

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO VÍCTOR MENDES BEZERRA BAÇO

**UTILIZAÇÃO DO BASALTO COMO ELEMENTO ARQUITETÔNICO VISANDO
PROTEÇÃO TÉRMICA DE RESIDÊNCIAS**

FRANCISCO BELTRÃO

2022

JOÃO VÍCTOR MENDES BEZERRA BAÇO

**UTILIZAÇÃO DO BASALTO COMO ELEMENTO ARQUITETÔNICO VISANDO
PROTEÇÃO TÉRMICA DE RESIDÊNCIAS**

Use of basalt as an architectural element for thermal protection of residences

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Wagner da Silveira.

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Junkes Corrêa

FRANCISCO BELTRÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOÃO VÍCTOR MENDES BEZERRA BAÇO

**UTILIZAÇÃO DO BASALTO COMO ELEMENTO ARQUITETÔNICO VISANDO
PROTEÇÃO TÉRMICA DE RESIDÊNCIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 08 de dezembro de 2022

Wagner da Silveira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fabio Junkes Corrêa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Leila Maria Sotocorno e Silva
Doutorado
Universidade do Oeste Paulista

“A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

FRANCISCO BELTRÃO

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Professor Wagner, por todos os ensinamentos transmitidos a mim nesse período.

Agradeço ao meu coorientador Professor Fábio, pelo auxílio ao longo do processo.

Agradeço minha família, pelo suporte inacabável e pela atenção.

Agradeço ao Laboratório de Análises da UTFPR de Francisco Beltrão, dos laboratórios da Central de Análise, localizada na UTFPR, campus de Pato Branco e, também, ao Laboratório de Instrumentação e Análises da UNESP de Presidente Prudente pelo suporte aos testes realizados.

RESUMO

O basalto é uma rocha ígnea bastante encontrada na região sul do Brasil. Devido as suas características, ela é muito utilizada na construção civil, principalmente em pavimentações e moldagens. O trabalho tem como principal objetivo apresentar uma destinação nobre ao pó de basalto, subproduto de pedreiras e a qual acaba sendo, muitas vezes, subutilizada. A solução para isso seria utilizá-lo na construção de telhas shingle. Para isso, o basalto foi recolhido *in natura*, triturado e peneirado. Depois disso, foi submetido a testes de caracterização química (FTIR, DRX e Análise Térmica) e testes de caracterização mecânica (teste de tração) para analisar a possibilidade na construção de telhas. No DRX e no FTIR se observou a presença da fase anortita e na Análise Térmica se notou a fusão do material. O basalto também foi incorporado em um protótipo de telha shingle para realizar testes de tração. A respeito dos testes de caracterização química, os resultados foram positivos, pois o basalto utilizado continha materiais propícios a sua utilização em telhas, tendo uma resistência satisfatória, além dos materiais terem uma boa resistência térmica. Entretanto, os testes de caracterização mecânica apresentaram diferentes do esperado, pois as amostras com basalto se romperam. A utilização de pó de basalto comumente descartado em pedreiras como componente de telhas shingle se mostra interessante ao dar um novo destino ao pó de basalto por causa das características químicas da fase anortita encontrada nele, além do aproveitamento de um material subutilizado.

Palavras-chave: basalto; telhas; resistência térmica.

ABSTRACT

Basalt is an igneous rock often found in southern Brazil. Due to its characteristics, it is widely used in civil construction, mainly in paving and molding. The main objective of this work is to present a noble destination for basalt powder, a by-product of quarries and which ends up being, many times, underused. The solution to this would be to use it in the construction of shingle roof. The basalt was collected in natura, crushed and sieved. It was subjected to chemical characterization tests (FTIR, DRX and Thermal Analysis) and mechanical characterization tests (tensile test) to analyze the possibility in tile construction. In the DRX and in the FTIR the presence of the anorthite phase was observed and in the Thermal Analysis the melting of the material was noticed. Basalt was also incorporated into a prototype shingle roof to perform tensile tests. Regarding the chemical characterization tests, the results were positive, as the basalt used contained materials suitable for its use in tiles, having satisfactory resistance, in addition to the materials showing good thermal resistance. However, the mechanical characterization tests were different than expected, as the samples with basalt broke. The use of basalt powder, commonly discarded in quarries, as a component of shingle roof is interesting in giving a new destination to basalt powder due its chemical characteristics of the anorthite phase found in it, in addition to the use of an underutilized material.

Keywords: basalt; roof tiles; thermal resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de uma telha <i>shingle</i> .	17
Figura 2 - Pedreira Motter.	19
Figura 3 - Equipamento de FTIR-MIR, modelo Frontier, da Perkin Elmer.	20
Figura 4 - Equipamento de DRX, modelo Miniflex 600, da marca Rigaku.	21
Figura 5 - Equipamento de FRX, modelo EDX7000, da marca Shimadzu.	22
Figura 6 - Equipamento de Análise Térmica, modelo SDT Q-600, da marca TA Instruments.	23
Figura 7 - Amostras de papelão com manta asfáltica.	24
Figura 8 - Texturômetro, modelo TA.XTplus/50, marca Stable Micro System.	24

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Leitura da amostra escura peneirada em 150 mesh.....	25
Gráfico 2 - Leitura da amostra escura peneirada em 200 mesh.....	26
Gráfico 3 - Leitura da amostra vermelha peneirada em 150 mesh.....	26
Gráfico 4 - Leitura da amostra vermelha peneirada em 200 mesh.....	27
Gráfico 5 - Leitura da amostra escura peneirada em 150 mesh em comparação com a anortita.	28
Gráfico 6 - Leitura da amostra escura peneirada em 200 mesh em comparação com a anortita.	28
Gráfico 7 - Leitura da amostra vermelha peneirada em 150 mesh em comparação com a anortita.....	29
Gráfico 8 - Leitura da amostra vermelha peneirada em 200 mesh em comparação com a anortita.....	29
Gráfico 9 - DRX de uma amostra de anortita.	31
Gráfico 10 - Leitura das amostras na faixa de 4.000 a 500 cm ⁻¹	32
Gráfico 11 - Leitura das amostras na faixa de 1.500 a 500 cm ⁻¹	33
Gráfico 12 - Análise do FTIR em uma amostra de anortita.	34
Gráfico 13 - DSC-TGA da perda de massa de uma amostra de basalto vermelho. ...	35
Gráfico 14 - DSC-TGA do ponto de fusão de uma amostra de basalto vermelho.	36
Gráfico 15 - Tensão x deformação da amostra sem basalto.....	37
Gráfico 16 - Tensão x deformação da amostra de basalto vermelho.....	38
Gráfico 17 - Tensão x deformação da amostra de basalto escuro.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da amostra escura no teste FRX.....	30
Tabela 2 - Composição da amostra vermelha no teste FRX.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Central de Análise
DRX	Difração de Raio X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
FRX	Fluorescência de Raio X
FTIR	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
MPa	Megapascal
TG	Técnicas de Gravimetria
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Problema	12
1.2	Justificativa.....	12
2	OBJETIVOS	13
2.1	Objetivo geral.....	13
2.2	Objetivos específicos.....	13
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1	Formação de rocha ígnea	14
3.2	Basalto	14
3.3	Anortita.....	15
3.4	Construção civil.....	15
3.5	Tipos de telha	17
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1	Testes de caracterizações químicas.....	19
4.1.1	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .	20
4.1.2	Difração de Raio X (DRX)	20
4.1.3	Análise térmica	22
4.2	Testes de caracterizações mecânicas	23
4.2.1	Ensaio de tração.....	23
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
5.1	Testes de caracterizações química.....	25
5.1.1	Difração de Raio X (DRX)	25
5.1.2	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) .	31
5.1.3	Análise térmica	34
5.2	Teste de caracterizações mecânicas	37
5.2.1	Teste de tração.....	37
6.	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Rochas ígneas ou magmáticas são o tipo mais abundante na crosta terrestre. Elas recebem esse nome devido à formação no interior da Terra a partir da fusão do magma (GILL, 2014). Algumas de suas aplicações são na construção civil, pavimentação de estradas, fins ornamentais, entre outros.

O basalto é uma rocha ígnea bastante encontrada na região sul do Brasil. É composto por minerais de silício, alumínio e ferro. Devido as suas características, é muito utilizado na construção civil, principalmente em pavimentações e moldagens (SCHIAVON; REDONDO; YOSHIDA, 2007). Entretanto, podem existir destinações mais nobres para esta rocha, como ser utilizada para a melhora da resistência térmica de residências, como em telhados, por exemplo.

A casa própria é um sonho de grande parte da população brasileira na atualidade, entretanto, o preço se torna um empecilho. Além disso, devido ao aquecimento global, é observado um aumento no fenômeno das chuvas de granizo no Brasil (PINHEIRO, 2021). Logo, a resistência que o telhado oferece se torna um fator importante.

Ademais, outro problema atual propiciado pelo aquecimento global são as mudanças bruscas de temperatura, além de uma grande amplitude térmica ao longo do ano. Sendo assim, o material para construir a casa deve ser capaz de proteger do frio e do calor, proporcionando o bem-estar.

Com relação ao campo da construção civil, ele é um dos mais importantes para a economia do Brasil, influenciando a qualidade de vida e a infraestrutura da sociedade (MONTEIRO FILHA; COSTA; ROCHA, 2010). Sendo assim, existe uma grande preocupação em relação à adequação com o tipo de material a ser utilizado.

Portanto, este trabalho propõe uma observação a caracterizar quimicamente a rocha de basalto para observar se a mesma tem alguma fase que possa ser prejudicial ao ser humano e, não sendo prejudicial, observar as propriedades físicas do basalto em uma telha do tipo shingle. Ou seja, existe a proposta de utilizar um subproduto do processo da quebra das rochas, geralmente redirecionado a aterros sanitários, na construção de telhas, dando assim um destino mais nobre ao basalto

1.1 Problema

Devido às mudanças climáticas que o planeta vem enfrentando devido ao aquecimento global, existe a necessidade de adaptação nos telhados de construções para se adequarem à essas transformações, como o aumento de incidências de chuva de granizo e mudanças abruptas de temperatura. Outro fator a ser considerado é a possibilidade de um destino mais nobre para o basalto, que é uma rocha extremamente abundante na região onde é desenvolvida essa pesquisa, que tem o seu pó descartado na grande maioria das vezes.

1.2 Justificativa

A principal motivação para esse estudo é agregar um valor maior à rocha basalto, uma vez que ela é muito abundante na região sul do Brasil. Entretanto, o seu uso acaba sendo muito limitado, mesmo não tendo um custo elevado. Uma alternativa para esse problema seria no campo da construção civil, com enfoque nos telhados.

Outro motivo para a realização desse trabalho, seria auxiliar na busca por soluções para alguns problemas causados na construção civil pelo aquecimento global, como o aumento das chuvas de granizo e as mudanças bruscas de temperatura, devido à algumas características do basalto, um material cerâmico resistente, que sendo usado como telhado pode vir a solucionar esses problemas mencionados.

Por fim, pode-se mencionar que estudos envolvendo a possibilidade de toxicidade ao ser humano propiciada pelo basalto devem ser levados em consideração, para que esse material possa ser utilizado em residências.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a possibilidade da utilização do pó de rochas do tipo basalto como elemento de cobertura em residências.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar quimicamente o basalto;
- Verificar se há uma fase presente no basalto, que a literatura menciona a sua toxicidade.
- Traçar um perfil da resistência mecânica do basalto através de ensaios mecânicos;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Formação de rocha ígnea

Rochas ígneas (do grego, *igneus*, incandescente) são definidas como aquelas que se formam no interior da Terra através de fusão, mais especificamente na parte do magma. De maneira geral, é a mistura de líquido e sólidos em suspensão que ficam no interior da Terra. Após essa fusão, o magma passa por um processo lento de esfriamento, formando as rochas ígneas. Essas rochas também são denominadas de magmáticas devido a sua origem (GILL, 2014).

Gill (2014) ainda destaca que uma das maneiras de se identificar uma rocha ígnea é por meio de análises geoquímicas quantitativas, fornecendo seus principais constituintes químicos. Também pode ser identificada através de uma lista de materiais que está presente na rocha, aliando estimativas qualitativas ou quantitativas de suas proporções.

Existem duas classificações diferentes para as rochas magmáticas: extrusivas e intrusivas. As extrusivas, ou vulcânicas, são aquelas lançadas para a superfície por meio de erupções vulcânicas, como, por exemplo o riolito, basalto, andesito e obsidiana. São encontradas na construção civil, na pavimentação de estradas, como rochas ornamentais e em diversos outros lugares. Já as intrusivas (também denominadas de plutônicas) têm a sua formação sendo cristalizadas na superfície, como o granito, feldspato, turmalina e diorito. Podem ser utilizadas como rochas ornamentais, na construção civil, fabricação de vidro, dentre outras (JERRAM; PETFORD, 2014).

3.2 Basalto

Como mencionado anteriormente, o basalto é uma rocha ígnea vulcânica, sendo a mais abundante da superfície da Terra. Sua composição se dá por minerais de silício, alumínio e ferro, nas formas de piroxênios (augita), plagioclásios (labradorita) e magnetita (SCHIAVON; REDONDO; YOSHIDA, 2007). Conforme consulta em uma pedreira na cidade de Francisco Beltrão, um metro cúbico de basalto

(equivalente a um valor em torno de 2.900 kg, afinal a densidade do basalto é de 2,9 kg/m³), tem valor de R\$ 80,00.

De acordo com Schiavon, Redondo e Yoshida (2007), as principais características atribuídas ao basalto são a sua alta resistência às altas temperaturas, dureza, durabilidade e coloração escura. Devido à essas especificidades, esse material é muito utilizado em locais que necessitam de moldagem, como tubos e lajes. Na construção civil, os principais locais onde a pedra pode ser encontrada são em agregados asfálticos para pavimentação, ferrovias e concretos (AGASNALLI *et al.*, 2022). Também é bastante utilizada como pedra decorativa em paredes, calçadas e escadas.

Outra maneira de utilizar o basalto é por meio da fibra de basalto. Ela é feita quando o material é aquecido em temperaturas entre 1.450 até 1.500 °C e, após sair do forno, é enrolado em grandes carretéis. Apenas basaltos ácidos podem ser transformados em fibra e podem ser usados para reforçar concretos e argamassas (RUOCCO, 2016).

3.3 Anortita

A anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) é um mineral constituído de alumínio e silicato de cálcio. Ela é do grupo dos feldspatos chamado plagioclásios, devido ao fato de apresentar a presença de sódio ou cálcio e ter uma estrutura cristalina triclinica. Algumas das características do mineral são alta resistência a choque térmico, baixo coeficiente de expansão térmica e alta resistência à altas temperaturas (ZAIYOU *et al.*, 2016).

Algumas das aplicações da anortita são em pavimentos cerâmicos, placas de fixação em fraturas e encapsulamento de remédios. Além disso, é possível citar seu uso na bioengenharia, aplicações clínicas, reparação de cartilagens e na indústria eletroeletrônica (GONÇALVES, 2019).

3.4 Construção civil

O campo da construção civil tem um grande impacto no desenvolvimento econômico e social do brasileiro, pois tem uma ligação direta com a qualidade de vida e a infraestrutura de suas moradias (MONTEIRO FILHA; COSTA; ROCHA, 2010).

Logo, existe uma grande preocupação na escolha dos materiais a serem utilizados na construção civil.

Alguns fatores que devem ser levados em consideração para a seleção dos materiais são a praticidade, a eficiência do material, o benefício econômico, rentabilidade e a sustentabilidade. Ademais, destaca-se também a disponibilidade geográfica do material na região, visando um menor custo de transporte (RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2006).

Um dos principais aspectos da construção civil é a construção de telhados. Muitos estudos vêm sendo desenvolvidos devido aos problemas recentes como o aquecimento global e as mudanças climáticas bruscas. Logo, buscam-se materiais que possam reduzir o acúmulo de energia, como também resistir ao frio (SILVA, 2019).

Portanto, alguns dos requisitos para selecionar um material na construção de um telhado são a resistência térmica, conforto oferecido, escoamento de água e resistência a erosão (sol, vento e poeira). Destacam-se também as diferentes estruturas possíveis para facilitar o escoamento de água, as quais variam de acordo com o clima da região.

As telhas podem ser construídas com diversos materiais: barro, cimento-amianto, chapas de alumínio, zinco, alumínio, vidro translúcido, entre outros (SEVEGNANI; GHELFI FILHO; SILVA, 1994). Nesse estudo, se destaca principalmente o uso de rochas.

De acordo com o IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional), no primeiro modelo de telha introduzida no Brasil, durante o período de colonização portuguesa, já era possível observar o uso de rochas. Desse período histórico, destacam-se as telhas de material cerâmico proveniente da Península Ibérica e as telhas de ardósia.

Hodiernamente, pode-se mencionar o uso do concreto, com rochas como basalto em sua composição, para a construção de telhas (SOUZA, 1982). Outro campo onde as rochas são aplicadas é no de paredes finas para divisórias, onde a lâ de rocha é utilizada devido à sua resistência térmica e isolamento acústico (VELOSA; FANGUEIRO, MENDONÇA, 2013).

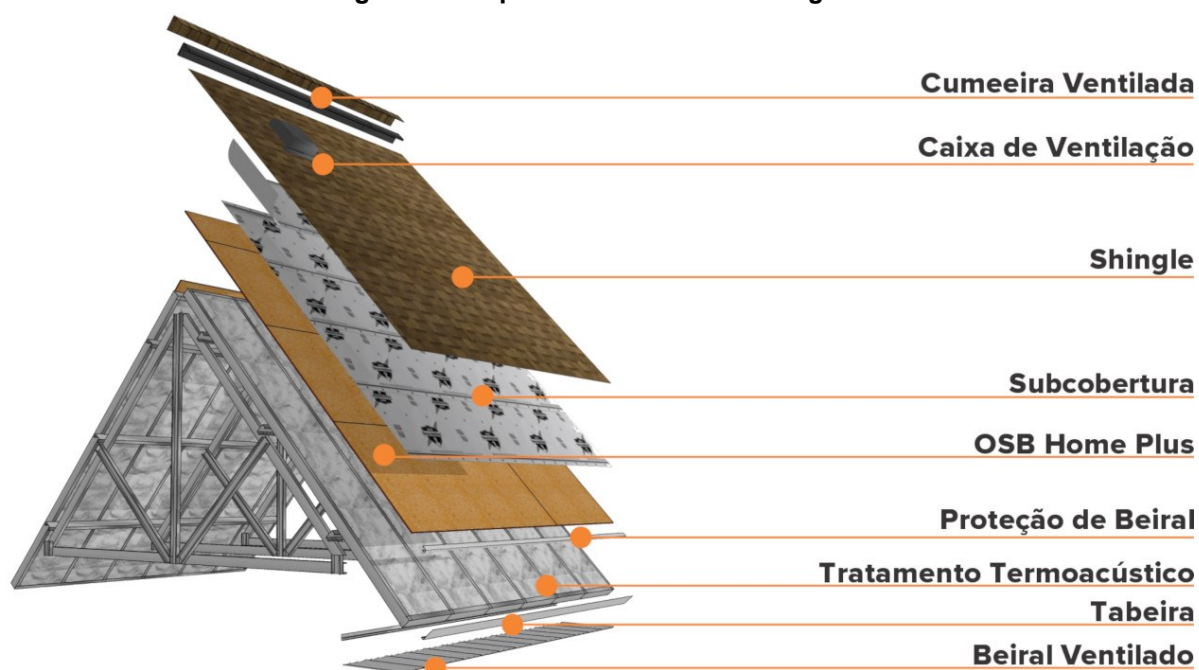
3.5 Tipos de telha

No campo da construção civil, um fator muito importante é a escolha da telha. Alguns dos elementos a serem levados em consideração são a resistência térmica, dureza, conforto proporcionado, além da questão estética.

As telhas de cerâmica são o tipo mais comum usado pela construção civil. Elas são construídas a partir da argila, junto com minerais plásticos e não plásticos. São materiais com afinidade com água e porosidade interna, logo tem uma boa absorção (DIAS; TOFFOLI; AGOPYAN, 2004). Os autores também destacam sua resistência mecânica, suficiente para os usos propostos.

O principal foco desse trabalho são as telhas *shingle* (Figura 1), sendo que sua utilização é mais comumente encontrada na América do Norte, devido às condições climáticas propícias. É um sistema de cobertura constituída por uma estrutura de suporte, base de madeira, subcobertura, as telhas, um sistema de ventilação e uma manta de fibra de vidro.

Figura 1 - Esquema de uma telha *shingle*



Fonte: Steel Home Construtora (2022)¹

Essas telhas são mais leves do que as convencionais. Logo, proporcionam economia na estrutura do telhado, como também a possibilidade da instalação em

¹ Disponível em: <https://steelhomeconstrutora.com.br/telhados-shingle/>

diversos tipos de arranjo (curvo, plano e recortado). Além disso, suportam uma amplitude de temperaturas, ações de chuva, granizo e vento devido à sua alta resistência mecânica (CRESTAN; LIMA, 2022).

4. MATERIAL E MÉTODOS

A coleta do material foi feita na Pedreira Motter, localizada na cidade de Francisco Beltrão, Paraná, onde a empresa permitiu que fosse coletado o pó de basalto. A Figura 2 apresenta essas pedras que são utilizadas na construção civil e um dos subprodutos dessa pedra é o pó, do rejeito dessa pedreira.

Figura 2 - Pedreira Motter



Fonte: Autoria Própria (2022)

Após a coleta, o pó passou por uma etapa de preparação. Para isso, ele foi lavado e separado em peneiras com variação de 20 até 160 mesh. O material coletado foi dividido em pó de basalto escuro e pó de basalto vermelho, para que fosse observado a diferenciação dentre os dois materiais.

Em seguida, as pedras foram enviadas para a cidade de Guarapuava, Paraná, onde foram moídas no laboratório de Engenharia Civil da UTFPR local. Após todos esses processos, o pó foi enviado para o processo de caracterização.

4.1 Testes de caracterizações químicas

Para que sejam conhecidas as propriedades do basalto, são realizadas caracterizações químicas, as quais foram feitas nos laboratórios da Central de Análise (CA), localizada na UTFPR, campus de Pato Branco e no Laboratório de Instrumentação e Análises da Unesp de Presidente Prudente.

4.1.1 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

O FTIR ou Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier, pode ser dividido em NIR (próximo) e MIR (médio), onde é medida a absorbância e a refletância, por meio da quantidade de moléculas quantizadas. O MIR opera na faixa de 200 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} e o NIR opera na faixa de 4.000 a 12.000 cm^{-1} . Para o trabalho, utilizou-se o MIR. Os testes com FTIR foram realizados na Central de Análise (CA), localizada na UTFPR de Pato Branco. O modelo do MIR é Frontier, da Perkin Elmer (Figura 3), sendo operado na faixa de 200 cm^{-1} a 4.000 cm^{-1} , com resolução de 8 cm^{-1} e 100 scans.

Figura 3 - Equipamento de FTIR-MIR, modelo Frontier, da Perkin Elmer



Fonte: Perkin Elmer (2022)².

Para realizar o teste, a amostra foi introduzida no aparelho e a radiação infravermelha foi infringida na amostra, onde uma radiação foi absorvida e outra foi transmitida. O resultado dos testes foi obtido na extensão .csv.

4.1.2 Difração de Raio X (DRX)

A difração de Raio X auxilia a observação da presença de estruturas cristalinas ou amorfas nas amostras. Ao ser incidido na amostra, o feixe de Raios X interage com os átomos, gerando o fenômeno da difração.

² Disponível em: <https://perkinelmer.com.br/product/spectrum-3-mir-std-dtc-kbr-ld-l1280133>

Esse fenômeno foi estudado pela primeira vez por William L. Bragg, no século XX, que observou que em estruturas cristalinas as ondas de Raio X são refletidas através de planos paralelos no interior do átomo, ou seja, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Isso é traduzido matematicamente por meio da Lei de Bragg, na equação (1) a seguir:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

Onde: 'n' representa a ordem de difração, 'λ' significa o comprimento de onda dos Raios X incidentes, 'd' é a distância interplanar e 'θ' é o ângulo de difração.

Para realizar esses testes foi utilizado modelo Miniflex 600, Rigaku (Figura 4). As amostras foram trituradas e peneiradas em uma peneira de 180 mesh. Em seguida foram compactadas e levadas ao difratômetro, onde aconteceu a análise, operando numa faixa de varredura de 10° até 80° e velocidade de varredura de 2°/min.

Figura 4 - Equipamento de DRX, modelo Miniflex 600, da marca Rigaku



Fonte: Rigaku (2022)³

Os testes foram realizados na Central de Análise (CA), localizada na UTFPR de Pato Branco. Nos testes foi obtido um padrão da difração dos materiais cristalinos. Os resultados foram enviados nas extensões .csv e .raw.

Para complementar os testes de DRX, também foram realizados testes de Fluorescência de Raio X (FRX). O FRX é uma técnica de caracterização elementar

³ Disponível em: <https://www.rigaku.com/pt-br/products/xrd/miniflex>

através da excitação da amostra por meio de Raio-X e com isso, ele averigua a energia característica das estruturas eletrônicas do átomo.

O teste de FRX foi realizado no Laboratório de Instrumentação e Análises da Unesp de Presidente Prudente. O modelo utilizado foi EDX7000, da marca Shimadzu (Figura 5).

Figura 5 - Equipamento de FRX, modelo EDX7000, da marca Shimadzu



Fonte: Shimadzu (2022)⁴

4.1.3 Análise térmica

A análise térmica possibilita de propriedades como a estabilidade térmica, perda de massa, fusão, cristalização, dentre outras análises.

Os testes de análise térmica utilizados neste trabalho, dividiram-se nos tipos TG (técnicas de gravimetria) e DSC (calorimetria exploratória diferencial), que foram realizados de maneira simultânea. Com os testes, foi possível determinar a perda de massa durante seu tratamento térmico e seu ponto de fusão.

Para passar por esse teste, a amostra moída foi um alfomarez de ágata e peneirada em uma peneira de 200 mesh. A faixa de varredura da operação foi de 25°C até 1.250°C, com um fluxo de 5 ml/min. O modelo utilizado para essa análise foi SDT

⁴ Disponível em: https://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/elemental/raios_x/eds/edx7000_8000-1.shtml

Q-600, da TA Instruments (Figura 6). Os testes de análise térmica foram realizados no Laboratório de Instrumentação e Análises da Unesp de Presidente Prudente.

Figura 6 - Equipamento de Análise Térmica, modelo SDT Q-600, da marca TA Instruments



Fonte: TA Instruments (2022)⁵

4.2 Testes de caracterizações mecânicas

Para avaliar a capacidade do basalto ser utilizado como material arquitetônico, são necessários alguns testes mecânicos, realizados na UTFPR de Francisco Beltrão, no Laboratório de Análises (LabAna), para analisar propriedades como tração e deformação.

4.2.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração demonstra como o material é tracionado. Sabe-se que a deformação é promovida de maneira uniforme no corpo até que seja atingida sua carga máxima. Logo ele é importante para demonstrar a tensão máxima suportada do basalto. Para realizar esse ensaio, foi necessário submeter o corpo de prova a uma força contínua. A deformação sofrida foi medida para fazer comparações com as tensões.

As amostras foram construídas com a intenção de replicar uma telha shingle comercial, que é um sistema com uma estrutura de suporte, base de madeira,

⁵ Disponível em: <https://www.azom.com/equipment-details.aspx?EquipID=7075>

subcobertura, as telhas, um sistema de ventilação e uma manta. Para isso, utilizou-se moldes de papelão 2,5 cm x 7 cm (Figura 7), cobertas com manta asfáltica de três tipos diferentes: sem basalto, com basalto avermelhado e com basalto escuro. Foi utilizado basalto peneirado em peneiras de 150 mesh. A manta asfáltica foi escolhida devido a sua facilidade de trabalhar em comparação com o asfalto derretido. Se utilizou 3 tipos de basalto para observar as diferenças dentre as propriedades mecânicas das amostras.

Figura 7 - Amostras de papelão com manta asfáltica



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para realizar os testes, utilizou-se um texturômetro modelo TA.XTplus/50 da marca Stable Micro System (Figura 8).

Figura 8 - Texturômetro, modelo TA.XTplus/50, marca Stable Micro System



Fonte: Stable Micro System (2022)⁶.

⁶ <https://www.stablemicrosystems.com/TAXTplus.html>

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são divididos entre os testes de caracterizações químicas e os de caracterizações mecânicas. Salienta-se que as informações obtidas nos testes são complementares e a grande maioria dos testes trabalha de maneira simultânea.

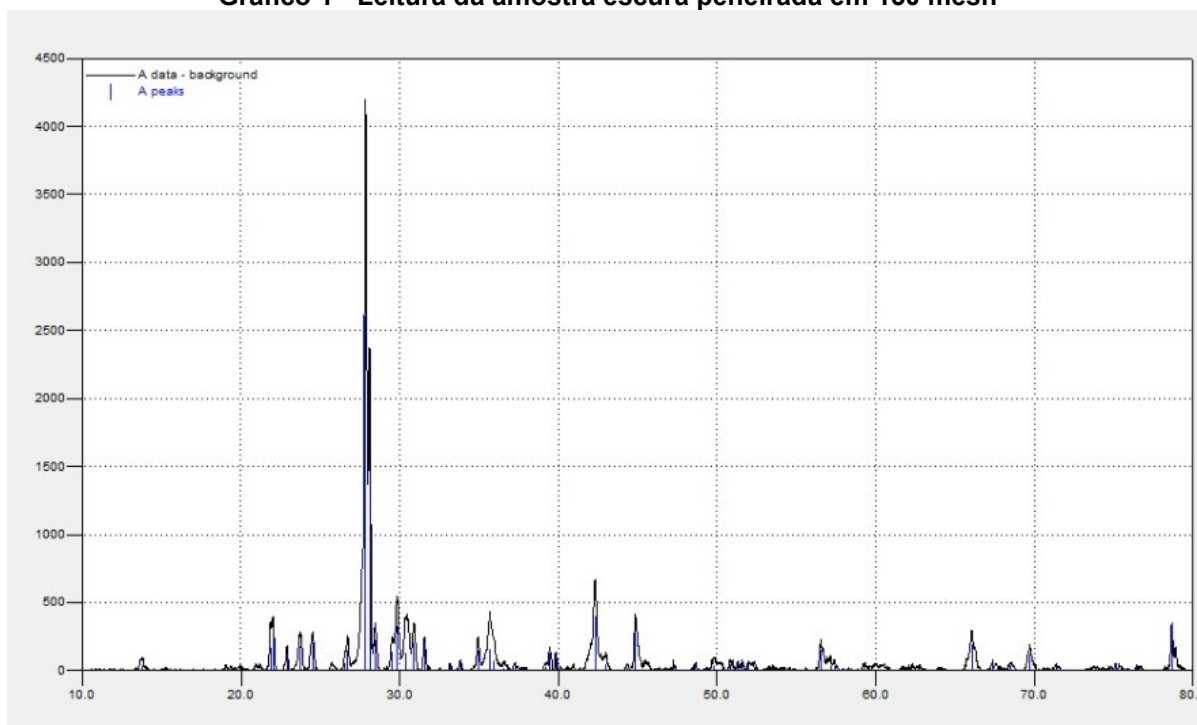
5.1 Testes de caracterizações química

Os testes se dividem em FTIR, Difração de Raio-X e Análise Térmica. Eles foram realizados no intuito de caracterizar quimicamente a amostra. Como foi uma amostra coletada *in natura* e não um material fabricado, deve-se observar que não é possível caracterizar todas as fases da amostra. Logo, nesse estudo foram destacadas as fases mais relevantes.

5.1.1 Difração de Raio X (DRX)

Primeiramente, com os resultados obtidos no teste de DRX, utilizou-se o software *Crystallographica Search-Match* para realizar as análises. O Gráfico 1 mostra a leitura da amostra escura peneirada em 150 mesh.

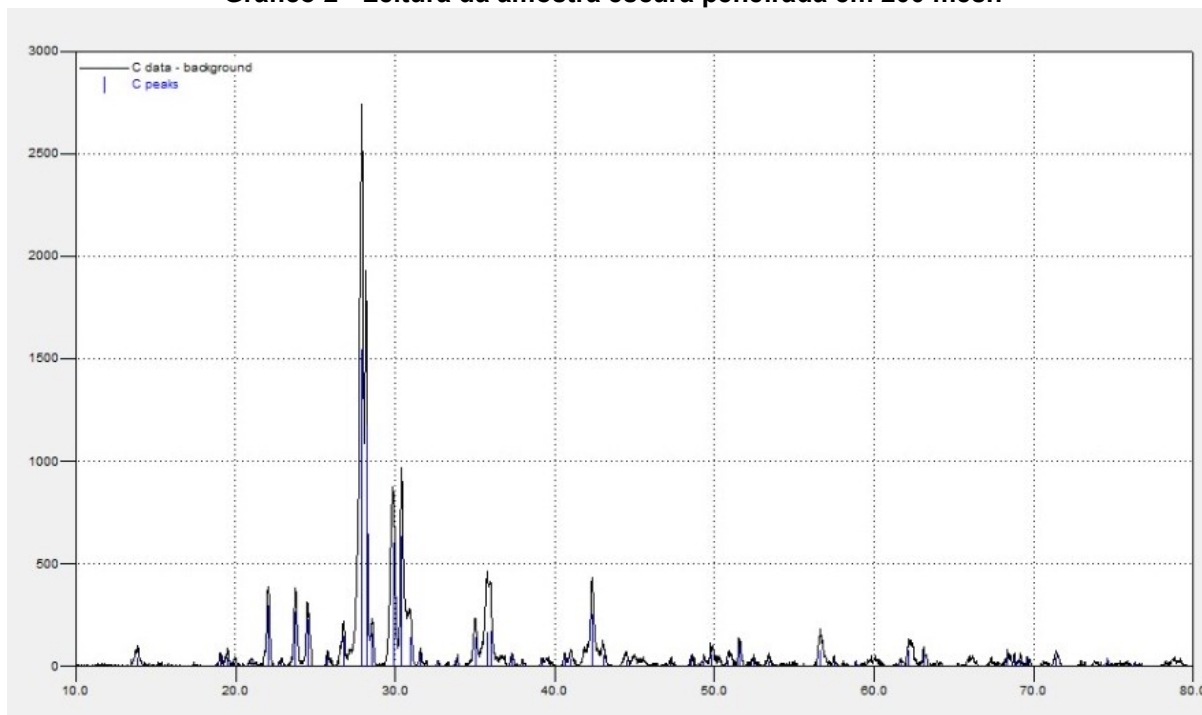
Gráfico 1 - Leitura da amostra escura peneirada em 150 mesh



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 2 mostra a leitura da amostra escura peneirada em 200 mesh.

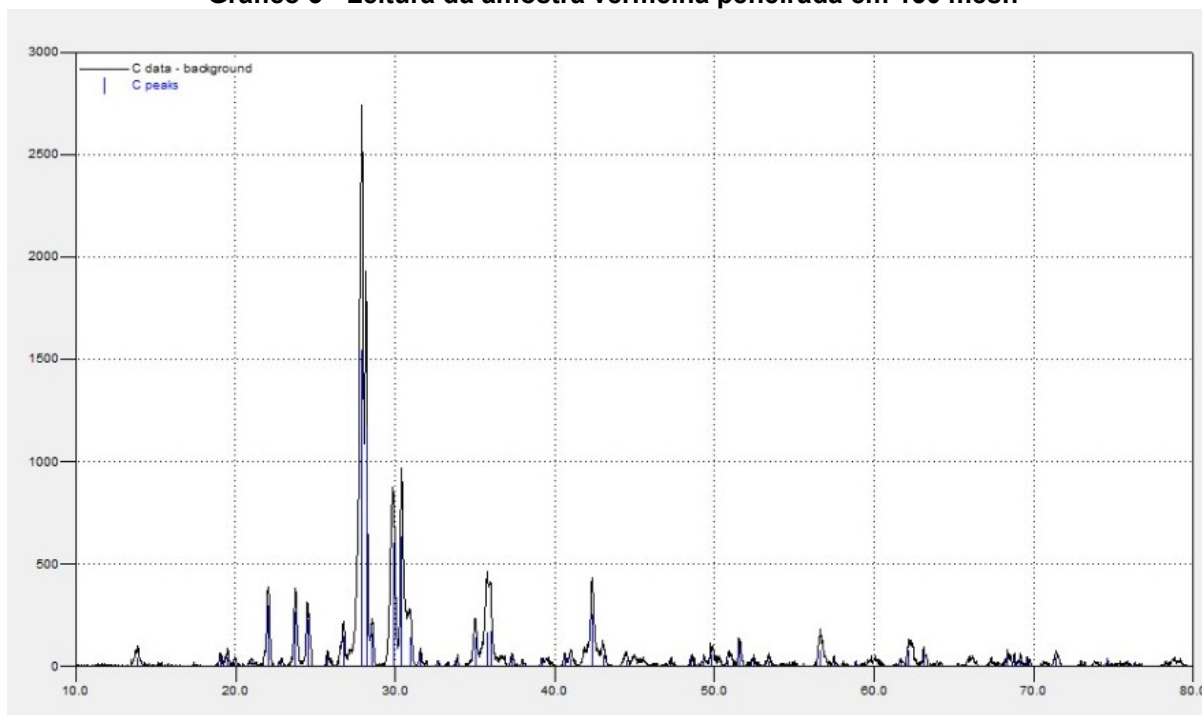
Gráfico 2 - Leitura da amostra escura peneirada em 200 mesh



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 3 mostra a leitura da amostra vermelha peneirada em 150 mesh.

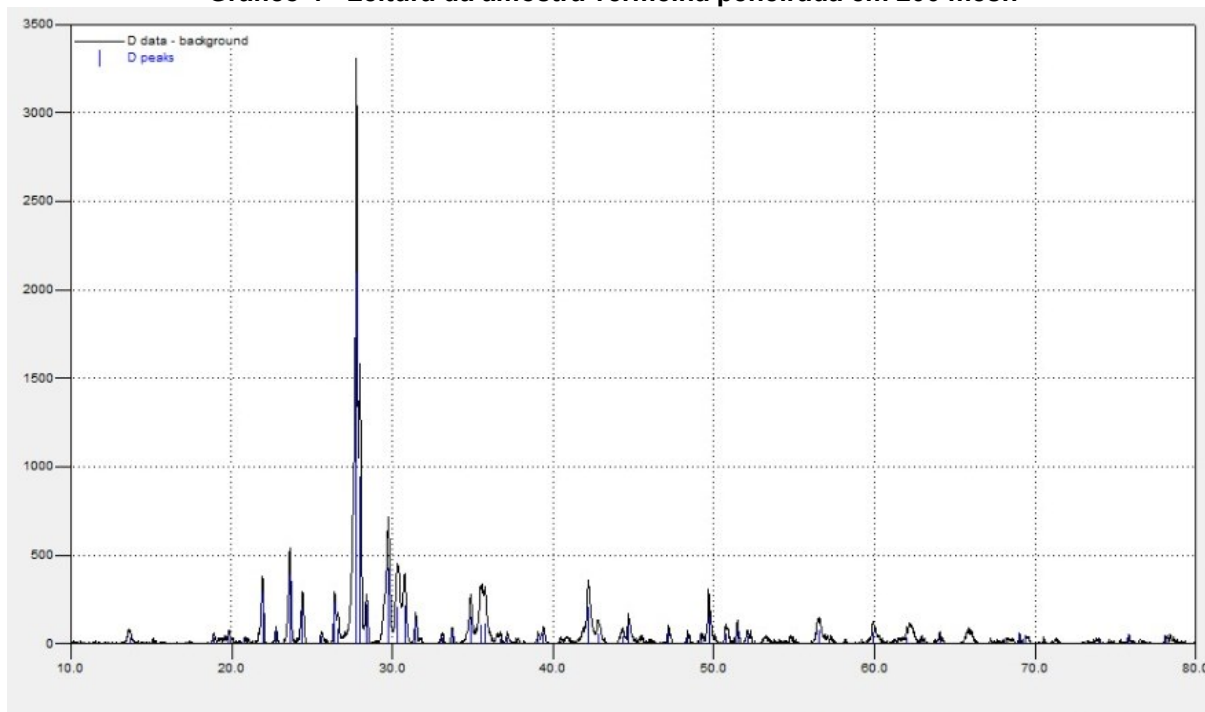
Gráfico 3 - Leitura da amostra vermelha peneirada em 150 mesh



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 4 mostra a leitura da amostra vermelha peneirada em 200 mesh.

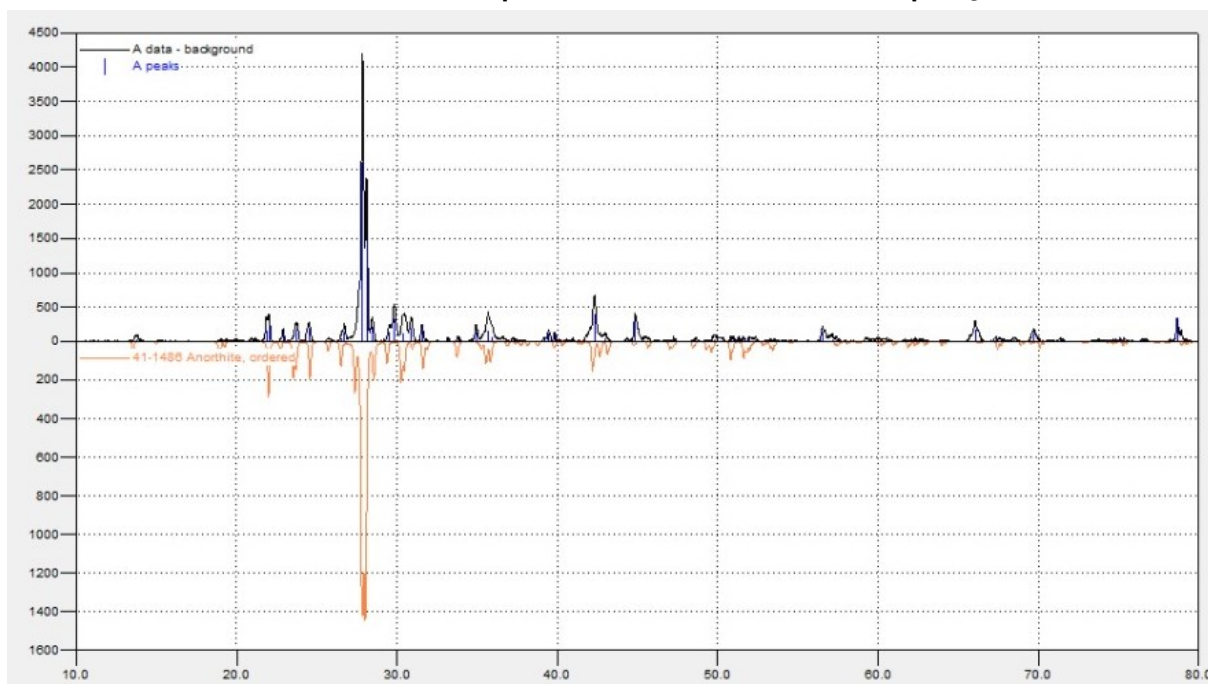
Gráfico 4 - Leitura da amostra vermelha peneirada em 200 mesh



Fonte: Autoria Própria (2022)

A partir das leituras iniciais, percebeu-se as grandes semelhanças entre gráficos de DRX obtido nos dois tipos de basalto. Então, se realizou a análise comparando suas ondas com o material disponível na base de dados do *software*. Com isso, foi feita a comparação por meio dos gráficos no Crystallographica Search-Match e percebeu-se a possibilidade da presença de uma fase anortita. O Gráfico 5 mostra a leitura para amostra escura peneirada em 150 mesh.

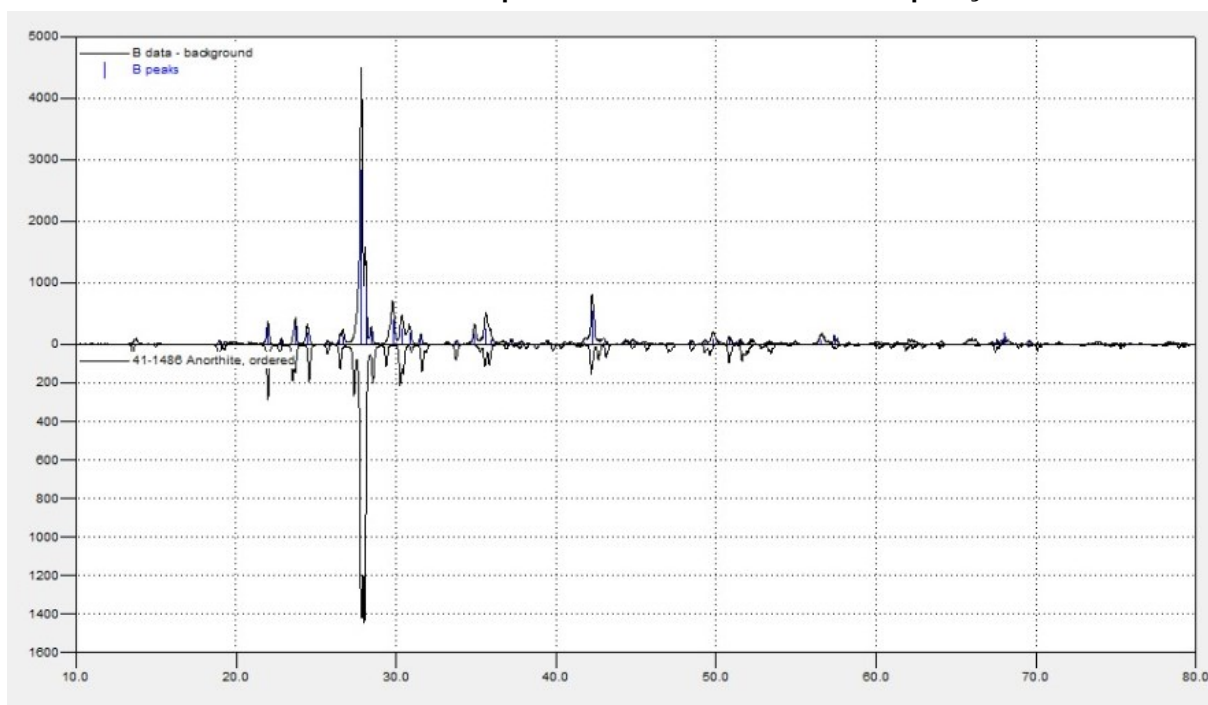
Gráfico 5 - Leitura da amostra escura peneirada em 150 mesh em comparação com a anortita



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 6 mostra a leitura para amostra escura peneirada em 200 mesh.

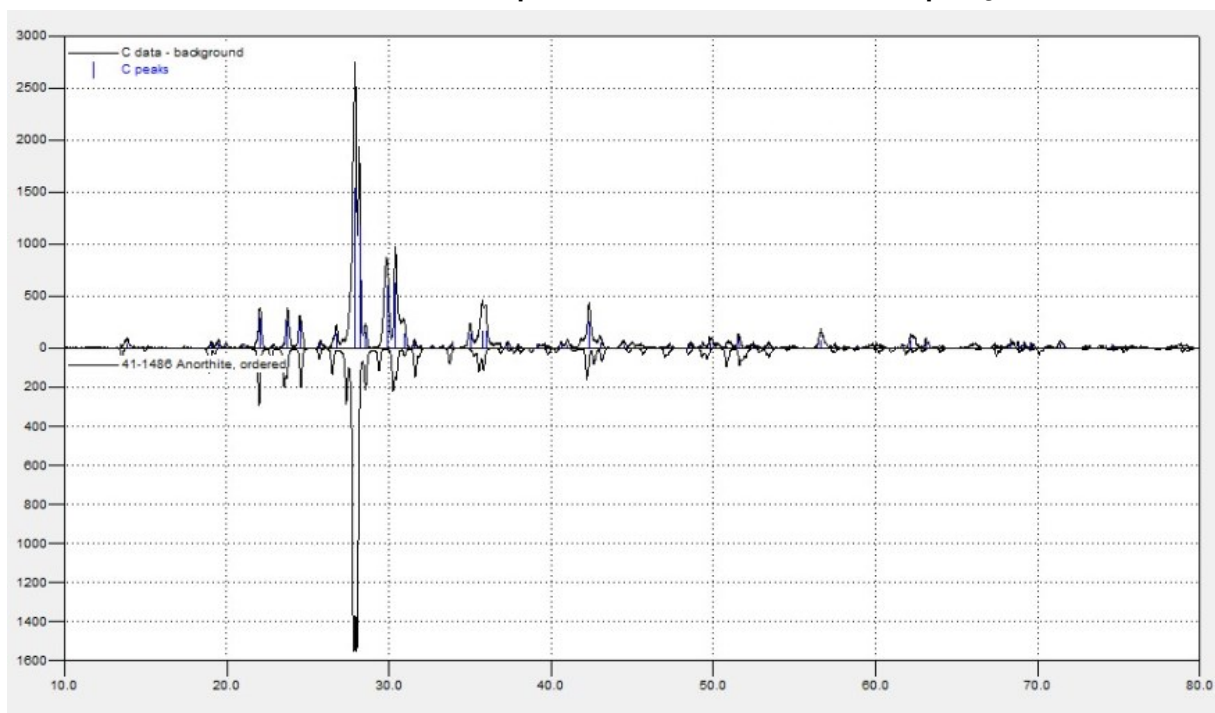
Gráfico 6 - Leitura da amostra escura peneirada em 200 mesh em comparação com a anortita



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 7 mostra a leitura para amostra vermelha peneirada em 150 mesh.

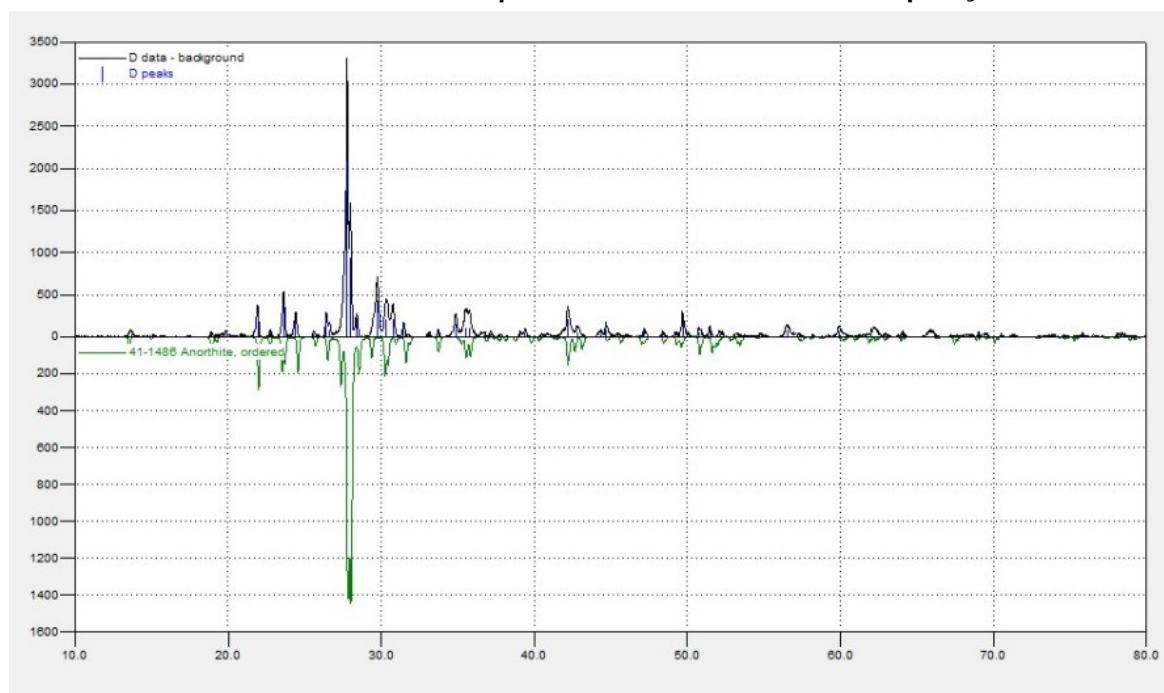
Gráfico 7 - Leitura da amostra vermelha peneirada em 150 mesh em comparação com a anortita



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 8 mostra a leitura para amostra vermelha peneirada em 200 mesh.

Gráfico 8 - Leitura da amostra vermelha peneirada em 200 mesh em comparação com a anortita



Fonte: Autoria Própria (2022)

Com isso, fortalece a hipótese da presença de anortita na amostra de basalto analisada. Em Schiavon, Redondo, Yoshida (2007), é observado em um Difratoograma de raios X de basalto, a fase anortita em uma região similar ao que foi observado no presente trabalho.

Para corroborar com a hipótese da fase anortita, foi realizado o teste de FRX (fluorescência de Raio-X), na UNESP de Presidente Prudente, para determinar os compostos presentes nas amostras.

Foram realizadas triplicatas para uma amostra com coloração escura e uma com a coloração vermelha (ambas peneiradas em peneiras de 150 mesh). Os resultados dos FRX estão expostos na Tabela 1 e 2.

Tabela 1 - Composição da amostra escura no teste FRX

Composto	Presença na amostra
SiO ₂	44,008
Fe ₂ O ₃	15,116
Al ₂ O ₃	13,500
Na ₂ O	9,864
CaO	9,800
MgO	3,337
TiO ₂	,678
Outros	2,617

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 2 - Composição da amostra vermelha no teste FRX

Composto	Presença na amostra
SiO ₂	44,678
Fe ₂ O ₃	15,142
Al ₂ O ₃	13,773
CaO	10,606
Na ₂ O	8,555
MgO	3,142
TiO ₂	1,733
Outros	2,371

Fonte: Autoria Própria (2022)

A partir dos testes de FRX, a hipótese da presença de anortita se fortalece devido à grande presença de SiO₂, uma vez que uma das ligações mais importantes

do composto da anortita é a ligação dentre silício e oxigênio. A presença de Al_2O_3 também fortalece a hipótese da amostra ter a presença de anortita, já que essa também é uma das ligações presentes na anortita (CREOPANI *et al.*, 2001).

Para meio de comparação, foi consultado em uma base de dados, análises de DRX da anortita, demonstrado no Gráfico 9.



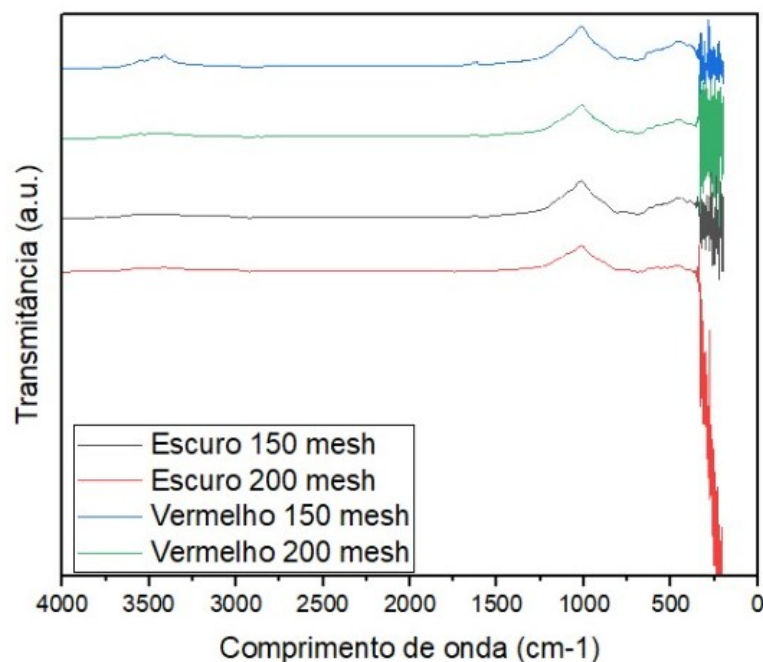
Fonte: RRUFF (2022)⁷

Considerando a forte presença de ruídos na amostra utilizada nessa pesquisa, é possível observar semelhanças de picos com a amostra, principalmente na faixa de 30°.

5.1.2 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A partir dos resultados disponibilizados, foi construído o Gráfico 10, construído no *software Origin*, com os eixos representando o tamanho da onda e da transmitância na faixa de 4.000 a 500 cm^{-1} .

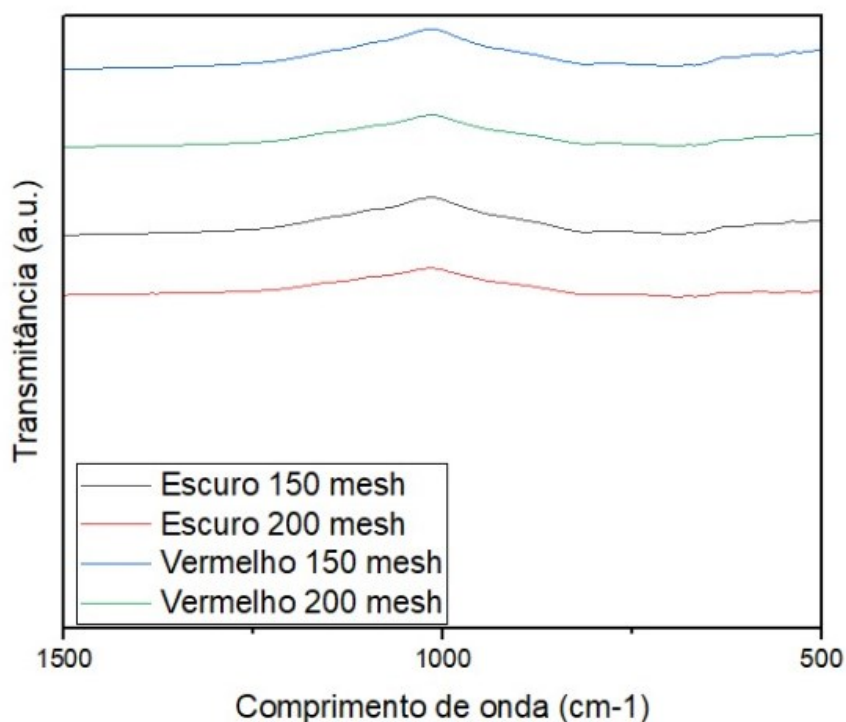
⁷ Disponível em: <https://rruff.info/anorthite/display=default/R040059>

Gráfico 10 - Leitura das amostras na faixa de 4.000 a 500 cm^{-1} 

Fonte: Autoria Própria (2022)

A priori, nota-se que a transmitância começa a se manifestar por volta do comprimento de onda de 1000 cm^{-1} , tendo seus maiores picos na faixa de 500 cm^{-1} , porém, a grande maioria desses picos são caracterizados como ruídos. Logo, a onda que mais interessa no estudo é a de 1000 cm^{-1} .

O Gráfico 11, a seguir, apresenta a onda de interesse na faixa de 1.500 a 500 cm^{-1} .

Gráfico 11 - Leitura das amostras na faixa de 1.500 a 500 cm^{-1} 

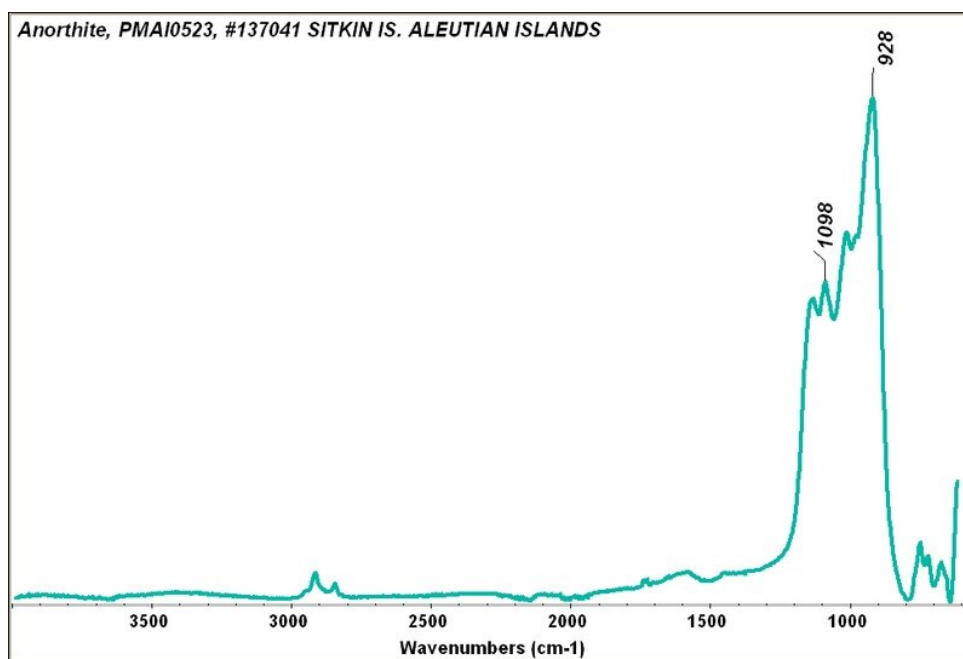
Fonte: Autoria Própria (2022)

De acordo com Saridemir e Bulut (2021), em um composto de basalto foi encontrado um sinal na mesma faixa de comprimento de onda em uma análise de FTIR, que pode representar silício, oxigênio e alumínio.

Além disso, em um teste de FTIR com fibra de basalto, foi encontrado uma ligação dupla de enxofre com oxigênio de um composto de anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), um mineral bastante comum em rochas ígneas (como o basalto) por volta da mesma área de comprimento de onda (FU *et al.*, 2022).

Com essas informações da literatura, parte-se para base de informações, a fim de comprovar a presença da anortita. De acordo com os dados CAMEO, encontram-se ondas próximas ao valor de 1.000 cm^{-1} (especificamente entre 1.098 e 928 cm^{-1}). O Gráfico 12 traz a leitura de FTIR disponível na base de dados.

Gráfico 12 - Análise do FTIR em uma amostra de anortita



Fonte: CAMEO (2022)⁸

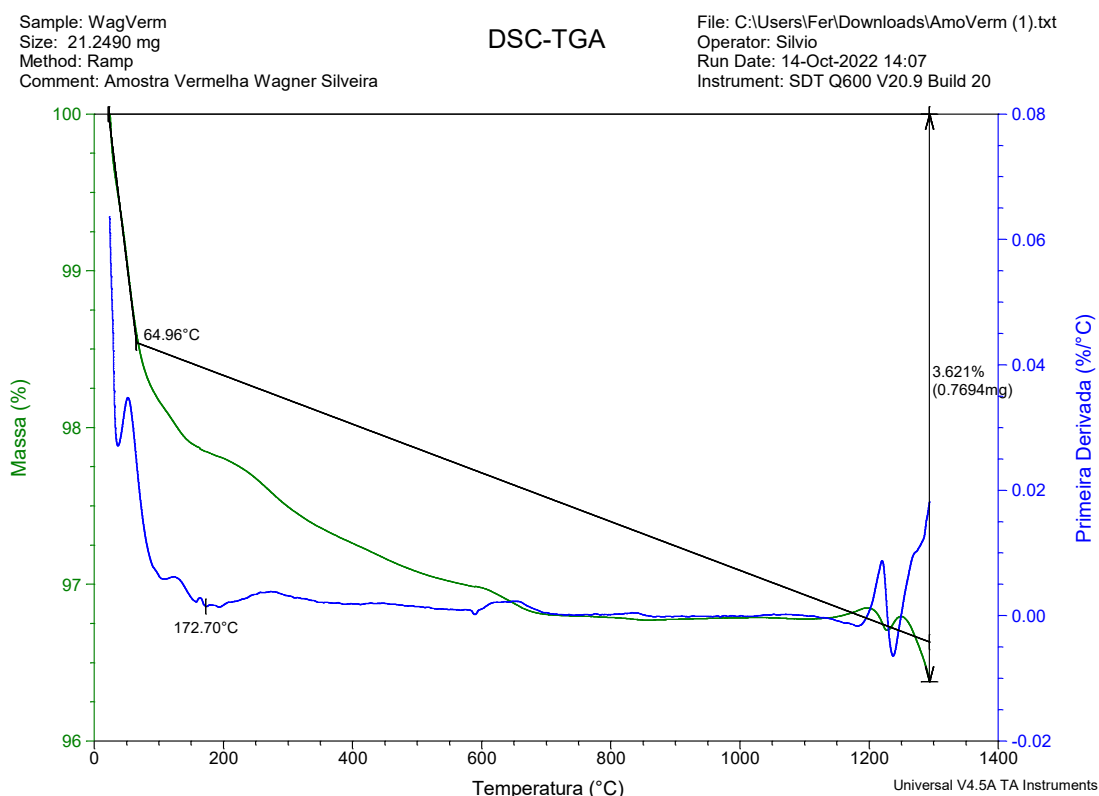
Constatando a presença de anortita, de acordo com Fu *et al.* (2022), quando submetido a uma mistura de asfalto, ela não gerava reações químicas e suas ligações permaneciam as mesmas. Logo, isso conformaria a possibilidade do material ser utilizado em telhas *single*, já que essas têm camadas de asfalto em sua composição.

Ademais, segundo Mao *et al.* (2022), além da baixa reatividade da fusão de basalto com materiais de anortita, a mistura entre eles oferece dureza e um baixo nível de geopolimerização, características desejadas na construção de telhas.

5.1.3 Análise térmica

Para fazer a análise, utilizou-se o *software da TA Instruments*, com o qual se gerou o Gráfico 13, com os eixos de massa e temperatura, além da primeira derivada da massa.

⁸ Disponível em: https://cameo.mfa.org/wiki/File:Anorthite_PMA.TIF

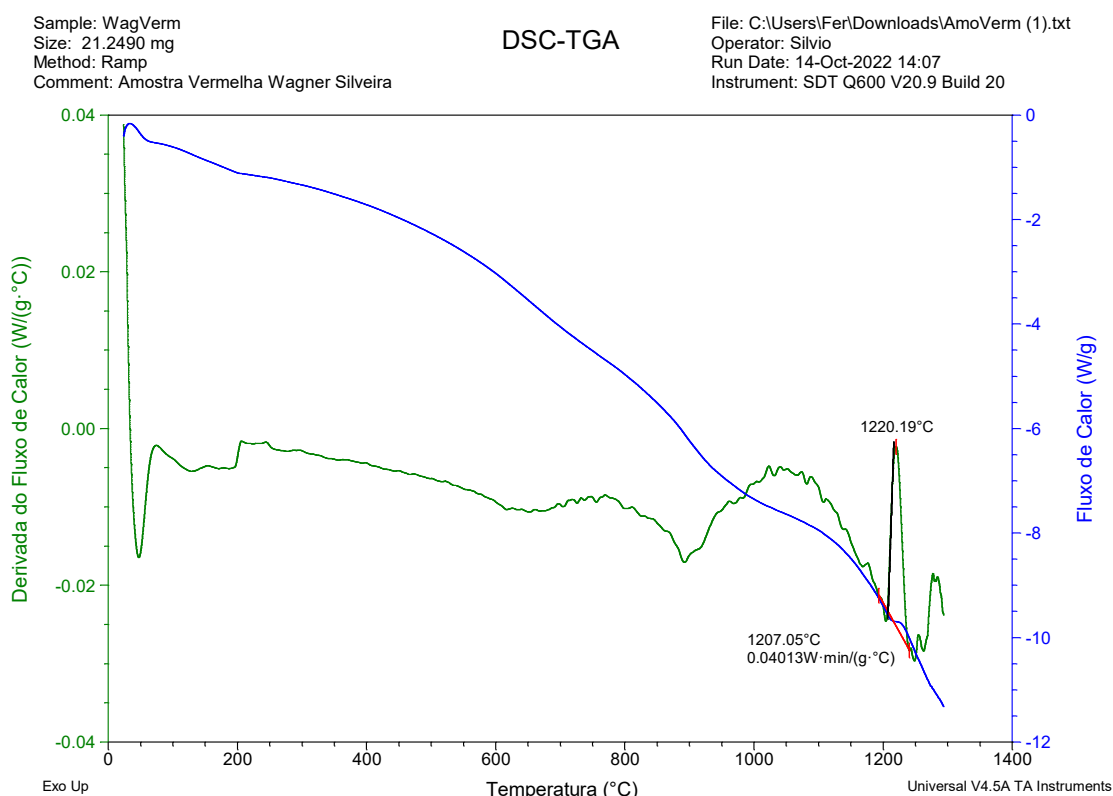
Gráfico 13 - DSC-TGA da perca de massa de uma amostra de basalto vermelho

Fonte: Autoria Própria (2022)

O gráfico apresenta informações importantes a respeito da amostra: ela teve 3,621% de perda de massa (o que corresponde a 0,7694 mg), o que demonstra a presença de nenhum material orgânico, pois essa perda é resíduo de umidade.

A temperatura de pico foi de 172,70 °C e a temperatura do *onset point* foi de 64,96°C. Esse valor obtido na perda de massa ao ser submetido ao calor é interessante à proposta do trabalho de construir telhas com esse material, afinal é um valor perdido bem baixo para as temperaturas onde foi exposto. Além disso, em temperaturas ambientes não ocorre nenhuma reação ou fusão do material, demonstrando a estabilidade do basalto em temperatura ambiente.

A partir do fluxo de calor e de sua derivada, o *software* também possibilitou encontrar a temperatura de fusão, ilustrado no Gráfico 14.

Gráfico 14 - DSC-TGA do ponto de fusão de uma amostra de basalto vermelho

Fonte: Autoria Própria (2022)

Observa-se que a temperatura onde ocorre a fusão (a amostra se transformou em vidro), pelos picos onde ocorre o cruzamento das curvas, está entre 1.207,05°C e 1.220,19°C.

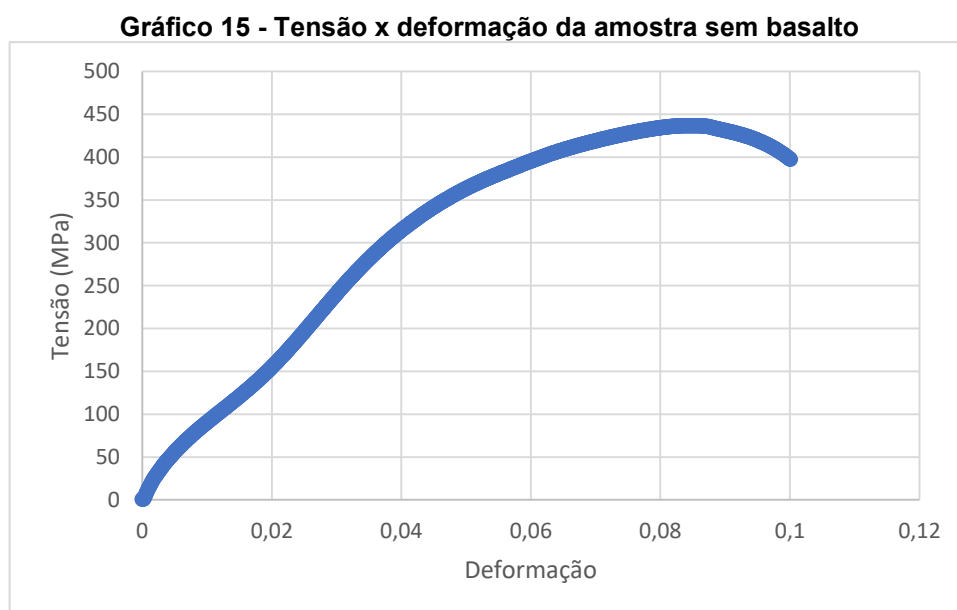
Esse fenômeno da cristalização pode ser observado em Lima (2020), onde ocorreu uma cristalização do basalto na temperatura de 1.195°C, sendo uma maneira de comprovar uma fase vítrea no material, que é uma fase muito comum em compostos que tem SiO₂, como o material analisado. A presença de uma fase vítrea não seria algo desejado na construção das telhas. Entretanto, como ela só ocorre em temperaturas muito extremas (acima de 1.000°C) que as telhas jamais seriam expostas em residências, o que condiz com a proposta do trabalho.

Em Gonzáles (2013), foi apresentada uma amostra de basalto com uma composição semelhante à amostra analisada neste estudo (45% de SiO₂). Constatou-se um ponto de transição vítrea próximo dos 900°C e, novamente, a capacidade de cristalização apenas em altas temperaturas do material, sendo desejado na construção de telhas.

5.2 Teste de caracterizações mecânicas

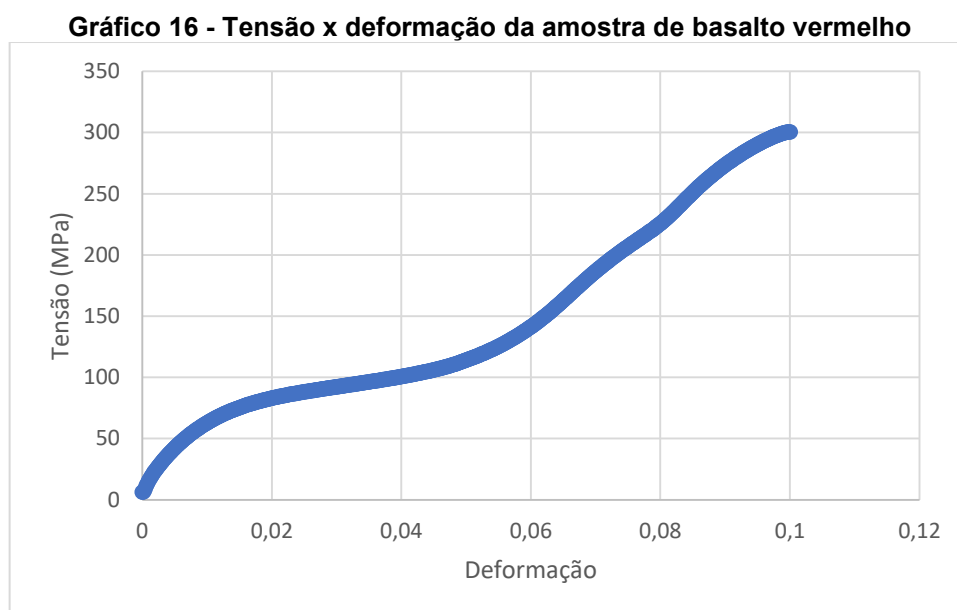
5.2.1 Teste de tração

Com os dados do ensaio de tração, foram construídos gráficos do tipo tensão x deformação para as três amostras (sem basalto, com basalto vermelho e com basalto escuro). O Gráfico 15 demonstra a tensão *versus* deformação para a amostra sem basalto.



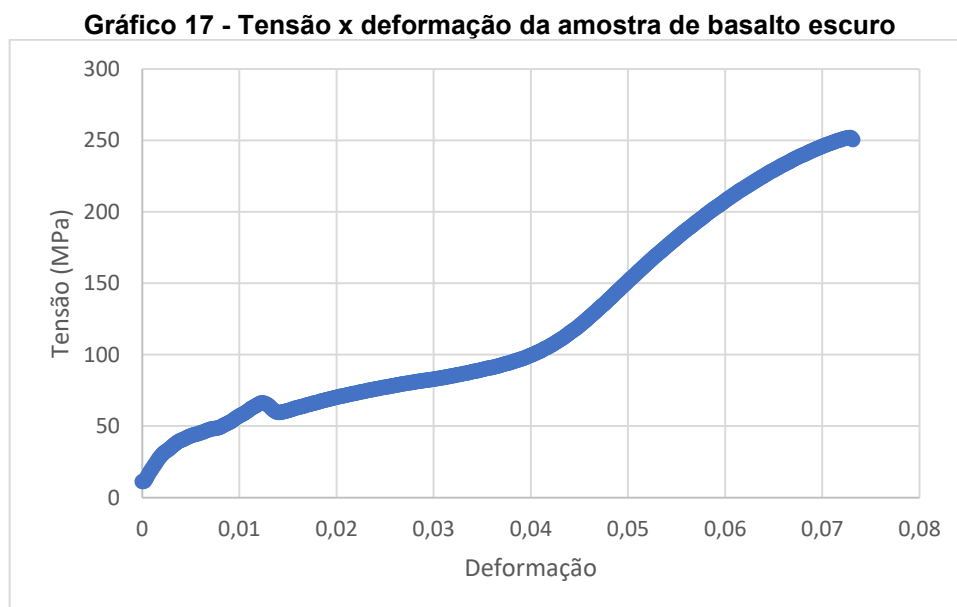
Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 16 demonstra a tensão *versus* deformação para a amostra com basalto vermelho.



Fonte: Autoria Própria (2022)

O Gráfico 17 demonstra a tensão *versus* deformação para a amostra com basalto escuro.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Os gráficos são padronizados até a deformação de 0,1. O gráfico 15 apresenta a amostra sem basalto, a única onde as amostras não se romperam. Observa-se um pico de tensão em torno de 450 MPa.

Os Gráficos 16 e 17 são similares entre si. Durante o teste, a amostra com a presença de basalto escuro se rompeu antes da amostra com basalto vermelho. No gráfico 16, nota-se que a tensão chega a um valor próximo de 300 MPa e, no gráfico 17, o valor da tensão é próximo a 250 MPa.

Por fim, conclui-se que acrescentar o basalto para simular os ensaios ocasiona um efeito negativo na amostra, pois as amostras que utilizaram do basalto foram as únicas que se romperam.

6. CONCLUSÃO

Durante os testes de caracterização química, os resultados foram positivos. o teste de FTIR demonstrou a presença da fase anortita, que apresenta características interessantes a serem trabalhados na construção civil, como sua resistência à altas temperaturas e baixa expansão térmica. A análise térmica das amostras demonstrou que o material é apto para construção civil quando usado em temperaturas ambientes.

Entretanto, aconteceu um revés durante os testes de caracterização mecânica, onde as amostras que continham o material de estudo (pó de basalto) se romperam e as sem ele não se romperam, um resultado diferente do esperado. Para isso, uma sugestão seria realizar mais testes de caracterização mecânica.

Concluindo, o pó basalto é um material subvalorizado atualmente, muitas vezes descartado em pedreiras, que poderia ter um destino mais nobre. Devido algumas de suas características nas fases encontradas no estudo uma alternativa seria sua utilização na construção de telhas shingle, onde esse subproduto seria aproveitado.

REFERÊNCIAS

AGASNALLI, C.; HEMA, H.C.; LAKKUNDI, T.; CHANDRAPPA, K.D. Integrated assessment of granite and basalt rocks as building materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, n. 8, p. 5388-5391, 2022.

CARDOSO, D.N.P.; CASTRO, K.F.; SOUZA, J.A.S.; SOUZA, C.A.G.; FELIPE, A.M.P.F. Comportamento reológico de argamassa de assentamento e revestimento com adição de rejeito de construção civil e cinzas volantes. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, **Anais...**, v.1, n. 2, 2015.

CARDOSO, F.A.; PILEGGI, R.G.; JOHN, V.M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, **Anais...**, 2011.

CASTRO, A.L.; LIBORIO, J.B.L.; PANDOLFELLI, V.C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão. **Cerâmica**, v. 57, n. 341, p. 63-75, 2011.

CREOPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T.G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

CRESTAN, M.M.; LIMA, S.P. Análise do conforto térmico com a utilização de telhas shingle em coberturas convencionais. **UNISOESC**, 2022.

DIAS, J.F.; TOFFOLI, S.M.; AGOPYAN, V. Absorção de telhas de cerâmica vermelha. 48º Congresso Brasileiro de Cerâmica, **Anais...**, Curitiba, 2004.

FU, Z.; TANG, Y.; MA, F.; WANG, Y. *et al.* Rheological properties of asphalt binder modified by nano-TiO₂/ZnO and basalt fiber. **Construction and Building Material**, v. 320, 2022.

GILL, R. **Rochas e Processos Ígneos**: um guia prático. 1ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2014.

GONZÁLEZ, A.M.S. **Cristalização de um vidro de basalto**. 2013. 147f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

GONÇALVES, V. S. **Preparação e Caracterização de Material Cerâmico Poroso à Base de Anortita Usando Resíduo de Casca de Ovo**. 2019. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2019.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **Manual de Conservação de Telhados**. IPHAN, 1999, 50 p.

JERRAM, D.; PETFORD, N. **Descrição de Rochas Ígneas**. 2ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2014.

LIMA, L.F. de. **Efeito do Teor de Ferro na Síntese de Vitrocerâmicos de Basalto**. 2020. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade de Caixas do Sul, Caxias do Sul, 2020.

MAO, J.; SONG, S.; XIE, G.; SU, Q.; JIAN, W.; OUYANG, T. Deciphering Deep-seated, highly fractioned, and reduced granitic magma system associated with world-class scheelite skarn ores: a case study of the Zhuxi deposit, South China. **Ore Geology Reviews**, v. 149, 105084, 2022.

MONTEIRO FILHA, D.C.M.; COSTA, A.C.R.; ROCHA, E.R.P. Perspectivas e desafios para inovar na construção civil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 31, p. 353-410, mar. 2010.

PINHEIRO, M.T. **Climatologia de Desastres Naturais na Região das Missões do Rio Grande do Sul: Vendaval e Granizo**. 2021. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Campo Largo, 2021.

RIBEIRO, C.C.; PINTO, J.D.S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 2ª edição. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006.

RIBEIRO, M. **Estudo das propriedades estruturais e ópticas em materiais nanoestruturados a base de silício**. 2009. 139f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

RUOCCO, G. di. Basalt fibers: the green material of the XXI-century, for a sustainable restoration of historical buildings. **Vitruvio**, v.1, n. 2, p. 25-39, 2016.

SARIDEMIR, M.; BULUT, M. Effects of ground basaltic pumice and high temperatures on the properties of HSMs. **Journal of Building Engineering**, v. 41, 2021.

SCHIAVON, M.A.; REDONDO, S.U.A.; YOSHIDA, I.V.P. Caracterização térmica e morfológica de fibras contínuas de basalto. **Cerâmica**, v. 53, p. 212-217, 2007.

SEVENGANI, K.B.; GHELFI FILHO, H.G.; SILVA, I.J.O. Comparação de vários materiais de cobertura através de índices de conforto térmico. **Construções Rurais**, v. 51, n. 1, 1994.

SILVA, M.P. da. **Simulação termoenergética e análise econômica do uso de telhados de alta refletância solar em uma residência unifamiliar**. 2019. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

SOUZA, S.A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. 4ª edição. Editora Edgar Bluncher LTDA., 1982.

VELOSA, J.C.; FANGUEIRO, R.; MENDONÇA, P. Estudo das propriedades térmicas de materiais fibrosos aplicados em paredes divisórias leves. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 25, p. 50-56, 2013.

WANG, Y.; WANG, W.; WANG, L. Understanding the relationships between rheology and chemistry of asphalt binders: A review. **Construction and Building Materials**, v. 329, 2022.

ZAIOU, S.; HARABI, A.; HARABI, E.; GUECHI, A.; KARBOUA, N.; BANHASSINE, M.-T.; ZOUAI, Z.; GUERFA, F.; Sintering of anorthite based ceramics prepared from kaolin DD2 and calcite. **Cerâmica**, v. 62, p. 317-322, 2016.