

DESENVOLVIMENTO DE ROCHA ARTIFICIAL UTILIZANDO RESÍDUO DE QUARTZITO E PORCELANATO REFORÇADO COM FIBRA NATURAL DE FIQUE

DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL ROCK USING QUARTZITE AND PORCELAIN WASTE REINFORCED WITH NATURAL FIQUE FIBER

DESARROLLO DE ROCA ARTIFICIAL UTILIZANDO RESIDUOS DE CUARCITA Y PORCELANA REFORZADA CON FIBRA NATURAL

 <https://doi.org/10.56238/arev7n11-041>

Data de submissão: 06/10/2025

Data de publicação: 06/11/2025

Guilherme de Souza Reis

Mestrando em Engenharia e Ciência dos Materiais

Instituição: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/3990059944496283>

Elaine Aparecida Santos Carvalho Costa

Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais

Instituição: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2265929820644777>

Marcelo Barcellos Reis

Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais

Instituição: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8155043609225714>

Afonso Rangel Garcez de Azevedo

Doutor em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5332016516191423>

Carlos Maurício Fontes Vieira

Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais

Instituição: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6309884585355966>

RESUMO

O Brasil é um dos principais países na produção e exportação de rochas ornamentais, ocupando a quinta posição no ranking mundial desse setor, o que embora cause um impacto positivo na economia apresenta um impacto negativo ao meio ambiente, devido a grande quantidade de resíduos sólidos provenientes da produção. O intuito desta pesquisa é desenvolver rochas artificiais sustentáveis utilizando resíduos provenientes da etapa de fabricação de rochas ornamentais naturais e usar a fibra natural de fique como reforço para essas rochas em alternativa as usuais fibras sintéticas de vidro. O resíduo aplicado para conformação da matriz da rocha foi proveniente da etapa de lapidação de porcelanatos e resíduos de quartzitos, que foram aplicados conjunto com a resina epóxi para a formação da rocha artificial, além de avaliar a viabilidade da utilização da malha da fibra natural de fique como opção sustentável para reforço de rochas. A rocha artificial foi produzida através de quatro

composições selecionadas através da densidade vibrada das partículas, foi adotado o método de vibração, compreensão e vácuo, com pressão de 600 mm/Hg para o vácuo, passando por um processo de vibração a 60 Hz por dois minutos e sendo compactada a quente a 90°C por 20 minutos a uma pressão de 10 MPa. Foram produzidas as rochas de composição granulométrica 2,5,7 e 8 com 18% de resina em relação a massa de resíduos utilizados, com as rochas da composição 7 e 8 sendo selecionadas para a etapa de adição da malha da fibra de fique, devido as melhores propriedades físicas e mecânicas apresentadas. A adição da malha da fibra de fique ocorreu por dois meios diferentes, por prensagem na etapa de compactação e por laminação das rochas. Os ensaios de flexão e impacto das rochas revelou uma melhoria nas propriedades mecânicas após a adição das fibras, com destaque na adição da fibra por laminação.

Palavras-chave: Rochas Artificiais. Fibra Natural. Fique.

ABSTRACT

Brazil is one of the leading countries in the production and export of ornamental stones, ranking fifth in the world in this sector. While this has a positive impact on the economy, it also has a negative impact on the environment due to the large amount of solid waste generated during production. The aim of this research is to develop sustainable artificial rocks using waste from the manufacturing process of natural ornamental stones and to use natural fique fiber as reinforcement for these rocks, as an alternative to the usual synthetic glass fibers. The waste applied to form the rock matrix came from the polishing stage of porcelain tiles and quartzite waste, which were applied together with epoxy resin to form the artificial rock. The research also evaluated the feasibility of using natural fique fiber mesh as a sustainable option for rock reinforcement. The artificial rock was produced using four compositions selected based on the vibrated density of the particles. The vibration, compression, and vacuum method was adopted, with a vacuum pressure of 600 mm/Hg, followed by a vibration process at 60 Hz for two minutes and hot compaction at 90°C for 20 minutes at a pressure of 10 MPa. Rocks of granulometric compositions 2, 5, 7, and 8 were produced with 18% resin relative to the mass of waste used, with compositions 7 and 8 being selected for the addition of the fique fiber mesh due to their better physical and mechanical properties. The addition of the fique fiber mesh occurred through two different methods: pressing during the compaction stage and lamination of the rocks. Flexural and impact tests of the rocks revealed an improvement in mechanical properties after the addition of the fibers, with particular emphasis on the addition of the fiber by lamination.

Keywords: Artificial Rocks. Natural Fiber. Fique.

RESUMEN

Brasil es uno de los países líderes en la producción y exportación de rocas ornamentales, ocupando el quinto lugar a nivel mundial en este sector. Si bien esto tiene un impacto positivo en la economía, también tiene un impacto negativo en el medio ambiente debido a la gran cantidad de residuos sólidos generados en su producción. El objetivo de esta investigación es desarrollar rocas artificiales sostenibles utilizando residuos del proceso de fabricación de rocas ornamentales naturales y utilizar fibra natural de fique como refuerzo para estas rocas, como alternativa a las fibras de vidrio sintéticas habituales. El residuo utilizado para formar la matriz de la roca provino del proceso de corte de baldosas de porcelana y residuos de cuarcita, que se aplicaron junto con resina epoxi para formar la roca artificial. El proyecto también busca evaluar la viabilidad del uso de malla de fibra natural de fique como una opción sostenible para el refuerzo de rocas. La roca artificial se produjo utilizando cuatro composiciones seleccionadas en función de la densidad vibrada de las partículas. Se utilizó el método de vibración, compresión y vacío, con una presión de vacío de 600 mm/Hg. La roca se sometió a un proceso de vibración a 60 Hz durante dos minutos y se compactó en caliente a 90 °C durante 20

minutos a una presión de 10 MPa. Se produjeron rocas con composiciones granulométricas de 2, 5, 7 y 8 con un 18 % de resina en relación con la masa de residuo utilizado. Se seleccionaron rocas con composiciones 7 y 8 para la adición de la malla de fibra de fique debido a sus mejores propiedades físicas y mecánicas. La malla de fibra de fique se añadió mediante dos métodos diferentes: prensado durante la etapa de compactación y laminado. Las pruebas de flexión e impacto realizadas en las rocas revelaron una mejora en las propiedades mecánicas tras la adición de las fibras, especialmente mediante laminado.

Palabras clave: Rocas Artificiales. Fibra Natural. Fique.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos principais países na produção e exportação de rochas ornamentais, segundo a ABIROCHAS (2025) o país ocupa a quinta posição entre os maiores produtores mundiais desse setor. A associação brasileira de rochas informa que no primeiro trimestre de 2025 as exportações de rochas ornamentais somaram um total de US\$ 353,8 milhões e 521,1 mil toneladas. Embora esses valores causem um impacto positivo na economia eles apresentam um impacto negativo ao meio ambiente, devido a grande quantidade de resíduos sólidos provenientes da produção.

A indústria de rochas ornamentais tem como um dos principais aspectos o elevado volume de produção, o que exige uma intensa extração de materiais rochosos em jazidas. Além disso, todas as etapas necessárias para alcançar o padrão comercial das rochas produzem igualmente grandes volumes de resíduos de diversos tipos (BONDUA *et al.* 2024).

Uma alternativa para a redução dos resíduos oriundos da produção de rochas ornamentais é a fabricação de rochas artificiais sustentáveis. Rochas artificiais são produzidas a partir de altos teores de partículas sólidas, aproximadamente 85% de resíduos sólidos, que comumente são descartados pelo setor industrial, as partículas podem ser aglomeradas por dois tipos de matrizes, as poliméricas e cimentícias, e podem ser classificadas em três tipos: mármore composto, superfície cristalizada de vidro e superfície de quartzo (SILVA *et al.* 2018).

A utilização de rochas artificiais geralmente apresenta uma série de vantagens em relação as rochas ornamentais naturais, com destaque para as rochas de matriz polimérica, que normalmente apresentam densidade inferior em relação as rochas naturais e menor quantidade de poros, o que resulta em um melhor desempenho do material, evitando a formação de trincas e reduzindo a absorção de água do material (GOMES *et al.* 2022).

Com o objetivo de reduzir a fragilidade apresentada por rochas ornamentais comumente é realizado a aplicação de uma malha de fibras de vidro na parte inferior da rocha, visando a otimização das propriedades mecânicas das rochas (SILVEIRA, 2015).

As fibras de vidro são utilizadas para a laminação de rochas artificiais devido as suas propriedades mecânicas e baixo custo ao ser comparada com outras fibras sintéticas como as fibras de carbono e poliaramida. Porém, ao ser comparado com fibras naturais, a fibra de vidro apresenta a desvantagem ecológica, devido a geração de gases poluentes em sua produção, como o dióxido de carbono, que se apresenta nulo na fabricação de fibras naturais (WANBUA *et al.* 2003).

A substituição da fibra de vidro pela fibra de fique como material de reforço na laminação de rochas artificiais pode reduzir significativamente a geração de resíduos descartados no meio ambiente, tornando a iniciativa mais sustentável. Além disso, ao considerar o aspecto socioeconômico, o uso da

fibra de fique apresenta menor custo de obtenção e ainda contribui para agregar valor econômico ao produto conformado (LOPES *et al.* 2021).

A fibra de fique está sendo amplamente estudada para aprimoramento de desempenho em materiais compósitos. A pesquisa de AVILA *et al.* (2025) apresenta a fibra de fique como um excelente reforço em compósitos balísticos, reduzindo drasticamente a energia residual do projétil após o impacto.

A aplicação de materiais menos prejudiciais ao meio ambiente, assim como a utilização e o reaproveitamento de resíduos, representa uma alternativa viável para promover um modelo de trabalho mais sustentável e com menor impacto ambiental (GOMES e MENDES, 2023).

O objetivo dessa pesquisa é o desenvolvimento e análise de rochas artificiais sustentáveis utilizando resíduos de quartzito e porcelanato em matriz de resina epóxi, e posteriormente a adição da fibra natural de fique como reforço. Possibilitando assim observar o comportamento mecânico das rochas em três condições diferentes:

- Rocha artificial sem a adição da fibra de fique;
- Rocha artificial com adição da fibra de fique por laminação;
- Rocha artificial com adição da fibra de fique por prensagem.

2 METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

- Resíduo de porcelanato;
- Resíduo de quartzito;
- Resina epóxi;
- Fibra de fique.

O resíduo de porcelanato utilizado é originário do processo de lapidação do porcelanato, realizado por uma indústria de revestimento cerâmico. O resíduo foi coletado, marretado e submetido ao moinho de bolas, até que atingisse a granulometria fina. O resíduo de quartzito foi ofertado pela empresa EcologicStone, localizada em Cachoeiro de Itapemirim, Espírito Santo, parceira da universidade, nas granulometrias grossa e média.

A carga de resíduo foi classificada entre as peneiras de 10 e 200 mesh, dividindo-se em três faixas granulometrias diferentes: grossa, média e fina como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação granulométrica.

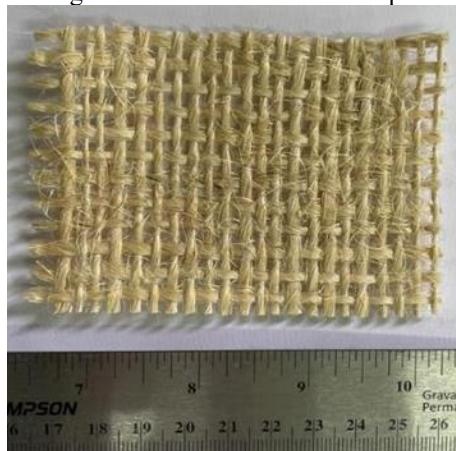
Classe	Faixa Granulométrica (mm)
Grosso	2,000 – 0,710
Médio	0,125 – 0,045
Fino	<0,045

Fonte: ABNT NBR 7181, 2016

Foi utilizado a epóxi de nome comercial MC 130, uma resina do tipo diglicidil éter de bisfenol A (DEGEBA), de densidade de 1,15 g/cm³ em conjunto com o endurecedor FD 129, trietilenotetramina (TETA), ambos adquiridos pelo fabricante EPOXYFIBER S/A, foi utilizado uma razão de 10% do endurecedor em relação ao peso da resina, conforme sugerido pelo fabricante. A resina foi utilizada para a confecção das placas de rocha artificial e na laminação da fibra na parte inferior das rochas.

Adotou-se a fibra de fique como agente de reforço para a rocha desenvolvida artificialmente. A fibra foi utilizada em forma de malha entrecruzada, com abertura de 3 mm, sendo disponibilizada pela Universidade de Antioquia, Medellín, Colômbia. A malha utilizada é apresentada na figura 1.

Figura 1: Malha de Fibra de Fique



Fonte: Autores.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE FIQUE

Para a realização caracterização da fibra natural de fique foram realizados os seguintes ensaios:

- Diâmetro médio;
- Resistência a tração;
- Índices físicos;
- Análise termogravimétrica;
- Análise microestrutural.

A determinação do diâmetro médio das fibras foi dada a partir da metodologia de projeção de luz. Utilizou-se um projetor de perfil modelo PJ3150 Pantec com capacidade de ampliação de até 10 vezes. Realizou-se 5 medidas ao longo do comprimento de cada exemplar da fibra e em seguida, cada exemplar foi rotacionada em 90° para outras 5 medidas para cada tipo de fibra. Foram utilizados 40 exemplares no total. Sendo realizada a média aritmética para obtenção do diâmetro médio das fibras.

Para a determinação das propriedades mecânicas das fibras de fique foram confeccionados corpos de prova para ensaios de tração baseados nas recomendações da norma ASTM D 3822 (2007), que aborda sobre a determinação de propriedades mecânicas sob esforço de tração para fibras têxteis, uma vez que para o ensaio à tração em fibras vegetais ainda não é normalizado, sendo assim, a influência do comprimento da fibra precisa ser levada em consideração. Para o teste de tração, realizou-se a colagem de uma proteção nas extremidades da fibra, para fixação da fibra nas garras da máquina universal de ensaios mecânicos INSTRON, modelo 5582, com velocidade de ensaio de 2 milímetros por minuto.

Para a determinação das propriedades físicas, uma pequena quantidade da fibra foi saturada em água e sequentemente submersa em uma proveta com água destilada, o volume do líquido deslocado foi utilizada para se obter a densidade do material. Após a imersão as fibras foram secas em estufa a 105°C por 24 horas para a obtenção da massa seca da fibra.

A densidade básica do material foi calculada utilizando-se a equação 1:

$$D = \frac{M_{sec}}{V_{sat}} \quad (1)$$

A absorção de água foi determinada através da equação 2:

$$A_a = \left(\frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Sendo: D = densidade básica (g/cm^3), M_{sec} = massa seca (g), M_{sat} = massa saturada (g), V_{sat} = volume saturado (cm^3).

Para a análise termogravimétrica da fibra foi utilizado o equipamento TGA-SDT650 TA Instruments, onde a fibra foi submetida ao ensaio em duas condições diferentes, utilizando a fibra com a adição da resina e sem a adição. O ensaio correu em uma faixa de temperatura de 30°C a 800°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto, a atmosfera utilizada no ensaio foi de ar, com um fluxo de 100 mililitros por minuto.

Buscou-se com auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) observar características microestruturais das fibras e analisar a superfície de fratura após o ensaio de tração. Para as análises utilizou-se o microscópio SuperScan SSX- 550 da SHIMADZU. Foi utilizada uma aceleração de 20kV de elétrons secundários e realizada uma metalização com ouro na superfície das amostras.

2.3 EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS

Com o objetivo de se encontrar um perfil granulométrico da amostra visando a otimização de empacotamento de suas partículas e ainda determinar as principais faixas de tamanho de grãos ideais dos resíduos para se trabalhar experimentalmente na confecção da rocha artificial proposta. Foram utilizadas três faixas granulométricas (grosso, médio, fino), que posteriores foram submetidas 10 misturas de partículas de composições diferentes, para isso sendo usado o diagrama ternário de modelo cúbico completo, desenvolvido baseado no Modelo de modelagem numérica Simplex-Lattice Design (SLD).

Para determinar o empacotamento as misturas foram transferidas para um recipiente de volume conhecido. Um peso de 10 Kg foi posicionado sobre a mistura de partículas e o sistema vibrado em um vibrador de peneiras, da marca Produtest, com frequência de 60 Hz por 10 minutos. No fim da vibração, realizou-se a pesagem da mistura e determinou-se a densidade vibrada. Esse procedimento foi repetido três vezes para cada mistura do resíduo.

Utilizando o Microsoft Excel, foram realizados tratamentos estatísticos sobre os resultados do teste da densidade vibrada, utilizando análise de variância (ANOVA) do delineamento inteiramente casualizado (CRD) ($p \leq 0,05$), para confirmar a significância estatística dos dados obtidos. Após validação da diferença estatística, foi aplicado o teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para corroborar a mistura que obteve os melhores resultados, escolhida para produzir as placas de rocha artificial.

Buscando determinar o teor mínimo de resina (TRM) a ser adotado na produção da rocha artificial, utilizou-se o cálculo do volume vazio (VV) um percentual da razão entre a densidade aparente a seco das partículas e a densidade do material, como apresentado na equação 3 (RIBEIRO e RODRIGUEZ, 2015).

$$VV\% = \left(1 - \frac{\rho_{PA}}{\rho_R}\right) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

VV% = Volume vazio presente na mistura de partículas;

ρ_{Pa} = Densidade aparente das partículas, calculada pelo método de empacotamento;

ρ_R = Densidade de resíduo, calculada por picnometria;

A partir da obtenção do valor do volume vazio (VV%) foi possível calcular o teor mínimo de resina (TMR), através da Equação 4 abaixo:

$$TRM\% = \frac{VV\% \times \rho_{resina}}{VV\% \times \rho_{resina} + (100 - VV\%) \times \rho_R} \quad (4)$$

Onde:

TMR% = Teor mínimo de resina para preencher o volume de vazio;

VV% = Volume de vazios presentes na mistura de partículas;

ρ_{resina} = densidade da resina epóxi;

ρ_R = Densidade do resíduo, calculada por picnometria.

Desta forma, o valor que é obtido representa ao menor teor de resina (%) que deve ser utilizado para preencher de forma efetiva o volume vazio das partículas.

2.4 PRODUÇÃO DAS PLACAS DE ROCHAS ARTIFICIAIS

As placas de rochas artificiais foram produzidas nas dimensões 100x100x10mm, pelo método de vibração, compressão e vácuo. As rochas artificiais conformadas foram denominadas de RAPQ (rocha artificial de porcelanato e quartzito). As placas conformadas foram a de maior empacotamento obtido pelo modelo LSD utilizando 18% de resina para o preenchimento dos vazios presentes na rocha. O equipamento que foi utilizado para confecção das placas foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa de rochas artificiais do LAMAV/UENF.

Primeiro as partículas de porcelanato e quartzito, foram secas em estufa a 100°C por 24 horas a fim de retirar toda umidade dos materiais. O resíduo foi pesado, sendo utilizado em proporção de 82/18 em relação a massa de resíduo para a massa da resina. O particulado foi adicionado dentro do misturador e adicionada a resina a fim de completar toda mistura. Aguardou-se até que toda a massa estivesse homogeneizada e tampou o misturador com o molde metálico, o qual foi ligado a um sistema de vácuo.

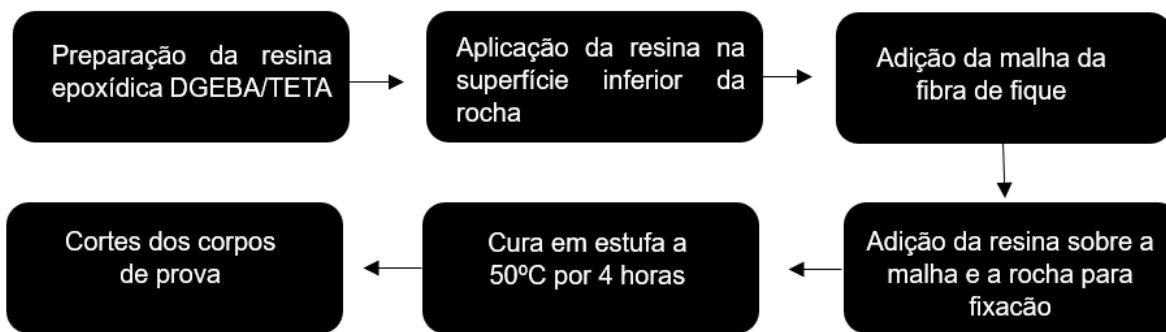
Já sob vácuo, o molde foi posto sobre uma mesa vibratória, da marca Produtest, por um tempo de 2 minutos para promover o espalhamento da massa na cavidade do molde e facilitar a retirada de bolhas de ar existentes na massa.

Passado o tempo de vibração, posicionou-se o molde ainda sob vácuo na prensa hidráulica, onde realizou-se a compactação das placas de rocha artificial com pressão de compactação de 10 toneladas durante 20 minutos e mantendo a placa aquecida a uma temperatura de 90°C durante a compactação (PERIN *et al.* 2023).

2.5 ADIÇÃO DA FIBRA NATURAL DE FIQUE NAS ROCHAS ARTIFICIAIS

Parte das placas de quartzito e porcelanato produzidas passaram pelo processo de lamination. Para uma adesão mais satisfatória entre a malha e a superfície da rocha, o processo foi realizado em etapas de acordo com a figura 2. A malha de fibra de fique foi posta sobre as placas e após isso adicionou-se uma camada de resina epóxi até que fosse possível cobrir a superfície da malha. A fim de eliminar bolhas que pudessem surgir durante a etapa de lamination utilizou-se um rolo para promover um espalhamento da resina, a fim de gerar uma camada homogênea.

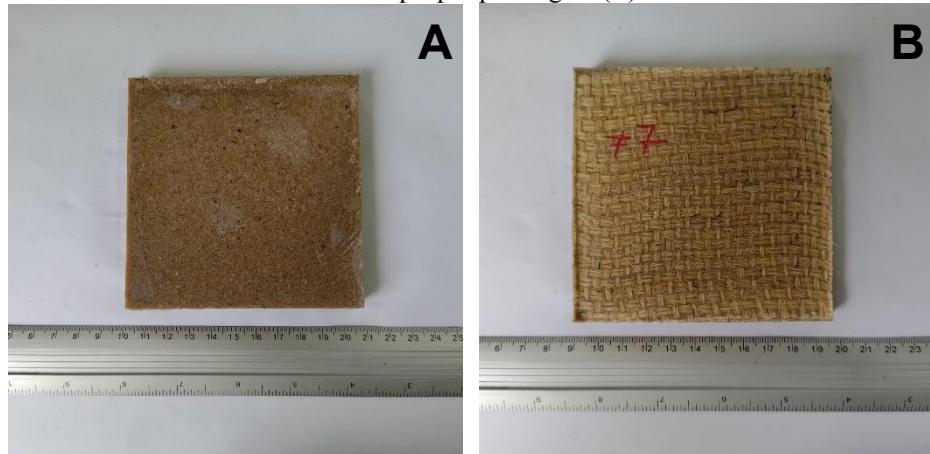
Figura 2: Fluxograma do processo de lamination.



Fonte: Autores.

Para a adição da fibra por prensagem na rocha, no processo de conformação da rocha a fibra foi adicionada ao molde posterior a etapa de mistura e antes da etapa de prensagem, gerando a rocha artificial apresentada na figura 3.

Figura 3: Placa da rocha artificial produzida com resíduo de quartzito e pó de porcelanato (A), rocha com adição da fibra de fique por prensagem (B).



Fonte: Autores.

2.6 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE ROCHAS ARTIFICIAIS

Para a realização caracterização das rochas artificiais foram realizados os seguintes ensaios:

- Índices físicos
- Resistência à flexão
- Resistencia ao impacto Izod
- Análise termogravimétrica
- Análise microestrutural

De acordo com as diretrizes da norma ABNT NBR 15845-2 (2015), determinou-se os valores de densidade, absorção de água e porosidade, constituindo os Índices Físicos das rochas, sendo propriedades altamente relevantes para determinar a aplicação como materiais de revestimento. Utilizou-se para o ensaio 10 corpos de prova com dimensões de 50x50x10 mm.

Para realizar o ensaio de flexão utilizou-se as diretrizes expostas na norma NBR15845-7 (2015) utilizando 7 corpos de prova de dimensões 100x25x10 e 0,25mm/min de velocidade de ensaio, o ensaio de impacto Izod ocorreu seguindo a norma ASTM D256 (2018), foram examinados 10 corpos de prova medindo 62 x 12 x 10mm e utilizando um martelo de 22J. Um entalhe de 2 mm a 45° foi feito na região central de uma das faces dos corpos de prova.

A análise termogravimétrica foi realizada em uma faixa de temperatura de 30°C a 1000°C com uma taxa de aquecimento de 10°C/min, utilizando um fluxo de ar de 100ml/min durante todo o teste.

A avaliação microestrutural da região de fratura dos ensaios de flexão e impacto com o intuito de se observar a adesão das partículas na rocha e interface entre a fibra e rocha, foram realizadas no

microscópio SuperScan SSX-550 da SHIMADZU, utilizando metalização com ouro na superfície das amostras.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PRODUÇÃO DAS PLACAS DE ROCHAS ARTIFICIAIS

A tabela 2 apresenta a média dos valores obtidos pelo método SLD para a densidade vibrada dos resíduos. Nesta tabela, destacam-se os valores de densidade vibrada para cada composição proposta pelo modelo simplex, utilizando pó de porcelanato (granulometria fina) e quartzito (granulometria média e grossa).

Tabela 2 – Densidade vibrada dos resíduos de quartzito e porcelanato.

Mistura	Densidade média vibrada (g/cm ³)
1	0,72 ± 0,03
2	1,75 ± 0,01
3	1,56 ± 0,01
4	1,41 ± 0,04
5	1,86 ± 0,04
6	1,43 ± 0,05
7	1,76 ± 0,01
8	1,75 ± 0,06
9	1,26 ± 0,01
10	1,74 ± 0,05

Fonte: Autores.

Foi realizado o tratamento dos dados por análise de variância considerando o delineamento inteiramente casualizado (CRD) realizado com 95% de nível de confiança ($p \leq 0,05$), com posterior contraste de médias pelo teste de Tukey.

A tabela 3 apresenta a ANOVA para o parâmetro densidades vibradas, enquanto a tabela 4 apresenta o teste de Tukey para o mesmo parâmetro, para a ANOVA foram utilizadas 3 repetições para cada uma das 10 misturas.

Tabela 3 – ANOVA para DIC de densidade vibrada ($p \leq 0,05$).

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	9,0000	3,1593	0,3510	212,7455
Resíduo	20,0000	0,0330	0,0017	-
Total	29,0000	3,1923	-	-
Conclusão: F calculado > F tabelado, existe diferença estatística. F tabelado = 2,39				

Fonte: Autores.

Analizando os resultados obtidos nas tabelas 3 e 4, é possível verificar que os tratamentos analisados apresentaram diferença estatística, ou seja, entre as 10 misturas, pelo menos 4 são

diferenciadas. Uma coisa que deve ser dita é que o coeficiente de variação do experimento foi de 19,56 %, o que indica que os resultados obtidos são confiáveis.

Tabela 4 – Teste de Tukey para contraste de médias de densidade vibradas.

Tratamento	Média	Teste de Tukey
5	1,87	A
2	1,76	AB
7	1,76	AB
8	1,76	AB
10	1,74	BC
3	1,57	BC
6	1,44	D
4	1,42	D
9	1,26	E
1	0,73	F

Fonte: Autores.

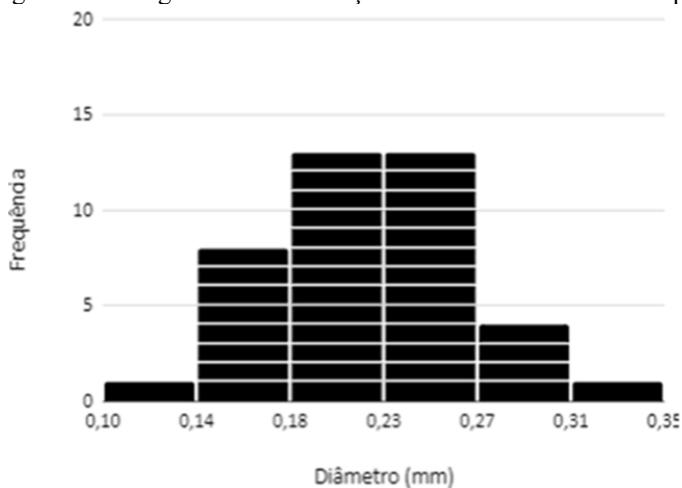
Foi possível concluir que os tratamentos com maiores valores de densidade foram as composições 2, 5, 7 e 8. Segundo a pesquisa de CARVALHO *et al.* (2018) a utilização da mistura de maior empacotamento resulta em vantagens econômicas, devido a necessidade de um menor teor de resina para preenchimentos dos poros das rochas produzidas, tendo em vista que a resina é o componente de maior valor financeiro aplicado para a formação das rochas.

Após obter o volume de vazios presentes no empacotamento das partículas por meio da equação (3), foi considerada a densidade da resina para o cálculo do teor mínimo de resina necessário para preencher os vazios, apresentado na equação (4). Com isso, concluiu-se que 18% de resina seria utilizada para a formulação da rocha artificial.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE FIQUE

Foi elaborado um histograma com a distribuição do tamanho médio de diâmetro das fibras com 40 exemplares, que podem ser observados na figura 4.

Figura 4: Histograma da distribuição de diâmetro da fibra de fique.



Fonte: Autores.

O diâmetro médio da fibra de fique apresentado foi de $0,219 \pm 0,043\text{mm}$, se apresentando condizente com outros valores encontrados na literatura, $0,211 \pm 0,057\text{mm}$ apresentado por GOMEZ *et al.* 2020 e do apresentado por SUAREZ e TUTA (2022) com uma faixa de diâmetros entre 0,16 – 0,32 mm.

A Tabela 5 apresenta os resultados da determinação da densidade e absorção de água da fibra de fique.

Tabela 5 – Propriedades físicas da fibra de fique.

Fibra	Densidade aparente(g/cm^3)	Absorção de água (%)
Fique	$0,45 \pm 0,03$	$147,05 \pm 0,12$

Fonte: Autores.

A pesquisa realizada por GOMEZ *et al.* (2020) e SUAREZ e TUTA (2022) apresentam valores de densidades da fibra de fique entre $0,6479\text{ g}/\text{cm}^3$ e $0,87\text{ g}/\text{cm}^3$, e relatam que tal variação pode ocorrer devido à natureza da matéria prima, diferentes regiões de plantio, entre outros diversos fatores.

SUAREZ e TUTA (2022) e NAVACERRADA *et al.*, (2014) relatam fibras de fique com densidade de $0,723\text{ g}/\text{cm}^3$ e absorção de água de 60%, mesmo valor apresentado por DELVASTO *et al.*, (2010). Segundo os autores citados as fibras podem apresentar variações em suas propriedades físicas e mecânicas devido a respostas físicas das condições em que se encontram.

As fibras selecionadas para este trabalho apresentaram menor densidade, e maior absorção de água, propriedades que podem ser atreladas a composição química da fibra e presença de poros, indicativos que as fibras utilizadas apresentam maior quantidade de grupos hidrofilicos ou de vazios (GOMEZ *et al.* 2020).

A baixa densidade da fibra de fique tende a ser atrativa, pois a utilização das mesmas como reforço para materiais, tendem a melhorar as propriedades mecânicas sem que ocorra grande alteração no peso do produto (LOPES *et al.* 2021).

O ensaio de tração realizado nas fibras de fique revelou uma elevada resistência à tração, como apresentado na tabela 6.

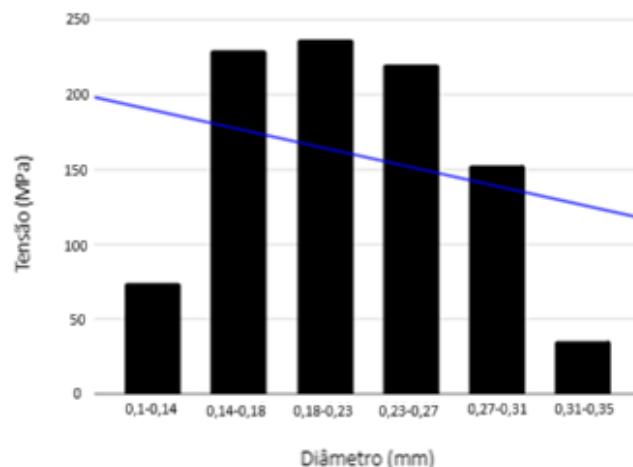
Tabela 6 – Resistência à tração da fibra de fique.

Fibra	Resistência à tração (MPa)
Fique	212,12 ± 130,23

Fonte: Autores.

Com base na pesquisa realizada por TONOLI *et al.* (2011) a fibra de fique apresenta uma resistência a tração entre 43 – 571 MPa. É observado na figura 5 que com o aumento do diâmetro da fibra, ocorre uma tendência ao decaimento da resistência da fibra, o que pode ser justificado pela maior quantidade de imperfeições presentes ao longo do comprimento da fibra (SILVA *et al.*, 2020).

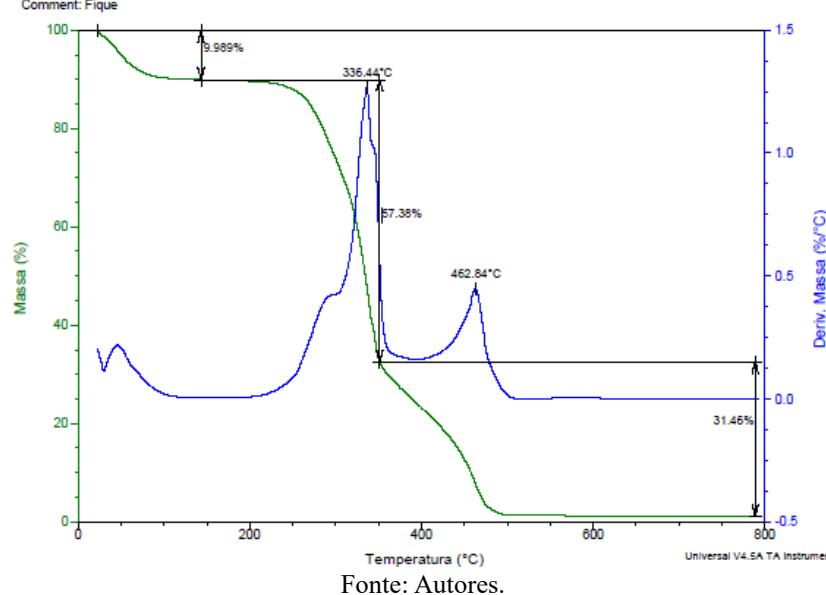
Figura 5: Gráfico de tensão em função da distribuição de diâmetro da fibra de fique.



Fonte: Autores.

Os resultados da degradação térmica da fibra de fique *in natura* são ilustrados na Figura 6. Com análise do gráfico, podem-se observar os eventos térmicos associados às perdas de massa, que são retratadas pelas inflexões das curvas de TGA.

Figura 6: Análise termogravimétrica na fibra de Fique In Natura.



Fonte: Autores.

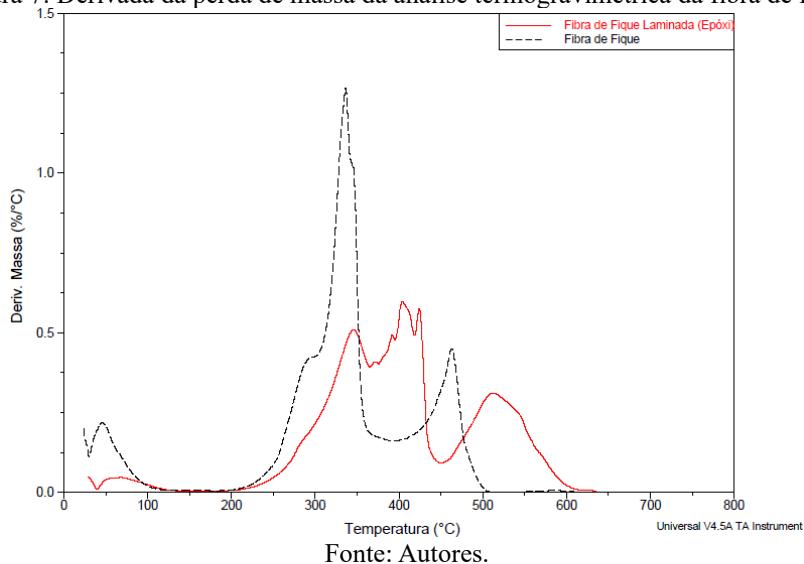
A primeira perda de massa para a fibra in natura ocorreu entre 23 e 100°C e trata-se da perda da umidade e de extrativos das fibras. Neste intervalo houve uma perda de massa de aproximadamente 10%. Embora as fibras tenham sido secas antes das análises, ainda ocorre a presença de umidade na fibra devido ao carácter hidrofilico que as fibras naturais apresentam (PAIVA *et al*, 2000; SILVA *et al*, 2020).

Na curva de TGA é possível observar três eventos de perda de massa, que ocorrem no intervalo de 200-470°C, apresentando a maior taxa de perda de massa a 336,44°C, correspondendo a 57,38% da massa total da amostra de teste. Esta inflexão na curva da fibra ocorre devido à ruptura das cadeias macromoleculares e processo de decomposição de hemicelulose e celulose (OLIVEIRA *et al*, 2023).

A hemicelulose caracteriza-se por decompor-se facilmente, registrando perda de massa na faixa de temperatura aproximadamente entre 220- 336°C. Já a pirólise da celulose é identificada em uma faixa maior de temperatura, entre 315-400°C. O terceiro estágio, entre 315 e 450°C é correspondente à decomposição da celulose e dos subprodutos obtidos no segundo estágio. Em torno de 480°C ocorre perda de massa, restando aproximadamente 31% de massa residual. A lignina tem a característica de se decompor em uma faixa mais ampla de temperatura (GANÁN e MONDRAGON, 2002).

Os resultados da degradação térmica da fibra de fique cobertas com a resina epoxídica podem ser observados na Figura 7.

Figura 7: Derivada da perda de massa da análise termogravimétrica da fibra de fique.

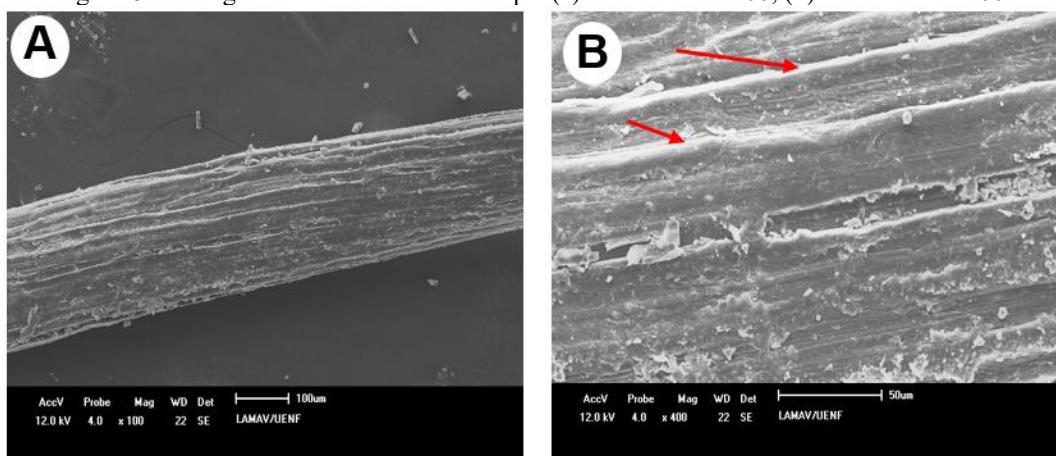


Fonte: Autores.

É possível observar a maior estabilidade térmica da fibra coberta com a resina em relação a fibra *in natura*, devido a curva e picos de degradação serem deslocados a direita, retardando o início da degradação e prorrogando a integridade da fibra na presença de temperaturas mais altas (SILVA *et al.* 2020), fazendo com que a resina atue como proteção para as fibras, iniciando o processo de degradação somente a temperaturas próximas de 280 °C.

A fibra de fique é composta de microfibrilas, que são possíveis observar nas imagens da Figuras 8 (A e B) evidenciado pelas setas vermelhas.

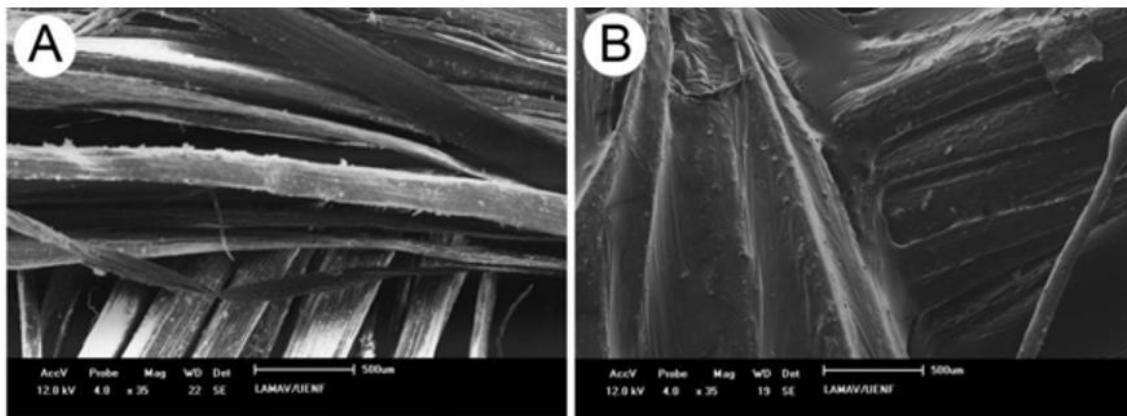
Figura 8: Micrografia das fibras fibra de fique (a) aumento de x100, (b) aumento de x400.



Fonte: Autores.

A Figura 9 apresenta as micrografias da malha de fibra antes e após a etapa de laminação com a resina epóxi para se observar a interação entre resina e fibra.

Figura 9: Macrografia da malha de fibra de fique (A) fibra sem laminação, (B) fibra laminada. Aumento das imagens x35.



Fonte: Autores.

Quando comparadas as imagens das malhas de fibra de fique (figura 9 A e B) é possível ver a permeação da resina na fibra preenchendo os vazios existentes entre as fibras na imagem (A) e que estão fechados na imagem (B) após a laminação, além de selar poros presentes na própria fibra.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE ROCHAS ARTIFICIAIS

A tabela 7 ilustra os resultados obtidos dos índices físicos encontrados para as 4 composições (2, 5, 7 e 8) das rochas conformadas, apresentando a média e desvio padrão da densidade, porosidade aparente e absorção de água.

Tabela 7 – Resultado dos índices físicos das rochas artificiais.

Propriedades Físicas	RAQ-2	RAPQ-5	RAPQ-7	RAPQ-8
Densidade (g/cm ³)	2,19 ± 0,03	1,84 ± 0,08	2,15 ± 0,03	2,25 ± 0,01
Absorção de água (%)	0,71 ± 0,14	0,39 ± 0,08	0,38 ± 0,07	0,27 ± 0,06
Porosidade aparente (%)	1,57 ± 0,38	0,72 ± 0,12	0,80 ± 0,14	0,60 ± 0,66

Fonte: Autores.

As rochas apresentaram uma densidade baixa devido a matriz epóxídica com o valor de densidade de 1,10 g/cm³, à utilização de um polímero com baixa densidade, torna o material mais leve, e consequentemente pode diminuir os custos logísticos, inclusive de transporte, pois por um preço fixo por carga, haverá uma quantidade maior de metros cúbicos de material transportado (DEMARTINI *et al*, 2018)

A baixa densidade da RAPQ-5 pode ter ocorrido devido a morfologia das partículas que geraram uma baixa ancoragem entre a matriz polimérica com as partículas cerâmicas, fazendo com que ocorra uma maior quantidade de vazios internos na rocha, contribuindo assim para o decréscimo na densidade. (SILVA *et al*, 2018)

A absorção de água ficou entre os valores informados por CHIODI e RODRIGUEZ (2009) de 0,1 - 0,4 %, considerado material de baixa absorção de água, podendo ser utilizados em ambientes internos, tamos e pisos flutuantes/elevados. Devendo ter, preferencialmente, índice de absorção de água inferiores a 0,4%.

De acordo com a norma técnica brasileira NBR 15844, a densidade aparente do granito artificial deve ser inferior a 2,5 g/cm³; a absorção máxima de água, $\leq 0,4\%$; e a porosidade aparente, no máximo, 1%. Ao comparar com as rochas produzidas, todas se adequam às normas quanto ao critério de densidade. Contudo, no quesito porosidade e absorção de água, a rocha de composição 2 apresenta valores superiores aos exigidos. Essa maior porosidade e absorção de água pode estar atrelada ao fato de que a RAQ-2 possui apenas uma faixa granulométrica de resíduos em sua composição, o que prejudica o preenchimento dos vazios na rocha.

A tabela 8 ilustra a resistência flexural das rochas artificiais produzidas.

Tabela 8 – Resistência à flexão das rochas sem laminação.

Composição	Resistência à Flexão (MPa)
RAQ-2	$14,20 \pm 1,30$
RAPQ-5	$16,98 \pm 1,05$
RAPQ-7	$25,13 \pm 3,70$
RAPQ-8	$27,67 \pm 2,60$

Fonte: Autores.

De acordo com CHIODI e RODRIGUEZ (2009), as rochas de composição 7 e 8 são classificadas como de muito alta resistência ($> 20\text{ MPa}$), a rocha de composição 5 é classificada como de resistência alta (entre 16 e 20 MPa), enquanto a rocha de composição 2 é classificada como mediana (entre 10 e 16 MPa).

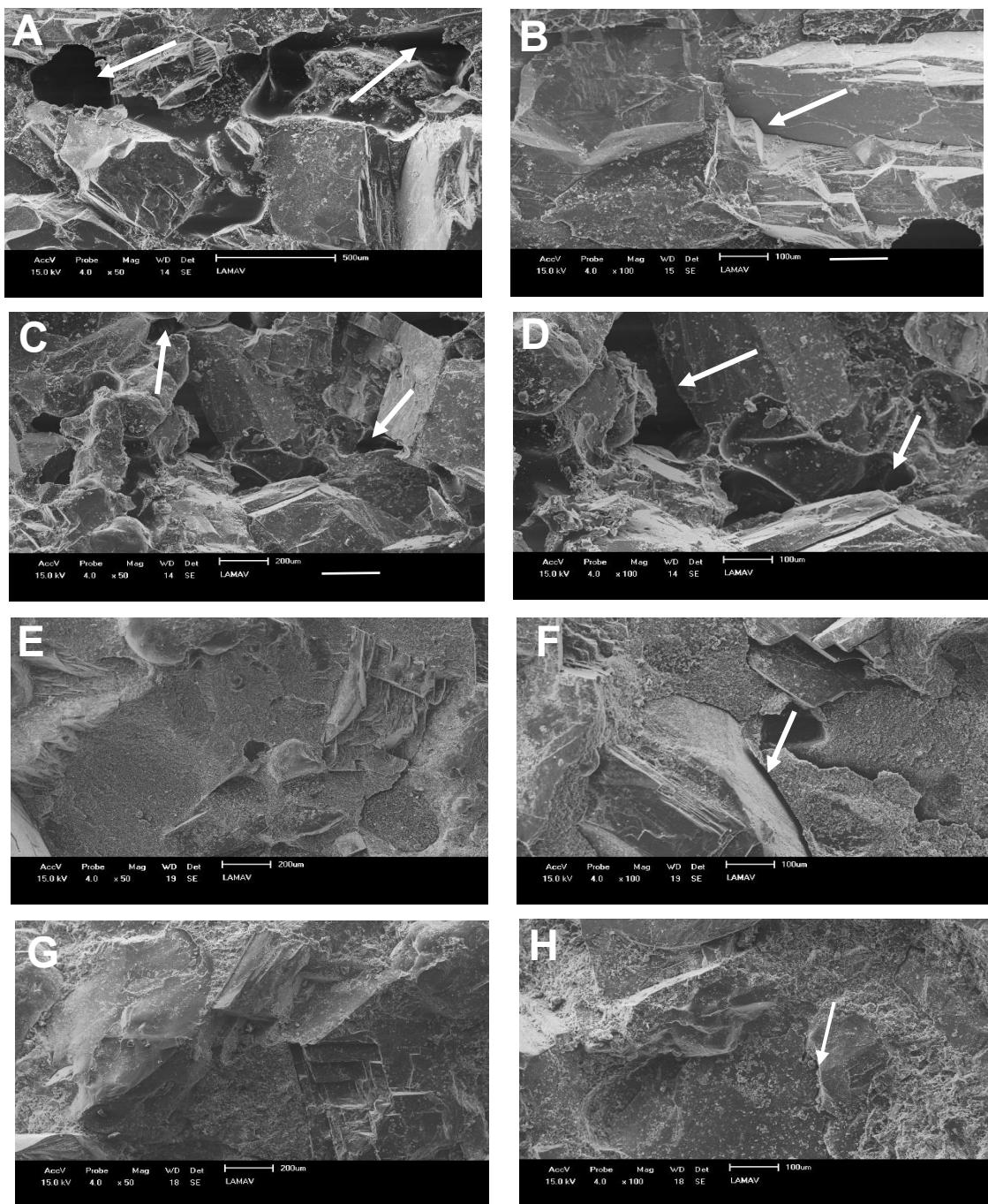
Pode-se observar que a composição foi o principal fator, a RAPQ-7 e 8 são as que obtiveram o valor com maior tensão de ruptura e são as duas composições com as três granulometrias. Apontando que um maior empacotamento das partículas expressa por valores de densidade mais elevados e nas propriedades de flexão. As partículas finas podem desempenhar um papel no preenchimento da lacuna de acúmulo de agregados. (BEZERRA *et al.* 2022)

BARRETO *et al.* (2022), em seu estudo em desenvolvimento de rocha artificial utilizando resíduo de quartzo e vidro, obteve a composição 7 como a maior densidade vibrada (1/3 grosso, 1/3 médio e 1/3 fino), com resultado de tensão máxima de flexão $33,5 \pm 4\text{ MPa}$. O que reforça a ideia que a utilização das três faixas granulométricas impacta positivamente nas propriedades mecânicas da rocha artificial.

COSTA *et al.*, (2021), definiram que pedras para pisos são consideradas de altíssima resistência ou excelente qualidade se sua resistência à flexão for superior a 20/22 MPa, respectivamente. A norma NBR 15844 estipula que a resistência mínima à flexão em ensaio de flexão em 3 pontos deve ser de 10 MPa, para pedras utilizadas em pisos, enquanto a ASTM C615 diz que é de 7 MPa.

A figura 10 apresenta micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das seções da superfície fraturada das amostras RAQ-2, RAPQ-5, RAPQ-7 e RAPQ-8, após o ensaio de flexão em três pontos. Conforme evidenciado na Tabela 8, as composições RAQ-2 e RAPQ-5, ilustradas na figura 10 (A, B, C e D), apresentam grande quantidade de poros ou cavidades, conforme indicado pelas setas, geradas pelo contato entre as partículas. O que resultou em uma fraca aderência na região e, assim, sob a tensão aplicada, formou-se um cisalhamento entre os planos, acarretando um baixo desempenho mecânico (GOMES e MENDES, 2023).

Figura 10: Micrografias das seções de superfície fraturada da rocha artificial. (RAPQ-5) (A e B); (RAQ-2) (C e D); (RAPQ-7) (E e F) e (RAPQ-8) (G e H).



Fonte: Autores.

Observa-se superfícies de fraturas com grãos que se romperam em função da solicitação mecânica, além de partículas totalmente envolvidas pela matriz, entretanto, nota-se também a ocorrência de partículas descoladas da matriz. Os vazios na região de interface observados, apontam que esse descolamento ocorra pelo crescimento destes vazios na região de interface. O desprendimento de partículas e trincas observadas (figura 10 B e D) são fortes evidências de que a ligação interfacial é amplamente ausente, outro fator que colabora para a menor resistência mecânica das rochas 2 e 5 são

as suas composições, que não apresentam todas as faixas granulométricas de resíduos, o que pode ocasionar em uma maior quantidade de vazios internos nas rochas (BEZERRA *et al.* 2022; GOMES e MENDES, 2023).

Por outro lado, a figura 10 (F) da RAPQ-7 mostra superfície de fratura intergranular com evidência de falha mecânica, uma vez que as trincas de fratura passam pelos grãos indicados pela seta. Mas as partículas estão bem aderidas e contribuiu para uma ligação interfacial eficaz, o que resulta em transferência de tensão entre as fases. A RAPQ-8 (figura 10 G e H), houve pouco deslocamento de grãos residuais, confirmando o molhamento eficiente.

A compactação aumenta o assentamento e adesão das partículas, e o vácuo auxilia a resina a penetrar melhor nos interstícios das partículas de resíduos, preenchendo o volume vazio, que é claramente visto na micrografia, por uma boa adesão interfacial entre as partículas residuais e a resina (CARVALHO *et al.*, 2021).

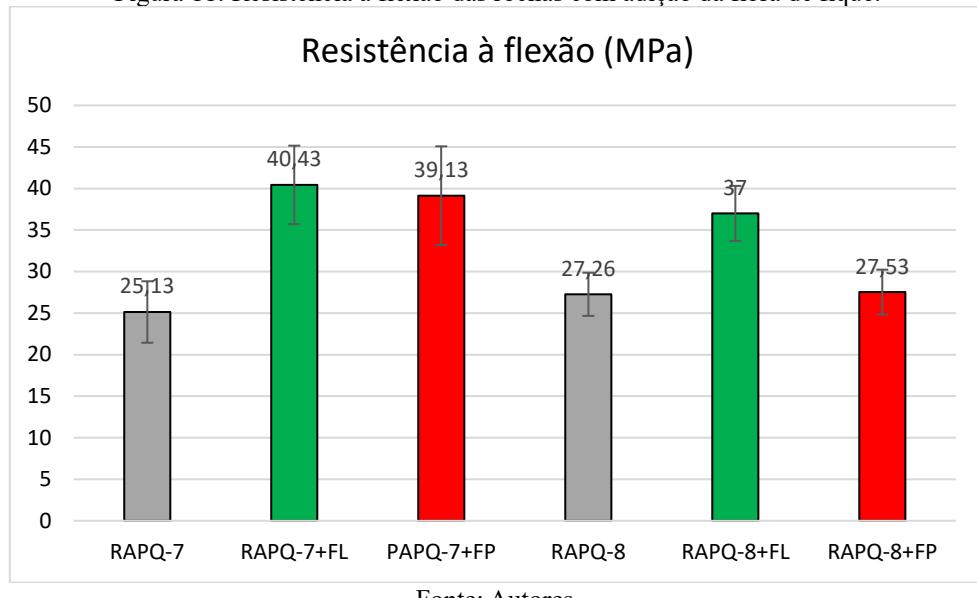
A boa interação interfacial é evidência de um eficaz molhamento da resina com o resíduo, que está diretamente relacionado com a melhoria da resistência mecânica do material, conforme relatado por MILLER *et al.* (1998).

Devido aos melhores resultados apresentados, as rochas RAPQ-7 e RAPQ-8, foram selecionadas para a adição da malha de fibra fique, que foi realizada por dois meios diferentes: Pela laminação com a malha de fibra em umas das fases da rocha e por adição da malha da fibra ao molde previamente ao processo de prensagem.

As rochas com a adição da fibra de fique foram submetidas ao ensaio de flexão de 3 pontos, sendo as rochas laminadas pela fibra de fique (RAPQ-7+FL e RAPQ-8+FL) e as com adição da fibra de fique por prensagem (RAPQ-7+FP e RAPQ-8+FP).

A figura 11 apresenta um comparativo dos resultados de resistência a flexão entre as rochas conformadas, sem a adição da fibra, com a adição da fibra por laminação e com a adição a da fibra por prensagem.

Figura 11: Resistência à flexão das rochas com adição da fibra de fique.



Fonte: Autores.

Os resultados apresentados na figura 11 demonstram que a aplicação da fibra de fique como reforço para rochas artificiais proporcionam um grande aumento nas propriedades mecânicas, destacando a aplicação por meio da laminação, onde foi possível observar um aumento na média de aproximadamente 60% na resistência à flexão para a RAPQ-7 e de 36% para a RAPQ-8.

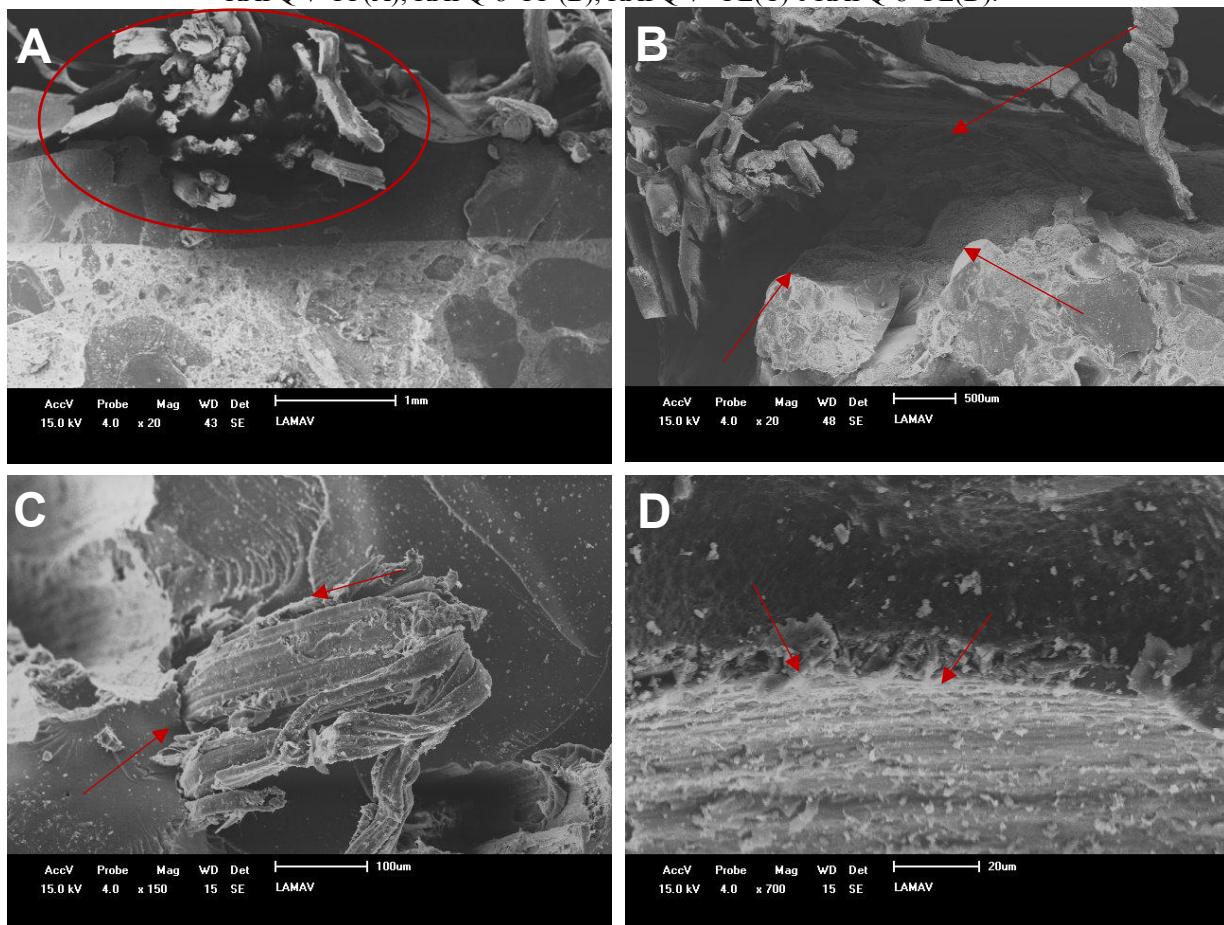
Os resultados obtidos para adição da fibra por meio da prensagem foram menos satisfatórios em comparação com as adicionadas por laminação, com foco na RAPQ-8, que não proporcionou mudanças significativas na resistência à flexão. SILVA *et al.* (2020) relata em sua pesquisa que a aplicação da fibra natural de bananeira como reforço para rochas artificiais pode não proporcionar um aumento na resistência do material, devido a rocha já apresentar uma resistência otimizada.

A aplicação da malha da fibra de fique apresentou uma melhor interface ao ser aplicada por laminação devido ao molhamento da fibra com a resina, o que resultou em uma interface entre a resina e rocha artificial que são materiais que possuem similaridade química e físicas, e proporcionam uma melhor interdifusão e formação ligações secundárias (ASHBEE, 1993).

A micrografia da região de fratura das rochas após a adição da fibra de fique por prensagem e laminação revelam características que contribuem para os resultados obtidos. Na figura 12 (A) referente a RAPQ-7+FP, a área circulada de vermelho aponta o rasgamento não uniforme da fibra de fique, indicativo que as fibras contribuíram para a distribuição de tensão do material, elevando a resistência (RUA *et al.*, 2021). A figura 12 (B) que representa a RAPQ-8+FP, ocorre a má aderência da interface fibra e matriz, se descolando após o ensaio de flexão (indicado pelas setas vermelhas), o que resulta na contribuição somente da matriz para a resistência do material.

A micrografia da RAPQ-7+FL apresentada na figura 12 (C) mostra a fibra de fique atuando como possível travamento de discordâncias presentes no material, impedindo a propagação de trincas e defeitos, enquanto a figura 12 (D) apresenta o caso da RAPQ-8+FL, onde é possível observar a ancoragem da fibra coberta por resina e matriz formando assim uma boa interface, em ambos os casos melhorando o desempenho mecânico da rocha artificial (RUA et al, 2021).

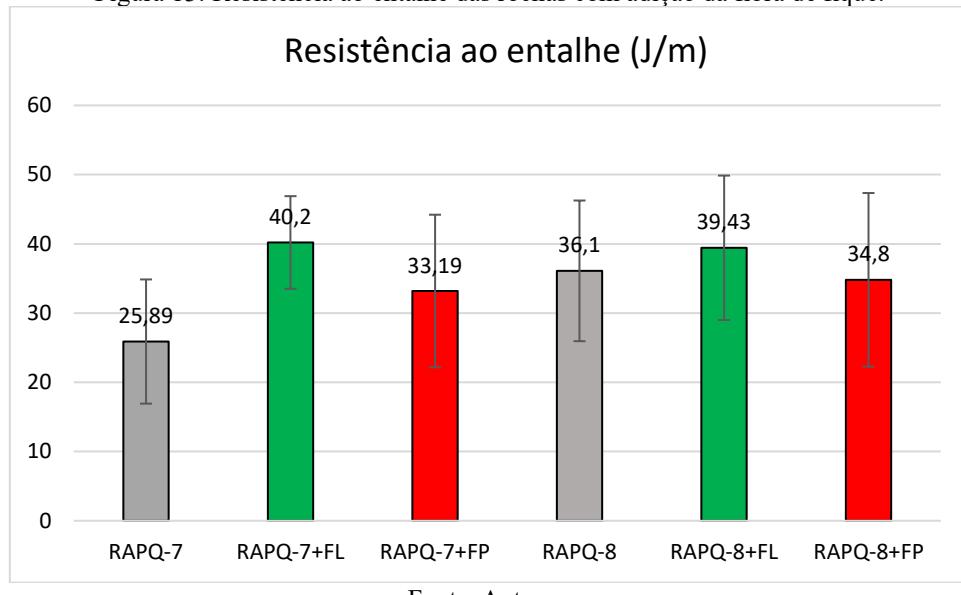
Figura 12: Micrografia da região de fratura das rochas artificiais com a adição da fibra de fique após o ensaio de flexão. RAPQ-7+FP(A); RAPQ-8+FP (B); RAPQ-7+ FL(C) e RAPQ-8+FL(D).



Fonte: Autores.

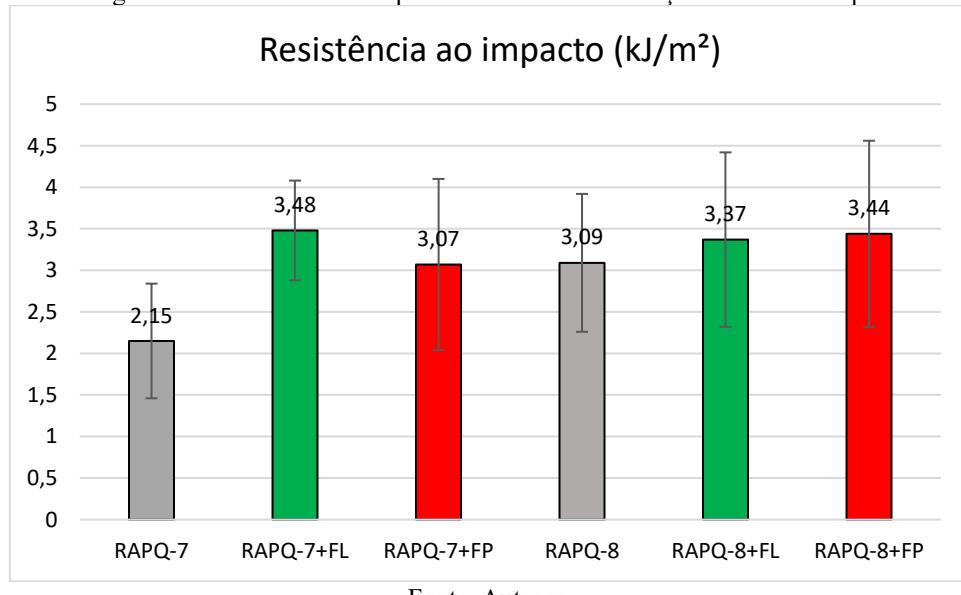
As figuras 13 e 14 apresentam os resultados obtidos do ensaio de impacto. De acordo com BARRETO *et al*, (2023), ainda não existe uma padronização dos requisitos para as rochas artificiais quanto ao resultado do ensaio de impacto Izod.

Figura 13: Resistência ao entalhe das rochas com adição da fibra de fique.



Fonte: Autores.

Figura 14: Resistência ao impacto das rochas com adição da fibra de fique.

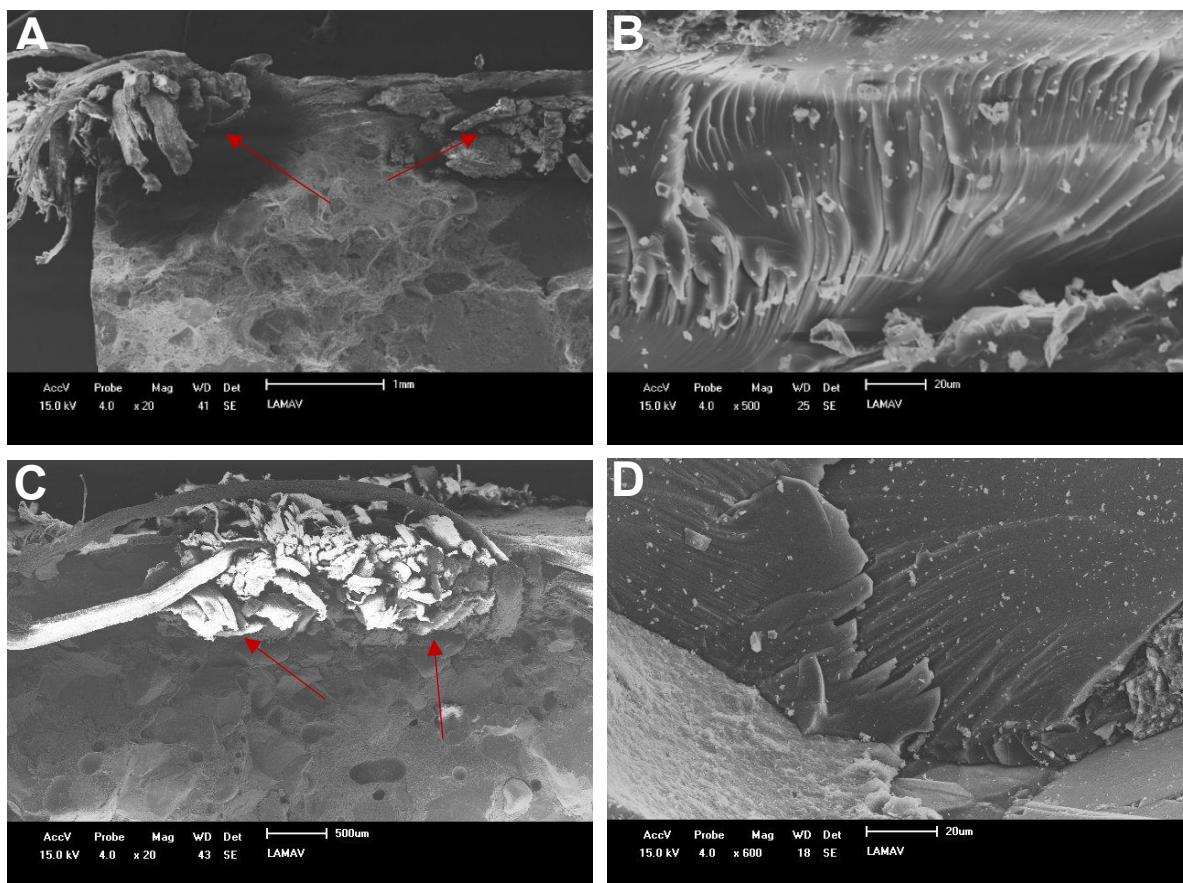


Fonte: Autores.

Ao ser comparado com a literatura CARVALHO *et al*, (2018) produziram uma rocha artificial com brita, resíduos de quartzo e resina epóxi com resistência ao entalhe de $24,1 \pm 4,9$ J/m, na pesquisa de BARRETO *et al*, (2023) foi realizado a formação de rochas artificiais utilizando resíduos de pneu em conjunto com resíduos de vidro, para a composição com maior teor de resíduos de vidro foi obtido uma resistência ao entalhe de $29,05 \pm 8,05$ J/m, e para a composição com maior teor de resíduos de pneu foi obtido $71,18 \pm 11,12$ J/m. As resistências obtidas em pesquisas que utilizam partículas mais duras tendem a ser mais uniforme, devido ao comportamento frágil das rochas.

Ao examinar as micrografias das rochas artificiais obtidas no ensaio de impacto, é possível observar na figura 15 (A e C) a interface formada entre a fibra e a matriz evidenciada pelas setas vermelhas, é semelhante ao ensaio de flexão sendo que as fibras sofreram o rasgamento não uniforme, o que contribuiu para a resistência final da rocha. Na figura 15 (B e D) é possível observar a energia do impacto gerado sendo propagada no decorrer da matriz da rocha artificial.

Figura 15: Micrografia da fratura das rochas artificiais com adição da fibra de fique por prensagem após o ensaio de impacto. RAPQ-7 (A e B) e RAPQ-8 (C e D).



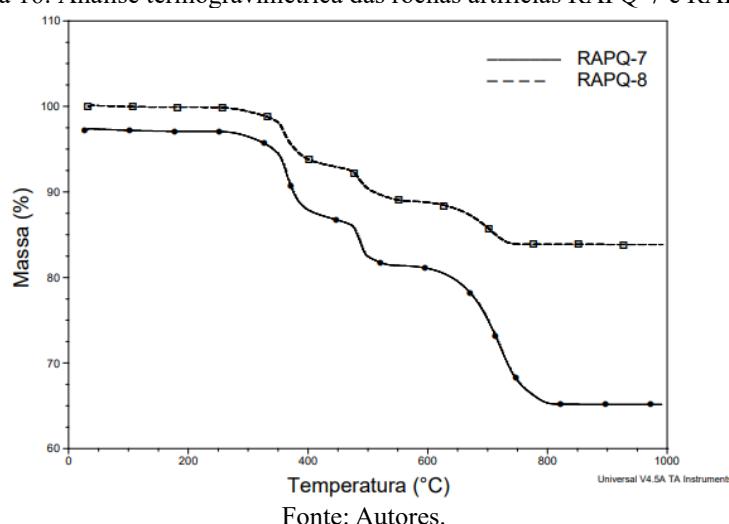
Fonte: Autores.

RIBEIRO *et al.* (2017) e DEBNATH *et al.* (2004) descreveram que interações interfaciais eficazes no compósito podem beneficiar suas propriedades mecânicas. Estas interações estão diretamente correlacionadas com a intensidade da força adesivas resultante do sucesso do umedecimento das regiões interfaciais, desta forma a aprimoração do desempenho mecânico quando comparados as rochas sem a adição da malha da fibra pode ser atrelado a boa adesão das fibras e partículas na matriz, o que dificultou a fratura dos corpos de prova.

A análise termogravimétrica do material permite avaliar a variação percentual em peso das amostras submetidas a um aumento constante de temperatura. Ao analisar a figura 16, é possível

observar três eventos de perda de massa, o primeiro evento ocorre em faixas de 260 - 390º C, que representa a degradação da resina epóxi presente no material, o segundo e terceiro evento de perdas de massa que ocorre entre 390 - 820º C podem ser associados ao fenômeno de desidroxilação e perda de massa dos óxidos do magnésio e potássio presentes na amostra (NASCIMENTO *et al*, 2024). MARQUES *et al*, (2007) aponta em sua pesquisa a variedade de elementos químicos encontrados na composição dos resíduos de polimento do porcelanato, contendo diversos óxidos na composição, como os óxidos de potássio, ferro, magnésio, sódio, alumínio e diversos outros.

Figura 16: Análise termogravimétrica das rochas artificiais RAPQ-7 e RAPQ-8.



Fonte: Autores.

Como observado na figura 16 a RAPQ-7 apresentou uma maior degradação térmicas comparada a RAPQ-8, este evento pode estar associado a maior quantidade de porcelanato utilizada na fabricação da composição 7 em relação a 8, sendo 33% e 17% respectivamente.

DOMINGUES e ROCCO (2020) indicam a alta resistência térmicas do silício, principal componente químico presente no quartzito e porcelanato, o que justifica a baixa degradação ocorrida nas rochas artificiais após serem submetidas a uma temperatura de 1000ºC. Restando aproximadamente 65% da massa da RAPQ-7 e 83% da RAPQ-8.

CHIODI e RODRIGUEZ (2009) as RAPQ-7 e 8 apresentaram altos valores de resistência à flexão, podendo ser utilizadas em painéis fixados com insertos metálicos em fachadas de edificações, pois resistirão a ventos fortes, ou em pisos suspensos/elevados sem substrato.

4 CONCLUSÃO

- A caracterização da fibra natural de fique revelou as boas propriedades mecânicas que as fibras apresentam para o reforço de materiais frágeis, principalmente ao serem aplicadas por

laminação, onde a resina tende a selar a porosidade da fibra, melhorando ainda mais seu desempenho mecânico, fazendo com que as fibras naturais se tornem uma alternativa viável, promovendo a economia e sustentabilidade.

- Ao avaliar o empacotamento das partículas, foi possível fazer a seleção das composições que apresentam menor quantidade de vazios, o que resultou em uma quantidade menor de resina a ser aplicada para a conformação dos corpos de prova.
- Os indicies físicos das rochas destacaram rochas de excelentes propriedades, apresentando absorção de água inferior a 0,4% e porosidade menor que 1%, com exceção da composição RAQ-2, que devido a utilizar somente uma faixa granulométrica, apresentou uma maior quantidade de vazios.
- O resultado do ensaio de flexão apresentou que as rochas RAPQ-7 e RAPQ-8 são classificadas como rochas de muito alta resistência à flexão, obtendo valores de resistência à flexão de $25,13 \pm 3,70$ MPa e $27,67 \pm 2,60$ MPa respectivamente, mesmo sem a adição da fibra, que após serem aplicadas, otimizaram as propriedades mecânicas.
- Após a adição da fibra de fique nas rochas RAPQ-7 e RAPQ-8, foi possível observar um aumento significativo na resistência à flexão, chegando a $39,13 \pm 5,94$ MPa e $27,53 \pm 2,70$ MPa para as fibras adicionadas por prensagem e $40,43 \pm 4,72$ MPa e $37,00 \pm 3,31$ MPa para as fibras adicionadas por laminação.
- O ensaio de impacto IZOD também apresentou uma melhoria após a adição da fibra de fique, elevando a dissipação de energia ao impacto da RAPQ-7 de $2,15 \pm 0,69$ kJ/m² para $3,48 \pm 0,60$ kJ/m² por adição por laminação e para $3,07 \pm 1,03$ kJ/m² na adição por prensagem. Para a RAPQ-8 a melhoria nas propriedades foi menos acentuada, aumentando de $3,09 \pm 0,83$ 69 kJ/m² para $3,37 \pm 1,05$ 69 kJ/m² por adição das fibras por laminação e para $3,44 \pm 1,12$ 69 kJ/m² por adição da fibra por prensagem.
- A micrografia da região de fratura dos ensaios de flexão e impacto, apresentam uma boa interface formada entre a fibra e rocha, o que resultou no acréscimo de resistência das rochas. Com exceção dà fibra adicionada por prensagem na RAPQ-8, onde a interface não foi aderente, fazendo com que os resultados obtidos sejam inalterados ao se comparar a rocha sem a adição e com a adição da fibra.
- Com base nos resultados obtidos é possível avaliar que as RAPQ são viáveis a serem produzidas. Sendo um material de baixa densidade com altas propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Balanço das Exportações e Importações Brasileiras e Rochas ornamentais no primeiro trimestre de 2025. Brasília, 2025. Disponível em: https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/01/Informe-04_2025-Exportacoes-do-primeiro-trimestre.pdf. Acesso em: 20 de jun. 2025.
2. S. BONDUA; S. FOCACCIA; M. ELKARMOTY. SlabCutOpt: A code for ornamental stone slab cut optimization. *Software Impacts*, p. 100704–100704, 1 out. 2024.
3. SILVA FS, Ribeiro CE, Rodriguez RJS. Physical and mechanical characterization of artificial stone with marble calcite waste and epoxy resin. *Materials Research*, 2018; 21: 1-6.
4. GOMES, M.L.P.M., Carvalho, E.A.S., Barreto, G.N.S, Rodriguez, R.J.S., Monteiro, S.N., Vieira, C.M.F. Development of Sustainable Artificial Stone Using Granite Waste and Biodegradable Polyurethane from Castor Oil. *Sustainability*, 2022, 14: 6380.
5. SILVEIRA, L. L. L. da S. (2015) Processo de telagem de chapas de rochas ornamentais. BR nº BR 102013018760-7 A2.
6. WAMBUA, P.; IVENS, I.; VERPOEST, I. (2003) Natural fibers: can they replace glass and fibre reinforced plastics?" *Composites Science and Technology*, v. 63, p. 1259- 1264. 2003.
7. LOPES, M. D. M; Pádua, M. S; Carvalho, J. P. R. G; Simonassi, N. T; Lopez, F. P. D; Colorado, H. A; Vieira, C. M. F. Natural based polyurethanematrixcompositesreinforced with bamboo fiberwaste for use as orientedstrandboard, *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 2317-2324, 2021.
8. AVILA DE CÊA, B. S. et al. An experimental and numerical study of the ballistic behavior of an epoxy matrix hybrid composite reinforced with aramid fabric and fique fabric. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 35, p. 2037–2054, 23 jan. 2025.
9. GOMES, R.; MENDES, L. Bibliographic review on sustainability and processing of ornamental rocks. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2023, 19(03), 569–576. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.19.3.1838> Acesso em: 14 de jul. 2025.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
11. ASTM D3822, “American Society for Testing and material”, American Society for Testing and Materials, 2007.
12. RIBEIRO, C. E. G.; RODRIGUEZ, R. J. S. (2015) Influence of Compaction Pressure and Particle Content on Thermal and Mechanical Behavior of Artificial Marbles with Marble Waste and Unsaturated Polyester. *Mat. Res. [online]*. ahead of print, Nov 24, 2015. ISSN 1980-5373. <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.372314>.

13. PERIM, T.B. et al. Characterization of Artificial Stone Produced with Blast Furnace Dust Waste Incorporated into a Mixture of Epoxy Resin and Cashew Nut Shell Oil. *Polymers*, v. 15, n. 20, p. 4181–4181, 21 out. 2023.
14. ABNT NBR 15845-2 Rochas para revestimento - Parte 2: Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água
15. ABNT NBR 15845-7 Rochas para revestimento - Parte 7: Determinação da resistência à flexão por carregamento em quatro pontos
16. ASTM D256 (2018) Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics
17. CARVALHO, E. A. S.; VILELA, N. de F.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F.; SILVA, L. C. Novel Artificial Ornamental Stone Developed with QuarryWaste in EpoxyComposite. *Materials Research*. 2018, 21(1): IAEA. Caracterização De Resíduo De Mármore Para Fabricação De Rocha Artificial.
18. GOMEZ, T. S., Navacerrada, M. A., Díaz, C., & Fernández-Morales, P. (2020). Fique fibres as a sustainable material for thermoacoustic conditioning. *Applied Acoustics*, 164, 107240.
19. SUAREZ-GÓMEZ, S. A.; CÓRDOBA-TUTA, E. Composite materials reinforced with fique fibers – a review. *Revista UIS Ingenierías*, v. 21, n. 1, 14 jan. 2022.
20. NAVACERRADA Saturio, M. D. L. Á., Díaz Sanchidrián, C., & Fernández, P. (2014). Characterization of a material based on short natural fique fibers. *BioResources*, 9(2), 3480-3496
21. DELVASTO, S., Toro, E. F., Perdomo, F., & de Gutiérrez, R. M. (2010). An appropriatevacuumtechnology for manufacture of corrugated fique fiberre in forcedcementitious sheets. *Construction and Building Materials*, 24(2), 187-192.
22. TONOLI, G. H. D., Santos, S. F. D., Rabi, J. A., Santos, W. N. D., & Savastano Junior, H. (2011). Thermal performance of sisal fiber-cement roofing tiles for rural constructions. *Scientia Agricola*, 68, 1-7.
23. SILVA, F.S. et al. Physical, Chemical, Mechanical, and Microstructural Characterization of Banana Pseudostem Fibers from *Musa Sapientum*. *Macromolecular Symposia*, v. 394, n. 1, 1 dez. 2020.
24. PAIVA, J. M. F.; TRINDADE, W.G.; FROLLINI, E. (2000) Compósitos de matriz termofixa fenólica reforçada com fibras vegetais. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, n.2, p. 170-176
25. OLIVEIRA MS, Pereira AC, Colorado HA, Meliande NM, da Cunha JdSC, Figueiredo AB-HdS, Monteiro SN. 2023. Avaliação de Parâmetros Térmicos e Colorimétricos de Materiais Envelhecidos Termicamente: Um Estudo do Éter Diglicidílico do Sistema
26. GANÁN, P. and MONDRAGON I. Thermal and degradation behavior of fique Fiber reinforced thermoplastic matrix composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2003.

27. DEMARTINI TJC, Rodríguez RJS, Silva FS. Physical and mechanical evaluation of artificial marble produced with dolomitic marble residue processed by diamond-plated bladed gang-saws. *Journal of Materials Research and Technology*, 2018; 7:308–313.
28. CHIODI FC, RODRIGUEZ EP. Guia de aplicação para rochas de revestimento. Abirochas: São Paulo, Brazil, 2009.
29. ABNT NBR 15844; Rochas para Revestimento—Requisitos para Granito. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
30. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C615 – Standard Specification for Granite Dimension Stone. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.
31. BEZERRA, A. K. L. et al. Production and characterization of artificial stone for coating with limestone waste laminated in polymeric matrix. *Ambiente Construído*, v. 22, p. 23–33, 9 set. 2022.
32. BARRETO, G. N. S. et al. Engineered Stone Produced with Glass Packaging Waste, Quartz Powder, and Epoxy Resin. *Sustainability*, v. 14, n. 12, p. 7227, 13 jun. 2022.
33. COSTA, FP, Fernandes JV, Melo LRL, Rodrigues AM. The Potential for Natural Stones from Northeastern Brazil to Be Used in Civil Construction. *Minerals* 2021, 11, 440.
34. CARVALHO, E. A. S.; Souza, V. da S. de; Barreto, G.N.S.; Monteiro, S.N.; Rodriguez, R. J. S.; Vieira, C.M.F. Incorporation of Porcelain Powder and Mineral Wastes in Epoxy Matrix for Artificial Stone Purchase. In: Li, J., Zhang, M., Li, B., Monteiro, S.N., Ikhmayies, S., Kalay, Y. E., Hwang, JY., Diaz, J.P.E., Carpenter, J.S., Brown, A.D., Soman, R., Moser, A. (eds.) *The Minerals, Metals & Materials Society*, Gewerbestrasse: Springer, 2021: 435-433
35. MILLER, J.D.; Ishida, H.; Maurer. Dynamic-mechanical properties of interfacially modified glass sphere filled polyethylene. *Rheol. Acta* 1988, 27, 397–404
36. ASHBEE, K. H. G. (1993) *Fundamentals Principles of Fiber Reinforced Composites*. 2nd. ed., Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA.
37. RUA, J. et al. Impact behavior of laminated composites built with fique fibers and epoxy resin: a mechanical analysis using impact and flexural behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 14, p. 428–438, set. 2021.
38. BARRETO, G. N. S., Gomes, M. L. P. M., Carvalho, E. A. S., Lopera, H. A. C., Monteiro, S. N., & Vieira, C. M. F. (2023). Flexible artificial stonedeveloped with waste tire and waste glass agglomerated by a biopolymericresin. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 7417-7429. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.206>.
39. RIBEIRO, C. E. G. Rodriguez, R. J. S., Carvalho, E. A. Microstructure and mechanical properties of artificial marble. *Construction and Building Materials*. 2017, 149:149– 155.
40. DEBNATH, S., Ranade, R., Wunder, S. L., McCool, J., Boberick, K., & Baran, G. (2004). Interface effects on mechanical properties of particle-reinforced composites. *Dental Materials*, 20(7), 677-686.

41. NASCIMENTO, B. et al. Estudo do processo de têmpera química em porcelanatos industriais visando o incremento de propriedades mecânicas e a redução de espessura. *Cerâmica*, v. 70, 1 jan. 2024.
42. MARQUES, L. N., et al. Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*. V. 2, p. 34-42, 2007.
43. DOMINGUES, M.; ROCCO, J. PROPRIEDADES DE PROTEÇÃO TÉRMICA DO CARBETO DE SILÍCIO EM REVESTIMENTOS CERÂMICOS. *Química Nova*, 2020.