CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

THAIS SANTOS SILVA

PRODUÇÃO DE ROCHA ARTIFICIAL COM RESÍSUO PROVENIENTE DA EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO DE ARDÓSIA

BELO HORIZONTE

2018

THAIS SANTOS SILVA

PRODUÇÃO DE ROCHA ARTIFICIAL COM RESÍSUO PROVENIENTE DA EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO DE ARDÓSIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientadora: Prof. Dra. Luciana Boaventura Palhares

BELO HORIZONTE

2018

THAIS SANTOS SILVA

PRODUÇÃO DE ROCHA ARTIFICIAL COM RESÍSUO PROVENIENTE DA EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO DE ARDÓSIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dra. Luciana Boaventura Palhares

_____

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

_____

Douglas Filipe Galvão

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha existência e por tudo que Ele faz em minha vida.

Aos meus pais, Mário Pereira da Silva e Janete Maria dos Santos Silva pelo apoio incondicional em todos os momentos, por toda orientação, incentivo, ensinamentos e compressão.

Ao meu irmão Vinícius Luiz Santos Silva, por todos ensinamentos e apoio.

Aos meus amigos, pelo companheirismo e amizade.

A minha orientadora, Prof. Dra. Luciana Boaventura Palhares, pela disposição em me ajudar, por toda orientação e todo apoio.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) e todos os docentes que tive o prazer de conhecer, pela oportunidade, experiência, e ensinamentos que foram importantes na minha vida acadêmica e pessoal.

E a todos que direta ou indiretamente colaboraram com este trabalho.

"*A persistência é o caminho do êxito.*"

(Charles Chaplin)

"*Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.*"

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

A indústria responsável pela produção de rochas ornamentais gera grande quantidade de resíduos, produzidos durante o corte e o beneficiamento das rochas. O descarte desses resíduos é um problema para as indústrias, com dificuldade de alocá-los de forma adequada, tendo vista que o descarte de forma inapropriada gera grandes impactos ambientais. Visando a utilização desses resíduos como insumos que venham beneficiar a sociedade, o presente trabalho propõe a produção de rochas artificiais, utilizando resíduos de ardósia, resina poliéster e um catalisador, a fim de alcançar propriedades que tornem possível a utilização dessas rochas em diversas aplicações. Os corpos de prova produzidos foram colocados em mesa vibratória e em seguida deixados à temperatura ambiente para que as reações químicas acontecessem em tempo hábil para endurecimento do compósito. O resíduo de ardósia utilizado foi caracterizado através de ensaio de DRX e as amostras produzidas foram caracterizadas através de ensaio de flexão, de dureza, microscopia óptica e análise de densidade, porosidade e absorção de água. Os resultados dos ensaios de flexão, dureza e densidade apresentaram uma relação direta de proporção com a porcentagem de ardósia utilizada na amostra. Os resultados de porosidade mantiveram-se próximos em todas as formulações, em aproximadamente 1%, e os valores de absorção de água apresentaram uma variação, mas mostraram-se menores quando comparados aos valores típicos de compósitos cimentícios, que possibilitam a utilização da rocha artificial produzida para diversas aplicações, como pisos, paredes e decoração.

Palavras-chave: Rochas ornamentais, resíduos de ardósia, resina poliéster, compósito.

ABSTRACT

The industry responsible for the production of ornamental rocks generates a lot of waste, produced during the cutting and the processing of the rocks. Disposal of these wastes is a problem for the industries, with the difficulty of allocating them adequately, considering that improper disposal leads to large environmental impacts. The present work proposes the production of artificial rocks, using slate residues, polyester resin and a catalyst, in order to reach properties that make possible the use of these rocks in several applications. The specimens produced were placed on a vibrating table and then left at room temperature for the chemical reactions to take place in a timely manner to cure the composite. The slate residue was characterized by XRD test and the samples were characterized by flexural strength, hardness, optical microscopy and density, porosity and water absorption analysis. The results of the bending, hardness and density tests presented a direct relation of proportion with the percentage of slate used in the sample. The porosity results remained close in all formulations, by approximately 1%, and the water absorption values presented a variation, but were lower when compared to the typical values of cementitious composites, that allow the use of the artificial rock produced for various applications such as floors, walls and decoration.

Keywords: Ornamental rocks, slate residues, polyester resin, composite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática do ensaio de flexão em três pontos.....21

Figura 2 – Difratômetro de raios X.....24

Figura 3 – Difratograma de raio-X do pó do ardósia.....30

Figura 4 – Corpos de prova da rocha artificial produzida com resíduo de ardósia.....31

Figura 5 - Resistência a Flexão.....32

Figura 6 – Microdureza Vickers.....33

Figura 7 – Densidade, absorção de água e porosidade aparente.....35

Figura 8 - Micrografia das amostras (A) 10% de ardósia, (B) 30% de ardósia, (C) 50% de ardódia e (D) 70% de ardósia.....36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência a Flexão.....31

Tabela 2 - Microdureza Vickers.....33

Tabela 3 - Densidade, absorção de água e porosidade aparente.....34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM - American Society for Testing and Materials.

CP – Corpo de prova.

DRX: Difração de Raios X.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. OBJETIVOS 15
2.1 Objetivo Principal 15
2.2 Objetivos Específicos 15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16
3.1 Materiais Compósitos 16
3.1.1 Compósitos de matriz polimérica 17
3.2 Resíduos Sólidos Industriais 17
3.2.1 Resíduo da Indústria de Rochas Ornamentais 18
3.3 Produção de Rochas Artificiais 18
3.3.1 Propriedades das Rochas Artificiais 20
3.4 Revisão Bibliográfica das Técnicas de Caracterização 20
3.4.1 Ensaio de flexão 20
3.4.1.1 Tipos de ensaio de flexão 20
3.4.2 Ensaio de Dureza 21
3.4.2.1 Dureza Brinell 22
3.4.2.2 Dureza Rockwell 22
3.4.2.3 Dureza Vickers 23
3.4.3 Difração de Raios X 23
3.4.4 Microscopia óptica 25
3.4.5 Absorção de água 25
3.4.6 Densidade 25
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 26
4.1 Materiais 26
4.2 Metodologia 26

4.2.1 Produção das rochas artificiais 26
4.2.1.1 Caracterização do resíduo de ardósia 26
4.2.1.2 Produção dos corpos de prova 26
4.2.1.3 Caracterização dos corpos de prova 27
4.2.1.3.1 Ensaio de flexão 27
4.2.1.3.2 Ensaio de Microdureza Vickers 28
4.2.1.3.3 Porosidade, absorção de água e densidade aparente 28
4.2.1.3.4 Microscopia óptica 29
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 29
5.1 Propriedades do resíduo de ardósia 29
5.1.1 Análise mineralógica 29
5.2 Propriedades das rochas artificiais produzidas 30
5.2.1 Ensaio de Flexão 31
5.2.2 Ensaio de Microdureza Vickers 32
5.2.3 Densidade, absorção de água e porosidade aparente 34
5.2.4 Microscopia óptica 35
6. CONCLUSÃO 36
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 38

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos processos que tem relação com atividades econômicas geram resíduos, sejam na forma de gases, líquidos ou sólidos, sendo que o descarte inadequado desses resíduos acarreta em problemas ambientais.

A indústria de rochas ornamentais produz grande quantidade de resíduos em todo o mundo, e o volume desses resíduos deverá aumentar continuamente (SOUZA *et al*., 2010).

O Brasil é o 6º produtor mundial dessas rochas. No entanto, atrelado a essa produção, observa-se a geração de uma quantidade significativa de resíduos, produzidos durante o corte e beneficiamento, que podem acarretar grandes impactos ambientais, além de problemas econômicos para o setor (ARRUDA, 2014).

A produção e o consumo de rochas ornamentais no Brasil apresentou crescimento notável nas últimas décadas, devido sua utilização em revestimentos externos de prédios, pisos, paredes, mesas, entre outros. Destacando-se os granitos, mármores, ardósias e calcários que, possuem beleza visual, e são rochas resistentes que não perdem o brilho de polimento durante longos anos.

O processo de extração dessas rochas começa nas pedreiras, onde essa rocha é encontrada na sua forma natural. O material é extraído através de cortes que fatiam as montanhas tirando os blocos. O bloco é então levado à serraria onde máquinas cortam os mesmos, transformando-os em chapas. Posteriormente, as chapas são trabalhadas e transformadas no produto final (ARRUDA, 2014).

Visando a sustentabilidade na atividade mineral, contribuindo positivamente para o meio ambiente e transformando os resíduos de valor negativo para a sociedade, em insumos, de valor positivo, surge a produção de rochas artificiais, com características visuais e propriedades físicas e mecânicas similares as das rochas ornamentais naturais.

A utilização desses resíduos na produção de rochas artificiais contribui de forma positiva no contexto ambiental e econômico.

O Brasil faz parte do grupo dos grandes produtores e exportadores mundiais do setor de rochas ornamentais. Os estados do Espírito Santo e Minas Gerais são os dois principais produtores e exportadores brasileiros de rochas ornamentais seguidos por Bahia e Ceará. O Espírito Santo contribuiu com 43% da produção nacional de rochas

ornamentais, que foi de 6,9 milhões de toneladas no ano de 2005 (REIS E TRISTÃO, 2007).

Como o Brasil é um grande detentor dessas reservas, é de grande importância a implantação de uma política que possa conciliar o aproveitamento racional dos recursos naturais com a utilização de novas tecnologias. Além do que, rochas artificiais atualmente são produzidas em outros países, então, estudos que busquem nacionalizar a produção destes materiais tornam-se pertinentes, a fim de oferecê-los ao mercado interno com preços mais acessíveis (RIBEIRO, 2011).

O presente trabalho apresenta o estudo da obtenção e caracterização de rochas artificiais produzidas com resíduo de ardósia e resina poliéster, afim de minimizar os efeitos danosos dos resíduos no meio ambiente e nacionalizar a produção de rochas que podem ser utilizadas em diversas aplicações.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Principal

Produzir e caracterizar a rocha artificial obtida com resíduos de ardósia e resina poliéster levando em conta os materiais utilizados para uma análise das propriedades finais do produto.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a matéria-prima via Difração de Raios X.

- Avaliar as propriedades físicas, mecânicas e morfológicas dos produtos obtidos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Materiais Compósitos

Compósitos são materiais cuja estrutura é constituída por uma combinação de dois ou mais produtos não solúveis entre si. Um material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades (RIBEIRO, 2011).

De uma forma abrangente pode-se dizer que um dos componentes da mistura, descontínuo, dá a principal resistência ao reforço, e o outro, contínuo, é o meio de transferência desse reforço. Esses componentes atuam de forma conjunta, e as propriedades do conjunto são superiores à de cada componente individual. A escolha do tipo de material de reforço é muito importante, pois além de ter grande impacto nas propriedades finais do compósito, tem também grande importância no custo do produto final. Muitas vezes é utilizado mais de um tipo de reforço com o objetivo de obter propriedades únicas (SANTOS, 2007).

O componente matricial pode ser um metal, um polímero ou uma cerâmica. Em geral, os metais e polímeros são usados como os materiais de matrizes, pois alguma ductilidade é desejável. Para os compósitos com matriz cerâmica, o componente de reforço é adicionado para melhorar a tenacidade à fratura (CALLISTER, 2008).

A interface entre o reforço e a matriz é a superfície onde ocorre a mudança de um elemento para o outro, é responsável pela transferência de carga entre a matriz e o reforço, e assume papel decisivo nas propriedades mecânicas do material final, de modo que uma boa adesão resulta em boas propriedades mecânicas. Esta adesão está relacionada com as propriedades químicas das cargas, bem como as conformações moleculares e constituição química da matriz e, caso não seja perfeita, surgirão inevitavelmente vazios na região interfacial, provocando a fragilização do material (RIBEIRO, 2011).

3.1.1 Compósitos de matriz polimérica

Os materiais compósitos poliméricos, ou plásticos reforçados com fibras, são compostos, basicamente, por fibras de elevada resistência, envolvidas numa matriz polimérica (resina).

Há uma grande variedade de resinas e fibras que podem ser usadas na fabricação de um compósito. A escolha da resina mais adequada depende do tipo de ambiente ao qual o compósito estará submetido. As fibras, por outro lado, devem ser selecionadas em função da resistência, rigidez e durabilidade requeridas. As propriedades dos materiais compósitos poliméricos dependem das propriedades dos seus materiais constituintes, resinas e fibras, e da interação entre estes elementos (RIBEIRO, 2011).

As resinas poliméricas mais utilizadas e mais baratas são os poliésteres e os ésteres vinílicos. Essas matrizes são usadas principalmente em compósitos reforçados com fibras de vidro. Um grande número de formulações dessas resinas proporciona uma ampla variedade de propriedades para esses polímeros. Os epóxis são mais caros e possuem melhores propriedades mecânicas e uma maior resistência à umidade que as resinas poliésteres e vinílicas (RIBEIRO, 2011).

3.2 Resíduos Sólidos Industriais

Os resíduos sólidos constituem hoje uma das grandes preocupações ambientais do mundo moderno. As sociedades de consumo avançam destruindo os recursos naturais e os bens, os quais em geral têm vida útil limitada e são transformados em resíduos, com quantidades crescentes, gerando impactos diretos na qualidade de vida e saúde humana. O resíduo industrial é um dos maiores responsáveis pelas agressões ao meio ambiente, uma vez que, neles estão incluídos produtos químicos, metais pesados e solventes que ameaçam os ciclos naturais e a qualidade da água nos locais onde são despejados. Embora seja possível e prioritário reduzir a quantidade de resíduo durante a produção e até o pós-consumo, eles sempre são gerados (RIBEIRO, 2011).

O fechamento do ciclo produtivo, gerando novos produtos a partir da reciclagem de resíduos, é uma alternativa insubstituível. Assim o desenvolvimento de tecnologias

para reciclagem de resíduos ambientalmente eficientes e seguras, que resultem em produtos com desempenho técnico adequado e que sejam economicamente competitivas nos diferentes mercados é um desafio de fundamental importância (RIBEIRO, 2011).

3.2.1 Resíduo da Indústria de Rochas Ornamentais

Rochas ornamentais compreendem os materiais geológicos naturais que podem ser extraídos em blocos ou placas, cortados em formas variadas e beneficiados por meio de esquadrejamento, polimento, lustro, etc. Seus principais campos de aplicação incluem tanto peças isoladas, como esculturas, tampos e pés de mesa, balcões, lápides e arte funerária em geral, quanto edificações, destacando-se neste caso os revestimentos internos e externos de paredes, pisos, pilares, colunas, soleiras, dentre outros.

O processo inicia-se com a extração dos blocos nas grandes jazidas, o desdobramento, a transformação das placas em produto polido e por fim as placas polidas são cortadas e transformadas nos produtos acabados.

O resíduo gerado pela indústria das rochas ornamentais pode ser subdividido em material grosso e material fino. O resíduo grosso é constituído de fragmentos maiores que areia fina, incluindo placas defeituosas ou quebradas, pedaços de rochas e/ou minerais e aparas de blocos. O resíduo fino é composto pela lama gerada pelo corte dos blocos, polimento das placas e acabamento das peças (SOUZA *et al.*,2010).

Um grande desafio na atualidade é o aproveitamento de forma racional de resíduos provenientes das operações de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais. Transformar em matérias-primas, de modo a torná-las úteis para a sociedade.

3.3 Produção de Rochas Artificiais

O processo de obtenção de material compósito a base de resinas e resíduos de rochas ornamentais envolve, em sua fase inicial, a britagem e/ou moagem dos resíduos graúdos gerados durante o processo de lavra e de beneficiamento, sendo que esta britagem e/ou moagem deve ser conduzida de forma seletiva, ajustando-se o britador/moinho para gerar partículas de granulometria menor ou igual a 6,35mm e maior que 0,053mm.

Após a escolha da composição granulométrica de interesse, que terá reflexos tanto no fator de empacotamento das partículas quanto no aspecto visual do material compósito obtido, é preparada a composição de resinas mais aditivos a ser utilizada, sendo que as classes de resinas que mais se ajustam ao processo envolvem as resinas epóxi, as resinas poliéster e os poliuretanos, combinadas com seus catalisadores/endurecedores e diluentes, que podem ou não ser reativos (ROCHA, 2012).

Existem muitas possibilidades de obtenção de materiais compósitos dependendo da composição escolhida e da distribuição de partículas dos resíduos, que impactam diretamente na qualidade visual do material obtido, na eficiência de empacotamento das partículas, na quantidade de resina, de catalisador, de diluente e de antibolhas a ser utilizado. Dependendo do processo de conformação e da composição escolhida, o teor de resíduos pode variar, em peso, entre 68,8% e 87,8%, a resina entre 12% e 25%, o catalisador entre 0,2% e 3%, o antibolhas entre 0% e 0,2% e o diluente entre 0% e 3% (ROCHA, 2012).

Os componentes são misturados por um tempo suficiente para homogeneização e em seguida vertido em uma forma apropriada, que pode ser de aço ou qualquer outro material rígido e compatível com a resina empregada. Sendo aplicado à forma um desmoldante, podendo, para resina epóxi, o agente desmoldante ser um hidrocarboneto alifático ou óleo mineral. O molde poderá ser de formato cúbico, de diferentes tamanhos, ou de formatos complexos (ROCHA, 2012).

O aquecimento do material e submissão ao vácuo objetivam a eliminação da umidade e retirada do ar das cavidades da carga, favorecendo o mecanismo de interface por adsorção e molhamento. Além disso, o vácuo e a temperatura favorecem o preenchimento do molde através do surgimento de um gradiente de pressão e da redução da viscosidade da resina. O aquecimento favorece ainda a reação de cura da resina (RIBEIRO, 2011).

Após a moldagem sob vibração e vácuo, o material é deixado reagir por um período antes de ser desmoldado.

3.3.1 Propriedades das Rochas Artificiais

A rocha artificial de uma maneira geral se assemelha a rocha natural do qual o resíduo se origina, seja ela de natureza silicática ou carbocática, inclusive quanto às propriedades físicas e propriedades mecânicas (ROCHA, 2012).

As propriedades físicas e mecânicas dos compósitos obtidos a base de resíduos e resinas encontram-se próximas a de materiais já utilizados comercialmente, viabilizando a utilização das rochas artificias para diversas aplicações (RIBEIRO, 2011).

3.4 Revisão Bibliográfica das Técnicas de Caracterização

As técnicas de caracterização das rochas artificiais produzidas são descritas a seguir.

3.4.1 Ensaio de flexão

Consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra geometricamente padronizada. A carga aplicada parte de um valor inicial igual à zero e aumenta lentamente até a ruptura do corpo de prova. É um ensaio bastante aplicado em materiais frágeis como cerâmicos e metais duros, ferro fundido, aço ferramenta e aço rápido, pois fornece dados quantitativos da deformação desses materiais (DALCIN, 2007).

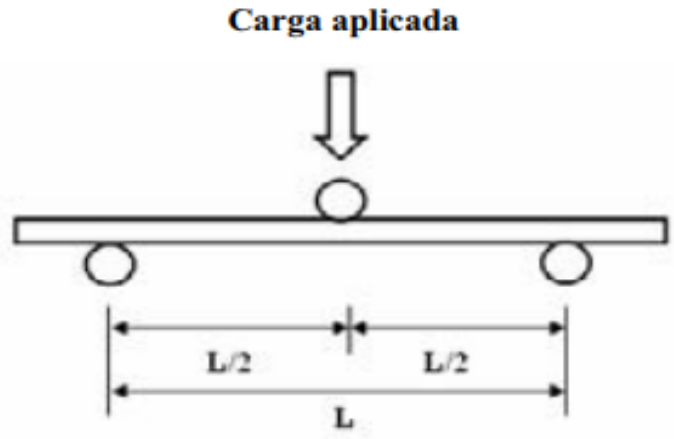
3.4.1.1 Tipos de ensaio de flexão

- Ensaio de flexão em três pontos: é utilizada uma barra bi apoiada com aplicação de carga no centro da distância entre os apoios, ou seja, existe três pontos de carga.
- Ensaio de flexão em quatro pontos: consiste de uma barra bi apoiada com aplicação de carga em dois pontos eqüidistante dos apoios.

Os principais resultados dos ensaios são: módulo de ruptura na flexão, módulo de elasticidade, módulo de resiliência e módulo de tenacidade. Os resultados fornecidos podem variar com a temperatura, a velocidade de aplicação da carga, os defeitos superficiais e principalmente com a geometria da seção transversal da amostra (DALCIN, 2007).

Um dos ensaios mecânicos mais utilizados na caracterização de compósitos é o ensaio de flexão em três pontos, mostrado na figura 1. O ensaio consiste na aplicação de uma carga no centro de corpo de prova específico, padronizado, apoiado em dois pontos, como mostra a figura 1. A carga aplicada aumenta lentamente até a ruptura do corpo de prova. O valor da carga aplicada *versus* o deslocamento do ponto central é a resposta do ensaio (SANTOS. 2007).

Figura 1 – Representação esquemática do ensaio de flexão em três pontos.



Fonte: SANTOS, 2007.

3.4.2 Ensaio de Dureza

A dureza não é uma propriedade intrínseca do material, ditada por definições precisas em termos de unidades fundamentais de massa, comprimento e tempo. Um valor da propriedade de dureza é o resultado de um procedimento específico de medição.

Um método de obtenção do valor de dureza é medir a profundidade ou área deixada por um instrumento de endentação de formato específico sobre o material, usando-se para tal, uma força definida, aplicada durante um tempo específico.

Para materiais como borrachas e plásticos, a dureza é usualmente determinada por choque**,** onde um instrumento causa impacto sobre a superfície do material. Parte da energia do choque é usada para a medida da dureza.

Os principais métodos padronizados de medição são: Brinell, Vickers, e Rockwell (DALCIN, 2007).

Por razões práticas e de calibração, cada um dos métodos é divido em campos de escala, definidos por uma combinação de carga aplicada e geometria do endentado.

3.4.2.1 Dureza Brinell

O método de teste de dureza Brinell consiste em endentar o material com uma esfera de aço endurecido ou metal duro com 10 mm de diâmetro com uma carga de 3000 kgf. Para materiais mais moles a carga pode ser reduzida para 1500 kg ou 500 k para reduzir endentação excessiva.

Comparada a outros métodos, a esfera do teste Brinell provoca a endentação mais profunda e mais larga . Com isto a dureza medida no teste abrange uma porção maior de material, resultando numa média de medição mais precisa, tendo em conta possíveis estruturas policristalinas e heterogeneidades do material.

Este método é o melhor para a medição da dureza macro-dureza de um material, especialmente para materiais com estruturas heterogêneas (COUTINHO, 2005).

3.4.2.2 Dureza Rockwell

O teste de dureza Rockwell consiste em endentar o material sob teste com um cone de diamante ou endentador de esfera de aço endurecido. O endentador é pressionado contra a superfície do corpo de prova com uma pré-carga F_0 , usualmente de 10kgf . Quando o equilíbrio é atingido, um dispositivo indicativo que segue os

movimentos do endentador e responde às variações da profundidade de penetração é ajustado para a posição zero.

Ainda com a pré-carga aplicada, uma segunda carga é introduzida, aumentando a penetração. Atingido novamente o equilíbrio a carga é removida, mantendo-se a pré-carga. A remoção da carga provoca uma recuperação parcial, reduzindo a profundidade da penetração. O aumento permanente na profundidade da penetração resultante da aplicação e remoção da carga é usado para calcular o valor da dureza Rockwell (COUTINHO, 2005).

3.4.2.3 Dureza Vickers

O teste de dureza Vickers consiste em endentar o material sob teste com um endentador de diamante, na forma de uma pirâmide reta de base quadrada e um ângulo de 136^0 entre as faces opostas , utilizando uma carga de 1 a 100 kgf.

A carga plena é aplicada normalmente durante um tempo de 10 a 15 segundos. As duas diagonais da endentação deixadas na superfície do material depois da remoção da carga são medidas usando-se um microscópio. Com os valores lidos calcula-se a média aritmética. A seguir calcula-se a area da superfície inclinada da endentação. A dureza Vickers é o quociente obtido dividindo a carga (em kgf) pela área da endentação.

O teste é aplicável a uma grande gama de materiais, dos mais moles aos mais duros, com ampla faixa de ajuste de cargas (COUTINHO, 2005).

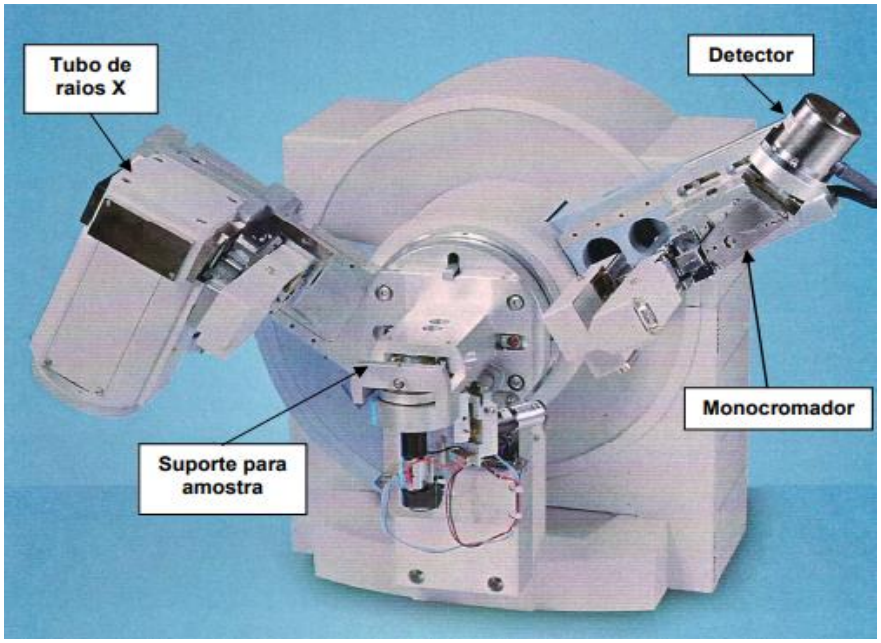
3.4.3 Difração de Raios X

A difração de raios X resulta de um processo em que os raios X são dispersos pelos elétrons dos átomos componentes de um material, sem mudança de comprimento de onda, sendo obedecidas certas condições geométricas. Ao atingirem um material, os raios X podem ser espalhados sem perda de energia pelos elétrons dos átomos. Após colidirem com o material, os raios X mudam a sua direção de propagação, porém, mantêm o comprimento de onda da radiação incidente (KAPLAN, 1978).

Os instrumentos tradicionais de medida da DRX são os difratômetros, mostrado na figura 2, com análises pelo método do pó ou com câmaras de monocristais acopladas, sendo que as últimas são utilizadas apenas em certas situações, por exemplo, quando é crítica a disponibilidade de amostra e, principalmente, em estudos específicos para a determinação de parâmetros cristalográficos.

A técnica de caracterização DRX usada para determinar a estrutura atômica e molecular de um cristal, na qual os átomos cristalinos fazem com que um feixe de raios X incidentes difrate em muitas direções específicas. Medindo os ângulos e as intensidades dos feixes difratados, um cristalógrafo pode produzir uma imagem tridimensional da densidade de elétrons dentro do cristal. A partir desta densidade de elétrons, as posições médias dos átomos no cristal podem ser determinadas, bem como suas ligações químicas, sua desordem e várias outras informações. O material analisado é finamente triturado, homogeneizado e a composição média em massa é determinada (difração de raios X em pó) (SILVA, 2013).

Figura 2 – Difratômetro de raios X



Fonte: SILVA, 2013.

3.4.4 Microscopia óptica

O microscópio óptico apresenta dois sistemas de lentes convergentes; a objetiva e a ocular. A objetiva é um conjunto de lentes que apresenta pequena distância focal e que fornece uma imagem real e aumentada do objeto que é observado. A ocular, também formada por lentes convergentes, funciona como uma lupa, que fornece uma imagem virtual e aumentada da imagem real que se formou pela objetiva. Um microscópio em sua constituição simples é formado por três elementos: Um sistema óptico de ampliação; uma fonte de luz; e um estágio de visualização (DALCIN, 2007).

3.4.5 Absorção de água

A absorção de água tem influência direta sobre outras propriedades do produto. A resistência mecânica do produto, por exemplo, é tanto maior, quanto mais baixa for a absorção (FERREIRA, 2003).

Propriedade analisada de acordo com a norma ASTM C373.

3.4.6 Densidade

A densidade é a razão entre a massa de um material e o volume por ele ocupado. É uma propriedade específica de cada material e pode ser calculada pela fórmula: densidade= massa/volume.

É uma grandeza que varia de acordo com a temperatura e pressão. Isso ocorre porque as variações da temperatura e da pressão provocam uma alteração no volume do material e, consequentemente, alteram também a densidade que é inversamente proporcional ao volume (PACIONI et al., 2007).

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Materiais

- Resíduos de ardósia, proveniente da empresa Micapel.
- Resina poliéster, de uso comercial, resina poliéster -cristal 5061.
- Catalisador, para a cura da resina poliéster, catalizador mek de 1% em massa/peso.

4.2 Metodologia

4.2.1 Produção das rochas artificiais

O resíduo de pó de ardósia após passar pelo processo de britagem e moagem foi secado em estufa a temperatura de 120ºC por 24 horas e classificado em uma peneira de 1,18mm.

4.2.1.1 Caracterização do resíduo de ardósia

O rejeito que passou na peneira foi classificado quanto a composição mineralógica por Difração de Raios X(DRX), em equipamento Shimadzu XRD-7000, com velocidade de escaneamento de 2º/min e ângulo de varredura variando de 3º a 85º, com alvo metálico de cobre. O ensaio foi realizado afim de identificar a composição e as respectivas estruturas cristalinas dos compostos.

4.2.1.2 Produção dos corpos de prova

Foram preparadas misturas de resíduo de ardósia previamente tratado, resina de poliéster-cristal 5061, e, para acelerar o processo de polimerização, foi adicionado um catalizador mek de 1 a 2% em massa/peso.

As misturas utilizadas foram produzidas com 10%, 30%, 50% e 70% de pó de ardósia com resina, homogeneizadas e vazadas e moldes metálicos, para que fosse possível avaliar as propriedades dos produtos obtidos com diferentes formulações. Posteriormente, os moldes foram colocados em uma mesa vibratória por 1 minuto para evitar a formação de poros. A cura ocorreu após 48 horas em temperatura ambiente 25ºC. Os corpos de prova foram desmoldados, cortados e lixados, e então apresentaram-se aptos para a realização dos ensaios de caracterização.

4.2.1.3 Caracterização dos corpos de prova

Através de testes padronizados, foram avaliadas as propriedades mecânicas e físicas dos corpos de prova.

4.2.1.3.1 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão foi realizado em uma máquina universal de ensaios Autograph AG-X 10kN da marca Shimadzu, com dobramento em três pontos, na velocidade de 2mm/min. Tal ensaio foi realizado em 4 amostras, sendo cada uma com um valor de porcentagem de resíduo de ardósia em relação a quantidade de resina(10%, 30%, 50% e 70%). As dimensões dos corpos de prova eram de (90x20x10)mm aproximadamente.

Para determinar o limite de resistência à flexão foi utilizada a equação:

$$\sigma = 3PL/2bd^2 \qquad \text{(eq. 01)}$$

Onde:

σ = tensão de flexão (Mpa);

P = máxima carga aplicada (N);

L = distância entre os apoios (mm);

b = largura do CP (mm);

d = espessura do CP (mm);

4.2.1.3.2 Ensaio de Microdureza Vickers

O ensaio de dureza foi realizado em um microdurômetro Shimadzu Modelo HMV 2T. Foram utilizadas 4 amostras, cada uma com uma porcentagem de resíduo de ardósia, e foram realizados 10 testes em cada amostra, com carga de 200kgf durante 15 segundos.

4.2.1.3.3 Porosidade, absorção de água e densidade aparente

A porosidade, absorção de água e densidade aparente, foram medidas com a utilização da norma ASTM C373-88, que descreve o método de Arquimedes e sua adequação matemática.

De acordo com a norma ASTM C373-88, os corpos de prova devem ser fervidos por 5h a 150º em água, permanecendo após esse tempo, imersos em água por 24h. Posteriormente, cada corpo de prova é pesado utilizando-se o aparato de Arquimedes e balança comum.

A porosidade aparente, a absorção de água e densidade, foram calculadas respectivamente pelas equações 2, 3 e 4 abaixo:

$$P = (M_{sat} - M_{sec}) / (M_{sat} - M_{sub}) \times 100 \quad \text{(eq.02)}$$

$$A = (M_{sat} - M_{sec}) / (M_{sec}) \times 100 \quad \text{(eq.03)}$$

$$D = M_{sec} / (M_{sat} - M_{sub}) \times 100 \quad \text{(eq.04)}$$

Onde:

A= Absorção de água;

P=Porosidade aparente;

D=Densidade aparente;

M_{sat}= Massa saturada;

M_{sec} = Massa seca;

M_{sub}= Massa submersa.

4.2.1.3.4 Microscopia óptica

A análise por microscopia óptica foi conduzida em um microscópio Fortel com sistema de aquisição de imagens Kontrol modelo M713.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

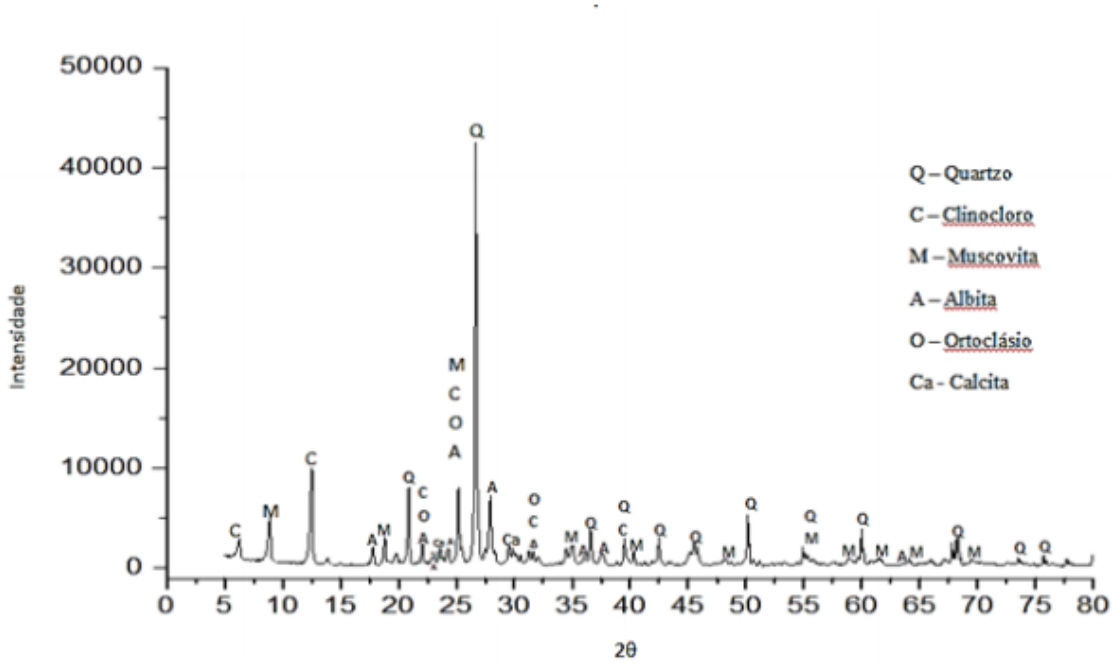
5.1 Propriedades do resíduo de ardósia

5.1.1 Análise mineralógica

O difratograma do pó de ardósia é mostrado na figura 3, confirmando a presença de materiais cristalinos. Percebe-se a presença dos filossilicatos e do quartzo, e os demais minerais, tais como a calcita, não aparecem de modo destacado no difratograma. Os principais minerais identificados foram: Quartzo (Q): mineral duro composto de SiO_2 cristalina; Clinocloro (C): $5MgO.Al_2O_3.SiO_2.4H_2O$ - hidróxido silicato de magnésio, ferro e alumínio, pertencente ao grupo das cloritas, responsável pela cor verde das ardósias; Muscovita (M): $K_2O.2MgO.Al_2O_3.8SiO_2.4H_2O$ - hidróxido silicato potássico alumínico pertencente a classe das micas e principal determinante da clivagem

da ardósia. Albita (A) e ortoclásio (O): $Na_2O.Al_2O_3.6SiO_2$ e $KA_lSi_3O_8$, respectivamente - silicatos pertencentes a série dos feldspatos.

Figura 3 – Difratograma de raio-X do pó do ardósia

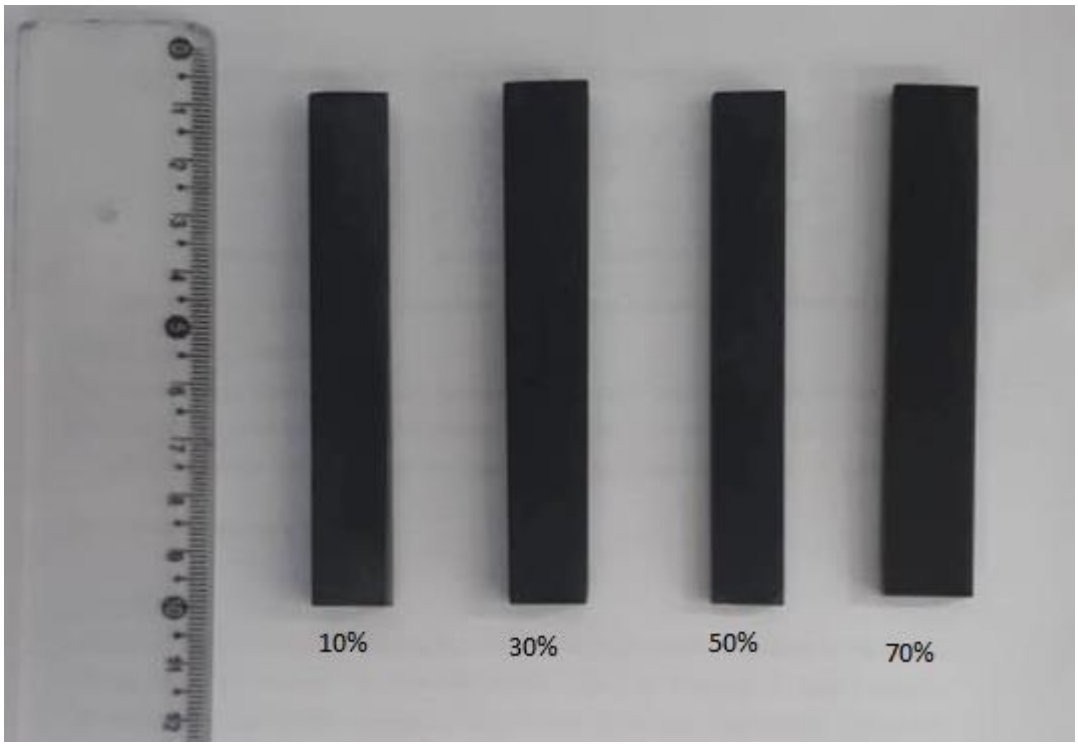


Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 Propriedades das rochas artificiais produzidas

A figura 4 mostra os corpos de prova da rocha artificial produzida com resíduo de ardósia, com carga mineral de 10%, 30%, 50% e 70% respectivamente. É possível observar a uniformidade dos corpos de prova, com superfícies homogêneas, sem a presença de poros.

Figura 4 – Corpos de prova da rocha artificial produzida com resíduo de ardósia.



5.2.1 Ensaio de Flexão

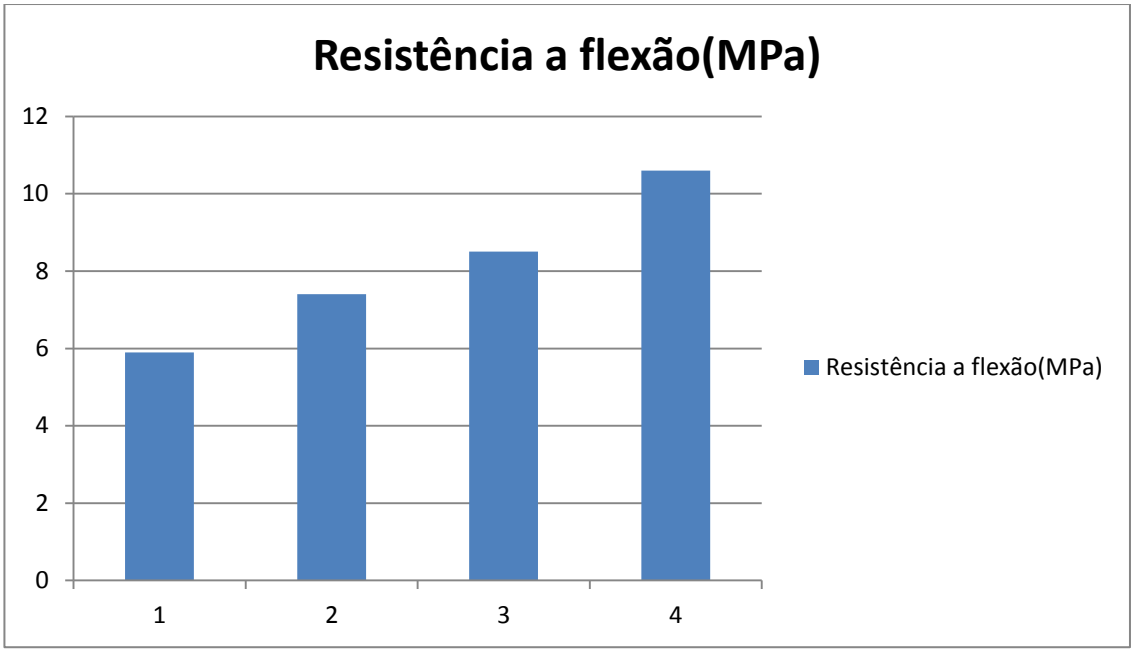
Os valores de resistência a flexão mostrados na tabela 1 foram obtidos a partir de um ensaio com dobramento em três pontos, na velocidade de 2mm/min. Resultados com amostras de 10%, 30%, 50% e 70%.

Tabela 1 - Resistência a Flexão

	Porcentagem de ardósia	**Resistência Flexão (MPa)**
1	10	5,9 ± 0,6
2	30	7,4 ± 0,8
3	50	8,5 ± 1,2
4	70	10,6 ± 1,0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5 - Resistência a Flexão



Fonte: Elaborada pelo autor.

É observado que a amostra com maior porcentagem de resíduo em relação a resina apresentou maior resistência a flexão, conforme figura 5, e a amostra com menor porcentagem de resíduo, uma menor resistência, o que expõe que a incorporação das partículas de ardósia em matriz de poliéster resultou em um aumento da resistência a flexão dos compósitos produzidos. Pode-se dizer que a ardósia tem a capacidade de não deteriorar as propriedades mecânicas em relação ao polímero puro. As interações entre as partículas de ardósia e poliéster foram suficientemente elevadas para permitir um aumento da resistência mecânica do polímero.

5.2.2 Ensaio de Microdureza Vickers

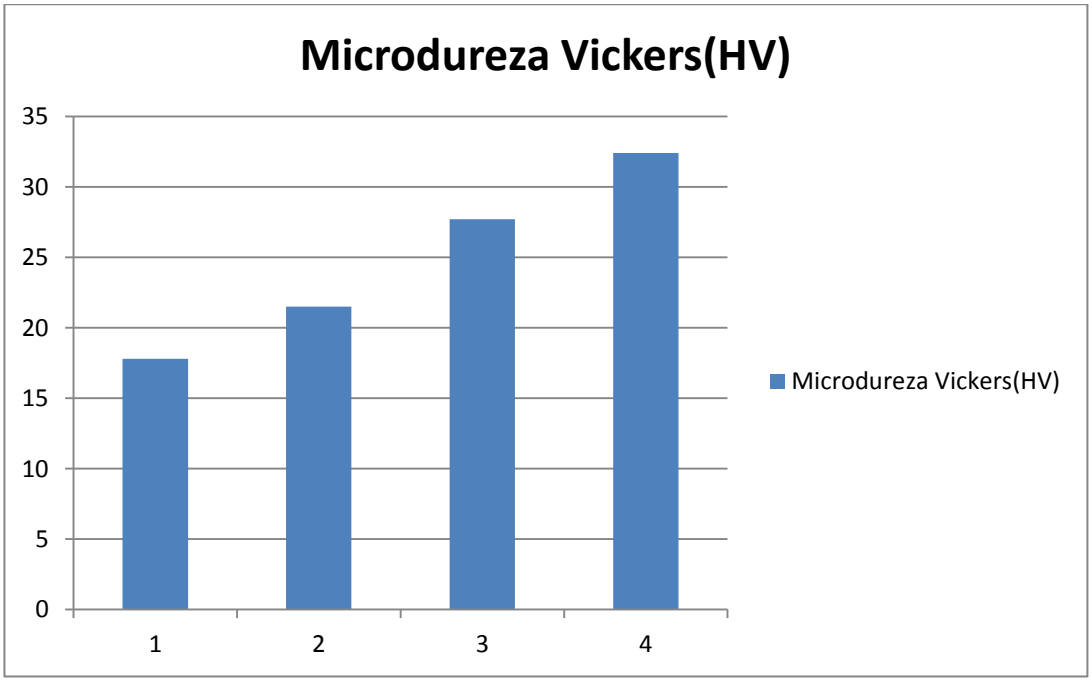
Foram obtidos valores de dureza para as amostras produzidas com 10%, 30%, 50% e 70% de pó de ardósia com resina, como pode ser observado na tabela 2. Foi aplicada uma carga de 200 Kgf por 15 segundos.

Tabela 2 - Microdureza Vickers

	Porcentagem de ardósia	Dureza Vickers (HV)
1	10	17,8 ± 1,0
2	30	21,5 ± 1,5
3	50	27,7 ± 2,7
4	70	32,4 ± 2,4

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 6 – Microdureza Vickers



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos de dureza corroboram com os resultados de resistência a flexão.

A maior porcentagem de resíduo de ardósia confere uma maior dureza ao material, conforme figura 6, mostrando a forte adesão das partículas de ardósia à matriz polimérica.

5.2.3 Densidade, absorção de água e porosidade aparente

A densidade aparente do compósito foi aumentada conforme a adição da carga de resíduo, mostrado na tabela 3, indicando o efeito da carga na matriz polimérica. O aumento da densidade aparente tende para valores mais próximos à densidade da rocha natural que é de aproximadamente 2,7 g/cm^3(PALHARES, *et al*., 2013). Observa-se então que o compósito produzido seria mais leve, viabilizando sua utilização em substituição as pedras ornamentais. Os valores de porosidade mantiveram-se muito próximos em todas as formulações, em aproximadamente 1%, conforme tabela 4.

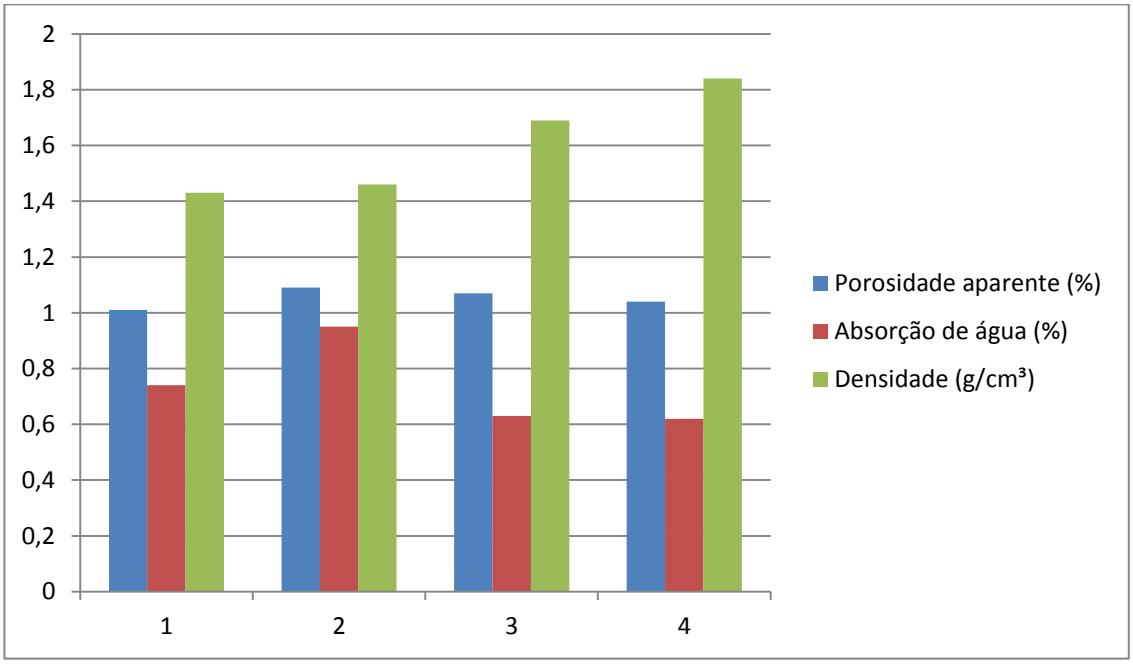
Na absorção de água pelos compósitos observa-se uma pequena variação, conforme figura 7, porém os valores são bem baixos quando comparados aos valores típicos de compósitos cimentícios, comprovando a que a rocha artificial pode ser utilizada como material de revestimento.

Tabela 3 - Densidade, absorção de água e porosidade aparente.

Formulações	**Porosidade aparente (%)**	**Absorção de água (%)**	**Densidade (g/cm³)**
10	1,01 ± 0,24	0,74 ± 0	1.43 ± 0
30	1,09 ± 0.27	0,95 ± 0	1.46 ± 0,01
50	1,07 ± 0.23	0,63 ± 0,01	1.69 ± 0,01
70	1,04 ± 0.22	0,62 ± 0	1.84 ± 0,04

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7 - Densidade, absorção de água e porosidade aparente.

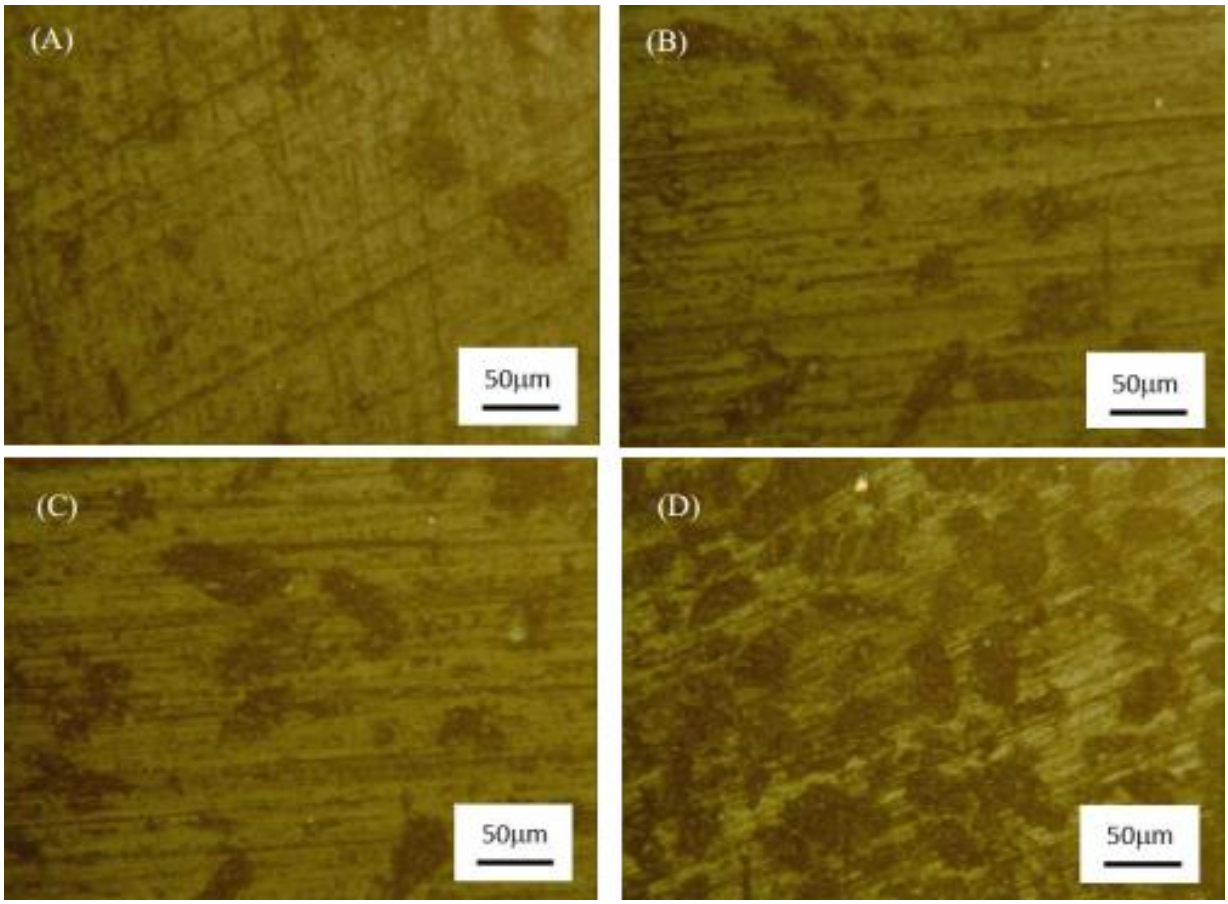


Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.4 Microscopia óptica

A figura 8 mostra as micrografias obtidas via miscroscópio óptico. É possível observar a imagem gerada para cada formulação(10%, 30%, 50% e 70% de resíduo de ardósia). As regiões mais escuras referem-se a presença da ardósia, sendo observado o aumento da mesma com o acréscimo da mistura. Observa-se que quanto maior a porcentagem de ardósia, maior a interação com a matriz polimérica.

Figura 8 – Micrografia das amostras (A) 10% de ardósia, (B) 30% de ardósia, (C) 50% de ardódia e (D) 70% de ardósia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

6. CONCLUSÃO

A caracterização do resíduo de ardósia por Difração de Raios X não mostrou a presença de impurezas, destacando-se a presença do quartzo.

A incorporação das partículas de ardósia em matriz polimérica resultou no aumento da resistência a flexão dos compósitos produzidos, da microdureza e da densidade, mostrando seu potencial para aplicação na produção de rocha artificial.

A rocha artificial produzida com 70% de ardósia mostrou-se a mais indicada, devido ao maior valor de resistência a flexão, de 10,6Mpa, maior valor de dureza e densidade, respectivamente 32,4HV e 1,84 g/cm³. O valor de densidade tende para valores mais próximos da densidade da rocha natural.

Os valores de absorção de água e porosidade apresentaram valores baixos, possibilitando, então, a utilização da rocha artificial produzida para diversas aplicações, como pisos, paredes e decoração. A porosidade manteve-se próxima em todas as formulações, em aproximadamente 1%. Já a absorção de água apresenta valores mais baixos quando comparados aos valores típicos de compósitos cimentícios.

A microscopia óptica das rochas artificiais produzidas mostrou a adesão das partículas de ardósia na matriz polimérica, em que o aumento da porcentagem de respiduo de ardósia implica na maior interação do mesmo com a matriz.

A utilização dos resíduos de ardósia e uma resina para produção de rochas artificiais, como forma de reaproveitamento, mostrou-se viável, já que minimiza o efeito danoso dos resíduos no meio ambiente e permite a produção de rochas que podem ser utilizadas em diversas aplicações, com um baixo custo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRUDA, C.M.R. **Aplicação de resíduos de rochas ornamentais como carga para fabricação de compósitos de matriz polimérica.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2014.

CALLISTER, W.D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

COUTINHO, J.S. **Materiais de construção: ensaios mecânicos**. Porto: FEUP, 2005.

DALCIN, G.B. **Ensaio dos materiais**. Santo Ângelo: URI, 2007.

FERREIRA, H.C. *et al.* **Análise da expansão por umidade e absorção de água de pisos cerâmicos comerciais em relação à composição química e à quantidade estimada de fase vítrea (Analysis of moisture expansion and water absorption of commercial ceramic tiles in relation with chemical composition and estimated glassy phase content).** Campina Grande: UFPB, 2003.

KAPLAN, I**. Física Nuclear**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1978.

PACIONI, T.R. et al. **Relatório de ensaio de tração com materiais poliméricos**. Campinas: UNICAMP, 2007.

PALHARES, L. B. *et al***. Microstructure evaluation of slate pieces submitted to heat treatment at different temperatures"**, Turkey. Anais, 2013.

REIS, A. S.; Tristão, F. A. **Análise de argamassas com resíduo de corte de rochas ornamentais.** Espírito Santos: UFES, 2007.

RIBEIRO, C.E.G. **Produção de rocha artificial utilizando resíduo da indústria de mármore em matriz poliéster**. Campos dos Goytacazes: UENF, 2011.

ROCHA, J.C. **Processo de obtenção de material compósito a base de resina e resíduos de rochas ornamentais**. Rio de Janeiro: INT, 2012.

SANTOS, E.A**. Avaliação mecânica e microestrutural de compósitos de matriz**
de poliéster com adição de cargas minerais e resíduos industriais. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Mecânica) – Natal – RN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, 2007.

SILVA, A.L. **Caracterização minerológica por difração de raios x e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia.** Belo Horizonte: UFMG, 2013.

SOUZA, A.J. *et al*. **Processing of floor tiles bearing ornamental rock-cutting waste.** Campos dos Goytacazes: UENF, 2010.