

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARIA CAROLINA TOREZIN GEQUELIM

CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE BASALTO PARA USO COMO BIOMATERIAL

FRANCISCO BELTRÃO

2023

MARIA CAROLINA TOREZIN GEQUELIM

CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE BASALTO PARA USO COMO BIOMATERIAL

Characterization of basalt powder for use as a biomaterial

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

Orientador: Prof. Dr. Wagner da Silveira

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Freitas Berti

FRANCISCO BELTRÃO

2023



[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.

MARIA CAROLINA TOREZIN GEQUELIM

CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE BASALTO PARA USO COMO BIOMATERIAL

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: 27/junho/2023

Wagner da Silveira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Lucas Freitas Berti
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Janaína Accordi Junkes
Doutorado
Centro Universitário Tiradentes

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

FRANCISCO BELTRÃO
2023

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho recebeu recursos financeiros provenientes do Edital 07/2022 – DIRGRAD/DIRGE da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR-FB - Apoio à execução de trabalhos de conclusão de cursos.

Ao meu professor orientador professor Dr. Wagner da Silveira pela orientação, incentivo, paciência e ensinamentos.

Ao meu coorientador professor Dr. Lucas Berti por todo o auxílio nas pesquisas.

À Central de Análises da UTFPR - Campus Pato Branco pela realização das análises.

Ao Laboratório de Instrumentação e Análises da UNESP de Presidente Prudente pelo suporte aos testes realizados.

RESUMO

Neste trabalho, estudou-se a composição das rochas basálticas encontradas no derrame basáltico de Francisco Beltrão, na região sudoeste do Paraná, além de suas utilidades e viabilidade de aplicação na produção de biomateriais, como uma alternativa de reaproveitamento ao seu descarte, que é comumente seu destino final. Para que isso ocorra com segurança, fez-se necessário a análise química e estrutural da rocha, através de testes de caracterização química. Inicialmente, o basalto foi colhido *in natura* e submetido a um processo de moagem para obtenção do pó da rocha. Em seguida, foram realizados os testes de caracterização química: difração de raio-X (DRX), fluorescência de raio-X (FRX), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e análise térmica DSC-TGA. Na análise DRX e FTIR observou-se a presença da fase anortita e albita, pertencentes ao grupo dos feldspatos plagioclásicos. O teste FRX forneceu a composição química do material, que é composto, majoritariamente, por óxidos, sendo esses o dióxido de silício (SiO_2), óxido de ferro III (Fe_2O_3) e alumina (Al_2O_3). A análise térmica forneceu o teor da perda de massa da amostra, bem como sua temperatura de fusão. Foi possível observar, também, a inexistência de reações químicas ou fusão em temperatura ambiente, comprovando a estabilidade do basalto. No geral, o uso do basalto na confecção de biomateriais é viável, visto que não possui compostos nocivos à saúde humana e se apresentou estável, podendo ser uma alternativa ao destino final do pó dessa rocha.

Palavras-chave: basalto; cerâmicas; biomateriais.

ABSTRACT

In this study, the composition of the basaltic rocks found in the basaltic flow of Francisco Beltrão, in the southwest region of Paraná, was studied, in addition to their uses and feasibility of application in the production of biomaterials, as an alternative to their disposal, which is commonly their destination. Final. For this to occur safely, it was necessary to carry out a chemical and structural analysis of the rock, through chemical characterization tests. Initially, the basalt was harvested in natura and subjected to a grinding process to obtain the rock powder. Then, chemical characterization tests were carried out: X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (FRX), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and DSC-TGA thermal analysis. In the DRX and FTIR analysis, the presence of the anorthite and albite phase, belonging to the group of plagioclase feldspars, was observed. The FRX test provided the chemical composition of the material, which is mainly composed of oxides, namely silicon dioxide (SiO_2), iron III oxide (Fe_2O_3) and alumina (Al_2O_3). Thermal analysis provided the mass loss content of the sample, as well as its melting temperature. It was also possible to observe the absence of chemical reactions or melting at room temperature, proving the stability of basalt. In general, the use of basalt in the manufacture of biomaterials is feasible, since it does not contain compounds harmful to human health and is stable and may be an alternative to the final destination of this rock dust.

Keywords: basalt; ceramics; biomaterials.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição química do basalto em diferentes regiões do mundo.....	16
Figura 2 - Pedras de basalto.	22
Figura 3 - Difratorômetro de Raios-X (modelo Miniflex 600, Rigaku).	23
Figura 4 - Equipamento de FRX, modelo EDX7000, da marca Shimadzu.	24
Figura 5 - Equipamento de Análise Térmica, modelo SDT Q-600, da marca TA Instruments.....	25
Figura 6 - Equipamento de FTIR-MIR, modelo Frontier, da Perkin Elmer.....	25
Figura 7 - Série dos plagioclásios	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Leitura da amostra escura 150 mesh	26
Gráfico 2 - Leitura da amostra escura 200 mesh.	26
Gráfico 3 - Leitura da amostra vermelha 150 mesh.	27
Gráfico 4 - Leitura da amostra vermelha 200 mesh.	27
Gráfico 5 - Leitura da amostra escura (150 mesh) em comparação com a anortita. .	28
Gráfico 6 - Leitura da amostra escura (150 mesh) em comparação com a albita.	28
Gráfico 7 - Leitura da amostra escura (200 mesh) em comparação com a anortita. .	29
Gráfico 8 - Leitura da amostra vermelha (150 mesh) em comparação com a anortita.	29
Gráfico 9 - Leitura da amostra vermelha (200 mesh) em comparação com a anortita.	30
Gráfico 10 - Resultado da análise FTIR	32
Gráfico 11 - Resultado da análise FTIR (ampliado).	33
Gráfico 12 - DSC-TGA da perda de massa de basalto vermelho.	34
Gráfico 13 - DSC-TGA do ponto de fusão do basalto vermelho.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da amostra vermelha.	31
Tabela 2 - Composição química da amostra escura.	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Central de Análises
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
FTIR	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
TG	Termogravimetria
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 PRODUTOS	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3 DESENVOLVIMENTO.....	15
3.1 Rochas basálticas	15
3.2 Cerâmicas	17
3.3 Biomateriais	20
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	22
4.1 Difração de Raio-X.....	22
4.2 Fluorescência de Raio-X (FRX)	23
4.3 Análise Térmica (DSC – TGA).....	24
4.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) ...	25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6 CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

O basalto é uma rocha vulcânica proveniente do magma solidificado na crosta terrestre, sendo atribuído à classificação de rocha ígnea. É constituído, de forma majoritária, por minerais de silício, ferro e alumínio, os quais se apresentam como piroxênios e plagioclásios. A sua composição se dá, principalmente, por óxidos de silício, magnésio, alumínio, ferro, sódio, cálcio e potássio. Segundo Da Wetzel *et al.* (2020), o basalto é uma rocha máfica e básica, máfica, pois é constituído, principalmente, por ferro e magnésio, e básica porque o teor de sílica (SiO_2) varia entre 45 e 52% (em peso). De acordo com Popp (2017), dentre as suas características estão a composição com pouquíssimo quartzo e, por isso, possui uma coloração escura.

Encontrado em abundância na região sul do Brasil, o basalto é comumente empregado na construção civil para a confecção de pisos, paredes, decorações ornamentais e, principalmente, na construção de asfaltos. Além de ser um material resistente às altas temperaturas e à abrasão, é de aplicação simples, facilmente encontrado e conta com um baixo custo de comercialização. Durante o processo de beneficiamento da rocha obtém-se as lascas ou o pó de basalto, considerado um subproduto de baixo valor comercial, sendo necessário o seu descarte, que por muitas vezes é realizado em locais impróprios.

Ao longo dos anos, estudos sobre diversas aplicações têm sido desenvolvidos em torno do pó das rochas basálticas a fim de se obter uma maior valorização econômica. Por possuir uma composição rica em minerais, o pó de rocha pode ser adicionado ao solo como uma alternativa aos fertilizantes químicos (THEODORO; LEONARDOS, 2006). Ainda, devido às suas características, o pó vem sendo empregado na fabricação de materiais cerâmicos, como, por exemplo, os filamentos e as fibras de basalto (MILITKY; KOVACIC; BAJZIK, 2007; SCHIAVON; REDONDO; YOSHIDA, 2007; FIORE *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2022;), os compósitos de gesso (PETROPAVLOVSKAYA *et al.*, 2018) e vidros/vitrocerâmicas (LIMA, *et al.*, 2020; LIMA; ZORZI; CRUZ, 2022), apresentando, também, grande potencial para o uso na produção de biomateriais, como biocerâmica.

Biomaterial é a classe de materiais que entram em contato com um tecido vivo ou sistema biológico a fim de cumprir uma determinada função. São muito utilizados na prática da medicina moderna para implantes, próteses, substituição óssea e

dentária. “Biomateriais são materiais que podem ser implantados para substituir ou reparar tecidos em falta.” (STEIN; GEHLEN; ROJAS, 2017, p. 217). Segundo Callister e Rethwish (2021), as aplicações de biomateriais podem incluir próteses de articulações (por exemplo, da bacia e do joelho) e de válvulas coronárias, enxertos vasculares (vasos sanguíneos), dispositivos para fixação de fraturas, restaurações dentárias e a geração de novos tecidos de órgãos. Podem ser de origem natural ou sintética e possuem características específicas que oferecem confiabilidade ao material, como, por exemplo, o material deve apresentar biocompatibilidade com o corpo humano, não deve apresentar rejeição, deve ser atóxico, não carcinogênico e possuir alta resistência à corrosão. De acordo com a finalidade, os biomateriais podem ser produzidos a partir de metais (biometais), polímeros (biopolímeros), compósitos (biocompósitos) ou cerâmicas (biocerâmicas).

As biocerâmicas são muito utilizadas em diversas áreas da biomedicina, pois possuem propriedades favoráveis para essa finalidade. Conforme Stein, Gehlen e Rojas (2017), as biocerâmicas apresentam biocompatibilidade, alta resistência à corrosão e ao desgaste, alta rigidez e baixo atrito, propriedades desejadas para qualquer biomaterial. Callister e Rethwish (2021) afirmam que, ao longo dos últimos anos, o desenvolvimento de biomateriais novos e melhores acelerou rapidamente, e atualmente essa é uma das áreas “quentes” dos materiais, com uma abundância de novas oportunidades de trabalho excitantes e com altos salários. Tendo em vista a ascensão dos biomateriais e a busca pela valorização do pó do basalto, procura-se estudar uma aplicação nobre para este subproduto através da realização do estudo de caracterização do pó de basalto e sua viabilidade técnica de poder ser sinterizado e empregado como um material biocerâmico com atuação na ablação de tecidos orgânicos.

1.1 Produtos

A rocha basáltica tem sido, frequentemente, usada na construção civil, tendo pouco valor comercial agregado, além de apresentar uma complicação a respeito do subproduto gerado no processo de beneficiamento da rocha, sendo necessário o estudo de um método de reaproveitamento do pó de basalto. A composição do basalto pode variar de acordo com a sua região de ocorrência (LIMA; ZORZI; CRUZ, 2022), mas, a princípio, o basalto e suas fibras não possuem elementos ou compostos

nocivos à saúde (KOGAN; NIKITINA, 1994; HESTERBERG *et al.*, 1993). Por esse motivo, torna-se um candidato a ser utilizado em atividades em que se tenha contato com o ser humano, principalmente, porque com esse material podem ser produzidas peças que serão utilizadas como biomateriais. Desta forma, analisar estruturalmente e quimicamente o basalto torna-se essencial para que ele possa ser utilizado com segurança.

1.2 Justificativa

A área da medicina é uma das ciências mais nobres que pode ser empregada à disposição da humanidade. Através desta ciência, vidas são salvas, dores são minimizadas e doenças podem ser curadas. Os problemas de saúde em decorrência de acidentes, desastres ou doenças são rotineiramente encontrados no mundo todo, e, com isso, aumenta-se a demanda de novos materiais para suprir as aplicações médicas que tais incidentes requerem (YUAN *et al.*, 2014). Com isso, existem diversas técnicas na área da medicina cirúrgica e da odontologia onde se faz necessário o uso de algum biomaterial. O conceito de biomaterial abrange todos os materiais e produtos médicos, desde os dispositivos e implantes, até aqueles que auxiliam nos diagnósticos e tratamento de doenças, medicamentos e produtos biológicos (ZHANG *et al.*, 2022). Esses tipos de materiais não devem possuir compostos que possam reagir com o tecido humano e precisam ser estável termicamente e quimicamente. Desta forma, o basalto surge como um possível material que pode ser usado para a confecção de biomateriais. Há também, uma certa importância econômica, tecnológica e sustentável em valorizar este tipo de material, visto que ele possui propriedades desejáveis para ser usado como biomaterial em virtude da sua inércia química e da sua biocompatibilidade, apresentando, também, uma alta resistência mecânica, a corrosão e ao transporte de calor devido à presença de ligações iônicas entre seus átomos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar as rochas magmáticas encontradas no derrame basáltico da região de Francisco Beltrão com o intuito de verificar a viabilidade para ser utilizado na fabricação de biomateriais.

2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar em quais temperaturas ocorre a cristalização e mudanças de fase no basalto;
- b) Determinar quais fases cristalinas se apresentam no basalto;
- c) Avaliar a composição química do basalto com sua estrutura e grupos funcionais.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Rochas basálticas

Muito comum na região Sul do país, o basalto pertence à classe das rochas magmáticas. “As rochas magmáticas, também denominadas ígneas, eruptivas, plutônicas ou vulcânicas, são formadas pelo resfriamento e pela consolidação do magma originário do manto.” (QUEIROZ, 2016, p.32). Durante o processo de erupção ocorre a desgaseificação e o resfriamento repentino do magma, iniciando, assim, a formação de minúsculos cristais na rocha, atribuindo a essa rocha uma textura classificada como afanítica, conhecida também como extrusiva (LAMANA, 2009; GILL, 2010). Em alguns casos, o basalto pode conter pequenas cavidades em decorrência dos gases vulcânicos retidos na lava durante o seu processo de resfriamento. Quando as cavidades estão preenchidas tem-se o basalto amigdaloidal, quando estão vazias tem-se o basalto vesicular e quando não há presença de cavidades tem-se o basalto denso (GILL, 2010).

De acordo com Wicander e Monroe (2017), conforme o magma ou a lava esfria, os minerais cristalizam e crescem, determinando, assim, a composição mineral das rochas ígneas, como o basalto (composto majoritariamente por silicatos ferromagnesianos). O basalto é uma rocha máfica, pois é rico em elementos pesados, principalmente silicatos ferromagnesianos, os quais atribuem a ele uma coloração mais escura. Sua composição química contém alguns tipos de óxidos, sendo eles: os óxidos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3), ferro (Fe_2O_3 , FeO), magnésio (MgO), potássio (K_2O), sódio (Na_2O) e fósforo (P_4O_{10}). Por apresentar um teor de sílica entre 45 e 52% em peso recebem a classificação de rocha básica (DA WETZEL *et al.*, 2020). Segundo Schiavon, Redondo e Yoshida (2007), o silício, alumínio e o ferro presentes na composição do basalto se apresentam na forma de piroxênios (augita), plagioclásios (labradorita) e magnetita. Klein e Dutrow (2012) afirmam que a classificação das rochas ígneas está diretamente relacionada com a quantidade de feldspato presente, quanto maior for o teor de sílica presente, mais sódico será esse feldspato e menor será o teor de minerais escuros; ao contrário disso, quanto menor for o teor de sílica presente, mais cálcico será esse feldspato e maior será o teor de minerais escuros. A composição do basalto pode variar de acordo com a região de ocorrência, conforme constatado no estudo de Lima, Zorzi e Cruz (2022), que pode

ser observado na Figura 1, a qual destaca as variações da composição do basalto de acordo com a região em que é encontrado.

Figura 1 - Composição química do basalto em diferentes regiões do mundo

Oxide (wt.%)	Typical basalt [29]	Thrace region, Turkey [36]	Southern Anatolia, Turkey [37]	Arkhangelsk Oblast, Russia [38]	SGF, Brazil [39]	Vrelo-Kopaonik, Serbia [40]	Vrelo-Kopaonik, Serbia [41]	Egyptian basalt, Egypt [42]
SiO ₂	48.3	45.91	43.18	45.83	51.42	56.21	49.33	48.39
Al ₂ O ₃	13.03	12.16	13.15	15.34	13.81	18.61	16.13	13.98
Fe ₂ O ₃	6.84	10.74 ^a	13.49 ^a	1.52	7.36	1.15	3.81	12.63 ^a
FeO	7.72	–	–	9.16	5.83	2.97	2.68	–
CaO	10.91	9.12	9.67	7.72	10.45	7.78	8.87	9.16
MgO	5.46	12.16	8.48	6.78	6.29	3.40	6.48	6.92
K ₂ O	0.51	4.25 ^b	2.78	1.33	0.70	3.37	2.70	0.79
Na ₂ O	2.34	–	4.27	3.37	2.45	4.73	3.30	2.50
TiO ₂	2.59	2.93	3.34	7.61	1.37	1.11	1.94	–
MnO	0.23	–	–	0.21	0.20	–	0.14	–
P ₂ O ₅	0.26	–	0.96	–	0.14	–	–	–
H ₂ O	1.42	–	–	–	–	–	1.57	–
CO ₂	0.49	–	–	–	–	–	–	–
LOI ^c	–	2.72	–	–	–	–	–	5.32

^a FeO + Fe₂O₃.
^b K₂O + Na₂O.
^c Loss on ignition.

Fonte: Lima, Zorzi e Cruz (2022)

Como possui uma alta resistência à abrasão e a extremas temperaturas, o basalto é comumente utilizado na área da construção civil para a construção de lajes, paredes, pisos, decorações, pavimentação de rodovias, sendo aproveitado também para incorporações na argamassa e como cascalho. O processo de mineração da rocha compreende a etapa de extração e beneficiamento da rocha. A extração é realizada nas jazidas com o auxílio de explosivos, sendo um processo relativamente caro comparado com o preço de venda, que na região sudoeste do Paraná gira em torno de R\$80,00 por cada metro cúbico. O beneficiamento da rocha compreende seu acabamento para a comercialização do produto para suas determinadas aplicações, deste processo resultam-se como subprodutos as lascas de rocha que podem ser submetidas ao processo de britagem para produção de pedra brita. Segundo Toscan, Kautzmann e Sabedot (2007), do processo de britagem obtém-se o pó da rocha, que não tem uma demanda compatível com sua produção, tornando-se um resíduo.

O pó de basalto, resíduo que por muitas vezes é descartado em locais impróprios (TOSCAN; KAUTZMANN; SABEDOT, 2007), têm sido alvo de estudos visando seu reaproveitamento. Na área de agronomia, o pó pode ser empregado na fertilização do solo, visto que é rico em diversos minerais. Na área de construção civil pode ser acrescentado como um componente na argamassa para substituição parcial da areia. Já na área de materiais o basalto pode ser aplicado na produção de fibras, possuindo ainda potencial para ser utilizado na produção de outras classes de

materiais, como, por exemplo, os biomateriais, visto que é um material cerâmico que apresenta uma composição inerte e uma ótima resistência.

3.2 Cerâmicas

A definição de cerâmica varia de acordo com alguns autores. Callister e Rethwisch (2021, p. 8) definem cerâmica como compostos formados por ligações metálicas e não-metálicas, como os óxidos, nitretos e carbetos. Newell (2010, p. 20) diz que cerâmicas são compostos que contém átomos metálicos ligados a átomos não-metálicos, como o oxigênio, o carbono e o nitrogênio. Carter e Norton (2007, p. 3) afirmam que cerâmicas estão normalmente associadas a uma mistura de ligações iônicas, covalentes e, algumas vezes, metálicas. Smith e Hashemi (2012, p. 399) apontam que cerâmicas são materiais inorgânicos e não-metálicos que consistem em elementos metálicos e ametálicos unidos por ligações iônicas e/ou covalentes.

Nos dias atuais, as cerâmicas podem ser divididas em dois grupos: as cerâmicas tradicionais, compostas basicamente de argila, sílica e feldspato, que resultam em produtos como telhas, tijolos, louças ou vidros; e as cerâmicas voltadas à engenharia ou “cerâmicas avançadas”, as quais são compostos com certo grau de pureza, como os óxidos e derivados de silício, utilizados na produção de computadores, eletrônicos, sistemas de comunicação e na indústria automotiva e aeroespacial (SMITH; HASHEMI, 2012; STEIN; GEHLEN; ROJAS, 2017; CALLISTER; RETHWISCH, 2021). As cerâmicas avançadas exibem propriedades mecânicas superiores - resistência à corrosão ou oxidação, propriedades elétricas, ópticas e/ou magnéticas – e apresentam, também, uma composição química mais simples quando comparadas com as cerâmicas tradicionais, composta basicamente de óxidos, nitretos, carbetos e boretos (CARTER; NORTON, 2007; GROOVER, 2017). Enquanto as cerâmicas tradicionais são utilizadas há mais de 25.000 anos, as cerâmicas avançadas são uma tecnologia consideravelmente recente, a qual começou a ser desenvolvida há cerca de 100 anos.

A produção de objetos a partir de cerâmicas avançadas é feita a partir do processamento do pó desse material, em um processamento que compreende as etapas de preparação da matéria-prima, moldagem ou compactação, sinterização e acabamento. O pó precisa ser homogêneo em tamanho/formas de partícula e em composição, para que então seja compactado e sinterizado em altas temperaturas a

fim de se obter a união dos grãos, redução de porosidade e aumento da massa específica (HUMMEL, 2004; SANTOS, 2020). Esse processo é semelhante ao de metalurgia do pó que, segundo Santos (2020), trata-se da compactação dos pós em matrizes seguido da sinterização para provocar a densificação - aumento da ligação entre as partículas – resultando em uma massa rígida e dura.

Partindo das definições de cerâmicas já existentes, sabe-se que esse material é composto de elementos metálicos e não-metálicos, apresentando, na sua estrutura, ligações primárias, as quais são predominantemente iônicas, resultado da transferência ou compartilhamento de elétrons entre cátions e ânions que causam uma forte atração entre os átomos pela diferença de eletronegatividade – fenômeno este conhecido como ‘forças de Coulomb’ (SANTOS, 2020; CALLISTER; RETHWHISH, 2021). “Como a força de Coulomb é forte e de longo alcance, muitos compostos iônicos possuem altas temperaturas de fusão e ebulição.” (CARTER; NORTON, 2007, p. 53). Os materiais cerâmicos são duros e frágeis, bons isolantes térmicos e elétricos, propriedades essas que estão diretamente ligadas com a configuração eletrônica e a natureza da ligação iônica no material (CALLISTER; RETHWHISH, 2021). As fortes ligações iônicas conferem ao material uma alta dureza, estabilidade química, resistência à abrasão e à erosão química, altas temperaturas de fusão e baixa condutividade de eletricidade e do calor (PARK; LAKES, 2007; NEWELL, 2010). Para Smith e Hashemi (2012, p. 399) “[...] graças a essas propriedades os materiais cerâmicos são indispensáveis para muitas aplicações no campo da engenharia”.

O material pode apresentar também ligações covalentes que, de acordo com Callister e Rethwhish (2021), são ligações que ocorrem em átomos que possuem diferença de eletronegatividade, onde a estabilidade da configuração eletrônica ocorre pelo compartilhamento de elétrons. Segundo Hummel (2004), diamante, silício, cerâmicas de silicato, vidros e peças cerâmicas são alguns exemplos de materiais que possuem átomos covalentemente ligados.

As cerâmicas recebem a classificação de acordo com a sua estrutura cristalina – a qual está ligada diretamente com a estrutura e arranjo atômico dos átomos, ou seja, o tipo de ligação atômica presente. Segundo Smith e Hashemi (2012), a quantidade de ligações covalentes ou iônicas presentes no material é importante, pois determina qual tipo de estrutura cristalina será formada: quando a ligação presente é predominantemente iônica (cátion metálico e ânion não metálico) duas principais

características influenciam na estrutura do cristal - 1) o tamanho relativo dos íons; e 2) a necessidade de balanço eletrostático de cargas, buscando a neutralidade elétrica no cristal. Os cátions cedem elétrons quando ionizados e, por conta disso, possuem raios menores do que os ânions, fazendo com que a razão entre o raio do cátion (r_c) e o raio do ânion (r_a) seja menor do que 1 (NEWELL, 2010; CALLISTER; RETHWHISH, 2021). A estabilidade é atingida quando a maior quantidade possível de ânions entra em contato com o cátion no centro, e ânions devem manter contato com o cátion central, visto que deve ocorrer a neutralidade de cargas (SMITH; HASHEMI, 2012, p. 401). Callister e Rethwhish (2021; p. 362) definem que o número de coordenação “[...] é o número de ânions vizinhos mais próximos para um cátion”, o qual está relacionado com a razão entre r_c e r_a , e ainda que “para um número de coordenação específico existe uma razão r_c/r_a crítica para a qual esse contato cátion-ânion é estabelecido”, ou seja, o número de coordenação determina o tipo de estrutura cristalina presente na cerâmica.

Para Newell (2010), as estruturas podem ser classificadas pelo número de cátions e ânions diferentes presentes em cada rede, existindo, assim, estruturas do tipo AX (um cátion para cada ânion), A_mX_p (carga do cátion diferente da carga do ânion) e $A_mB_nX_p$ (duas espécies de cátions com cargas diferentes). Se os átomos ou íons de um material estiverem ordenados em um padrão tridimensional que se repete, pode-se dizer que esse material possui uma estrutura cristalina, ou seja, ele é um sólido cristalino. No caso contrário, quando os átomos ou íons não estão arranjados periodicamente de maneira repetitiva, esse material é conhecido como amorfo ou não-cristalino (SMITH; HASHEMI, 2012). Segundo Groover (2017), cerâmicas podem apresentar estrutura cristalina ou amorfa e, em alguns casos, elas podem existir no mesmo material, um exemplo disso é a sílica, que naturalmente é um quartzo cristalino, porém, quando o material é derretido e solidificado, apresenta uma estrutura amorfa. Compostos a base de silicatos, como, por exemplo, o dióxido de silício ou sílica (SiO_2) possuem os quatro átomos de oxigênio ligados ao átomo de silício em uma forma tetraédrica e, se esses tetraedros estiverem arranjados de uma maneira regular, forma-se uma estrutura cristalina (CALLISTER; RETHWHISH, 2021).

3.3 Biomateriais

Biomaterial é um material inerte, seja ele natural ou sintético, que irá entrar em contato e interagir com sistemas biológicos com propósito de reparar, substituir, tratar ou aumentar tecidos, órgãos, ossos ou função do corpo humano (WILLIANS, 1999). Conforme Park e Lakes (2007), biomaterial pode ser definido como qualquer material usado para fabricar dispositivos para substituir uma parte ou função do corpo de maneira segura, confiável, econômica e fisiologicamente aceitável. Atualmente, são muito utilizados na medicina e na ortodontia para implantes, restauração e/ou cicatrização de tecidos, próteses, enxertos, sensores e até mesmo em cirurgias. Segundo Newell (2010), existem duas classes de biomateriais: os biomateriais estruturais, que servem para dar suporte físico ao corpo; e os biomateriais funcionais, que são aqueles que realizam uma determinada função no corpo.

Os materiais possuem requisitos e características específicas para serem considerados biomateriais: não devem possuir toxicidade, não podem ser cancerígenos, devem ser biocompatíveis, é necessário possuírem comportamento mecânico similar ou superior aos materiais biológicos (aqueles produzidos por seres vivos) e, também, devem apresentar uma resistência mecânica ótima de acordo com a sua finalidade no sistema biológico (SANTOS, 2020; PARK; LAKES, 1992).

Os biomateriais sintéticos podem ser confeccionados a partir de metais, polímeros, compósitos e cerâmicas. Os biometais são corriqueiramente utilizados na área ortopédica para próteses devido a sua grande resistência mecânica, porém, são considerados, dentre todos, os menos biocompatíveis por conta dos problemas de corrosão e toxicidade (REGÍ-VALLET, 2010). Os biopolímeros são uma boa alternativa aos biometais por serem mais resistentes à corrosão, já que eles são quimicamente e estruturalmente similares a alguns tecidos do corpo. Já as biocerâmicas se destacam dos biomateriais metálicos e poliméricos por apresentarem maior estabilidade química superficial (SINHORETI; VITTI; SOBRINHO, 2013), além de apresentarem propriedades desejadas para qualquer material, como, por exemplo, a biocompatibilidade. Portanto, pode-se considerar as biocerâmicas uma excelente alternativa para outros tipos de materiais.

Os materiais cerâmicos são muito úteis na medicina, principalmente no campo dos biomateriais devido às características que favorecem o seu uso: possuem inércia química, resistência ao desgaste, dureza e baixo coeficiente de atrito (CALLISTER;

RETHWHISH, 2021). Na odontologia, podem ser utilizadas como implantes ou coroas dentárias devido sua inércia aos fluidos corporais, alta resistência a compressão e boa aparência estética. Já na ortopedia, podem ser utilizadas como componente de reforço em implantes de ossos ou tendões, devido à sua biocompatibilidade e alta resistência específica (PARK; LAKES, 1992). De acordo com Park e Bronzino (2003), as propriedades desejáveis para as biocerâmicas incluem: atoxicidade, antialérgica, biocompatibilidade e biofuncionalidade durante sua vida no hospedeiro. A principal vantagem do uso cerâmica sobre outros tipos de materiais é a sua biocompatibilidade. Em contrapartida, a maior desvantagem é sua baixa tenacidade. Formas de aumentar a tenacidade da cerâmica é formar um compósito, onde a cerâmica pode ser a fase de reforço, a matriz ou ambas (CARTER; NORTON, 2007).

As biocerâmicas podem ser classificadas como não absorvíveis (relativamente inertes), bioativas ou semi-inertes (superfície reativa), e biodegradável ou reabsorvível (não inerte). Exemplos de biocerâmicas inertes são a alumina (Al_2O_3), zircônia (ZrO_2), nitretos de silicone e carbono; algumas cerâmicas de vidro e hidroxiapatitas são consideradas semi-inertes (PARK; BRONZINO, 2003).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Pedras de basalto (Figura 2) foram obtidas na pedreira Motter em Francisco Beltrão, no Paraná (-26.064809, -53.10907). As pedras foram lavadas e separadas de acordo com suas cores, preta e vermelha. A rocha vermelha é mais dura, sendo extraída após 30 metros de profundidade. Posteriormente, as pedras foram lavadas em água corrente e encaminhadas para moagem para se obter o pó de rocha, que foi submetido aos testes de caracterização química. A moagem foi realizada em um moinho de bolas, sendo este o método mais adequado à moagem fina.

Figura 2 - Pedras de basalto



Fonte: Autoria Própria (2023)

4.1 Difração de Raio X

O teste de Difração de Raios X determina a presença de estruturas cristalinas ou amorfas através do feixe de luz difratado. As amostras (vermelha e escura) investigadas por DRX foram maceradas até apresentarem um aspecto de pó fino, passando por uma malha de 150 e 200 mesh. Encerrado esse processo, foram colocadas no porta amostra e, então, compactadas levemente e levadas ao difratômetro para que a análise fosse efetuada. O equipamento é um Difratômetro de Raios X modelo *Miniflex 600* Rigaku (Figura 3), que operou em modo contínuo com uma faixa de varredura de 10° até 80° e velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$. Para a identificação das fases dos materiais utilizou-se o programa Search Match e o banco de dados Powder Diffraction Files (PDF). Essa caracterização DRX teve realização na

Central de Análises (CA), UTFPR-Pato Branco. Segundo as especificações cedidas pela Central de Análises, o Difratorômetro de Raios X de bancada possui tubos geradores de raios x ($K\alpha$ do Cu $\lambda = 0,154$ nm) funcionando a 600 W de potência e voltagem de 40kV. Esse equipamento permite obter um padrão de difração de materiais cristalinos.

Figura 3 - Difratorômetro de Raios X (modelo Miniflex 600, Rigaku)



Fonte: Central de Análises da UTFPR, Pato Branco – Paraná (2023)

4.2 Fluorescência de Raio X (FRX)

Para complementar os testes de DRX, realizou-se, também, testes de Fluorescência de Raio X (FRX). É uma análise qualitativa que permite evidenciar quais elementos químicos estão presentes na amostra e qual sua proporção, através da incidência de raios X, a fim de excitar os níveis eletrônicos dos átomos da amostra. O teste FRX foi realizado no Laboratório de Instrumentação e Análises da Unesp de Presidente Prudente. O modelo do equipamento utilizado é o EDX7000, da marca Shimadzu (Figura 4).

Figura 4 - Equipamento de FRX, modelo EDX7000, da marca Shimadzu



Fonte: SHIMADZU (2023)¹

4.3 Análise Térmica (DSC – TGA)

Análise térmica é um conjunto de técnicas que medem as alterações nas propriedades de um material quando submetido a uma variação de temperatura. Com a técnica de análise térmica é possível estudar a relação entre as propriedades e reações físicas e químicas das amostras conforme se aumenta a temperatura. Os testes de análise térmica, neste trabalho, dividem-se em TG (técnicas de gravimetria) e DSC (calorimetria exploratória diferencial), ambos realizados de maneira simultânea, onde é possível observar a perda de massa da amostra durante a variação de temperatura e seu ponto de fusão. Desse modo, as medidas de análises térmicas foram realizadas utilizando o aparelho SDT Q-600, TA Instruments (Figura 5). As amostras foram moídas em um almofariz de ágata e passadas em uma peneira de 180 e 200 mesh. O cadinho aplicado é de alumina, a faixa de varredura estendeu-se de 25°C até 1250°C e a atmosfera utilizada foi de ar sintético com fluxo de 5 ml/min. Os ensaios de análise térmica foram realizados no LCGRS, FCT-UNESP.

¹Disponível em: www.shimadzu.com.br

Figura 5 - Equipamento de Análise Térmica, modelo SDT Q-600, da marca TA Instruments



Fonte: TA Instruments (2023)

4.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é um método amplamente empregado para caracterizar materiais, pois possui uma alta resolução e oferece informações sobre a estrutura do material analisado, como, por exemplo, a contribuição espectral de cada elemento ou grupos funcionais na estrutura do material analisado. O ensaio ocorreu na Central de Análises na UTFPR de Pato Branco, em um Espectrômetro de Infravermelho na região do Médio com Transformada de Fourier (FT-MIR), modelo *Frontier*, Perkin Elmer, absorvância 200 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 32 acumulações, por 1 hora. Os espectros foram extraídos em extensão .csv. Segundo especificações cedidas pela Central de Análises, o equipamento possui uma fonte de infravermelho policromática e detector tipo DTGS. Realiza a análise em absorvância e transmitância e para análise em reflectância utiliza acessórios de reflectância difusa (*Difuse reflectance sampling* – Perkin Elmer) e de reflectância total atenuada (*Universal ATR* – Perkin Elmer) que permitem analisar amostras sólidas e líquidas.

Figura 6 - Equipamento de FTIR-MIR, modelo Frontier, da Perkin Elmer

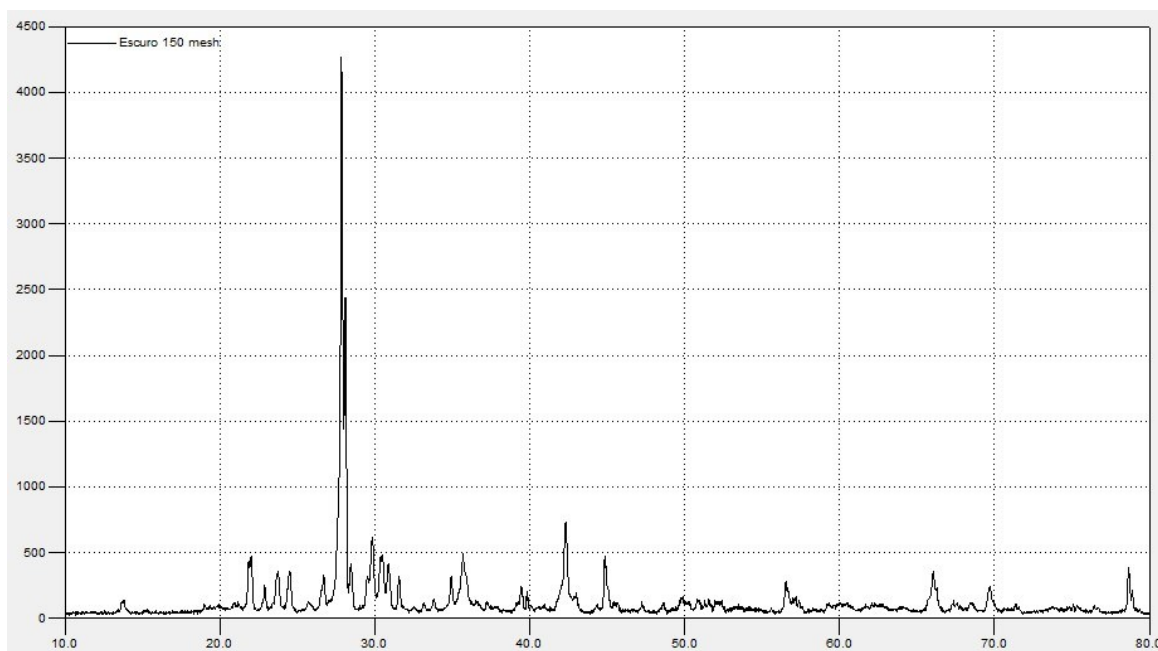


Fonte: Central de Análises da UTFPR, Pato Branco – Paraná (2023)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

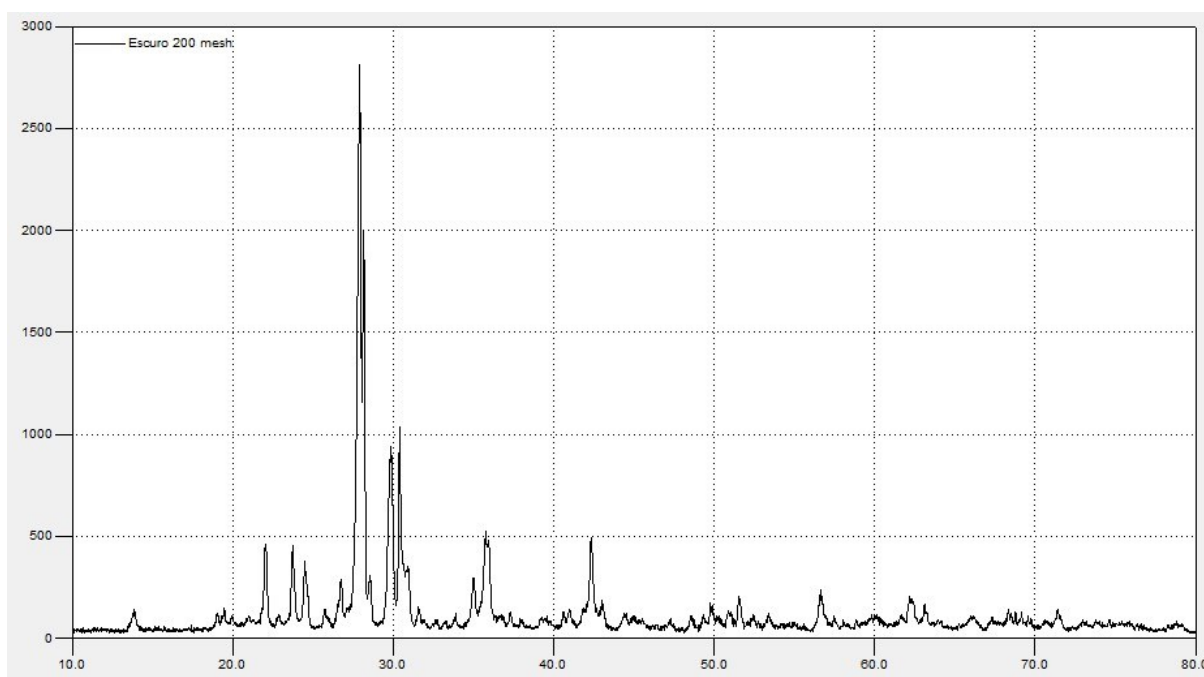
Os resultados obtidos no teste DRX foram colocados em gráficos com o auxílio do software *Crystallographica Search-Match*. Os gráficos das análises de DRX para a amostra do pó escuro em 150 e 200 mesh são apresentados no Gráfico 1 e 2.

Gráfico 1 - Leitura da amostra escura 150 mesh



Fonte: Autoria Própria (2023)

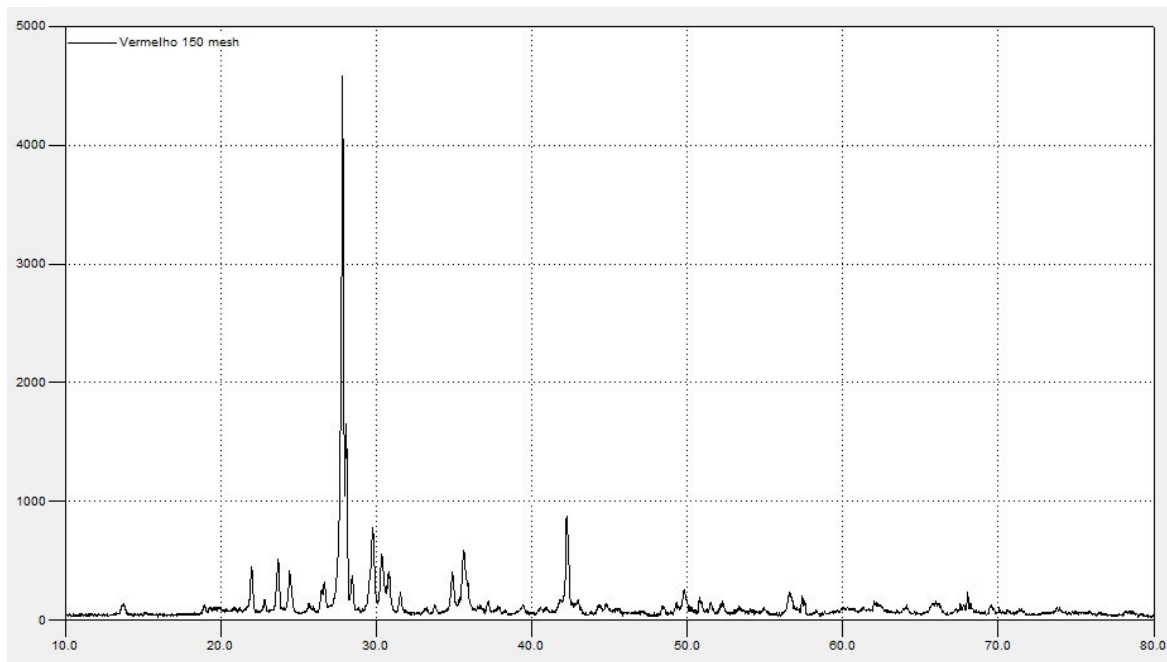
Gráfico 2 - Leitura da amostra escura 200 mesh



Fonte: Autoria Própria (2023)

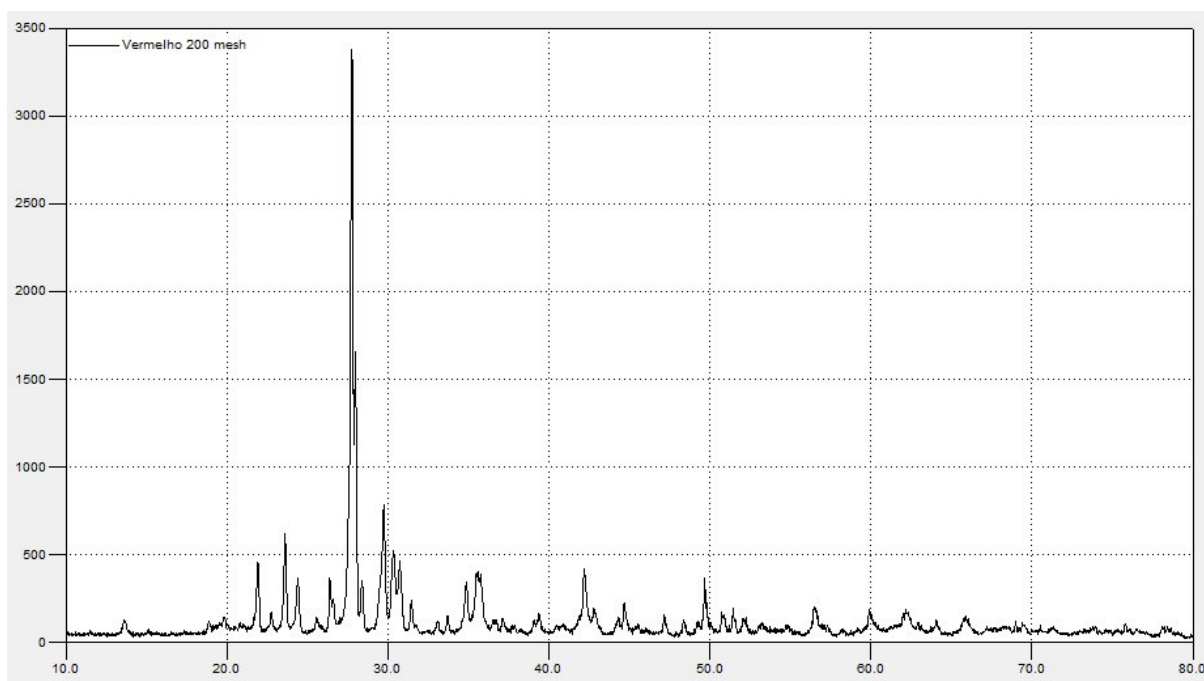
Os resultados da leitura da amostra do pó vermelho de 150 e 200 mesh são apresentados nos Gráficos 3 e 4.

Gráfico 3 - Leitura da amostra vermelha 150 mesh



Fonte: Autoria Própria (2023)

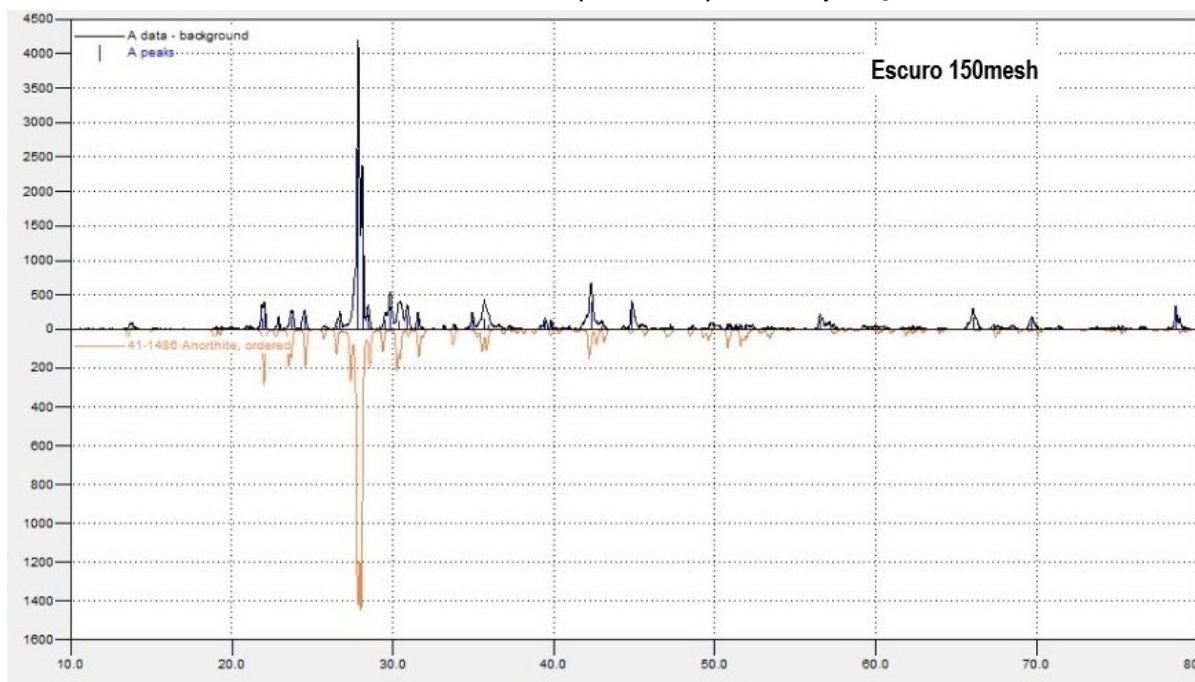
Gráfico 4 - Leitura da amostra vermelha 200 mesh



Fonte: Autoria Própria (2023)

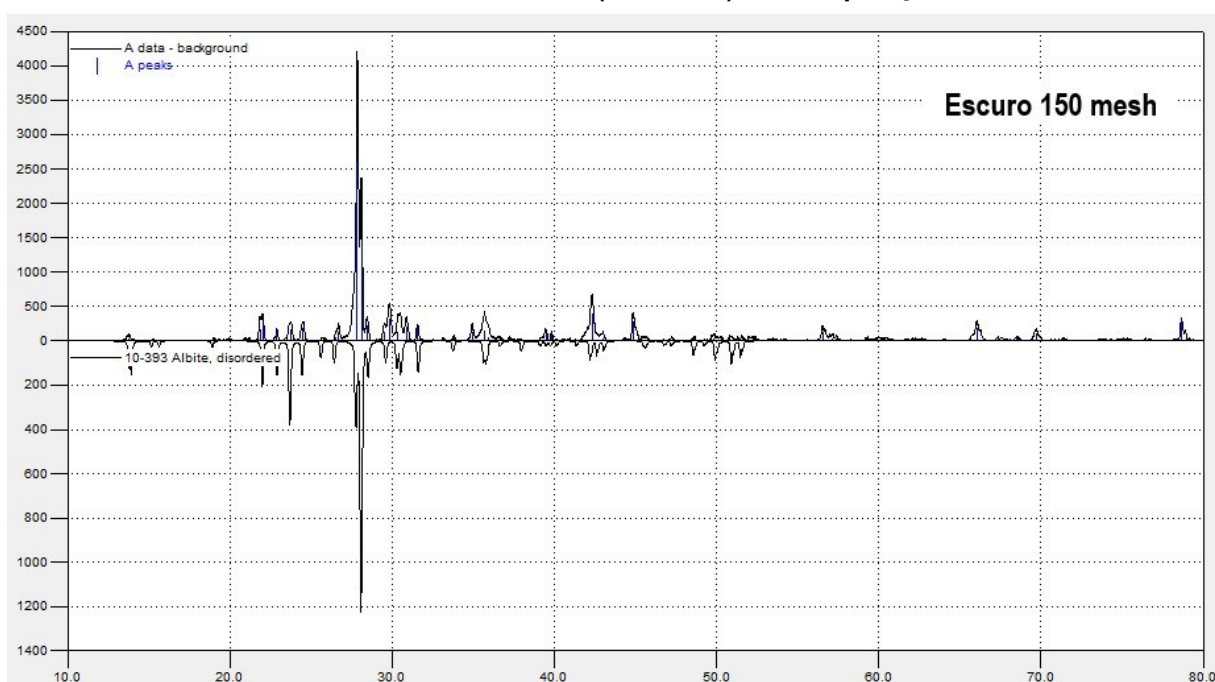
Inicialmente, como se pode perceber pelas leituras, há uma grande semelhança entre os dois tipos de difratogramas do basalto. Em seguida, foi possível fazer uma comparação de picos da amostra com materiais já existentes na base de dados do *software*. Com isso, é possível perceber que pode haver a presença da fase anortita e albita, devido à semelhança entre os picos, como mostra o Gráfico 5 e 6.

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



Fonte: Autoria Própria (2023)

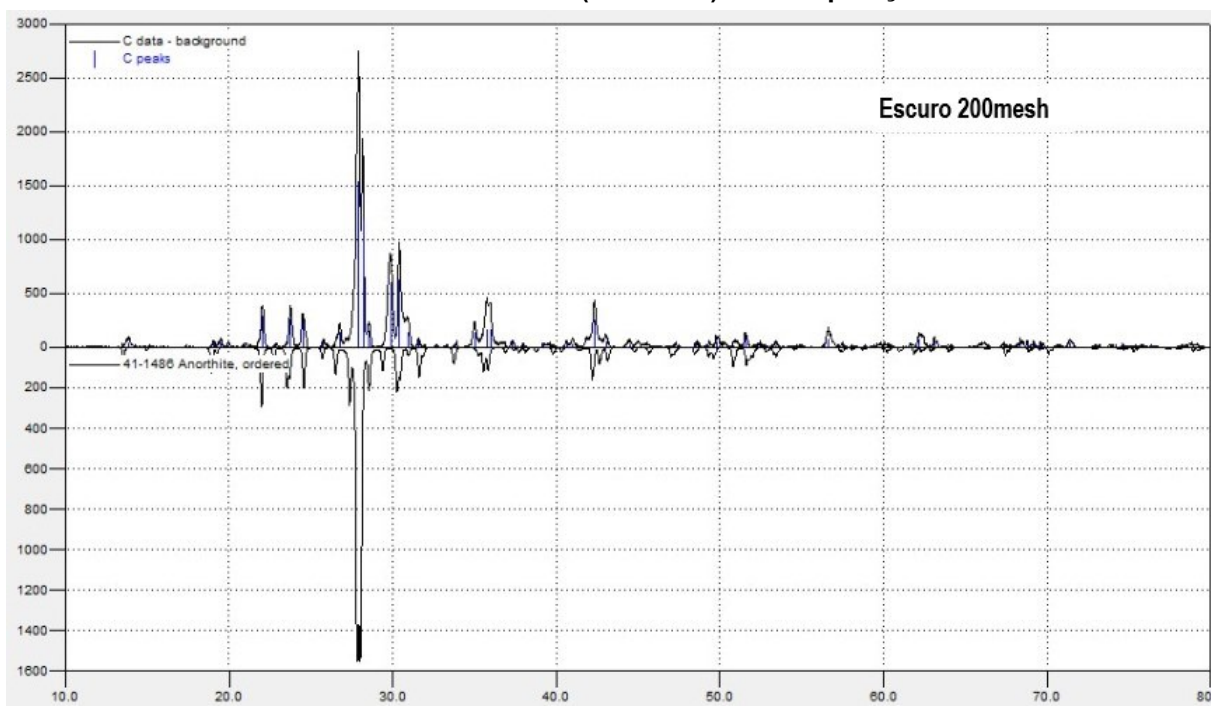
Gráfico 6 - Leitura da amostra escura (150 mesh) em comparação com a albita



Fonte: Autoria Própria (2023)

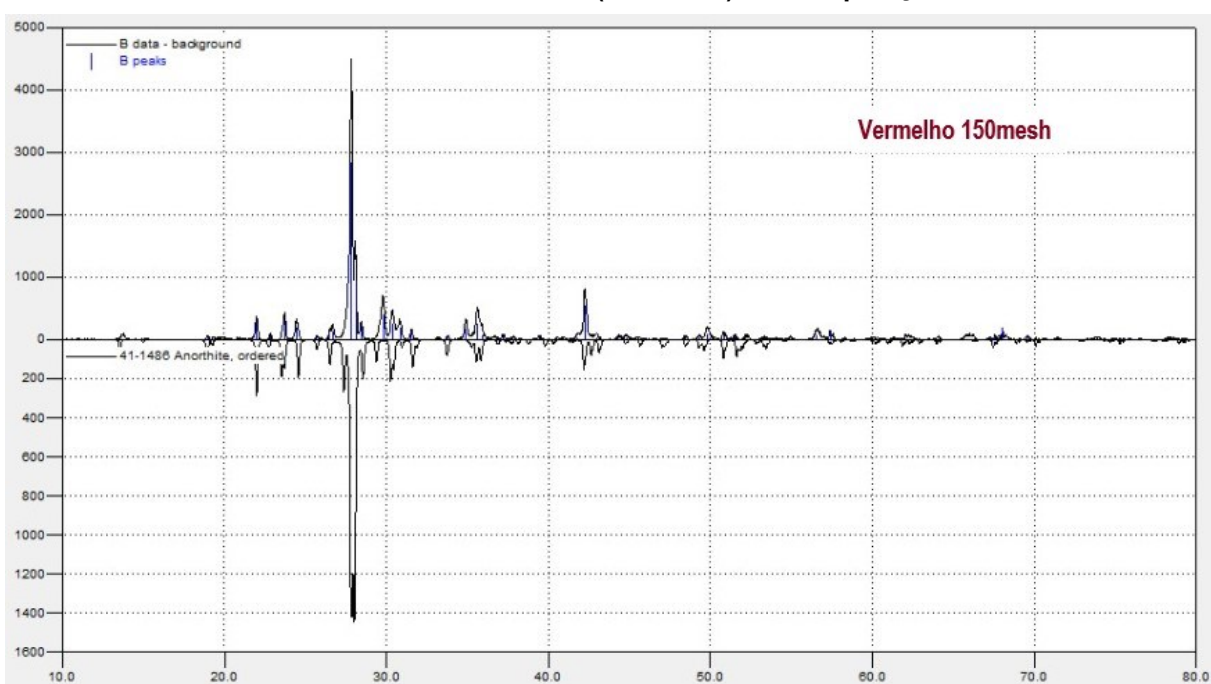
Do mesmo modo, os Gráficos 7, 8 e 9 apresentam a comparação das amostras com a anortita.

Gráfico 7 - Leitura da amostra escura (200 mesh) em comparação com a anortita



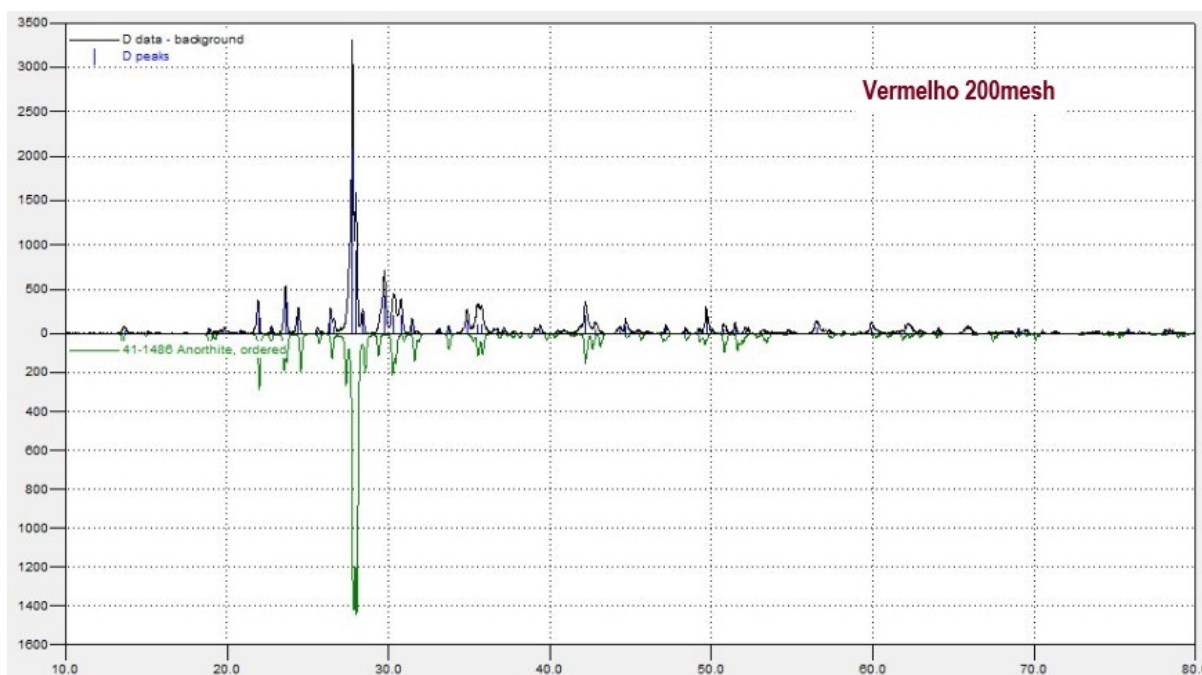
Fonte: Autoria Própria (2023)

Gráfico 8 - Leitura da amostra vermelha (150 mesh) em comparação com a anortita



Fonte: Autoria Própria (2023)

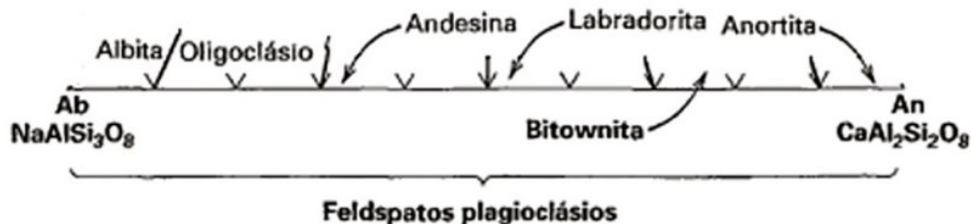
Gráfico 9 - Leitura da amostra vermelha (200 mesh) em comparação com a anortita



Fonte: Autoria Própria (2023)

A presença de anortita e albita confirma que o material pertence ao grupo dos plagioclásios, pois, de acordo com trabalhos encontrados na literatura, a anortita é um mineral pertencente ao grupo dos feldspatos, conhecido como plagioclásio – minerais pertencentes ao subgrupo dos plagioclásios, normalmente, possuem cálcio ou sódio em sua composição -, além de possuir uma estrutura cristalina triclinica (ZAIYOU *et al.*, 2016). Sua fórmula química é posta como $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$. De forma semelhante, a albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) também pertencente ao grupo plagioclásio e diferente da anortita, não possui cálcio em sua composição, e sim sódio. Segundo a Equipe da USP, os plagioclásios compreendem sólidos minerais que vão desde a albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) até a anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), fato que pode ser observado na Figura 3. De acordo com Rouabhia, Nemamcha e Moumeni (2018), a presença de anortita aumenta a resistência e estabilidade química do material e melhora suas propriedades físicas, e a presença de albita promove as propriedades químicas da cerâmica. Saridemir e Bulut (2021), em seu trabalho, realizaram o teste DRX em amostra de pó de basalto, o qual constatou a presença de anortita, diopsídio potássiano, albita e feldspato. No trabalho de Schiavon, Redondo e Yoshida (2007) é apresentado um difratograma de raios-X de fibras de basalto, com resultados muito semelhantes ao encontrado neste trabalho.

Figura 7 - Série dos plagioclásios



Fonte: Wetzel *et al.* (2020)

Realizou-se também um teste FRX (Fluorescência de Raio-X) a fim de determinar e quantificar os compostos presentes na amostra. O teste foi realizado em triplicata para a amostra escura e vermelha, ambas peneiradas a 150 mesh. A média dos resultados encontra-se na Tabela 1 e 2.

Tabela 1 - Composição química da amostra vermelha

Amostra Vermelha	
Composto	Teor de presença na amostra
SiO ₂	44,67%
Fe ₂ O ₃	15,14%
Al ₂ O ₃	13,77%
Na ₂ O	8,55%
CaO	10,06%
MgO	3,14%
TiO ₂	1,74%
Outros	2,91%

Fonte: Autoria Própria (2023)

Tabela 2 - Composição química da amostra escura

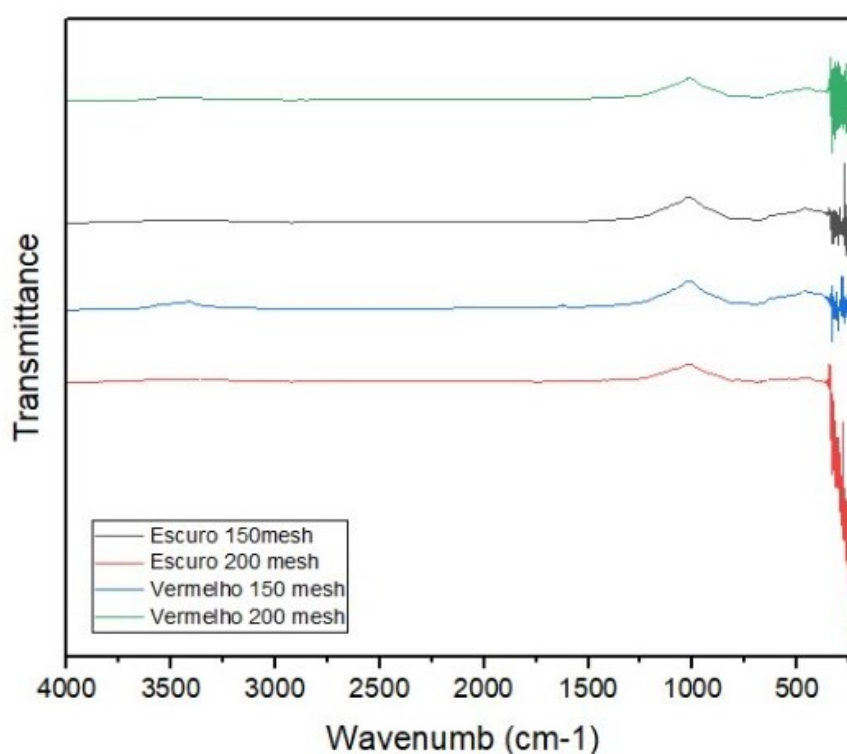
Amostra Escura	
Composto	Teor de presença na amostra
SiO ₂	44,00%
Fe ₂ O ₃	15,09%
Al ₂ O ₃	13,5%
Na ₂ O	9,86%
CaO	9,80%
MgO	3,33%
TiO ₂	1,70%
Outros	2,68%

Fonte: Autoria Própria (2023)

Os resultados do FRX fortalecem a ideia da presença de anortita e albita por conta da grande presença de SiO_2 – o principal composto encontrado nos feldspatos plagioclásicos (KLEIN; DUTROW, 2012). Outro fator que determina a presença de anortita e albita é o teor de Al_2O_3 , uma das principais ligações dos plagioclásios desse grupo (ROUABHIA; NEMAMCHA; MOUMENI, 2018).

O Gráfico 10 foi realizado a partir dos resultados obtidos do teste FTIR. O *software* OriginLab foi utilizado para a interpretação dos dados. Os eixos representam o comprimento de onda e transmitância na faixa de 4.000 a 500 cm^{-1} .

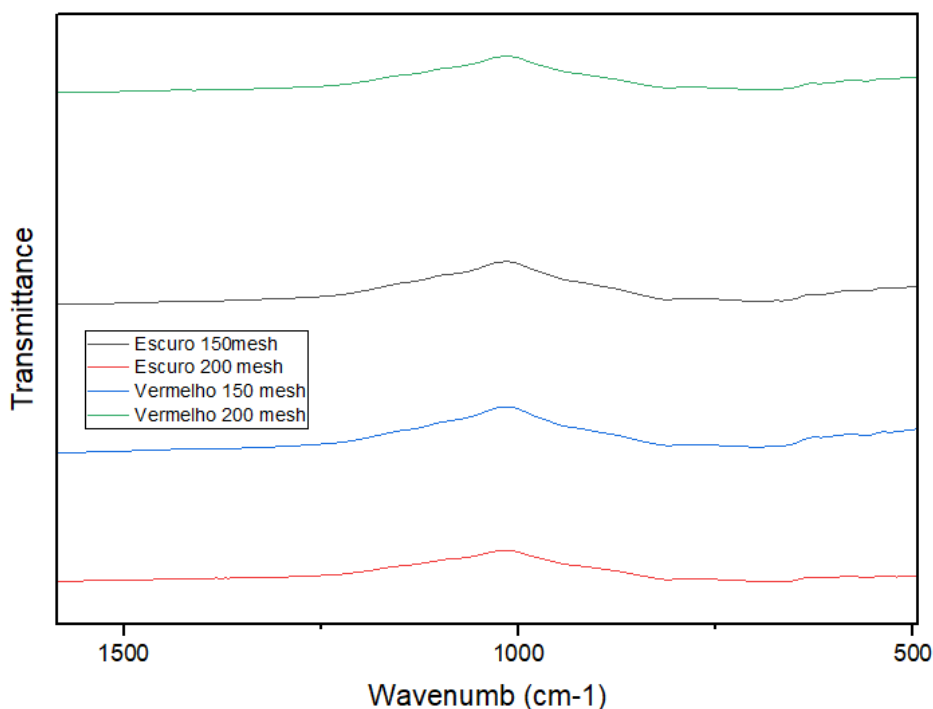
Gráfico 10 - Resultado da análise FTIR



Fonte: Autoria Própria (2023)

A princípio percebe-se que a transmitância apresenta um pico próximo ao comprimento de onda de 1.000 cm^{-1} , com vários picos se manifestando na faixa de 500 cm^{-1} , os quais podem ser considerados ruídos. Com isso, a ênfase maior será na faixa de 1.000 cm^{-1} , que se encontra ampliado no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Resultado da análise FTIR (ampliado)

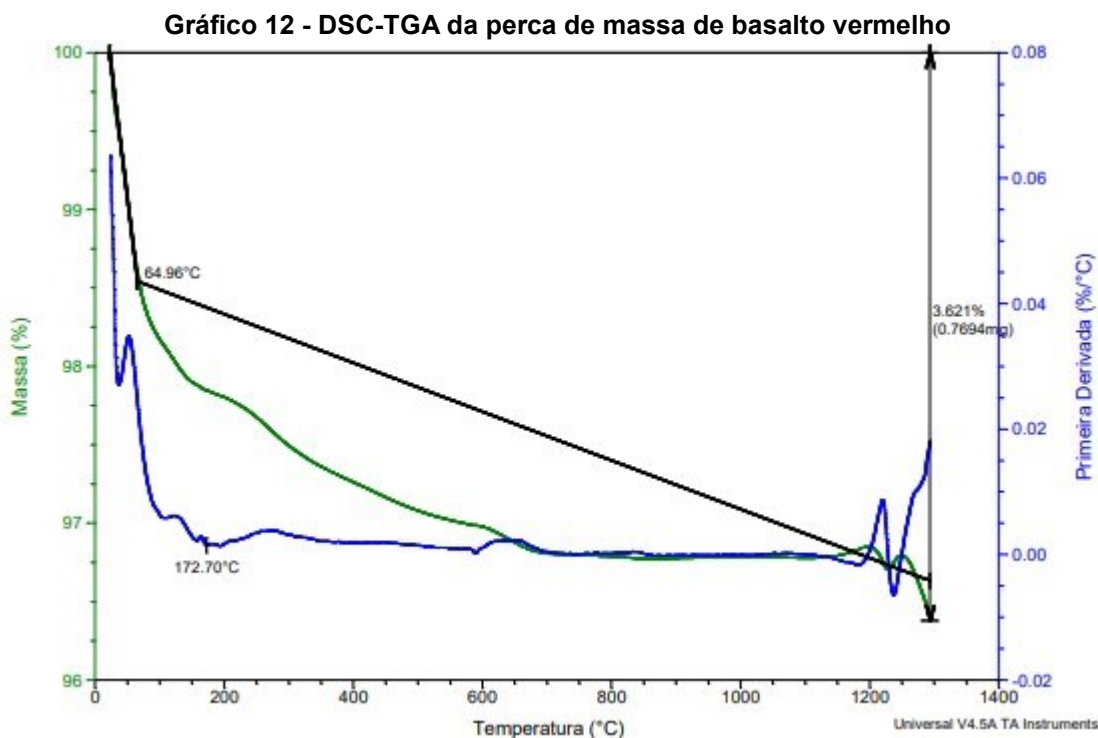


Fonte: Autoria Própria (2023)

Em uma análise FTIR de um composto basáltico, Saridemir e Bulut (2021) encontraram um sinal na faixa de comprimento de onda próximo a 100 cm^{-1} que, segundo os autores, pode representar uma ligação de silício e oxigênio e/ou silício, oxigênio e alumínio. De acordo com Frydych *et al.* (2020), o pico em torno de 1.000 cm^{-1} representa a vibração Si-O. Do mesmo modo, Radosavljević-Mihajlović *et al.* (2021) afirmam que as vibrações próximas a 1.000 cm^{-1} são atribuídas as vibrações de alongamento simétrico dos tetraedros de SiO_4 e AlO_4 , e as vibrações na região do comprimento de onda de 450 cm^{-1} correspondem a presença de ligações Ca-O e Mn-O.

No trabalho de Prasath *et al.* (2020), após realizar uma análise FTIR em pó de basalto, os autores constataram a presença do grupo hidroxila (OH) no material em um comprimento de onda de $3.390\text{--}3.425\text{ cm}^{-1}$, caracterizando-o de natureza polar hidrofílica. Os autores também evidenciaram a presença de CH_3 (metil) e CH_2 (etileno) no pó de basalto.

Com relação ao teste de análise térmica, o resultado foi analisado com o auxílio do *software* da *TA Instruments*. O Gráfico 12 exibe o resultado da análise TGA para a amostra de basalto vermelho, com os eixos de massa e temperatura e a primeira derivada da massa.

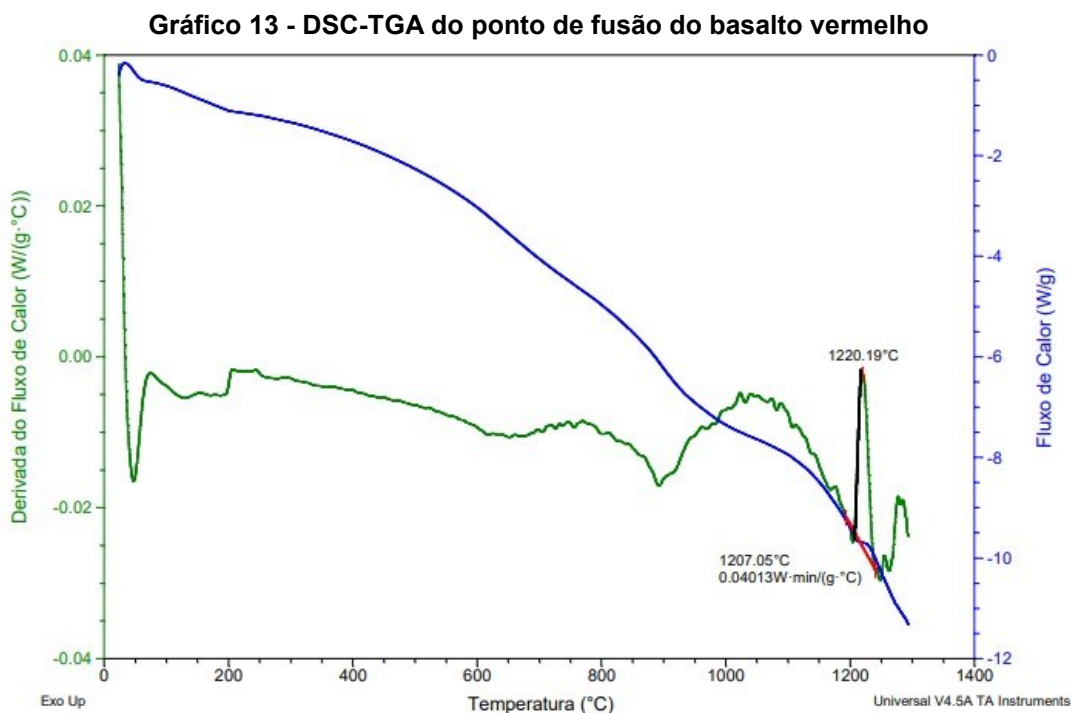


Fonte: Autoria Própria (2023)

De acordo com o gráfico, a amostra teve 0,7694 g ou 3,621% de perda de massa e, considerando que essa perda é referente a umidade do material durante o aquecimento, pode-se afirmar que não há a presença de material orgânico na amostra do pó de basalto vermelho.

A temperatura do *onset point* foi de 64,96°C, e a temperatura de pico encontrada foi de 172,70°C. A partir disso, pode-se dizer que, em temperatura ambiente, não há indícios de alguma reação ou fusão do basalto, demonstrando uma estabilidade do material, um fator desejado para a confecção de biomateriais.

Com o auxílio do *software* também foi possível encontrar a temperatura de fusão da amostra, a partir do fluxo de calor e sua derivada, como mostra o Gráfico 13.



Fonte: Autoria Própria (2023)

Pode-se observar que a temperatura em que ocorre a fusão da amostra transformando-a em vidro foi entre as temperaturas de 1.207,05°C e 1.220,19°C. Drobot *et al.* (2013) constataram que a temperatura de fusão do basalto começa em 1.000°C, visto que a sinterização do material começa com a fusão de plagioclásios, que constituem a maior parte do basalto moído, e o aumento da temperatura para 1.340°C leva à fusão completa deste componente.

Ao realizar o teste DSC-TGA em seu trabalho com basalto nanométricos, Alwafi e Saeed (2022) observaram que nenhuma fase cristalina mudou nos basaltos puros durante o aquecimento - da temperatura ambiente até 1.200K (926,85°C) e que, em geral, o nanobasalto puro apresentou estabilidade térmica. Lima (2020) pode analisar em seu trabalho que em 1.195°C o basalto cristalizou, comprovando a fase vítrea do material, o que é uma característica de materiais que possuem SiO₂ em sua composição. Para biomateriais, a fase vítrea não seria algo desejado, porém essa fase só ocorre em temperaturas extremas acima de 1.000°C, temperatura a qual, normalmente, os biomateriais não são expostos.

6 CONCLUSÃO

Os testes de caracterização química do pó de basalto apresentaram resultados positivos para seu uso como biomaterial. O teste FRX comprovou que a composição química do material encontra respaldo no que é disposto pela literatura, não apresentando compostos nocivos à saúde humana. A análise térmica demonstrou que o material não apresenta mudança de fase em temperatura ambiente ou na temperatura normal do corpo humano (36°C), bem como a inexistência de reações químicas ou fusão em temperatura ambiente, comprovando a estabilidade do basalto. Os resultados do FTIR e DRX apontaram a presença do grupo plagioclásio, contendo anortita e albita, aumentando, assim, a resistência e estabilidade química do material.

Conclui-se, então, que o pó de basalto, oriundo do descarte das pedreiras, poderá ter um destino final útil, sendo empregado na produção de biomateriais, visto que é um material estável quimicamente e seguro à saúde humana. Como sugestão para trabalhos futuros, convém a realização do teste de toxicidade do material bem como um teste de biocompatibilidade.

REFERÊNCIAS

- ALWAFI, R.; SAEED, A. Single-Walled Carbon Nanotubes in Nanosized Basalts as Nanocomposites: The Electrical/Dielectric Properties and Electromagnetic Interference Shielding Performance. **Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials**, v. 32, p. 4340-4358, 2022.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.
- CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramics Materials: Science and Engineering**. New York: Springer, 2007.
- DA WETZEL, R. S.; MÁRCIO, F.; SILVA, L. A. *et al.* **Mineralogia**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2020.
- DROBOT, N. F.; NOSKOVA, O. A.; STEBLEVSKII, A. V.; FOMICHEV, S. V.; KRENEV, K. A. Use of chemical and metallurgical methods for processing of gabbro-basalt raw material. **Theoretical Foundations of Chemicals Engineering**, v. 47, p. 484-488, 2013.
- FIORE, V.; SCALICI, T.; DI BELLA, G.; VALENZA, A. A review on basalt fiber and its composites. **Composite's part B: Engineering**, v. 74, p. 74-94, 2015.
- FRYDYCH, M.; HYSEK, S.; FRIDRICHOVÁ, L.; LE VAN, S. *et al.* Impact of Flax and Basalt Fibre Reinforcement on Selected Properties of Geopolymer Composites. **Sustainability**, v. 12, p. 118, 2020.
- GILL, R. **Igneous rocks and processes: a practical guide**. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- GROOVER, M. P. **Fundamentos da Moderna Manufatura**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- HESTERBERG, T. W.; MILLER, W. C.; McCONNEL, E. E.; CHEVALIER, J. *et al.* Chronic inhalation toxicity of size-separated glass fibers in Fischer 344 rats. **Fundamental and Applied Toxicology**, v. 20, p. 464-476, 1993.
- HUMMEL, R. E. **Understanding Materials Science**. 2. ed. New York: Springer-Verlag LCC, 2004.
- KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciências dos Minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- KOGANAND, F. M.; NIKITINA, O. V. Solubility of Chrysotile Asbestos and Basalt Fibers in Relation to their Fibrogenic and Carcinogenic Action. **Environmental Health Perspectives**, v. 102, p. 205-206, 1994.

LAMANA, C. X. **Rochas**: Canal Escola. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2009. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Rochas-1107.html?tpl=printerview>>. Acesso em: 20 set. 2022.

LIMA, L. F. **Efeito do teor de ferro na síntese de vitrocerâmicos de basalto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de e Ciência dos Materiais, Caxias do Sul, 2020.

LIMA, L. F.; MANTAS, P. Q.; SEGADÃES, A. M.; CRUZ, R. C. D. Processing and characterization of sinter-crystallized basalt glass-ceramics. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 538, 2020

LIMA, L. F.; ZORZI, J. E.; CRUZ, R. C. D. Basaltic glass-ceramic: A short review. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 61, p. 2-12, 2022.

LIU, H.; YU, Y.; LIU, Y.; ZHANG, M. *et al.* A Review on Basalt Fiber Composites and Their Applications in Clean Energy Sector and Power Grids. **Polymers**, v. 14, n. 12, 2317, 2022.

MILITKI, J.; KOVACIC, V.; BAJZIK, V. Mechanical Properties of Basalt Filaments. **Fibres & Textiles**, v. 15, n. 5-6, p. 64-65, 2007.

NEWELL, J. **Fundamentos da Moderna Engenharia e Ciência dos Materiais**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

PARK, J.; LAKES, R. S.; **BIOMATERIALS**: An introduction. 3. ed. USA: Springer, 2007.

PARK, J. B.; BRONZINO, J. D. **Biomaterials**: principles and applications. Flórida: CRC Press, 2003.

PRASATH, K.; ARUMUGAPRABU, V.; AMUTHAKKANNAN, P.; MANIKANDAN, V. *et al.* Low velocity impact, compression after impact and morphological studies on flax fiber reinforced with basalt powder filled composites. **Materials Research Express**, v. 7, 2020.

PETROPAVLOVSKAYA, V.; BURYANOV, A.; NOVICHENKOVA, T.; PETROPAVLOVSKII, K. Gypsum composites, improved by applying basalt dust. **MATEC Web of Conferences**, v. 170, p. 7, 2018.

POPP, J. H. **Geologia geral**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

QUEIROZ, R. C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. São Paulo: Editora Blucher, 2016.

RADOSAVLJEVIĆ-MIHAJLOVIĆ, A.; MITIC, V.; SAPONJIC, A.; KASIC, V. D. Thermally Induced Phase Transformation of Mn – LTA and Mn – FAU Zeolite to Anorthite Phases. **Science of Sintering**, v. 53, p. 397-406, 2021.

REGÍ-VALLET, M. Evolution of bioceramics within the field of biomaterials. **Comptes Rendus Chimie**, v. 13, n. 1-2, p. 174-185, 2010.

ROUABHIA, F.; NEMAMCHA A.; MOUMENI H. Elaboration and characterization of mullite-anorthite-albite porous ceramics prepared from Algerian kaolin. **Cerâmica**, v. 64, p. 126-132, 2018.

SANTOS, G. A. **Tecnologias Mecânicas: materiais, processos e manufatura avançada**. São Paulo: Érica, 2020.

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.

SINHORETI, M. A. C.; VITTI, R. P.; SOBRINHO, L. C. Biomateriais na Odontologia: panorama atual e perspectivas futuras. **Revista da Associação Paulista de Cirurgiões Dentista**, v.67, n.4, p. 256-261, 2013.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Porto Alegre: AMGH, 2012.

STEIN, R. T.; GEHLEN, R. Z.da C.; ROJAS, F. C. **Tecnologia dos materiais**. Porto Alegre: SAGAH, 2017.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 4, p. 721-730, 2006.

TOSCAN, L.; KAUTZMANN, R. M.; SABEDOT, S. O rejeito da mineração de basalto no nordeste do Estado do Rio Grande do Sul: diagnóstico do problema. **Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 4, p. 657-662, 2007.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). **Plagioclásio**. Criado pela Equipe Técnica da Seção e Colaboradores da USP. Disponível em: <<https://didatico.igc.usp.br/minerais/silicatos/tectossilicatos/plagioclasio/>>. Acesso em: 24 abr. 2023.

WETZEL, R. S.; LEÃO, M. F.; SILVA, L. A. *et al.* **Mineralogia**. Porto Alegre: SAGAH, 2020.

WICANDER, R.; MONROE, J., S. **Geologia**. Tradução da 2ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2017.

WILLIAMS, D.F. **The Williams dictionary of biomaterials**. Liverpool University Press, Liverpool, UK, 368, 1999.

YUAN, Y.; LIN, D.; CHEN, F.; LIU, C. Clinical translation of biomedical materials and the key factors towards product registration. **Journal of Orthopaedic Translation**, v. 2, p. 49-55, 2014.

ZAIYOU, S.; HARABI, A.; HARABI, E.; GUECHI, A. *et al.* Sintering of anorthite based ceramics prepared from kaolin DD2 and calcite. **Cerâmica**, v. 62, n. 364, 2016.

ZHANG, K.; MA, B.; HU, K.; YUAN, B. *et al.* Evidence-based biomaterials research. **Bioactive Materials**, v. 15, p. 495–503, 2022.