

**REFORÇO AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO COM COMPÓSITOS DE FIBRAS DE SISAL EM MATRIZ
GEOPOLIMÉRICA**

ANA CAROLINA LEMOS DE SOUZA PESSANHA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
SETEMBRO/2024

**REFORÇO AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO COM COMPÓSITOS DE FIBRAS DE SISAL EM MATRIZ
GEOPOLIMÉRICA**

ANA CAROLINA LEMOS DE SOUZA PESSANHA

“Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

Orientador: D. Sc. Sergio Luis González Garcia

Coorientador: D. Sc. Dylmar Penteado Dias

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

SETEMBRO/2024

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

P475

Pessanha, Ana Carolina Lemos de Souza.

REFORÇO AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM COMPÓSITOS DE FIBRAS DE SISAL EM MATRIZ GEOPOLIMÉRICA / Ana Carolina Lemos de Souza Pessanha. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2024.

157 f. : il.

Bibliografia: 147 - 154.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2024.

Orientador: Sergio Luis González Garcia.

1. reforço ao cisalhamento . 2. compósitos geopoliméricos . 3. fibras naturais. 4. fibras de sisal . 5. Correlação de Imagem Digital (CID). I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624


REFORÇO AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM COMPÓSITOS DE FIBRAS DE SISAL EM MATRIZ GEOPOLIMÉRICA

ANA CAROLINA LEMOS DE SOUZA PESSANHA


“Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.”

Aprovado em 06/09/2024


Comissão examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **AUGUSTO CESAR DA SILVA BEZERRA**
Data: 03/12/2024 19:07:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Augusto Cesar da Silva Bezerra, D. Sc. – CEFET/MG

Documento assinado digitalmente
 **FELIPE PINHEIRO TEIXEIRA**
Data: 04/12/2024 09:49:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Felipe Pinheiro Teixeira, D. Sc. – CEFET/RJ


Documento assinado digitalmente
 **RANCES CASTILLO LARA**
Data: 04/12/2024 21:48:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Rancés Castilho Lara, D. Sc. – LECIV/UENF

Documento assinado digitalmente
 **DYLMAR PENTEADO DIAS**
Data: 04/12/2024 18:19:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dylmar Penteado Dias, D. Sc. – LECIV/UENF
(Coorientador)

Prof. Sergio Luis González Garcia, D. Sc. – LECIV/UENF
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO LUIS GONZALEZ GARCIA**
Data: 05/12/2024 09:52:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, que em sua infinita bondade e misericórdia me permitiu realizar esse mestrado e foi minha força nos momentos de dificuldade.

Agradeço aos meus pais, Geraldo e Eliédima, por celebrarem comigo cada conquista, por sempre me apoiarem nos meus projetos e sonhos e, muitas vezes, promover meios para que eu pudesse realizá-los.

Ao meu esposo, Marcos Pessanha, por seu apoio incondicional, por ser meu maior incentivador e exemplo na vida acadêmica, por entender meus momentos de ausência para dedicação na realização deste trabalho e por acreditar em mim em momentos que nem eu mesma acreditava.

Ao professor Sergio Luis González por sua orientação em todas as etapas desta pesquisa, por todo seu empenho em resolver os imprevistos que apareceram durante a execução do programa experimental e pelo conhecimento compartilhado.

Ao professor Dylmar Dias por seu conhecimento compartilhado e toda sua contribuição no desenvolvimento da matriz geopolimérica utilizada nesta pesquisa.

À amiga Pamella, que esteve presente em todas as etapas do desenvolvimento desta pesquisa, sendo meu braço direito no laboratório, sendo meu apoio quando muitas das vezes parecia que nada daria certo e por deixar essa caminhada mais leve, trazendo muitos momentos alegres.

Agradeço de maneira especial aos colegas Gabryel e Dhara pela ajuda incondicional na etapa de desenvolvimento do programa experimental.

Ao professor Eduardo Atem por toda sua ajuda na etapa de instrumentação das barras de aço, por também disponibilizar o equipamento para aquisição dos dados do *strain gage*.

Ao professor Noah pela contribuição na realização dos ensaios das fibras de sisal.

Aos técnicos de laboratório, José Roberto e Vanúzia, na realização dos ensaios de caracterização dos materiais.

Aos demais colegas pela convivência e os bons momentos vividos durante o mestrado.

À Empresa Metacaulim do Brasil pela doação do metacaulim utilizado no desenvolvimento desta pesquisa.

À UENF pela infraestrutura e condições necessárias para realização desta pesquisa.

À CAPES pelo fomento da bolsa de estudo.

RESUMO

O potencial dos compósitos reforçados com fibras tem sido amplamente explorado devido às suas propriedades mecânicas elevadas, como resistência à tração e capacidade de deformação. Alguns estudos têm explorado a utilização de matrizes cimentícias ou resina epóxi em combinação com fibras sintéticas e naturais para utilização como elementos de reforço. No entanto, a utilização do geopolímero, um tipo de polímero inorgânico que possui alta resistência inicial e excelentes propriedades mecânicas, também tem sido objeto de investigação. Nesse contexto, o presente trabalho analisou a aplicação de compósitos geopoliméricos pré-fabricados, reforçados com fibras naturais de sisal como reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado. Para a produção dos geopolímeros foi utilizado metacaulim como material precursor, combinado com hidróxido de sódio e silicato de sódio como ativadores alcalinos. Os compósitos foram produzidos com fibras longas de sisal dispostas de forma alinhada. Na caracterização mecânica, realizada por meio do ensaio de tração direta, os compósitos apresentaram comportamento *strain-hardening*. Foram ensaiadas vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras naturais distribuídas em uma e em duas direções, apresentando incremento nos valores do cortante de fissuração de 37% e 52%, respectivamente, quando comparadas às vigas sem reforço. Além disso, o incremento na carga última foi de 55% e 59%, respectivamente. Além do ganho de resistência, as vigas reforçadas apresentaram aumento significativo na rigidez. A técnica de Correlação de Imagem Digital foi empregada para avaliar a cinética de fissuração das vigas e dos compósitos. Os resultados obtidos experimentalmente evidenciaram o alto desempenho dos compósitos geopoliméricos reforçados com fibras naturais de sisal como solução eficaz para o reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado.

Palavras-chave: reforço ao cisalhamento; compósitos geopoliméricos, fibras naturais, fibras de sisal, Correlação de Imagem Digital (CID).

ABSTRACT

The potential of fiber-reinforced composites has been extensively explored due to their high mechanical properties, such as tensile strength and deformation capacity. Some studies have investigated the use of cementitious matrices or epoxy resin combined with synthetic and natural fibers as reinforcement elements. However, the use of geopolymers, a type of inorganic polymer with high initial strength and excellent mechanical properties, has also been a subject of investigation. In this context, the present work analyzed the application of prefabricated geopolymer composites, reinforced with natural sisal fibers, as shear strengthening for reinforced concrete beams. For the production of geopolymers, metakaolin was used as the precursor material, combined with sodium hydroxide and sodium silicate as alkaline activators. The composites were produced with long sisal fibers arranged in an aligned manner. In mechanical characterization, performed through direct tensile testing, the composites exhibited strain-hardening behavior. Reinforced concrete beams strengthened with natural fiber composites distributed in one and in two directions were tested, presenting an increase in the cracking shear values of 37% and 52%, respectively, when compared to the beams without strengthening. In addition, the increase in ultimate load was 55% and 59%, respectively. Besides the gain in strength, the strengthening beams also demonstrated a significant increase in stiffness. The Digital Image Correlation technique was employed to evaluate the cracking kinetics of the beams and composites. The experimental results highlighted the high performance of geopolymer composites reinforced with natural sisal fibers as an effective solution for shear strengthening of reinforced concrete beams.

Keywords: shear strengthening; geopolymeric composites; natural fibers; sisal fibers, Digital Image Correlation (DIC).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes sistemas de geopolímeros com base no número de unidades de siloxo SiO.	26
Figura 2 – Modelo conceitual de formação do geopolímero.	27
Figura 3 – Geometria das vigas ensaiadas (dimensões em mm).	34
Figura 4 – Geometria das vigas ensaiadas.	36
Figura 5 – Comportamento carga-deflexão do concreto simples e reforçado com fibras.	40
Figura 6 – Classificação das fibras.	41
Figura 7 – Microestrutura típica da fibra natural.	45
Figura 8 – Esquema de ensaio das vigas (dimensões em mm).	47
Figura 9 – Diferentes configurações de reforço.	48
Figura 10 – Organograma com as etapas do programa experimental.	52
Figura 11 – Determinação da massa específica do metacaulim: a) processo de aquecimento do picnômetro em banho-maria; b) processo de preenchimento do picnômetro com água.	55
Figura 12 – Granulômetro a laser.	56
Figura 13 – Curva granulométrica do metacaulim.	57
Figura 14 – Espectrômetro de fluorescência de raios X.	58
Figura 15 – MEV: a) amostra de metacaulim fixada no porta-amostra com fita adesiva dupla face; b) microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu.	59
Figura 16 – Micrografias do metacaulim: a) 1000x; b) 2000x.	60
Figura 17 – Caracterização da areia: a) parte das peneiras utilizada no ensaio de granulometria; b) picnômetro com areia e água; c) determinação da massa do picnômetro com areia e água.	62
Figura 18 – Curva granulométrica da areia de rio utilizada na confecção do concreto.	62
Figura 19 – Curva granulométrica do agregado graúdo.	63
Figura 20 – Ensaio de tração direta do aço: a) máquina de ensaio SHIMADZU®; b) realização do ensaio de tração direta no corpo de prova; c) preparação do corpo de prova para colagem do <i>strain gage</i>	66

Figura 21 – Curva tensão <i>versus</i> deformação específica das barras de aço CA-60 (5,0mm).....	67
Figura 22 – Curva tensão <i>versus</i> deformação específica das barras de aço CA-50 (16,0mm).....	67
Figura 23 – Fibras de sisal como recebidas.....	68
Figura 24 – Análise do diâmetro das fibras de sisal em projetor de perfil.	69
Figura 25 – Produção da solução ativadora: a) pesagem da água destilada; b) pesagem do hidróxido de sódio; c) mistura do hidróxido de sódio com a água em um agitador magnético; d) pesagem do silicato de sódio.....	73
Figura 26 – Mistura do metacaulim com areia: a) pesagem do metacaulim; b) adição da areia ao metacaulim; c) metacaulim e areia para serem homogeneizados.....	73
Figura 27 – Fabricação da matriz: a) solução ativadora alcalina e metacaulim + areia preparados previamente; b) solução ativadora alcalina na cuba; c) adição do metacaulim + areia à cuba; d) retirada dos materiais presos à parede e à pá da argamassadeira.....	74
Figura 28 – Corpos de prova cilíndricos para caracterização mecânica da matriz geopolimérica.	75
Figura 29 – Retificação dos corpos-de-prova cilíndricos.....	76
Figura 30 – Corpo de prova cilíndrico sendo ensaiado à compressão axial.	76
Figura 31 – Disposição do corpo de prova para o ensaio de tração por compressão diametral.....	77
Figura 32 – Modo de ruptura dos corpos de prova: a) e b) ruptura no ensaio de resistência à compressão axial; c) e d) ruptura no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	79
Figura 33 – Etapa de tratamento das fibras: a) lavagem das fibras em água quente; b) aferição da temperatura da água; c) e d) fibras secas ao ar por 48h.....	80
Figura 34 – Dimensões do compósito e esquema de moldagem: a) dimensões do compósito (dimensões em mm); b) compósitos com fibras orientadas longitudinalmente (três camadas de fibras); c) compósitos com fibras orientadas a 45° e 315° (quatro camadas de fibras).....	82
Figura 35 – Fibras penteadas, após a saturação, para a preparação dos compósitos ensaiados à tração: a) fibras longitudinais; b) fibras distribuídas a 45° e 315°.	83
Figura 36 – Moldagem dos corpos de prova com fibras distribuídas longitudinalmente: a) 1. ^a camada de matriz; b) 1. ^a camada de fibras; c) 2. ^a camada	

de matriz; d) 2. ^a camada de fibras; e) 3. ^a camada de matriz; f) 3. ^a camada de fibras; g) compósito finalizado com camada de matriz.....	83
Figura 37 – Moldagem dos corpos de prova com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e a 315°: a) 1. ^a camada de fibra; b) 2. ^a camada de fibra; c) 3. ^a camada de fibras; d) 4. ^a camadas de fibras; e) compósito finalizado com camada de matriz.	84
Figura 38 – Corpos de prova após a desmoldagem: a) e b) corpos de prova com as fibras distribuídas longitudinalmente; c) e d) corpos de prova com as fibras distribuídas a 45° e a 315°; e) corpos de prova envoltos com plástico filme.....	85
Figura 39 – Desenho esquemático dos ensaios de tração direta dos compósitos (dimensões em mm).....	86
Figura 40 – Preparação dos corpos de prova para o ensaio de tração direta: a) lixas que foram coladas nas chapas de aço; b) processo de aperto dos parafusos com chave de torque manual.....	86
Figura 41 – Configuração adotada para realização do ensaio de tração direta e aquisição das imagens com a utilização da técnica CID.....	87
Figura 42 – Fôrmas dos compósitos em compensado naval: a) folhas de compensado naval cortadas para fabricação das fôrmas; b) fôrmas prontas com as dimensões do compósito.....	88
Figura 43 - Dimensões dos compósitos pré-fabricados (dimensões em mm).....	88
Figura 44 – Esquema de moldagem dos compósitos: a) compósitos com fibras distribuídas em uma direção (três camadas de fibras); b) compósitos com fibras distribuídas em duas direções (quatro camadas de fibras).	89
Figura 45 – Processo de moldagem do compósito geopolimérico com fibras orientadas em uma direção: a) primeira camada de matriz + primeira camada de fibras; b) segunda camada de fibras; c) última camada de matriz.	90
Figura 46 – Processo de moldagem dos compósitos geopoliméricos com fibras orientadas em duas direções: a) primeira camada de matriz + primeira camada de fibra (longitudinal); b) segunda camada de fibra (transversal), sobreposta à camada de matriz; c) terceira camada de fibra (longitudinal), sobreposta à camada de matriz; d) quarta camada de fibra (transversal), sobreposta à camada de matriz; e) compósito finalizado.....	90

Figura 47 – Compósitos geopoliméricos após a desmoldagem: a) e b) compósito produzido com fibras em uma direção; c) e d) compósito produzido com fibras em duas direções.	91
Figura 48 – Produção do concreto em betoneira: a) homogeneização do agregado graúdo com a água; b) mistura de todos os constituintes do concreto.....	93
Figura 49 – Ensaio de abatimento de cone (<i>slump test</i>).	93
Figura 50 – Corpos de prova cilíndricos de concreto: a) corpos de prova vistos frontalmente; b) corpos de prova - vista superior.	94
Figura 51 – Detalhamento das armaduras (dimensões em cm, exceto diâmetros, que estão em mm).	96
Figura 52 – Instrumentação das barras de aço com <i>strain gauges</i> : a) fixação dos sensores; b) proteção dos sensores com adesivo epóxi; c) sensores das duas barras protegidos com massa adesiva durepoxi.	99
Figura 53 – Moldagem das vigas de concreto armado: a) lançamento do concreto nas fôrmas; b) adensamento com vibrador de imersão; c) regularização da superfície; d) vigas concretadas.....	100
Figura 54 – Compósitos aplicados à viga no vão de cisalhamento (dimensões em mm).....	101
Figura 55 – Esquema de ensaio das vigas (dimensões em mm).....	102
Figura 56 – Configuração do ensaio das vigas.	103
Figura 57 – Curvas tensão <i>versus</i> deformação específica dos compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente: a) curvas de todos os compósitos; b) estágios descritos do comportamento <i>strain-hardening</i> no corpo-de-prova PE1-F0.....	108
Figura 58 – Curva tensão <i>versus</i> deformação específica do compósito com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e 315° (PE5-F45X315).	110
Figura 59 – Padrão de fissuração do corpo de prova PE1-F0: a) estágio inicial; b) surgimento da 1. ^a fissura; c) ruptura do corpo de prova.....	112
Figura 60 – Compósitos após a realização do ensaio de tração direta: a) e b) compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente; c) e d) compósitos com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e a 315°.	112
Figura 61 – Comparação entre os valores de $T_{cr}/\sqrt{f_c}$ das vigas de referência com as vigas reforçadas de cada grupo: a) vigas REF comparadas com as vigas F90; b) vigas REF comparadas com as vigas FM.	119

Figura 62 – Comparação entre os valores de $\tau_u/\sqrt{f_c}$ das vigas de referência com as vigas reforçadas de cada grupo: a) vigas REF comparadas com as vigas F90; b) vigas REF comparadas com as vigas FM.	120
Figura 63 – Curvas força cortante <i>versus</i> deslocamento para as vigas REF.	122
Figura 64 – Curvas força cortante <i>versus</i> deslocamento para as vigas F90.	122
Figura 65 – Curvas força cortante <i>versus</i> deslocamento para as vigas FM.	123
Figura 66 – Comparação entre as curvas força cortante <i>versus</i> deslocamento de todas as vigas ensaiadas.	123
Figura 67 – Curva carga <i>versus</i> deformação específica das armaduras longitudinais das vigas do grupo REF.	127
Figura 68 – Curva carga <i>versus</i> deformação específica das armaduras longitudinais das vigas do grupo F90.	127
Figura 69 – Curva carga <i>versus</i> deformação específica das armaduras longitudinais das vigas do grupo FM.	127
Figura 70 – Comparação entre as curvas carga <i>versus</i> deformação específica das armaduras longitudinais de todas as vigas ensaiadas.	128
Figura 71 - Curva carga <i>versus</i> deformação específica das armaduras transversais das vigas do grupo REF.	129
Figura 72 - Curva carga <i>versus</i> deformação específica das armaduras transversais das vigas do grupo F90.	129
Figura 73 - Curva carga <i>versus</i> deformação específica das armaduras transversais das vigas do grupo FM.	129
Figura 74 - Comparação entre as curvas carga <i>versus</i> deformação específica das armaduras transversais de todas as vigas ensaiadas.	130
Figura 75 – Formato esquemático simplificado da fissura diagonal de cisalhamento das vigas de referência.	131
Figura 76 – Formato esquemático simplificado da fissura diagonal de cisalhamento das vigas reforçadas com compósitos de fibras em uma direção (F90).....	132
Figura 77 – Formato esquemático simplificado da fissura diagonal de cisalhamento das vigas reforçadas com compósitos de fibras em duas direções (FM).	132
Figura 78 – Fissura de cisalhamento dividida em trechos e marcação dos pontos no <i>software Gom Correlate</i> [®] para análise da abertura de fissuras e deslizamento: a) viga F90-2; b) viga FM-5.	133

Figura 79 – Abertura média dos trechos da fissura diagonal crítica das vigas ensaiadas: a) REF-2; b) REF-3; c) F90-1; d) F90-2; e) F90-3; f) FM-4; g) FM-5 e h) FM-6.....	135
Figura 80 – Deslizamento médio dos trechos da fissura crítica diagonal das vigas ensaiadas: a) REF-2; b) REF-3; c) F90-1; d) F90-2; e) F90-3; f) FM-4; g) FM-5 e h) FM-6.....	136
Figura 81 – Campos de deformação horizontal (ϵ_x) e vertical (ϵ_y) para valores de V_{cr} e V_u das vigas de referência: a), b), c) e d) REF-2; e), f), g) e h) REF-3.	139
Figura 82 – Campos de deformação horizontal (ϵ_x) e vertical (ϵ_y) para valores de V_{cr} e V_u das vigas do grupo F90: a), b), c) e d) F90-1; e), f), g) e h) F90-2; i), j), k) e l): F90-3.....	139
Figura 83 – Campos de deformação horizontal (ϵ_x) e vertical (ϵ_y) para valores de V_{cr} e V_u das vigas do grupo FM: a), b), c) e d) FM-4; e), f), g) e h) FM-5; i), j), k) e l): FM-6.	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais resultados encontrados na pesquisa de Zhang <i>et al.</i> (2019). .	38
Tabela 2 - Principais resultados.	49
Tabela 3 – Tamanhos característicos D10, D50, D90, Dmédio do metacaulim.	56
Tabela 4 – Composição química e propriedades físicas do metacaulim.	58
Tabela 5 – Propriedades físicas e químicas do hidróxido de sódio.	60
Tabela 6 – Propriedades físicas e químicas do silicato de sódio alcalino comercial.	61
Tabela 7 – Características do superplastificante Glenium 51.	64
Tabela 8 – Propriedades físicas e mecânicas das barras de aço.	66
Tabela 9 – Características das fibras de sisal utilizadas nesta pesquisa e a comparação com dados da literatura.	70
Tabela 10 – Razões molares da matriz geopolimérica.	71
Tabela 11 – Propriedades mecânicas da matriz geopolimérica, com valores de desvio-padrão entre parênteses.	78
Tabela 12 – Composição do concreto.	92
Tabela 13 – Características das vigas produzidas e ensaiadas com desvio-padrão entre parênteses.	96
Tabela 14 – Carga de ruptura por flexão e cortante teóricas das vigas ensaiadas. ...	97
Tabela 15 – Propriedades do compósito.	105
Tabela 16 – Previsão teórica – capacidade das vigas reforçadas.	105
Tabela 17 – Propriedades mecânicas dos compósitos com o desvio-padrão entre parênteses.	111
Tabela 18 – Comparação das propriedades mecânicas dos compósitos da presente pesquisa com resultados encontrados na literatura.	114
Tabela 19 – Principais resultados dos ensaios das vigas.	116
Tabela 20 – Tensões médias de fissuração e última normalizadas, com o desvio-padrão entre parênteses.	117
Tabela 21 – Comparação entre previsão teórica e resultados experimentais.	121
Tabela 22 – Valores da altura da linha neutra e deformação específica do concreto comprimido à compressão para a carga última.	126

Tabela 23 – Comparativo de ganho na capacidade de carga de vigas reforçadas ao cisalhamento com compósitos com diferentes tipos de fibras encontradas na literatura.	142
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
BET	Superfície específica B.E.T. (Brunauer, Emmet e Teller)
CaO	Óxido de cálcio
CP	Corpo de prova
CID	Correlação de Imagem Digital
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
EDX	Espectrometria de fluorescência de raios X
F90	Compósito de fibras distribuídas em uma direção
FM	Compósito de fibras distribuídas em duas direções
FRM	Compósito reforçado com fibras
GM	Matriz geopolimérica
GPM	Argamassa geopolimérica
H ₂ O	Fórmula química da água
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
KOH	Hidróxido de potássio
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados da UENF
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil da UENF
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NaOH	Hidróxido de sódio
Na ₂ SiO ₃ ·nH ₂ O	Silicato de sódio alcalino
NBR	Norma Brasileira
NEXMAT	Núcleo de Excelência em Materiais Cimentícios
SiO ₂	Dióxido de silício
PVA	Álcool polivinílico
PCM	Argamassa de cimento Portland
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS

a/c	Relação água/cimento em massa
a/d	Relação entre a distância do ponto de aplicação da carga até o apoio/altura útil da viga
Al	Alumínio
A_{sw}	Área da seção transversal da armadura transversal no comprimento s
b_w	Largura da seção transversal da viga
cm	Centímetro
d	Altura útil da viga
f_c	Resistência à compressão do concreto
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração por compressão diametral do concreto
f_y	Resistência ao escoamento do aço
f_u	Resistência última do aço
g	Grama
GPa	Giga Pascal
h	Altura da seção transversal da viga
kg	Quilograma
kN	Quilo Newton
l	Comprimento da viga
m	Metro
mm	Milímetro
m_s	Massa seca da amostra
m_p	Massa do picnômetro
MPa	Mega Pascal
N	Newton
n	Número de barras de aço longitudinais e transversais
s	Espaçamento da armadura transversal
$s_{máx}$	Espaçamento máximo da armadura transversal
Si	Silício
V	Força cortante
V_c	Força cortante resistida pela parcela de concreto
V_{cr}	Força cortante de fissuração
V_u	Força cortante máxima
x	Posição da linha neutra

LETRAS GREGAS

Δ_{cr}	Flecha correspondente à carga de fissuração
Δ_u	Flecha correspondente à carga máxima ou flecha correspondente à última medição
ϵ_{cu}	Deformação específica do concreto para carga máxima
ϵ_{su}	Deformação específica da barra de aço para carga máxima
ϵ_x	Deformação específica na superfície lateral da viga na di-

	reção horizontal
ϵ_y	Deformação específica na superfície lateral da viga na direção vertical
ϵ_{sy}	Deformação específica de escoamento do aço
ϵ_{sy}^*	Deformação específica de escoamento do aço correspondente ao diagrama tensão-deformação bilinear
ϵ_{su}	Deformação última do aço na ruptura
ρ_s	Taxa geométrica de armadura longitudinal de tração
ρ_{sw}	Taxa geométrica de armadura transversal
$\rho_{swmín}$	Taxa geométrica de armadura transversal mínima
σ	Tensão normal
τ	Tensão cisalhante
τ_{cr}	Tensão cisalhante de fissuração
τ_u	Tensão cisalhante máxima
ϕ	Diâmetro das barras de aço

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivos	23
1.1.1 Geral.....	23
1.1.2 Específicos	23
1.2 Justificativas	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Geopolímero	25
2.1.1 Matérias-primas	28
2.1.2 Precursor: metacaulim	29
2.1.3 Solução alcalina.....	29
2.1.4. Comportamento mecânico dos geopolímeros	31
2.1.5 Trabalhabilidade	32
2.1.6. Aplicações	32
2.2 Vigas reforçadas com geopolímeros	33
2.2.1 Irmawaty, Fakhruddin e Ekaputri (2022)	33
2.2.2 Laskar; Talukdar (2019).....	35
2.2.3 Guades <i>et al.</i> (2021)	35
2.2.4 Zhang <i>et al.</i> (2019).....	37
2.3 Compósitos reforçados com fibras	40
2.3.1 Fibras naturais	42
2.3.2 Fibra de sisal	43
2.4 Trabalhos com compósito reforçado com fibras naturais em diferentes aplicações	45
2.4.1 Correia (2011).....	46
2.4.2 Teixeira, Cardoso e Silva (2021).....	46
2.4.3 Makhlouf <i>et al.</i> (2024)	48

2.4.4 Wongsa <i>et al.</i> (2020).....	50
2.5 Considerações Finais	51
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	52
3.1 Considerações iniciais	52
3.2 Materiais.....	54
3.2.1 Metacaulim	54
3.2.1.1 <i>Massa específica</i>	54
3.2.1.2 <i>Granulometria a laser</i>	55
3.2.1.3 <i>Composição química</i>	57
3.2.1.4 <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	58
3.2.2 Hidróxido de sódio	60
3.2.3 Silicato de sódio alcalino.....	60
3.2.4 Agregado miúdo.....	61
3.2.5 Agregado graúdo	63
3.2.6 Cimento Portland	63
3.2.7 Superplastificante	64
3.2.8 Água.....	64
3.2.9 Barras de aço	65
3.2.10 Fibras de sisal.....	67
3.2.10.1 <i>Caracterização dimensional</i>	68
3.2.10.2 <i>Ensaio de tração</i>	69
3.3 Composição da matriz geopolimérica.....	70
3.4 Produção da matriz geopolimérica.....	72
3.5 Propriedades mecânicas da matriz geopolimérica	75
3.5.1 Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral	75
3.6 Tratamento das fibras.....	80
3.7 Comportamento mecânico dos compósitos.....	80

3.8 Desenvolvimento dos compósitos aplicados à viga	87
3.9 Composição do concreto	91
3.10 Propriedades do concreto no estado endurecido.....	94
3.10.1 Resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral.....	94
3.11 Características das vigas	95
3.12 Cálculo da resistência à flexão e ao cortante.....	97
3.13 Produção e instrumentação das vigas.....	98
3.14 Ensaio à flexão a três pontos.....	100
3.15 Previsão teórica da capacidade ao cisalhamento das vigas reforçadas.....	103
3.16 Correlação de Imagem Digital (CID)	105
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
4.1 Comportamento mecânico dos compósitos.....	107
4.2 Ensaio em vigas	114
4.2.1 Resistência à força cortante	117
4.2.1.1 <i>Resultados experimentais versus previsão teórica.....</i>	<i>120</i>
4.2.2 Deslocamento no meio do vão	121
4.2.3 Deformações específicas do concreto na seção no meio do vão	125
4.2.4 Deformação específica das armaduras longitudinais e transversais	126
4.2.5 Fissuração nas vigas ensaiadas.....	130
4.3 Comparação dos resultados obtidos nos ensaios das vigas com estudos da literatura.....	140
5 Considerações finais	144
5.1 Conclusões.....	144
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	145
REFERÊNCIAS.....	147
APÊNDICE A	155

1 INTRODUÇÃO

Por diversas causas, as estruturas sofrem com problemas patológicos e necessitam ser reabilitadas. A falta de manutenção, projetos estruturais ineficientes ou até mesmo a falta de projetos, erro na escolha e dosagem dos materiais e erros de execução são algumas das causas que podem comprometer a segurança das estruturas e fazer com que necessitem de recuperação. Além disso, outro fator que pode ocorrer é a mudança de utilização da construção, que passa a ser submetida a carregamentos para os quais não foi dimensionada.

A recuperação estrutural pode ser dividida em reparo e reforço. O reparo é um conjunto de correções localizadas em que o objetivo é sanar os problemas patológicos e permitir, dessa forma, que a estrutura volte a suportar o carregamento para qual foi dimensionada. Já o reforço é aplicado quando o objetivo é aumentar a capacidade portante da estrutura.

Os serviços de reparo e reforço são recorrentes na Construção Civil, uma vez que os custos envolvidos nas construções são altos, não sendo viável sua inutilização ou demolição.

Há no mercado diversas técnicas de reparo/reforço de vigas de concreto armado que apresentam resultados confiáveis. Pode-se citar algumas soluções convencionais que são utilizadas, a saber: protensão externa, colagem externa de chapas de aço na superfície da viga, adição de armaduras, aplicação de polímeros reforçados com fibras.

Em diversas pesquisas na Engenharia Civil, a reabilitação estrutural em vigas de concreto armado é desenvolvida com a utilização de argamassas e concretos convencionais. Porém, um método alternativo que possui alguns estudos de aplicação em reabilitação de estruturas é a utilização de argamassas geopoliméricas. O geopolímero é um polímero inorgânico que pode ser produzido a partir de resíduos industriais ou argilas calcinadas.

Os geopolímeros apresentam características mecânicas semelhantes às do concreto. Além disso, a estrutura amorfa e inorgânica deste material permite que ele apresente durabilidade térmica (Thiyagarajan *et al.*, 2022). Destaca-se também nesses materiais a capacidade de alcançar altas resistências nas idades iniciais (Mehta; Siddique, 2017; Soares *et al.*, 2021), e a boa aderência com o substrato de

cimento Portland (Laskar; Talukdar, 2019), sendo este último um parâmetro de suma importância no desempenho de materiais utilizados como reforço em estruturas de concreto.

Apesar de apresentar boas propriedades mecânicas e de durabilidade, assim como argamassas e concretos convencionais, os geopolímeros são caracterizados pela baixa resistência à tração e à flexão, e baixa capacidade de deformação, levando a falhas abruptas (Silva *et al.*, 2020). A fim de contornar essa limitação e melhorar a tenacidade e resistência aos esforços de tração do material, têm se desenvolvido pesquisas com adição de fibras, tanto naturais quanto sintéticas à matriz geopolimérica (Mahmood *et al.*, 2021). A utilização de fibras como reforço em matrizes à base de cimento Portland é reconhecida como sendo capaz de aumentar a tenacidade, permitindo que a matriz continue a suportar elevadas cargas mesmo após o surgimento da primeira fissura (Mehta; Monteiro, 2006).

Diferentes tipos de fibras podem ser adicionados a matrizes cimentícias e geopoliméricas, como fibras sintéticas de aço, carbono, fibras de álcool polivinílico (PVA), como também fibras naturais. Com o objetivo de se produzir um material compósito mais sustentável, a incorporação de fibras naturais se torna viável, visto que esses tipos de fibras são provenientes de fontes renováveis e são biodegradáveis.

A utilização de fibras naturais como reforço em matrizes cimentícias tem sido objeto de investigação nos últimos anos (Silva Junior; Souza; Silva, 2021; Teixeira *et al.*, 2022), e tem se mostrado uma alternativa de baixo custo e que apresenta bom desempenho mecânico (Ardanuy; Claramunt; Toledo Filho, 2015). Em relação à matriz geopolimérica, predomina-se as pesquisas com a utilização de fibras sintéticas (Bernal *et al.*, 2010; He *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2007).

Diante das boas propriedades apresentadas pelos geopolímeros, aliada a uma fibra proveniente de fonte renovável, esta pesquisa visou produzir painéis pré-fabricados de matriz geopolimérica reforçados com fibras naturais de sisal e avaliar a sua utilização como material de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado.

O trabalho desenvolvido visou ampliar o entendimento do comportamento deste material compósito, suas características e propriedades, e mostrar sua potencialidade da utilização como material de reparo/reforço de estruturas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o desempenho de compósitos pré-fabricados de matriz geopolimérica reforçada com fibras naturais de sisal para utilização como reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado.

1.1.2 Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa foram:

- produzir e caracterizar mecanicamente compósitos geopoliméricos reforçados com fibras longas de sisal distribuídas de forma alinhada;
- avaliar a influência da orientação da fibra de sisal, distribuída de forma longitudinal e em duas direções, no comportamento mecânico do compósito;
- aplicar compósitos pré-fabricados de matriz geopolimérica reforçada com fibra de sisal com duas diferentes orientações de fibras como reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado;
- comparar o desempenho ao cisalhamento de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos geopoliméricos pré-fabricados com vigas de referência (sem reforço), a fim de avaliar o ganho de resistência produzido pelo compósito, bem como seu potencial de utilização.

1.2 Justificativas

As boas propriedades apresentadas na literatura sobre os materiais geopoliméricos, como alta resistência inicial, durabilidade térmica e química (Singh *et al.*, 2015; Thiyagarajan *et al.*, 2022), aderência com o substrato de concreto (Guades *et al.*, 2021; Laskar; Talukdar, 2019) são motivações para novos estudos sobre sua utilização como matriz de reforço. Porém, para essas aplicações, as propriedades de resistência à tração e tenacidade devem ser melhoradas.

A adição de diferentes tipos de fibras em matrizes frágeis como as de

geopolímero tem esse objetivo. A constante busca pelo desenvolvimento de materiais sustentáveis tem despertado o interesse na utilização de materiais provenientes de fontes renováveis, como as fibras naturais.

O desenvolvimento de uma nova pesquisa sobre compósitos geopoliméricos reforçados com fibras naturais visa contribuir com o desenvolvimento de materiais de alto desempenho mecânico que sejam inovadores e alternativos aos comumente utilizados. A necessidade de estudos sobre o comportamento mecânico deste material e seu desempenho quando utilizados como método de reforço em vigas de concreto armado é essencial para mostrar suas potencialidades e para futura aplicação na indústria da Construção Civil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geopolímero

Diversos incêndios desastrosos ocorridos na França entre 1970 e 1973 impulsionaram pesquisas por novos materiais que fossem resistentes ao calor, na configuração de materiais poliméricos não inflamáveis e não combustíveis (Davidovits, 1991).

Os estudos sobre geopolímeros vêm sendo desenvolvidos desde 1939; porém, somente em 1972 o conceito de geopolímero foi introduzido e aplicado por Joseph Davidovits, cujo foi patenteado por ele em 1981. O autor define geopolímero como um material inorgânico do tipo cerâmico produzido em baixas temperaturas, que pode ser fabricado a partir de aluminossilicatos provenientes do metacaulim ou de resíduos industriais como a cinza volante e a escória de alto-forno (Davidovits, 2020).

De acordo com Davidovits (2020), os geopolímeros são novos materiais para revestimentos e adesivos, ligantes para compósitos com fibras, como também um novo cimento para concreto. Segundo ele, este material possui ampla potencialidade de aplicação, devido a características como, por exemplo, em aplicações onde se necessite de resistência ao fogo, em compósitos para reparo e reforço estrutural, resinas de alta tecnologia, entre outras.

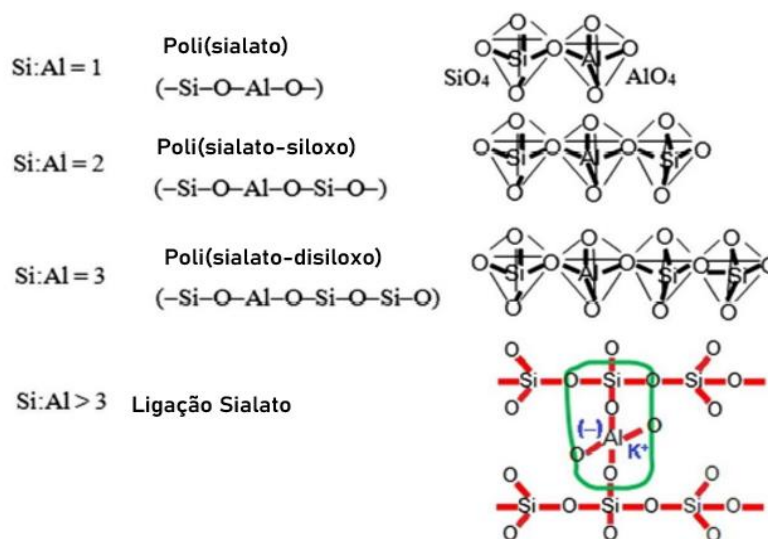
A formação do geopolímero acontece a partir da reação química entre os compostos sólidos dos aluminossilicatos (Si_2O_5 , Al_2O_2) e uma solução alcalina altamente concentrada (Davidovits, 1991). As matérias-primas de base são constituídas de duas partes, a saber: sólidos de aluminossilicatos reativos, que podem ser provenientes de resíduos industriais como a cinza volante e a escória de alto-forno, ou de ocorrência natural, como o metacaulim (obtido a partir da calcinação do caulim), e uma solução ativadora alcalina, podendo ser hidróxidos alcalinos (sódio e/ou potássio) e/ou silicatos (Davidovits, 2020).

O mecanismo de reação envolvido é chamado de geopolimerização, que é uma reação exotérmica que ocorre por meio da policondensação da matéria-prima fonte de aluminossilicatos em baixa temperatura (Davidovits, 1991).

Os geopolímeros, também chamados polissilicatos (grande cadeia molecular constituída de silício, oxigênio e alumínio), consistem em tetraedros de SiO_4 e AlO_4

ligados alternadamente, compartilhando todos os oxigênios. Nas cavidades das estruturas devem estar presentes os íons positivos (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{++} , Ba^{++} , NH_4^+ e H_3O^+) de forma a equilibrar a carga negativa de Al^{3+} e Si^{4+} em número de coordenação IV com o oxigênio (Davidovits, 1991). A Figura 1 mostra as três estruturas básicas dos geopolímeros de acordo com as razões Si/Al. Essas estruturas são divididas em: poli-(sialato), poli-(sialato-siloxo) e poli-(sialato-disiloxo) (Liew *et al.*, 2016). Sialato é uma abreviação de sílico-oxo-aluminato.

Figura 1 – Diferentes sistemas de geopolímeros com base no número de unidades de siloxo SiO.



Fonte: Adaptado de Davidovits (2002).

Segundo Davidovits (1991), os geopolímeros possuem estrutura que varia de amorfa à semicristalina. A fórmula empírica deste material é dada pela Equação 1.

$$M_n \cdot \{-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O} \quad (1)$$

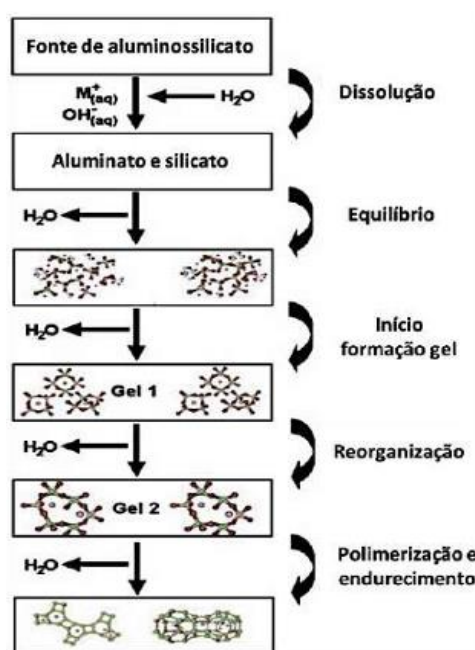
Onde, M é um íon positivo, como potássio, sódio ou cálcio; n significa o grau de policondensação; z assume valor de 1,2 ou 3, de acordo com os três tipos de polissialatos, conforme mostrado na Figura 1.

Duxson *et al.* (2007) apresenta de maneira simplificada o mecanismo de síntese dos geopolímeros, que é dividido em seis etapas: dissolução, equilíbrio, gelificação, reorganização, polimerização e endurecimento. Na Figura 2 o processo

é apresentado linearmente; entretanto, estes mecanismos ocorrem de forma simultânea.

No processo de dissolução a fonte sólida de aluminossilicato sofre uma reação de hidrólise alcalina devido à alta concentração de OH^- e, como consequência, forma-se o aluminato e o silicato (Duxson *et al.*, 2007).

Figura 2 – Modelo conceitual de formação do geopolímero.



Fonte: Adaptado de Duxson *et al.* (2007)

Quando em solução, uma mistura de diferentes espécies de silicatos, aluminatos e aluminossilicatos é formada devido às espécies liberadas na dissolução e à presença da solução ativadora. Na presença de um pH elevado, há rápida dissolução dos aluminossilicatos amorfos, dando origem à uma solução supersaturada de aluminossilicato devido à condensação de oligómeros; isso resulta na formação de um gel bifásico composto pelo aglutinante de alumínio, silicato e água (Duxson *et al.*, 2007).

Na etapa de reorganização, o sistema continua a se rearranjar, e ao passo que há aumento na conectividade da rede de gel, há a formação de uma rede tridimensional (3D) de aluminossilicatos.

É durante o estágio de crescimento que os núcleos atingem tamanho crítico e os cristais se desenvolvem. É nessa fase de reorganização estrutural que se determina a microestrutura e a distribuição dos poros do material, sendo essenciais

nas propriedades físicas dos geopolímeros. A etapa final se caracteriza pela polimerização de todo sistema, que se torna uma massa sólida (Duxson *et al.*, 2005; Nawaz; Heitor; Sivakumar, 2020).

As propriedades mecânicas dos geopolímeros são determinadas de acordo com a natureza química do gel formado. Por isso, uma boa seleção das matérias-primas e uma correta dosagem são fatores importantes para se alcançar as propriedades esperadas do material (Mahmood *et al.*, 2021).

Estudos desenvolvidos com geopolímeros demonstraram que esses materiais apresentam propriedades comparáveis e até mesmo superiores ao do cimento Portland (Dias; Thaumaturgo, 2005). Como características dos geopolímeros pode-se destacar: boas propriedades mecânicas, resistência a altas temperaturas, resistência à corrosão, além de resistência a sulfatos e a ácidos. Essas propriedades, unidas ao fato de não ser um material agressivo ao meio ambiente, faz com que os geopolímeros sejam considerados um substituto viável ao cimento Portland (Thiyagarajan *et al.*, 2022).

2.1.1 Matérias-primas

O geopolímero é um material aglutinante tridimensional de aluminossilicato. São utilizadas como matérias-primas para sua preparação, em presença de um ativador alcalino, um material inorgânico rico em sílica e alumina, como o metacaulim ou resíduos industriais como as cinzas da queima do carvão mineral e a escória de alto-forno (Rovnaník, 2010). Alguns parâmetros são considerados essenciais para o processo de polimerização e precisam ser analisados na fase de seleção das matérias-primas para a produção dos geopolímeros, tais como: teor de sílica reativa (amorfa) e distribuição do tamanho das partículas (Criado; Palomo; Fernandez-Jimenez, 2005). A escolha das matérias-primas determina as características microscópicas, físicas, mecânicas, químicas e térmicas dos geopolímeros (Mahmood *et al.*, 2021).

O precursor sólido de aluminossilicato geralmente é ativado por uma solução alcalina altamente concentrada (Neupane, 2016). Para que os aluminossilicatos sejam dissolvidos, é necessário um meio alcalino forte, com valores de pH elevado. Geralmente são utilizados hidróxidos e carbonatos de metais alcalinos-terrosos para esse fim (Mahmood *et al.*, 2021).

2.1.2 Precursor: metacaulim

Diferentes materiais podem ser utilizados como precursores na fabricação dos geopolímeros. O metacaulim, um tipo de argila calcinada, já foi utilizada por diversos pesquisadores (Cheng *et al.*, 2012; Duxson *et al.*, 2007; Ozer; Soyer-Uzun, 2015; Pacheco-Torgal *et al.*, 2011; Rovnaník, 2010).

O metacaulim é um material pozolânico composto, principalmente, de sílica e alumina, pertencente à família das argilas calcinadas, e são obtidos a partir da ativação térmica da argila caulim em temperaturas em torno de 500°C a 800°C. A calcinação do caulim ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) leva à quebra da estrutura pela perda de íons de hidroxila, formando assim o metacaulim $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ (Siddique; Klaus, 2009).

Nos geopolímeros à base de metacaulim, o tempo de pega é reduzido para elevado teor de Al_2O_3 ; porém, como resultado, tem-se uma diminuição na resistência devido a menor concentração SiO_2 . Dessa forma, mesmo que o Al tenha papel importante no tempo de pega, o maior desenvolvimento de resistência é devido a quantidade de Si; portanto, maiores razões de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ são responsáveis por ganhos de resistência em idades posteriores (Silva; Sagoe-Crenstil; Sirivivatnanon, 2007).

Tanto os geopolímeros gerados com metacaulim como com resíduo industrial, apresentam características únicas. Embora apresentem boas características e possam ser fabricados com propriedades previsíveis, geralmente, os geopolímeros à base de metacaulim, (matéria-prima com partículas em forma de placa), necessitam de elevada quantidade de água, e, como consequência, pode ocorrer aumento na porosidade. Já os geopolímeros à base de cinza volante, de maneira geral, são mais resistentes mecanicamente e apresentam maior durabilidade em relação aos fabricados com metacaulim. Os geopolímeros à base de escória de alto-forno apresentam maior resistência a ácidos e maior resistência inicial que os dois anteriores. (Duxson *et al.*, 2007; Singh *et al.*, 2015).

2.1.3 Solução alcalina

Para que ocorra a reação química que origina os geopolímeros, é necessário, além dos materiais precursores mencionados, um meio altamente alcalino, pois é nessas condições que ocorre a geopolimerização.

O meio alcalino altamente concentrado faz com que ocorra a hidrólise das partículas dos aluminossilicatos do material precursor. Dessa forma, a solução ativadora exerce papel fundamental na dissolução do aluminossilicato (Görhan; Kürklü, 2014). São comumente utilizados como ativadores alcalinos: hidróxido de sódio (NaOH) ou de Potássio (KOH), como também silicato de sódio e de potássio (Somna *et al.*, 2011).

A ativação dos geopolímeros por meio alcalino pode ser por fonte líquida ou sólida. O mecanismo de ativação líquida ocorre pela mistura de hidróxidos de metais alcalinos ou silicatos com a água. Já a ativação sólida acontece pela mistura de hidróxidos de metais alcalinos com e silicatos em forma de pó (Mahmood *et al.*, 2021).

O hidróxido de sódio, também conhecido como soda cáustica, em geral, é o meio alcalino mais utilizado para promover a geopolimerização. É um material sólido branco que, ao reagir com a água, libera grande quantidade de calor - reação exotérmica (Mahmood *et al.*, 2021). O hidróxido de sódio apresenta maior solubilidade em relação ao hidróxido de potássio, ou seja, tende a liberar maiores quantidades de aluminato e silicato dos materiais precursores. O hidróxido de sódio também apresenta maior viscosidade em relação ao hidróxido de potássio (Zhang *et al.*, 2017), resultando em um geopolímero com menor trabalhabilidade, podendo afetar suas propriedades reológicas (Pacheco-Torgal *et al.*, 2011).

Em relação aos silicatos alcalinos, os mais utilizados são o de sódio e o de potássio. Palomo, Grutzeck e Blanco (1999) mostraram que a solução alcalina contendo silicato apresenta taxas de reações mais altas quando comparadas com soluções com hidróxidos, pois o silicato da solução se torna uma fonte adicional de SiO₂ para o sistema (Palomo; Grutzeck; Blanco, 1999). Da mesma forma que o hidróxido de sódio, o silicato de sódio apresenta maior viscosidade em relação ao silicato de potássio (Pacheco-Torgal *et al.*, 2011).

A natureza da solução alcalina tem grande influência nas propriedades mecânicas do produto final. Para se obter boa resistência mecânica nos geopolímeros é recomendável valores de pH entre 13 e 14 (Khale; Chaudhary, 2007). Alguns pesquisadores mostraram que os geopolímeros à base de metacaulim com solução alcalina utilizando como base o cátion sódio apresentaram elevada resistência à flexão e à compressão (Pacheco-Torgal *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2017).

Zhang *et al.* (2017) concluíram que o processo de crescimento da resistência à compressão dos geopolímeros é fortemente dependente do cátion utilizado na solução alcalina (Na^+ ou K^+). Os pesquisadores mostraram que compostos formados por Na^+ , para a mesma razão Si/Al, apresentam maior resistência à compressão em relação aos compostos produzidos com K^+ . Essa característica está relacionada com a baixa tendência de dissolução do K^+ ; dessa forma partículas do precursor metacaulim podem ficar sem reagir.

2.1.4. Comportamento mecânico dos geopolímeros

As propriedades mecânicas dos geopolímeros são fortemente afetadas por algumas condições, como a relação Si/Al (Ozer; Soyer-Uzun, 2015), a concentração de hidróxido (Wang; Li; Yan, 2005), devido às condições de cura (Rovnaník, 2010; Yuan *et al.*, 2016), como também pelo tipo de cátion utilizado na solução alcalina (Xu; van Deventer; Lukey, 2001).

Mehta; Siddique (2017) conduziram estudos com concreto geopolimérico que atingiram 92% de resistência à compressão aos três dias e 97% aos sete dias em relação aos vinte e oito dias.

Soares (2020) produziu resinas geopoliméricas utilizando o metacaulim como material precursor e combinações de hidróxidos e silicatos de sódio e potássio. A resistência à compressão aos três dias da resina produzida com hidróxido e silicato de sódio foi cerca de 85% da resistência obtida aos vinte e oito dias, e a resistência obtida aos 14 dias foi a mesma ao obtida aos 28 dias.

Esses resultados evidenciam que este material pode ser utilizado em situações que é necessária alta resistência inicial, como nos casos de reparos e reforço de estruturas de concreto armado. A alta resistência inicial, também faz com que os geopolímeros apresentem grande potencial de utilização na indústria de pré-moldados (Ranjbar *et al.*, 2016).

O estudo desenvolvido por Laskar; Talukdar (2019) mostram que além do elevado ganho de resistência dos geopolímeros em idades iniciais, este material apresenta boa aderência com substrato de concreto armado tanto em estado danificado quanto em estágio intacto, sendo essa uma característica desejável para aplicações em reparos e reforço de estruturas de concreto armado.

2.1.5 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade dos geopolímeros está muito ligada às matérias-primas utilizadas, principalmente pelas características do material precursor. O metacaulim, por exemplo, tem sua estrutura em forma de placas; isso faz com que ocorra redução da fluidez da pasta devido à fricção entre as partículas (Duxson *et al.*, 2007).

No estudo desenvolvido por Trindade (2017), as argamassas obtidas apresentaram boas consistências quando comparadas com as sugestões da literatura sobre trabalhabilidade. Nas argamassas em que parte do metacaulim foi substituído por sílica ativa ou escória de alto-forno, a matriz necessitou de volume maior de água na solução ativadora, tornando a mistura mais fluida. O que também pôde ser observado no estudo é que o metacaulim retém grande quantidade de água presente na mistura.

Rangel (2017), em seu estudo com geopolímero à base de metacaulim, observou que o aumento na relação água/sólidos conduz a uma melhor trabalhabilidade. Também foi observado que o aumento da relação ativador/precursor, tanto para ativadores à base NaOH quanto para ativadores à base de KOH, desempenha influência sobre a trabalhabilidade. O autor também destacou que os geopolímeros ativados por KOH apresentaram maior trabalhabilidade em relação aos ativados por NaOH.

2.1.6. Aplicações

Algumas empresas ao redor do mundo já aplicam geopolímeros em média e em larga escala. Fundada pelo pesquisador J.van Deventer, que possui grande contribuição em pesquisas na área, a empresa australiana Zeobond é uma das pioneiras na comercialização dos geopolímeros.

A Wagner's EFC é outra empresa australiana que se destaca na comercialização dos geopolímeros. Esta empresa atuou no projeto de maior aplicação de concreto geopolimérico do mundo, que foi a construção do aeroporto Brisbane West Wellcamp na Austrália.

Outras empresas também trabalham com produtos geopoliméricos, como a americana Geopolymer Solutions LLC, que trabalha com concreto geopolimérico de

alta resistência a ácidos e a altas temperaturas, e a Clock Spring, que trabalha com argamassas geopoliméricas reforçadas com fibras para reabilitação de tubulações de grande diâmetro, bueiros e áreas de contenções.

2.2 Vigas reforçadas com geopolímeros

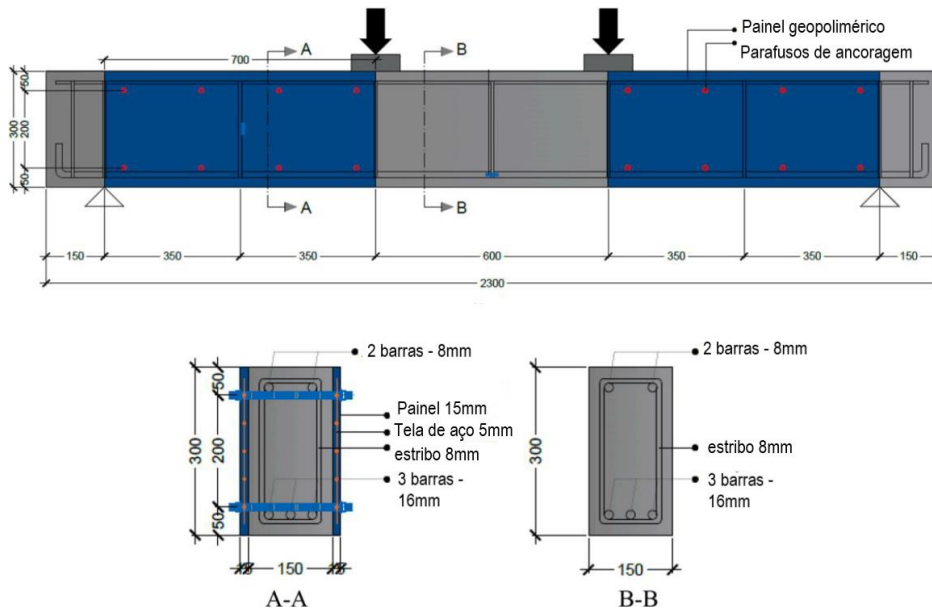
As boas propriedades mecânicas dos geopolímeros e sua capacidade de ganho resistência inicial demonstram o potencial de aplicação deste material nos serviços de reparo e reforço de estruturas de concreto armado. Alguns pesquisadores desenvolveram estudos com diferentes métodos de reforço utilizando matrizes geopoliméricas. Neste tópico serão apresentados alguns desses estudos.

2.2.1 Irmawaty, Fakhrudin e Ekaputri (2022)

Os autores produziram painéis pré-fabricados de matriz geopolimérica com 15mm de espessura reforçados com 0,6% de fibras curtas de álcool polivinílico (PVA) dispersas na matriz. Os compósitos foram produzidos com 700 mm de comprimento e 300 mm de altura. As vigas produzidas possuíam 2300 mm de comprimento e seção transversal de 150 mm x 300 mm (largura x altura). A matriz atingiu resistência à compressão de 21,5 MPa aos 28 dias.

Para as análises, os painéis foram colados nas duas faces laterais das vigas, e foram utilizados parafusos espaçados a 200mm e a 300mm para a fixação dos compósitos para reforço das vigas. Além dos parâmetros mencionados, os compósitos foram armados com uma tela de arame. A Figura 3 mostra a geometria das vigas e a aplicação do reforço.

Figura 3 – Geometria das vigas ensaiadas (dimensões em mm).



Fonte: Adaptado de Irmawaty, Fakhruddin e Ekaputri (2022).

O método de reforço utilizado aumentou significativamente a carga última das vigas ensaiadas. O ganho de resistência variou de 14,1% a 34,9%. Nas vigas reforçadas com painéis geopoliméricos que continham tela de aço e que foram utilizadas a ancoragem mecânica espaçada a 200mm no eixo longitudinal, apresentaram aumento de carga de 34,9% em relação à viga sem nenhum reforço.

Nas vigas reforçadas com painéis com a mesma distância de ancoragem dos parafusos, porém sem a utilização de tela de aço nos compósitos geopoliméricos, o ganho de resistência foi menor, de 14,1%, evidenciando que a presença da tela suporta parcela do esforço ao cisalhamento.

Além dessas duas configurações, também foi analisada uma viga reforçada com painel geopolimérico que continha a tela de arame, porém foram utilizados maior espaçamento na ancoragem mecânica, igual a 300mm. Nesse caso, o ganho de resistência foi de 22,8%. Por fim, também foi analisada uma viga reforçada com painel reforçado de matriz cimentícia, contendo tela de arame e ancoragem espaçada a 200mm. A matriz cimentícia possuía resistência à compressão aos 28 dias, semelhante ao da matriz geopolimérica (23,2 MPa) e, nesse caso, o ganho na capacidade de carga com esse painel foi de 29,5%. O ganho de resistência foi semelhante entre os painéis cimentícios e geopoliméricos, mostrando o potencial dos geopolímeros como material alternativo ao cimento Portland.

2.2.2 Laskar; Talukdar (2019)

Os estudos desenvolvidos por Laskar; Talukdar (2019) compararam o desempenho de argamassas geopoliméricas (GPM) e de cimento Portland (PCM) para o reparo de vigas de concreto armado total e parcialmente danificadas. Os resultados obtidos mostraram falha de aderência entre o PCM e o concreto da viga, principalmente em idades iniciais. Já o GPM apresentou melhor aderência e maior resistência em idades precoces, sendo essa característica desejável quando se fala em reparo.

O GPM apresentou melhor desempenho no reparo em relação ao PCM. As vigas totalmente danificadas que foram reparadas com GPM alcançaram 98% da carga atingida pela viga antes do dano, aos 28 dias, enquanto as vigas reparadas com PCM alcançaram apenas 67%.

No caso das vigas parcialmente danificadas, esse desempenho foi ainda maior, pois a carga obtida da viga reparada com GPM foi 1,11 vezes maior que a da viga sem dano, mostrando que esse sistema funciona melhor quando aplicado no estágio inicial do dano. As vigas reparadas com GPM também apresentaram maior ductilidade em relação às reparadas com PCM (Laskar; Talukdar, 2019).

2.2.3 Guades *et al.* (2021)

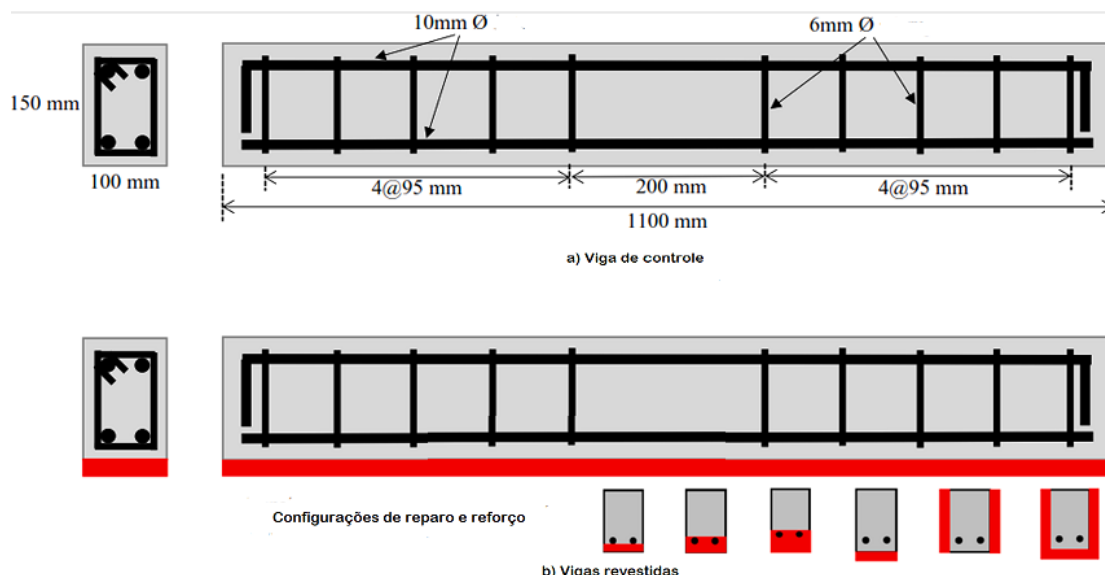
Guades *et al.* (2021) avaliaram o comportamento à flexão de vigas de concreto armado revestidas com geopolímeros reforçado com fibras híbridas de aço e de álcool polivinílico (PVA).

Foi utilizado geopolímero produzido a partir de cinza volantes. As fibras de aço tinham um comprimento de onze milímetros e as fibras de PVA de dezoito milímetros. O volume de fibras utilizado foi de 2% (1% de fibra de aço e 1% de fibra de PVA).

As vigas revestidas foram divididas em dois grupos: vigas reparadas (sem alteração da seção transversal); e vigas reforçadas, com aumento da seção transversal em relação à viga de referência devido ao acréscimo de camadas do compósito. A Figura 4 mostra as dimensões das vigas e o esquema de aplicação do revestimento. A espessura do revestimento variou de 25mm a 66mm. Foram

ensaiadas à flexão a quatro pontos um total de quatorze vigas, duas de referência e duas vigas para cada configuração de reforço adotada.

Figura 4 – Geometria das vigas ensaiadas.



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

As vigas reforçadas com o compósito apresentaram aumento na carga de fissuração, de escoamento e última, nas porcentagens de 28% a 58%, 8% a 35% e 10% a 33%, em relação às vigas de referência. As vigas reparadas com 25 mm e 41 mm de espessura tiveram a ductilidade e a tenacidade aumentadas de 3% a 8% e 21 a 25% em relação às vigas de controle, respectivamente.

As vigas reforçadas com o compósito com 25mm de espessura na parte inferior, nas duas laterais da viga e com os três lados reforçados exibiram aumento de carga de fissuração de 94% a 167%, e aumento na carga de escoamento da armadura de 24% a 62%. Em relação à carga última, as vigas com essa configuração de reforço apresentaram incremento de carga de 21% a 62%, quando o reforço variou de uma a três camadas, respectivamente.

As vigas de concreto armado reforçadas nas duas faces laterais tiveram ductilidade comparável com a viga de referência, e apresentaram aumento na capacidade de absorção de energia de 30%. Em contrapartida, as vigas reforçadas em três lados (duas faces laterais e fundo) tiveram comportamento menos dúctil.

O compósito geopolimérico apresentou boa aderência com o substrato de concreto da viga, pois não houve descolamento até a falha, independentemente da configuração do reparo/reforço adotada.

2.2.4 Zhang *et al.* (2019)

Zhang *et al.* (2019) produziram vigas de concreto armado reforçadas com argamassa geopolimérica e tecido de carbono. Os parâmetros analisados foram: orientação do tecido (unidirecional, bidirecional); espaçamento entre os fios do tecido (7 mm e 10 mm); número de camada de tecido, matriz utilizada (geopolímero ou resina epóxi) e presença de tiras de aço para ancoragem.

Foram produzidas vigas de concreto armado com dimensões de 150 mm x 300 mm x 2000 mm (largura x altura x comprimento). A matriz geopolimérica utilizada como reforço foi produzida utilizando como materiais precursores 50% de metacaulim e 50% de cinza volante, e solução alcalina de silicato de potássio. A matriz geopolimérica alcançou resistência à compressão de 43,3 MPa aos 28 dias e resistência à tração de 3,0MPa. Para efeito de comparação, uma viga foi reforçada utilizando resina epóxi com resistência de 47,2 MPa.

As vigas receberam o reforço após 30 dias de cura. O reforço foi aplicado nos três lados da viga, em formato de jaqueta em U, e em uma das vigas não foi aplicado nenhum tipo de reforço (referência), sendo denominada Bcon. As vigas reforçadas foram denominadas como X-YN-A, em que X se refere ao tipo de tecido utilizado (Uni10 para têxtil unidirecional com espaçamento entre fios de 10 mm, Bi10 e Bi7 para têxteis bidirecionais com espaçamento entre fios de 10 mm e 7 mm, respectivamente), Y para a matriz utilizada no reforço (GM para argamassa geopolimérica e ER para resina epóxi), N representando o número de camadas têxteis (1, 2 e 3) e, por fim, a letra A representando a presença de ancoragem com tiras de aço. Algumas vigas receberam ancoragem com tiras de aço finas, coladas longitudinalmente nas vigas e fixadas por parafusos mecânicos. As vigas foram ensaiadas em uma configuração de carga a 4 pontos, simplesmente apoiadas, com vão de cisalhamento de 700 mm.

A viga de controle rompeu por cisalhamento, enquanto as reforçadas romperam por cisalhamento, com ruptura das fibras, ou por descolamento do reforço e delaminação do substrato de concreto. A Tabela 1 mostra os resultados encontrados e os modos de ruptura das vigas.

Tabela 1 – Principais resultados encontrados na pesquisa de Zhang *et al.* (2019).

Viga	V _{cr} (kN)	V _u (kN)	Ganho de resistência (%)	Modo de ruptura
Bcon	95	170	-	Cisalhamento
Bi10-GM1-A	135	285	67,6	Cisalhamento + ruptura da fibra
Bi10-GM1	130	250	47,1	Cisalhamento + ruptura da fibra
Bi7-GM1-A	160	315	85,3	Cisalhamento + ruptura da fibra
Bi7-GM1	160	290	70,6	Cisalhamento + ruptura da fibra
Bi10-GM2-A	150	385	126,5	Cisalhamento + ruptura da fibra
Bi10-GM2	170	350	105,9	Cisalhamento + ruptura da fibra
Uni10-GM1	130	230	35,3	Cisalhamento + ruptura da fibra
Bi10-GM3	180	360	111,8	Descolamento do reforço + delaminação
Bi10-ER1	-	340	100,0	Descolamento do reforço + delaminação

Fonte: adaptado de Zhang *et al.* (2019).

Observa-se que o aumento do número de camadas de tecido proporcionou aumento na carga de fissuração e na carga de ruptura, porém esse aumento não ocorreu de forma proporcional. O percentual de aumento da capacidade de carga de duas camadas de tecido para três é inferior ao aumento de uma para duas camadas. Esse comportamento pode ser explicado pela mudança no modo de falha do reforço com três camadas (Bi10-GM3), que rompeu por descolamento do reforço e deslocamento do substrato de concreto, enquanto os reforços com uma e duas camadas de fibras (Bi10-GM1 e Bi10-GM2) falharam por cisalhamento e ruptura das fibras. Isso mostra que toda a capacidade da viga reforçada Bi10-GM3 não foi utilizada.

Comparando as cargas de ruptura da viga reforçada com tecido bidirecional (Bi10-GM1) com a da viga com tecido unidirecional (Uni10-GM1), nota-se que o incremento de carga da viga Bi10-GM1 é maior em 11,8%, isso indica que as fibras longitudinais atuaram na melhoria da capacidade ao cisalhamento, porém esse aumento foi pouco expressivo.

Nas vigas reforçadas com tecido com menor espaçamento (Bi7-GM1) o ganho de capacidade ao cisalhamento (70,6%) foi 1,5 vezes maior que o ganho da

viga reforçada com tecido com maior espaçamento (Bi10-GM1), que apresentou ganho de 47,1%. Isso indica que a utilização de fibras de tecidos mais densos é benéfica para a capacidade ao cisalhamento sem a presença de ancoragem. Segundo os pesquisadores, esse comportamento ocorre porque, com o menor espaçamento, a força é distribuída de maneira mais uniforme nas fibras.

Também foi feito um comparativo em relação ao material de ligação. As vigas Bi10-GM1 e Bi10-ER1 foram reforçadas com o mesmo tipo de tecido têxtil, porém com diferentes adesivos (argamassa geopolimérica e resina epóxi). Os resultados mostraram que o ganho da capacidade de resistência do reforço ligado com argamassa geopolimérica foi cerca de metade do ganho da resina epóxi. O menor incremento de resistência fornecido pela argamassa geopolimérica comparada à resina epóxi ocorreu devido ao fato de que a argamassa não impregnou completamente os fios do tecido, interferindo, assim, na transferência dos esforços de cisalhamento para as fibras. Ainda assim, o sistema com de reforço utilizando argamassa geopolimérica apresentou elevados na capacidade ao cisalhamento das vigas; além disso a argamassa possui vantagens, como resistência ao fogo, resistência à corrosão e resistência às intempéries em relação à resina epóxi

Quanto à rigidez, as vigas reforçadas com 1, 2 e 3 camadas de tecido apresentaram aumento na rigidez após o surgimento da primeira fissura com o aumento do número de camadas de tecido. O espaçamento das fibras do tecido e a ancoragem tiveram pouca influência na rigidez.

O estudo desenvolvido mostrou, ainda, que o reforço utilizando tecido de carbono e argamassa geopolimérica pode efetivamente aumentar a capacidade de cisalhamento das vigas de concreto armado. O sistema de reforço utilizando uma e duas camadas de tecido promoveu um aumento na capacidade ao cisalhamento de 47,1% e 105%, respectivamente, em relação à viga sem reforço.

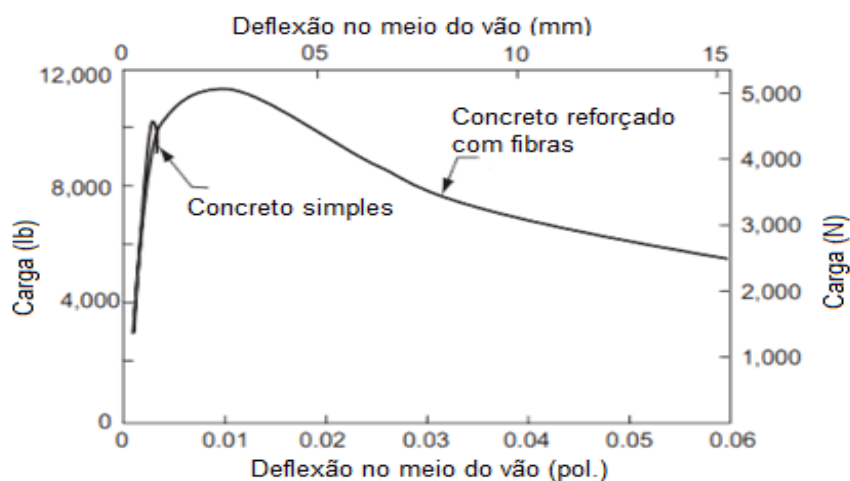
Apesar da menor resistência apresentada pelo reforço com uma camada de tecido e argamassa geopolimérica em relação ao reforço utilizando resina epóxi, o sistema de reforço com argamassa apresentou bom desempenho como reforço, além das vantagens, mencionadas, mostrando-se ser um método eficaz e promissor.

2.3 Compósitos reforçados com fibras

Assim como os geopolímeros, o concreto de cimento Portland é frágil e apresenta baixa resistência à tração e à flexão. O concreto possui numerosas microfissuras, e a rápida propagação dessas microfissuras sob tensão compromete a resistência à tração. A adição de fibras ao concreto tem como principal objetivo, aumentar a resistência à tração e à flexão (Mehta; Monteiro, 2006).

A título de exemplo, utilizando o concreto como referência, devido a semelhança de suas características com o geopolímero, a Figura 5 mostra a curva típica de carga *versus* deflexão para um concreto simples e um concreto reforçado com fibra. Pode-se observar que o concreto simples tem falha repentina quando a deflexão correspondente à resistência à flexão é alcançada. Em contrapartida, o concreto reforçado com fibras continua a suportar cargas consideráveis, mesmo com deflexões superiores à deflexão de colapso do concreto simples. No caso do concreto reforçado com fibras o colapso acontece principalmente devido ao arrancamento ou descolamento das fibras. Isto mostra que um corpo de prova de concreto reforçado com fibras não se rompe logo após o início da primeira fissura (Mehta; Monteiro, 2006).

Figura 5 – Comportamento carga-deflexão do concreto simples e reforçado com fibras.



Fonte: Adaptado de Mehta; Monteiro (2006).

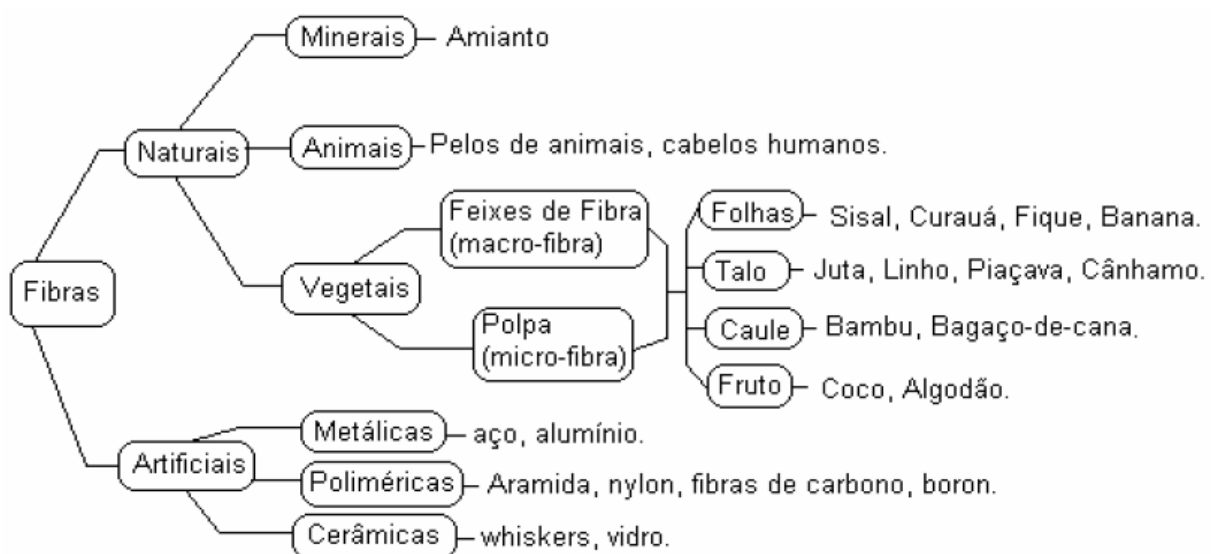
Em compósitos reforçados com fibras (FRC), a principal função exercida pelas fibras ocorre na zona pós-fissuração. Em compósitos bem elaborados, as fibras podem atuar aumentando a resistência do compósito em relação à matriz,

sendo um meio de transferência de tensões através das fissuras. As fibras aumentam a tenacidade do compósito, provendo elevada absorção de energia até a ruptura (Bentur; Mindess, 2007).

A capacidade das fibras em melhorar o desempenho de matrizes frágeis depende, principalmente, das interações fibra-matriz; entre estas interações pode-se destacar: adesão física, atrito e ancoragem mecânica (Bentur; Mindess, 2007). Além da interação fibra matriz, o desempenho dos compósitos será fortemente influenciado pelo tipo, comprimento e fração volumétrica de fibras (Mehta; Monteiro, 2006).

A Figura 6 mostra, de maneira geral, a classificação das fibras, que podem ser separadas em naturais e sintéticas (Mahmood *et al.*, 2021). A maior parte das pesquisas sobre geoplímeros reforçados com fibra são concentradas na utilização de fibras sintéticas como, por exemplo: fibras de aço (Bernal *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2007), fibras de carbono (He *et al.*, 2010b), fibras de vidro (Nematollahi *et al.*, 2013), fibras de polipropileno (Puertas *et al.*, 2003), fibras de álcool polivinílico -PVA (Sun; Wu, 2008). Há também estudos com fibras inorgânicas de basalto (Dias; Thaumaturgo, 2005). Entretanto, a conscientização ambiental e a busca pelo desenvolvimento de materiais sustentáveis têm estimulado o interesse em fibras de fontes naturais (Silva *et al.*, 2020).

Figura 6 – Classificação das fibras.



Fonte: Adaptado de Santiago *et al.* (2012).

As matrizes geopoliméricas reforçadas com qualquer tipo de fibra mostram melhores resultados de tenacidade quando comparadas com matrizes de cimento Portland (Mahmood *et al.*, 2021).

2.3.1 Fibras naturais

As fibras naturais provenientes de animais são de difícil coleta e são mais difíceis de serem implementadas em larga escala. Em se tratando de fibras minerais, boa parte delas necessitam de vários processamentos antes da aplicação, com exceção da fibra de amianto, porém este material é classificado como cancerígeno, não sendo indicado seu uso. Diante deste panorama, a melhor opção para fabricação de compósitos geopoliméricos reforçados, são as fibras naturais vegetais (Silva *et al.*, 2020).

As fibras vegetais apresentam vantagens que se sobressaem em relação às fibras sintéticas, tais como: baixo custo, disponibilidade, baixo peso, são biodegradáveis, apresentam boa resistência à tração e à flexão e são provenientes de fontes renováveis (Silva *et al.*, 2020).

Quando comparadas a matriz sem reforço, as matrizes geopoliméricas reforçadas com fibras vegetais apresentam maior ductilidade, maior resistência à flexão, maior absorção de energia, maior resistência à deformação e menores aberturas de fissuras. As fibras atuam no controle da fissuração, auxiliando na distribuição e transferência de cargas (Mahmood *et al.*, 2021).

Assim como nos geopolímeros, as características das fibras vegetais estão relacionadas com sua composição. Seus principais componentes são a celulose e a lignina (fibras de lignocelulose), sendo que o teor de celulose varia de acordo com a espécie e a idade da planta que dá origem à fibra. As propriedades das fibras são inerentes à sua composição (Silva *et al.*, 2020).

Além da composição química, as propriedades mecânicas das fibras vegetais estão relacionadas, também, com suas características físicas, como o diâmetro, comprimento, densidade e absorção de umidade (Yuan *et al.*, 2016). A utilização de fibras vegetais em compósitos requer a observação de diversos fatores, como a seleção, composição, tratamento, dispersão na matriz e orientação das fibras (Silva *et al.*, 2020).

O comportamento da fibra em compósitos geopoliméricos está relacionado com alguns fatores, como as propriedades da fibra utilizada, o material precursor utilizado na matriz, condições de cura, e principalmente a interface entre a fibra e a matriz. Se a ligação na interface for forte, altas cargas podem ser facilmente transferidas da matriz para as fibras (Mahmood *et al.*, 2021).

Uma grande dificuldade na utilização das fibras vegetais, tanto em matriz cimentícia como na matriz geopolimérica, é alta capacidade de absorção de água e baixa estabilidade dimensional. Devido às suas características hidrofílicas, a adesão entre a fibra e a matriz pode ser prejudicada. Com o objetivo de melhorar essa aderência, alguns tratamentos podem ser conferidos às fibras, como: hornificação - ciclo de molhagem e secagem na fibra (Ferreira *et al.*, 2012), pré-tratamento químico da fibra, entre outros (Silva *et al.*, 2020).

A maioria dos pesquisadores utilizaram tratamentos químicos à base NaOH e silanos. As melhorias nas propriedades das fibras, por meio da utilização dos tratamentos químicos dependem da concentração e tempo de exposição. Para concentrações e tempo de exposição maiores que o necessário, há a deterioração das propriedades das fibras (Senthilkumar *et al.*, 2018).

2.3.2 Fibra de sisal

Entre as diversas fibras vegetais existentes, a fibra de sisal está entre as mais utilizadas. A fibra de sisal é proveniente da planta *Agave Sisalana* e seu cultivo se dá principalmente no Brasil, Índia, Haiti, África Oriental, Indonésia e China (Mahmood *et al.*, 2021).

A *Agave Sisalana* é uma planta originária do México. A planta foi trazida e difundida no Brasil em 1903 no estado da Bahia (Martin *et al.*, 2009). Atualmente o Brasil é o maior produtor de sisal do mundo, e seu cultivo se concentra principalmente na região nordeste, sendo a Bahia o maior produtor nacional (Melo *et al.*, 2019).

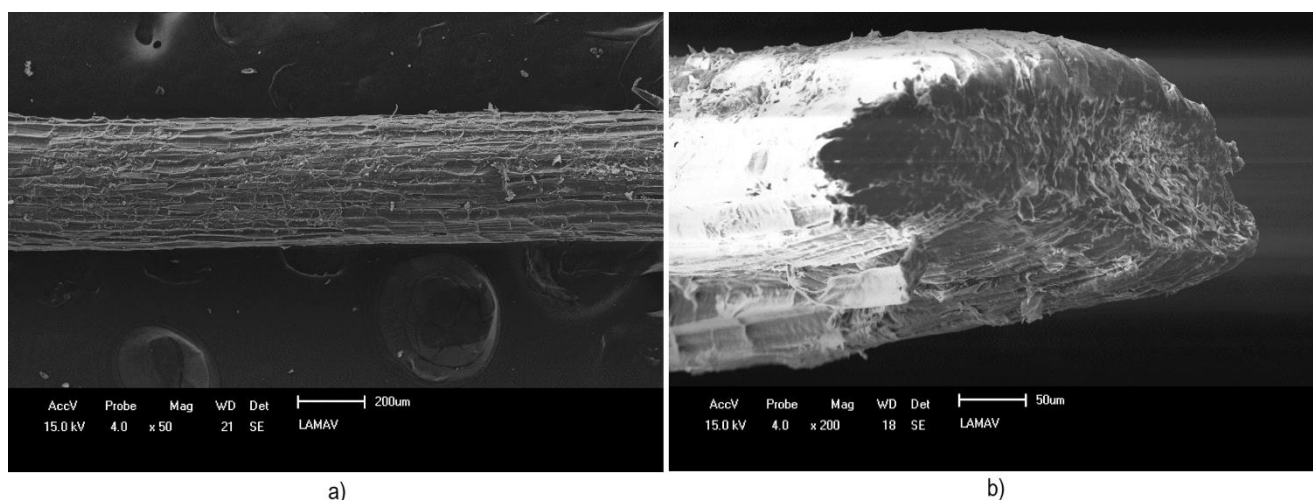
Em geral, a planta que dá origem ao sisal contém de 200 a 250 folhas de sisal, sendo que cada folha pode conter de 1000 a 1200 feixes de fibras (Senthilkumar *et al.*, 2018). A extração da fibra pode ser por maceração ou por meios mecânicos, sendo esse último mais recomendável para se ter fibras de boa qualidade (Mahmood *et al.*, 2021).

O processo de transformação do sisal em fios naturais se inicia a partir dos três anos de vida da planta, ou quando as folhas atingem cerca de 140cm de comprimento, pois podem dar origem a fibras de 90cm a 120cm. As fibras representam somente 3% a 5% da massa bruta da folha de sisal, sendo os 95% a 97% restantes resíduos de beneficiamento, que podem ser utilizados como adubo orgânico e para alimentação animal (Martin *et al.*, 2009).

A principal aplicação do sisal industrializado é no artesanato, na fabricação de cordas, barbantes, produção de estofados, além da utilização em fertilizantes e ração animal. Além dessas aplicações, devido às suas características, as fibras têm sido aplicadas na indústria automobilística como painéis, assentos e em base de carpetes, como também nas recentes aplicações na Construção Civil, sob a forma de compósitos à base de cimento e outras matrizes (Melo *et al.*, 2019).

Do ponto de vista estrutural, a fibra de sisal é um feixe de sub fibras ocas, com paredes celulares reforçadas com celulose orientada em forma de espiral em matriz composta por hemicelulose e lignina (Yan; Kasal; Huang, 2016). Cada microfibrila é composta por uma estrutura em camada, composta por uma parede celular primária e três paredes celulares secundárias. As propriedades mecânicas da fibra de sisal dependem da espessura das camadas intermediárias. Uma das características das fibras naturais, que as diferem das fibras sintéticas, é sua estrutura oca, devido à presença do lúmen (Azwa *et al.*, 2013). A Figura 7 mostra a micrografia da fibra de sisal utilizada nesta pesquisa. Foram obtidas imagens da fibra no sentido longitudinal e de sua seção transversal. Na micrografia obtida no sentido longitudinal, observa-se impurezas aderidas à superfície da fibra.

Figura 7 – Microestrutura típica da fibra natural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como em outras fibras lignocelulósicas, a composição química principal do sisal é de celulose (65%-68%), hemicelulose (10-22%), além de lignina (9%-14%) e de ceras, tendo um teor de umidade em torno de 10%-22% (Senthilkumar *et al.*, 2018).

Entre as características físicas e mecânicas que podem ser citadas das fibras de sisal é sua baixa densidade, que fica na faixa de 1,03 g/cm³ a 1,45 g/cm³, e resistência à tração consideravelmente alta, em torno de 347 MPa a 700 MPa. A fibra de sisal tem alto teor de celulose, quando comparada com outras fibras vegetais, sendo sua elevada resistência à tração atribuída ao teor desse componente (Mahmood *et al.*, 2021).

De forma geral, a adição de fibras de sisal na matriz resulta em melhores propriedades mecânicas, sendo a fração volumétrica e o comprimento das fibras fatores importantes o incremento nas propriedades do produto final. Outro aspecto importante é o tratamento da fibra, que pode melhorar a aderência da fibra com a matriz (Senthilkumar *et al.*, 2018).

2.4 Trabalhos com compósito reforçado com fibras naturais em diferentes aplicações

Neste tópico serão abordados alguns estudos experimentais encontrados na literatura sobre compósitos reforçados com fibras naturais. Serão abordados os

resultados encontrados com a utilização de diferentes fibras naturais. O comportamento mecânico dos compósitos, bem como sua aplicação como reforço em vigas de concreto armado.

2.4.1 Correia (2011)

Correia (2011) estudou compósitos geopoliméricos reforçados com fibras naturais de sisal e de abacaxi. Foram utilizadas fibras com 25mm de comprimento na proporção de 3% em volume. O compósito foi fabricado alternando camadas de matriz e fibras.

No ensaio de flexão a três pontos, as matrizes reforçadas com fibras apresentaram aumento de resistência de até 90% em relação à matriz sem reforço. O melhor desempenho das matrizes reforçadas com fibras também foi observado nos ensaios de compressão diametral e de impacto. A utilização de fibras elevou a capacidade de absorção de impacto em até 200% e levou o corpo de prova a fraturas dúcteis, enquanto a ruptura dos corpos de prova sem reforço foi de natureza frágil.

Apenas no ensaio de resistência à compressão uniaxial que a matriz sem reforço apresentou melhor desempenho. Neste caso, as fibras não apresentaram contribuição.

Já as matrizes reforçadas com fibras de sisal apresentaram melhor desempenho mecânico em relação às reforçadas com fibra de abacaxi.

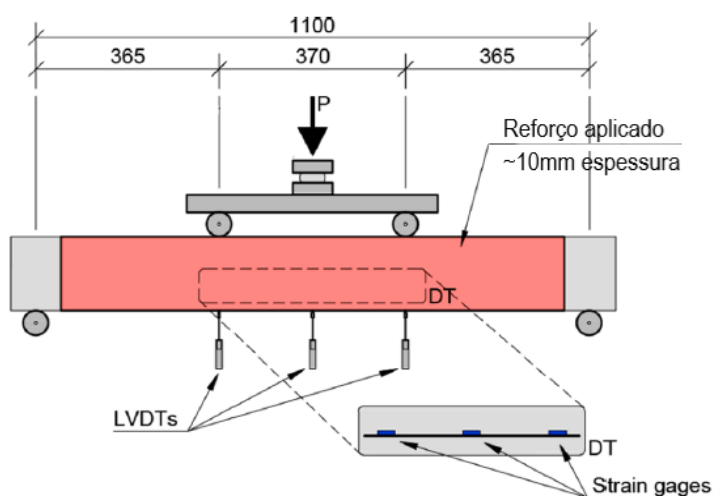
2.4.2 Teixeira, Cardoso e Silva (2021)

Teixeira, Cardoso e Silva (2021) produziram compósitos cimentícios reforçados com tecidos naturais de curauá, para aplicação como reforço externo ao cisalhamento de vigas de concreto armado. Para a aplicação como reforço estrutural foram produzidos compósitos laminados com 10 mm de espessura, 150 mm de largura e 1000 mm de comprimento, adotando-se fração volumétrica de 5% de fibras, distribuídas em três camadas, como um tecido unidirecional alinhado longitudinalmente.

As vigas analisadas nos estudos tinham as dimensões de 120 mm x 150 mm x 1200 mm (largura x altura x comprimento), e não receberam armadura de

cisalhamento no vão de reforço, buscando-se ruptura puramente por cisalhamento no vão analisado. Os compósitos foram fabricados diretamente sobre as laterais das vigas, antes da aplicação do carregamento, e foram curados por 28 dias. Os ensaios de flexão foram realizados a quatro pontos. Foi ensaiada uma viga de referência, sem aplicação do reforço, e uma viga reforçada com o compósito. A Figura 8 mostra de maneira esquemática a configuração adotada para a realização do ensaio.

Figura 8 – Esquema de ensaio das vigas (dimensões em mm).



Fonte: Adaptada de Teixeira, Cardoso e Silva (2021).

A matriz cimentícia utilizada no compósito alcançou resistência à compressão de 81 MPa aos 28 dias, enquanto o concreto utilizado nas vigas atingiu 33 MPa aos 28 dias.

A viga de referência ensaiada alcançou carga máxima de 29,3 kN, enquanto a viga reforçada atingiu 37,5 kN. A utilização do reforço com tecido de curauá proporcionou aumento na capacidade de carga de 28%.

Além do aumento da capacidade de carga, a viga reforçada proporcionou um aumento de rigidez. Na análise do comportamento de deflexão das vigas, medidos por transdutores de deslocamento variável linear (*LVDT*), as deflexões foram maiores para a viga de referência em todos os estágios de carregamento. Na resistência última, as duas vigas apresentaram valores semelhantes de deflexão de (6,6 mm e 6,3 mm) para as vigas de referência e reforçadas, respectivamente. Porém, a viga reforçada apresentou maior capacidade de carga para uma mesma deflexão.

Além do ganho de resistência, o compósito de tecido de curauá em matriz cimentícia apresentou alta aderência ao substrato de concreto das vigas, não apresentando delaminação ou descolamento durante o ensaio.

A utilização do reforço não alterou o modo de ruptura da viga, em que ambas as vigas apresentaram modo de ruptura por cisalhamento com surgimento da fissura diagonal crítica.

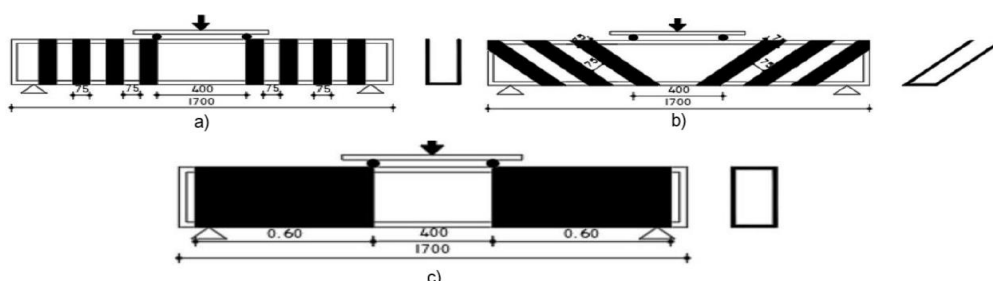
Os resultados mostraram que os compósitos reforçados com tecido natural é um método eficaz no reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado, proporcionando aumento na capacidade resistente e de rigidez.

2.4.3 Makhoulf *et al.* (2024)

Makhoulf *et al.* (2024) produziram vigas de concreto armado com dimensões de 150 mm x 300 mm x 1700 mm (largura x altura x comprimento) com concreto de resistência à compressão de 30 MPa. As vigas foram reforçadas com compósitos de fibras naturais de juta e uma resina epóxi que com resistência à compressão de 41,74 MPa aos 7 dias.

Foram produzidas confeccionadas vigas com diferentes configurações de aplicação do reforço: vigas com tiras de fibras aplicadas à viga em formato de jaqueta U, com ângulo de 90°; vigas com tiras de fibras em jaqueta U com ângulo de 45°; e, vigas com chapas inteiriças de compósito com fibras a 90° no vão de cisalhamento. A Figura 9 ilustra a configuração adotada para cada reforço.

Figura 9 – Diferentes configurações de reforço.



Fonte: Adaptado de Makhoulf *et al.* (2024)

O reforço fibroso foi aplicado manualmente e diretamente sobre as vigas impregnadas com resina epóxi. A resina foi aplicada primeiramente sobre a superfície das vigas. Em cada grupo foram utilizados reforços com 2 e 4 camadas de

fibras. As vigas reforçadas foram curadas em temperatura ambiente a 23°C por sete dias, sendo ensaiadas em flexão a quatro pontos. A Tabela 2 mostra os principais resultados obtidos.

Tabela 2 - Principais resultados.

Viga	V _{cr} (kN)	V _u (kN)	Ganho de resis- tência (%)	Modo de falha
Viga de contro- le	65	107	-	Cisalhamento
J-U-2-90	115	180	68,22	Cisalhamento + ruptura do reforço
J-U-4-90	125	215	100,93	Cisalhamento + ruptura do reforço
JU-2-45	118	205	91,59	Cisalhamento + ruptura do reforço
JU-4-45	127	230	114,95	Cisalhamento + ruptura do reforço
J-FS-2-90	160	260	142	Cisalhamento + ruptura do reforço
J-FS-4-90	180	295	175,7	Cisalhamento + ruptura do reforço

Fonte: Adaptado de Makhoul *et al.* (2024)

É possível observar que todas as vigas reforçadas com fibras naturais de juta apresentaram ganho na carga de fissuração e na carga última em relação à viga sem reforço. As vigas do grupo J-FS-90, em que o vão de cisalhamento foi completamente envolto com compósito fibroso, foram as que apresentaram maior eficiência, tanto na carga de fissuração como na carga última. Destaca-se, porém, que o método de reforço J-FS-90 é de difícil aplicação em estruturas reais, visto que o reforço cobriu completamente as vigas, incluindo as faces inferiores e superiores.

Em relação ao ângulo de aplicação de reforço, os compósitos com fibras distribuídas a 45° apresentaram melhor desempenho de fissuração e carga última em relação àqueles com fibras distribuídas a 90°. A fissura característica de cisalhamento é uma fissura diagonal a 45° que, no geral, prolonga-se do local de aplicação da carga até o apoio. Assim, as fibras distribuídas a 45° atuaram na mesma direção da transferência de esforços ao cisalhamento.

Observa-se que o aumento do número de camadas de fibras proporcionou maior capacidade de carga de fissuração e carga última para todas as configurações de fibras adotadas.

Os pesquisadores relataram que nas vigas reforçadas JU-2-90 e J-FS-2-90 houve deslocamento do cobrimento do concreto em decorrência da ruptura. Porém, em nenhuma viga houve falha devido ao descolamento do compósito, mostrando a boa resistência de aderência proporcionada pela resina.

Os resultados alcançados demonstraram o bom desempenho de fibra natural de juta com resina epóxi como reforço externo ao cisalhamento de vigas de concreto armado, mostrando o potencial de utilização das fibras naturais.

2.4.4 Wongsá *et al.* (2020)

A distribuição e o comprimento das fibras (curtas ou longas) influenciam diretamente nas propriedades do compósito. Wongsá *et al.* (2020) realizaram um estudo com argamassa geopoimérica com adição de fibras naturais de sisal e coco, comparando com fibras de vidro. O comprimento das fibras naturais utilizadas foi de 35mm a 40mm, enquanto a fibra de vidro tinha comprimento de 12 mm. A proporção de fibra na matriz, em fração volumétrica, foi de 0,50%, 0,75% e 1,00%. Os pesquisadores relataram que não foi possível trabalhar com frações maiores que 1,0%, pois deixaram a matriz sem trabalhabilidade e de difícil compactação.

Em relação às propriedades mecânicas, a resistência à tração e à flexão, e o modo de ruptura melhoraram com a adição das fibras na matriz. Os resultados experimentais mostraram que as resistências à flexão e à tração tendem a aumentar com o aumento no teor de fibras. O intervalo de resistência à flexão das pastas reforçadas com fibras de sisal e coco foi de 5,3 MPa e 6,6 MPa, sendo maiores que as pastas reforçadas com fibras de vidro, que apresentaram resistências entre 3,1 MPa e 3,7 MPa, bem como a pasta de controle com valores de (3,1 MPa). O melhor desempenho das fibras naturais em relação às fibras de vidro foi atribuído ao maior comprimento utilizado.

Em relação à resistência à tração, as argamassas reforçadas com fibras de sisal apresentaram valores em torno de 2,2 MPa e 3,3 MPa, e foram superiores aos valores obtidos pelas argamassas reforçadas com fibras de coco e de vidro, que ficaram na faixa de 2,0 MPa e 2,2 MPa, e à argamassa de controle de (1,9 MPa).

Na ruptura, todas as argamassas reforçadas com fibras naturais e sintética apresentaram comportamento dúctil, enquanto a argamassa de controle apresentou ruptura frágil.

A resistência à compressão, para fração volumétrica de fibras igual a 0,5%, das argamassas reforçadas com sisal, coco e vidro apresentaram valores de 34,7 MPa, 32,4 MPa e 30,5 MPa, respectivamente, sendo maiores que da argamassa de controle (30,4 MPa). Porém, com o aumento do teor de fibras a resistência à compressão diminuiu ligeiramente para as argamassas reforçadas com sisal; já as argamassas reforçadas com fibras de coco e vidro tiveram reduções significativas. Outro aspecto observado nesse estudo foi que a absorção de água das argamassas reforçadas com fibras naturais variou de 5,1% e 5,6%, valores maiores que as argamassas reforçadas com fibras de vidro (4,8% e 4,9%) e da argamassa de controle com 5,1%, esses resultados deixam evidente o caráter hidrofílico das fibras vegetais.

Ante o exposto, observa-se que a adição de fibras naturais nas argamassas geopoliméricas resulta em melhorias relevantes no comportamento mecânico, sendo comparáveis às fibras sintéticas.

2.5 Considerações Finais

Os estudos apresentados ao longo deste capítulo evidenciam o alto desempenho da matriz geopolimérica utilizada como material de reforço em vigas de concreto armado. Os estudos apontaram algumas vantagens na utilização desse material, sendo as principais a capacidade de alcançar elevadas resistências em idades iniciais e a boa resistência de aderência com o substrato de concreto.

Os estudos também indicam que a incorporação de diferentes tipos de fibras em matrizes geopoliméricas melhoram significativamente suas propriedades mecânicas de tração e de tenacidade. Porém, grande parte das pesquisas se concentrou na utilização de fibras sintéticas. Entretanto, os estudos aqui apresentados demonstraram o bom desempenho na utilização de diferentes matrizes de elevada resistência reforçadas com fibras naturais como método de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado.

Os bons resultados apresentados na literatura sobre a utilização desses materiais motivaram o estudo de compósitos geopoliméricos pré-fabricados reforçados com fibras de sisal para utilização como método de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

A fim de alcançar os objetivos geral e específicos propostos no item 1.2, um programa experimental foi elaborado e dividido nas seguintes etapas:

- caracterização dos materiais utilizados na produção da matriz geopolimérica e nas vigas de concreto armado;
- caracterização das fibras de sisal;
- caracterização mecânica dos compósitos e da matriz geopolimérica;
- elaboração das vigas de concreto armado e aplicação dos compósitos à viga como reforço;
- ensaio à flexão a três pontos das vigas de referência e das vigas reforçadas.

A Figura 10 mostra a sequência experimental e as diferentes etapas do presente estudo.

Figura 10 – Organograma com as etapas do programa experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, as fibras de sisal foram caracterizadas em termos de sua dimensão e mecanicamente ao esforço de tração. Foram utilizadas cem amostras de fibras para essas análises, sem a aplicação de nenhum tratamento prévio.

Para a confecção dos compósitos, a dosagem da matriz foi ajustada para garantir viscosidade e resistência mecânica adequadas para utilização como matriz

de reforço em compósitos. Com a dosagem devidamente ajustada, foram confeccionados seis corpos de provas prismáticos de compósitos reforçados com fibras para a caracterização mecânica. Desses, três corpos de prova foram confeccionados com as fibras de sisal longas orientadas longitudinalmente, enquanto os outros três foram fabricados com as fibras orientadas em duas direções, distribuídas a 45° e a 315°. Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração direta e a análise do padrão de fissuração e de deformação foi realizada por meio da técnica de Correlação de Imagem Digital (CID).

A fim de avaliar o comportamento das placas compósitas de matriz geopolimérica reforçadas com fibras de sisal, visando seu uso como reforço estrutural em vigas de concreto armado, foram fabricados compósitos com duas variações quanto à orientação das fibras, conforme descrito abaixo:

- fibras contínuas e alinhadas dispostas em uma única direção, orientadas verticalmente em relação ao eixo longitudinal da viga;
- fibras contínuas e alinhadas dispostas em duas direções, orientadas tanto verticalmente quanto horizontalmente em relação ao eixo longitudinal da viga, formando uma malha.

Foram fabricadas doze placas de compósito geopolimérico, sendo seis placas para cada variação de distribuição das fibras. As placas tinham 10 mm de espessura, 250 mm de altura e 600 mm de comprimento. Em cada viga foram aplicadas duas placas de compósitos coladas lateralmente na zona crítica de cisalhamento.

Um total de nove vigas foram ensaiadas, divididas em três grupos; o primeiro formado pelas vigas de referência (sem reforço); o segundo pelas vigas reforçadas com compósitos de fibras distribuídos em uma direção; e o terceiro por vigas reforçadas com compósitos de fibras distribuídas em duas direções. Todas as vigas possuíam seção retangular e dimensões idênticas, foram simplesmente apoiadas e submetidas ao ensaio de flexão a três pontos, utilizando um carregamento assimétrico. A relação a/d , onde a representa a distância entre o ponto de aplicação da carga e o apoio, e d a altura útil da viga, foi de aproximadamente 3,0.

Os compósitos foram colados externamente às vigas com uma resina epóxi comercial, com uma camada de 2 mm de espessura. As vigas receberam o reforço antes da aplicação de carregamento, em um estado sem fissuração

Os principais parâmetros analisados foram: cortante de fissuração; abertura de fissuras; carga última; deslocamento vertical (flecha); deformações do concreto e das armaduras internas longitudinais e transversais. A técnica CID foi utilizada para análise da fissuração, dos deslocamentos e da deformação do concreto.

Os detalhes das etapas do programa experimental, os ensaios realizados e os resultados da caracterização dos materiais empregados são apresentados e discutidos nos itens subsequentes no presente capítulo.

3.2 Materiais

Os materiais utilizados na confecção dos compósitos geopoliméricos e das vigas de concreto armado foram caracterizados física, química e mecanicamente. Os ensaios realizados para caracterização são apresentados a seguir.

3.2.1 Metacaulim

O metacaulim foi o material precursor utilizado como fonte de aluminossilicato para a produção dos geopolímeros. Este material é composto basicamente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). O metacaulim é obtido por meio da calcinação da argila caulim a temperaturas entre 500°C e 800°C .

O metacaulim HP Máx utilizado nesta pesquisa foi fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil S/A. Os ensaios realizados para a caracterização deste material serão descritos a seguir.

3.2.1.1 Massa específica

A massa específica do metacaulim foi determinada pelo método do picnômetro, seguindo as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua norma NBR 6458 (ABNT, 2016). Uma amostra de aproximadamente 3,0g, seca em estufa por 24h, foi utilizada para determinação da massa específica. A amostra foi colocada em um picnômetro, que foi preenchido parcialmente com água e aquecido em banho-maria. Após esse processo, o picnômetro foi preenchido com água até completar seu volume. A massa do conjunto: picnômetro + água + metacaulim foi determinada para três temperaturas

diferentes. O valor da massa específica foi calculado pela média dos valores aferidos em cada temperatura, de acordo com a Equação 2. A Figura 11 mostra o picnômetro com a amostra sendo preenchido com água e a etapa de aquecimento em banho-maria.

$$\rho = \frac{m_s}{(m_p + m_s - m_{ps})} \quad (2)$$

Onde,

ρ : massa específica, em g/cm³;

m_s : massa do metacaulim, em g;

m_p : massa do picnômetro com água, em g;

m_{ps} : massa do picnômetro com água e metacaulim, em g.

Figura 11 – Determinação da massa específica do metacaulim: a) processo de aquecimento do picnômetro em banho-maria; b) processo de preenchimento do picnômetro com água.



a)

b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A massa específica obtida foi de 2,46 g/cm³, sendo esse valor 7,8% menor que o valor especificado pelo fabricante.

3.2.1.2 Granulometria a laser

A distribuição granulométrica do metacaulim foi obtida por meio do ensaio de granulometria por difração a laser, realizado em um analisador de partículas a laser Malvern Instruments, modelo Mastersizer 3000 (Figura 12). O ensaio foi realizado no

Núcleo de Excelência em Materiais Cimentícios (NEXMAT) do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF. A amostra de metacaulim foi dispersa em água deionizada durante quinze minutos com agitação de 1500rpm e tempo de ultrassom de um minuto.

Figura 12 – Granulômetro a laser.



Fonte: Elaborado pelo autor

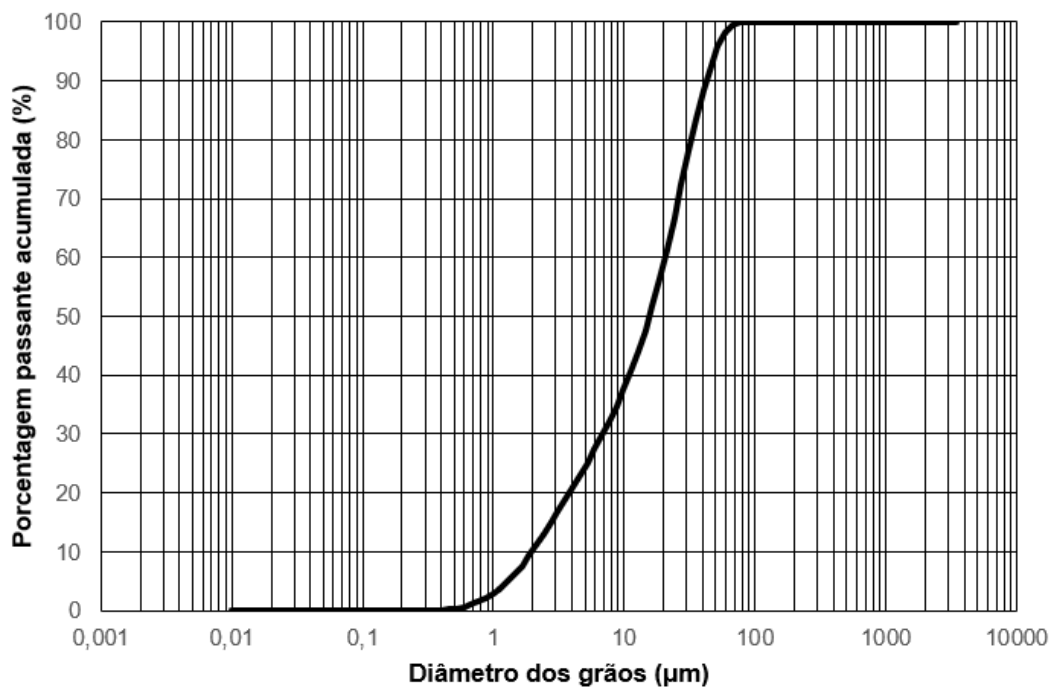
A Figura 13 mostra a curva granulométrica do metacaulim e a Tabela 3 apresenta seus diâmetros característicos. Estes diâmetros são definidos como o tamanho da partícula abaixo dos quais se encontram 10% (D10), 50% (D50) e 90% (D90) da massa do material.

Tabela 3 – Tamanhos característicos D10, D50, D90, Dmédio do metacaulim.

Diâmetro (%)	Metacaulim (μm)
D ₁₀	1,98
D ₅₀	15,6
D ₉₀	42,2
D _{médio}	19,93

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Curva granulométrica do metacaulim.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1.3 Composição química

As quantidades percentuais de óxidos da amostra de metacaulim foram obtidas pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (*EDX*), utilizando um equipamento Shimadzu EDX-720, mostrado na Figura 14, com tubo de 3kW e alvo de ródio do LECIV/UENF. A amostra foi seca em estufa a 110°C por 24h antes da realização do ensaio.

A composição química do material é mostrada na Tabela 4, em porcentagem mássica. Pelo resultado é possível observar que os óxidos SiO_2 e Al_2O_3 são predominantes na composição do metacaulim e atendem aos requisitos químicos exigidos pela NBR 15894-1 (ABNT, 2010).

Figura 14 – Espectrômetro de fluorescência de raios X.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Composição química e propriedades físicas do metacaulim.

Especificações	Resultados fornecidos pelo fabricante*	Resultados dos ensaios**	Limites da NBR 15894-1***
SiO ₂ (%)	67,9	55,47	≥ 44,0% e ≤ 65,0%
Al ₂ O ₃ (%)	15,7	38,37	≥ 32,0% e ≤ 46,0%
K ₂ O (%)	4,6	1,85	0,658 K ₂ O + Na ₂ O ≤ 1,5%
Fe ₂ O ₃ (%)	6,8	1,408	-
TiO ₂ (%)	0,9	1,31	-
SO ₃ (%)	0,1	1,29	≤ 1,0%
Na ₂ O	1,0	-	< 0,5%
CaO (%)	2,0	0,14	CaO + MgO ≤ 1,5%
MgO (%)	0,1	-	
V ₂ O ₅ (%)	-	0,075	-
ZrO ₂ (%)	-	0,054	-
CuO (%)	-	0,031	-
Perda ao fogo (%)	0,9	-	≤ 4,0%
Área específica BET (cm ² /g)	-	11.100	≥ 150.000
Finura (%) (< #325 - 44 μm)	17,9	-	≤ 10,0%
Massa específica (kg/dm ³)	2,67	2,46	-

Fonte: * Dados do fabricante (2023); ** Elaborado pelo autor;*** (ABNT, 2010).

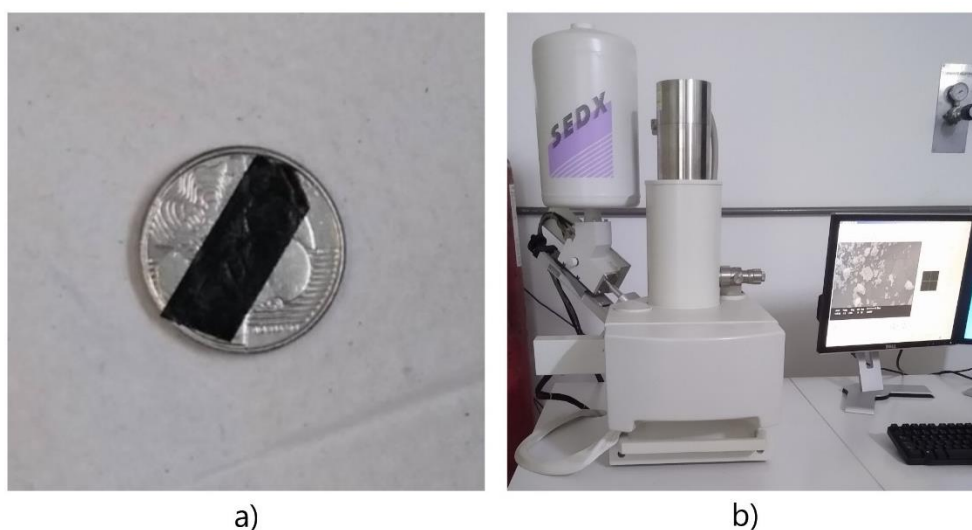
3.2.1.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada para análise das características morfológicas microestruturais do metacaulim.

As imagens foram obtidas por meio de um microscópio da marca Shimadzu, modelo SSX-550, operado a 20kV, pertencente ao Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF.

Para a obtenção das micrografias, a amostra de metacaulim foi seca em estufa a 100°C por 24h. Após a retirada da estufa, a amostra foi fixada com uma fita adesiva dupla face de carbono, que serviu como condutora elétrica em um porta-amostras (*stub*) de alumínio. Esse processo foi realizado para garantir que a amostra ficasse carregada negativamente para a detecção das imagens durante a varredura dos elétrons. Na etapa seguinte, a amostra foi recoberta com ouro, ou seja, metalizada, para garantir imagens adequadas por meio do uso de elétrons secundários. A Figura 15 mostra o equipamento utilizado para realização do ensaio e a amostra preparada.

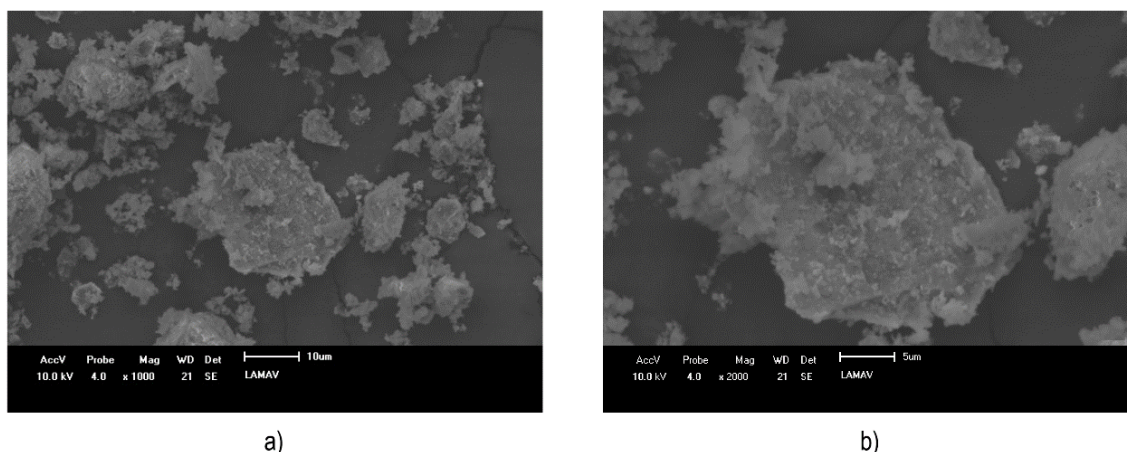
Figura 15 – MEV: a) amostra de metacaulim fixada no porta-amostra com fita adesiva dupla face; b) microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 16 mostra as micrografias do metacaulim geradas com ampliações iguais a 1000x e 2000x. As micrografias mostram a estrutura da partícula do material, que de modo geral, apresenta formato lamelar. As características físicas do material impactam diretamente na trabalhabilidade da pasta produzida. Segundo Duxson *et al.* (2007), essa estrutura em forma de placas das partículas do metacaulim faz com que haja redução da fluidez da pasta e necessidade de maior quantidade de água.

Figura 16 – Micrografias do metacaulim: a) 1000x; b) 2000x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio (NaOH) comercial, em forma de escamas, foi utilizado como ativador alcalino para a produção da matriz geopolimérica. O material foi fornecido pela distribuidora de produtos químicos Casa dos Químicos. As propriedades físicas e químicas do material foram fornecidas pelo fabricante e são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades físicas e químicas do hidróxido de sódio.

Especificações	Mínimo	Máximo	Resultado
Concentração NaOH (%)	97,0	100	97,70
Carbonatos (%)	0,00	0,60	0,10
Cloreto – Cl (%)	0,00	0,03	0,01
Fe (%)	0,00	6,00	1,40
Densidade (g/cm ³)	2,13	2,20	2,15
Aspecto visual	-	Escamas	Escamas

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante (2023).

3.2.3 Silicato de sódio alcalino

Além do hidróxido de sódio, foi utilizado como ativador alcalino da matriz geopolimérica o silicato de sódio alcalino (Na₂SiO₃.nH₂O). O silicato foi fornecido pela distribuidora de produtos químicos São Lázaro Ltda.

As propriedades físicas e a composição química do silicato foram fornecidas pelo fabricante e são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades físicas e químicas do silicato de sódio alcalino comercial.

Especificações	Parâmetros do fabricante	Resultado
Na ₂ O (%)	14,5 – 15,3	15,2
SiO ₂ (%)	31,5 – 33,5	32,98
Densidade – 25°C (g/cm ³)	1,560 – 1,580	1,572
Viscosidade (cP)	900 – 1300	1165
Relação SiO ₂ /Na ₂ O (%)	2,15 – 2,20	2,17
Sólidos totais (%)	46,50 – 48,80	48,18
Baumé – 25°C (°Be)	52,0 – 53,0	52,80

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante (2023).

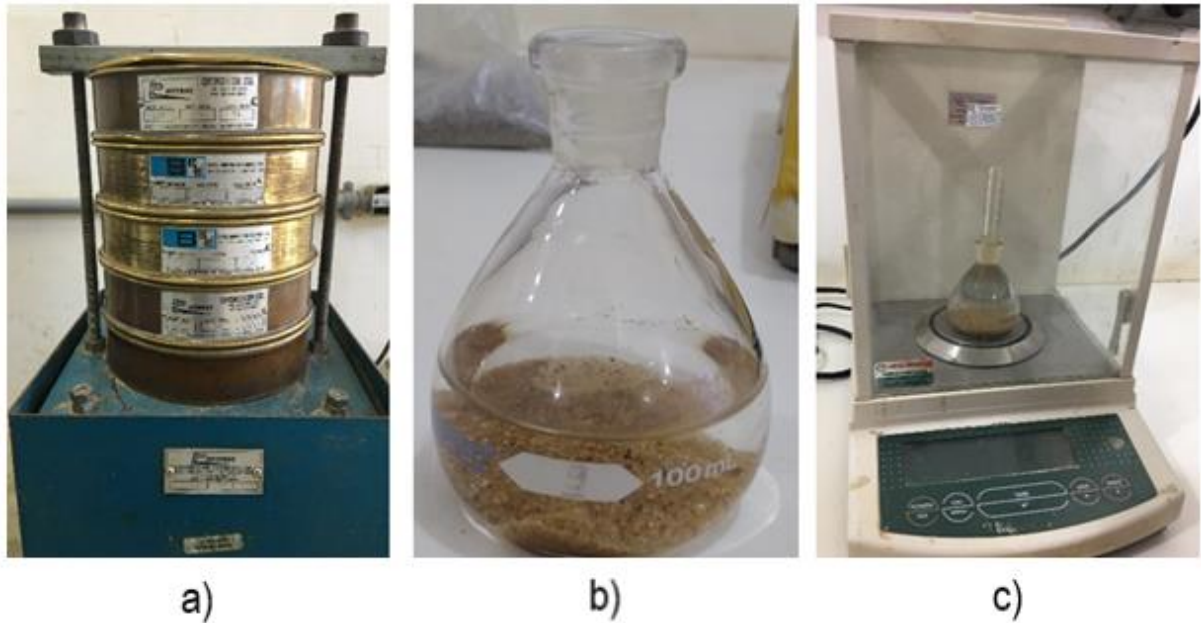
3.2.4 Agregado miúdo

Para a produção da matriz geopolimérica foi utilizada somente a parcela da areia normal na fração granulométrica fina (#100), que é caracterizada pelo material que fica retido na peneira de abertura nominal de 0,15mm. A produção e o fornecimento deste material são de responsabilidade do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), conforme estabelecido na NBR 7214 (ABNT, 2015).

Para a produção do concreto das vigas e dos corpos de prova cilíndricos de cimento Portland foi utilizada areia quartzosa lavada, proveniente do rio Paraíba do Sul, na cidade de Campos dos Goytacazes-RJ.

A distribuição granulométrica da areia de rio foi determinada conforme as prescrições da NBR 17054 (ABNT, 2022c), utilizando duas amostras de 1kg de massa seca. A massa específica foi determinada pelo método do picnômetro, seguindo as especificações da NBR 6458 (ABNT, 2016). A Figura 17 mostra parte das peneiras utilizadas no ensaio de granulometria e as etapas do ensaio de determinação da massa específica.

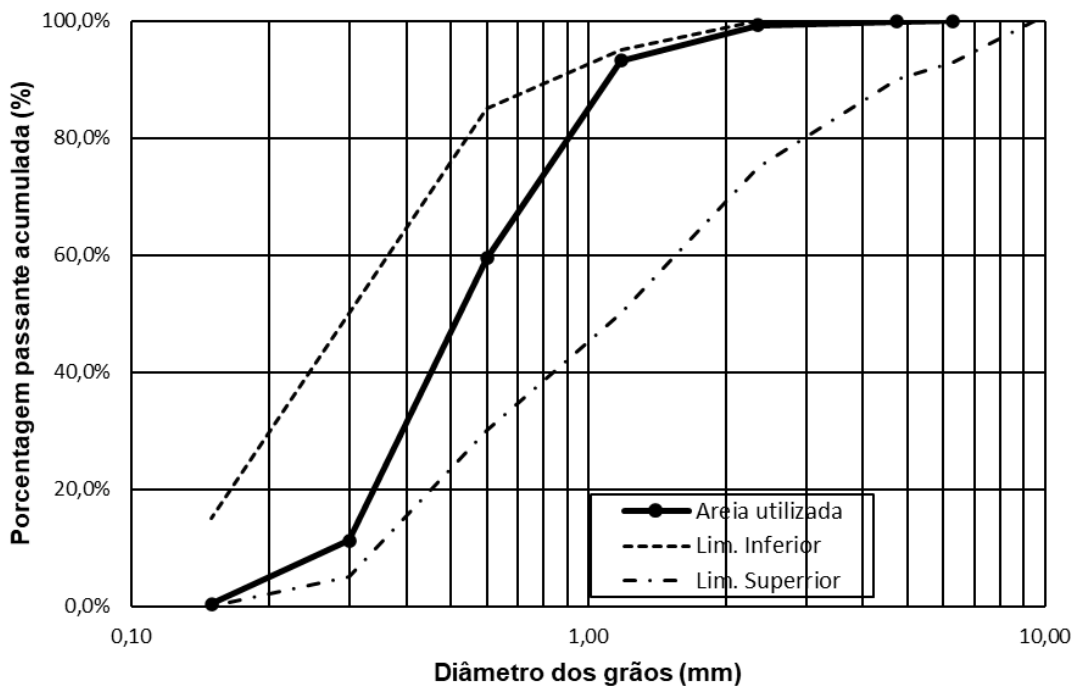
Figura 17 – Caracterização da areia: a) parte das peneiras utilizada no ensaio de granulometria; b) picnômetro com areia e água; c) determinação da massa do picnômetro com areia e água.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva granulométrica da areia de rio utilizada na fabricação do concreto é apresentada na Figura 18 e se manteve dentro da zona utilizável, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022a). A areia apresentou módulo de finura de 2,36 e massa específica de 2,65 g/cm³.

Figura 18 – Curva granulométrica da areia de rio utilizada na confecção do concreto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

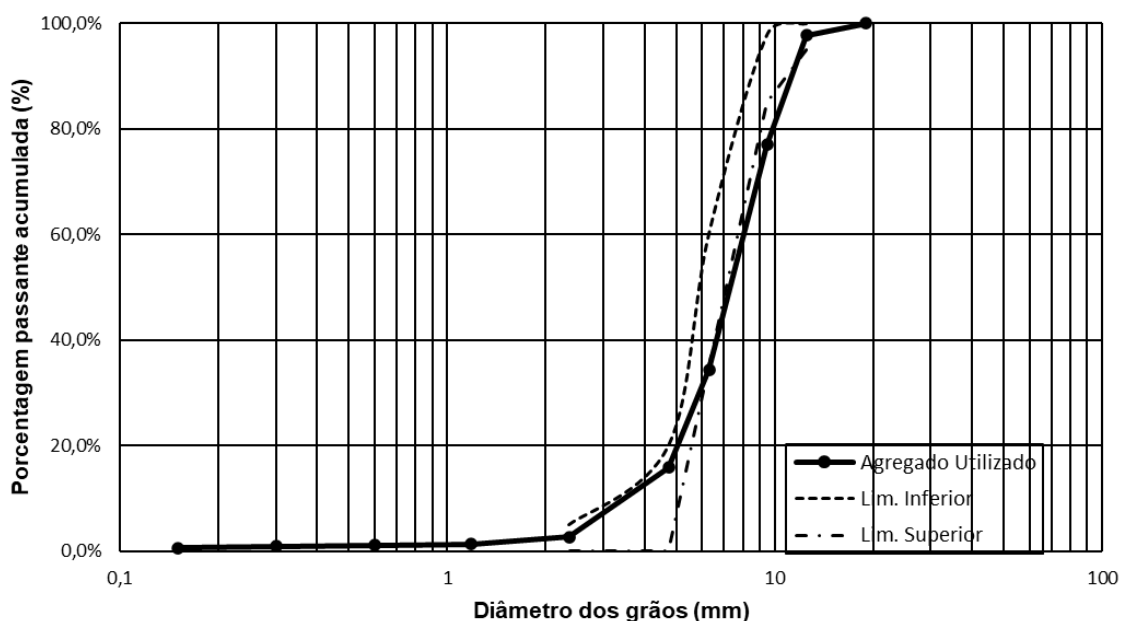
3.2.5 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado para a produção do concreto das vigas e dos corpos de prova cilíndricos de cimento Portland foi do tipo gnaïsse, proveniente de jazidas localizadas no município de Campos dos Goytacazes/RJ.

A distribuição granulométrica do agregado graúdo foi determinada de acordo com as especificações da NBR 17054 (ABNT, 2022c). Para a realização deste ensaio foram utilizadas duas amostras secas em estufa por 24h. A massa específica foi determinada conforme a NBR 16917 (ABNT, 2021b).

A Figura 19 apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo. O valor de porcentagem passante acumulada na peneira de abertura de 9,5mm foi maior que o valor limite estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2022a). A dimensão máxima do agregado é de 12,5mm, sendo caracterizado como brita zero. A massa específica é de 2,61 g/cm³.

Figura 19 – Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.6 Cimento Portland

Para a produção das vigas de concreto e dos corpos de prova cilíndricos para os ensaios mecânicos foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial,

CPV ARI, da empresa Cimento Nacional, adquirido em comércio local em embalagens de 40kg.

3.2.7 Superplastificante

Na confecção dos concretos das vigas foi utilizado um aditivo químico superplastificante à base éter policarboxílico, Glenium 51, produzido pela empresa BASF. O superplastificante é um aditivo líquido utilizado para melhorar a trabalhabilidade do concreto, mesmo com a redução da água de amassamento e sem alteração do tempo de pega. As características técnicas do superplastificante, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 7.

Na primeira dosagem do concreto, o superplastificante foi utilizado na proporção de 0,15% em massa do teor de cimento; porém, com essa quantidade o concreto ainda não apresentava trabalhabilidade adequada. Por isso optou-se por ajustar a dosagem ao teor de 0,45% em massa de cimento.

Tabela 7 – Características do superplastificante Glenium 51.

Especificações	Parâmetros do fabricante
Aspecto	Líquido
Cor	Branco turvo
pH	5 – 7
Densidade (g/cm ³)	1,067 – 1,107
Sólidos (%)	28,5 – 31,5
Viscosidade (cps)	< 150

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante (2023).

3.2.8 Água

Para a fabricação da matriz geopolimérica foi utilizada água destilada, para evitar possíveis contaminações e variações nas concentrações dos reagentes químicos. Para as vigas e os corpos de provas de concreto produzidos com cimento Portland foi utilizada água proveniente da rede de abastecimento da cidade de Campos dos Goytacazes-RJ, fornecida pela concessionária Águas do Paraíba.

3.2.9 Barras de aço

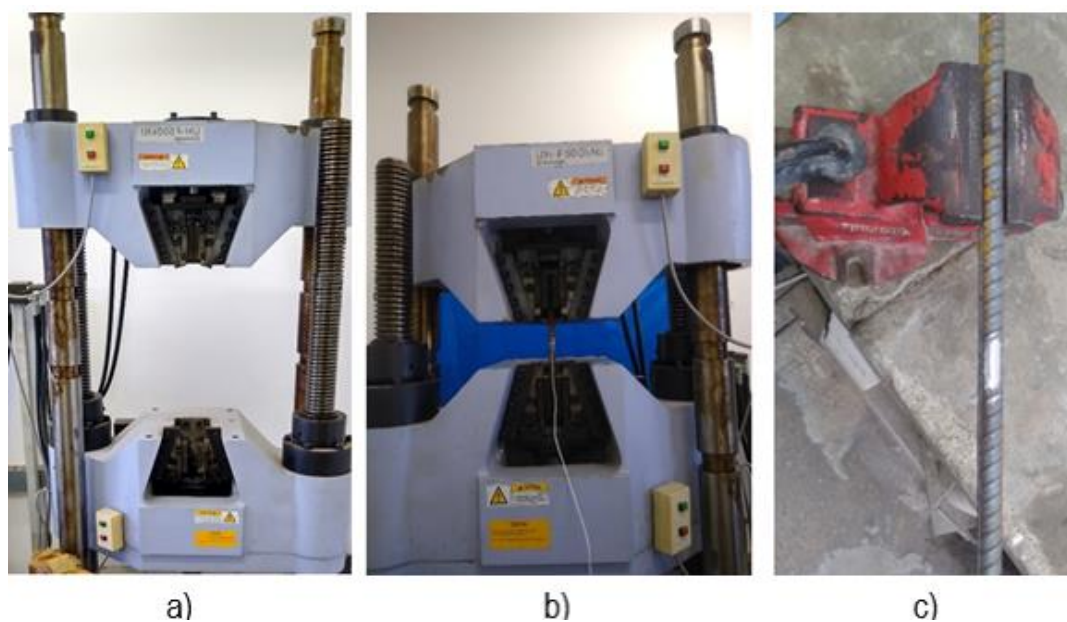
Foram utilizadas na confecção das vigas de concreto armado barras de aço do tipo CA-50 e CA-60. Foram utilizadas barras nervuradas CA-60 com diâmetro nominal de 5,0 mm. De acordo com as especificações da NBR 7480 (ABNT, 2022b), esse tipo de barra apresenta tensão de escoamento de 600 MPa e massa nominal de 0,154 kg/m. Os diâmetros nominais das barras CA-50 foram de 6,3 mm e 16,0 mm, com tensão de escoamento de 500 MPa e massas nominais de 0,245 kg/m e 1,578 kg/m, respectivamente, segundo a NBR 7480 (ABNT, 2022b).

As armaduras das vigas foram dimensionadas seguindo as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2023). O detalhamento das armaduras utilizadas encontra-se no item 3.11.

As propriedades mecânicas das barras de aço, como tensão de escoamento, foram determinadas por meio do ensaio de tração direta, realizado em uma prensa universal de marca SHIMADZU®, com capacidade máxima de carga de 500kN do LECIV/UENF. A velocidade de deslocamento do equipamento foi de 0,5mm/min, de acordo com as recomendações da NBR 6892-1 (ABNT, 2013).

Foram confeccionados três corpos de prova da barra de aço CA-60 de 5,0mm e três corpos de prova da barra CA-50 de 16,0mm para a realização do ensaio, todos com 300mm de comprimento. A fim de se obter as deformações das barras ao longo do ensaio de tração direta, os corpos de prova foram instrumentados com sensores elétricos de resistência (*strain gauges*). Para melhor leitura da deformação, foi necessário criar uma superfície lisa; por este motivo, os corpos foram lixados e limpos com álcool isopropílico antes da colagem dos sensores. A Figura 20 mostra a máquina de ensaio, a realização do ensaio e a etapa de preparação do corpo de prova.

Figura 20 – Ensaio de tração direta do aço: a) máquina de ensaio SHIMADZU®; b) realização do ensaio de tração direta no corpo de prova; c) preparação do corpo de prova para colagem do *strain gage*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 21 e 22 mostram as curvas de tensão *versus* deformação das barras de aço CA-50 e CA-60. A tensão de escoamento das barras de aço foi determinada pela formação de um patamar de escoamento no gráfico tensão-deformação para as barras CA-50, conforme indicado pela NBR 7480 (ABNT, 2022b). Na Tabela 8 são mostradas as propriedades físicas e mecânicas das barras de aço ensaiadas.

Tabela 8 – Propriedades físicas e mecânicas das barras de aço.

Classe do aço	Φ (mm)	Área (mm ²)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_{sy} (‰)	ϵ_{sy}^* (‰)	ϵ_{su} (‰)
CA-60	5,0	19,63	763	806	5,83	3,70	12,25
CA-50	16,0	201,06	592	656	3,10	-	12,31

Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde,

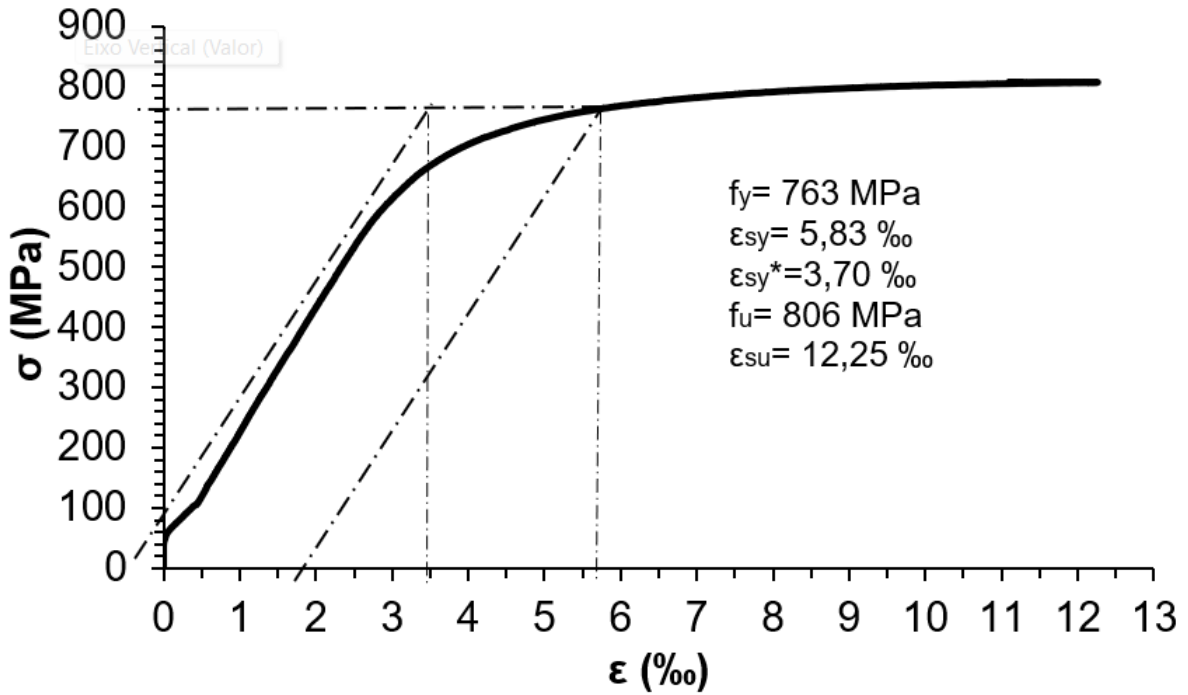
f_y é a tensão de escoamento do aço;

f_u é a resistência última do aço;

ϵ_{sy} é deformação específica de escoamento do aço;

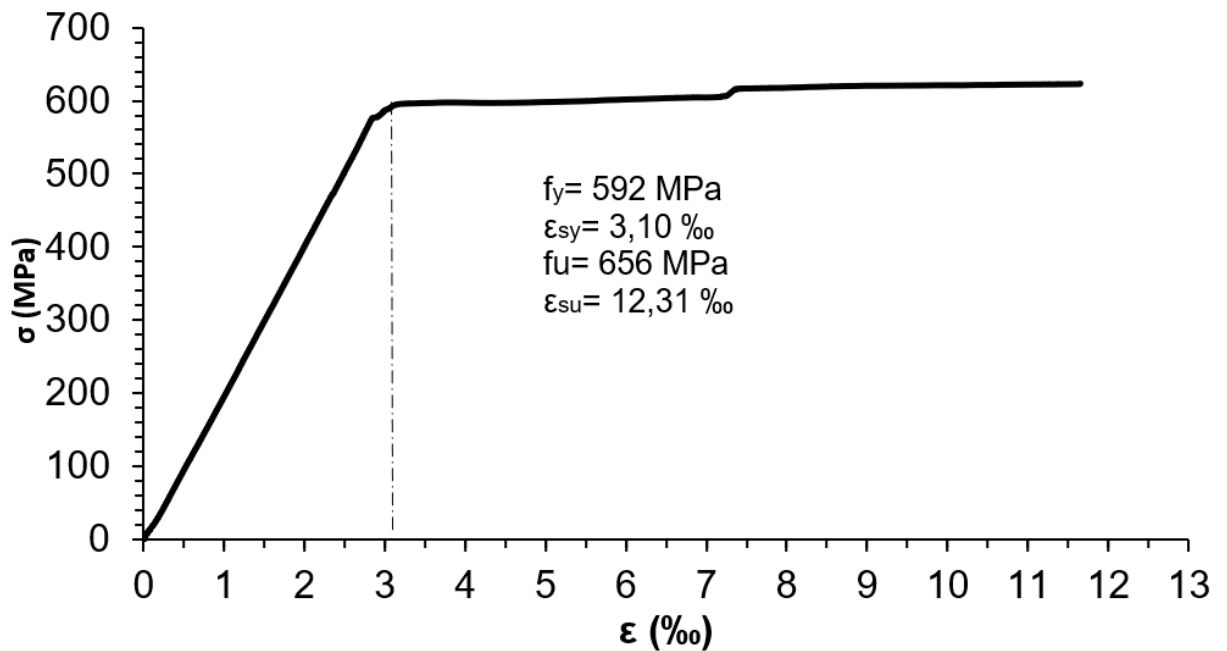
ϵ_{sy}^* é deformação específica de escoamento do aço correspondente ao diagrama tensão-deformação bilinear; ϵ_{su} é deformação última do aço na ruptura.

Figura 21 – Curva tensão versus deformação específica das barras de aço CA-60 (5,0mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Curva tensão versus deformação específica das barras de aço CA-50 (16,0mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.10 Fibras de sisal

Há diferentes configurações possíveis de fibras em compósitos cimentícios e geopoliméricos. Nesta pesquisa foi analisado o comportamento de compósitos com fibras longas contínuas e alinhadas distribuídas em uma única direção na placa de reforço, sendo também analisado o comportamento de compósitos com fibras distribuídas em duas direções, formando uma malha.

As fibras naturais de sisal utilizadas nesta pesquisa foram adquiridas em comércio local, na cidade de Campos dos Goytacazes-RJ. As fibras foram recebidas em feixes de aproximadamente 1200 mm, como mostrado na Figura 23. As fibras foram escovadas manualmente para desembaraçá-las e cortadas no comprimento de 300mm para a realização dos ensaios de caracterização. Os ensaios realizados para a caracterização mecânica e morfológica dessas fibras são apresentados nos itens subsequentes.

Figura 23 – Fibras de sisal como recebidas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.10.1 Caracterização dimensional

As fibras de sisal não apresentam seção transversal circular perfeita. Existem diferentes métodos para a determinação da seção transversal desse tipo de fibra. No método adotado por Castoldi, Souza e Silva (2019) e Ferreira *et al.* (2018) a quantificação é feita utilizando microscopia eletrônica de varredura. Neste estudo foi adotado o método utilizado por Glória *et al.* (2017), Neves *et al.* (2020) e Silva *et al.* (2021), que consiste na medição do diâmetro da fibra por meio do uso de um

projedor de perfil. Para esta análise foram separadas aleatoriamente um lote com 100 amostras de fibras cortadas com 300mm de comprimento. Em cada amostra foram realizadas dez medições do diâmetro ao longo do comprimento da fibra, sendo cinco medições em uma direção e outras cinco após a rotação das fibras em 90°.

Por se tratar de um material natural, a fibra apresenta grande variação de diâmetro ao longo do seu comprimento. Levando em consideração que o acúmulo de tensão tende a ocorrer na região de menor seção transversal, foi adotado, para cada uma das 100 amostras de fibras ensaiadas, o menor diâmetro medido. Após a determinação do diâmetro, a área de cada fibra foi calculada como se fosse uma seção transversal circular.

A análise do diâmetro das fibras foi feita em um projetor de perfil da Nikon, modelo 65, do LAMAV/UENF. A Figura 24 mostra a realização das medições de diâmetro com este equipamento.

Figura 24 – Análise do diâmetro das fibras de sisal em projetor de perfil.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.10.2 Ensaio de tração

As fibras de sisal foram caracterizadas mecanicamente quanto à sua resistência à tração direta. Para esta caracterização, foi utilizado o mesmo lote das 100 amostras de fibras que tiveram seus diâmetros medidos no projetor de perfil.

As amostras de fibras foram submetidas ao esforço de tração em uma máquina universal Instron modelo 1101 com capacidade de carga de 100kN do LAMAV/UENF. O ensaio foi realizado com controle de deslocamento de 0,2mm/min.

Os valores do diâmetro, da área transversal e da resistência à tração encontrados nessas análises corroboram os dados encontrados por outros pesquisadores, conforme apresentado na Tabela 9, que resume as propriedades físicas e mecânicas das fibras ensaiadas e os dados da literatura. As fibras de sisal apresentaram resistência à tração média de 478,6 MPa.

Tabela 9 – Características das fibras de sisal utilizadas nesta pesquisa e a comparação com dados da literatura.

Características morfológicas e mecânica das fibras de sisal		
	Experimental*	Literatura**
Diâmetro (mm)	0,176 ± 0,05	0,18 – 0,30
Área transversal (mm ²)	0,0264 ± 0,016	0,017 – 0,030
Resistência à tração (MPa)	478,2 ± 286	372 – 484

Fonte: * Elaborado pelo autor; ** Alves Fidelis *et al.* (2013); Castoldi, Souza e Silva (2019); Fernandes, Mano e Reis (2013); Ferreira *et al.* (2018).

3.3 Composição da matriz geopolimérica

O material precursor utilizado na produção da matriz geopolimérica foi o metacaulim, fonte de alumina e sílica, matéria-prima já consagrada por outros pesquisadores como eficiente, como Cheng *et al.* (2012), Pacheco-Torgal *et al.* (2011), Soares *et al.* (2021). A solução alcalina empregada consistiu em uma combinação de hidróxido de sódio e silicato de sódio, seguindo a metodologia de Soares *et al.* (2021).

A presente pesquisa buscou utilizar uma matriz de reforço com resistência equivalente à resistência do concreto das vigas que receberam o reforço. França (2017) obteve bons resultados com a utilização de matriz geopolimérica em reparo de estruturas de concreto. De maneira semelhante, Soares *et al.* (2021) produziram resinas geopoliméricas com boas propriedades adesivas e alta resistência mecânica, para aplicação em recuperação estrutural de concreto armado, atingindo resistência à compressão axial na faixa de 80 MPa.

No presente estudo adaptou-se a dosagem proposta por Soares *et al.* (2021) devido à alta resistência alcançada naquela pesquisa. Houve a necessidade de se

produzir uma matriz com mais fluidez para a confecção dos compósitos, visando garantir boa penetração da matriz nas fibras. Assim, a dosagem utilizada por Soares *et al.* (2021) foi ajustada, aumentando-se a quantidade de líquidos na mistura e diminuindo-se a quantidade de areia. Soares (2020) utilizou a composição dada pela Equação 3.

$$S: \text{areia}: L/S \quad (3)$$

Onde,

- S (sólidos): somatório do material precursor (metacaulim), NaOH e parte sólida do $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$;
- areia: número que corresponde à relação entre a quantidade de areia e a quantidade do parâmetro S;
- L (líquidos): somatório da água de amassamento e da parte líquida do $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Assim sendo, foi aqui adotada a proporção de 1:0,34:0,38. Com essa proporção foi possível produzir uma matriz geopolimérica com fluidez e trabalhabilidade adequada para a confecção dos compósitos. As razões molares da matriz geopolimérica utilizada são apresentadas na Tabela 10. A matriz foi denominada por Soares *et al.* (2021) como h.S – s.S, fazendo referência à solução alcalina utilizada, de hidróxido de sódio e silicato de sódio. Nesta pesquisa, por ter apenas um tipo de solução alcalina, a matriz foi denominada MG – matriz geopolimérica.

Tabela 10 – Razões molares da matriz geopolimérica.

Matriz	Razão molar			
	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{NaOH}}$	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2}$	$\frac{\text{NaOH}}{\text{Al}_2\text{O}_3}$
MG	3,36	9,32	0,12	0,40

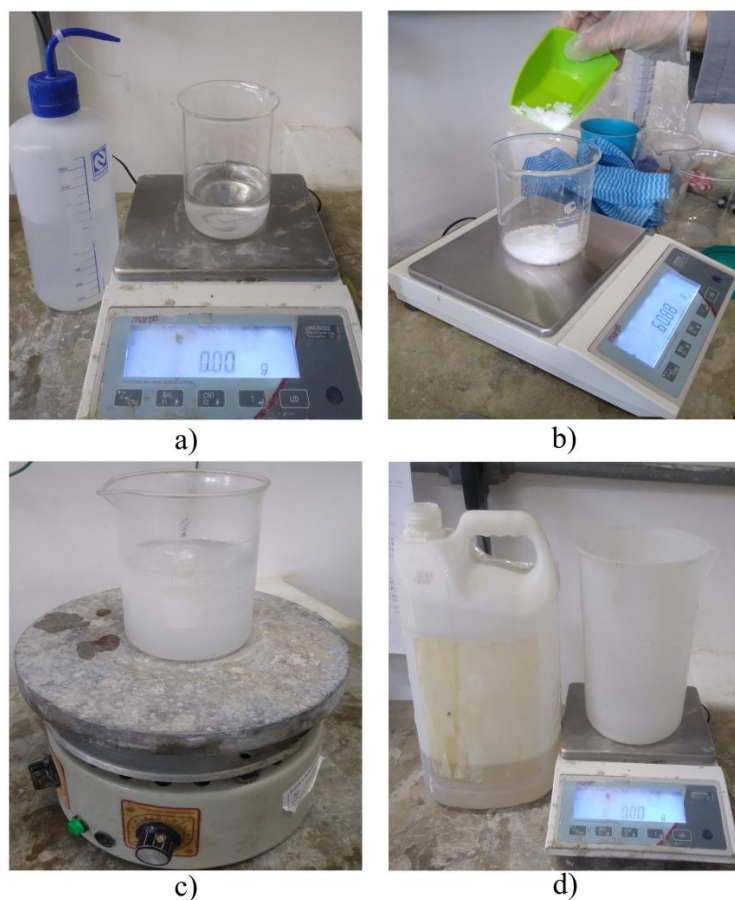
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Produção da matriz geopolimérica

Na etapa de produção da matriz geopolimérica foi seguida a sequência descrita por Soares (2020). A produção inicia-se a partir da mistura do metacaulim (precursor) com a solução ativadora. A solução ativadora alcalina foi preparada 24h antes da moldagem dos corpos de prova. A areia também foi misturada e homogeneizada com o metacaulim 24h antes da moldagem, de acordo com a seguinte sequência:

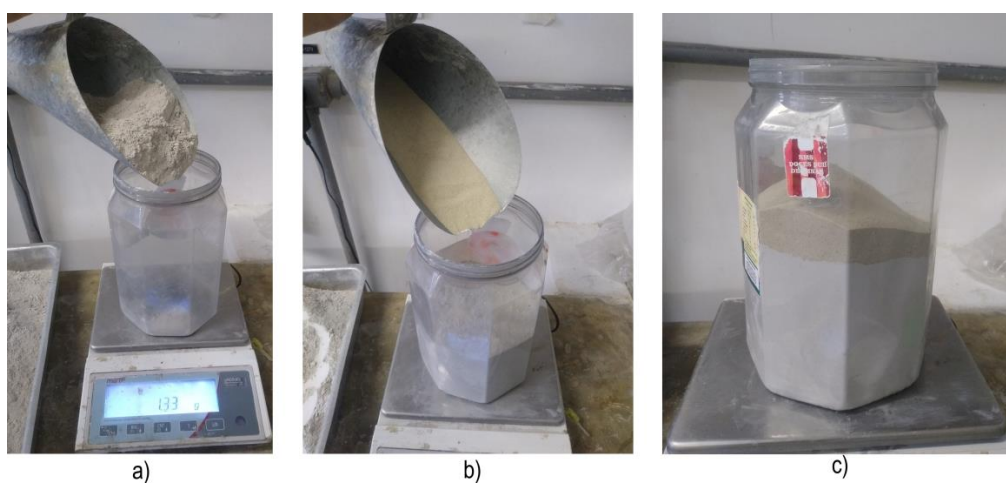
- pesagem da água destilada (Figura 25a);
- pesagem do hidróxido de sódio, adicionando-o à água e misturando em um agitador magnético durante 2 min (Figura 25b e 25c);
- pesagem do silicato de sódio, adicionando a ele a mistura de água e hidróxido ao silicato, misturando durante 3 min em um agitador magnético (Figura 25d);
- pesagem e homogeneização do metacaulim juntamente com a areia fina com granulometria #100 do IPT (Figura 26).

Figura 25 – Produção da solução ativadora: a) pesagem da água destilada; b) pesagem do hidróxido de sódio; c) mistura do hidróxido de sódio com a água em um agitador magnético; d) pesagem do silicato de sódio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Mistura do metacaulim com areia: a) pesagem do metacaulim; b) adição da areia ao metacaulim; c) metacaulim e areia para serem homogeneizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a produção da matriz geopolimérica foi utilizado um misturador de argamassa EMIC com capacidade máxima de 5 litros. A mistura dos materiais

sólidos (metacaulim e areia) com a solução ativadora alcalina seguiu a sequência adaptada de Soares (2020):

- umedeceu-se a cuba do misturador e adicionou-se a solução ativadora (Figura 27b);
- adicionou-se o metacaulim previamente homogeneizado com a areia, misturando durante 1min em baixa velocidade (Figura 27c);
- desligou-se o misturador e, com o auxílio de uma espátula metálica, retiraram-se os materiais aderidos às paredes da cuba e da pá do misturador (Figura 27d);
- religou-se o misturador e os materiais foram misturados por mais 3 min em alta velocidade.

Figura 27 – Fabricação da matriz: a) solução ativadora alcalina e metacaulim + areia preparados previamente; b) solução ativadora alcalina na cuba; c) adição do metacaulim + areia à cuba; d) retirada dos materiais presos à parede e à pá da argamassadeira.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 Propriedades mecânicas da matriz geopolimérica

Para a determinação das propriedades mecânicas da matriz geopolimérica no estado endurecido, foram moldados corpos de prova cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura, seguindo a sequência descrita em 3.3 e 3.4.

Os corpos de prova foram desmoldados 24h após a moldagem e curados em temperatura ambiente entre 25°C a 30°C até a data da realização dos ensaios nas idades de 7, 14 e 28 dias. Foram moldados seis corpos de prova (Figura 28) para cada idade de ensaio e para cada dia de moldagem, sendo ensaiados 48 corpos de prova, metade para determinar a resistência à compressão axial (f_c) e a outra metade para determinar a resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$). Além disso, foram moldados 36 corpos de prova adicionais para serem ensaiados à compressão (f_c) e à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) no mesmo dia do ensaio das vigas, para que se pudesse ter valores mais precisos da resistência da matriz aplicada como reforço. Os corpos de prova adicionais foram ensaiados aos 120 dias.

Figura 28 – Corpos de prova cilíndricos para caracterização mecânica da matriz geopolimérica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.1 Resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado seguindo as prescrições da NBR 5739 (ABNT, 2018). Para realização do ensaio, os corpos de prova tiveram suas superfícies regularizadas com o auxílio de uma máquina retificadora do LECIV/UENF, conforme mostra a Figura 29. Esse procedimento foi adotado com o objetivo de evitar concentrações de tensões nas superfícies irregulares e excentricidades na aplicação do carregamento.

Os ensaios foram realizados em uma prensa universal de marca SHIMADZU®, modelo UH, com capacidade máxima de carga de 500 kN, sob uma taxa de deslocamento de 0,5mm/min, até a ruptura dos corpos de prova. A Figura 30 mostra a execução do ensaio de compressão axial.

Figura 29 – Retificação dos corpos-de-prova cilíndricos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Corpo de prova cilíndrico sendo ensaiado à compressão axial.

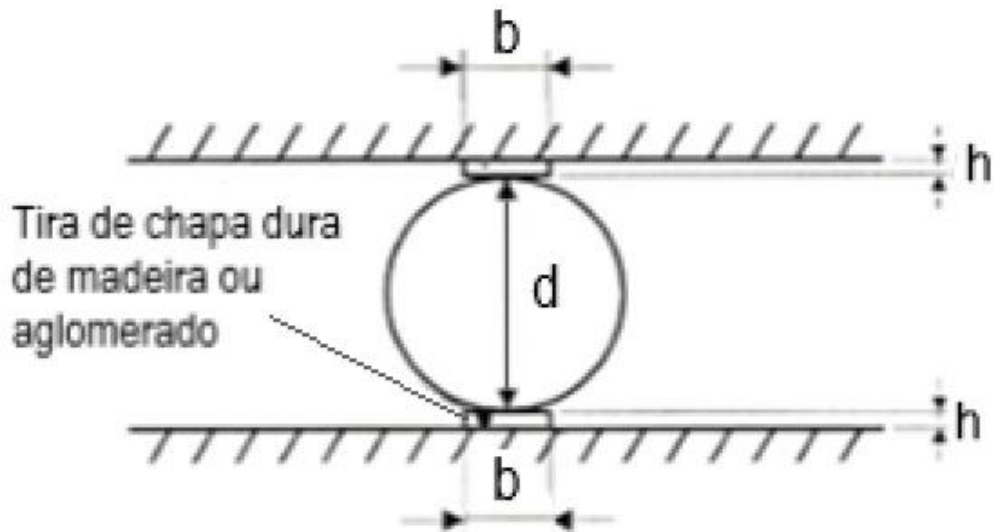


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para caracterização da resistência à tração por compressão diametral, foram seguidas as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 2011). O ensaio foi realizado com o

mesmo equipamento mostrado na Figura 30 e sob a mesma velocidade de deslocamento. A Figura 31 ilustra a configuração adotada para a realização do ensaio.

Figura 31 – Disposição do corpo de prova para o ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: Adaptado de NBR 7222 (ABNT, 2011).

Onde:

d = diâmetro do corpo de prova, em mm;

$b = (0,15 \pm 0,01) \cdot d$, em mm;

$h = (3,5 \pm 0,5)$, em mm.

A Equação 4 foi empregada para o cálculo dos valores de resistência à tração:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (4)$$

em que,

$f_{ct,sp}$: resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F : carga de ruptura (N);

d : diâmetro do corpo de prova (mm);

l : comprimento do corpo de prova (mm).

Na Tabela 11 são apresentados os valores médios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral e os desvios-padrão obtidos para

cada idade de ensaio. A matriz geopolimérica alcançou resistência mecânica de aproximadamente 40 MPa aos 28 dias. Os valores são menores que o encontrado por Soares *et al.* (2021). Esta diferença ocorreu possivelmente devido à utilização de matérias-primas de lotes e fornecedores diferentes, o que levou a diferentes razões molares e, conseqüentemente, a diferentes resistências mecânicas. Ressalta-se que inicialmente foram realizadas moldagens com a mesma dosagem utilizada originalmente por Soares *et al.* (2021), sem adaptações. Ainda assim, a resistência de 80 MPa não foi atingida, alcançando, no máximo, resistência de 45 MPa. Devido à necessidade de se produzir uma matriz menos viscosa, foram realizadas as adaptações descritas no item 3.3.

Os geopolímeros apresentaram ganho de resistência nos primeiros dias. A resistência à compressão aos 7 dias foi cerca de 93% da resistência obtida aos 28 dias, e aos 14 dias se obteve a mesma resistência alcançada aos 28 dias. O elevado ganho de resistência inicial acontece devido à maior quantidade de precursores disponíveis para reagir nos primeiros dias (Soares, 2020). A mesma tendência de elevado ganho de resistência nas primeiras idades foi observada nas resinas produzidas por Soares (2020), em que aos três dias as resinas alcançaram cerca de 85% da resistência obtida aos 28 dias. O concreto geopolimérico estudado por Mehta e Siddique (2017) atingiu 92% de resistência aos 3 dias, e 97% aos 7 dias da resistência alcançada aos 28 dias.

O ganho de resistência inicial é uma característica desejável quando se trata de material de reparo e reforço de estruturas de concreto armado. A alta resistência alcançada nas primeiras idades pelos geopolímeros demonstram seu potencial de utilização como material para recuperação estrutural.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas da matriz geopolimérica, com valores de desvio-padrão entre parênteses.

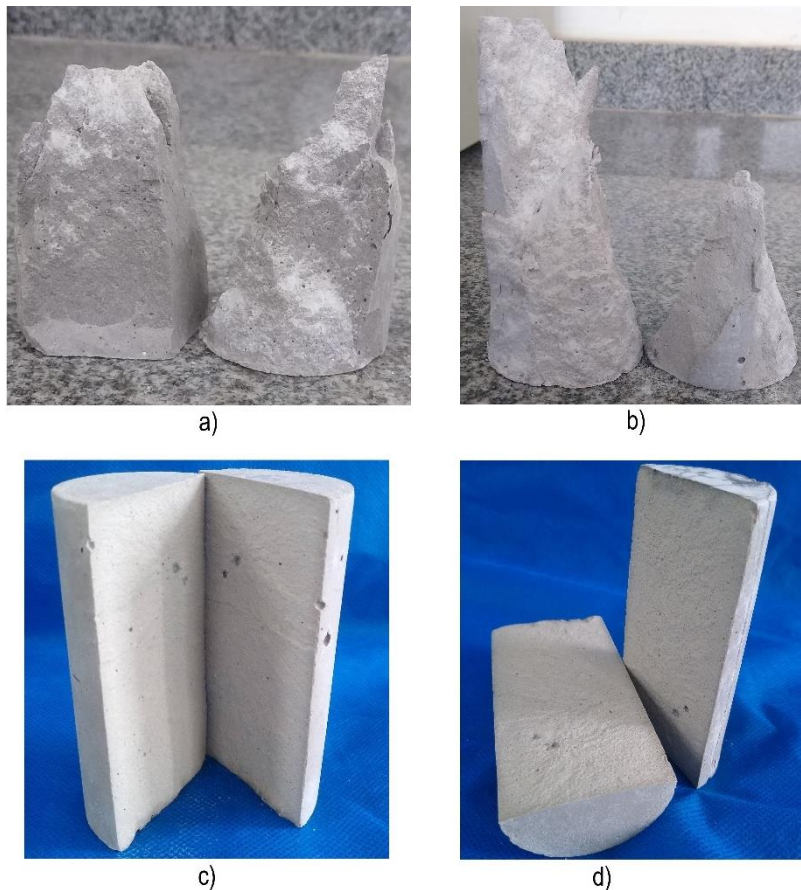
Matriz	Idade CP (dias)	f_{cm} (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)
MG	7	37,86 (\pm 5,43)	4,35 (\pm 0,38)
	14	40,40 (\pm 4,43)	3,39 (\pm 0,36)
	28	40,00 (\pm 2,79)	3,78 (\pm 0,67)
	120	43,87 (\pm 4,43)	3,64 (\pm 0,61)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A resistência à tração por compressão diametral da matriz geopolimérica manteve valores bem próximos nas idades ensaiadas. Os valores variaram de 8,39% a 9,45% em relação à resistência à compressão axial.

A Figura 32 mostra o padrão de ruptura à compressão e à tração dos corpos de prova geopoliméricos cilíndricos. Os corpos de prova ensaiados à compressão apresentaram ruptura semelhante a dos corpos de prova de concreto de cimento Portland, ruptura do Tipo A - Cônica-, conforme definição da NBR 5739 (ABNT, 2018). A ruptura dos corpos de prova ensaiados à tração também ocorre de maneira semelhante à ruptura de corpos de prova de concreto convencional, sendo por fendilhamento.

Figura 32 – Modo de ruptura dos corpos de prova: a) e b) ruptura no ensaio de resistência à compressão axial; c) e d) ruptura no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



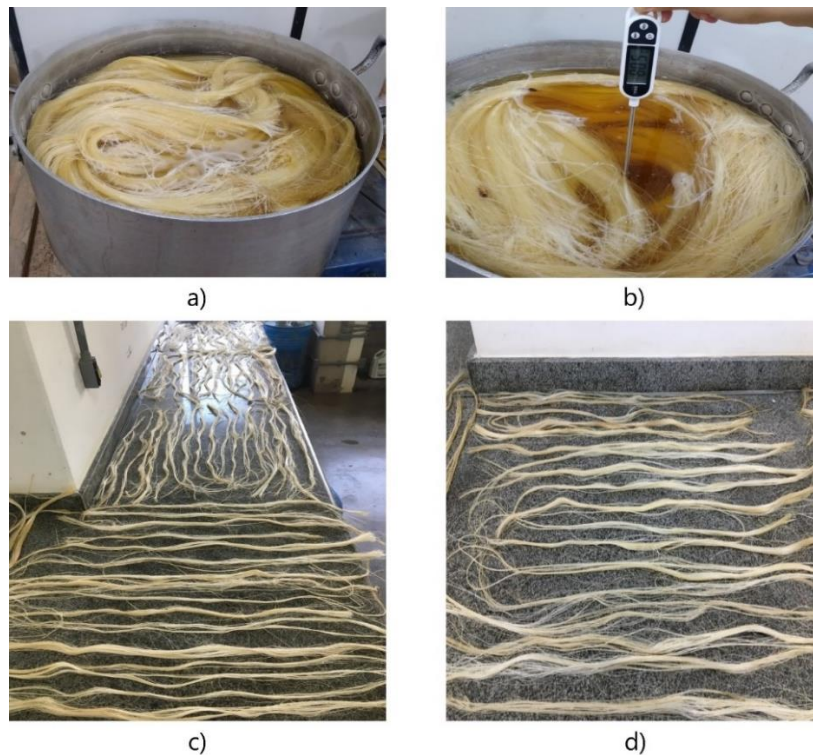
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 Tratamento das fibras

Antes da aplicação das fibras nos compósitos, elas foram tratadas com água quente a uma temperatura de $80 \pm 5^\circ\text{C}$, por um período de 1h. Esse procedimento foi adotado buscando eliminar o máximo de impurezas e resíduos superficiais aderidos às fibras devido ao processo de extração. Após esse processo, as fibras foram secas ao ar por 48h (Castoldi; Souza; Silva, 2019; Teixeira; Cardoso; Silva, 2021).

Depois de tratadas, as fibras foram penteadas e cortadas no comprimento necessário para aplicação no compósito. A Figura 33 mostra a etapa de tratamento das fibras com água quente.

Figura 33 – Etapa de tratamento das fibras: a) lavagem das fibras em água quente; b) aferição da temperatura da água; c) e d) fibras secas ao ar por 48h.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7 Comportamento mecânico dos compósitos

Para a análise do desempenho mecânico dos compósitos, foram confeccionados seis corpos de prova para o ensaio de tração direta, utilizando moldes metálicos com as dimensões de 500mm x 60mm x 10mm (comprimento,

largura, espessura, respectivamente).

Foram adotadas duas orientações distintas de fibras contínuas e alinhadas. Três compósitos foram confeccionados com as fibras orientadas na direção longitudinal do molde, enquanto outros três foram confeccionados com as fibras orientadas em um ângulo de 45° e 315°. As fibras orientadas a 45° foram distribuídas em duas direções. A nomenclatura atribuída aos corpos de prova representa a distribuição de fibras adotada, conforme a seguinte convenção: PEN-F0 ou PEN-F45x315, em que:

- PE: placa de ensaio;
- N: corresponde ao número do corpo de prova confeccionado;
- F0: refere-se às fibras distribuídas longitudinalmente;

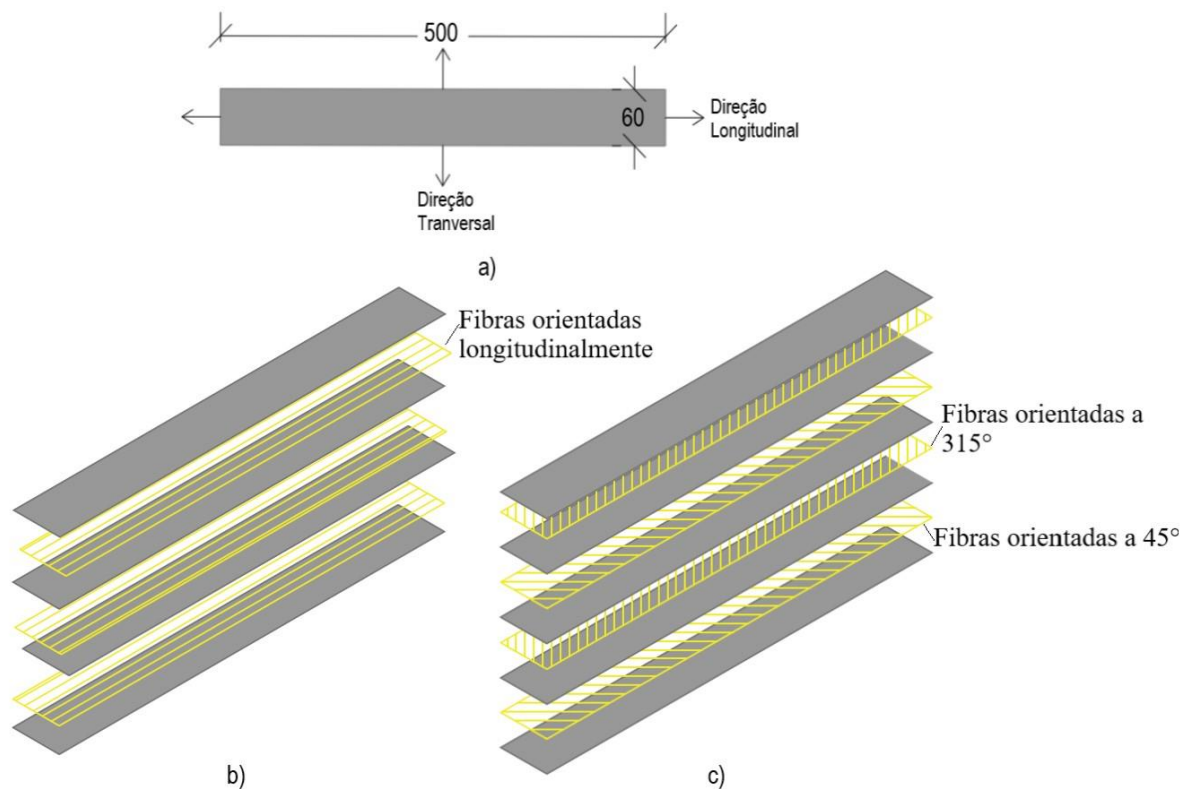
F45X315: refere-se às fibras distribuídas a 45° e a 315°

A mistura e a produção dos corpos de prova seguiram os procedimentos descritos nos itens 3.3 e 3.4. Durante a moldagem, a matriz geopolimérica foi colocada nos moldes metálicos manualmente com o auxílio de uma espátula metálica para o espalhamento, alternando-se as camadas de matriz e fibra, sendo a primeira e a última camada de compósito compostas por matriz. Cada camada de matriz adicionada foi adensada com o auxílio de uma mesa vibratória por um período de 30s para remover as bolhas de ar.

Foi adotada uma fração volumétrica de 3% de fibras. Embora a densidade das fibras não tenha sido investigada experimentalmente nesta pesquisa, utilizou-se o valor de 1,30 g/cm³ para determinar a quantidade total de fibras em cada camada. Conforme relatado por Mahmood *et al.* (2021) a densidade das fibras pode variar de 1,03 a 1,45 g/cm³. A preparação das fibras seguiu os procedimentos descritos em 3.6.

Nos compósitos com fibras orientadas longitudinalmente, a quantidade total de fibras foi dividida em três camadas. Já nos compósitos com fibras orientadas a 45°, as fibras foram distribuídas em quatro camadas: metade em uma direção (45°) e a outra metade na outra direção, à 315°, mantendo a mesma proporção de fibra em cada camada. Nos compósitos em que as fibras foram dispostas em duas direções, optou-se pela configuração de distribuição em quatro camadas para assegurar uma quantidade uniforme de fibras em cada uma e evitar que a espessura do compósito ultrapassasse 10 mm. A Figura 34 ilustra as dimensões e a configuração adotada para a moldagem dos compósitos

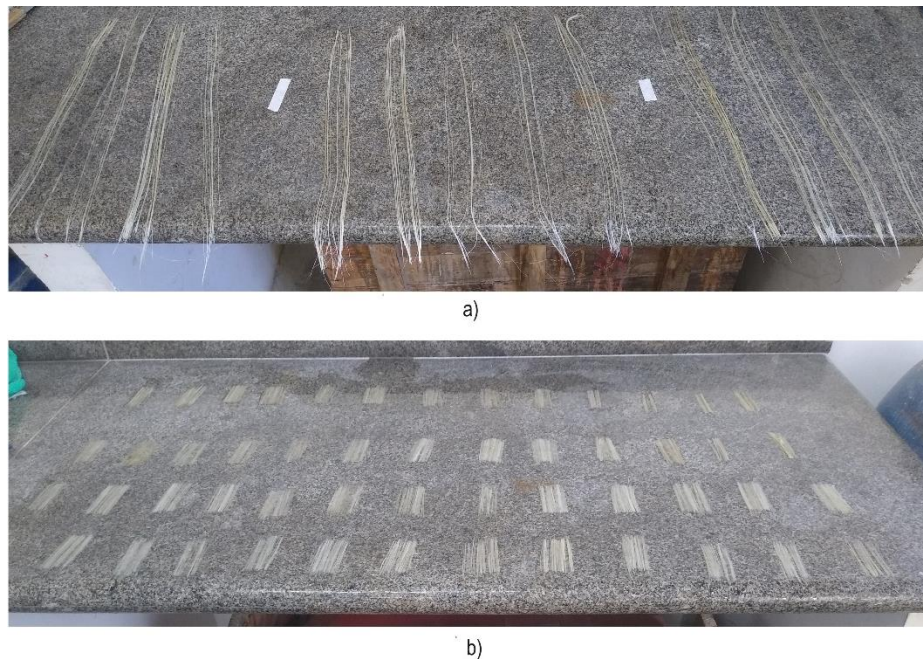
Figura 34 – Dimensões do compósito e esquema de moldagem: a) dimensões do compósito (dimensões em mm); b) compósitos com fibras orientadas longitudinalmente (três camadas de fibras); c) compósitos com fibras orientadas a 45° e 315° (quatro camadas de fibras).



Fonte: Elaborado pelo autor.

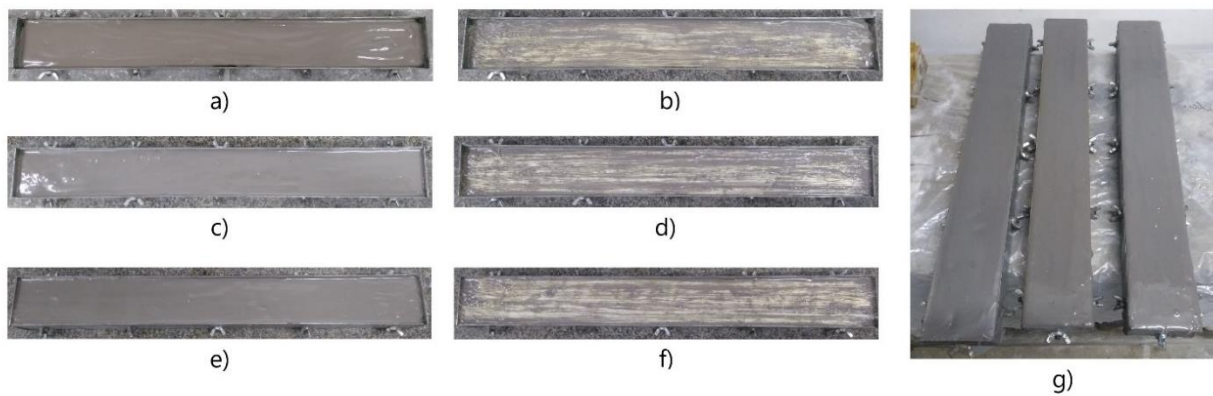
Antes da aplicação nos compósitos, além do tratamento com água quente, as fibras foram pré-saturadas via submersão em água por um período de 1h, com o objetivo de minimizar a absorção de água da matriz, devido à natureza hidrofílica das fibras, conforme procedimento adotado por Teixeira *et al.* (2022). Depois de saturadas, as fibras foram penteadas novamente para alinhamento. A Figura 35 mostra as fibras penteadas após saturação, enquanto as Figuras 36 e 37 mostram as etapas de moldagem dos corpos de prova com as duas distribuições de fibras adotadas.

Figura 35 – Fibras penteadas, após a saturação, para a preparação dos compósitos ensaiados à tração: a) fibras longitudinais; b) fibras distribuídas a 45° e 315°.



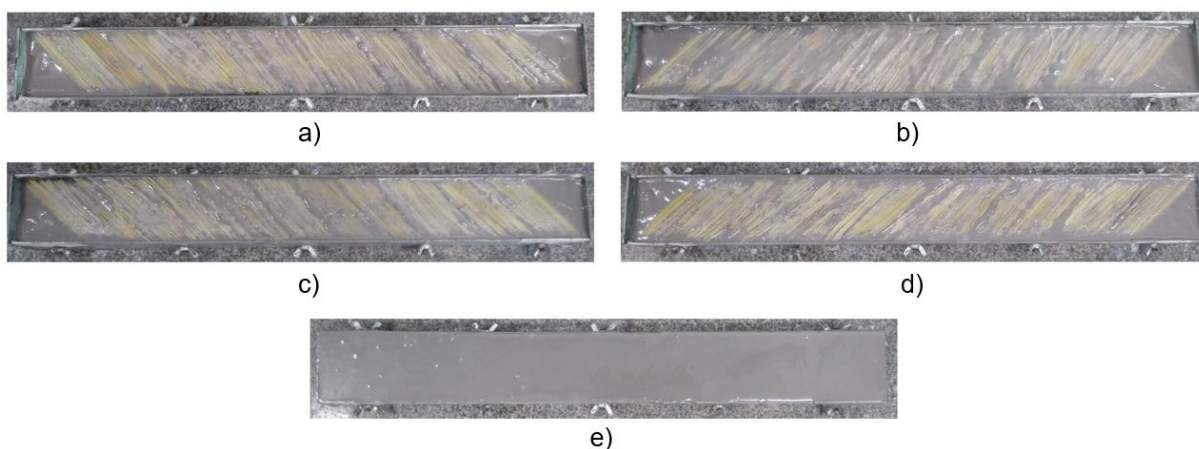
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 – Moldagem dos corpos de prova com fibras distribuídas longitudinalmente: a) 1.^a camada de matriz; b) 1.^a camada de fibras; c) 2.^a camada de matriz; d) 2.^a camada de fibras; e) 3.^a camada de matriz; f) 3.^a camada de fibras; g) compósito finalizado com camada de matriz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

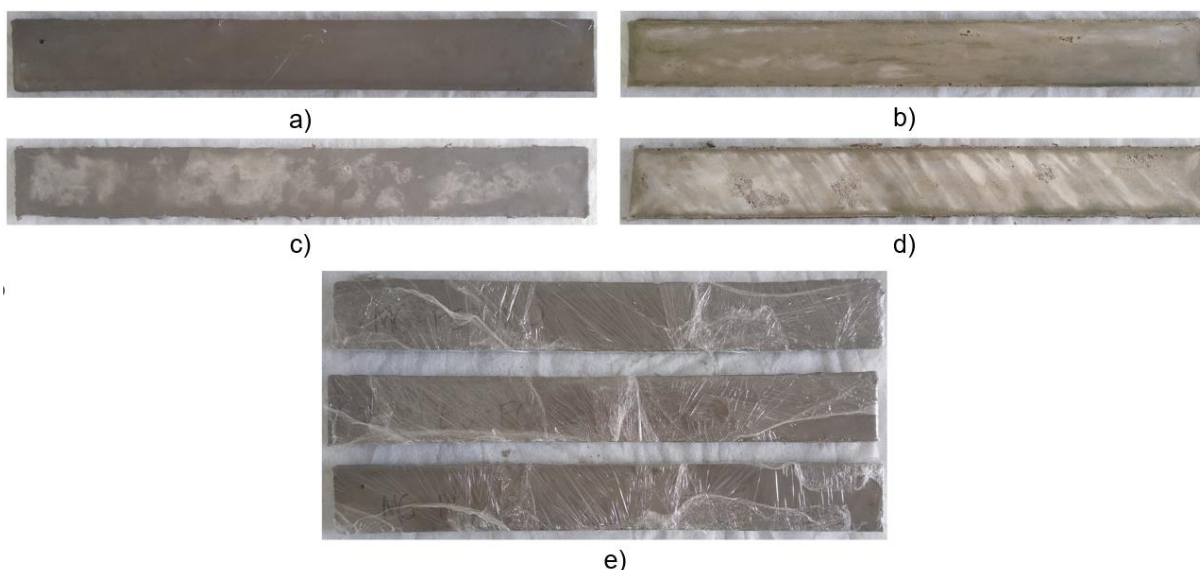
Figura 37 – Moldagem dos corpos de prova com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e a 315°: a) 1.^a camada de fibra; b) 2.^a camada de fibra; c) 3.^a camada de fibras; d) 4.^a camadas de fibras; e) compósito finalizado com camada de matriz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os corpos de prova foram desmoldados 24h após a moldagem e mantidos em cura à temperatura ambiente (25°C a 30°C) por um período de 28 dias, até a realização dos ensaios. Observou-se que, nos estágios iniciais do processo de cura, os corpos de prova sofreram retração e exibiram curvaturas em suas extremidades. Tais deformações podem ser atribuídas às características geométricas dos corpos de prova, uma vez que estes apresentam configuração esbelta. Estudos anteriores indicam que os geopolímeros à base de metacaulim são suscetíveis à retração devido à elevada demanda de água necessária à molhabilidade das partículas de metacaulim. Grande parte dessa água não se encontra quimicamente ligada, resultando em sua posterior evaporação (Kuenzel *et al.*, 2012; Zuhua *et al.*, 2009). Em virtude disso, os corpos de prova foram envoltos em filme plástico, conforme mostra a Figura 38, com o intuito de evitar o contato com o ar e a consequente evaporação da água livre (Rocha *et al.*, 2018).

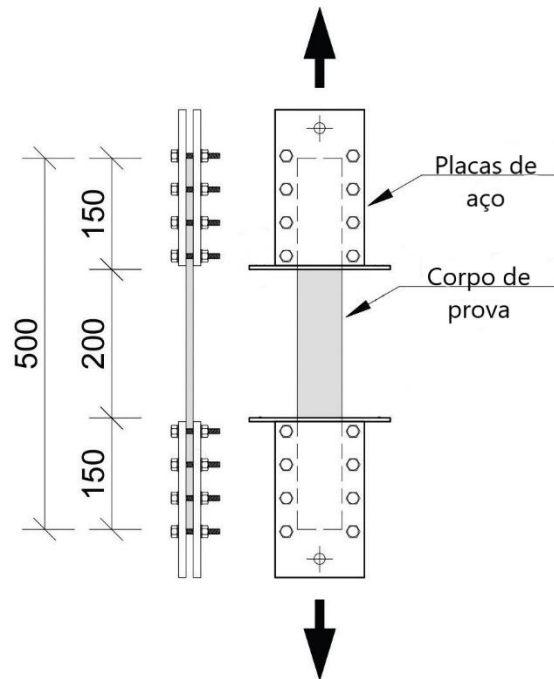
Figura 38 – Corpos de prova após a desmoldagem: a) e b) corpos de prova com as fibras distribuídas longitudinalmente; c) e d) corpos de prova com as fibras distribuídas a 45° e a 315°; e) corpos de prova envoltos com plástico filme.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios foram realizados em uma prensa universal de marca SHIMADZU, modelo UH com capacidade máxima de carga de 500kN pertencente ao LECIV/UENF, sob taxa de deslocamento de 0,5mm/min. Para a realização dos ensaios, os corpos de prova foram fixados em chapas de aço por meio de parafusos, utilizando uma chave de torque manual para fornecer torque controlado de 4N·m. Lixas de ferro com gramatura 80 foram coladas nas superfícies de contato da chapa de aço para promover atrito entre a chapa e o corpo de prova, prevenindo, assim, o deslizamento. A deformação e a abertura de fissuras foram analisadas pela técnica de Correlação de Imagem Digital (CID), com 200mm de comprimento útil para as medições, conforme ilustrado de forma esquemática na Figura 39. A Figura 40 mostra as lixas que foram fixadas nas superfícies das chapas de aço e o processo de aperto dos parafusos. Já a Figura 41 mostra a configuração adotada para a realização do ensaio.

Figura 39 – Desenho esquemático dos ensaios de tração direta dos compósitos (dimensões em mm).



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

Figura 40 – Preparação dos corpos de prova para o ensaio de tração direta: a) lixas que foram coladas nas chapas de aço; b) processo de aperto dos parafusos com chave de torque manual.



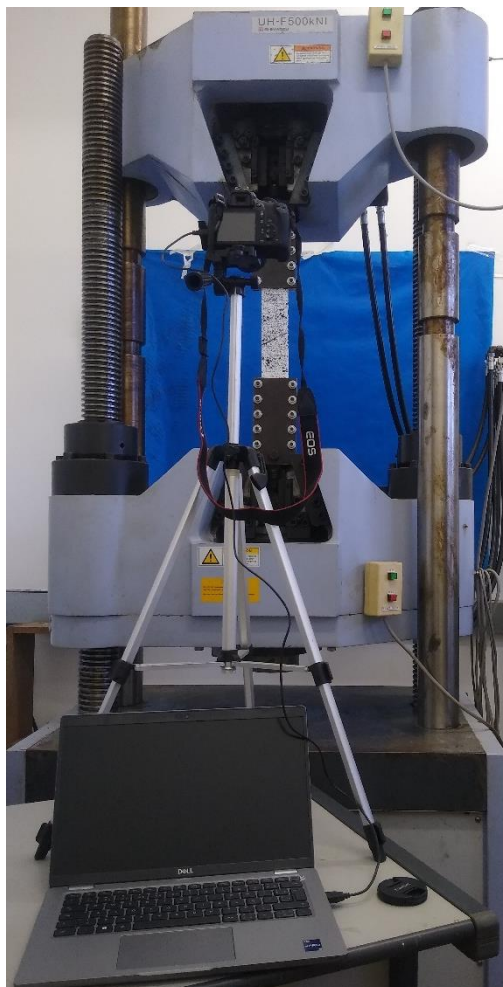
a)



b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 – Configuração adotada para realização do ensaio de tração direta e aquisição das imagens com a utilização da técnica CID.



Fonte: Elaborado pelo autor.

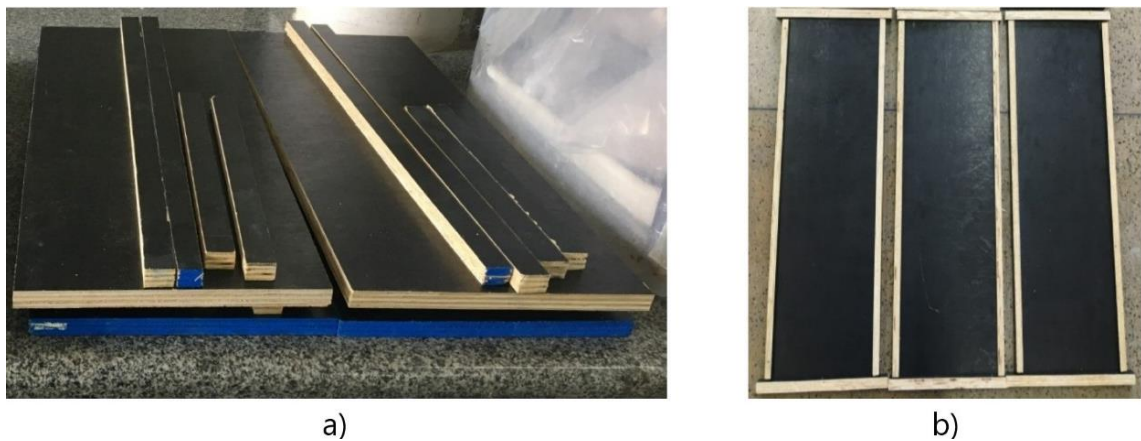
3.8 Desenvolvimento dos compósitos aplicados à viga

Para utilização como reforço nas vigas de concreto armado foram confeccionados doze placas de compósitos geopoliméricos com duas diferentes orientações de fibras contínuas e alinhadas. Na primeira configuração, as fibras foram dispostas em uma única direção, com orientação vertical em relação ao eixo longitudinal da viga. Na segunda configuração, as fibras foram dispostas em duas direções, com orientação tanto vertical quanto horizontal em relação ao eixo longitudinal da viga, formando uma malha.

Foram utilizadas fôrmas de compensado naval plastificado com 18mm de espessura para a moldagem dos compósitos. As fôrmas foram confeccionadas no LECIV/UENF, medindo 600 mm de comprimento, 25 mm de altura e 10 mm de espessura (Figura 42). As dimensões dos compósitos foram definidas em função do

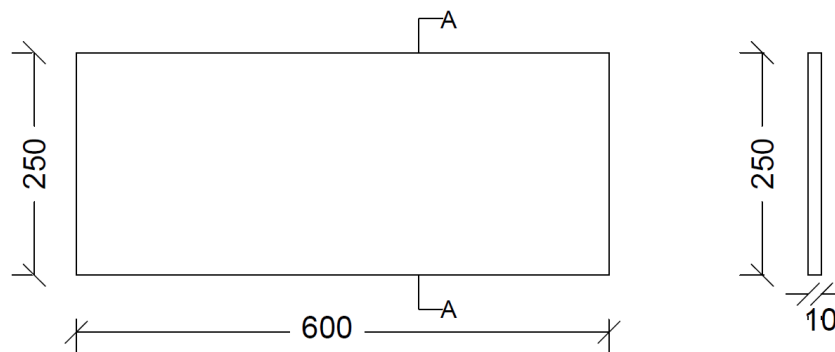
vão de cisalhamento e da altura da viga. A espessura foi adotada de modo que a aplicação dos compósitos não alterasse significativamente a largura das vigas, mantendo a mesma espessura adotada por Teixeira, Cardoso e Silva (2021), que desenvolveram compósitos cimentícios com fibras de curauá para reforço estrutural de vigas de concreto armado. A Figura 43 mostra as dimensões do compósito.

Figura 42 - Fôrmas dos compósitos em compensado naval: a) folhas de compensado naval cortadas para fabricação das fôrmas; b) fôrmas prontas com as dimensões do compósito.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 - Dimensões dos compósitos pré-fabricados (dimensões em mm).

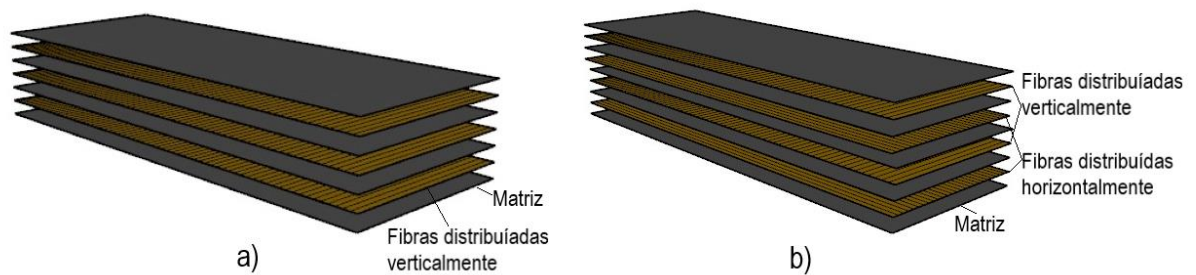


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em todos os compósitos, foi utilizada uma fração volumétrica de 3% de fibras de sisal. Nos compósitos com fibras distribuídas unidirecionalmente, a quantidade total de fibras foi dividida em três camadas. Já nos compósitos com fibras dispostas em duas direções, a quantidade total de fibras foi distribuída em quatro camadas, com duas camadas em cada direção e mantendo a mesma proporção volumétrica em cada uma. Essa configuração de quatro camadas foi adotada para garantir uma distribuição uniforme das fibras e evitar alterações na espessura do compósito. Em ambas as configurações, as camadas de fibras foram

intercaladas com camadas de matriz, sendo que a primeira e a última camada consistiram necessariamente de matriz. A Figura 44 ilustra o esquema de moldagem dos compósitos e a distribuição das camadas.

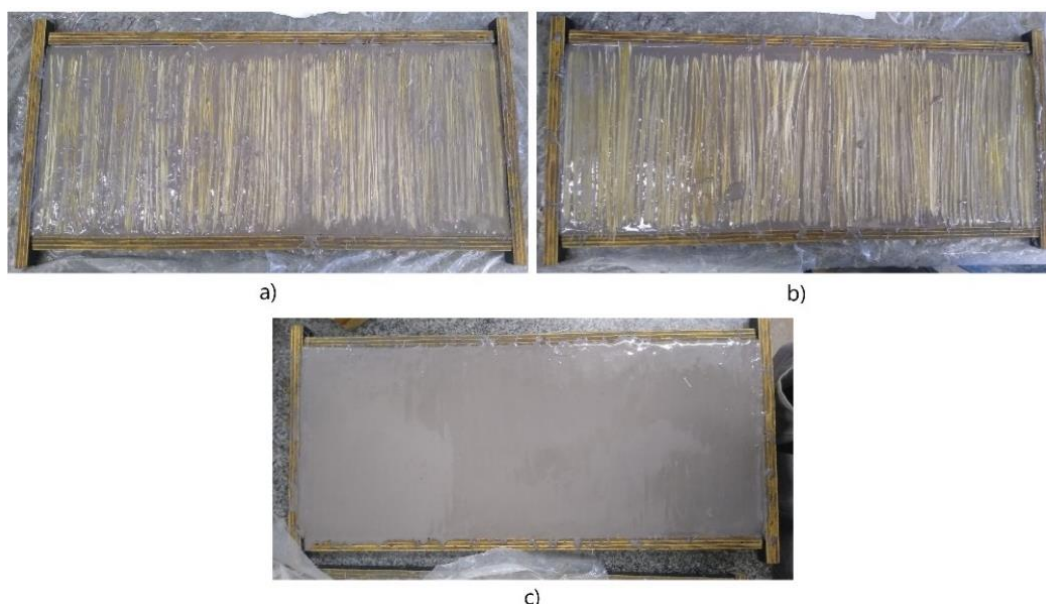
Figura 44 – Esquema de moldagem dos compósitos: a) compósitos com fibras distribuídas em uma direção (três camadas de fibras); b) compósitos com fibras distribuídas em duas direções (quatro camadas de fibras).



Fonte: Elaborado pelo autor.

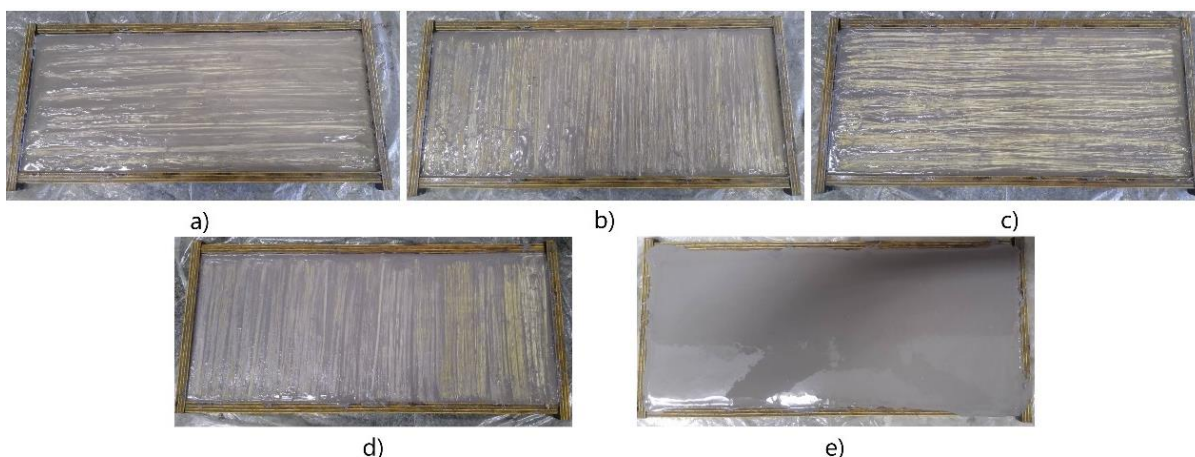
As misturas e a produção da matriz geopolimérica foram realizadas conforme descrito nos itens 3.3 e 3.4. Durante a moldagem foi seguido o mesmo processo descrito em 3.7, com dispersão manual da matriz no molde, alternando as camadas de fibras e matriz, com a primeira e a última camada composta por matriz. Cada camada de matriz foi adensada em mesa vibratória por 30s. As Figuras 45 e 46 mostram o processo de moldagem dos compósitos geopoliméricos.

Figura 45 – Processo de moldagem do compósito geopolimérico com fibras orientadas em uma direção: a) primeira camada de matriz + primeira camada de fibras; b) segunda camada de fibras; c) última camada de matriz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 – Processo de moldagem dos compósitos geopoliméricos com fibras orientadas em duas direções: a) primeira camada de matriz + primeira camada de fibra (longitudinal); b) segunda camada de fibra (transversal), sobreposta à camada de matriz; c) terceira camada de fibra (longitudinal), sobreposta à camada de matriz; d) quarta camada de fibra (transversal), sobreposta à camada de matriz; e) compósito finalizado.

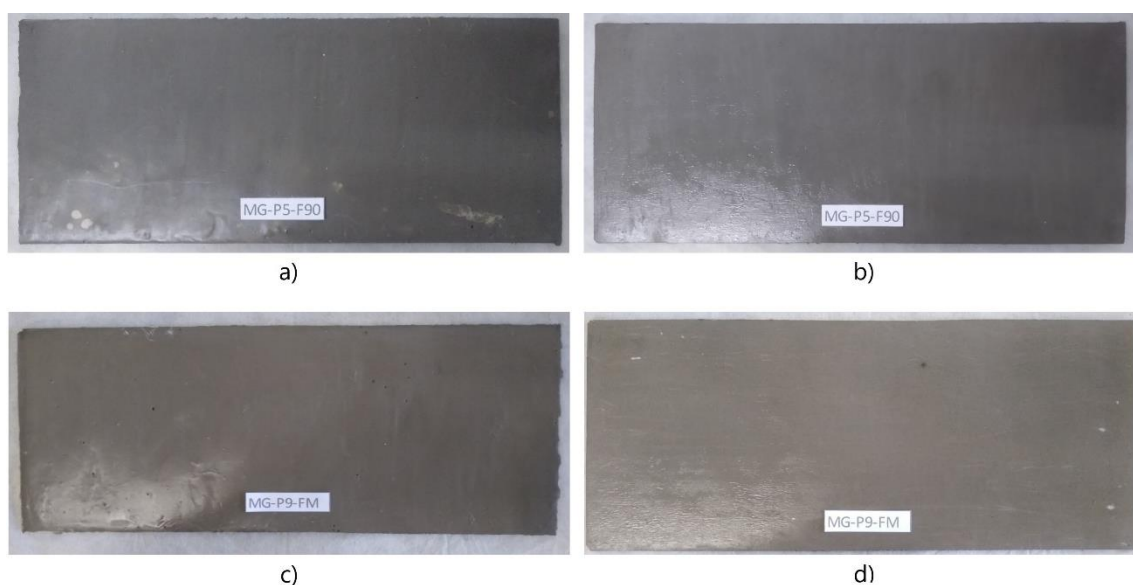


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os compósitos foram desmoldados 24h após a moldagem e mantidos em cura sob temperatura ambiente variando entre 25°C a 30°C até sua aplicação como reforço na viga. A Figura 47 mostra, após a desmoldagem, os dois tipos de compósitos fabricados. Os doze corpos de prova moldados foram nomeados conforme a distribuição das fibras aplicadas, adotando-se a seguinte nomenclatura: MG-PN-F90 ou MG-PN-FM, em que:

- MG: matriz geopolimérica;
- PN: número da placa confeccionada;
- F90: orientação das fibras - fibras distribuídas unidirecionalmente, com orientação vertical em relação ao eixo longitudinal das vigas;
- FM: orientação das fibras - fibras distribuídas em duas direções, com orientação vertical e horizontal em relação ao eixo longitudinal da viga - malha.

Figura 47 – Compósitos geopoliméricos após a desmoldagem: a) e b) compósito produzido com fibras em uma direção; c) e d) compósito produzido com fibras em duas direções.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.9 Composição do concreto

Para a moldagem das vigas de concreto armado, foi utilizada uma dosagem adaptada de Lima; Cardoso, Daniel; Silva, Flávio de Andrade (2019). Com a dosagem utilizada, buscou-se alcançar uma resistência próxima à obtida pela matriz geopolimérica de reforço.

A concretagem dos elementos estruturais foi dividida em três etapas. Nas primeira e segunda etapas foram concretadas as vigas que receberam o reforço geopolimérico. Na terceira etapa foram concretadas as vigas de referência (sem reforço). Em todas essas etapas foram moldados corpos de prova cilíndricos para caracterização mecânica do concreto.

Na primeira produção do concreto utilizou-se superplastificante na proporção de 0,15% em massa do teor de cimento; porém, o concreto não atingiu trabalhabilidade adequada. Por esse motivo a quantidade de superplastificante foi ajustada para 0,45% em massa do cimento. Na Tabela 12 são apresentadas as proporções dos materiais utilizados com a quantidade de superplastificante ajustada.

Tabela 12 – Composição do concreto.

Materiais	kg/m ³
Cimento CPV-ARI	336
Areia	642
Brita 0	808,41
Água	168
Superplastificante	1,5
Relação a/c	0,50

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O concreto foi produzido em uma betoneira com capacidade de 145 litros, previamente umedecida, pertencente ao LECIV/UENF. A mistura e produção dos concretos seguiu a sequência:

- umedecimento da betoneira com água;
- adição de toda quantidade do agregado graúdo e metade da água com homogeneização por 1 min (Figura 48a);
- adição do cimento e mistura por mais 1 min;
- adição da areia e da quantidade restante da água com toda a quantidade de superplastificante diluído, realizando a mistura por mais 3 min (Figura 48b).

Os concretos produzidos foram caracterizados no estado fresco por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2021a), conforme mostra a Figura 49. O valor do abatimento obtido para o concreto produzido foi de 125 mm.

Figura 48 – Produção do concreto em betoneira: a) homogeneização do agregado graúdo com a água; b) mistura de todos os constituintes do concreto.



a)

Fonte: Elaborado pelo autor.

b)

Figura 49 – Ensaio de abatimento de cone (*slump test*).



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.10 Propriedades do concreto no estado endurecido

Além da caracterização no estado fresco, foram determinadas as propriedades dos concretos no estado endurecido, por meio dos ensaios de compressão axial (f_c) e resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$).

Para a realização dos ensaios foram moldados corpos de prova cilíndricos com 100 mm x 200 mm (diâmetro e altura, respectivamente). Durante a concretagem os corpos de prova foram adensados com um vibrador de imersão em contato com a face lateral externa dos moldes.

Os corpos de prova foram desmoldados 24 h após a moldagem (Figura 50) e mantidos em cura úmida em tanques com água saturada com cal por 28 dias.

Figura 50 – Corpos de prova cilíndricos de concreto: a) corpos de prova vistos frontalmente; b) corpos de prova - vista superior.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.10.1 Resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), em uma máquina universal Shimadzu® com capacidade de carga de 500 kN. Para realização do ensaio, os corpos de prova tiveram suas superfícies regularizadas em uma máquina retificadora, conforme mostrado na Figura 29.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 7222 (ABNT, 2011), realizada no mesmo equipamento do ensaio de compressão axial. Adotou-se a configuração ilustrada na Figura 31.

3.11 Características das vigas

Para alcançar os objetivos propostos neste estudo, foram confeccionadas nove vigas prismáticas de concreto armado com dimensões de 120 mm x 250 mm x 1500 mm (largura, altura e comprimento, respectivamente). Seis dessas vigas receberam reforço com placas pré-moldadas de compósitos geopoliméricos com fibras de sisal, enquanto as três restantes não receberam nenhum tipo de reforço, sendo consideradas vigas de referência.

As vigas foram dimensionadas de maneira a garantir que o colapso ocorresse por cisalhamento quando ensaiadas à flexão em três pontos. Para isso, foram adotadas armaduras na zona de tração que assegurassem resistência à flexão superior à resistência ao cisalhamento. O dimensionamento dos elementos estruturais foi realizado de acordo com as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2023), utilizando aços classificados pela NBR 7480 (ABNT, 2022b) nas categorias CA-50 e CA-60. Na zona de tração das vigas foram utilizadas três barras de aço CA-50 com diâmetro nominal de 16mm, enquanto para a armadura transversal foram utilizadas barras CA-60 com diâmetro nominal de 5,0mm.

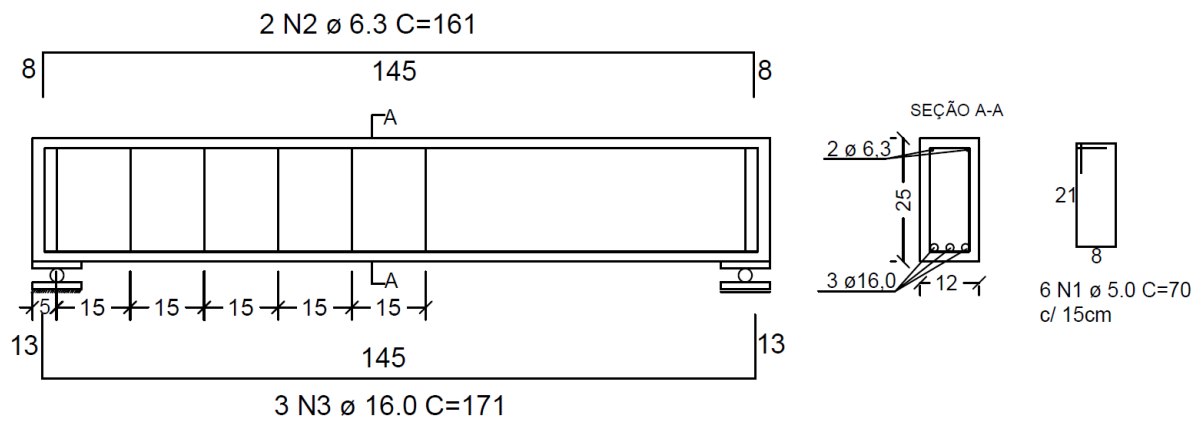
Para melhor avaliar o efeito do compósito como reforço, a zona crítica de cisalhamento das vigas, onde o reforço foi aplicado, não foi armada com estribos. Essa configuração sem estribo na zona de reforço foi escolhida com o intuito de avaliar o potencial do sistema reforço externo, já que os estribos resistem uma parte dos esforços de cisalhamento e, na presença deles, a contribuição do reforço externo seria reduzida (Bousselham; Chaallal, 2006; Ombres, 2015).

As características geométricas e o detalhamento das armaduras transversais e longitudinais das vigas produzidas são mostrados na Figura 51. Todas as vigas foram produzidas com a mesma taxa de armadura de tração longitudinal ($\rho_s = 2,371\%$) e, também, no vão não reforçado idêntica taxa de armadura transversal ($\rho_{sw} = 0,218\%$), além de mesma seção transversal. A Tabela 13 mostra um resumo das características das vigas produzidas e ensaiadas, e a resistência à compressão e à tração do concreto ensaiado.

As vigas foram nomeadas conforme a presença ou não do reforço e a orientação das fibras dos compósitos, adotando a seguinte nomenclatura: REF-N, F90-N ou FM-N, em que:

- REF: grupo de vigas sem reforço (vigas de referência);
- F90: grupo de vigas reforçadas com compósitos de fibras distribuídas em uma direção, formando um ângulo de 90° com o eixo longitudinal das vigas;
- FM: grupo de vigas reforçadas com compósitos de fibras distribuídas em duas direções, em forma de malha;
- N: representa o número da viga confeccionada.

Figura 51 – Detalhamento das armaduras (dimensões em cm, exceto diâmetros, que estão em mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Características das vigas produzidas e ensaiadas com desvio-padrão entre parênteses.

Vigas	f_c (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	ρ_s (%)	ρ_{sw} (%)
REF-1	53,21 (\pm 5,78)	2,96 (\pm 0,75)	2,371	0,218
REF-2				
REF-3				
F90-1	51,78 (\pm 5,69)	2,90 (\pm 0,20)		
F90-2				
F90-3				
FM-4	51,02 (\pm 5,90)	2,84 (\pm 0,41)		
FM-5				
FM-6				

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.12 Cálculo da resistência à flexão e ao cortante

O dimensionamento das vigas foi feito seguindo as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2023). Foram adotados os valores de resistência do aço encontrados experimentalmente no ensaio de tração direta, conforme descrito no item 3.2.9. Também foram consideradas as resistências do concreto encontradas experimentalmente. Não foram adotados coeficientes de minoração. A Tabela 14 mostra os valores de ruptura por flexão e cisalhamento obtidos. Ressalta-se que nos valores apresentados na Tabela 14 considerou-se apenas as características do aço e do concreto ensaiados, sem considerar a parcela resistente pelo reforço externo aplicado.

A parcela V_c , que foi calculada utilizando o modelo de cálculo I, item 17.4.2.2 da 6118 (ABNT, 2023), considera a parcela resistente do cortante resistida apenas pelo concreto. Os valores dessa parcela foram mostrados para melhor entendimento da carga de ruptura das vigas de referência, pois as vigas não receberam estribos no vão de cisalhamento, sendo o esforço resistido unicamente pelo concreto. Os valores de ruptura de $V_{u-cortante}$ correspondem à soma da parcela resistente do concreto e do aço das armaduras transversais no vão em que as vigas foram armadas com estribos conforme mostrado na Figura 51. Nesse trecho utilizou-se taxa de armadura transversal mínima, dimensionada de acordo com o item 17.4.1.1.1 da NBR 6118 (ABNT, 2023).

Tabela 14 – Carga de ruptura por flexão e cortante teóricas das vigas ensaiadas.

Viga	d (mm)	x (mm)	$V_{u-flexão}$ (kN)	V_c (kN)	$V_{u-cortante}$ (kN)
REF-1	212	8,23	183,66	45,34	83,46
REF-2					
REF-3					
F90-1	212	8,45	182,73	44,53	82,64
F90-2					
F90-3					
FM-4	212	7,46	182,22	44,09	82,21
FM-5					
FM-6					

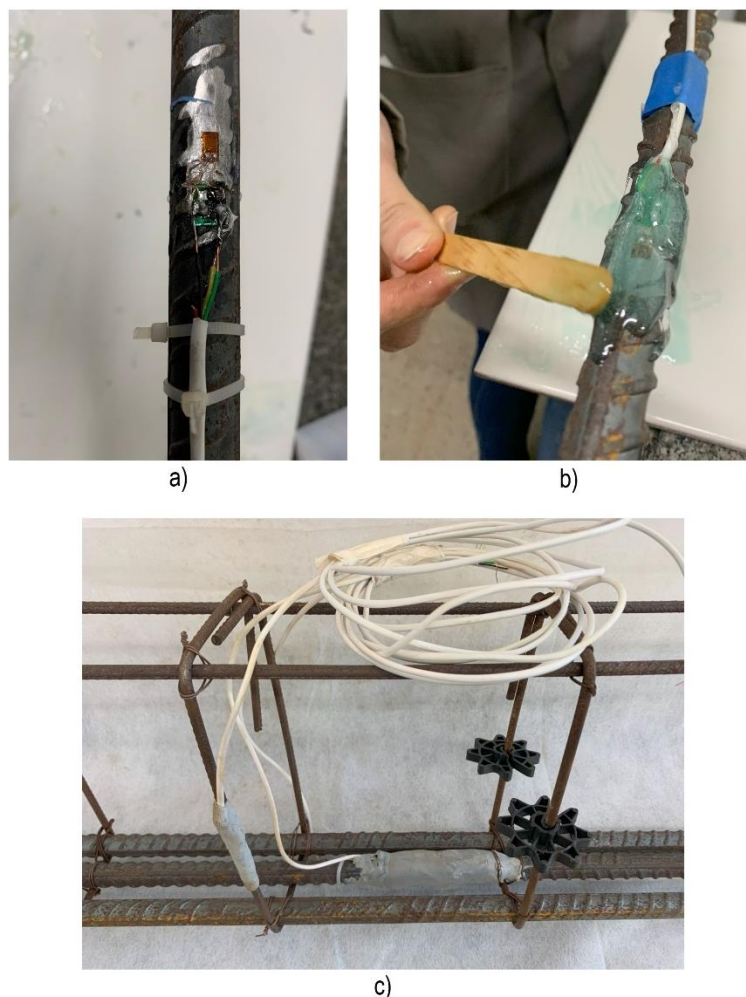
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.13 Produção e instrumentação das vigas

A deformação específica nas barras de aço longitudinais e transversais durante o ensaio de flexão das vigas foi medida por sensores elétricos de resistência (*strain gauges*). Nas barras centrais posicionadas na zona de tração das vigas foram colados dois sensores, e o estribo central foi instrumentado com um sensor.

Para a fixação dos sensores nas barras de aço foi necessário criar uma superfície lisa. Portanto, a região de colagem dos sensores foi lixada para remover as nervuras das barras. Após essa etapa, com as barras lixadas e limpas, os sensores foram colados com o auxílio da cola adesiva instantânea TekBond® 793. Em seguida, os sensores receberam uma camada de resina de silicone. Para evitar danos durante o processo de concretagem e para proteção contra água e umidade, os sensores foram revestidos com uma camada protetora de adesivo epóxi Araldite Hobby da TekBond®. Por fim, adicionou-se uma última camada protetora com massa adesiva durepoxi, da marca Loctite®. A Figura 52 mostra a etapa de instrumentação das barras de aço.

Figura 52 – Instrumentação das barras de aço com *strain gauges*: a) fixação dos sensores; b) proteção dos sensores com adesivo epóxi; c) sensores das duas barras protegidos com massa adesiva durepoxi.



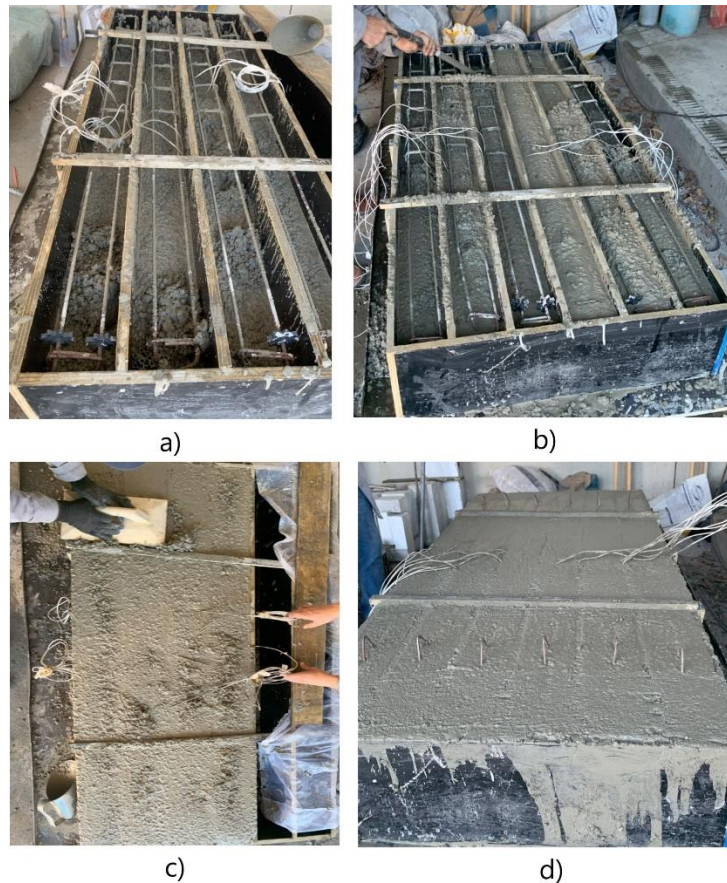
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a confecção das vigas foram utilizadas fôrmas de compensado naval plastificado, nas quais foram aplicados desmoldantes para concreto Vedacit®. Também foram utilizados espaçadores plásticos para garantir o cobrimento de 20mm. Com as fôrmas já montadas, as armaduras foram posicionadas no interior destas, e na sequência foi lançado o concreto. Para a mistura e a produção do concreto das vigas foram seguidos os procedimentos descritos no item 3.9. O concreto lançado nas fôrmas das vigas foi adensado com o auxílio de um vibrador de imersão. Com o concreto ainda no estado fresco, foram posicionados ganchos na face superior das vigas para facilitar o manuseio, movimentação e transporte no estado endurecido.

Durante as primeiras 24h as vigas foram cobertas com uma manta úmida para evitar a perda de umidade. Após essa etapa as vigas foram desmoldadas. A

cura foi realizada durante 28 dias com as vigas cobertas com manta úmida, sendo realizados ciclos de molhagem três vezes ao dia. A Figura 53 mostra a etapa de moldagem das vigas.

Figura 53 – Moldagem das vigas de concreto armado: a) lançamento do concreto nas fôrmas; b) adensamento com vibrador de imersão; c) regularização da superfície; d) vigas concretadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

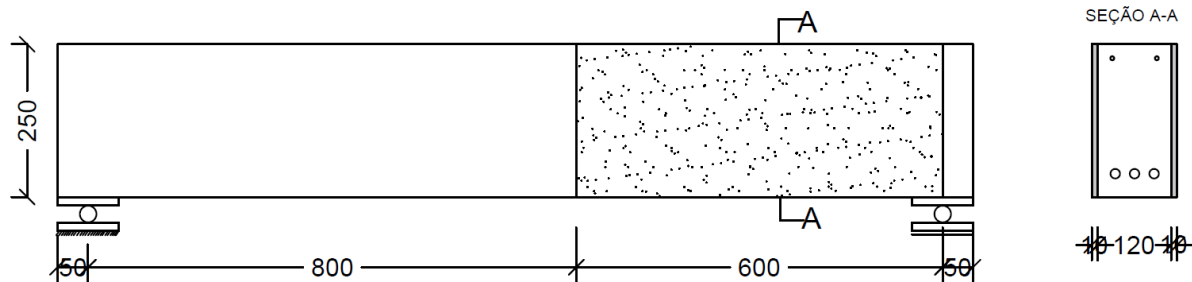
3.14 Ensaio à flexão a três pontos

Após os 28 dias de cura das vigas, as placas compósitas de matriz geopolimérica reforçadas com fibras de sisal foram fixadas nas duas faces laterais das vigas no vão crítico de cisalhamento. Para aplicação do reforço, as faces laterais das vigas foram limpas com auxílio de panos úmidos. A fixação das placas de reforço foi realizada utilizando resina epóxi estrutural Sikadur® com 2mm de espessura. Para garantir a espessura de resina, foram utilizadas arruelas metálicas lisas com a espessura especificada, fixadas com cola adesiva instantânea nas vigas. Com o auxílio de uma espátula metálica, a quantidade adequada de resina foi

aplicada nas faces das vigas que receberam o reforço. Conforme especificado pelo fabricante, a resina atinge resistência à compressão de 70 MPa após sete dias.

A Figura 54 ilustra os compósitos aplicados nas duas faces laterais das vigas, os quais atuaram como reforço externo.

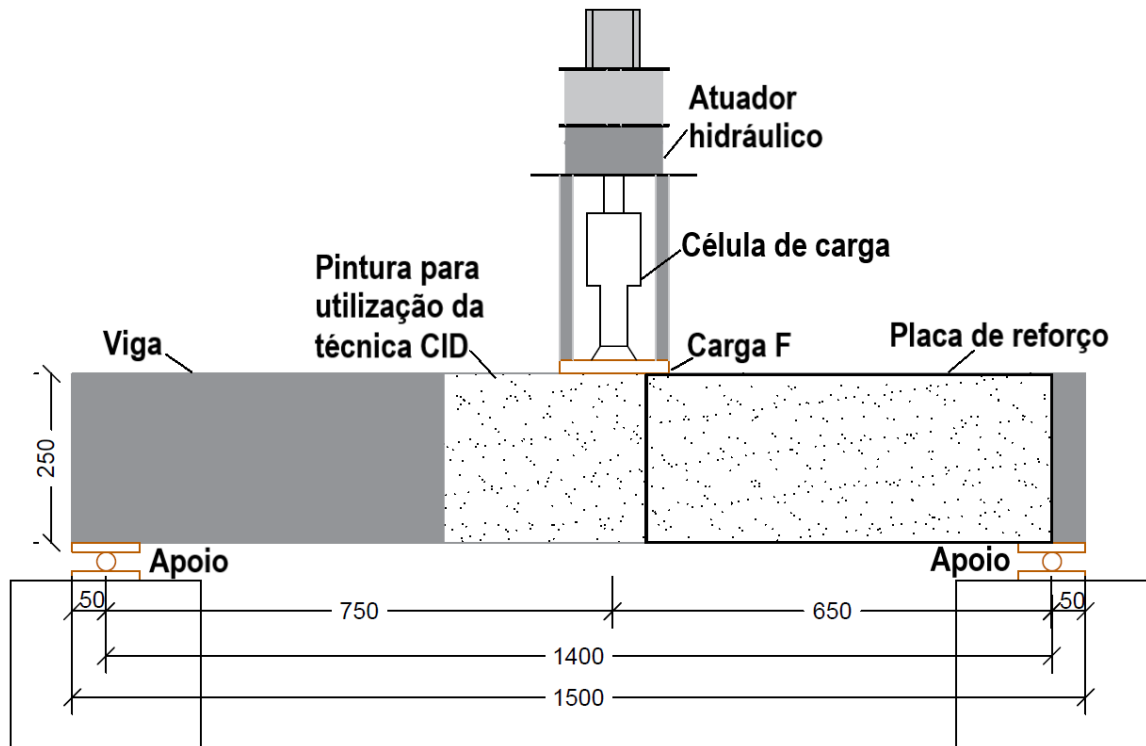
Figura 54 – Compósitos aplicados à viga no vão de cisalhamento (dimensões em mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a realização dos ensaios, todas as vigas foram biapoiadas, com apoios de 1° e 2° gênero, distantes entre si 1400 mm. O carregamento consistiu em uma carga concentrada excêntrica, estando mais próximo do apoio de 1° gênero à direita, com uma distância de 650mm, sendo este o vão de cisalhamento analisado. A relação a/d de todas as vigas foi de 3,06. A Figura 55 ilustra de maneira esquemática o ensaio realizado nas vigas.

Figura 55 – Esquema de ensaio das vigas (dimensões em mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Antes da realização dos ensaios, as placas compósitas que foram aplicadas no vão de cisalhamento das vigas e o vão de cisalhamento das vigas de referência foram preparados para a utilização da técnica CID. O processo de preparação consistiu primeiramente na criação de um padrão de fundo branco fosco. Posteriormente, após a secagem, foram criados com tinta spray pontos pretos foscos espaçados aleatoriamente. A fissuração, a deformação específica do concreto na face superior das vigas e o deslocamento vertical foram medidos por meio da técnica CID.

Os ensaios foram realizados 120 dias após a produção das vigas. Para tal, foi utilizado um atuador hidráulico modelo 661.23F-01, controlado pelo sistema servo-hidráulico MTS, com capacidade de carga de 500 kN, e velocidade de aplicação de carga de 1,0mm/min até a ruptura. O ensaio foi realizado na laje de reação na Oficina de Estruturas do LECIV/UENF.

O equipamento utilizado para fazer as leituras dos sensores elétricos de resistência das armaduras (*strain gauges*) foi o P3 *Strain Indicator*, um instrumento portátil operado por bateria. A Figura 56 mostra o esquema de ensaio das vigas.

Figura 56 – Configuração do ensaio das vigas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.15 Previsão teórica da capacidade ao cisalhamento das vigas reforçadas

A capacidade resistente ao cisalhamento das vigas reforçadas externamente com compósitos geopoliméricos com fibras de sisal foi prevista conforme as recomendações da *American Concrete Institute (ACI) 549.4R-20* (ACI, 2020). De acordo com o modelo do ACI, a resistência final da viga ao cisalhamento baseia-se na suposição de que a resistência combinada dos elementos, a saber: contribuição do concreto V_c , do aço V_s e do reforço externo V_f , conforme Equação 5:

$$V_u = V_c + V_s + V_f \quad (5)$$

Nesta pesquisa, o vão reforçado não foi armado com estribos, por esse motivo a parcela V_s foi desconsiderada. Segundo o modelo do ACI, a contribuição do reforço externo de compósitos reforçados com fibras (V_f) é obtida conforme a Equação 6:

$$V_f = n \cdot A_f \cdot f_{fv} \cdot d \quad (6)$$

Onde,

n é o número de camadas de fibras;

A_f é a área do tecido por unidade de largura efetiva de cisalhamento;

f_{fv} é a resistência à tração da fibra, que é calculado de acordo com a Equação 7;

d corresponde a altura útil da viga.

$$f_{fv} = E_f \cdot \varepsilon_{fv} \quad (7)$$

Onde,

E_f é o módulo de elasticidade do material compósito;

ε_{fv} é a deformação de tração.

Para calcular a contribuição do reforço, é necessário conhecer o parâmetro da área do tecido por unidade de largura efetiva no cisalhamento (A_f). No caso de fibras e tecidos sintéticos, esse parâmetro é facilmente determinado devido ao arranjo bem definido de trama e urdume. Entretanto, para as fibras naturais de sisal, em razão de suas características morfológicas, não é possível determinar com precisão sua seção transversal e área ao longo de 1 mm linear. Diante disto, o método foi adaptado. Conhecendo a largura e o comprimento da camada de fibra aplicada, determinou-se a área da camada. Em seguida, dividindo-se o volume de fibras pela área da camada, calculou-se a espessura da camada em milímetros.

Considerando que as fibras foram distribuídas uniformemente ao longo de toda a camada de reforço, a espessura da camada permaneceu constante em toda a sua extensão. Assim, o parâmetro A_f foi obtido multiplicando-se a espessura da camada por 1mm de extensão de reforço.

A Tabela 15 mostra as propriedades dos compósitos utilizadas no cálculo da contribuição do reforço. A deformação de tração é limitada pela ACI 549.4R-20 (ACI, 2020) a 0,004 mm/mm, portanto esse foi o valor adotado. O módulo de elasticidade foi obtido através da caracterização mecânica do compósito, sendo considerado a média obtida para os compósitos ensaiados com as fibras orientadas longitudinalmente.

Tabela 15 – Propriedades do compósito.

Nomenclatura	Un.	F90	FM
Número de camadas (n)	Qtd.	3	4
Área de fibras (A_f)	mm ² /mm	0,1	0,075
Deformação* (ε_{fv})	mm/mm	0,004	0,004
Módulo de elasticidade (E_f)	GPa	10,87	10,87
Resistência à tração	MPa	43,47	43,47

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o ACI 549.4R-20 (ACI, 2020), a contribuição do concreto pode ser calculada seguindo o ACI 318-19 (ACI, 2019). No entanto, como o dimensionamento das vigas nesta pesquisa foi realizado com base na norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2023), o valor de V_c adotado foi o calculado pela NBR 6118 (ABNT, 2023), conforme apresentado anteriormente na Tabela 14. A Tabela 16 apresenta os valores da resistência ao cisalhamento das vigas reforçadas, conforme previsto pelo método descrito.

Tabela 16 – Previsão teórica – capacidade das vigas reforçadas.

Viga	V_c (kN)	V_f (kN)	$V_c + V_f$ (kN)
F90	44,53	5,53	50,06
FM	44,09	5,53	49,62

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.16 Correlação de Imagem Digital (CID)

Com o objetivo de analisar o processo de fissuração dos compósitos ensaiados à tração, bem como dos compósitos aplicados como reforço às vigas, empregou-se a técnica de Correlação de Imagem Digital, do inglês *Digital Image Correlation (DIC)*. A técnica consiste em um método óptico que é capaz de medir deformações de modo não invasivo, sem a necessidade de contato com a superfície, fornecendo diretamente deslocamentos e deformações por meio da comparação de imagens digitais nos estados não deformado e deformado (Pan *et al.*, 2009).

A CID consiste na análise de imagens consecutivas, obtidas antes e depois da deformação sofrida pelo corpo de prova. Inicialmente, uma área de interesse é escolhida manualmente, sendo dividida em subconjuntos (conjuntos de *pixels*). Em seguida, são calculados os deslocamentos em cada ponto do subconjunto. Então, o

movimento do ponto central do subconjunto é rastreado, correlacionando a imagem de referência (imagem não deformada) com as imagens deformadas (Yao *et al.*, 2015).

A aquisição das imagens para aplicação da técnica foi realizada em uma câmera digital Canon modelo EOS Rebel T7 com lente EF-S 18-55mm, controlada pelo *software digiCamControl*. No ensaio de tração direta dos compósitos, o *software* foi programado para capturar uma imagem a cada 2s; já no ensaio à flexão das vigas de concreto armado, o *software* foi programado para capturar uma imagem a cada 5s. Com a utilização do *software*, além de programar a frequência dos disparos, foi possível transferir as imagens diretamente para um computador. A análise das imagens, a análise da abertura de fissuras, deformações e deslocamentos foi feita utilizando-se o *software Gom Correlate*[®], da empresa Zeiss Inspect.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na caracterização mecânica dos compósitos, bem como os ensaios realizados nas vigas, analisando a carga de fissuração e ruptura, a capacidade resistente das vigas reforçadas e a ductilidade proporcionada pelo reforço. Os resultados desta pesquisa são comparados com estudos presentes na literatura sobre reforço de vigas de concreto armado com compósitos.

4.1 Comportamento mecânico dos compósitos

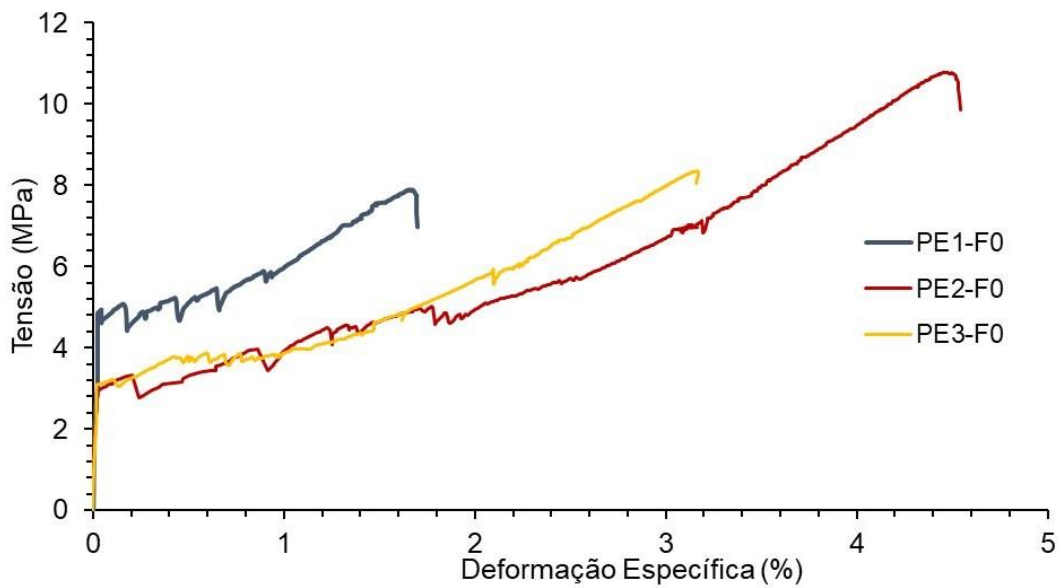
Os compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente em três camadas, nomeados conforme o critério descrito no item 3.7 como PE1-F0, PE2-F0 e PE3-F0, apresentaram comportamento *strain-hardening*, com a formação de múltiplas fissuras ao longo do corpo de prova. A Figura 57a apresenta a curva tensão *versus* deformação específica dos compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente. Neste tipo de compósito o trecho inicial é, geralmente, caracterizado pelo comportamento linear-elástico, em que tanto a fibra como a matriz se comportam linearmente. Neste estágio de carregamento, antes do aparecimento da primeira fissura, a rigidez do compósito é determinada pelas propriedades da matriz, devido à baixa fração volumétrica de fibras - 3% (Silva; Mobasher; Toledo Filho, 2009; Teixeira *et al.*, 2022).

A partir da curva tensão *versus* deformação específica é possível observar quatro estágios diferentes de comportamento (Silva; Mobasher; Toledo Filho, 2009). A região linear inicial (estágio I) é interrompida com o aparecimento da primeira fissura. Após o surgimento da primeira fissura, a capacidade de carga do compósito continua a aumentar com a formação de múltiplas fissuras (estágio II) devido ao efeito de distribuições de tensões proporcionado pelas fibras. O espaçamento entre as fissuras diminui a partir do surgimento de novas fissuras e do aumento da deformação.

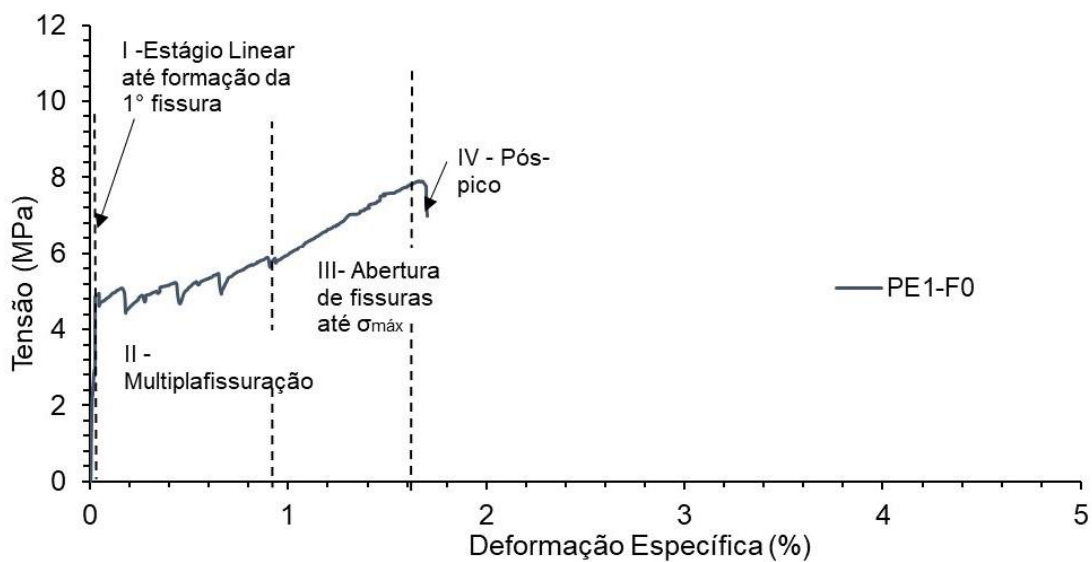
No estágio III a abertura de fissuras se esgota e não há formação de novas fissuras, sendo caracterizado pelo alargamento das fissuras até a tensão máxima do compósito. Neste estágio há alongamento das fibras e aumento da rigidez do

compósito pela contribuição das fibras na distribuição de tensões (Silva Junior; Souza; Silva, 2021). Já o estágio IV é caracterizado pelo comportamento pós-pico, em que o compósito continua a se deformar e a capacidade de carga diminui. A Figura 57b ilustra os diferentes estágios comportamentais dos compósitos.

Figura 57 – Curvas tensão *versus* deformação específica dos compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente: a) curvas de todos os compósitos; b) estágios descritos do comportamento *strain-hardening* no corpo-de-prova PE1-F0.



a)



b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

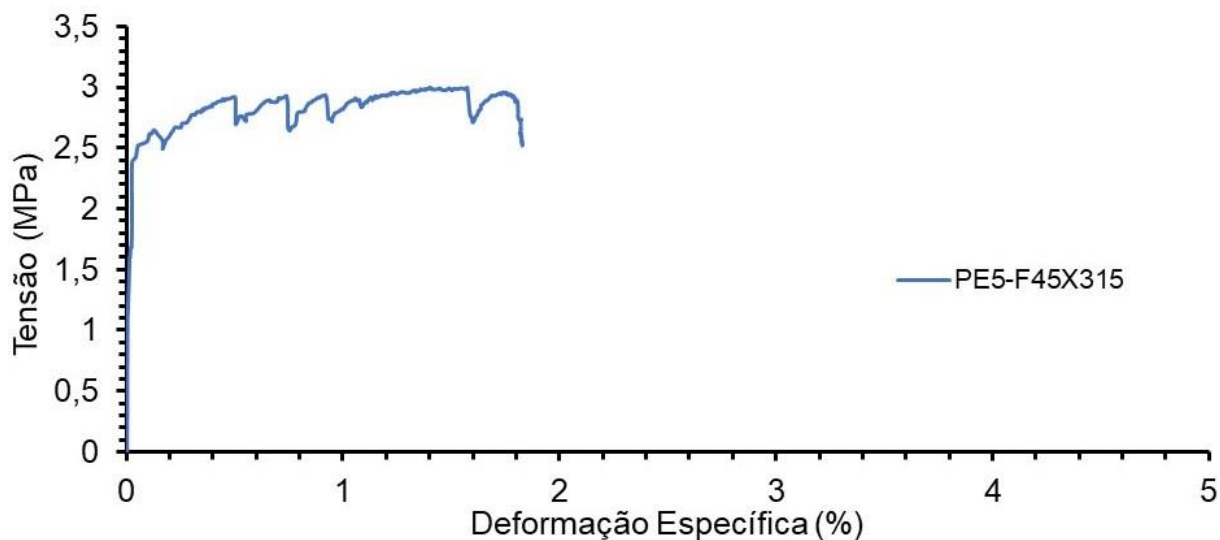
Os compósitos com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e 315°, nomeados conforme descrito em 3.7 de PE4-F45x315, PE5-F45x315 e PE6-F45x315, também apresentaram comportamento *strain-hardening*, exceto PE4-F45x315. Este último, devido à falha no processo de aperto dos parafusos para realização do ensaio, resultou no escorregamento da placa e formação de uma única fissura logo abaixo da chapa de fixação.

Os compósitos deste grupo exibiram comportamento semelhante aos compósitos do grupo anterior, com a presença dos quatro estágios durante o carregamento. No entanto, apresentaram menor número de fissuras e menor valor de tensão última (σ_u). Apesar do compósito PE6-F45x315 ter apresentado σ_{1f} superior ao compósito PE3-F0, que as fibras foram dispostas longitudinalmente, o ganho de resistência última foi pouco significativo.

Esses resultados indicam que a forma de distribuição das fibras tem grande influência no desempenho do compósito. A orientação do ensaio de tração direta é no eixo y, eixo longitudinal do compósito. Nesse contexto, as fibras distribuídas em duas direções, mesmo que distribuídas com um ângulo de 45° e 315°, contribuíram pouco para ganho de resistência última, pois não atuaram na direção de aplicação dos esforços solicitantes.

A Figura 58 mostra a curva tensão *versus* deformação específica do compósito PE5-F45x315. Devido a falhas de leitura das deformações no compósito PE6-F45x315, houve inconsistências na curva tensão *versus* deformação específica desse corpo de prova, razão pela qual não foi apresentado.

Figura 58 – Curva tensão *versus* deformação específica do compósito com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e 315° (PE5-F45X315).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise das deformações dos corpos de prova foi feita por meio da técnica CID, utilizando o *software Gom correlate*®. Para as análises, foram criados pontos e distâncias na base e no topo de corpo de prova num eixo vertical, dispondo pares de pontos paralelos. A distância entre esses pontos foi medida no estágio inicial de carregamento ($\sigma = 0$), coincidindo com o comprimento útil do corpo de prova. À medida que o carregamento de tração avançava, as distâncias entre os pontos aumentavam. A deformação nominal do compósito foi obtida pela diferença da distância dos pares de pontos em cada estágio de carregamento e a distância inicial, dividida pela distância inicial.

A partir da técnica CID também foi possível determinar o número de fissuras em cada corpo de prova, o instante de surgimento da primeira fissura e a largura média das fissuras. Na Tabela 17 são apresentadas as propriedades mecânicas dos compósitos. A Figura 59 apresenta o padrão de fissuração do corpo de prova PE1-F0 no campo de deformação longitudinal (ϵ_y) obtido pelo *Gom correlate*®. A Figura mostra a superfície do corpo de prova no estágio inicial, quando o carregamento e a deformação são iguais a zero (Figura 59a), no estágio de surgimento da primeira fissura (Figura 59b) e no estágio final de ruptura (Figura 59c).

Tabela 17 – Propriedades mecânicas dos compósitos com o desvio-padrão entre parênteses.

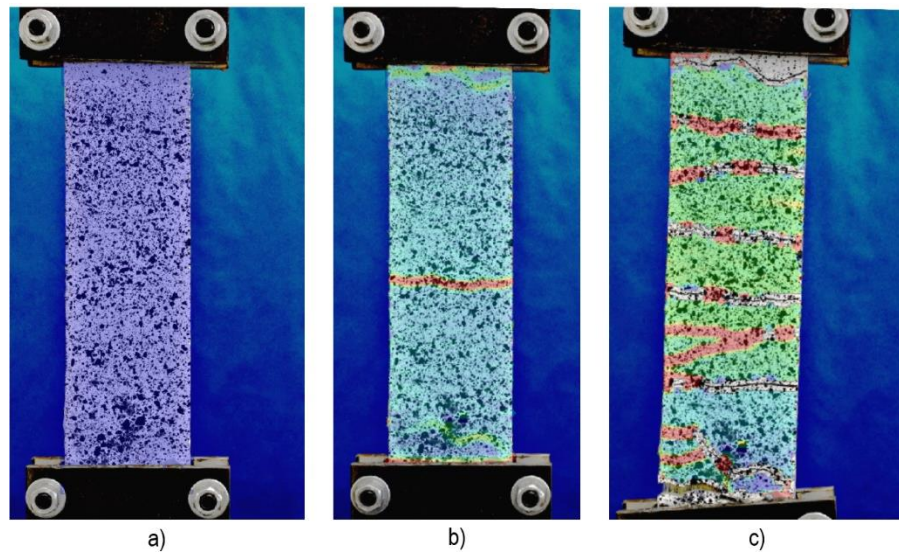
CP	N.º de fissuras	σ_{1f} (MPa)	Média σ_{1f} (MPa)	ε_{1f} (1) (mm/mm)	σ_u (MPa)	Média σ_u (MPa)	ε_u (2) (mm/mm)	E_t (GPa)	Abertura média de fissuras em σ_u (mm)
PE1-F0	9	2,79	2,56 ($\pm 0,24$)	0,000209	7,91	9,02 ($\pm 1,26$)	0,01661	12,00	0,53 ($\pm 0,15$)
PE2-F0	16	2,66		0,000214	10,79		0,0447	10,87	0,40 ($\pm 0,12$)
PE3-F0	14	2,24		0,0002027	8,37		0,0316	9,73	0,33 ($\pm 0,062$)
PE5-F45x315	5	1,88	2,16 ($\pm 0,23$)	0,000240	3,00	3,10 ($\pm 0,10$)	0,0140	8,04	0,50 ($\pm 0,12$)
PE6-F45x315	4	2,39		-	3,21		-	-	0,75 ($\pm 0,096$)

Fonte: Elaborado pelo autor.

(1) ε_{1f} : deformação correspondente a 1.ª fissura.

(2) ε_u : deformação correspondente à tensão última.

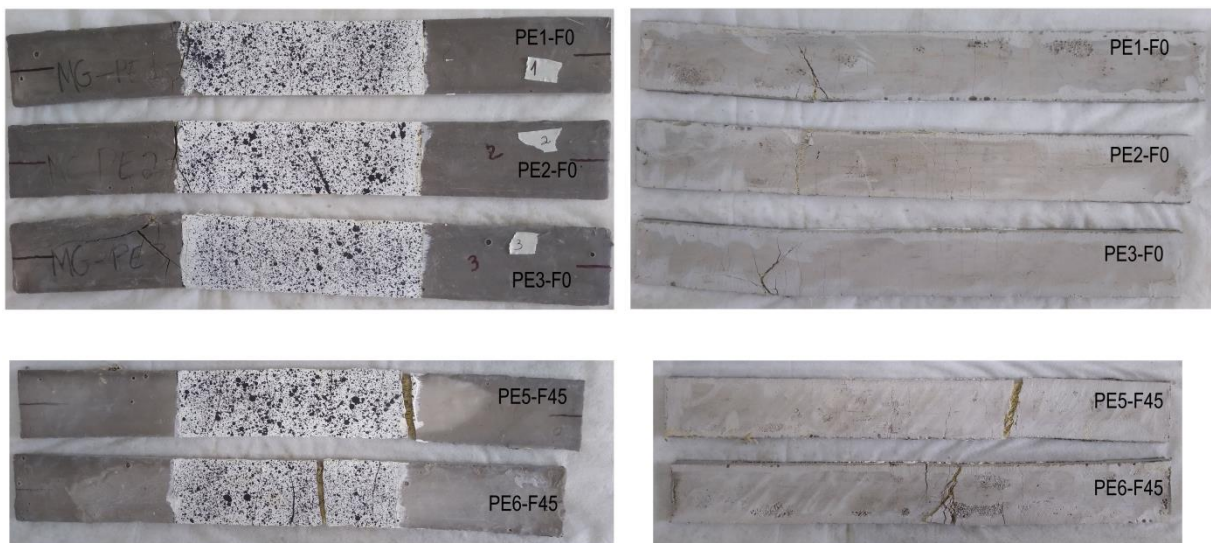
Figura 59 – Padrão de fissuração do corpo de prova PE1-F0: a) estágio inicial; b) surgimento da 1.ª fissura; c) ruptura do corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando os dois grupos de compósitos (Tabela 17), observa-se que os compósitos com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e a 315° apresentaram menor número de fissuras, porém com maior abertura. Isso mostra que houve elevada concentração de tensões em cada fissura. A Figura 60 mostra os compósitos após a ruptura.

Figura 60 – Compósitos após a realização do ensaio de tração direta: a) e b) compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente; c) e d) compósitos com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e a 315°.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O comportamento mecânico dos compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente do presente estudo foi comparado com o de outros pesquisadores que utilizaram fibras naturais (sisal e juta) em matrizes cimentícias e geopoliméricas. Os estudos da literatura utilizaram corpos de prova com mesma geometria, porém com diferente número de camadas e frações volumétricas de fibras (Tabela 18).

Nos compósitos produzidos por Teixeira *et al.* (2022) foram utilizadas três camadas de fibras de sisal com fração volumétrica de 5% em uma matriz cimentícia, os quais alcançaram 80 MPa de resistência à compressão aos 28 dias. O elevado valor de resistência mecânica da matriz e a maior fração volumétrica de fibras resultaram em resistência de fissuração e última superiores às do presente trabalho.

Trindade *et al.* (2018) produziram compósitos com fibras de sisal e com tecido de juta em matriz geopolimérica, utilizando metacaulim como material precursor. Eles utilizaram cinco camadas de fibras e fração volumétrica de 10%. O ensaio de tração foi realizado nos corpos de prova com idade de 7 dias. Eles encontraram valores de tensão de fissuração de 4,31 MPa e 4,37 MPa, e valores de tensão última entre 6,31 MPa e 11,53 MPa (juta e sisal, respectivamente). Os valores de σ_{1f} foram significativamente superiores aos aqui obtidos, o que pode ser explicado pela maior resistência da matriz, que alcançou 72 MPa de resistência à compressão aos 7 dias.

Os compósitos de fibras de sisal em matriz cimentícia produzidos por Silva Junior, Souza e Silva (2021) tinham menor fração volumétrica de fibras (6%) em comparação ao estudo anterior (10%). A resistência à compressão da matriz aos 28 dias também era menor (64 MPa). A tensão de fissuração (σ_{1f}) desses compósitos foi de 2,4 MPa, valor próximo aos encontrados na presente pesquisa, indicando que a resistência à fissuração inicial é governada pelas propriedades da matriz. A tensão última encontrada foi de 10,2 MPa, valor também próximo ao encontrado no atual trabalho.

Diante dos resultados, observa-se que o comportamento do compósito depende diretamente da resistência da matriz empregada e do volume de fibras adotado. No presente estudo, que utilizou menor fração volumétrica de fibras e matriz com menor resistência mecânica em relação aos trabalhos presentes na literatura, porém obteve-se tensão última relativamente próxima. Em relação à deformação na tensão última, houve diferença significativa, sendo os valores encontrados nesta pesquisa superiores aos encontrados por outros autores. Esse

comportamento pode ser explicado pelo baixo volume de fibras utilizado, em que o comportamento de deformação foi governado pela matriz.

Tabela 18 – Comparação das propriedades mecânicas dos compósitos da presente pesquisa com resultados encontrados na literatura.

Autor	Tipo de matriz	Tipo de fibra	V_f (%)	N.º de camadas de fibras	σ_{1f} (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (mm/mm)
Este trabalho	geopolímero (metacaulim)	sisal	3,0	3	2,56 ($\pm 0,23$)	9,02 ($\pm 1,26$)	0,031
Teixeira <i>et al.</i> (2022)	cimentícia	sisal	5,0	3	3,9 ($\pm 0,6$)	12 ($\pm 1,5$)	0,016
Trindade <i>et al.</i> (2018)	geopolímero (metacaulim)	sisal	10,0	5	4,37 ($\pm 0,26$)	11,53 ($\pm 0,46$)	0,014
Trindade <i>et al.</i> (2018)	geopolímero (metacaulim)	juta	10,0	5	4,31 ($\pm 0,51$)	6,31 ($\pm 0,78$)	0,034
Silva Júnior <i>et al.</i> (2021)	cimentícia	sisal	6,0	3	2,4 ($\pm 1,5$)	10,2 ($\pm 2,1$)	0,014

Fonte: Elaborado pelo autor.

V_f = fração volumétrica de fibras

4.2 Ensaio em vigas

Todas as vigas ensaiadas à flexão a três pontos romperam por cisalhamento, sem que houvesse escoamento das armaduras longitudinais de tração e sem esmagamento do concreto comprimido. Nas vigas de referência REF-2 e REF-3 não foi possível analisar a deformação do concreto pela técnica CID, devido ao grande deslocamento dos pontos na carga de ruptura.

Na viga de referência REF-1 não foi possível fazer nenhuma análise via CID, devido a um descuido (o lado preparado para a captura das imagens foi aquele que continha os estribos, e não o lado sem estribos, onde ocorreu a ruptura). Por essa razão, nessa viga só foram registrados os dados de carregamento e de deformação das armaduras.

A Tabela 19 resume os principais resultados obtidos para as vigas ensaiadas, a saber: força cortante de fissuração (V_{cr}), força cortante última (V_u), resistência à força cortante de fissuração (τ_{cr}), resistência à força cortante última (τ_u), resistência à força cortante de fissuração e última normalizada pela raiz

quadrada da resistência à compressão do concreto - $\tau_{cr}/\sqrt{f_c}$ e $\tau_u/\sqrt{f_c}$, respectivamente, deslocamento no meio do vão (Δ_u), e deformações nas armaduras longitudinais e transversais - ε_{su} e ε_{swu} , respectivamente. Cada item foi analisado e discutido nos próximos tópicos deste capítulo. As deformações do concreto (ε_{cu}) são mostradas em Tabela à parte, no tópico específico para análise deste parâmetro.

Tabela 19 – Principais resultados dos ensaios das vigas.

Viga	V_{cr} (kN)	V_u (kN)	τ_{cr} (MPa)	τ_u (MPa)	$(\tau_{cr}/\sqrt{f_c})$ (MPa ^{-0,5})	$(\tau_u/\sqrt{f_c})$ (MPa ^{-0,5})	Δ_u (1) (mm)	Δ_u (2) (mm)	ϵ_{su} (‰)	ϵ_{swu} (‰)
REF-1	-	38,38	-	1,51	-	0,207	-	-	1,02	-
REF-2	34,93	35,93	1,37	1,41	0,188	0,194	13,47	13,47	0,91	0,032
REF-3	37,82	39,27	1,49	1,54	0,204	0,212	9,43	13,13	0,72	-
F90-1	57,62	70,76	2,26	2,78	0,315	0,387	3,90	4,02	1,70	-
F90-2	45,74	50,65	1,80	1,99	0,250	0,277	2,02	13,20	1,43	0,45
F90-3	45,10	52,88	1,77	2,08	0,246	0,289	2,22	15,89	1,26	-
FM-4	49,07	57,59	1,93	2,26	0,270	0,317	3,72	13,05	1,31	0,58
FM-5	51,83	55,06	2,04	2,16	0,285	0,303	3,82	10,91	1,31	0,29
FM-6	61,4	64,25	2,41	2,53	0,338	0,353	5,06	10,71	1,38	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

(1) Δ_u - deslocamento vertical no meio do vão referente à carga máxima.(2) Δ_u - deslocamento referente à última medição.

4.2.1 Resistência à força cortante

De acordo com a Tabela 20, o valor do cortante de fissuração (V_{cr}) das vigas de referência foi praticamente igual do cortante último (V_u), indicando que logo após o surgimento da fissura diagonal de cisalhamento as vigas colapsaram. As vigas não possuíam estribos na região analisada, onde ocorreu a ruptura, e os esforços de cisalhamento foram resistidos unicamente pelo concreto (V_c). A carga última de cisalhamento alcançada experimentalmente pelas vigas de referência foi ligeiramente inferior ao valor teórico calculado. Considerando a resistência à compressão do concreto aos 28 dias, obtida experimentalmente como 53,21 MPa, o valor de V_c foi de 45,34 kN, conforme apresentado na Tabela 14.

Todas as vigas reforçadas apresentaram valores de cortante de fissuração superiores aos das vigas de referência. A Tabela 20 mostra os valores médios da tensão de fissuração e da tensão última para cada grupo de vigas normalizados pela resistência à compressão do concreto. Ao comparar as tensões médias de fissuração normalizadas de cada grupo, observou-se que as vigas F90 e FM apresentaram aumento nas tensões de fissuração de 37% e 52%, respectivamente, em relação às vigas de referência.

Tabela 20 – Tensões médias de fissuração e última normalizadas, com o desvio-padrão entre parênteses.

Viga	$(\tau_{cr}/\sqrt{f_c})$ (MPa ^{-0,5})	$(\tau_u/\sqrt{f_c})$ (MPa ^{-0,5})	$(\tau_{cr}/\sqrt{f_c})$ média (MPa ^{-0,5})	$(\tau_u/\sqrt{f_c})$ média (MPa ^{-0,5})
REF-1	-	0,207		
REF-2	0,188	0,194	0,196 (\pm 0,008)	0,204 (\pm 0,008)
REF-3	0,204	0,212		
F90-1	0,315	0,387		
F90-2	0,250	0,277	0,270 (\pm 0,031)	0,317 (\pm 0,049)
F90-3	0,246	0,289		
FM-4	0,270	0,317		
FM-5	0,285	0,303	0,298 (\pm 0,029)	0,324 (\pm 0,021)
FM-6	0,338	0,353		

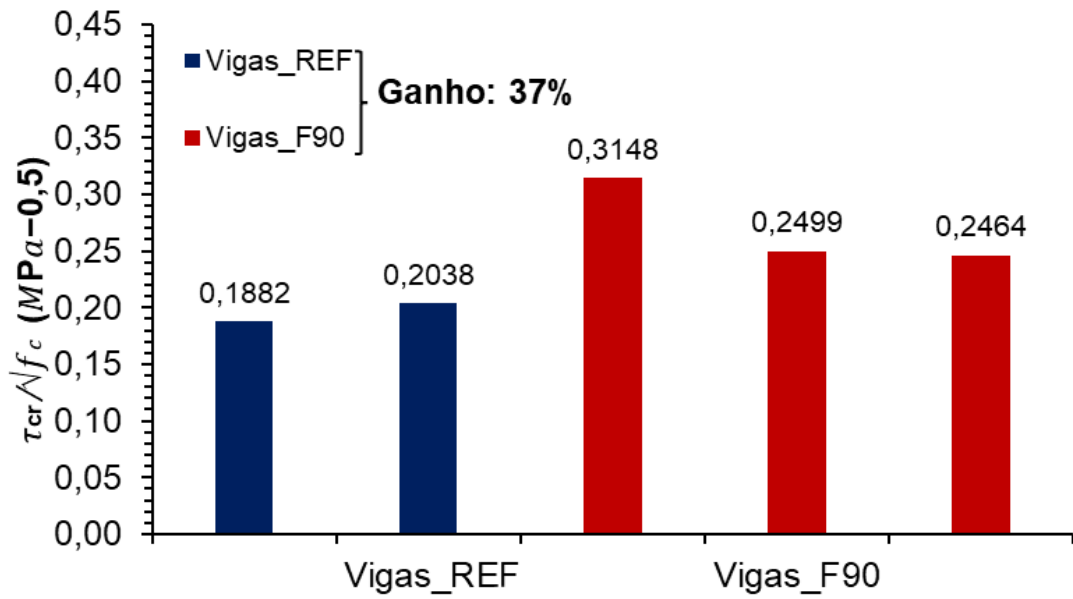
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os valores de cortante último das vigas ensaiadas, observa-se que houve ganho significativo das vigas reforçadas em relação às vigas de referência. Comparando os valores das tensões últimas normalizadas ($\tau_u/\sqrt{f_c}$) médias

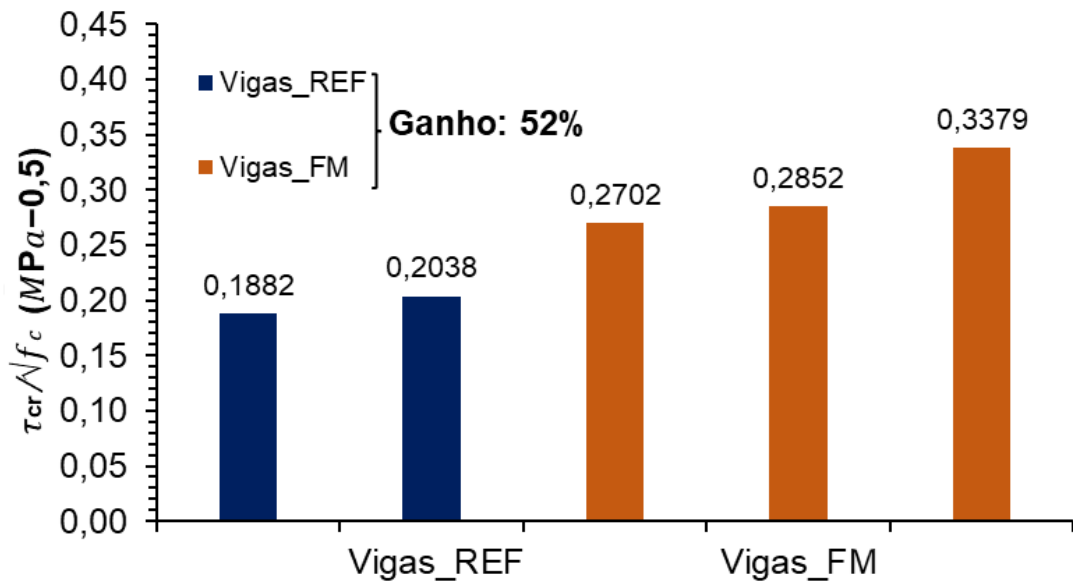
de cada grupo de vigas, verificou-se que as vigas reforçadas com compósitos de fibras distribuídas em uma direção (F90) e os compósitos de fibras distribuídas em duas direções (FM) proporcionaram aumentos na capacidade última de 55% e 59%, respectivamente.

Os resultados de tensão de fissuração e de tensão última demonstram que os compósitos geopoliméricos reforçados com fibras de sisal, aplicados externamente às vigas como reforço ao cisalhamento, apresentaram elevado desempenho, sendo capazes de aumentar significativamente a carga de fissuração e a capacidade última das vigas. As Figuras 61 e 62 apresentam as tensões normalizadas de fissuração e as tensões normalizadas últimas das vigas reforçadas e das vigas de referência.

Figura 61 – Comparação entre os valores de $\tau_{cr}/\sqrt{f_c}$ das vigas de referência com as vigas reforçadas de cada grupo: a) vigas REF comparadas com as vigas F90; b) vigas REF comparadas com as vigas FM.



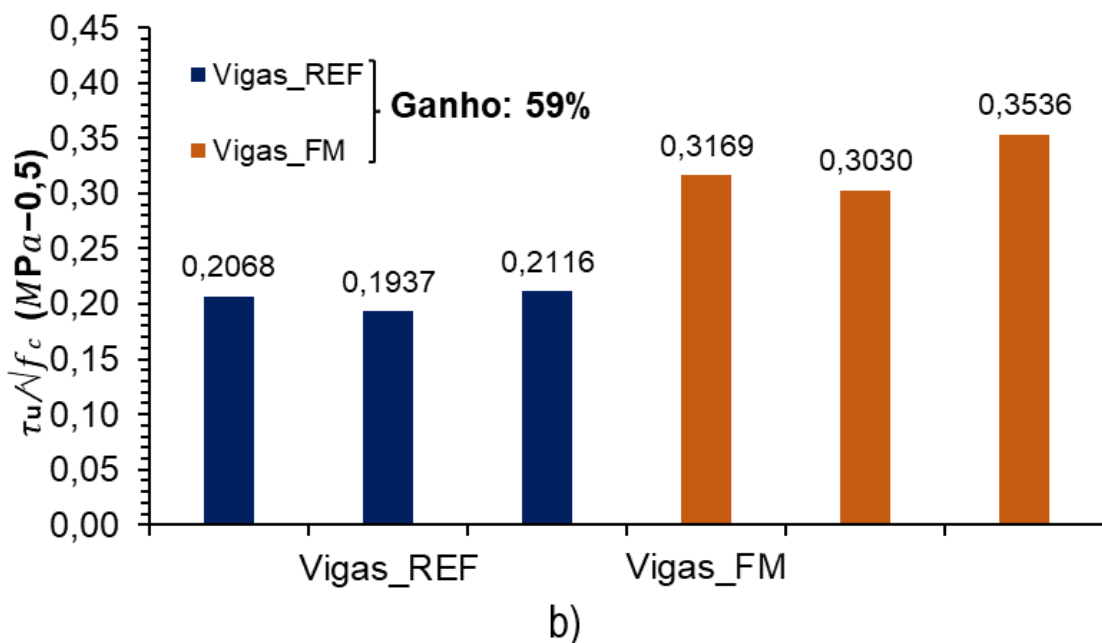
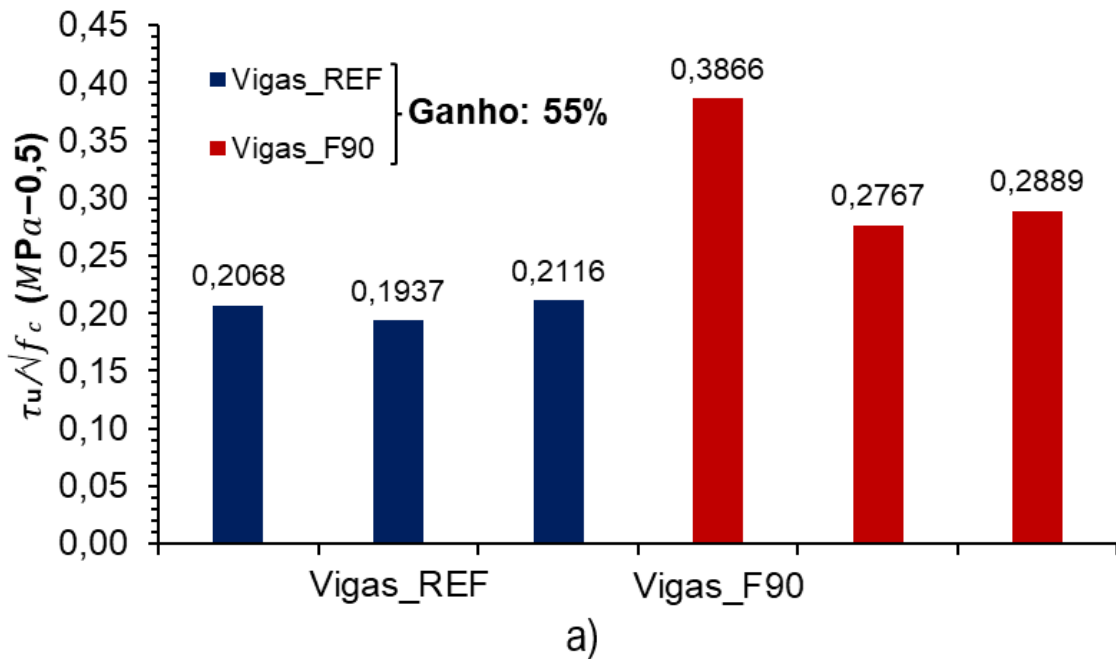
a)



b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62 – Comparação entre os valores de $\tau_u/\sqrt{f_c}$ das vigas de referência com as vigas reforçadas de cada grupo: a) vigas REF comparadas com as vigas F90; b) vigas REF comparadas com as vigas FM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1.1 Resultados experimentais versus previsão teórica

Conforme apresentado no item 3.15, a previsão teórica da capacidade ao cisalhamento das vigas reforçadas com compósitos geopoliméricos com fibras de sisal seguiu as diretrizes da (ACI) 549.4R-20 (ACI, 2020). A Tabela 21 compara os valores obtidos através do cálculo teórico e os resultados experimentais.

Tabela 21 – Comparação entre previsão teórica e resultados experimentais.

Viga	Experimental (kN) $V_u = V_c + V_f$	Teórico (kN) $V_u = V_c + V_f$	Relação $V_{u\text{experimental}} / V_{u\text{teórico}}$
F90-1	70,76		1,41
F90-2	50,65	50,05	1,01
F90-3	52,88		1,06
FM-4	57,59		1,16
FM-5	55,06	49,61	1,10
FM-6	64,25		1,30

Observa-se que todas as vigas apresentaram resistência ao cisalhamento superior à prevista teoricamente. Em particular, as vigas F90-1 e FM-6, que alcançaram maiores resistência ao cisalhamento, tiveram resultados experimentais superiores em 41% e 30%, respectivamente.

As demais vigas que foram reforçadas com compósitos de fibras distribuídas em uma direção (F90) apresentaram resultados muito semelhantes à previsão teórica. A viga F90-2, especificamente, apresentou valores teóricos e experimentais estatisticamente equivalentes.

Em se tratando das vigas reforçadas com compósitos de fibras distribuídas em duas direções (FM), os resultados experimentais mostraram valores relativamente próximos em relação à previsão teórica, sendo superiores na faixa de 10% a 30%. Esses resultados indicam que, para essa configuração de distribuição de fibras, o método se mostra mais conservador.

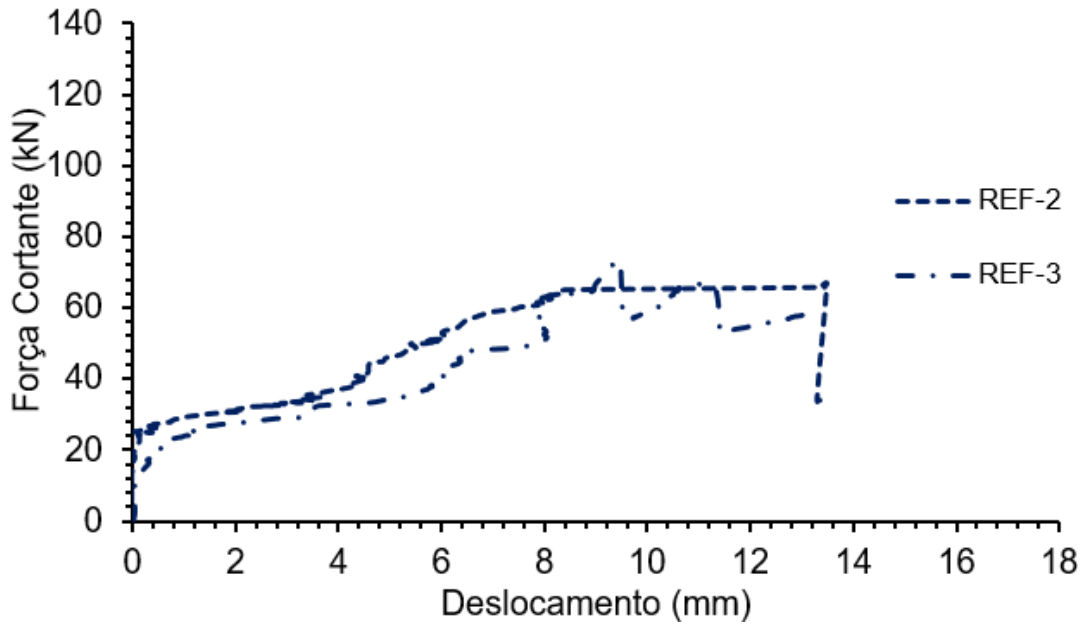
De modo geral, o método utilizado para o cálculo da contribuição do reforço, mesmo com as adaptações para o uso de fibras naturais, provou-se eficaz.

4.2.2 Deslocamento no meio do vão

Os deslocamentos verticais foram obtidos com o auxílio do *software Gom Correlate*[®], utilizando a técnica CID. Na seção no meio do vão foram traçados pontos na base da viga, e os deslocamentos no eixo vertical (dy) foram calculados para cada estágio de carregamento. À medida que o carregamento aumentava, o deslocamento do ponto também aumentava, devido à flexão das vigas. O valor do deslocamento do ponto no eixo y para cada estágio de carregamento corresponde ao deslocamento no meio do vão. As Figuras 63 a 65 apresentam as curvas força

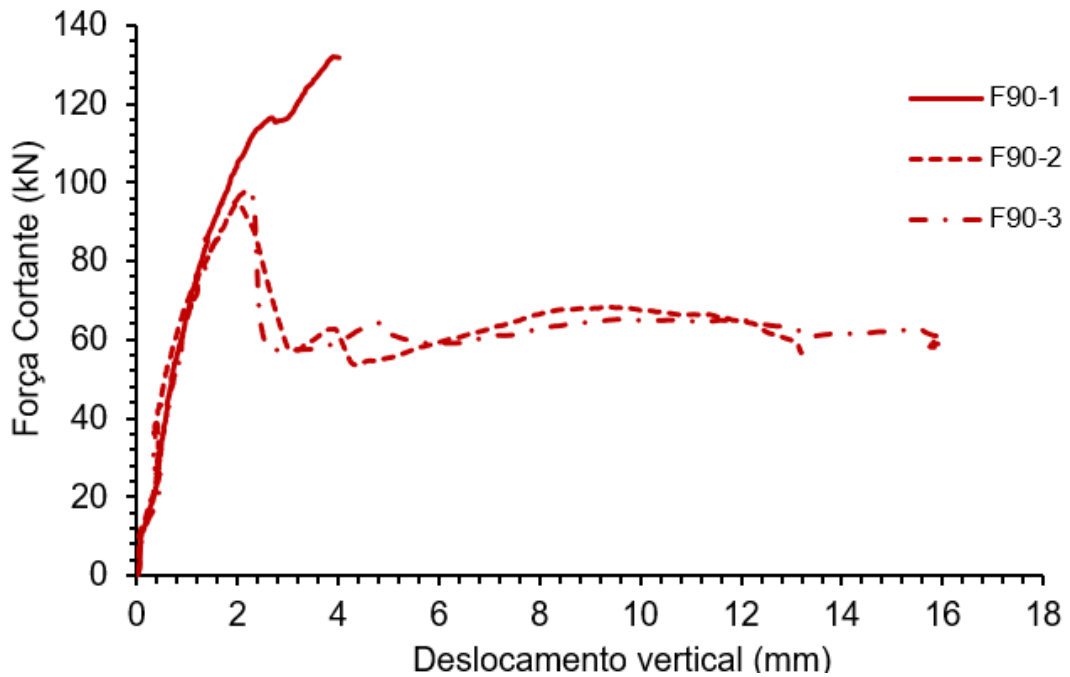
cortante *versus* deslocamento, separadas por grupo de vigas (REF, F90 e FM), e a Figura 66 mostra as curvas para todas as vigas em que foi feita a medição.

Figura 63 – Curvas força cortante *versus* deslocamento para as vigas REF.



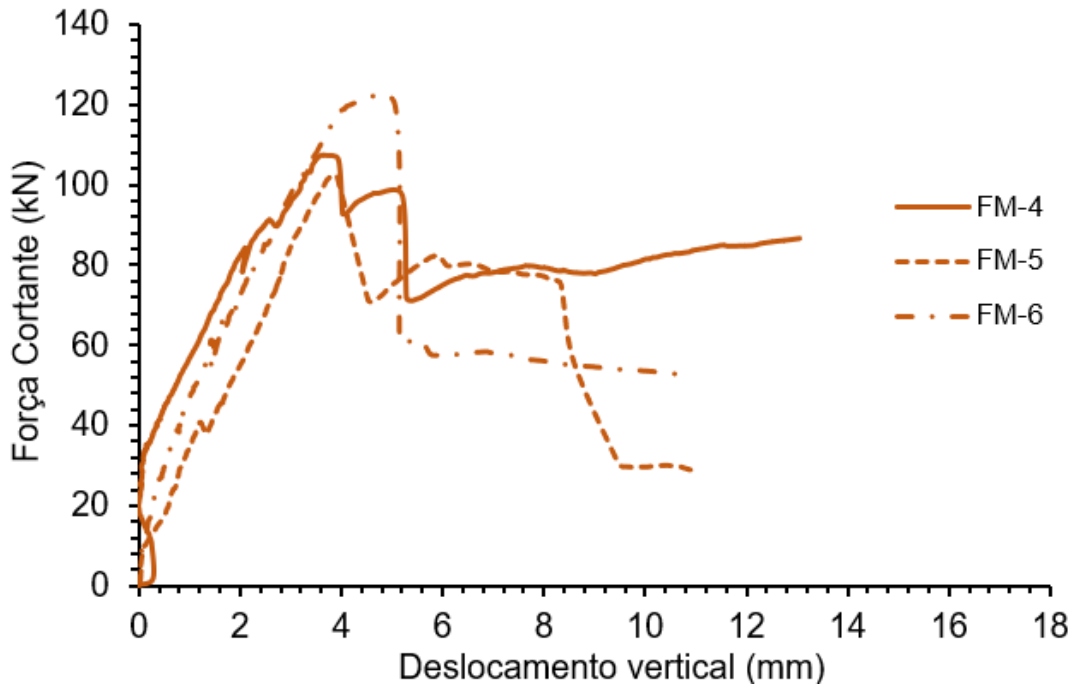
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 64 – Curvas força cortante *versus* deslocamento para as vigas F90.



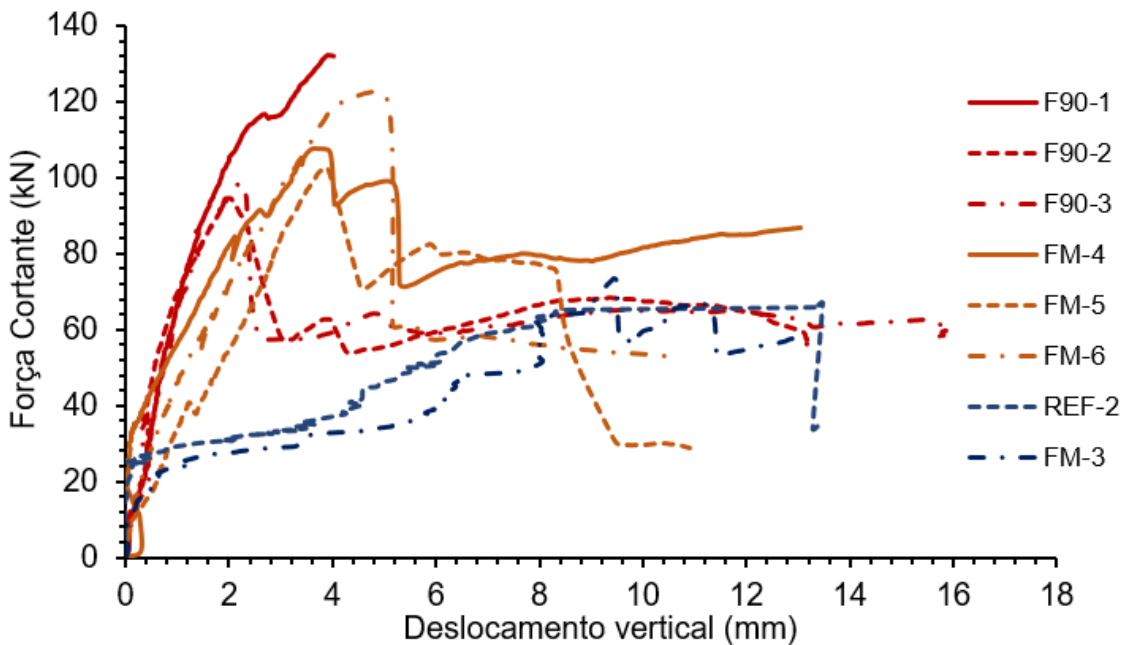
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 65 – Curvas força cortante versus deslocamento para as vigas FM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 66 – Comparação entre as curvas força cortante versus deslocamento de todas as vigas ensaiadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As vigas reforçadas, tanto as do grupo F90 quanto as do FM, apresentaram baixos valores de deslocamento até o cortante de fissuração e até a carga última, diferentemente das vigas de referência, que se deslocaram antes do surgimento da

fissura. Analisando as curvas para um mesmo carregamento, como por exemplo na carga de 30 kN e de 50 kN; as vigas REF apresentaram deslocamento vertical 6 vezes maior que as vigas do grupo F90, e quase 4 vezes maior em relação às vigas FM na carga de 30 kN. Para a carga de 50 kN, as vigas REF apresentaram deslocamento em torno de 10 vezes e 5 vezes maior em relação às vigas F90 e FM, respectivamente.

O deslocamento no cortante de fissuração nas vigas de referência variou de 8,39 mm a 9,23 mm, enquanto nas vigas reforçadas do grupo F90 esses valores foram bem menores, variando de 1,52 mm a 1,68 mm. Nas vigas reforçadas FM, os valores de deslocamento na fissuração foram superiores aos das vigas F90; porém, bem menores que os das vigas de referência. Os valores variaram de 2,82 mm a 3,8 mm. Esse comportamento das vigas reforçadas evidencia que os compósitos aplicados proporcionaram aumento na rigidez das vigas até o surgimento da primeira fissura, mostrando que os compósitos absorveram parte da energia durante o carregamento.

O comportamento de aumento de rigidez das vigas reforçadas também pode ser observado pelas curvas mostradas na Figura 66. Até atingir a carga máxima, as vigas reforçadas apresentaram valores de deslocamento vertical bem menores em relação às vigas de referência. O deslocamento vertical na carga máxima das vigas de referência foi cerca de 4 vezes maior quando comparadas às vigas reforçadas do grupo F90, e quase 3 vezes maior comparadas às vigas reforçadas do grupo FM. Os valores de deslocamento vertical na carga máxima das vigas são mostrados na Tabela 19, e variaram de 9,43 mm a 13,47 mm nas vigas de referência, enquanto para as vigas do grupo F90 e FM variaram de 2,02 mm a 3,90 mm, e 3,72 mm a 5,06 mm, respectivamente. As vigas FM tiveram maior deslocamento em relação às vigas F90.

O deslocamento máximo medido [Δ_u (2)] de todas as vigas foram semelhantes, com exceção da viga F90-1. Esta se comportou de maneira atípica em relação às demais, atingindo a maior carga de cortante última entre todas as vigas ensaiadas. Instantes antes de atingir a carga máxima, houve deslocamento do concreto na seção comprimida, abaixo do ponto de aplicação da carga. Além disso, ao atingir a carga máxima o ensaio foi interrompido abruptamente, sem que a fissura de cisalhamento se abrisse completamente, como nas demais vigas.

Embora as vigas reforçadas tenham apresentado valores de deslocamentos máximo próximos aos das vigas de referência, as vigas reforçadas apresentaram maior resistência última, com ganhos de 55% e 59% para as vigas F90 e FM, respectivamente, proporcionando maior resistência mecânica com menor deslocamento.

O comportamento de aumento de rigidez corrobora os resultados encontrados por Teixeira, Cardoso e Silva (2021), que reforçaram vigas de concreto armado ao cisalhamento com compósitos cimentícios com fibras de curauá. Eles encontraram valores de deslocamentos últimos próximos para as vigas reforçadas (6,6 mm) e não reforçadas (6,3 mm), porém as vigas reforçadas apresentaram maior resistência última, cerca de 28% para um mesmo valor de deslocamento.

Retornando ao presente estudo, as curvas de força cortante *versus* deslocamento se comportaram com padrão semelhante em cada grupo de vigas. A viga F90-3 apresentou maior valor de deslocamento entre todas as vigas ensaiadas. Pelo processo de fissuração, que foi discutido em tópico subsequente, observou-se que a fissuração dessa viga não se prolongou até o apoio, levando ao deslocamento do concreto na face inferior. Com exceção da viga F90-1, as vigas do grupo FM foram as que apresentaram maior carga cisalhante última e menor deslocamento máximo entre todas as vigas ensaiadas.

4.2.3 Deformações específicas do concreto na seção no meio do vão

As deformações específicas do concreto no meio do meio do vão foram obtidas por meio da utilização da técnica CID. Na zona comprimida do concreto foram traçados pares de pontos no eixo x; a distância entre esses pontos foi traçada a partir do estágio inicial de carregamento. Com o avanço do carregamento e com a compressão do concreto nessa seção, a distância entre esses pontos diminuía. A partir da diferença entre a distância obtida na carga última e distância inicial, dividido pela distância inicial, obteve-se a deformação do concreto para o cortante último. A Tabela 22 mostra os valores da altura da linha neutra (x) correspondente à carga última das vigas ensaiadas. Nessa Tabela também são apresentadas a relação da linha neutra com a altura útil (x/d), bem como a deformação do concreto para a carga última. Não foi possível realizar as medições utilizando a técnica CID nas

vigas de referência, pois ao atingir a carga última estas vigas apresentaram grandes deslocamentos, fazendo com que houvesse a perda dos pontos marcados.

Todas as vigas que receberam reforço com placa geopolimérica romperam por cisalhamento, sem que houvesse deformação excessiva do concreto comprimido. Os valores da altura da linha neutra apresentaram similaridade entre as vigas ensaiadas, com exceção das vigas F90-3 e FM-4, nas quais a deformação do concreto comprimido para a carga última apresentou baixos valores e, conseqüentemente, a altura da linha neutra foi menor.

Tabela 22 – Valores da altura da linha neutra e deformação específica do concreto comprimido à compressão para a carga última.

Viga	x (mm)	x/d	ϵ_{cu} (‰)
F90-1	123,86	0,58	2,38
F90-2	118,19	0,56	1,80
F90-3	87,81	0,41	0,89
FM-4	74,77	0,35	0,71
FM-5	140,43	0,66	2,58
FM-6	133,62	0,63	2,34

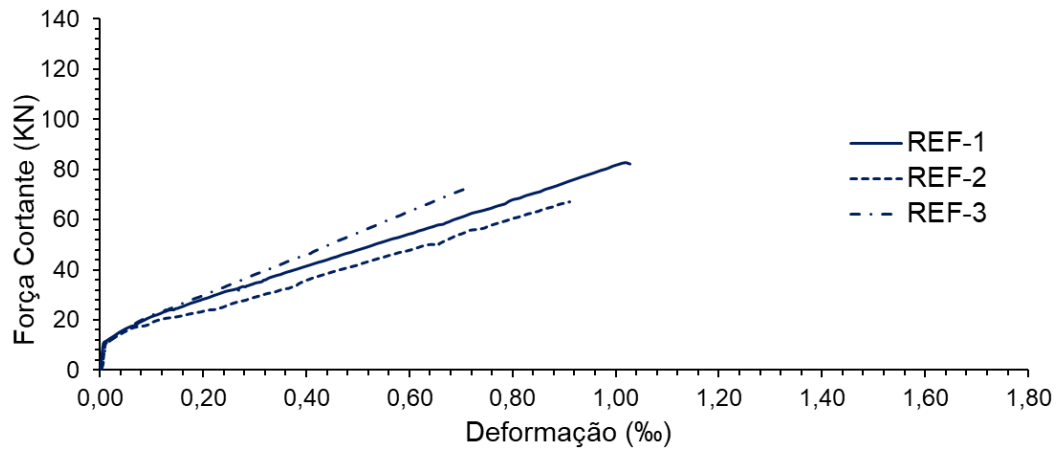
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Deformação específica das armaduras longitudinais e transversais

As deformações específicas das armaduras longitudinais e transversais foram medidas por meio de extensômetros elétricos de resistência (*strain gauges*). Dois sensores elétricos foram instalados nas barras de aço centrais de tração de cada viga, e um sensor foi instalado na armadura transversal central. Mesmo adotando processos de proteção dos sensores como descrito no item 3.13, durante a concretagem alguns sensores foram danificados e não emitiram sinal durante o ensaio.

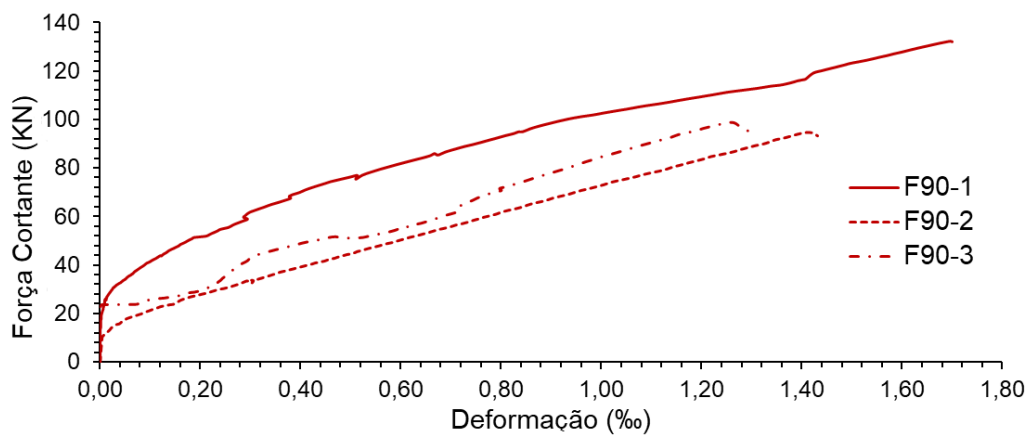
As Figuras 67 a 69 mostram as curvas força cortante *versus* deformação das armaduras longitudinais para cada grupo de vigas. Dentro do mesmo grupo, as curvas apresentaram comportamento semelhante entre si para o mesmo nível de carga. As vigas foram dimensionadas à flexão para que o colapso ocorresse por cisalhamento, sem que houvesse escoamento expressivo da armadura longitudinal. A Figura 70 mostra a curva de força cortante *versus* deformação das armaduras longitudinais para todas as vigas ensaiadas.

Figura 67 – Curva carga *versus* deformação específica das armaduras longitudinais das vigas do grupo REF.



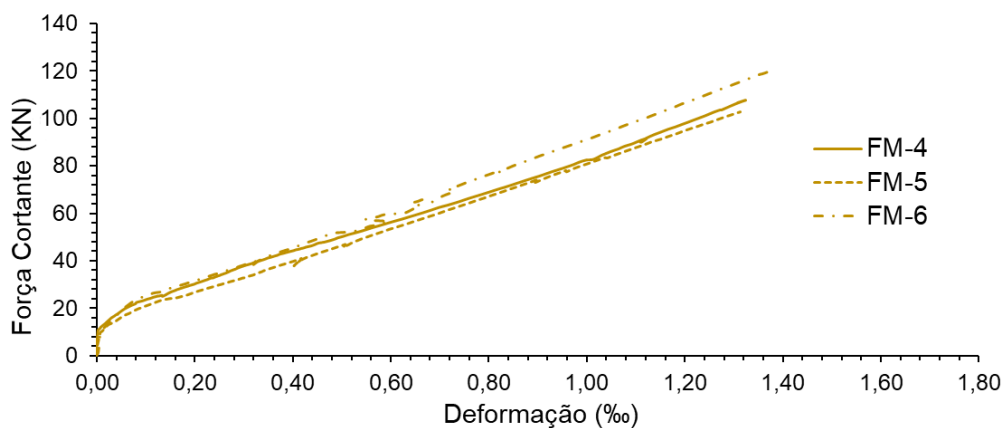
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 68 – Curva carga *versus* deformação específica das armaduras longitudinais das vigas do grupo F90.



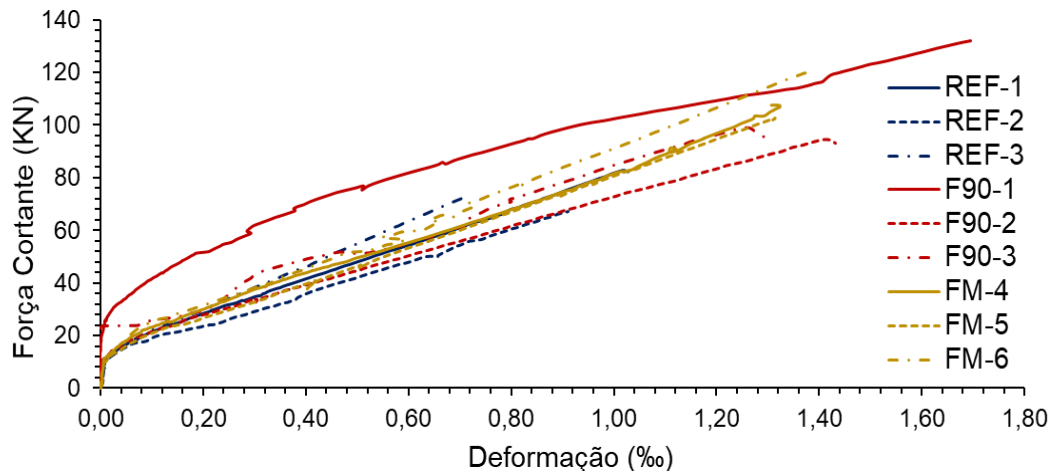
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 69 – Curva carga *versus* deformação específica das armaduras longitudinais das vigas do grupo FM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 70 – Comparação entre as curvas carga *versus* deformação específica das armaduras longitudinais de todas as vigas ensaiadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As vigas de referência (REF) foram as que apresentaram menor deformação das armaduras longitudinais, isso porque o colapso do elemento estrutural ocorreu por cisalhamento, quando atingida a capacidade máxima de resistência do concreto (V_c), sem que houvesse escoamento da armadura.

As deformações das armaduras longitudinais nas vigas reforçadas dos dois grupos foram semelhantes, com exceção da viga F90-1, que devido às maiores cargas, proporcionou maiores níveis de deformação nas armaduras. As deformações nas armaduras longitudinais do grupo F90 e FM foram 46% e 33% superiores aos das vigas REF, respectivamente.

Em relação à deformação das armaduras transversais, não foi possível a leitura dos sensores em todas as vigas, pois os sensores foram danificados no processo de concretagem. No grupo de vigas de referência obteve-se os dados da viga REF-2, enquanto no grupo das vigas reforçadas com compósitos de fibras em uma direção, F90, foram registrados os dados da viga F90-2. No terceiro grupo de vigas (FM), que foram reforçadas com fibras em duas direções, foram registrados os dados das vigas FM-4 e FM-5. As curvas força cortante *versus* deformação das armaduras transversais são mostradas nas Figuras 71 a 74.

Figura 71 - Curva carga *versus* deformação específica das armaduras transversais das vigas do grupo REF.

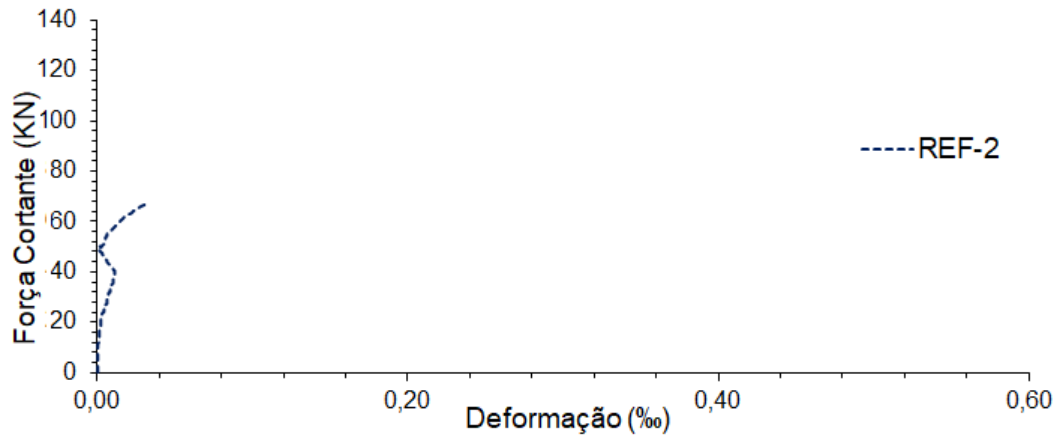


Figura 72 - Curva carga *versus* deformação específica das armaduras transversais das vigas do grupo F90.

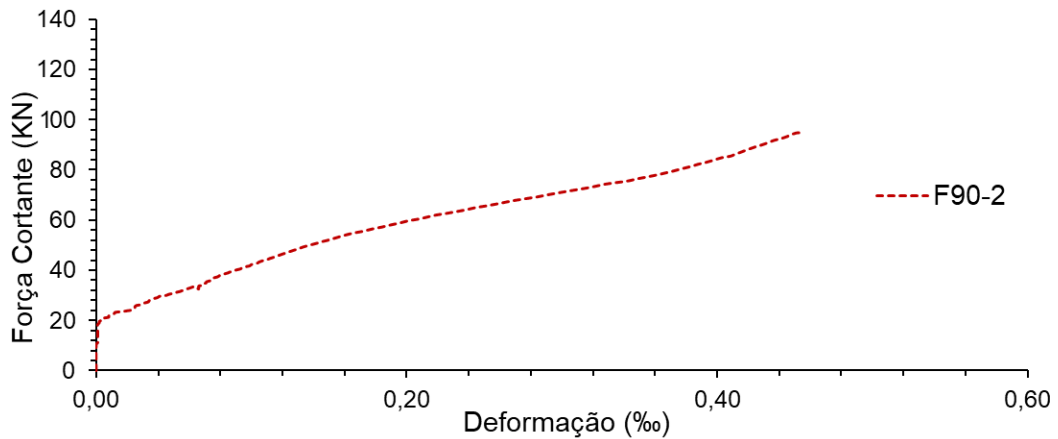


Figura 73 - Curva carga *versus* deformação específica das armaduras transversais das vigas do grupo FM.

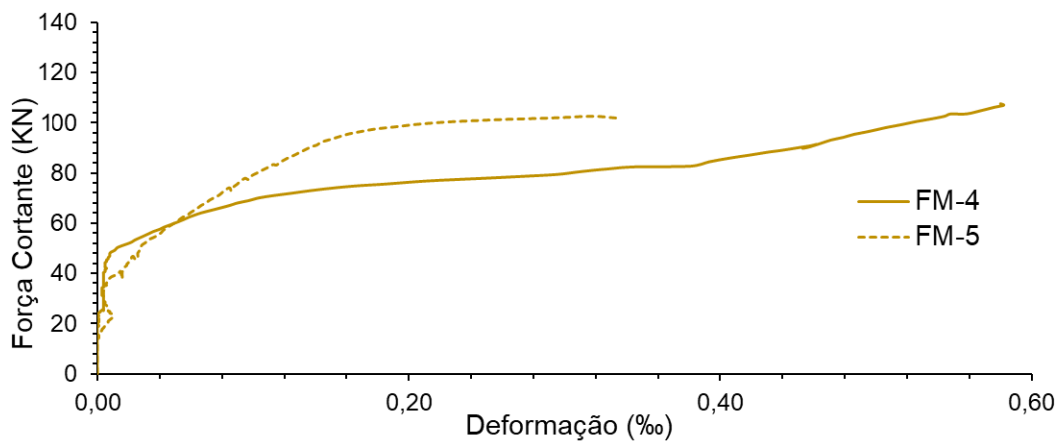
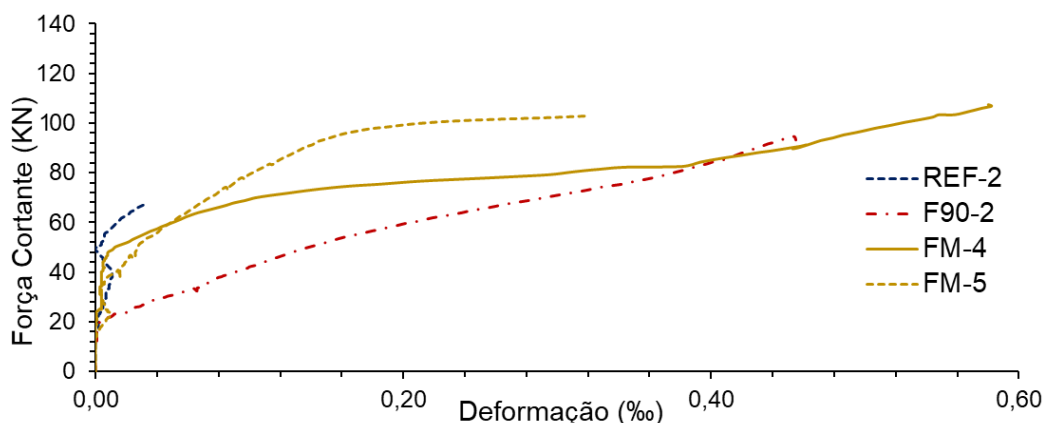


Figura 74 - Comparação entre as curvas carga *versus* deformação específica das armaduras transversais de todas as vigas ensaiadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas vigas REF, devido à ruptura ter ocorrido no vão de cisalhamento que não continha estribos, a armadura transversal instrumentada apresentou deformação quase nula, evidenciando que a ruptura ocorreu pelo esgotamento da capacidade resistente do concreto.

Na presença do reforço externo, tanto as vigas do grupo F90 como as do grupo FM apresentaram aumento na deformação da armadura transversal em relação às vigas de referência. Com a utilização do reforço externo, as vigas apresentaram maior capacidade de carga e, conseqüentemente, maior deformação da armadura. Destaca-se que, mesmo nesse caso, a armadura se deformou com valores bem abaixo da deformação de escoamento do aço utilizado.

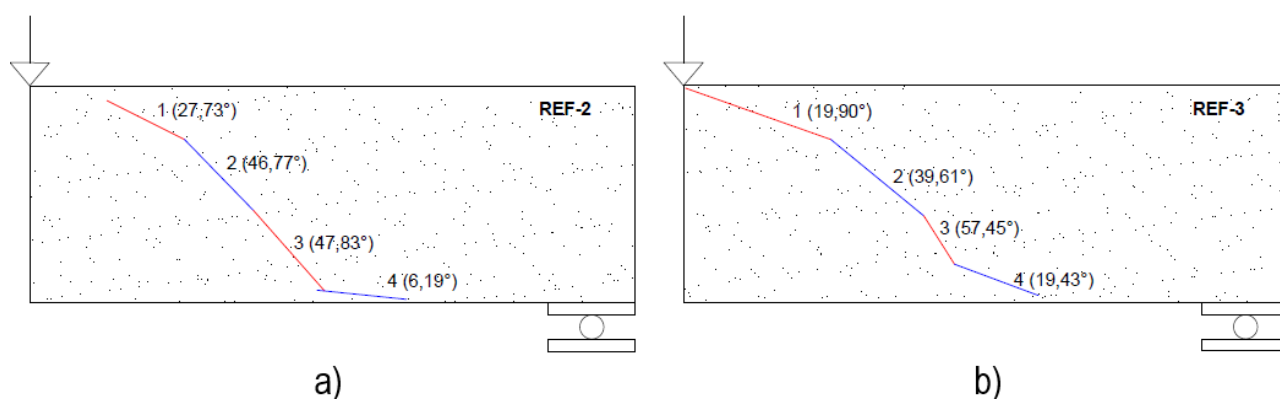
4.2.5 Fissuração nas vigas ensaiadas

Para o monitoramento da abertura de fissuras durante a realização dos ensaios das vigas foi utilizada a fotogrametria. Todas as vigas ensaiadas apresentaram modo de ruptura por cisalhamento, com fissura diagonal crítica propagando-se do ponto de aplicação da carga em direção ao apoio. As vigas apresentaram padrão de fissuras com uma combinação de trechos inclinados e outros trechos horizontais. Objetivando permitir as análises, a fissura diagonal principal de cada viga foi simplificada, considerando trechos retilíneos aproximados que melhor representassem o formato original da fissura.

As fissuras foram divididas em trechos e em cada trecho foram medidos os ângulos de inclinação com o eixo longitudinal das vigas. Nas vigas de referência, a

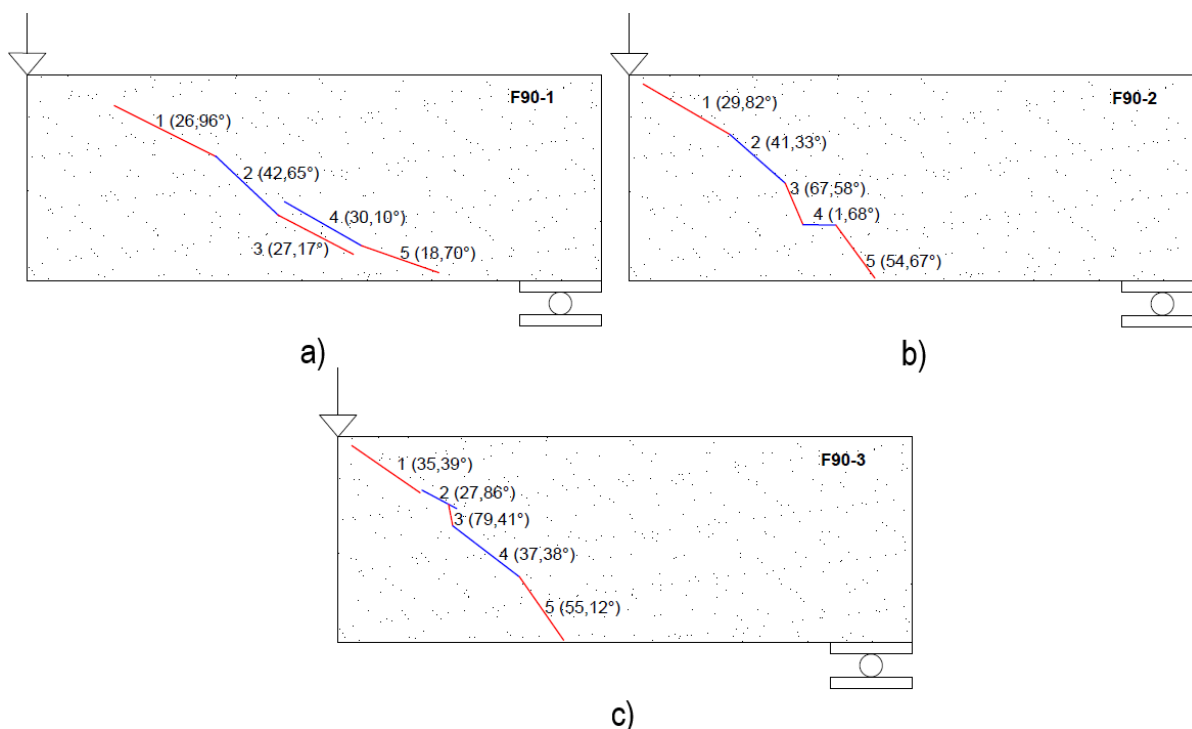
fissura foi dividida em quatro trechos, sendo o trecho de maior inclinação localizado abaixo da altura média das vigas. Nas vigas reforçadas do grupo F90 a fissura foi dividida em cinco trechos para melhor representação do seu formato original. Por fim, nas vigas grupo FM a fissura foi analisada em quatro trechos, com exceção da viga FM-4, que seguiu o mesmo padrão das vigas do grupo anterior, com a fissura dividida em cinco trechos. As Figuras 75 a 77 mostram, de maneira esquemática, a divisão dos trechos em cada viga e os respectivos ângulos de inclinação em relação ao eixo longitudinal.

Figura 75 – Formato esquemático simplificado da fissura diagonal de cisalhamento das vigas de referência.



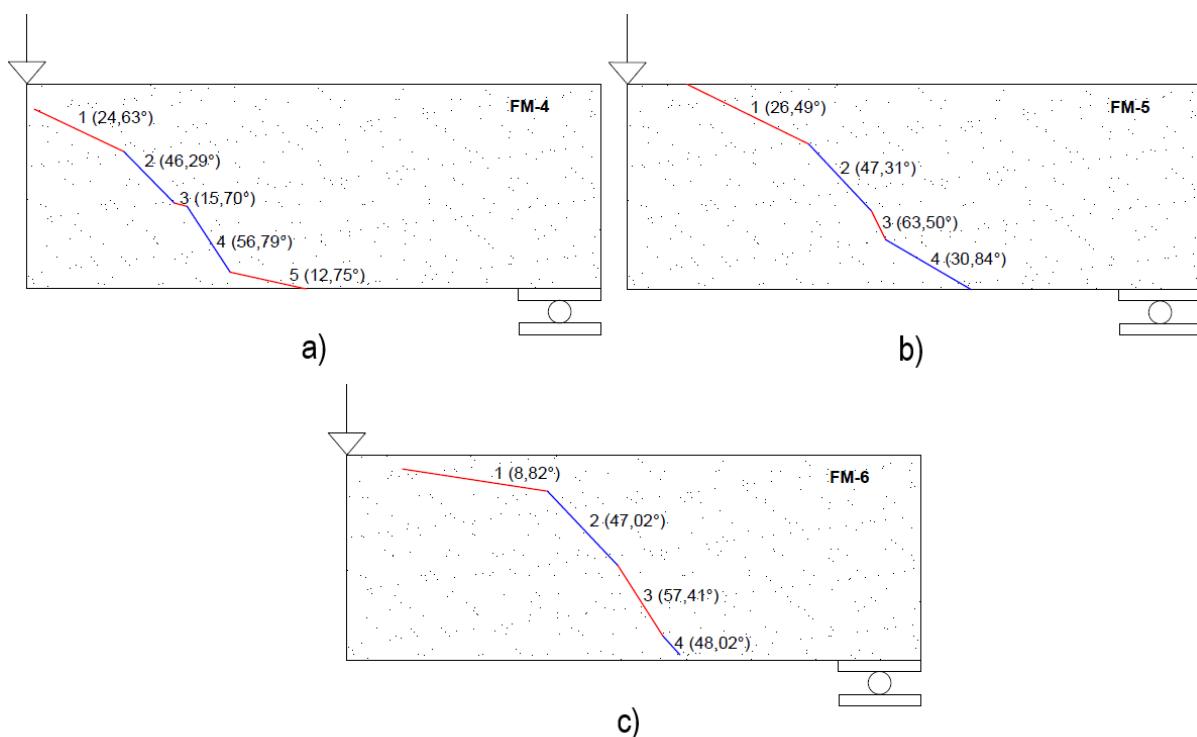
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 76 – Formato esquemático simplificado da fissura diagonal de cisalhamento das vigas reforçadas com compósitos de fibras em uma direção (F90).



Fonte: Elaborado pelo autor.

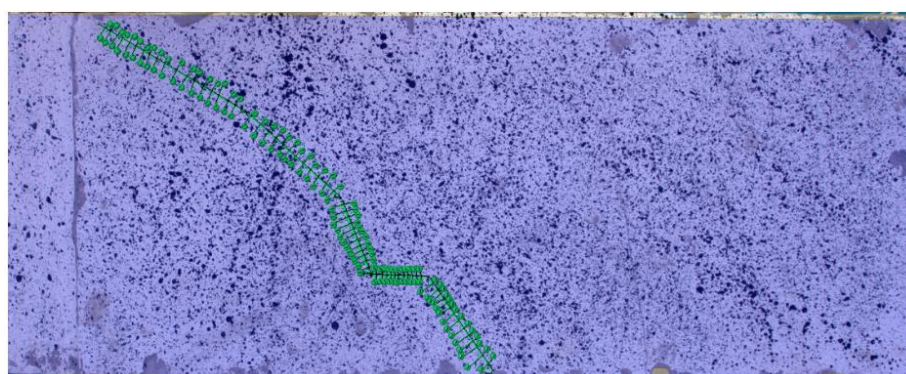
Figura 77 – Formato esquemático simplificado da fissura diagonal de cisalhamento das vigas reforçadas com compósitos de fibras em duas direções (FM).



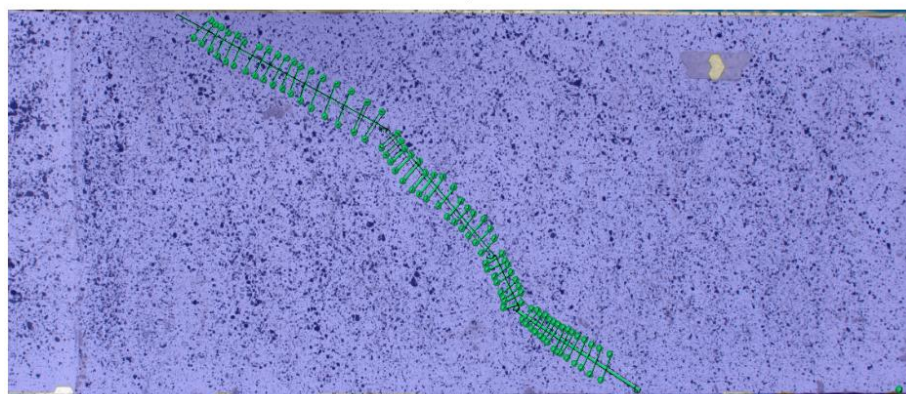
Fonte: Elaborado pelo autor.

As análises da abertura de fissura e do deslizamento foram feitas pela técnica CID, utilizando-se o *software Gom Correlate*[®]. Para tal, foram posicionados pontos acima e abaixo da fissura, e a distância entres dois pontos paralelos foi traçada. À medida que o carregamento era aplicado à viga, as distâncias entre os pontos variavam. A Figura 78 mostra a divisão de trechos e pontos criados para as análises das vigas F90-2 e FM-5.

Figura 78 – Fissura de cisalhamento dividida em trechos e marcação dos pontos no *software Gom Correlate*[®] para análise da abertura de fissuras e deslizamento: a) viga F90-2; b) viga FM-5.



a)



b)

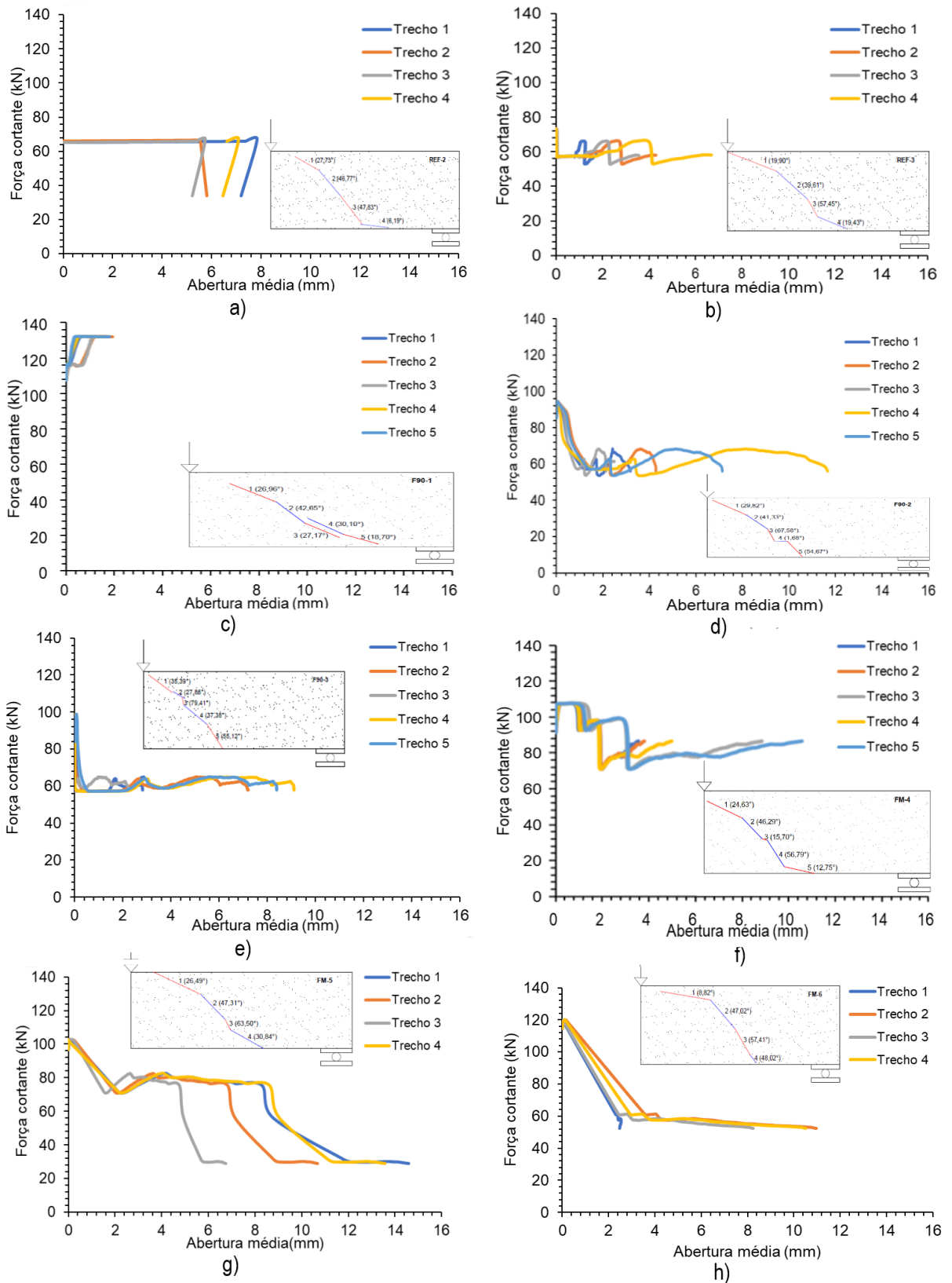
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos pontos criados e dos valores das distâncias entre cada par de pontos, foram calculadas as aberturas médias da fissura e deslizamento médio de cada trecho das vigas. Para a quantificação da abertura de fissura foram consideradas a variação das distâncias perpendiculares à fissura em cada trecho, enquanto que para as análises de deslizamento foram consideradas as distâncias paralelas às fissuras em cada trecho.

A Figura 79 mostra as curvas força cortante *versus* abertura média das fissuras de cada trecho das vigas ensaiadas, enquanto a Figura 80 mostra as curvas

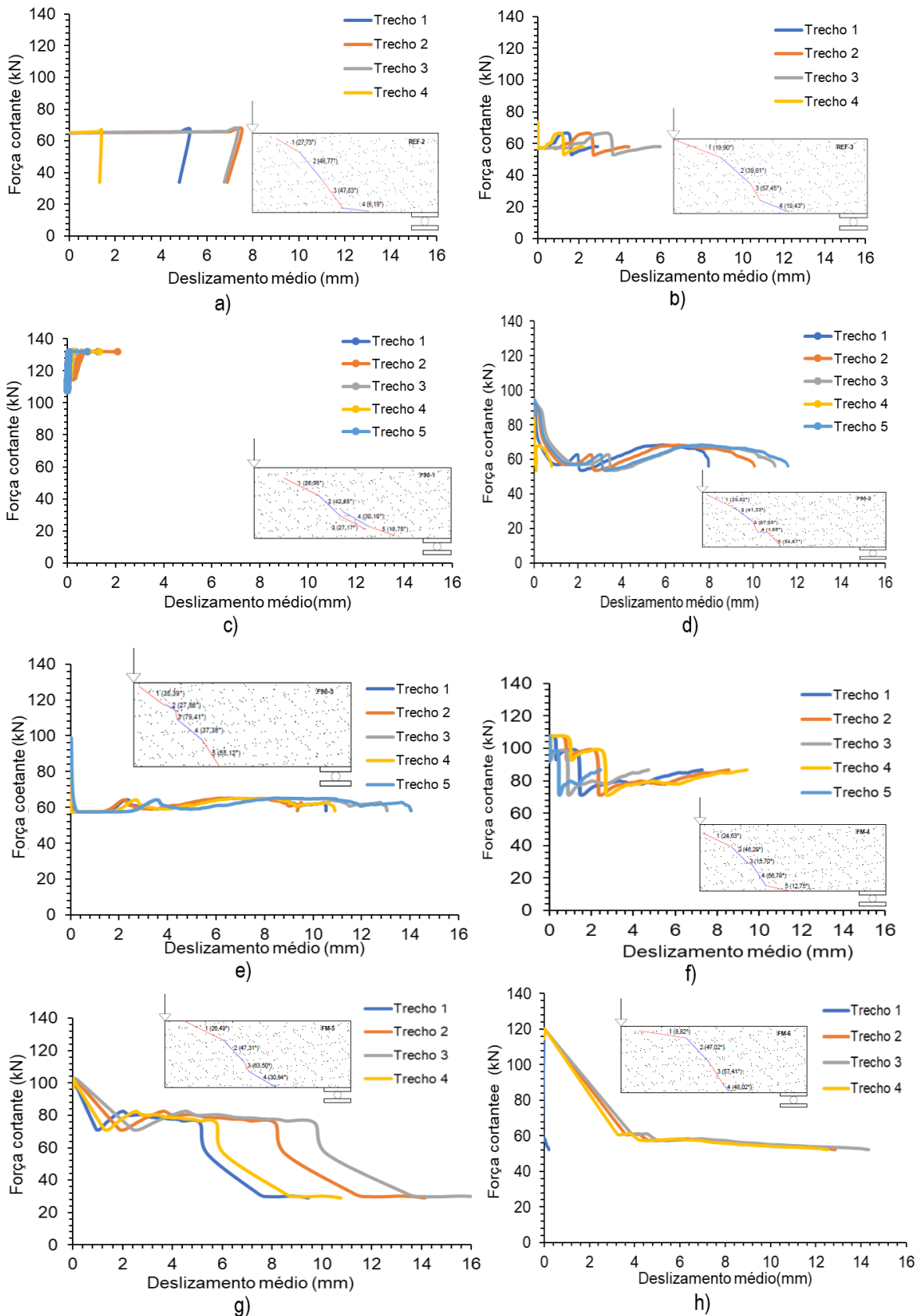
força cortante *versus* deslizamento para cada trecho das vigas ensaiadas. Não foi possível realizar as análises de abertura de fissura e deslizamento da viga REF-1, pois, como mencionado no início deste capítulo, houve um equívoco no processo de pintura da superfície da viga, sendo capturadas as imagens no vão contrário ao que ocorreu a ruptura.

Figura 79 – Abertura média dos trechos da fissura diagonal crítica das vigas ensaiadas: a) REF-2; b) REF-3; c) F90-1; d) F90-2; e) F90-3; f) FM-4; g) FM-5 e h) FM-6.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 80 – Deslizamento médio dos trechos da fissura crítica diagonal das vigas ensaiadas: a) REF-2; b) REF-3; c) F90-1; d) F90-2; e) F90-3; f) FM-4; g) FM-5 e h) FM-6.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As vigas de referência (REF) apresentaram, em geral, maiores valores de abertura de fissuras em comparação aos valores de deslizamento, com exceção dos trechos centrais 2 e 3, cujos valores de deslizamento foram superiores. Nesse grupo de vigas a fissura diagonal apresentou comportamento típico de fissura de cisalhamento, propagando-se do ponto de aplicação da carga em direção ao apoio. Na viga REF-2 ocorreu o colapso logo após a abertura da fissura, enquanto na viga REF-3 houve continuidade na aplicação da carga mesmo após a abertura da fissura e o alcance da carga máxima. A viga REF-2 apresentou maior largura média de fissura em relação à viga REF-3.

As vigas de referência (REF) apresentaram aberturas máximas médias de fissuras de 6,03 mm e 4,08 mm para as vigas REF-2 e REF-3, respectivamente. Esses valores foram próximos aos valores das vigas reforçadas com compósitos de fibras em uma direção, F90-2 e F90-3. As vigas reforçadas com compósitos de fibras distribuídas em duas direções (FM) apresentaram a maior largura média de abertura de fissuras entre todas as vigas ensaiadas, com valores máximos médios de 11,39 mm e 10,52 mm para as vigas FM-5 e FM-6, respectivamente.

Nas vigas do grupo F90 os valores de deslizamento médio foram superiores aos valores médios de abertura de fissura, com exceção da viga F90-1, que apresentou maior valor médio de abertura em comparação ao deslizamento. Como mencionado no item 4.2.2, a viga F90-1 foi a que apresentou maior carga última entre todas as vigas, porém foi a que teve menor valor de abertura de fissura. Nessa viga, ao se atingir a carga máxima, houve deslocamento do concreto na parte superior e interrupção repentina do ensaio. A fissura diagonal se dividiu em dois segmentos, com abertura média máxima de 1,57 mm.

Notou-se que as fissuras das vigas F90-2 e F90-3 apresentaram padrão escalonado, com trechos horizontais (F90-2). Nessas vigas, a fissura de cisalhamento não se prolongou completamente até o apoio, e o trecho final da fissura apresentou angulação com tendência perpendicular ao eixo longitudinal, acompanhando a direção de distribuição das fibras, que foram dispostas em ângulo ortogonal em relação ao eixo longitudinal da viga.

No grupo de vigas FM, as vigas FM-4 e FM-6 apresentaram aberturas média superiores aos deslizamentos, enquanto na viga FM-5 os valores de deslizamento médio foram ligeiramente superiores. A fissura diagonal desse grupo de vigas foi similar às das vigas de referência, com fissura diagonal crítica em direção ao apoio.

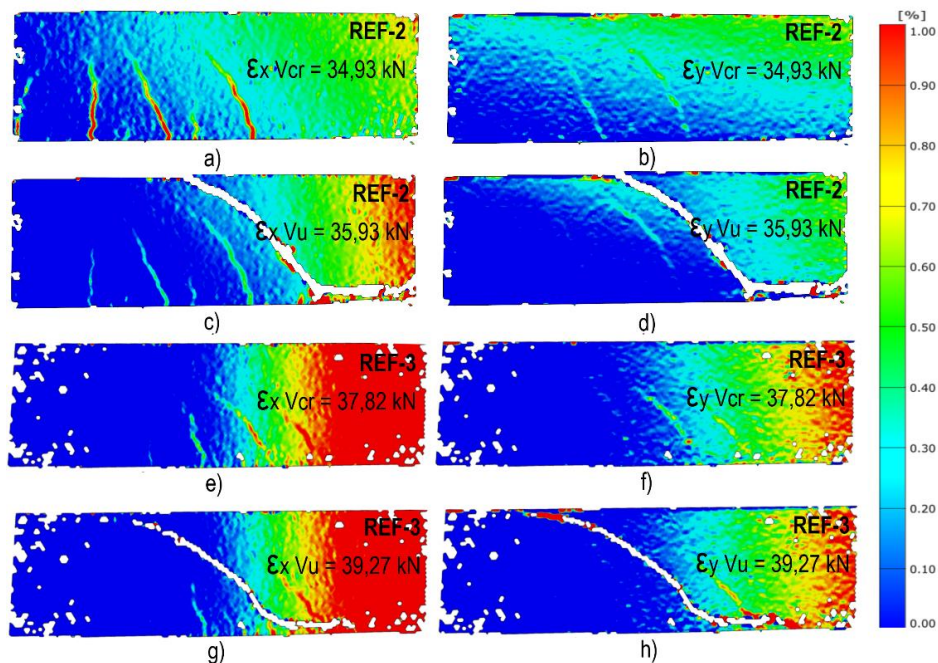
Durante os ensaios das vigas reforçadas, após atingir a carga máxima, as vigas continuaram a suportar carregamento. Observa-se, da análise das curvas de força cortante *versus* abertura média das vigas reforçadas que, após atingir a carga máxima, há queda brusca na resistência; entretanto, em determinado momento, há um pico de ganho de resistência. Esse comportamento das vigas reforçadas é devido à presença das fibras, que se alongam e proporcionam redistribuição de tensões, conferindo às vigas capacidade adicional de carga. Esse comportamento é bem pronunciado nas curvas das vigas F90-2 e FM-4.

Ressalta-se que em todas as vigas que receberam reforço com compósitos geopoliméricos pré-fabricados houve ruptura monolítica da peça, sem delaminação ou descolamento do compósito durante o ensaio. Apenas na viga F90-1 houve deslocamento do concreto na seção de aplicação da carga devido à elevada carga suportada por essa viga; mas, antes que houvesse deslocamento do concreto, houve abertura da fissura diagonal de cisalhamento. A utilização do reforço não foi capaz de alterar o modo de ruptura das vigas, que romperam de maneira frágil. Como pode ser observado nas curvas de abertura média e deslizamento, após atingir a carga máxima, houve queda brusca no carregamento, típica de falha frágil. Como já mencionado, a presença das fibras fez com que houvesse ganho adicional de resistência mesmo após a queda brusca do carregamento.

A ruptura monolítica das vigas reforçadas demonstra que a resina utilizada para fixação dos compósitos, na espessura de 2 mm, proporcionou alto desempenho de aderência entre a superfície das vigas e o compósito. As imagens das vigas após aplicação do carregamento são mostradas no Apêndice A.

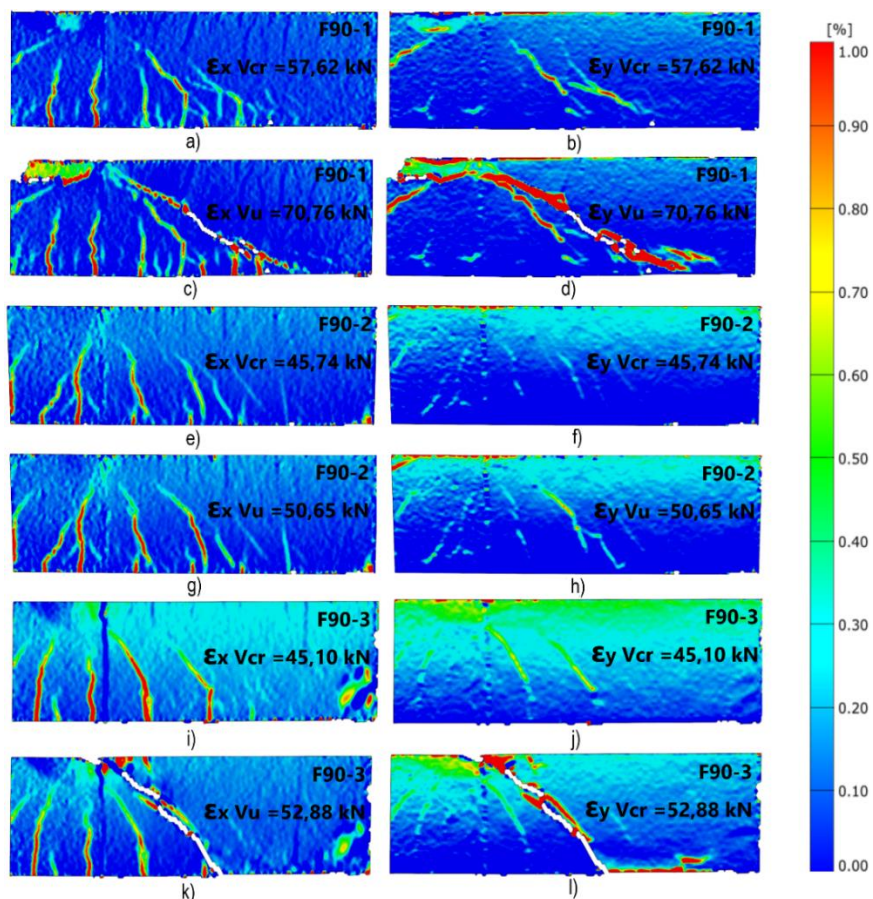
Objetivando visualizar o estado de fissuração no vão de ruptura, foram geradas imagens no *software Gom Correlate*[®] dos campos de deformações horizontal (ϵ_x) e vertical (ϵ_y) para a carga de fissuração e para a carga última. As imagens são mostradas nas Figuras 81 a 83.

Figura 81 – Campos de deformação horizontal (ϵ_x) e vertical (ϵ_y) para valores de V_{cr} e V_u das vigas de referência: a) b) c) e d) REF-2; e) f) g) e h) REF-3.



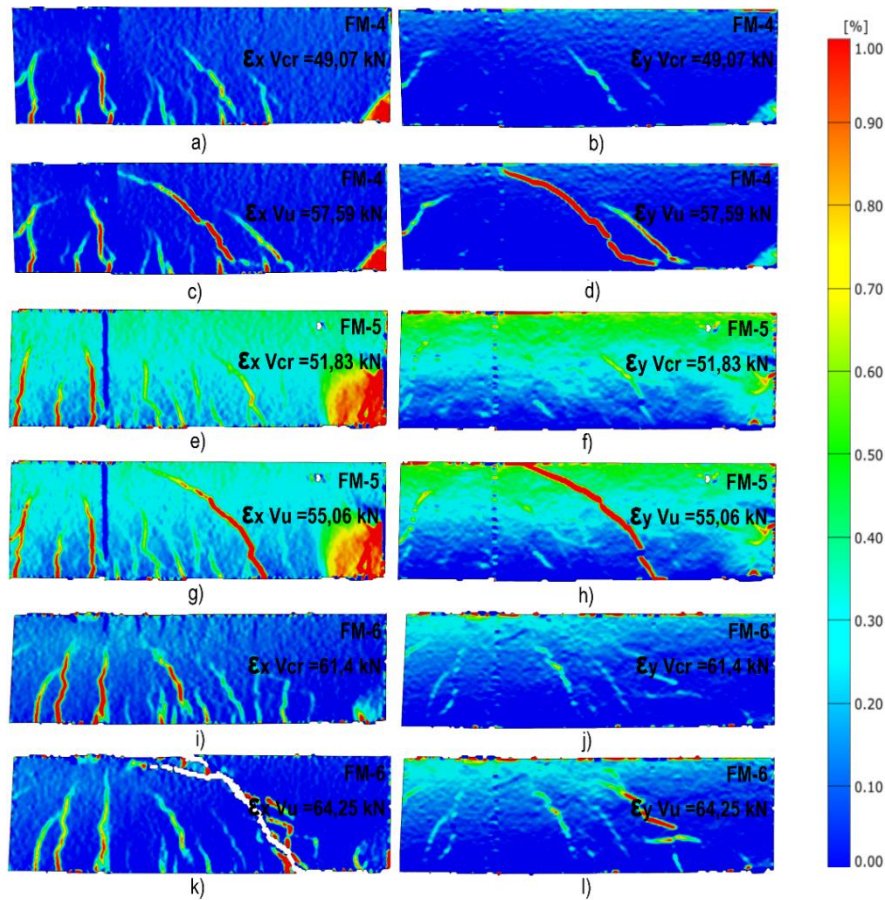
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 82 – Campos de deformação horizontal (ϵ_x) e vertical (ϵ_y) para valores de V_{cr} e V_u das vigas do grupo F90: a) b) c) e d) F90-1; e) f) g) e h) F90-2; i) j) k) e l): F90-3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 83 – Campos de deformação horizontal (ϵ_x) e vertical (ϵ_y) para valores de V_{cr} e V_u das vigas do grupo FM: a), b), c) e d) FM-4; e), f), g) e h) FM-5; i), j), k) e l): FM-6.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os campos de deformação (ϵ_x) e (ϵ_y) das vigas ensaiadas, observa-se que as cargas de fissuração das vigas REF foram praticamente iguais às cargas últimas. Em relação às vigas que receberam reforço, as cargas últimas foram ligeiramente superiores às cargas de fissuração. Observa-se, também, pelas imagens do campo de deformação que na viga F90-2 e nas vigas do grupo FM a fissura não abriu completamente no instante de aplicação da carga máxima; essa abertura ocorreu instantes depois. As vigas reforçadas apresentaram maior quantidade de fissuras de flexão/cisalhamento em relação às vigas de referência.

4.3 Comparação dos resultados obtidos nos ensaios das vigas com estudos da literatura

Neste tópico serão apresentados os resultados alcançados por diferentes autores que utilizaram compósitos cimentícios e geopoliméricos com diferentes tipos

de fibras como reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado. Para efeito de comparação, buscou-se trabalhos que aplicaram métodos de reforço semelhantes aos desenvolvidos neste estudo. O objetivo deste tópico não é o de demonstrar resultado superior ou inferior do presente estudo em relação a outros, mas mostrar a eficiência de utilização do método de reforço proposto.

As particularidades dos estudos elencados neste tópico são mostradas no Capítulo 2 deste trabalho; neste tópico apenas um resumo com as principais características é apresentado, tais como: tipo de fibra/tecido utilizado, matriz de reforço; geometria das vigas e aumento de capacidade ao cisalhamento. A Tabela 23 mostra essas características de estudos presente na literatura e o aqui desenvolvido.

Como relatado no Capítulo 2 deste trabalho, o estudo desenvolvido por Irmawaty; Fakhrudin; Ekaputri (2022) não utilizou fibras longas nos compósitos, porém variou-se os parâmetros com e sem a presença de malha de aço. Eles utilizaram painéis pré-fabricados de matriz geopolimérica para utilização como reforço em vigas. O ganho de resistência da viga reforçada com painéis que continham a malha foi de 34,9%. Além do ganho de resistência, as vigas reforçadas apresentaram aumento de rigidez.

Os resultados aqui obtidos corroboram os encontrados por Irmawaty; Fakhrudin e Ekaputri (2022), em que os compósitos pré-fabricados de matriz geopolimérica cumprem o papel de reforço e evidenciam o potencial de utilização deste método.

Tabela 23 – Comparativo de ganho na capacidade de carga de vigas reforçadas ao cisalhamento com compósitos com diferentes tipos de fibras encontradas na literatura.

Matriz	Fibra/tecido	Layout	N.º camadas de fibra	Presença de estribo	Geometria das vigas (bxhxl) (mm)	Aumento de carga (%)	Referência
Geopolimérica	Sisal	Colagem lateral	3	Não	120x250x1500	55	Este trabalho
Geopolimérica	Sisal	Colagem lateral	4	Não	120x250x1500	59	Este trabalho
Geopolimérica	Malha de aço	Colagem lateral	1	Sim	150x300x2300	34,9	Irmawaty; Fakhruddin; Ekaputri (2022)
Epóxi	Juta – 90°	Jaqueta U	2	Sim	150x300x1700	68,2	Makhlouf <i>et al.</i> (2024)
Epóxi	Juta – 90°	Envolto completo	2	Sim	150x300x1700	142	(Makhlouf <i>et al.</i> , 2024)
Cimentícia	Curauá	Colagem lateral	3	Não	120x150x1200	28	(Teixeira; Cardoso; Silva, 2021)
Geopolimérica	Carbono	Jaqueta U	1	Sim	150x300x2000	47,1	Zhang <i>et al.</i> (2019)
Geopolimérica	Carbono	Jaqueta U	2	Sim	150x300x2000	105	Zhang <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na pesquisa desenvolvida por Makhoul *et al.* (2024) foi utilizada uma combinação de fibra natural e resina epóxi com diferentes distribuições de fibras. Analisando somente as configurações que mais se assemelham ao presente estudo, o compósito com fibras distribuídas a 90° em duas camadas apresentou ganho de resistência de 68,2%, enquanto os compósitos com fibras que envolviam completamente a viga apresentaram ganho de 142% na capacidade ao cisalhamento. Os excelentes resultados alcançados por eles mostram o potencial de utilização das fibras naturais quando combinadas com matriz de alta resistência, que apresenta boa aderência com o substrato de concreto. Apesar do elevado ganho de resistência alcançado com a utilização da resina epóxi, destaca-se algumas vantagens da utilização de geopolímeros em relação a esse tipo de resina, a saber: resistência ao fogo, resistência a sulfatos e ácidos (Singh *et al.*, 2015; Thiagarajan *et al.*, 2022).

A pesquisa desenvolvida pelos autores Teixeira *et al.* (2022) usou fibra de curauá em matriz cimentícia. Esta pesquisa e o presente estudo assemelham-se em relação a não utilização de estribos no vão de cisalhamento analisado, no número de camadas de fibras e na forma de aplicação do reforço, fixados lateralmente às vigas, porém diferem-se principalmente no método de confecção dos compósitos: lá foi adotado o método de moldagem diretamente sobre a viga, enquanto aqui foi utilizado o método de confecção de compósitos pré-fabricados. Os compósitos cimentícios desenvolvidos por Teixeira *et al.* (2022) apresentaram ganho na capacidade de resistência ao cisalhamento de 28%, além do aumento de rigidez em todos os estágios de carregamento e alta aderência com o substrato de concreto, sem que houvesse descolamento do reforço durante o ensaio.

Por fim, tem-se os resultados de Zhang *et al.* (2019), que utilizaram matriz geopolimérica e tecido de carbono em forma de jaqueta U para reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado, com moldagem direta sobre a viga. Com a utilização de uma e de duas camadas de tecido, o reforço proporcionou ganho na capacidade de cisalhamento de 47,1% e 105%, respectivamente. O estudo mostrou que a utilização de argamassa geopolimérica combinada com tecido de alta resistência, como é o caso do tecido de carbono, pode promover aumento significativo na capacidade ao cisalhamento das vigas reforçadas. As fibras sintéticas apresentam maior resistência à tração do que as fibras naturais; porém, a utilização de fibras naturais visa produzir compósitos mais sustentáveis.

5 Considerações finais

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões referentes aos resultados obtidos no desenvolvimento desta pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de compósitos geopoliméricos pré-fabricados reforçados com fibras naturais de sisal para aplicação como reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado.

Foram produzidos compósitos geopoliméricos com duas diferentes distribuições de fibras para a caracterização mecânica. A partir do ensaio de tração direta destes compósitos e da utilização da técnica de fotogrametria foi possível obter resultados relevantes, os quais serão apresentados a seguir.

Os compósitos geopoliméricos apresentaram comportamento *strain-hardening* com a formação de múltiplas fissuras. Foi possível concluir que o desempenho satisfatório do compósito depende da forma de distribuição das fibras em relação à aplicação do carregamento. Os compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente proporcionaram ganho significativo na resistência à tração da matriz.

Os compósitos com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e 315° também apresentaram comportamento *strain-hardening*, porém essa distribuição de fibras representou pouco ganho de resistência última ao compósito, pois não atuaram na direção de aplicação dos esforços solicitantes.

A partir da utilização da técnica de Correlação de Imagem Digital no ensaio de tração direta dos compósitos, foi possível avaliar a deformação, o número de fissuras, a largura média de fissuras, o momento de surgimento da primeira fissura e correlacionar estes parâmetros com a carga aplicada, parâmetros estes essenciais para o entendimento de ductilidade e da rigidez dos compósitos.

A utilização de placas pré-moldadas de geopolímero, para as duas distribuições de fibras adotadas, foram capazes de proporcionar elevados ganhos na resistência do cortante de fissuração, de 35% e de 52%, para as vigas F90 e FM, respectivamente. Em relação ao cortante último, o incremento de carga das vigas

reforçadas foi ainda superior, com ganho de 55% para as vigas reforçadas com compósitos de fibras distribuídas em uma direção, e 59% para vigas reforçadas com compósitos de fibras distribuídas em duas direções. Além do elevado ganho na capacidade ao cisalhamento, a aplicação dos compósitos proporcionou às vigas aumento de rigidez em todos os estágios de carregamento.

Em relação ao modo de falha, todas as vigas falharam por cisalhamento, com formação da fissura diagonal típica de cisalhamento. A utilização do reforço não foi capaz de alterar a forma de ruptura das vigas, que romperam de forma frágil. Porém, a utilização das fibras fez com que, após a queda brusca do carregamento, houvesse picos de aumento de capacidade portante, conferindo às vigas resistência adicional.

Em relação ao padrão de fissuração, analisado pela utilização da técnica CID, foi possível observar que nas vigas reforçadas com compósitos de fibras distribuídas em uma direção (F90), a direção principal da fissura de cisalhamento foi alterada, não se prolongando até o apoio. A fissura deste grupo de vigas apresentou tendência de angulação mais ortogonal em relação ao eixo longitudinal das vigas, acompanhando a direção da orientação das fibras.

O sistema de colagem do reforço, com a utilização de uma resina epóxi com 2 mm de espessura, apresentou elevada aderência, pois todas as vigas romperam de forma monolítica, sem que houvesse descolamento do reforço.

Os compósitos utilizados como reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado mostraram alto desempenho nas duas configurações de distribuição de fibras analisadas, com aumento significativos nas cargas de fissuração e última, além do aumento de rigidez, indicando a possibilidade de utilização segura deste método de recuperação estrutural.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Embora o presente trabalho tenha realizado análises em relação ao comportamento dos compósitos geopoliméricos reforçados com fibras de sisal, incluindo sua utilização como método de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado, alguns aspectos devem ser explorados e elucidados por pesquisas vindouras. Assim, seguem algumas sugestões:

- avaliar diferentes angulações de fibras aplicadas nos compósitos como reforço ao cisalhamento;
- avaliar a degradação das fibras nos compósitos e possíveis tratamentos para mitigar essas degradações;
- avaliar a utilização da própria matriz geopolimérica na colagem dos compósitos às vigas, em substituição à resina epóxi, bem como realizar ensaios de aderência entre a matriz geopolimérica e o substrato de concreto;
- aplicar os compósitos de reforço em vigas pré-fissuradas e avaliar o ganho de resistência conferido ao sistema.

REFERÊNCIAS

ALVES FIDELIS, Maria Ernestina *et al.* The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 149–157, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-19: Building code requirements for structural concrete : ccommentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-19)**. Farmington Hills, MI: ACI, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 549.4R-20: Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix and steel-reinforced grout systems for repair and strengthening of concrete structures**. Farmington Hills, MI: ACI, 2020.

ARDANUY, Mònica; CLARAMUNT, Josep; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 79, p. 115–128, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892-1: Materiais metálicos — Ensaio de tração - Parte 1: Método de ensaio em temperatura ambiente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado — Requisitos**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cono tronco de cone.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917: Agregado graúdo — Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

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

AZWA, Z.N. *et al.* A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. **Materials & Design**, [s. l.], v. 47, p. 424–442, 2013.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre reinforced cementitious composites.** 2nd eded. London ; New York: Taylor & Francis, 2007. (Modern concrete technology series).

BERNAL, Susan *et al.* Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 208–214, 2010.

BOUSSELHAM, Abdelhak; CHAALLAL, Omar. Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 37–46, 2006.

CASTOLDI, Raylane de Souza; SOUZA, Lourdes Maria Silva de; SILVA, Flávio de Andrade. Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fiber reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 617–628, 2019.

CHENG, T.W. *et al.* The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 56, p. 90–96, 2012.

CORREIA, Edvaldo Amaro Santos. **Compósitos de Matriz Geopolimérica Reforçados com Fibras Vegetais de Abacaxi e de Sisal.** 2011. Tese de Doutorado - Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2011.

CRIADO, M; PALOMO, A; FERNANDEZJIMENEZ, A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. **Fuel**, [s. l.], v. 84, n. 16, p. 2048–2054, 2005.

DAVIDOVITS, Dr Joseph. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. [s. l.], p. 16, 2002.

DAVIDOVITS, Joseph. **Geopolymer: chemistry & applications.** 5th eded. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2020.

DAVIDOVITS, Joseph. GEOPOLYMERS: INORGANIC POLYMERIC NEW MATERIALS. **JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS**, [s. l.], v. 37, p. 1633–1656, 1991.

DIAS, Dylmar Penteado; THAUMATURGO, Clelio. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 49–54, 2005.

DUXSON, P. *et al.* Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007.

DUXSON, Peter *et al.* Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 269, n. 1–3, p. 47–58, 2005.

FERNANDES, Emanuel M.; MANO, João F.; REIS, Rui L. Hybrid cork–polymer composites containing sisal fibre: Morphology, effect of the fibre treatment on the mechanical properties and tensile failure prediction. **Composite Structures**, [s. l.], v. 105, p. 153–162, 2013.

FERREIRA, Saulo Rocha *et al.* Influence of natural fibers characteristics on the interface mechanics with cement based matrices. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 140, p. 183–196, 2018.

FERREIRA, S.R. *et al.* Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 1024–1034, 2012.

FRANÇA, Fernando Cesar Coelho. **AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REPARADAS COM ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA**. 2017. Tese de Doutorado - UENF, Rio de Janeiro, Brazil, 2017.

GLÓRIA, Gabriel Oliveira *et al.* Bending test in epoxy composites reinforced with continuous and aligned PALF fibers. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 411–416, 2017.

GÖRHAN, Gökhan; KÜRKLÜ, Gökhan. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 58, p. 371–377, 2014.

GUADES, Ernesto J. *et al.* Flexural behavior of hybrid fibre-reinforced geopolymer composites (FRGC)-jacketed RC beams. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 235, p. 112053, 2021.

HE, Peigang *et al.* Effects of high-temperature heat treatment on the mechanical properties of unidirectional carbon fiber reinforced geopolymer composites. **Ceramics International**, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 1447–1453, 2010a.

HE, Peigang *et al.* Effects of high-temperature heat treatment on the mechanical properties of unidirectional carbon fiber reinforced geopolymer composites. **Ceramics International**, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 1447–1453, 2010b.

IRMAWATY, Rita; FAKHRUDDIN; EKAPUTRI, Januarti Jaya. Experimental and analytical study for shear strengthening of reinforced-concrete beams using a prefabricated geopolymer–mortar panel. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 17, p. e01568, 2022.

KHALE, Divya; CHAUDHARY, Rubina. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 729–746, 2007.

KUENZEL, Carsten *et al.* Ambient Temperature Drying Shrinkage and Cracking in Metakaolin-Based Geopolymers. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 95, n. 10, p. 3270–3277, 2012.

LASKAR, Sulaem Musaddiq; TALUKDAR, Sudip. A study on the performance of damaged RC members repaired using ultra-fine slag based geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 217, p. 216–225, 2019.

LIEW, Yun-Ming *et al.* Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. **Progress in Materials Science**, [s. l.], v. 83, p. 595–629, 2016.

LIMA, Victor Nogueira; CARDOSO, DANIEL; SILVA, FLÁVIO DE ANDRADE. Flexural creep behavior of steel and polypropylene fiber reinforced concrete. *In*: 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES, 2019. **Proceedings of the 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures**. [S. l.]: IA-FraMCoS, 2019. Disponível em: <https://framcos.org/FraMCoS-10/Full-Papers/234778.pdf>. Acesso em: 6 fev. 2024.

MAHMOOD, Aamir *et al.* Geopolymers and Fiber-Reinforced Concrete Composites in Civil Engineering. **Polymers**, [s. l.], v. 13, n. 13, p. 2099, 2021.

MAKHLOUF, Mohamed H. *et al.* Experimental and numerical study of shear strengthening of reinforced concrete beams using jute fiber reinforced polymers (JFRP). **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 86, p. 108732, 2024.

MARTIN, Adriana R. *et al.* Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. **Polímeros**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 40–46, 2009.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 3rd eded. New York: McGraw-Hill, 2006.

MEHTA, Ankur; SIDDIQUE, Rafat. Strength, permeability and micro-structural characteristics of low-calcium fly ash based geopolymers. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 141, p. 325–334, 2017.

MELO, Kátia Moreira De *et al.* Study of the reuse potential of the sisal fibers powder as a particulate material in polymer composites. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 4019–4025, 2019.

NAWAZ, Mohsin; HEITOR, Ana; SIVAKUMAR, Muttucumar. Geopolymers in construction - recent developments. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 260, p. 120472, 2020.

NEMATOLLAHI, Behzad *et al.* Properties of Fresh and Hardened Glass Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer Concrete. **Key Engineering Materials**, [s. l.], v. 594–595, p. 629–633, 2013.

NEUPANE, Kamal. “Fly ash and GGBFS based powder-activated geopolymer binders: A viable sustainable alternative of portland cement in concrete industry”. **Mechanics of Materials**, [s. l.], v. 103, p. 110–122, 2016.

NEVES, Anna Carolina C. *et al.* Comparative mechanical properties between bio-composites of Epoxy and polyester matrices reinforced by hemp fiber. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 1296–1304, 2020.

OMBRES, Luciano. Structural performances of reinforced concrete beams strengthened in shear with a cement based fiber composite material. **Composite Structures**, [s. l.], v. 122, p. 316–329, 2015.

OZER, Isil; SOYER-UZUN, Sezen. Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar Si/Al ratios. **Ceramics International**, [s. l.], v. 41, n. 8, p. 10192–10198, 2015.

PACHECO-TORGAL, F. *et al.* Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 9, p. 3732–3745, 2011.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M.W.; BLANCO, M.T. Alkali-activated fly ashes. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 8, p. 1323–1329, 1999.

PAN, Bing *et al.* Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. **Measurement Science and Technology**, [s. l.], v. 20, n. 6, p. 062001, 2009.

PUERTAS, F *et al.* Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 33, n. 12, p. 2031–2036, 2003.

RANGEL, Greisson Peixoto. **ESTUDO DA VIABILIDADE TECNOLÓGICA DE ARGAMASSAS ATIVADAS POR NaOH OU KOH**. 2017. Dissertação de Mestrado - UENF, Rio de Janeiro, Brazil, 2017.

RANJBAR, Navid *et al.* Fracture evaluation of multi-layered precast reinforced geopolymer-concrete composite beams by incorporating acoustic emission into mechanical analysis. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 127, p. 274–283, 2016.

ROCHA, Thais da Silva *et al.* Metakaolin-based geopolymer mortars with different alkaline activators (Na + and K +). **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 178, p. 453–461, 2018.

ROVNANÍK, Pavel. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 24, n. 7, p. 1176–1183, 2010.

SANTIAGO, Gislene A. *et al.* Mechanical Behavior of Curauá Treated Fiber-Reinforced Sand. **Materials Science Forum**, [s. l.], v. 730–732, p. 355–360, 2012.

SENTHILKUMAR, K. *et al.* Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 174, p. 713–729, 2018.

SIDDIQUE, Rafat; KLAUS, Juvas. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 43, n. 3–4, p. 392–400, 2009.

SILVA, Guido *et al.* Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry. **Sustainable Materials and Technologies**, [s. l.], v. 23, p. e00132, 2020.

SILVA, Thuane Teixeira da *et al.* Thermal and Chemical Characterization of Kenaf Fiber (*Hibiscus cannabinus*) Reinforced Epoxy Matrix Composites. **Polymers**, [s. l.], v. 13, n. 12, p. 2016, 2021.

SILVA JUNIOR, Iranildo Barbosa da; SOUZA, Lourdes Maria Silva de; SILVA, Flávio De Andrade. Creep of pre-cracked sisal fiber reinforced cement based composites. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 293, p. 123511, 2021.

SILVA, Flávio de Andrade; MOBASHER, Barzin; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 31, n. 10, p. 721–730, 2009.

SILVA, P. De; SAGOE-CRENSIL, K.; SIRIVIVATNANON, V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 512–518, 2007.

SINGH, B. *et al.* Geopolymer concrete: A review of some recent developments. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 85, p. 78–90, 2015.

SOARES, Joadelio Chagas. **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DE RESINAS GEOPOLIMÉRICAS PARA RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**. 2020. Tese de Doutorado - UENF, Rio de Janeiro, Brazil, 2020.

SOARES, Joadelio Chagas *et al.* Determination of shear strength by losipescu (V-notch) method of metakaolin-based geopolymeric resins activated by different silicate and hydroxide combinations. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 275, p. 122120, 2021.

SOMNA, Kiatsuda *et al.* NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. **Fuel**, [s. l.], v. 90, n. 6, p. 2118–2124, 2011.

SUN, Peijiang; WU, Hwai-Chung. Transition from brittle to ductile behavior of fly ash using PVA fibers. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 29–36, 2008.

TEIXEIRA, Felipe Pinheiro *et al.* On the mechanical properties and crack pattern analysis of a strain-hardening cement-based composite reinforced by natural sisal fibers. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. e20220181, 2022.

TEIXEIRA, Felipe Pinheiro; CARDOSO, Daniel Carlos Taissum; SILVA, Flávio De Andrade. On the shear behavior of natural curauá fabric reinforced cement-based composite systems. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 246, p. 113054, 2021.

THIYAGARAJAN, Srividya *et al.* A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 16, p. e00812, 2022.

TRINDADE, Ana Carolina Constancio. **DESENVOLVIMENTO E COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS TÊXTEIS REFORÇADOS COM FIBRA DE JUTA**. 2017. MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL - PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, Brazil, 2017. Disponível em: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=30092@1. Acesso em: 21 mar. 2023.

TRINDADE, Ana C. C. *et al.* Mechanical Behavior of Geopolymeric Composites Reinforced with Natural Fibers. **Strain-Hardening Cement-Based Composites**, [s. l.], v. 15, RILEM Bookseries, p. 383–391, 2018.

WANG, Hongling; LI, Haihong; YAN, Fengyuan. Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [s. l.], v. 268, n. 1–3, p. 1–6, 2005.

WONGSA, Ampol *et al.* Natural fiber reinforced high calcium fly ash geopolymer mortar. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 241, p. 118143, 2020.

XU, H.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LUKEY, G. C. Effect of Alkali Metals on the Preferential Geopolymerization of Stilbite/Kaolinite Mixtures. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 40, n. 17, p. 3749–3756, 2001.

YAN, Libo; KASAL, Bohumil; HUANG, Liang. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 92, p. 94–132, 2016.

YAO, Y. *et al.* Tension stiffening in textile-reinforced concrete under high speed tensile loads. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 64, p. 49–61, 2015.

YUAN, Jingkun *et al.* Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers. **Ceramics International**, [s. l.], v. 42, n. 14, p. 16184–16190, 2016.

ZHANG, Hai Yan *et al.* Mechanical behavior of concrete beams shear strengthened with textile reinforced geopolymer mortar. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 196, p. 109348, 2019.

ZHANG, Fan *et al.* Role of alkali cation in compressive strength of metakaolin based geopolymers. **Ceramics International**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 3811–3817, 2017.

ZHAO, Q. *et al.* Novel geopolymer based composites with enhanced ductility. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 3131–3137, 2007.

ZUHUA, Z *et al.* Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 218–223, 2009.

APÊNDICE A – Vigas após a realização dos ensaios

Todas as fotos mostram as vigas no instante da finalização do ensaio, com exceção da viga REF-1. Para essa viga é mostrada a imagem após a realização do ensaio, pois nessa viga a ruptura aconteceu no vão contrário ao das imagens capturadas no momento de aplicação de carga.

As Figuras A.1 mostram as vigas de referência, enquanto as Figuras A.2 e A.3 mostram as vigas reforçadas do grupo F90 e FM, respectivamente.



a)



b)



c)



a)



b)



c)



a)

b)



c)