



IARA MARQUES DE CARVALHO

**COMPARAÇÃO DE CERÂMICAS POROSAS PRODUZIDAS
PELA QUEIMA DE CASCA DE ARROZ, BORRA DE CAFÉ
E SERRAGEM DE MADEIRA COMO AGENTES
POROGÊNICOS E ESTUDO DA VIABILIDADE DA
APLICAÇÃO DESTES MATERIAIS EM FILTROS DE
ÁGUA.**

**LAVRAS – MG
2022**

IARA MARQUES DE CARVALHO

**COMPARAÇÃO DE CERÂMICAS POROSAS PRODUZIDAS PELA QUEIMA DE
CASCA DE ARROZ, BORRA DE CAFÉ E SERRAGEM DE MADEIRA COMO
AGENTES POROGÊNICOS E ESTUDO DA VIABILIDADE DA APLICAÇÃO
DESTES MATERIAIS EM FILTROS DE ÁGUA.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte
das exigências do Curso de Engenharia de
Materiais, para a obtenção do título de
Bacharel.

Prof. Dr. Leonardo Sant'Ana Gallo

Orientador

LAVRAS -MG

2022

IARA MARQUES DE CARVALHO

COMPARAÇÃO DE CERÂMICAS POROSAS PRODUZIDAS PELA QUEIMA DE CASCA DE ARROZ, BORRA DE CAFÉ E SERRAGEM DE MADEIRA COMO AGENTES POROGÊNICOS E ESTUDO DA VIABILIDADE DA APLICAÇÃO DESTES MATERIAIS EM FILTROS DE ÁGUA.

COMPARISON OF POROUS CERAMIC PRODUCTS PRODUCED BY THE SINTERING OF RICE HUDS, COFFEE GROUNDS AND WOOD SAWDRESS AS POROGENIC AGENTS AND THE STUDY OF THE FEASIBILITY OF THE APPLICATION OF THESE MATERIALS IN WATER FILTERS.

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Materiais, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 22 de abril de 2022
Dr. Leonardo Sant'Ana Gallo UFLA
Dra. Jéssica de Oliveira Notório Ribeiro UFLA
Dra. Jeanini Jiusti LDMC

Prof. Dr. Leonardo Sant'Ana Gallo

Orientador

LAVRAS -MG

2022

AGRADECIMENTOS

À Deus, por toda providência, amor e cuidado durante esta jornada e por ter me sustentado até aqui.

À minha mãe, Renata, que apesar da distância sempre se manteve presente em todos os momentos, por todo o cuidado e amor, e por ter lutado pelos meus sonhos junto comigo.

Ao meu Pai, José Rodrigues, o meu maior incentivador, que desde criança sempre me ensinou a buscar concretizar meus objetivos e sonhos, por ter batalhado tanto para que eu conseguisse a minha tão sonhada graduação.

Aos meu irmãos, José Victor e Alice, meus grande companheiros desde a infância, por todo apoio a minha trajetória e por estarem sempre ao meu lado.

Aos meus avós, Carmen e José dos Santos, por toda preocupação e cuidado comigo durante estes anos.

À minha madrinha, Daniela, que muito me ajudou nesta jornada e também ao meu afilhado, Gabriel, por todo amor que representa na minha vida.

À todo restante da minha família, que torceram por mim e acreditaram sempre no meu potencial.

À todos os meus amigos do Ministério Universidades Renovadas, que me acolheram e fizeram parte de toda a minha trajetória na universidade, por todo o amor e força na minha caminhada espiritual que me deram em todo este tempo.

Ao Padre Samuel Henrique Borges, meu pároco muito querido, por todas as orações, conselhos e apoio.

Ao meu namorado, Uriel, que esteve ao meu lado em todos os momentos, por todo o apoio, amor e força que me deu na minha graduação.

À família do meu namorado, pelo acolhimento e por todo auxílio que me deram ao longo destes anos.

À todos os meus amigos de Bambuí, que mesmo longe, sempre torceram por mim.

À todos os meus professores, em especial ao Leonardo Gallo, meu orientador, que muito me auxiliou nesta jornada compartilhando comigo conhecimento, contribuindo com minha formação acadêmica e profissional.

Muito obrigada!

RESUMO

As cerâmicas porosas, utilizadas em diversas aplicações, podem ser obtidas por diferentes processos. Um dos primeiros métodos elaborado para se obter estas cerâmicas é o método de incorporação de material orgânico, que é muito empregado ainda nos dias atuais pela sua simplicidade e baixo custo, além de ser um processo que tem como vantagem a reutilização de resíduos que seriam descartados. As propriedades dos materiais relacionadas a obtenção de poros por este método dependerão do tamanho da partícula do agente porogênico utilizado, da maneira na qual o material ficou situado e quantidade de material orgânico adicionado ao corpo cerâmico. O objetivo deste projeto foi compreender como serragem de madeira, casca de arroz e borra de café promovem os poros nas cerâmicas e analisar a viabilidade da aplicação dos materiais obtidos em filtros de água. Foram avaliadas as características quanto aos poros obtidos com o auxílio de microscopia óptica, ensaio de porosidade aparente e ensaio de flexão em três pontos para avaliar a tensão de ruptura e módulo de elasticidade de amostras de material obtido por duas diferentes concentrações de material orgânico incorporado nas amostras, sendo elas 5 e 20% em massa. Os ensaios de porosidade aparente e microscopia óptica mostraram que quanto maior a quantidade de agentes porogênicos adicionados, maior a quantidade de poros nas amostras. O mesmo acontece com o diâmetro médio de poros, sendo que as amostras apresentaram diâmetro médio de uma ordem de grandeza maior do que a cerâmica comercial utilizada como filtro de água. A amostra com menor tamanho de poro foi a que continha 5% de serragem e as amostras com maior tamanho de poro foram as obtidas a partir de borra de café. As amostras que continham 5% de serragem, foram as que apresentaram a menor quantidade de poros superficiais e internos e a menor porosidade aparente, o que revela a presença de poros fechados. As demais amostras apresentaram maior quantidade de porosidade aberta, sendo que as amostras com 20% de serragem de madeira e casca de arroz apresentaram porosidade aberta semelhante à cerâmica comercial. A retração linear diminuiu com o aumento na concentração de agentes porogênicos. As amostras apresentaram uma diminuição no desempenho mecânico com o aumento no teor de porosidade, sendo que as amostras cujo agente porogênico utilizado foi a serragem de madeira, apresentaram melhor desempenho mecânico e as amostras com borra de café apresentaram maior fragilidade quando comparadas às demais. As amostras que apresentaram maior viabilidade para utilização em filtros de água foram as amostras com 20% de casca de arroz e serragem de madeira, devido às suas propriedades de porosidade, que ainda precisam ser otimizadas para gerarem uma maior eficiência na purificação de água.

Palavras-chave: Agentes porogênicos; Cerâmicas porosas; Triaxial cerâmico; Filtros de água.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	9
2.1. Triaxiais Cerâmicos.....	9
2.2. Cerâmicas Porosas.....	9
2.3. Processos de Fabricação de Cerâmicas Porosas.....	11
2.4. Agentes Porogênicos.....	12
2.5. Filtros de Água Cerâmicos.....	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
3.1. Obtenção das Amostras de Triaxial Cerâmico Poroso.....	16
3.1.1. Matérias-primas Utilizadas.....	16
3.1.2. Procedimento de Obtenção das Amostras.....	17
3.2. Ensaio Mecânicos.....	19
3.3. Microscopia Óptica.....	20
3.4. Porosidade Aparente.....	21
3.5. Retração de Queima.....	21
3.6. Análise do Material de uma Vela de Filtro Cerâmica Comercial.....	22
3.7. Análise Estatística dos Dados.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1. Análise das Propriedades das Amostras de Triaxial Cerâmico Obtidas.....	25
4.1.1. Análise Visual.....	25
4.1.2. Microscopia Óptica.....	27
4.1.3. Porosidade Aparente.....	32
4.1.4. Retração Linear de Queima.....	34
4.1.5. Ensaio Mecânicos.....	35
4.2. Viabilidade da Aplicação das Cerâmicas Obtidas em Filtros de Água.....	36
4.3. Considerações Finais.....	39
5. CONCLUSÃO.....	40
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Cerâmicas porosas são necessárias para diversas aplicações, tais como: isolamento acústico e térmico de edificações, suporte de catalisadores, filtros, trocadores de calor, queimadores de gás e implantes médicos. Estes materiais necessitam de microestruturas específicas para as diferentes aplicações. Sendo assim, podem ser produzidas por diferentes processos e rotas, para se obter poros de diferentes distribuições, tamanhos e conectividade entre poros (DUTRA; PONTES, 2002; ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014; RIBEIRO *et.al.*, 2019).

Um desses processos consiste na adição de agentes porogênicos à matriz cerâmica. No processo da sinterização, estes componentes queimarão e formarão poros. Estes produtos adicionados geralmente são produtos orgânicos, porém materiais inorgânicos também podem ser utilizados (ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014; SOUZA, 2018; RIBEIRO *et.al.*, 2019).

Este processo foi um dos primeiros métodos desenvolvidos para obtenção de cerâmicas porosas e ainda é largamente utilizado por ser um processo simples. Nesta técnica de preparação, a formação de poros dependerá do tamanho da partícula do agente porogênico utilizado, da maneira com que o material ficou situado e da quantidade de material orgânico adicionado ao corpo cerâmico (DUTRA; PONTES, 2002; ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014).

A utilização de resíduos, que na maioria das vezes seriam descartados em um processo de obtenção de materiais porosos possui ainda outra grande vantagem: a sustentabilidade. Assim, esta pesquisa se mostra vantajosa, pois além de ser uma alternativa de baixo custo, também é uma forma de reaproveitar diversos detritos orgânicos que seriam descartados (ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014).

Uma das aplicações em que cerâmicas porosas obtidas por este método são bastante utilizadas é na fabricação de filtros de água cerâmicos. O estudo de materiais para esta aplicação é de grande importância, uma vez que um problema que enfrentamos na atualidade é a falta de acesso a água potável, principalmente em países em desenvolvimento. Estima-se que mais de 780 milhões de pessoas no mundo se encontram nesta realidade, que gera muitas consequências, principalmente à saúde destas pessoas, que é muito dependente da qualidade da água que é consumida por elas (AKOSILE *et.al.*, 2020; MAXWELL *et.al.*, 2021).

Os filtros de água cerâmicos, além de possuírem uma boa eficiência na purificação da água, possuem os benefícios de serem materiais de baixo custo, de boa portabilidade, leveza e acessibilidade. Além disso, é possível utilizá-lo em diversos formatos: como vasos, discos e velas (AKOSILE *et.al.*, 2020). Por esses e outros motivos, estes filtros são muito viáveis de serem utilizados nestes países em desenvolvimento, para garantir o acesso a água potável a todos que dela necessitam.

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho da utilização de três produtos orgânicos, sendo eles borra de café, serragem de madeira e casca de arroz como agentes formadores de poros em cerâmicas porosas. Foi realizada uma comparação das propriedades mecânicas e porosidade das amostras obtidas a partir de duas concentrações distintas de produto orgânico em um triaxial cerâmico, sendo elas: 5% e 20% em massa. O projeto busca compreender como estes resíduos orgânicos provocam a porosidade em cerâmicas e analisar a viabilidade dos materiais obtidos para utilização em filtros de água.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Triaxiais Cerâmicos

Triaxiais cerâmicos são aquelas formadas por três matérias-primas, normalmente argila, feldspato e quartzo. A argila pode ser caulim ou *ball clay* (São Simão). Há poucas diferenças entre o caulim e a *ball clay*, uma vez que ambas exibem natureza caulinítica e possuem quartzo (SiO_2) e ferro (Fe_2O_3) como impurezas majoritárias e minoritárias, respectivamente (JERMOLOVICIUS; MOLISANI,2018).

Cada uma das três matérias-primas concede ao corpo cerâmico uma característica distinta, sendo a argila responsável por dar plasticidade a massa, o feldspato atua como principal fundente e o quartzo ocupa-se com a estrutura da peça. Estes materiais, ao serem utilizados com proporções distintas, originam produtos diversos, classificados quanto a temperatura de queima, porosidade e absorção de água. Um exemplo de um triaxial cerâmico muito utilizado na indústria é a porcelana (GUERINO et al.,2010).

2.2 Cerâmicas Porosas

Tradicionalmente, quando se trabalha com materiais cerâmicos, busca-se evitar a presença de poros, uma vez que os materiais cerâmicos são frágeis por natureza. Os poros atuam como concentradores de tensão, diminuindo a resistência. Apesar disso, as cerâmicas porosas são materiais que estão sendo muito estudados nos últimos anos devido a possibilidade de diversas aplicações, tais como revestimentos cerâmicos, materiais filtrantes e membranas utilizados para eliminar ou reduzir poluentes, já que a poluição ambiental tem aumentado. Algumas outras aplicações para estes materiais incluem: isolamento acústico e térmico das edificações, catalisadores, materiais para proteção contra o fogo, isolantes térmicos, ressonadores dielétricos, queimadores de gás, trocadores de calor, implantes biomédicos para substituição óssea, biorreatores e motores para combustão (DUTRA; PONTES, 2002; TOPATEŞ *et. al.*, 2013; ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014; PAGANO, 2017; RIBEIRO *et.al.*, 2019; CHALIA *et.al.*, 2020).

Um material heterogêneo que possui poros ou vazios em sua microestrutura é considerado um material poroso. Essa microestrutura peculiar geralmente é modelada como um sistema bifásico

constituída pela fase sólida (o material heterogêneo) e a fase vazia (poros). São consideradas cerâmicas porosas o material cerâmico com alto percentual de porosidade (entre 20% e 95%). Existem três categorias para estas cerâmicas dependendo do diâmetro médio dos poros, sendo elas: microporos (menos de 2nm), mesoporos (entre 2 e 50nm) e macroporos (mais de 50nm). O volume dos poros é representado pela distribuição do tamanho e é função do tamanho de poros (CHALIA *et.al.*, 2020).

Há uma crescente necessidade de materiais com as propriedades dos materiais cerâmicos aliados a porosidade controlada. Estas propriedades incluem: baixa condutividade térmica, alta resistência ao ataque químico, resistência térmica, resistência a abrasão, densidade relativamente baixa e pontos de fusão elevados. A porosidade irá diminuir a densidade da peça, sua condutividade térmica e constante dielétrica e aumentar sua área superficial e permeabilidade de forma controlada (PAGANO, 2017; CHALIA *et.al.*, 2020).

As propriedades da cerâmica utilizada irão governar de forma expressiva as propriedades do material. Porém, uma vez que a porosidade está significativamente presente, a magnitude das propriedades será governada pela porosidade do material. Há a exceção de algumas propriedades que são inerentes ao material, como o coeficiente de expansão térmico. Sendo assim, a distribuição, tamanho e morfologia dos poros impactarão significativamente em algumas propriedades do material, tais como resistência mecânica, condutividade térmica, taxa de transferência de calor ou constantes elásticas, por isso é necessário a utilização de processos que gerem microestruturas planejadas. É muito importante entender as interdependências entre diversas propriedades e a porosidade (PAGANO, 2017; CHALIA *et.al.*, 2020).

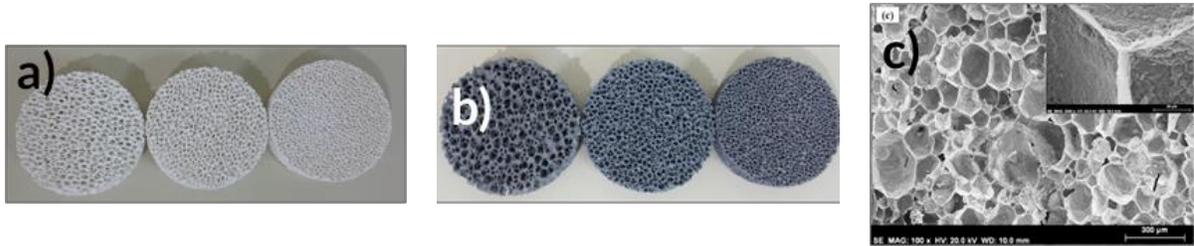
Geralmente, os materiais cerâmicos produzidos de forma porosa incluem óxidos sintéticos, tais como zircônia, alumina, titânia, sílica e nitretos, sendo a alumina a matéria-prima mais amplamente comercializada e utilizada. É possível visualizar na Figura 1 algumas cerâmicas porosas baseadas em alumina, carbetos de silício e zircônia. É inviável a produção destes materiais em larga escala, uma vez que as matérias-primas possuem preço elevado. Por isso, atualmente, as cerâmicas porosas de materiais naturais, tais como as argilas, tem recebido atenção particular devido a sua abundância, boa permeabilidade, estabilidade térmica e resistência ao ataque químico. Estas cerâmicas podem melhorar o funcionamento de diversos processos, incluindo membranas de microfiltração, isolamento térmico de edifícios e suportes fotocatalíticos (MOUIYA *et.al.*, 2019;

ŞAN; KOÇ; CENGİZLER, 2019).

Figura 1: a) Cerâmicas porosas baseadas em alumina com densidade de 10, 20 e 30 ppi.

b) Cerâmicas porosas baseadas em carбето de silício com densidade de 10, 20 e 30 ppi

c) Micrografia de uma cerâmica porosa a base de zircônia



Fonte: a) e b) (GHORASHI *et.al.*, 2018) c) (AHMAD; SONG, 2013).

2.3 Processos de Fabricação de Cerâmicas Porosas

Como mencionado anteriormente, o processo de fabricação utilizado para a produção de cerâmicas porosas irá desempenhar um papel muito importante no controle da microestrutura e propriedades resultantes nestes materiais. Os processos de obtenção de cerâmicas com porosidade controlada dependem muito da morfologia, distribuição e tamanho do produto desejado (MOHANTA *et.al.*, 2014; PAGANO, 2017).

Existem vários métodos para a obtenção de poros em cerâmicas, um deles o método da esponja polimérica, na qual a massa cerâmica é adicionada a uma esponja polimérica, que é removida por uma operação de queima. Outro método é do agente espumante (*foaming*), na qual é adicionado um agente espumante que produz espuma por agitação. Após a remoção da fase líquida, uma estrutura de poros fechados é construída (DUTRA; PONTES, 2002; ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014).

Outros processos para a obtenção de cerâmicas porosas são a sinterização parcial de materiais cerâmicos prensados, método da réplica, inserção gasosa em suspensão e a queima de compostos formadores de poros (agentes porogênicos), sendo que o último foi uma das primeiras técnicas empregadas e é amplamente utilizada até hoje (PAGANO, 2017).

O uso de agentes porogênicos, com relação aos demais processos é favorável, uma vez que é possível fazer um bom controle e planejamento da microestrutura. Com esta técnica, pode-se obter materiais de 20 a 90% em volume de poros com tamanhos variando de 1 a 700µm. A remoção da

fase indesejada também é mais fácil e menos crítica quando reparado a outros processos, o que gera peças com resistência mecânica mais elevada (PAGANO, 2017).

2.4 Agentes Porogênicos

Os agentes porogênicos são materiais utilizados em um processo muito comum para fabricação de cerâmicas porosas, que é o de incorporação de aditivos formadores de poros. Estes aditivos irão atuar como fase de sacrifício, queimando durante a sinterização e resultando em porosidade nas amostras, processo que pode ser visualizado na Figura 2 (MOHANTA *et.al.*, 2014; PAGANO, 2017; RIBEIRO *et.al.*, 2019).

Figura 2: Representação esquemática da formação de poros utilizando o método da adição de agentes porogênicos.



Fonte: Adaptação de (RIBEIRO *et.al.*, 2019).

Este método é um dos mais utilizados para a produção de cerâmicas porosas principalmente por sua simplicidade, mas também pelo fato que com ele, é possível ajustar as características dos poros mediante ao controle da quantidade de agente porogênico utilizado, forma, granulometria e distribuição destes aditivos. Com este processo, também é possível obter porosidade aberta ou fechada, dependendo da maneira com que o agente formador de poros ficar distribuído na matriz cerâmica (DUTRA; PONTES, 2002; ŽIVCOVÁ *et.al.*, 2009; ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014).

Uma grande variedade de formadores de poros são utilizados, entre eles estão incluídos o amido, serragem de madeira, fio de algodão, casca de coco, farinha de trigo e os mais diversos compostos orgânicos e resíduos agroindustriais, que possuem a vantagem de serem ecologicamente corretos, uma vez que, na maioria das vezes, são resíduos que seriam descartados, atóxicos e por apresentarem queima livre de defeitos entre aproximadamente 300 e 600°C. Além dos agentes

porogênicos orgânicos, também podem ser utilizados materiais inorgânicos, tais como espumas poliméricas e fibras, óxidos ou até mesmo líquidos (gel e emulsões) (ŽIVCOVÁ *et.al.*, 2009; MOHANTA *et.al.*, 2014; PAGANO, 2017; SOUZA, 2018).

Um resíduo agrícola que pode ser utilizado como agente porogênico é a casca de arroz. Estima-se que cerca de 600 milhões de toneladas de arroz sejam produzidas anualmente para atender a demanda da população mundial que tem crescido com o passar dos anos. Neste processo, grandes quantidades de casca de arroz são obtidas, sendo que uma parte é destinada a ração para gado e combustível para caldeiras e outra parte é descartada como resíduo. (CHOUDHARY *et.al.*, 2021).

Os resíduos celulósicos da indústria madeireira e moveleira também tem grande potencial para utilização como matéria-prima secundária, uma vez que estes produtos muitas vezes não tem uma destinação adequada. No Brasil, são gerados aproximadamente 60 milhões de toneladas de resíduos madeireiros por ano, uma vez que no processo de transformação da madeira, são aproveitados apenas cerca de 40% a 60% de seu volume, gerando um alto desperdício (AKUTAGAWA, MATSUDA, ASSAD FILHO; 2020). A incorporação de serragem de madeira em corpos cerâmicos também pode ser utilizada para a formação de poros, bem como uma alternativa para reaproveitamento deste resíduo (ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014; BITENCOURT *et.al.*, 2017).

O café, por sua vez, é consumido em todo o mundo e o Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo. De acordo com a Organização Internacional do Café (OIC), o consumo da bebida em 2018, aumentou com relação aos anos de 2016 e 2017, demandando 157,8 milhões de sacas, sendo que 21,99 milhões foram consumidos no Brasil (FRANCO; ROCHA; FILHO, 2020). Assim, a borra de café é um material descartado diariamente e em grandes quantidades por residências e comércios no Brasil. Muitas vezes estes materiais são depositados em aterros sanitários, aumentando o passivo acumulado no lixo. Este resíduo orgânico é constituído de celulose, lignina e hemicelulose, podendo também ser explorado para utilização como agente porogênico (MEI; OLIVEIRA, 2017).

A preparação do sistema bifásico (corpo cerâmico e agente porogênico) tem seus processos bastante flexíveis. Pode ser obtido por prensagem de uma mistura de pós, pela preparação de suspensão bifásica que tenha posteriormente passado por processos de colagem de barbotina, *tape casting*, *freeze casting*, processos tais como a formação sol-gel ou adicionando o aditivo em

suspensão cerâmica (PAGANO, 2017).

2.5 Filtros de Água Cerâmicos

A água é um dos recursos naturais mais importantes para a vida humana. A saúde de todo ser humano depende inteiramente de sua qualidade. Devido a isso, há grande necessidade de proteger e melhorar a água para a saúde, principalmente em países em desenvolvimento. A água potável presente em nosso planeta é muito impactada pela poluição, que tem crescido muito nos últimos anos. Assim, a poluição da água tem se tornado um grave problema na maioria dos países do mundo. Em países em desenvolvimento, existe a realidade de que muitas pessoas precisam beber água poluída pela falta de acesso à água potável. Estima-se que mais de 780 milhões de pessoas se encontram nesta situação (AKOSILE *et.al.*, 2020).

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 2030, de acordo com as Nações Unidas, visa “garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos”. Algumas estatísticas globais nos dizem que três a cada dez pessoas não têm acesso a serviços de água potável. Além disso, a escassez de água, que já atinge 40% da população global tende a aumentar, uma vez que mais de 80% das águas residuais resultante de atividades humanas são despejadas do mar, sem que haja qualquer remoção da poluição. Para contribuir com a melhora desta realidade, torna-se necessário buscar alternativas acessíveis e de baixo custo de filtragem segura da água. (MAXWELL *et.al.*, 2021 *apud United Nations*, 2015).

A filtração de água por meio de filtros cerâmicos é uma das formas de filtragem existentes, na qual a água passa através de um material cerâmico permeável. Dentre os benefícios da utilização deste material, se encontra o fato de ter um baixo custo e que reduz muito as doenças transmitidas pela água. Estes filtros são estão entre os mais eficazes e eficientes entre as várias tecnologias existentes de tratamento de água doméstico. Outros benefícios encontrados nestes tipos de filtro são sua portabilidade, leveza, acessibilidade e baixa necessidade de manutenção, além de não alterarem consideravelmente a temperatura e o sabor da água. O *design* destes filtros é flexível, podendo ser encontrados em várias formas como: vasos, discos e velas (AKOSILE *et.al.*, 2020).

Os filtros cerâmicos, são geralmente preparados com argila e uma mistura de compostos orgânicos, utilizados como agentes porogênicos. Alguns componentes orgânicos usualmente utilizados são: serragem, farinha e amido (DUNG, *et.al.*, 2019). Estes filtros, produzidos a partir de

recursos naturais, possuem alta eficiência na redução de doenças transmitidas pela água não tratada. Além disso, a fabricação desses filtros abre portas para o empreendedorismo local, o que é bastante positivo para a sociedade, principalmente para países em desenvolvimento (MUSTAPHA, *et.al.*, 2021).

A porosidade é um parâmetro muito relevante de ser estudado na fabricação destes filtros, uma vez que é necessário para melhorar a qualidade do pote cerâmico. A eficiência de remoção de poluentes dos filtros está muito relacionada ao percentual de porosidade dos filtros e aos grupos funcionais da matéria-prima cerâmica utilizada. A eficiência de remoção de bactérias também depende também da porosidade do filtro: muitos estudos comprovam que filtros cerâmicos de baixa porosidade apresentam maior eficiência na remoção de micro-organismos (MUSTAPHA, *et.al.*, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Obtenção das Amostras de Triaxial Cerâmico Poroso.

3.1.1 Matérias-primas Utilizadas

Para a obtenção das amostras, foram utilizadas como matérias-primas: argila São Simão, do Centro de Mineração Terra Nova; feldspato sódico da empresa AMG Mineração e quartzo M-325. A Figura 3 mostra as matérias-primas utilizadas.

Figura 3: Matérias-primas utilizadas. Sendo: a) Argila São Simão, b) Feldspato sódico, c) Quartzo.

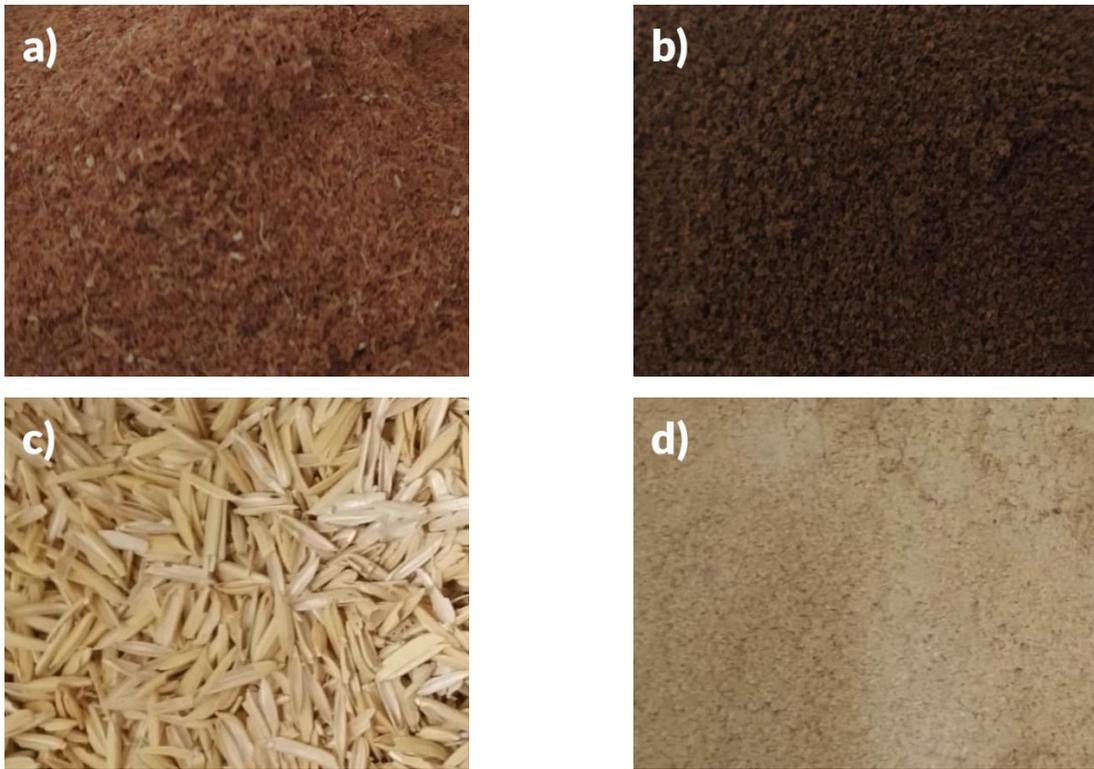


Fonte: do autor.

Como agentes porogênicos, foram utilizados serragem de madeira, casca de arroz e borra de café. A borra de café utilizada foi doada por amigos e pela cafeteria Casa do Frade, localizada em Lavras, Minas Gerais. A serragem de madeira foi doada pela Madeireira Pau Brasil, da cidade de Bambuí, Minas Gerais, e é uma mistura de resíduos das madeiras Pinnus, Roxinho e Paraju. Algumas fotos dos materiais utilizados como agentes porogênicos se encontram na Figura 4.

A casca de arroz, para ser utilizada como agente porogênico, passou previamente por uma moagem, utilizando um Moinho de Facas tipo *Willye*, modelo *Star* FT-50 da marca Fortinox, que se encontra no Laboratório de Compósitos, do curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Lavras, com o objetivo de transformar este material em pó, assim como os demais agentes porogênicos utilizados.

Figura 4: Agentes porogênicos utilizados. Sendo: a) Serragem de Madeira, b) Borra de Café, c) Casca de Arroz e c) Casca de Arroz moída.

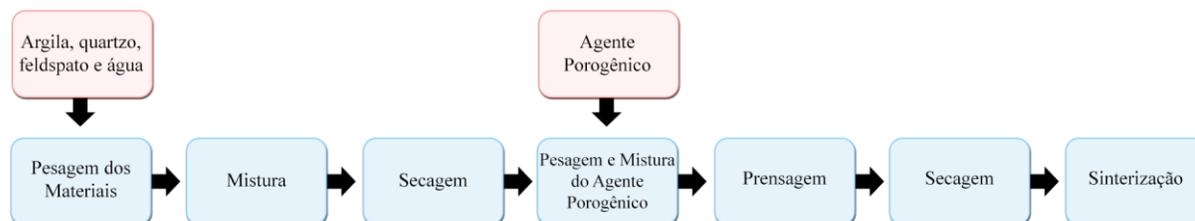


Fonte: do autor.

3.1.2 Procedimento de Obtenção das Amostras

O processamento de amostras de cerâmica porosa consiste em várias etapas, desde a seleção e pesagem de matérias-primas até a sinterização. O fluxograma abaixo compreende todas as etapas necessárias para a obtenção dos corpos de prova.

Figura 5: Fluxograma do processo de obtenção das amostras de triaxial cerâmico poroso utilizado.



Fonte: do autor.

Toda as etapas necessárias para a obtenção das amostras foram realizadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos do curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Lavras. A composição de triaxial cerâmico utilizada foi a seguinte: 77g de argila, 43g de feldspato, 45g de quartzo e cerca de 150mL de água (SIQUEIRA; SANTO; HOLANDA, 2015). Foram realizadas amostras para duas concentrações diferentes de agente porogênico, escolhidas arbitrariamente, sendo elas: 5% e 20% em massa. As amostras serão nomeadas conforme a tabela abaixo:

Tabela 1: Nomeação das amostras segundo tipo de agente porogênico e concentração.

Concentração (% em massa)	Casca de Arroz	Borra de Café	Serragem
5	CA5	BC5	SM5
20	CA20	BC20	SM20

Fonte: do autor.

Foi realizada a pesagem dos componentes em uma balança EDUTEK e a mistura foi feita logo em seguida em um misturador mecânico Fisatom utilizando em média 600rpm por 30 minutos. Após a mistura, a amostra passou por secagem em uma estufa LUCADEMA a 105°C durante 24h. Ao se retirar o pó da estufa, o agente porogênico foi pesado de acordo com a porcentagem em massa da amostra e foi misturado manualmente até a mistura se tornar homogênea. Foi adicionado cerca de 6% de água à massa cerâmica em pó para a conformação por prensagem uniaxial.

Foi utilizada uma prensa hidráulica uniaxial BOVENAU com carga de 3 TON, que

equivalem a 152,7 kgf/cm² de acordo com a conversão dada pelo fabricante. O molde utilizado tem dimensões de 80,54mm x 26,4mm x 14,67mm. Em seguida, a amostra passou novamente pela secagem nas mesmas condições que a anterior e após a retirada da estufa as dimensões da amostra a seco foram medidas com o auxílio de um paquímetro.

Os corpos de prova foram sinterizados em um forno MAITEC com taxa de aquecimento de 10°C/min até a temperatura de 1200°C. Ao ser atingida esta temperatura, as amostras permaneceram no forno durante 30 minutos e depois foram resfriadas dentro do forno até a temperatura ambiente. Depois da sinterização, as amostras foram novamente medidas com o auxílio de um paquímetro para o cálculo da retração de queima.

3.2 Ensaios Mecânicos

O ensaio mecânico realizado foi o de flexão em três pontos, em uma máquina de ensaios universal Arotec modelo MDW-20E, com capacidade de 2000kgf que se encontra na Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM) na Universidade Federal de Lavras, utilizando uma velocidade de ensaio de 5mm/min e distância entre apoios de 6cm. O objetivo deste ensaio foi obter informações quanto ao módulo de elasticidade e tensão de ruptura à flexão das amostras.

Os dados obtidos foram ajustados com auxílio do software Excel. Com esse gráfico é possível calcular o módulo de elasticidade (E) e tensão de ruptura à flexão (σ) a partir das seguintes fórmulas:

$$E = \frac{\Delta PL^3}{4\Delta v b h^3} \quad (3.1)$$

Sendo que: ΔP é a variação de carga;

L é a distância entre apoios;

V é a deflexão;

b é a base da seção transversal;

e h é a altura da seção transversal.

$$\sigma = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad (3.2)$$

Sendo que: P_{max} é a carga máxima;

L é a distância entre apoios;

b é a base da seção transversal;

e h é a altura da seção transversal.

3.3 Microscopia Óptica

Para se realizar a análise das amostras foi utilizado um microscópio estereoscópio Nikon SMZ 1500 que se encontra no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME) do Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras. As imagens foram capturadas pelo *software* NIS Elements D.

As superfícies de fratura das amostras foram lixadas para permitir uma melhor visualização no microscópio. O diâmetro médio de poros nas amostras foram obtidos através do mesmo *software* utilizado para as capturas. Foram medidos, no mínimo, 20 poros de cada tipo de amostra.

Figura 6: Microscópio Estereoscópio Nikon SMZ 1500.



Fonte: do autor

3.4 Porosidade Aparente

A porosidade aparente é utilizada para estimar a porcentagem de porosidade aberta no material. Para se determinar, pode ser utilizado o Princípio de Arquimedes, que considera a massa da amostra seca em estufa, imersa em líquido e úmida, após ter permanecido imersa em líquido durante 24 horas (PAGANO, 2017), conforme a equação abaixo:

$$\%PA = \frac{(Mu - Ms)}{(Mu - Mi)} \times 100 \quad (3.3)$$

Sendo que:

PA é a porosidade aparente (%);

Mu é a massa da amostra úmida;

Ms é a massa da amostra seca;

e Mi é a massa da amostra imersa em água.

Figura 7: Ensaio de Porosidade Aparente



Fonte: do autor.

3.5 Retração de Queima

A retração linear de queima é dada pela variação do comprimento da amostra antes e após a sinterização e pode ser calculada através da equação a seguir:

$$\%R_l = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100 \quad (3.4)$$

Sendo que:

R_l é a retração linear (%);

L_i é o comprimento da amostra antes da sinterização;

e L_f é o comprimento da amostra após a sinterização.

Para calcular a expansão que ocorreu na espessura das amostras após a sinterização, utilizou-se a seguinte equação:

$$\%E = \frac{E_f - E_i}{E_i} \times 100 \quad (3.5)$$

Sendo que:

E é a expansão na espessura (%);

E_f é a espessura média das amostras após a sinterização;

e E_i é a espessura média das amostras antes da sinterização.

3.6 Análise do Material de uma Vela de Filtro Cerâmica Comercial

Com objetivo de comparar as propriedades analisadas das amostras de triaxial cerâmico poroso obtidas com uma vela cerâmica comercial utilizada para filtragem de água, foram realizados os mesmos ensaios descritos anteriormente para amostras obtidas a partir de uma vela de filtro cerâmica comprada em supermercado, semelhante à Figura 8. Os ensaios mecânicos não foram possíveis de serem realizados na vela, uma vez que as amostras obtidas não possuíam o formato adequado para o ensaio na Máquina de Ensaio Universal. O mesmo ocorreu com a retração de queima, que não pode ser realizada.

Figura 8: Vela para filtro de barro.



Fonte: www.leroymerlin.com.br. Acesso em: 04 de abril de 2022.

3.7 Análise Estatística dos Dados

Para mensurar os valores das diferentes propriedades aqui propostas, foram obtidas 6 amostras de cada formulação distinta. A análise estatística destes dados consiste na obtenção das médias e desvios médios dos valores de propriedade para cada tipo de amostras, conforme equações abaixo.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.6)$$

Sendo:

\bar{x} a média dos valores;

x os valores obtidos para determinada propriedade;

e n a quantidade de valores obtidos.

$$DM = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (3.7)$$

Sendo:

DM o desvio médio;

\bar{x} a média dos valores;

x os valores obtidos para determinada propriedade;

e n a quantidade de valores obtidos.

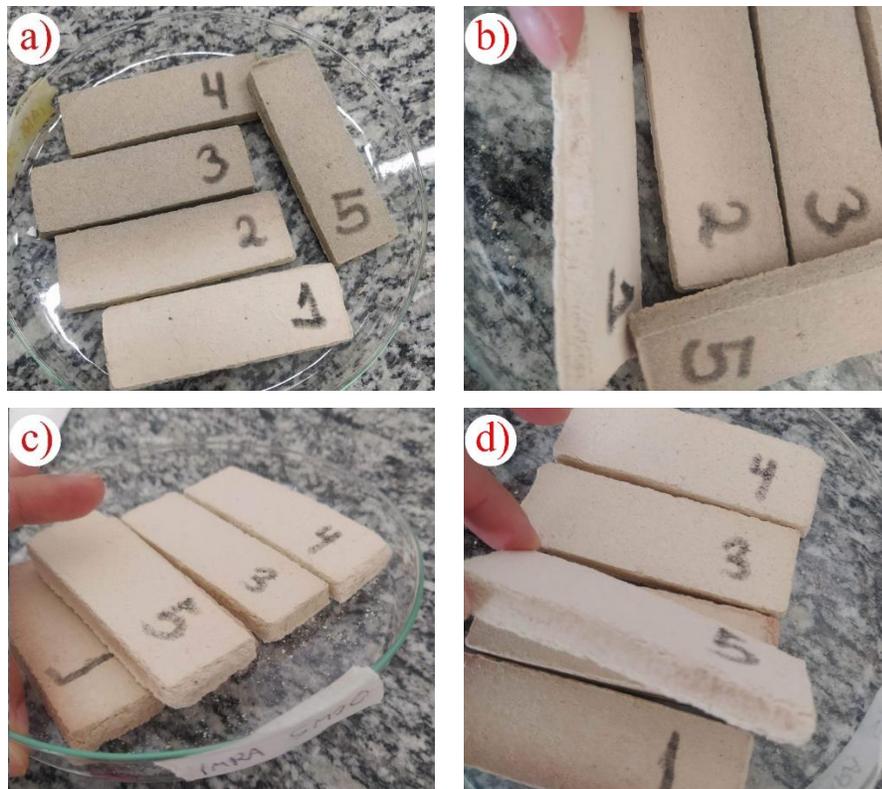
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

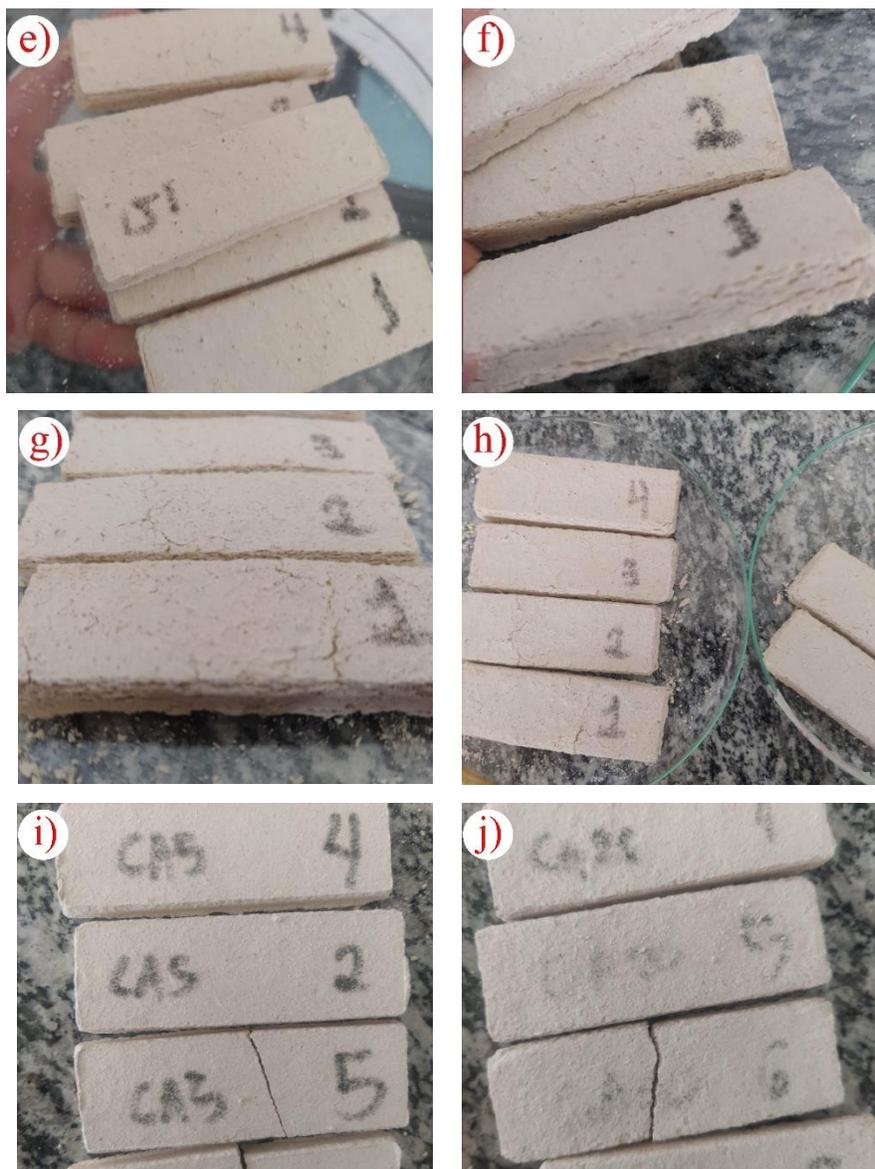
4.1 Análise das Propriedades das Amostras de Triaxial Cerâmico Poroso Obtidas

4.1.1 Análise Visual

A Figura 9 exibe fotografias das amostras de triaxial cerâmico poroso. Em um primeiro instante, realizando uma análise visual destas amostras, foi possível realizar considerações devido às diferenças significativas que foram observadas.

Figura 9: Amostras de triaxial cerâmico poroso. Sendo as imagens: a) e b) referente às amostras SM5; c) e d) referente às amostras SM20; e) e f) referente às amostras BC5; g) e h) referente às amostras BC20; i) referente às amostras CA5 e j) referente às amostras CA20.





Fonte: do autor.

Ao observar as amostras SM5, não foi possível perceber visualmente a presença de poros superficiais. Estas amostras possuíam superfícies bem homogêneas, com pouquíssimas trincas. Ao se aumentar a concentração de agente porogênico utilizado (amostras SM20), foi possível perceber algumas irregularidades na superfície e aumento no número de trincas. As amostras CA5 e CA20 apresentaram características visuais bem semelhantes à SM5, havendo maior presença de poros apenas nas amostras com maior concentração de agente porogênico.

Já nas amostras em que a borra de café foi utilizada como agente porogênico (BC5 e BC20)

era perceptível a presença de poros abertos e a quantidade de trincas era consideravelmente maior quando comparado às amostras SM5 e SM20. Sendo que, com o aumento da concentração de agente porogênico, a quantidade de poros e trincas também aumentou. As amostras BC20 estavam quebradiças e mais frágeis que as outras amostras devido à estas características. Desde antes da sinterização já era possível perceber diferenças destas amostras para com as demais, uma vez que elas não aparentavam estar bem compactadas por estarem bem mais frágeis e soltando muito pó, como pode-se observar na figura abaixo. Um possível motivo para isto seria que a grande quantidade de café utilizada possa ter atrapalhado a compactação do material.

Figura 10: Amostras BC20 à verde



Fonte: do autor.

4.1.2 Microscopia Óptica

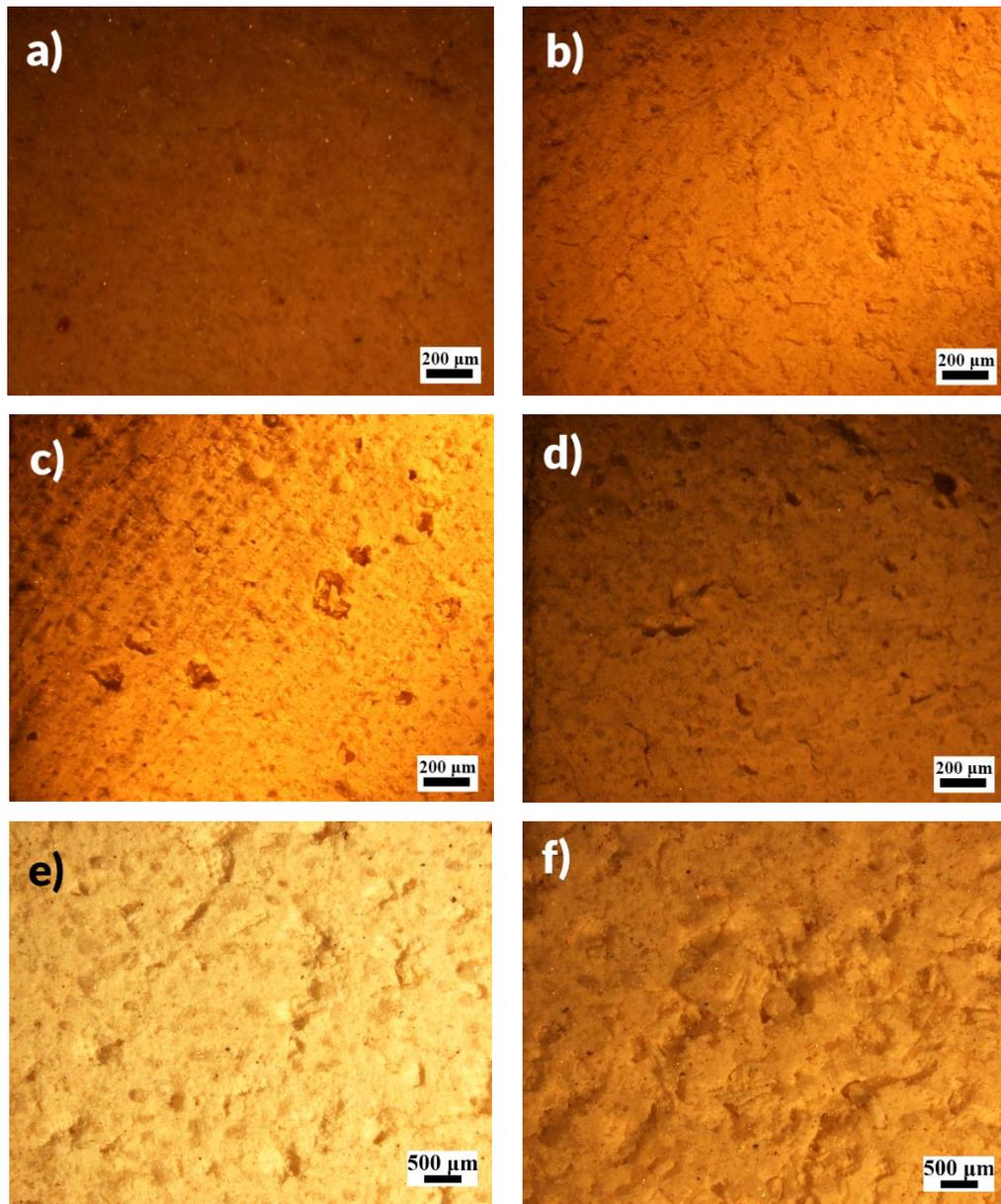
Para se analisar os poros obtidos nas amostras, foi realizado um ensaio de microscopia utilizando um microscópio estereoscópio. Obteve-se imagens da superfície das amostras e da superfície de fratura. As imagens obtidas podem ser observadas nas Figuras 11 e 12.

A partir das micrografias obtidas, foi possível confirmar aquilo que foi observado visualmente. No que diz a superfície das amostras, as amostras SM5 e SM20 apresentaram menor quantidade de poros na superfície, sendo que na amostra SM5 foi possível perceber a presença de poucos macroporos e quase nenhuma trinca. Com o aumento na concentração de agente porogênico, nas amostras SM20, foi possível perceber um considerável aumento na quantidade de poros superficiais e trincas.

As amostras BC5 e BC20 apresentaram poros maiores e em maior quantidade, como pode ser visualizado nas imagens c e d da Figura 11. Com o aumento da concentração de agente

porogênico na amostra, a quantidade de poros superficiais aumentou e também a quantidade de trincas. As amostras CA5 e CA20 apresentaram este mesmo comportamento, sendo possível observar a presença de diversos poros fechados pela superfície das amostras e poucas trincas.

Figura 11: Micrografias da superfície das amostras: a) SM5; b) SM20; c) BC5; d) BC20; e) CA5
f) CA20.

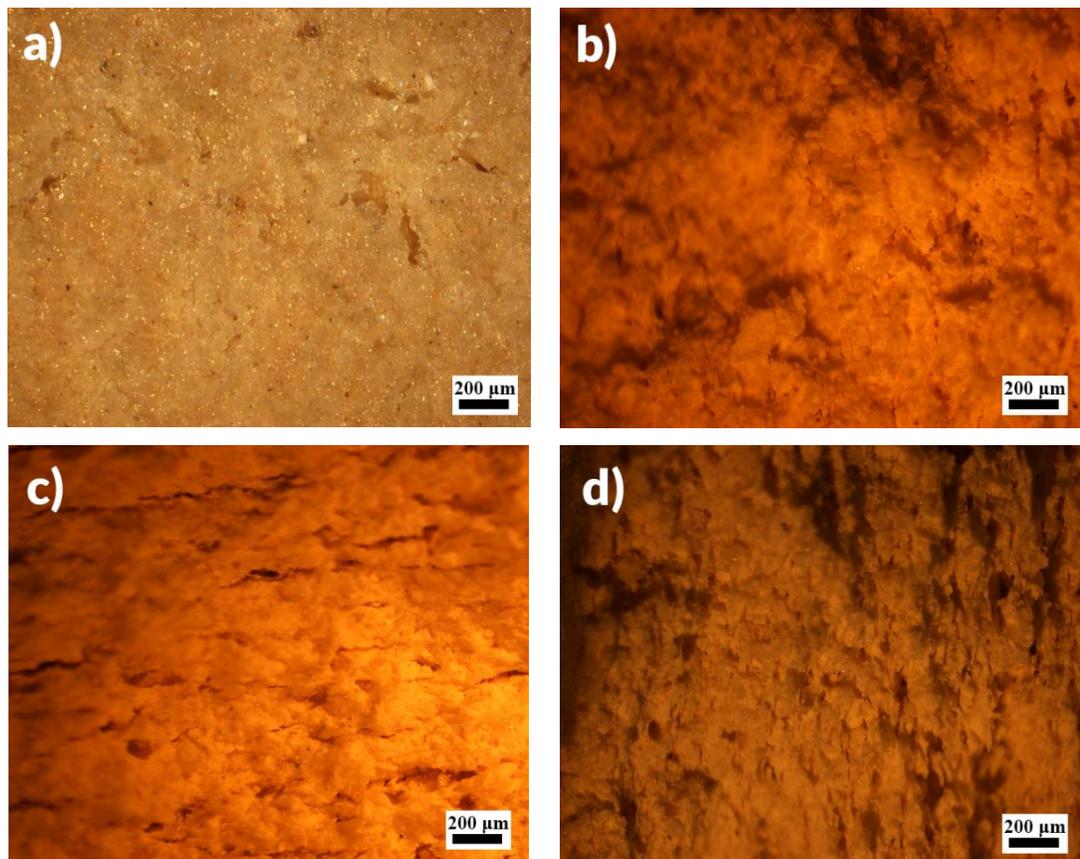


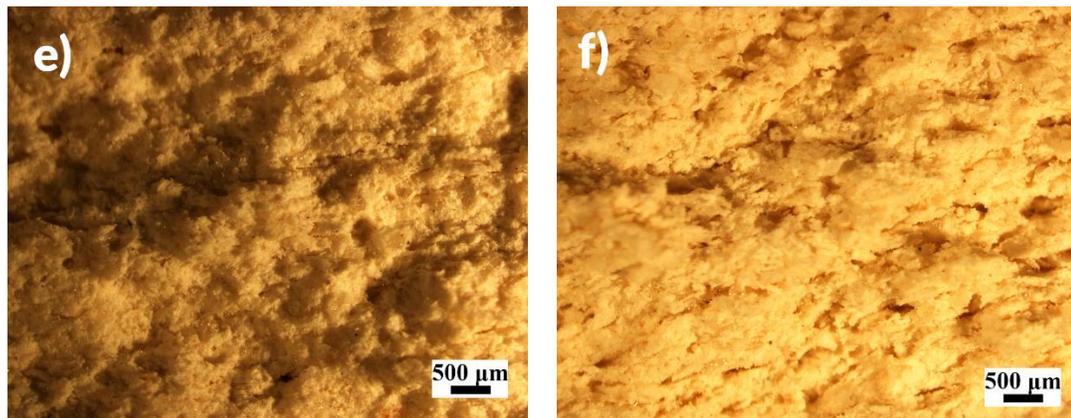
Fonte: do autor.

Já nas micrografias na superfície de fratura das amostras foi possível visualizar as características da porosidade em seu interior. As amostras com maior concentração de agente porogênico apresentaram uma maior quantidade de poros e poros de maior tamanho, fato que também foi constatado no experimento de DUTRA; PONTES, 2002, que apresentou resultados similares.

Ao analisar a Figura 12 é possível perceber que as amostras SM5 e SM20 apresentaram menor quantidade de poros quando comparadas com as demais. Já as amostras BC5 e BC20 apresentaram muitos poros e muitas trincas, enquanto as amostras CA5 e CA20 apresentaram menor quantidade de trincas e grande quantidade de poros.

Figura 12: Micrografias da superfície de fratura das amostras: a) SM5; b) SM20; c) BC5; d) BC20; e) CA5; f) CA20.

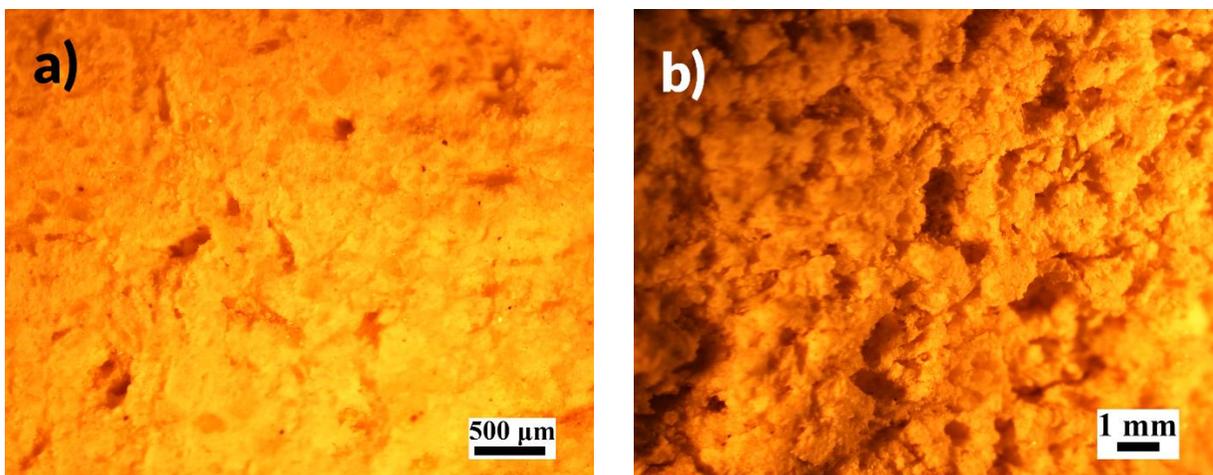


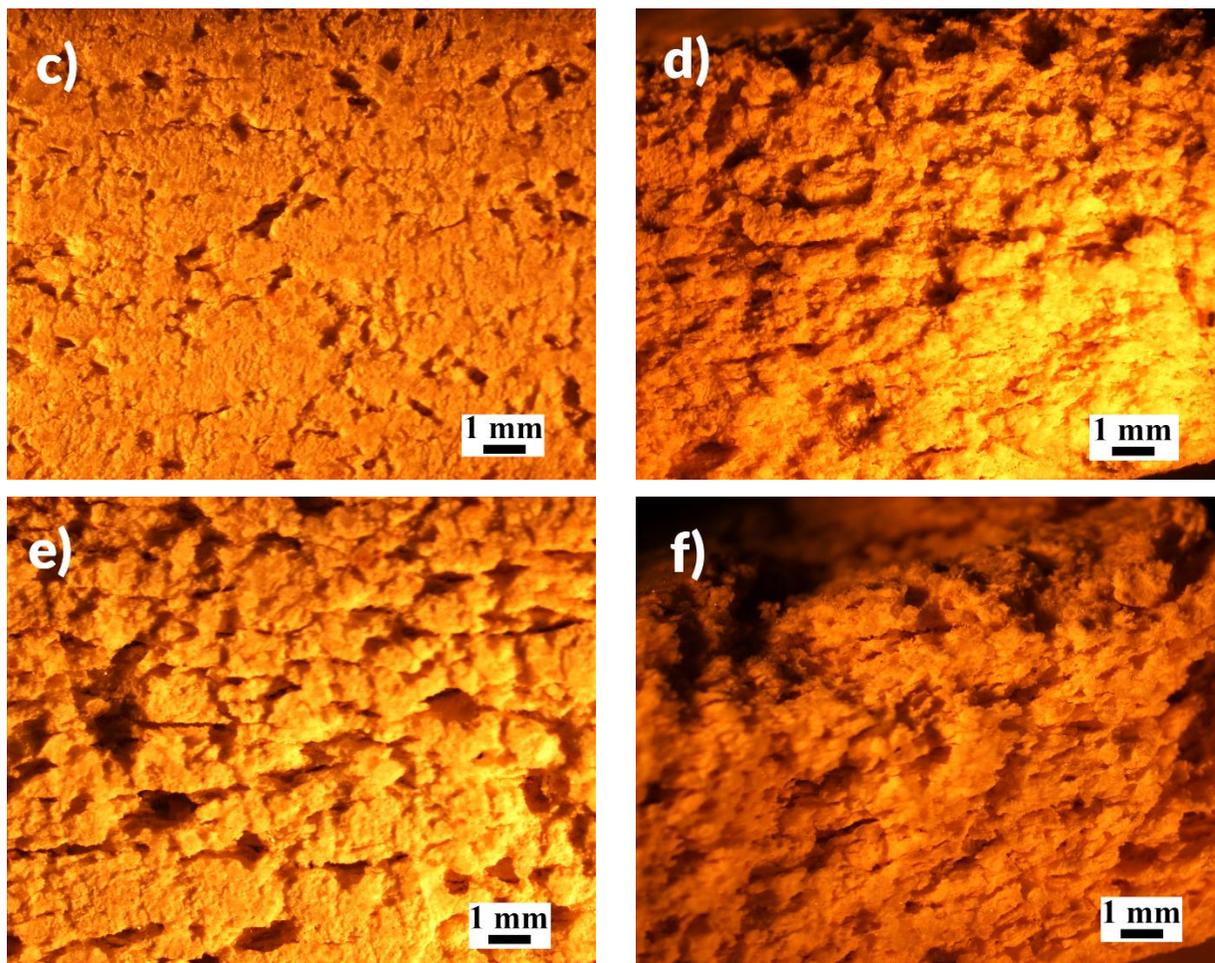


Fonte: do autor.

Para a análise do tamanho médio de poros, foram realizadas imagens das superfícies de fratura das amostras polidas para melhor visualização dos poros. Estas imagens podem ser visualizadas na Figura 13. Para cada amostra, foi utilizada uma objetiva diferente, para facilitar a medição dos poros.

Figura 13: Micrografias dos poros das amostras: a) SM5 – aumento de 30x b) SM20 – aumento de 10x c) CA5 – aumento de 10x d) CA20 – aumento de 10x e) BC5 – aumento de 10x f) BC20 – aumento de 10x.





Fonte: do autor.

Na Tabela 2, estão os valores de diâmetro médio de poro medidos para cada amostra. Como observado na Figura 13, as amostras BC20 apresentaram falhas na compactação e por isso, apresentaram a presença de muitas trincas que se misturaram com os poros, de modo que não foi possível medir o diâmetro dos poros destas amostras.

Tabela 2: Diâmetro médios de poros medidos para as amostras

Amostras	SM5	SM20	BC5	CA5	CA20
Diâmetro médio de poro (μm)	146 ± 52	466 ± 114	551 ± 145	334 ± 67	429 ± 92

Fonte: do autor

A partir desta medição foi possível perceber que todas as amostras apresentaram macroporos, conforme a definição apresentada por CHALIA *et.al.*, 2020. As amostras, no geral,

apresentaram diâmetro médio de poros dentro do esperado para o método utilizado. De acordo com PAGANO, 2017, o método da queima de fase de sacrifício gera poros de tamanho entre 1 a 700 μm .

As amostras que apresentaram os menores poros foram as amostras de serragem de madeira. As amostras SM5 apresentaram o menor diâmetro médio de poros do que todas as outras amostras, seguido pelas amostras CA5. Com relação às amostras SM20 e CA20, ambas apresentaram tamanhos de poros bem semelhantes. Foi possível notar que com o aumento do teor de agente porogênico, houve um aumento no tamanho de poros, que pode estar relacionado com o fato de que com o aumento da concentração dos agentes orgânicos, estes tendem a estarem mais aglomerados no corpo cerâmico, provocando assim, poros maiores quando queimados no momento da sinterização do material.

É possível perceber também, um grande erro associado a estas medidas. Estes erros podem estar associados a dois principais fatores: os poros obtidos não possuem formato regular, como pode ser observado na Figura 13, o que dificulta a medição do diâmetro e também o fato de que em todas as amostras houve a presença de poros com tamanhos bastante distintos, a depender da forma em que os agentes orgânicos ficaram alojados no corpo cerâmico, como já discutido anteriormente.

As amostras BC5, mesmo com baixo teor de agente porogênico, apresentaram os maiores poros com relação às demais amostras. Uma hipótese para este fato está relacionada com a dificuldade de compactação que as amostras de borra de café apresentaram, muito provavelmente devido à alta granulometria deste agente. Esta hipótese está de acordo com os estudos de DUTRA; PONTES, 2002, que coloca que o tamanho de poro está relacionado com os tamanhos de partículas dos agentes orgânicos. Para comprovar esta hipótese, seria necessária a análise granulométrica dos agentes porogênicos utilizados, o que não foi possível de ser realizado neste trabalho, devido à falta de disponibilidade de aparelhos na UFLA para a realização deste ensaio durante o período da elaboração deste trabalho.

4.1.3 Porosidade Aparente

Os resultados obtidos para porosidade aparente estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados de porosidade aparente obtidas para as amostras

Amostras	SM5	SM20	BC5	BC20	CA5	CA20
Porosidade aparente (%)	21 ± 7	60 ± 4	39 ± 2	87 ± 3	33,7 ± 0,6	56 ± 1

Fonte: do autor

Os valores de porosidade aparente mensurados das amostras comprovam o que foi constatado no ensaio de microscopia: com o aumento da concentração de agente porogênico, houve aumento na quantidade de poros na amostra. Alguns autores, tais como DUTRA; PONTES, 2002, ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014 e ALMEIDA *et.al.*, 2020 também constataram este mesmo comportamento em seus experimentos. ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014 apresenta este resultado como esperado, uma vez que “à medida que se tem mais poros, maior a quantidade de vazios e consequentemente mais fácil será a absorção de água”.

É importante mencionar que existem dois tipos de poros, os poros abertos e fechados. Os poros abertos tem contato com a superfície externa do material, sendo útil na fabricação dos filtros cerâmicos, enquanto os poros fechados possuem ar no seu interior, o que auxilia no aumento do poder isolante do material (DUTRA; PONTES, 2002).

Uma vez que na técnica de processamento de materiais cerâmicos porosos utilizando agentes porogênicos há a possibilidade de se obter porosidade aberta ou fechada, dependendo da maneira que o material orgânico ficar situado no corpo cerâmico, as amostras obtidas podem possuir estes dois tipos de poros (ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014). O ensaio de porosidade aparente consegue mensurar apenas a porosidade aberta, não sendo possível quantificar a porosidade total (fechada e aberta).

Sendo assim, os valores encontrados de porosidade para as amostras deve ser ainda maior considerando a porosidade fechada. De acordo com PAGANO, 2017, com esta técnica de processamento é possível obter materiais com porosidade total entre 20% e 90%. Sendo assim, é bem provável que haja a presença de poros fechados principalmente nas amostras SM5, que apresentaram uma porosidade aparente relativamente baixa, uma vez que estas amostras quase não apresentaram poros na superfície e poucos poros isolados na superfície de fratura (ver Figuras 9a e 10a). Isto justificaria a porosidade aparente menor do que o esperado.

Nas demais amostras, não é possível mensurar se há ou não a presença significativa de poros fechados. Porém, analisando as micrografias, é possível admitir que é improvável que as amostras

SM20, BC5, BC20 e CA20, obtenham uma grande quantidade destes poros, uma vez que tais amostras apresentaram muitos poros superficiais e grande quantidade de poros internos, que possivelmente estão interligados.

As amostras que continham concentração de 20% em massa de agente porogênico (SM20, BC20 e CA20) apresentaram elevado teor de porosidade e condizentes com os resultados de PAGANO, 2017. As amostras BC20 foram as que apresentaram maior volume de poros (cerca de 87%), valor que está de acordo com o que foi avaliado na microscopia.

4.1.4 Retração Linear de Queima

Os resultados obtidos para a retração linear de queima em relação ao comprimento se encontram disponíveis na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados de Retração Linear para as amostras

Amostras	SM5	SM20	BC5	BC20	CA5	CA20
Retração Linear (%)	3,9 ± 0,6	1,5 ± 0,9	1,5 ± 0,3	1,6 ± 0,2	0,96 ± 0,02	0,5 ± 0,2

Fonte: do autor

A partir destas medidas foi possível perceber que houve uma diminuição na retração linear das amostras com o aumento da concentração de agente porogênico. Este valor não se encontra condizente com algumas pesquisas, tais como DUTRA; PONTES, 2002 e ALMEIDA *et.al.*, 2020 que encontraram um aumento na retração linear das amostras quando houve o aumento da concentração de agente porogênico.

Apesar disso, há também casos em que o contrário aconteceu. É o caso de ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014 que em sua pesquisa, comparou cerâmicas porosas a base de duas diferentes argilas. As amostras foram obtidas utilizando pó de serra e MDF como agentes porogênicos a uma concentração de 10% e 20% em massa. Ao se variar as argilas, e agentes porogênicos, foi possível perceber que houveram casos em que a retração de queima diminuiu, aumentou e permaneceu igual nas duas diferentes composições utilizadas. A partir deste estudo, o pesquisador mostrou que a retração linear de cerâmicas porosas obtidas através deste método irá depender da interação do agente porogênico com o tipo de argila utilizada. Além disso, o aumento na quantidade de poros pode dificultar o processo de sinterização, favorecendo uma menor retração linear de queima.

Um ponto interessante de se mencionar é que, exceto nas amostras SM5, as demais

apresentaram uma expansão expressiva na espessura após a queima, como pode ser observado na Tabela 5. Uma hipótese para esta expansão seria a presença de voláteis durante a queima dos resíduos orgânicos. Na pesquisa de (SALLEH, *et. al.*, 2021) há uma menção a presença de gases na queima de materiais orgânicos utilizados como agentes porogênicos, estes gases são diferentes para cada material, a depender de sua composição química e são liberados no momento da sinterização. Para a análise da liberação de gases na queima, seria necessário uma caracterização dos materiais utilizados como agentes porogênicos, o que não foi possível ser realizada neste trabalho.

Uma possível evidência da presença destes gases é a disposição dos poros observados na Figura 13. A presença de poros alinhados e conectados pode evidenciar o caminho percorrido até a liberação dos gases durante a queima do material.

Tabela 5: Expansão na espessura das amostras

Amostras	SM5	SM20	BC5	BC20	CA5	CA20
Expansão na espessura (%)	-4 ± 2	12 ± 1	$11,6 \pm 0,5$	25 ± 5	3 ± 1	13 ± 1

Fonte: do autor

4.1.5 Ensaios Mecânicos

Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas das amostras: módulo de elasticidade e tensão de ruptura à flexão se encontram disponíveis na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados de Módulo de Elasticidade e tensão na ruptura à flexão para as amostras

Amostras	SM5	SM20	BC5	BC20	CA5	CA20
E (MPa)	1578 ± 700	207 ± 53	336 ± 78	71 ± 14	532 ± 27	86 ± 16
σ (MPa)	9 ± 2	$0,8 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,1$	$0,39 \pm 0,08$	$3,4 \pm 0,4$	$0,5 \pm 0,1$

Fonte: do autor

Em todas as amostras foi possível perceber uma diminuição considerável nas propriedades mecânicas com o aumento da porosidade. As amostras cuja porosidade foi provocada com a utilização de serragem de madeira como agente porogênico sofreram uma queda de cerca de 90% em ambas as propriedades. As demais amostras, de borra de café e casca de arroz apresentaram uma queda um pouco menor, de cerca de 80%. Esta diminuição das propriedades mecânicas se dá pelo fato de que os poros atuam no material como concentradores de tensão, diminuindo a área

transversal resistiva à aplicação de tensão (PAGANO, 2017).

Esta ocorrência também foi constatado nos experimentos de DUTRA; PONTES, 2002, que utilizou pó de madeira como agente porogênico. Neste experimento, houve uma queda de mais de 50% no valor da propriedade de resistência a flexão das amostras sinterizadas a uma temperatura de 1200°C quando passavam de um teor de agentes porogênicos de 15% para 30%.

Esta grande diminuição nas propriedades mecânicas pode impedir que estes materiais sejam aplicados em aplicações que exijam resistência mecânica razoável, uma vez que se apresentaram bastante frágeis.

É importante mencionar, que, apesar de todas as amostras apresentarem os mesmos teores de agente porogênico, elas obtiveram resultados bastante distintos para as propriedades mecânicas avaliadas. Isto se deve ao fato de que o impacto da porosidade nas propriedades mecânicas do material não se deve apenas ao teor de poros, mas à distribuição, tamanho e morfologia dos poros (CHALIA *et.al.*, 2020). Assim, a granulometria dos pós utilizados e a maneira com que estes se distribuíram no corpo cerâmico, podem influenciar nos valores desta propriedade.

As amostras de serragem de madeira apresentaram os melhores valores de resistência mecânica, em ambas as concentrações, enquanto as amostras de borra de café apresentaram a menor resistência mecânica. Na microscopia óptica, foi observado uma forte presença de trincas nas amostras de borra de café, um motivo que pode ter levado a estas amostras apresentarem menor desempenho mecânico. Também, o fato destas amostras não terem apresentado uma boa compactação pode ter influenciado.

Os resultados de propriedades mecânicas amostras apresentaram um grande desvio, resultando em um grande erro nos valores de propriedades apresentados pela Tabela 6. Um possível motivo seria o fato de que o método utilizado neste projeto para a mistura do agente porogênico com a massa cerâmica ter sido manual, não havendo um controle de como o pó ficou incorporado nas diferentes amostras de triaxial cerâmico, que pode ter gerado amostras com propriedades distintas umas das outras.

4.2 Viabilidade da Aplicação das Cerâmicas Obtidas em Filtros de Água

Para se estudar a viabilidade da aplicação das cerâmicas em filtros de água, foram realizados os mesmos ensaios anteriores para uma cerâmica comercial utilizada como filtro de água, com

exceção da resistência mecânica, que não foi possível ser realizada pela falta de corpos de prova capazes de serem ensaiados na máquina de ensaios universal e retração linear de queima, já que o material foi adquirido já pronto para uso. É importante mencionar que o material analisado não possui a mesma composição que as amostras obtidas nesse estudo. Enquanto as amostras obtidas são todas de triaxial cerâmico, a cerâmica comercial é de composição desconhecida.

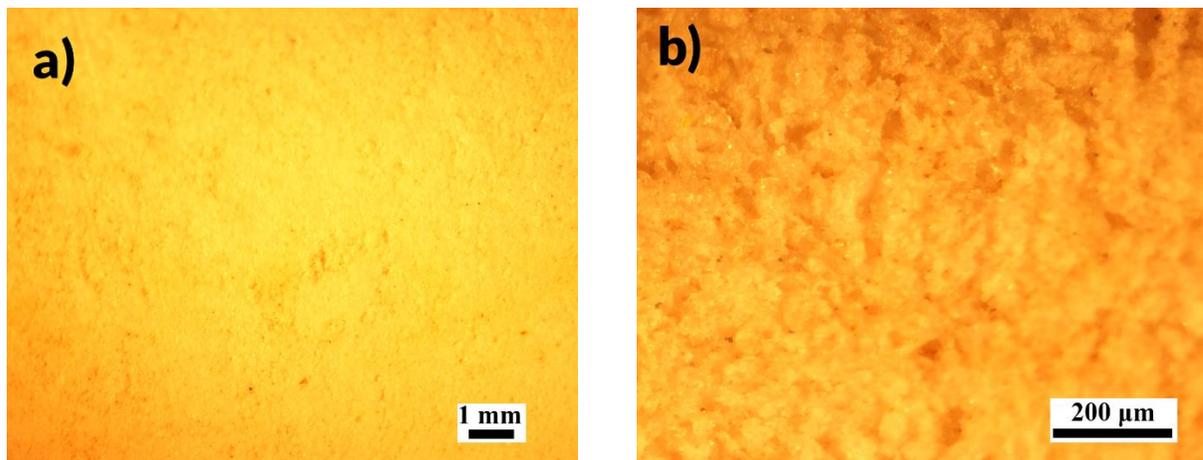
Assim, foram analisadas apenas as características relacionadas à porosidade. Os resultados para porosidade aparente e diâmetro médio de poros obtidos a partir dos ensaios de porosidade aparente e microscopia óptica se encontram na Tabela 7 e as micrografias se encontram na Figura 14.

Tabela 7: Resultados de porosidade aparente e diâmetro médio de poros para a cerâmica comercial

Porosidade Aparente (%)	Diâmetro médio de poro (μm)
56 ± 2	51 ± 7

Fonte: do autor

Figura 14: Micrografias da cerâmica comercial: a) aumento de 10x b) aumento de 100x.



Fonte: do autor

Ao analisar a Figura 14, é possível perceber que a cerâmica comercial possui poros menores e mais regulares que as cerâmicas obtidas neste estudo. Esta regularidade é percebida inclusive pelo menor erro associado às medidas de porosidade aparente e diâmetro médio de poro. Sendo assim, é possível compreender que o processamento desta cerâmica comercial foi realizado com mais controle de parâmetros, permitindo maior controle da microestrutura.

Os poros da cerâmica comercial são de uma ordem de grandeza menor do que as amostras de triaxial cerâmico poroso. A amostra que obtém menor tamanho de poro, SM5, ainda sim possui poros cerca de três vezes maior do que a cerâmica comercial e a amostra que possui o maior valor de diâmetro médio de poro, BC5, possui poros até dez vezes maiores. Para filtragem de água, poros menores auxiliam na remoção de partículas e micro-organismos, gerando uma maior eficiência. Por isso, seria interessante analisar os fatores que influenciam no tamanho dos poros para otimizar o processo de obtenção das amostras de triaxial cerâmico poroso.

Duas alternativas para diminuir o tamanho dos poros obtidos seria diminuir a granulometria dos pós utilizados como agentes porogênicos e descobrir maneiras de misturar melhor o pó do material cerâmico com o agente porogênico. De acordo com as pesquisas de DUTRA; PONTES, 2002; ŽIVCOVÁ *et.al.*, 2009 e ALVES JÚNIOR *et.al.*, 2014, estes fatores são críticos para o tamanho, morfologia e distribuição de poros obtidos por estes métodos.

Em termos de porosidade aparente, algumas amostras deste estudo obtiveram valores bem semelhantes. As amostras SM20 e CA20, que tiveram porosidade aparente de 60% e 56% respectivamente, obtiveram valores bem próximos à cerâmica comercial. De acordo com MUSTAPHA, *et.al.*, 2021, o percentual de porosidade em um filtro é um fator de grande relevância na eficiência de remoção de micro-organismos e poluição da água, sendo que os filtros não podem ter um alto grau de porosidade, para permitir uma melhor filtragem. As amostras BC20, por exemplo, que possuíram um grau de porosidade muito elevado, não seriam muito eficientes na filtragem de água.

Ao mesmo tempo, o grau de porosidade não pode ser tão baixo, já que para que haja filtragem, é necessária a presença de poros abertos e interligados que permitam a passagem da água (DUTRA; PONTES, 2002). Sendo assim, as amostras que obtiveram porosidade aparente bem mais baixa do que o valor da cerâmica comercial podem não ser tão eficientes na filtragem da água, como é o caso das amostras CA5 e SM5, que apresentaram percentual de porosidade aberta menores que 35%.

A partir da realização destas análises, pode-se concluir que as amostras que apresentam maior viabilidade para serem utilizadas em filtros de água são as amostras SM20 e CA20, pelo percentual de porosidade aberta que apresentaram. Porém, é necessário um estudo de formas de controlar melhor o tamanho de poro, com objetivo de aumentar o controle da microestrutura, de

modo a permitir uma melhor eficiência da purificação de água e remoção de micro-organismos.

As amostras BC5 e BC20 apresentaram falha na compactação, o que ocasionou a presença de muitas trincas que reduziram muito sua resistência mecânica, além disso apresentaram poros muito grandes e elevado percentual de porosidade aberta, já que estes fatores levam a uma menor eficiência na purificação de água. Estes fatores levam a crer que estas amostras não são viáveis de serem utilizadas em filtros de água, pois suas características diferem muito do esperado para esta aplicação.

4.3 Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, foi possível perceber a necessidade da realização de alguns ensaios e experimentos além dos realizados neste estudo para comprovação das hipóteses levantadas nos resultados que muito enriqueceriam os resultados, mas não foram possíveis de serem feitos devido às dificuldades impostas pela pandemia do COVID-19, pela falta de tempo e falta de equipamentos disponíveis na universidade. Sendo assim, serão pontuadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Caracterização física e química dos resíduos orgânicos;
- Estudo da otimização do processo de obtenção das amostras a fim de obter uma melhor distribuição do agente porogênico no corpo cerâmico, visando obter menores tamanhos de poros;
- Análise granulométrica dos agentes porogênicos e estudo do impacto dessa granulometria no diâmetro médio de poro;
- Estudo da influência da temperatura de sinterização nas propriedades de porosidade dos materiais;
- Estudo da influência da pressão de compactação nas propriedades de porosidade dos materiais.

5 CONCLUSÃO

A obtenção de amostras de triaxial cerâmico poroso utilizando borra de café, casca de arroz e serragem de madeira a uma concentração de 5% e 20% em massa foi bem sucedida. O aumento da concentração de agente porogênico utilizado aumentou significativamente a quantidade de poros.

A retração linear de queima das amostras mostram sua diminuição com o aumento da concentração de agente porogênico. Duas possíveis explicações para este fato seriam o efeito *springback*, que consiste na recuperação elástica do material após a conformação, devido à grande quantidade de aditivos orgânicos e também a interação entre a argila e o composto orgânico.

Os resultados dos ensaios mecânicos apresentaram uma diminuição considerável do desempenho mecânico das amostras com o aumento da porosidade. As amostras que apresentaram melhor desempenho mecânico foram as de serragem de madeira, seguido da casca de arroz. As amostras de borra de café apresentaram desempenho mecânico bastante inferior quando comparado às demais amostras, devido à grande presença de trincas e morfologia dos poros obtidos.

A porosidade aparente aumentou em todas as amostras com o aumento da concentração de agente porogênico utilizado. Sendo que a amostra BC20 foi a que apresentou o maior percentual de porosidade, enquanto as amostras CA20 e SM20 apresentaram porosidade moderada. As amostras contendo 5% de agente porogênico apresentaram baixos valores de porosidade aparente, provavelmente relacionado com a presença de poros fechados nas amostras.

Com o aumento do percentual de agentes porogênicos nas amostras, o diâmetro médio de poro também aumentou, sendo que todas as amostras apresentaram diâmetro médio de uma ordem de grandeza maior do que a cerâmica comercial utilizada como filtro de água. As amostras que apresentaram menor tamanho de poro foram as SM5 e as que apresentaram maior tamanho foram as BC5.

A partir deste estudo, foi possível perceber que as amostras mais viáveis para serem utilizadas como filtros de água são as amostras SM20 e CA20, por apresentarem percentuais de porosidade aberta semelhante ao filtro utilizado comercialmente.

REFERÊNCIAS

AHMAD, Rizwan; HA, Jang-Hoon; SONG, In-Hyuck. Particle-stabilized ultra-low density zirconia toughened alumina foams. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 33, n. 13-14, p. 2559-2564, 2013.

AKOSILE, S. I. et al. Performance evaluation of locally produced ceramic filters for household water treatment in Nigeria. **Scientific African**, v. 7, p. e00218, 2020.

AKUTAGAWA, Karla Hikari; MATSUDA, Celia Kimie; ASSAD FILHO, Nabi. Estudo e desenvolvimento de materiais produzidos com os resíduos de madeira e trigo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 58180-58188, 2020.

ALMEIDA, Ester Pires de et al. Preparação de blocos porosos utilizando resíduos de MDF na formulação de massas cerâmicas estruturais. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, 2020.

ALVES JUNIOR, R. et al. Desenvolvimento de materiais cerâmicos de dupla camada com adição de diferentes materiais orgânicos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 9, n. 1, p. 10-15, 2014.

BITENCOURT, Schaiane Silveira et al. Desenvolvimento de biocompósitos de poli (L-ácido láctico)(PLLA) com serragem de madeira. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 4, 2017.

CHALIA, Sonia et al. An overview of ceramic materials and their composites in porous media burner applications. **Ceramics International**, 2020.

CHOUDHARY, Rajan et al. Biomineralization, dissolution and cellular studies of silicate bioceramics prepared from eggshell and rice husk. **Materials Science and Engineering: C**, v. 118, p. 111456, 2021.

DUNG, Tran Thi Ngoc et al. Preparation of silver nanoparticle-containing ceramic filter by in-situ reduction and application for water disinfection. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 3, p. 103176, 2019.

DUTRA, R. P. S.; PONTES, L. R. Obtenção e análise de cerâmicas porosas com a incorporação de produtos orgânicos ao corpo cerâmico. **Cerâmica**, v. 48, n. 308, p. 223-230, 2002.

FILHO, Wilson B. D. N.; FRANCO, Carlos Ramon. Avaliação do potencial dos resíduos produzidos através do processamento agroindustrial no Brasil. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 6, p. 1968-1987, 2015.

FRANCO, Heider Alves; ROCHA, Marcus Vinicius de Castro; FILHO, Sergio Thode. Impacto Ambiental do Extrato Solubilizado de Borra de Café sobre Organismo Terrestre. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v.9, p.404-413, 2020.

GHORASHI, Seyed Amin et al. Experimental study on pollutant emissions in the novel combined porous-free flame burner. **Energy**, v. 162, p. 517-525, 2018.

GUERINO, K. et al. Uso de areia de fundição como matéria-prima para a produção de cerâmicas brancas triaxiais. *Ceram. Ind.*, v. 15, p. 42–46, 2010.

JERMOLOVICIUS, A. B.; MOLISANI, A. L. Porcelana colorida translúcida para luminárias decorativas. *Cerâmica*, scielo, v. 64, p. 341 – 351, 09 2018. ISSN 0366-6913. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S036669132018000300341&nrm=iso>.

MAXWELL, Omeje et al. Sustainable nano-sodium silicate and silver nitrate impregnated locally made ceramic filters for point-of-use water treatments in sub-Sahara African households. *Heliyon*, v. 7, n. 12, p. e08470, 2021.

MEI, Lúcia Helena; OLIVEIRA, Natália. Caracterização de um compósito polimérico biodegradável utilizando Poli (ϵ -caprolactona) e borra de café. *Polímeros*, v. 27, n. SPE, p. 99-109, 2017.

MOHANTA, Kalyani et al. Processing and properties of low cost macroporous alumina ceramics with tailored porosity and pore size fabricated using rice husk and sucrose. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 34, n. 10, p. 2401-2412, 2014.

MOUIYA, M. et al. Effect of sintering temperature on the microstructure and mechanical behavior of porous ceramics made from clay and banana peel powder. *Results in Materials*, v. 4, p. 100028, 2019.

MUSTAPHA, Saheed et al. Fabrication of porous ceramic pot filters for adsorptive removal of pollutants in tannery wastewater. *Scientific African*, v. 11, p. e00705, 2021.

PAGANO, Eduardo. **Obtenção de cerâmicas de alumina com gradiente funcional de porosidade a partir de diferentes técnicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais). Setor de Ciências Agrárias e Tecnologia, Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 2017.

RIBEIRO, G. C. et al. Evaluation of mechanical properties of porous alumina ceramics obtained using rice husk as a porogenic agent. *Cerâmica*, v. 65, p. 70-74, 2019

SALLEH, Siti Zuliana et al. Recycling food, agricultural, and industrial wastes as pore-forming agents for sustainable porous ceramic production: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 306, p. 127264, 2021.

SIQUEIRA, F. B.; SANTO, L. S. do E.; HOLANDA, J. N. F. Influência da pressão de compactação sobre as propriedades de massa de revestimento cerâmico. *Acta Scientiae & technicae*, v. 3, n. 2, 2015.

SOUZA, Fernanda Bernardi. **Preparação de membranas cerâmicas utilizando resíduos agroindustriais como agentes formadores de poros.** Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

2018.

ŞAN, Osman; KOÇ, Muhterem; CENGİZLER, Hakan. Production of porous ceramic from clinoptilolite incorporating aluminum powder. **Ceramics International**, v. 45, n. 18, p. 24037-24043, 2019.

TOPATEŞ, Gülsüm et al. Production and permeability of porous Si₃N₄ ceramics produced by starch addition. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 1, n. 3, p. 257-261, 2013.

ŽIVCOVÁ, Zuzana et. al. Thermal conductivity of porous alumina ceramics prepared using starch as a pore-forming agent. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 29, n. 3, p. 347-353, 2009.