSEN, J.; HOANG, L. C.; GOLTERMANN, P. Shear capacity of steel and polymer fibre reinforced concrete beams. Material and Structures, v. 44, p. 1079–1091, 2010.

LANTSOGHT, E. O. L. Database of shear experiments on steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. Materials, v. 16, n. 6, p. 1–36, 2019a.

LANTSOGHT, E. O. L. How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups? Composites Part B: Engineering, v. 175, 15 out. 2019b.

LEE, S.C.; CHO, J.Y.; VECCHIO, F. J. Analysis of steel fiber-reinforced concrete elements subjected to shear. ACI Structural Journal, v. 113, n. 2, p. 275–285, 2016.

LEE, D. H.; HAN, S. J.; KIM, K. S.; LaFAVE, J. M. Shear capacity of steel fiber-reinforced concrete beams. Structural Concrete, v. 18, p. 278–291, 2017.

LEONE, M.; CENTONZE, G.; COLONNA, D.; MICELLI, F.; AIELLO, M. A. Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behaviour. Construction and Building Materials, v. 161, p. 141–155, 2018.

LI, Z. X.; LI, C. H.; SHI, Y. D.; ZHOU, X. J. Experimental investigation on mechanical properties of Hybrid Fibre Reinforced Concrete. Construction and Building Materials, v. 157, p. 930–942, 2017.

MacGREGOR, J.G.; WIGHT, J. K. Reinforced concrete: Mechanics and Design, Pearson Prentice Hall, 6 ed. 2012.

- MANSUR, M. A.; ONG, K. C. G.; PARAMASIVAM, P. Shear Strength of Fibrous Concrete Beams Without Stirrups. *Journal of Structural Engineering*, v. 112, n. 9, p. 2066–2079, 1986.
- MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, propriedades e Materiais*. 2ª Edição, Editora Nicole Pagan Hasparyk, IBRACON, 2014.
- MINELLI, F.; VECCHIO, F. J. Compression field modeling of fiber-reinforced concrete members under shear loading. *ACI Structural Journal*, v. 103, n. 2, p. 244–252, 2006.
- MIRSAYAH, A. A.; BANTHIA, N. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, v. 99, n. 5, p. 473–479, 2002.
- MOGHADAM, M. A.; IZADIFARD, R. Evaluation of shear strength of plain and steel fibrous concrete at high temperatures, *Construction and Building Materials*, v.215, p.217-216, 2019.
- MORENO JUNIOR, A. L.; VEDOATO, A. P. Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras de aço. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 4, n. 5, p. 784–791, 2011.
- NARAYANAN, R.; DARWISH, I. Y. S. Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement. *ACI Structural Journal*, v. 84, n. 3, p. 216–227, 1987.
- NAVAS, F. O.; GREGORI, J. N.; HERDOCIA, G. L.; SERNA, P.; CUENCA, E. An experimental study on the shear behaviour of reinforced concrete beams with macro-synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, v. 169, p. 888–899, 2018.
- PATIL, S. P.; SANGLE, K. K. Shear and flexural behaviour of prestressed and non-prestressed plain and SFRC concrete beams. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, v. 29, n. 4, p. 321–328, 2017.
- PERCEKA, W.; LIAO, W. C.; WU, Y. F. Shear strength prediction equations and experimental study of high strength steel fiber-reinforced concrete beams with different shear span-to-depth ratios. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 9, n. 22, p. 18–20, 2019.
- PICAZO, A.; GALVEZ, J. C.; ALBERTI, M. G.; ENFADAQUE, A. Assessment of the shear behaviour of polyolefin fibre reinforced concrete and verification by means of digital image correlation. *Construction and Building Materials*, v. 181, p. 565–578, 2018.
- PICAZO, A.; ALBERTI, M. G.; GALVEZ, J. C.; ENFADAQUE, A. Shear slip post-cracking behaviour of polyolefin and steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v. 290, p. 123187, 2021.
- QASIM, O. A. Comparison between the Behaviors of Different Concrete Types in Various Shear Tests. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 745, n. 1, 2020.
- RESENDE, T. L. Contribuição dos mecanismos resistentes à força cortante em vigas de concreto armado sem e com fibras de aço. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2020. 253 p.
- RESENDE, T. L.; CARDOSO, D. C. T.; SHEHATA, L. C. D. Experimental and theoretical investigation on the stress transfer across cracks due to combined action of steel fibers and aggregate interlock. *Cement and Concrete Composites*, v. 124, n. September, 2021.

RILEM TC162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – recommendations, *Materials and Structures*, v. 33, p. 75-81, mar. 2000.

RUIZ, R.; DONIAK, L. O.; TODISCO, L.; CORRES, H. Database of shear tests for prestressed fibre reinforced concrete beams without vertical stirrups and comparison with code provisions. *Structural Concrete*, v. 24, n. 4, p. 4565–4576, 2023.

SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. *Revista Matéria*, v. 18, n. 2, p. 1273-1285, 2013.

SAHOO, D. R.; MARAN, K.; KUMAR, A. Effect of steel and synthetic fibers on shear strength of RC beams without shear stirrups. *Construction and Building Materials*, v. 83, p. 150–158, 2015.

SHOAIB, A.; LUBELL, A. S. Effect of mix composition on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*, v. 286, p. 122760, 2021.

SINGH, B.; JAIN, K. Appraisal of Steel Fibers as Minimum Shear Reinforcement in Concrete Beams. n. 111, 2014.

SINGH, R.; SINGH, H. Shear strength models for steel fibre reinforced concrete beams: Current scenario. *Civil Engineering Journal (Iran)*, v. 7, n. 2, p. 399–406, 2021.

SOETENS, T.; MATTHYS, S. Shear-stress transfer across a crack in steel fibre-reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, v.82, p. 1-13, 2017.

SUK, D. A.; FERRARI, V. Aplicação do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) em vigas submetidas ao cisalhamento. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 24, e129720, jan./dez. 2024.

SUSETYO, B.; GAUVREAU, P.; VECCHIO, F. J. Steel Fiber-Reinforced Concrete Panels in Shear: Analysis and Modeling. *ACI Structural Journal*, v. 110, n. 2, p. 285-296, 2013.

TORRES, J. A.; LANTSOGH, E. O. L. Influence of Fiber Content on Shear Capacity of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams. *Fibers*, v. 7, n. 12, p. 102, 2019.

TRINDADE, J.; GARCIA, S. L.; TORRES, H. Shear strength of concrete with recycled aggregates reinforced with steel fibers. *ACI Materials Journal*, v. 118, n. 5, p. 185–198, 2021.

VECCHIO, F. J.; COLLINS, M. P. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Journal*, v. 83, n.2, p. 219-231, 1986.

VECCHIO, F. J. Disturbed stress field model for reinforced concrete: formulation. *Journal of Structural Engineering*, v. 126, n. 9, p. 1070–1077, 2000.

VISSER, D.; BOSHOFF, W. P. Shear behaviour of concrete V-shaped beams with and without steel fibres. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 54, n. 1, p. 1–23, 2021.

VITOR, P. DE C. P.; SANTOS, A. C. DOS; TRAUTWEIN, L. M. Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço. *Ambiente Construído*, v. 18, n. 3, p. 255–270, 2018.

XU, H.; SHAO, Z.; WANG, Z.; CAI, L.; LI, Z.; JIN, H.; CHEN, T. Experimental study on mechanical properties of fiber reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. *Construction and Building Materials*, v. 261, p. 120610, 2020.

YANG, Y.; UIJL, J. D.; WALRAVEN, J. Critical shear displacement theory: on the way to extending the scope of shear design and assessment for members without shear reinforcement. *Structural Concrete*, v. 17, n. 5, p. 790–798, 2016.

YUAN, T. F.; YOO, D.Y.; YANG, J. M.; YOON, Y. S. Shear Capacity Contribution of Steel Fiber Reinforced High-Strength Concrete Compared with and without Stirrup. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 14, n. 1, 2020.

ZARRINPOUR, M. R.; CHAO, S. H. Shear strength enhancement mechanisms of steel fiber-reinforced concrete slender beams. *ACI Structural Journal*, v. 114, n. 3, p. 729–742, 2017.

ZHANG, F. ; DING, Y. ; XU, J. ; ZHANG, Y. ; ZHU, W. ; SHI, Y. Shear strength prediction for steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*, v. 127, p. 101–116, 2016.

ZHANG, Y.; DENG, M. Shear tests of engineered cementitious composites: Mechanical behavior and toughness evaluation. *Structural Concrete*, v. 22, n. 4, p. 2482–2492, 2021.

ZHAO, J.; LIANG, J.; CHU, L.; SHEN, F. Experimental study on shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams with high-strength reinforcement. *Materials*, v. 11, n. 9, 2018.