

Comportamento mecânico e análise de padrão de fissuração de compósitos geopoliméricos reforçados com fibras de sisal

Mechanical behavior and cracking pattern analysis of geopolymer composites reinforced with sisal fibers

Ana Carolina Lemos de Souza Pessanha¹ , Sergio Luis González García¹ ,
Dylmar Penteado Dias¹ , Pamella Inacio Moreira¹, Gabryel de Carvalho Alves¹ 

¹Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Avenida Alberto Lamego, 2000, 28013-602, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

e-mail: anacarolina.cl54@gmail.com, liluiser@uenf.br, dylmar@uenf.br, pamella_moreira@hotmail.com, gabryeldecarvalhoalves@hotmail.com

RESUMO

Os geopolímeros são materiais que apresentam alta resistência inicial à compressão, além de apresentarem resistência à altas temperaturas, a sulfatos e a ácidos. Porém, é um material cerâmico de comportamento frágil. Para compensar tal fragilidade, diversos tipos de fibras têm sido utilizadas. No presente trabalho, compósitos geopoliméricos reforçados com fibras de sisal foram produzidos e ensaiados à tração direta. Foram avaliadas duas diferentes distribuições de fibras contínuas e alinhadas: fibras distribuídas longitudinalmente e fibras distribuídas a 45°, em ambos os casos foram utilizadas uma fração volumétrica de 3% de fibras. O comportamento de deformação e fissuração foram analisados pela técnica de Correlação de Imagem Digital (CID). Os resultados encontrados foram comparados com outros resultados presentes na literatura, demonstraram similaridade com os estudos analisados. Os compósitos apresentaram comportamento *strain-hardening* com a formação de múltiplas fissuras, com o aumento da resistência após a formação da primeira fissura. Os compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente apresentaram melhor desempenho, demonstrando que o desempenho dos compósitos depende da orientação de distribuição das fibras em relação ao carregamento aplicado.

Palavras-chave: Compósitos geopoliméricos; fibras de sisal; geopolímeros; correlação de imagem digital (CID).

ABSTRACT

Geopolymers are materials that present high initial compressive strength, in addition to presenting resistance to high temperatures, sulfates and acids. However, it is a ceramic material with brittle behavior. To compensate for such fragility, several types of fibers have been used. In the present work, geopolymer composites reinforced with sisal fibers were produced and tested under direct tension. Two different distributions of continuous and aligned fibers were evaluated: fibers distributed longitudinally and fibers distributed at 45°, in both cases a volume fraction of 3% of fibers was used. The deformation and cracking behavior were analyzed by the Digital Image Correlation (DIC) technique. The results found were compared with other results present in the literature, demonstrating similarity with the studies analyzed. The composites presented strain hardening behavior with the formation of multiple cracks, with an increase in resistance after the formation of the first crack. Composites with longitudinally distributed fibers showed better performance, demonstrating that the performance of composites depends on the orientation of fiber distribution in relation to the applied load.

Keywords: Geopolymer composites; sisal fibers; geopolymers; digital image correlation (DIC).

1. INTRODUÇÃO

O geopolímero é um tipo de polímero inorgânico produzidos à temperatura ambiente à partir de uma fonte de aluminossilicatos proveniente da argila calcinada como metacaulim, ou ainda pelo aproveitamento de resíduos industriais como a cinza volante e a escória de alto-forno [1]. O conceito de geopolímero foi introduzido e aplicado por Joseph Davidovits, e o termo foi patenteado por ele em 1981 [1].

Segundo DAVIDOVITS [1], os geopolímeros são novos materiais para revestimento e adesivos, novos ligantes para compósitos, como também um novo cimento para concreto. Estudos já desenvolvidos com geopolímeros demonstraram que esses materiais apresentam propriedades comparáveis a até mesmo superiores ao do cimento Portland [2]. Como as características dos geopolímeros, pode-se destacar as boas propriedades mecânicas, ganho de resistência inicial, resistência a altas temperaturas, resistência a corrosão, além resistência a sulfatos e a ácidos. Essas propriedades, unidas ao fato de não ser um material agressivo ao meio ambiente, faz com que o geopolímero seja considerado um substituto viável ao cimento Portland [3, 4].

A formação dos geopolímeros acontece a partir da reação química entre os compostos sólidos dos aluminossilicatos (Si_2O_5 , Al_2O_3) e uma solução alcalina altamente concentrada [5]. A fonte de aluminossilicato pode 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) [1]. Diversos pesquisadores já utilizaram o metacaulim como material precursor na fabricação de geopolímeros, sendo uma matéria-prima já consagrada como eficiente [6–9]. Os geopolímeros à base de metacaulim, devido a essa matéria terem partículas em forma de placa, necessitam de elevada quantidade de água, e, como consequência, pode ocorrer aumento na porosidade [3].

Em relação ao meio alcalino, são comumente utilizados com ativadores alcalinos hidróxidos de sódio (NaOH) ou de potássio (KOH), e silicatos de sódio e potássio [10]. Destaca-se que a combinação de silicato de sódio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sódio (NaOH) é mais comumente adotada devido a sua relação de custo benefício, pois resulta em geopolímeros com resistência à compressão superior quando comparada ao uso isolado de silicatos ou hidróxidos [10]. ZHANG *et al.* [11] 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 os compostos formados por Na^+ , para a mesma razão de Si/Al, apresentaram 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 material precursor podem ficar sem reagir.

Apesar das suas boas propriedades, uma grande limitação para aplicações estruturais dos geopolímeros é sua baixa resistência à tração e ruptura frágil [12]. O reforço da matriz com a utilização de fibras tem sido utilizado como alternativa para contornar essas limitações [13]. Em compósitos reforçados com fibras (FRC), as fibras atuam principalmente na zona pós-fissuração, sendo um meio de transferência de tensões através das fissuras, aumentando a tenacidade do compósito [14].

A maior parte das pesquisas sobre geopolímeros reforçados com fibras de concentrou na utilização de fibras sintéticas, como por exemplo: fibras de aço [15], fibras de carbono [16, 17], fibras de vidro [18], fibras de polipropileno [19], fibras de álcool polivinílico (PVA) [20]. Entretanto, a busca pelo desenvolvimento de materiais sustentáveis têm estimulado o interesse em fibras de fontes naturais [12]. As fibras naturais vegetais apresentam vantagens que se sobressaem em relação às fibras sintéticas, como baixo custo, baixo peso, são provenientes de fontes renováveis, e apresentam alta resistência à tração e à flexão [12].

A utilização de materiais compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais tem sido explorada nos últimos anos, e tem se mostrado uma alternativa ecologicamente atrativa e de baixo custo em relação às fibras sintéticas convencionais [21]. TEIXEIRA *et al.* [22] produziram compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de sisal de alto desempenho, que além de apresentarem aumento de resistência, apresentaram melhoria de deformação, com comportamento *strain-hardening*. Os pesquisadores SILVA JUNIOR *et al.* [23] avaliaram o comportamento de fluência de compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal longas e unidirecionais, com fibras na condição saturada e com umidade natural. Os compósitos também apresentaram comportamento *strain-hardening* com a formação de múltiplas fissuras. Os resultados obtidos mostram que as fibras saturadas promovem uma melhor transferência de tensões entre a fibra e a matriz, devido ao maior contato na interface. Os compósitos com fibras saturadas apresentaram menor abertura de fissura, maior tenacidade e resistência à tração.

Alguns estudos também foram realizados com a utilização de fibras naturais em matriz geopolimérica, como o estudo desenvolvido por TRINDADE *et al.* [24], que produziram compósitos geopoliméricos reforçados com fibras de sisal e tecido de juta, utilizando como material precursor da matriz o metacaulim. Na pesquisa desenvolvida pelos autores, foi utilizada uma fração volumétrica de 10% de fibras divididas em cinco camadas. Os compósitos apresentaram alto desempenho quando ensaiados à tração direta com formação de múltiplas fissuras e resistência última de 6,31 MPa e 11,53 MPa para o tecido de juta e sisal, respectivamente. O compósito reforçado com fibras de sisal também apresentou valor de resistência última superior (17,68 MPa) no ensaio de flexão quando comparado com o compósito com tecido de juta (15,21 MPa). Em ambos os ensaios, os compósitos reforçados com fibras de sisal apresentaram maior número de fissuras e menor capacidade de deformação em relação ao compósito reforçado com tecido de juta. Esse comportamento pode estar associado a melhor ligação entre a matriz geopolimérica e a fibra de sisal. A capacidade das fibras em melhorar o desempenho

de matrizes frágeis depende, principalmente, das interações fibra-matriz [14]. O comportamento mecânico também é fortemente influenciado pelo tipo, comprimento e fração volumétrica de fibras [25].

A utilização de fibras em matrizes frágeis como matrizes de cimento Portland tem permitido produzir materiais considerados de alto desempenho devido a resistência à tração e tenacidade [23, 26]. Porém, visando sua aplicação na indústria da construção civil, são necessárias maiores investigações do comportamento mecânico desses compósitos, principalmente os que utilizam o geopolímero como matriz, visto que grande parte das pesquisas com fibras naturais se concentrou na utilização de matrizes cimentícias. Portanto, este trabalho busca analisar o comportamento mecânico de compósitos geopoliméricos reforçados com fibras longas de sisal, adotando duas diferentes configurações de distribuição, como também analisar o padrão de fissuração através da utilização da técnica de Correlação de Imagem Digital (CID).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Matriz geopolimérica

A matriz geopolimérica foi produzida pela mistura do material precursor, agregado miúdo e uma solução alcalina ativadora. Nesta pesquisa, utilizou-se uma dosagem adaptada de SOARES *et al.* [27], que produziu resinas geopoliméricas de alta resistência. O material precursor utilizado foi o metacaulim, fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil. A composição química do metacaulim, obtido por espectrometria de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX), é mostrado na Tabela 1. A solução alcalina consistiu em uma combinação de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio alcalino (Na_2SiO_3). A composição química desses materiais, que foi fornecida pelo fabricante, é mostrada na Tabela 2. Como agregado miúdo foi utilizada areia normalizada na fração granulométrica fina peneira nº 100 (abertura 0,15 mm), fornecida e produzida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), conforme estabelecido na NBR 7214 [28]. Visando produzir uma matriz com maior fluidez, a dosagem de SOARES *et al.* [27] foi adaptada aumentando a quantidade de líquidos na mistura e diminuindo a quantidade de agregado miúdo. As razões molares da matriz geopolimérica (MG) são apresentadas na Tabela 3. Para a determinação das propriedades mecânicas da matriz no estado endurecido, foram moldados

Tabela 1: Características físicas e químicas do metacaulim.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA	PESO
SiO_2 (%)	55,47
Al_2O_3 (%)	38,37
K_2O (%)	1,85
Fe_2O_3 (%)	1,41
TiO_2 (%)	1,31
SO_3 (%)	1,29
CaO (%)	0,14
Massa específica (kg/dm^3)	2,46

Tabela 2: Composição química dos hidróxido e silicato de sódio.

COMPONENTE (%)	HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH)	SILICATO DE SÓDIO (Na_2SiO_3)
NaOH (%)	97,70	–
Carbonatos (%)	0,10	–
Fe (%)	1,40	–
Na_2O (%)	–	15,2
SiO_2 (%)	–	32,98

Tabela 3: Razões molares da solução alcalina ativadora.

RAZÃO MOLAR				
MATRIZ	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$
MG	3,36	9,32	0,12	0,40

48 corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Os corpos de prova foram ensaiados à compressão axial e à tração por compressão diametral nas idades de 7, 14 e 28 dias.

2.2. Fibras de sisal

A fibra de sisal é proveniente da planta *Agave Sisalana*, uma planta originária do México, e seu cultivo se dá principalmente no Brasil, Índia, Haiti, África Oriental, Indonésia e China [13].

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 [29]. Cada microfibrilha 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 [30]. A fibra de sisal é composta principalmente por celulose (65%–68%), hemicelulose (10%–22%), lignina (9%–14%) e ceras [31]. As fibras possuem baixa densidade, com valores em torno de 1,03g/cm³ a 1,45g/cm³ [13].

As fibras de sisal utilizadas neste trabalho foram adquiridas em comércio local, na cidade de Campos dos Goytacazes-RJ. As fibras foram recebidas em feixes de aproximadamente 1200 mm. As fibras foram escovadas manualmente para desembaraçá-las e cortadas no comprimento de 300 mm para a realização dos ensaios de caracterização. Para análise da seção transversal da fibra, adotou-se o método utilizado por [32, 33], que consiste na medição do diâmetro da fibra por meio de um projetor de perfil. Para esta análise foram separadas aleatoriamente um lote com 100 amostras de fibras, e, em cada amostra foram realizadas dez medições de diâmetro ao longo do comprimento da fibra, sendo cinco medições em uma direção e outras cinco após a rotação das fibras em 90°. Após a medição do diâmetro, a área de cada fibra foi calculada considerando uma seção transversal circular. A Figura 1 mostra a realização das medições em um projetor de perfil da Nikon, modelo 65. As fibras de sisal também foram caracterizadas mecanicamente quanto à sua resistência à tração direta. Para este ensaio, foi utilizado o mesmo lote de 100 fibras que tiveram seus diâmetros analisados no projetor de perfil.

2.3. Manufatura

Na produção da matriz geopolimérica seguiu-se a sequência de Soares *et al.* [27]. A solução alcalina foi preparada 24 h antes da moldagem dos corpos de prova, utilizando um agitador magnético para a mistura do hidróxido e silicato de sódio com a água. Inicialmente, adicionou o hidróxido de sódio à água, misturando por 2 min, posteriormente adicionou a mistura ao silicato de sódio, realizando a mistura por mais 3 min.

No processo de confecção da matriz, antes da mistura do material precursor com a solução ativadora, o material precursor (metacaulim) e a areia foram pesados e homogeneizados. A matriz foi produzida utilizando



Figura 1: Análise do diâmetro das fibras de sisal em projetor de perfil.

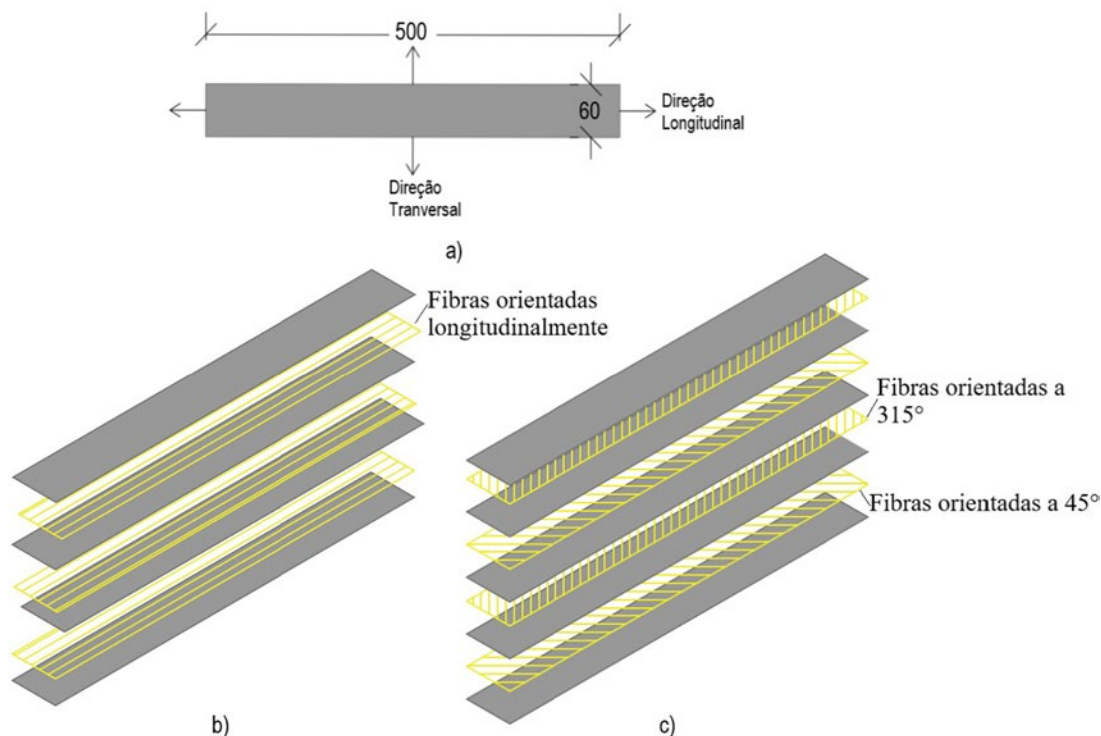


Figura 2: Dimensões dos compósitos e esquema de moldagem: (a) dimensões dos compósitos em mm; (b) compósitos com fibras orientadas longitudinalmente (três camadas de fibras); (c) compósitos com fibras orientadas a 45° e 315° (quatro camadas de fibras).

um misturador de bancada da EMIC com capacidade máxima de 5 litros. Inicialmente, umedeceu-se a cuba do misturador e adicionou-se a solução ativadora, em seguida adicionou-se o metacaulim previamente homogeneizado com a areia e foi feita a mistura durante 1 min em baixa velocidade. Desligou-se o misturador e, com o auxílio de uma espátula metálica, retirou-se os materiais aderidos às paredes da cuba e da pá do misturador. Após esse processo, religou-se o misturador e foi feita a mistura por mais 3 min em alta velocidade.

Antes da aplicação nos compósitos, buscando eliminar o máximo de impurezas e resíduos superficiais aderidos às fibras devido ao processo de extração, as mesmas foram tratadas com água quente a uma temperatura de $80 \pm 5^\circ \text{C}$, por um período de 1 h, conforme procedimento adotado por [34, 35]. Após esse processo, as fibras foram secas ao ar por 48 h. Depois de tratadas, foram penteadas e cortadas no comprimento necessário para aplicação no compósito. Devido às características hidrofílicas das fibras naturais, que é a alta capacidade de absorção de água, e consequentemente, baixa estabilidade dimensional, a adesão entre a fibra e a matriz pode ser prejudicada. Visando minimizar a absorção de água da matriz pelas fibras, as mesmas foram pré-saturadas submersas em água por um período de 1 h [35].

Para a moldagem dos compósitos, foram utilizados moldes metálicos com as dimensões de $500 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (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 ângulo de 45° . As fibras orientadas a 45° foram distribuídas em duas direções. Foi adotada uma fração volumétrica de 3% de fibras. 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 e a outra metade na outra direção, à 315° , mantendo a mesma proporção de fibra em cada camada. Como as fibras orientadas a 45° 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 2 ilustra as dimensões dos compósitos e a configuração adotada para a moldagem. 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 30 s para remover as bolhas de ar. As Figuras 3 e 4 mostram o processo de moldagem dos compósitos. A nomenclatura atribuída aos corpos de prova

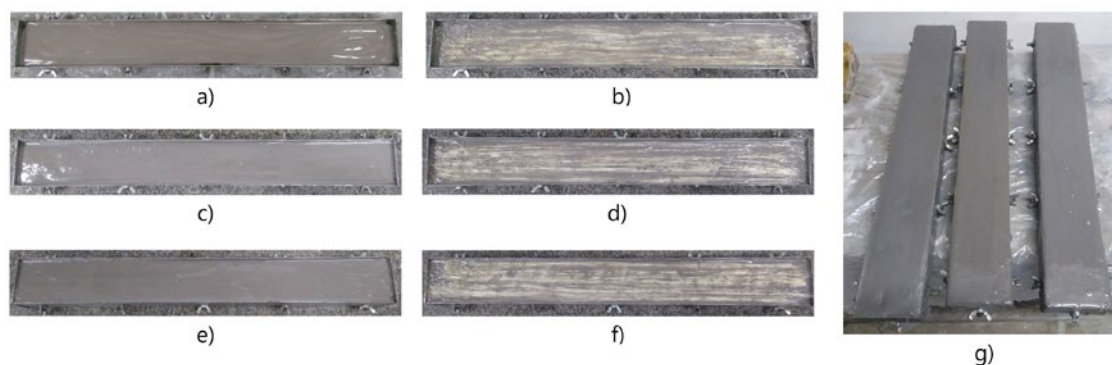


Figura 3: Moldagem dos corpos de prova com fibras distribuídas longitudinalmente: (a) 1.ª camada de matriz; (b) 1.ª camada de fibras; (c) 2.ª camada de matriz; (d) 2.ª camada de fibras; (e) 3.ª camada de matriz; (f) 3.ª camada de fibras; (g) compósito finalizado com camada de matriz.

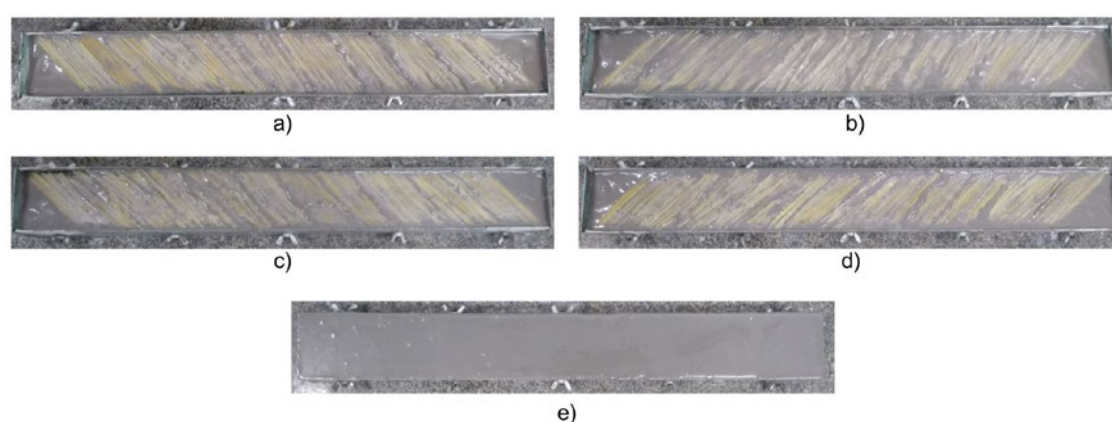


Figura 4: Moldagem dos corpos de prova com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e a 315°: (a) 1.ª camada de fibra; (b) 2.ª camada de fibra; (c) 3.ª camada de fibras; (d) 4.ª camadas de fibras; (e) compósito finalizado com camada de matriz.

representa a distribuição de fibras adotada, conforme a seguinte convenção: PEN-F0 ou PEN-F45x315, em que: PE representa 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°. Os compósitos foram desmoldados 24 h após a moldagem e mantidos em cura à temperatura ambiente (25 °C a 30 °C) por um período de 28 dias envoltos em filme plástico, com o intuito de evitar o contato com o ar e consequente evaporação da água livre [36].

2.4. Teste de tração

Os compósitos produzidos foram submetidos ao ensaio de tração direta. Os ensaios foram realizados em uma prensa universal SHIMADZU, modelo UH com capacidade máxima de carga de 500 kN, sob taxa de deslocamento de 0,5 mm/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 4 N·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), 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 [37]. Para utilização da técnica, foi necessário criar sobre a superfície do corpo de prova um fundo branco fosco. Em seguida, foram criados com tinta spray pontos pretos foscos espaçados aleatoriamente. A aquisição das imagens para utilização da técnica foi realizada em uma câmera digital Canon modelo EOS Rebel T7 com lente EF-S 18-55 mm, controlada pelo *software digiCamControl*. O *software* foi programado para capturar uma imagem a cada 2 s. Para as análises do CID, foi utilizado o *software* Gom Correlate®, da empresa Zeiss Inspect. A Figura 5 mostra a configuração adotada para a realização do ensaio de tração direta dos compósitos.

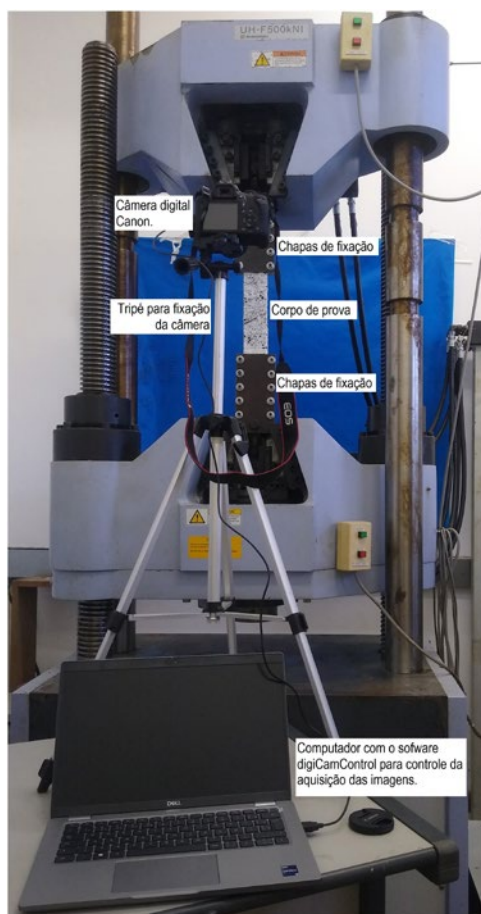


Figura 5: Configuração adotada para realização do ensaio de tração direta e aquisição das imagens com a utilização da técnica CID.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resistência mecânica da matriz geopolimérica

A Tabela 4 apresenta os valores médios da resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral e os desvios-padrão da matriz obtidos em cada idade de ensaio. Os geopolímeros apresentaram ganho de resistência nas primeiras idades. 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 [27]. A mesma tendência de elevado ganho de resistência nas primeiras idades foi observada nas resinas produzidas por SOARES *et al.* [27], 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 [38] 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 4: 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 ($\pm 0,67$)

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.

3.2. Caracterização das fibras

A análise do diâmetro das fibras através de um projetor de perfil resultou em um diâmetro médio de 0,176 mm. Destaca-se que para cada uma das 100 amostras de fibras ensaiadas foi adotado o menor diâmetro para o cálculo da área da seção transversal, visto que o acúmulo de tensão ocorre na região de menor seção transversal. A área média da seção transversal das fibras foi de 0,0264 mm². Os resultados encontrados na análise dimensional das fibras corroboram os resultados encontrados por outros pesquisadores, o que mostra que o método adotado para essa análise foi satisfatório.

O ensaio de tração direta das fibras apresentou uma resistência à tração de 478,6 ± 286 MPa, evidenciando a elevada resistência desse tipo de fibra lignocelulose. A fibra de sisal possui um alto teor de celulose, quando comparadas a outras fibras vegetais, sendo sua alta resistência à tração atribuída a essa característica [13]. O alto valor de resistência à tração é consistente com os dados reportados outros pesquisadores. A Tabela 5 resume as propriedades físicas e mecânicas das fibras ensaiadas e as compara com os dados da literatura.

3.3. Comportamento mecânico dos compósitos

Os compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente em três camadas, nomeados como PE1-F0, PE2-F0 e PE3-F0, apresentaram desempenho de *strain-hardening*, com a formação de múltiplas fissuras ao longo do corpo de prova. A Figura 6a mostra a curva tensão *versus* deformação específica dos compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente. Em compósitos de fibras longas e alinhadas, o trecho inicial é, geralmente, caracterizado pelo comportamento linear-elástico, em que tanto a fibra quanto 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% [22, 42].

A partir da curva tensão *versus* deformação específica é possível observar quatro estágios diferentes de comportamento [42]. 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 com o 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 [23]. 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 6b ilustra os diferentes estágios comportamentais dos compósitos.

Os compósitos com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e 315°, nomeados como PE4-F45 × 315, PE5-F45 × 315 e PE6-F45 × 315, também apresentaram comportamento *strain-hardening*, exceto PE4-F45. 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 com essa configuração de distribuição de fibras exibiram comportamento semelhante aos compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente, com a formação de quatro estágios de comportamento durante o carregamento. No entanto, os compósitos com fibras distribuídas a 45° e 315° apresentaram menor número de fissuras e menor valor de tensão última (σ_u). Esses resultados evidenciam que a configuração de distribuição de 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 7 mostra a curva tensão *versus* deformação específica do compósito PE5-F45 × 315.

Tabela 5: Características das fibras de sisal utilizadas nesta pesquisa e a comparação com os dados da literatura [34, 39–41].

	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)	478,6 ± 286	372 – 484

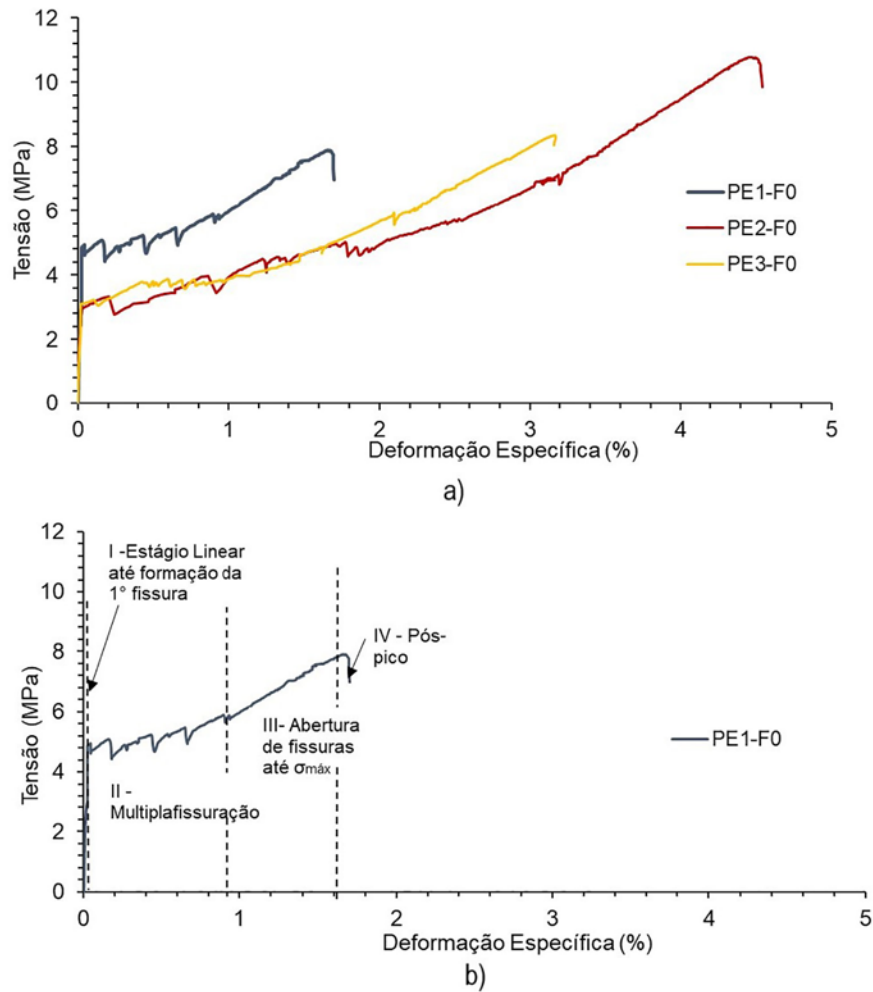


Figura 6: Curvas tensão *versus* deformação específica dos compósitos com fibras distribuídas longitudinalmente: (a) curvas de todos os compósitos; (b) estágios descritos do comportamento *strain-hardening* no corpo de prova PE1-F0.

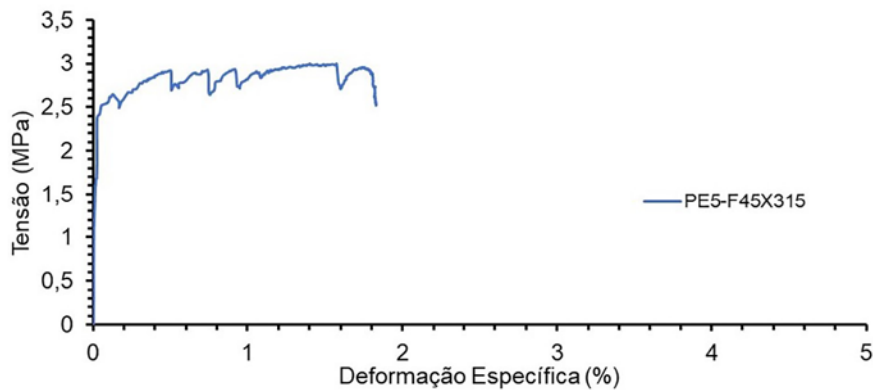
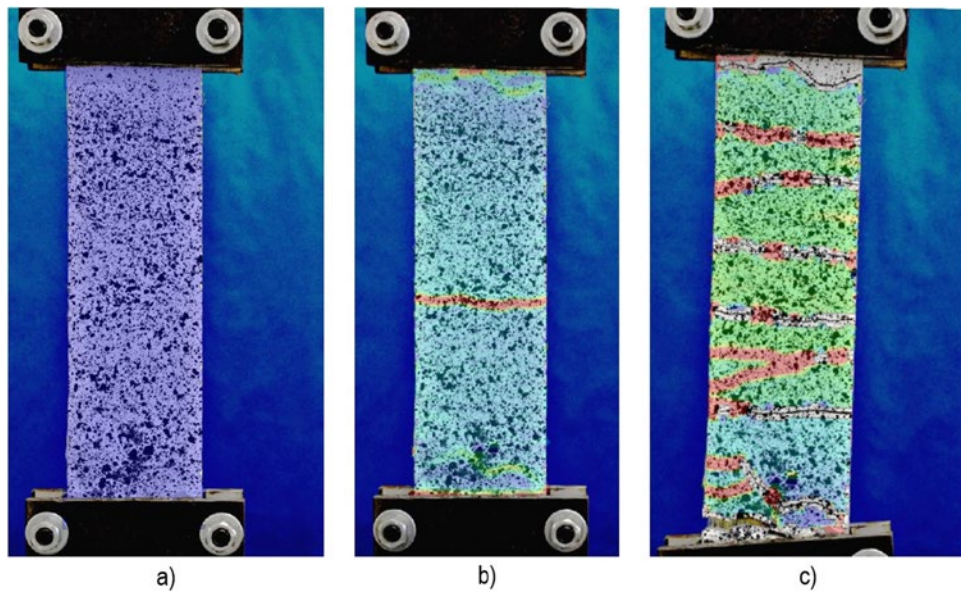


Figura 7: Curvas tensão *versus* deformação específica do compósito com fibras distribuídas em duas direções, a 45° e 315° (PE5-F45x315).

A partir da utilização da técnica CID 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 6 são apresentadas as propriedades mecânicas dos compósitos analisados. A Figura 8 mostra 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 8a), no estágio de surgimento da primeira fissura (Figura 8b) e no estágio final de ruptura (Figura 8c).

Tabela 6: Propriedades mecânicas dos compósitos com 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 FISSURA 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	2,23		0,0002027	8,37		0,0316	9,73	0,33 ($\pm$ 0,062)
PE5-F45x315	5	1,88	2,14 ($\pm$ 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)

 ε_{1f} : deformação correspondente a 1.ª fissura. ε_u : deformação correspondente à tensão última.**Figura 8:** Padrão de fissuras do corpo de prova PE1-F0: (a) estágio inicial; (b) surgimento da 1.ª fissura; (c) ruptura do corpo de prova.

Comparando os dois tipos de compósitos confeccionados, observa-se que os compósitos com fibras distribuídas a 45° e 315° apresentaram menor número de fissuras, porém com maior abertura. Isso mostra que houve elevada concentração de tensões em cada fissura.

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 comparados utilizaram corpos de prova com mesma geometria, porém com diferente número de camadas e frações volumétricas de fibras (Tabela 7).

Tabela 7: 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	sisal	3,0	3	2,56 ($\pm$ 0,24)	9,02 ($\pm$ 1,26)	0,031
TEIXEIRA <i>et al.</i> [22]	cimentícia	sisal	5,0	3	3,90 ($\pm$ 0,6)	12,00 ($\pm$ 1,5)	0,016
TRINDADE <i>et al.</i> [24]	geopolímero	sisal	10,0	5	4,37 ($\pm$ 0,26)	11,53 ($\pm$ 0,46)	0,014
TRINDADE <i>et al.</i> [24]	geopolímero	juta	10,0	5	4,13 ($\pm$ 0,51)	6,31 ($\pm$ 0,78)	0,034
SILVA JUNIOR <i>et al.</i> [23]	cimentícia	sisal	6,0	3	2,4 ($\pm$ 1,5)	10,2 ($\pm$ 2,1)	0,014

 V_f : Fração volumétrica de fibras.

Nos compósitos produzidos por TEIXEIRA *et al.* [22] foram utilizadas três camadas de fibras de sisal com fração volumétrica de 5% em uma matriz cimentícia, que alcançou 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.* [24] 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_{lf} 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 *et al.* [23] 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_{lf}) 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, 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.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o comportamento mecânico à tração de compósitos de matriz geopolimérica, que utilizou como material precursor o metacaulim, reforçado com fibras de sisal distribuídas de forma contínua e alinhada, e avaliou a deformação e a fissuração dos compósitos através da técnica CID. Da caracterização mecânica da matriz e das fibras, bem como do ensaio à tração dos compósitos pode-se concluir:

A matriz geopolimérica apresenta elevada resistência à compressão nas primeiras idades, demonstrando seu potencial de utilização em aplicações que essa característica é fundamental, como no caso de reparo e reforço de estruturas.

As fibras de sisal apresentaram valores de diâmetro e área próximos aos encontrados na literatura, mostrando que o método adotado para análise foi satisfatório.

Os compósitos geopoliméricos reforçados com fibras de sisal apresentaram comportamento *strain-hardening* com a formação de múltiplas fissuras. Por meio do ensaio de tração direta 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 resultados encontrados foram compatíveis com outros estudos presentes na literatura que utilizaram fibras naturais, ainda que o presente estudo tivesse menor fração volumétrica de fibras, apenas 3%.

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.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e a FAPERJ pelo apoio financeiro no desenvolvimento desta pesquisa, e pelo fomento da bolsa de estudos.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] DAVIDOVITS, J., *Geopolymer: chemistry & applications*, 5th ed, Saint-Quentin, Institut Géopolymère, 2020.
- [2] ALANEME, G.U., OLONADE, K.A., ESENOGHO, E., “Eco-friendly agro-waste based geopolymer-concrete: a systematic review”, *Discover Materials*, v. 3, n. 1, pp. 14, Jun. 2023. doi: <http://doi.org/10.1007/s43939-023-00052-8>.

- [3] DUXSON, P., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PROVIS, J.L., *et al.*, “Geopolymer technology: the current state of the art”, *Journal of Materials Science*, v. 42, n. 9, pp. 2917–2933, May. 2007. doi: <http://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>.
- [4] SRIVIDYA, T., KANNAN RAJKUMAR P.R., SIVASAKTHI, M., SUJITHA, A., JEYALAKSHMI, R., “A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications”, *Case Studies in Construction Materials*, v. 16, pp. e00812, 2022. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00812>.
- [5] DAVIDOVITS, J., “Geopolymers: inorganic polymeric new materials”, *Journal of Thermal Analysis*, v. 37, n. 8, pp. 1633–1656, 1991. doi: <http://doi.org/10.1007/BF01912193>.
- [6] CHEN, S., ZHANG, Y., YAN, D., *et al.*, “The influence of Si/Al ratio on sulfate durability of metakaolin-based geopolymer”, *Construction & Building Materials*, v. 265, pp. 120735, Dec. 2020. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120735>.
- [7] KIM, G., CHO, S., IM, S., *et al.*, “Impact of interatomic structural characteristics of aluminosilicate hydrate on the mechanical properties of metakaolin-based geopolymer”, *Construction & Building Materials*, v. 411, pp. 134529, Jan. 2024. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134529>.
- [8] MOHAMMAD, S.H., SHAKOR, P., MUHAMMAD, J.H., *et al.*, “Sustainable alternatives to cement: synthesizing metakaolin-based geopolymer concrete using nano-silica”, *Construction Materials*, v. 3, n. 3, pp. 276–286, Jul. 2023. doi: <http://doi.org/10.3390/constrmater3030018>.
- [9] ZHANG, B., LIU, Y., PAN, Z., *et al.*, “The microstructure and mechanical properties of recycled metakaolinite-based geopolymer: Dependence of recycled powder replacement ratio”, *Journal of Building Engineering*, v. 85, pp. 108730, May. 2024. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108730>.
- [10] CASTILLO, H., COLLADO, H., DROGUETT, T., *et al.*, “State of the art of geopolymers: a review”, *E-Polymers*, v. 22, n. 1, pp. 108–124, 2022. doi: <http://doi.org/10.1515/epoly-2022-0015>.
- [11] ZHANG, F., ZHANG, L., LIU, M., *et al.*, “Role of alkali cation in compressive strength of metakaolin based geopolymers”, *Ceramics International*, v. 43, n. 4, pp. 3811–3817, Mar. 2017. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.034>.
- [12] SILVA, G., KIM, S., AGUILAR, R., *et al.*, “Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers - A review of potential eco-friendly applications to the construction industry”, *Sustainable Materials and Technologies*, v. 23, pp. e00132, Apr. 2020. doi: <http://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00132>.
- [13] MAHMOOD, A., NOMAN, M.T., PECHOČIAKOVÁ, M., *et al.*, “Geopolymers and fiber-reinforced concrete composites in civil engineering”, *Polymers*, v. 13, n. 13, pp. 2099, Jun. 2021. doi: <http://doi.org/10.3390/polym13132099>. PubMed PMID: 34202211.
- [14] BENTUR, A., MINDESS, S., *Fibre reinforced cementitious composites*, 2nd ed, London, New York, Taylor & Francis, 2007.
- [15] BAZAN, P., KOZUB, B., ŁACH, M., *et al.*, “Evaluation of hybrid melamine and steel fiber reinforced geopolymers composites”, *Materials (Basel)*, v. 13, n. 23, pp. 5548, Dec. 2020. doi: <http://doi.org/10.3390/ma13235548>. PubMed PMID: 33291368.
- [16] SHANG, X., WANG, S., GONG, B., *et al.*, “Improved carbon fibers dispersion in geopolymer composites”, *Case Studies in Construction Materials*, v. 21, pp. e03480, Dec. 2024. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03480>.
- [17] ZHANG, D., ZHANG, S., WANG, Y., *et al.*, “High-temperature behaviour of geopolymer composites containing carbon fibre and nano-silica: Mechanical, microstructure, and air-void characteristics”, *Construction & Building Materials*, v. 451, pp. 138690, Nov. 2024. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138690>.
- [18] SIKDER, A., MISHRA, J., KRISHNA, R.S., *et al.*, “Evaluation of the mechanical and durability properties of geopolymer concrete prepared with C-Glass fibers”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 48, n. 10, pp. 12759–12774, Oct. 2023. doi: <http://doi.org/10.1007/s13369-022-07558-y>.
- [19] FARHAN, K.Z., JOHARI, M.A.M., DEMIRBOĞA, R., *et al.*, “Performance of polypropylene fiber reinforced GGBFS-based alkali activated composite under elevated temperatures”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 21, n. 7, pp. 523–535, Jul. 2023. doi: <http://doi.org/10.3151/jact.21.523>.
- [20] CAI, J., JIANG, J., GAO, X., *et al.*, “Improving the mechanical properties of fly ash-based geopolymer composites with PVA fiber and powder”, *Materials (Basel)*, v. 15, n. 7, pp. 2363, Mar. 2022. doi: <http://doi.org/10.3390/ma15072363>. PubMed PMID: 35407696.

- [21] WU, H., SHEN, A., CHENG, Q., *et al.*, “A review of recent developments in application of plant fibers as reinforcements in concrete”, *Journal of Cleaner Production*, v. 419, pp. 138265, Sep. 2023. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138265>.
- [22] TEIXEIRA, F.P., SOUZA, F.R.D., LIMA, V.N., *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)*, v. 27, n. 4, pp. e20220181, 2022. doi: <http://doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0181>.
- [23] SILVA JUNIOR, I.B., DE SOUZA, L.M.S., SILVA, F.D.A., “Creep of pre-cracked sisal fiber reinforced cement based composites”, *Construction & Building Materials*, v. 293, pp. 123511, Jul. 2021. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123511>.
- [24] TRINDADE, A.C.C., ARÊAS, I.O.M., ALMEIDA, D.C.T., *et al.*, “Mechanical behavior of geopolymeric composites reinforced with natural fibers”, *Strain-Hardening Cement-Based Composites*, v. 15, pp. 383–391, 2018. doi: http://doi.org/10.1007/978-94-024-1194-2_45.
- [25] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., *Concrete: microstructure, properties, and materials*, 3rd ed, New York, McGraw-Hill, 2006.
- [26] GUERRA, C.K., LOPES, L.P.R., “Mechanical behavior and eco-efficiency of sisal fiber reinforced cement composites containing husk rice ash”, *Magazine of Civil Engineering*, v. 17, n. 3, pp. 12702, 2024.
- [27] SOARES, J.C., DIAS, D.P., DE CARVALHO, E.A., *et al.*, “Determination of shear strength by Iosipescu (V-notch) method of metakaolin-based geopolymeric resins activated by different silicate and hydroxide combinations”, *Construction & Building Materials*, v. 275, pp. 122120, Mar. 2021. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122120>.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação*, Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- [29] YAN, L., KASAL, B., HUANG, L., “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*, v. 92, pp. 94–132, May. 2016. doi: <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>.
- [30] AZWA, Z.N., YOUSIF, B.F., MANALO, A.C., *et al.*, “A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres”, *Materials & Design*, v. 47, pp. 424–442, May. 2013. doi: <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025>.
- [31] SENTHILKUMAR, K., SABA, N., RAJINI, N., *et al.*, “Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review”, *Construction & Building Materials*, v. 174, pp. 713–729, Jun. 2018. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.143>.
- [32] NEVES, A.C.C., ROHEN, L.A., MANTOVANI, D.P., *et al.*, “Comparative mechanical properties between biocomposites of Epoxy and polyester matrices reinforced by hemp fiber”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 2, pp. 1296–1304, Mar. 2020. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.056>.
- [33] SILVA, T.T., SILVEIRA, P.H.P.M., RIBEIRO, M.P., *et al.*, “Thermal and chemical characterization of kenaf fiber (*Hibiscus cannabinus*) reinforced epoxy matrix composites”, *Polymers*, v. 13, n. 12, pp. 2016, Jun. 2021. doi: <http://doi.org/10.3390/polym13122016>. PMID:34203077.
- [34] CASTOLDI, R.S., SOUZA, L.M.S., SILVA, F.A., “Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fiber reinforced concretes”, *Construction & Building Materials*, v. 211, pp. 617–628, Jun. 2019. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.282>.
- [35] TEIXEIRA, F.P., CARDOSO, D.C.T., SILVA, F.D.A., “On the shear behavior of natural curauá fabric reinforced cement-based composite systems”, *Engineering Structures*, v. 246, pp. 113054, Nov. 2021. doi: <http://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113054>.
- [36] ROCHA, T.S., DIAS, D.P., FRANÇA, F.C.C., *et al.*, “Metakaolin-based geopolymer mortars with different alkaline activators (Na + and K +)”, *Construction & Building Materials*, v. 178, pp. 453–461, Jul. 2018. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.172>.
- [37] PAN, B., QIAN, K., XIE, H., *et al.*, “Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review”, *Measurement Science & Technology*, v. 20, n. 6, pp. 062001, Jun. 2009. doi: <http://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>.
- [38] MEHTA, A., SIDDIQUE, R., “Strength, permeability and micro-structural characteristics of low-calcium fly ash based geopolymers”, *Construction & Building Materials*, v. 141, pp. 325–334, Jun. 2017. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.031>.

- [39] ALVES FIDELIS, M.E., PEREIRA, T.V.C., GOMES, O., *et al.*, “The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 2, n. 2, pp. 149–157, Apr. 2013. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>.
- [40] FERNANDES, E.M., MANO, J.F., REIS, R.L., “Hybrid cork-polymer composites containing sisal fibre: Morphology, effect of the fibre treatment on the mechanical properties and tensile failure prediction”, *Composite Structures*, v. 105, pp. 153–162, Nov. 2013. doi: <http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.05.012>.
- [41] FERREIRA, S.R., PEPE, M., MARTINELLI, E., *et al.*, “Influence of natural fibers characteristics on the interface mechanics with cement based matrices”, *Composites. Part B, Engineering*, v. 140, pp. 183–196, May. 2018. doi: <http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.016>.
- [42] SILVA, F.A., MOBASHER, B., TOLEDO FILHO, R.D.T., “Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites”, *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 10, pp. 721–730, Nov. 2009. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004>.