

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC  
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**SARA MEDEIROS DOS SANTOS PIZZATTO**

**DESEMPENHO DE PLACAS CERÂMICAS POROSAS OBTIDAS  
A PARTIR DE RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE BASALTO  
E LAMA DE CAL PARA EMPREGO EM FACHADA  
VENTILADA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo.

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Junca.

**CRICIÚMA  
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P695d Pizzatto, Sara Medeiros dos Santos.

Desempenho de placas cerâmicas porosas obtidas a partir de resíduo de beneficiamento de basalto e lama de cal para emprego de fachada ventilada / Sara Medeiros dos Santos Pizzatto. - 2020.

164 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2020.

Orientação: Oscar Rubem Klegues Montedo.

Coorientação: Eduardo Junca.

1. Fachada ventilada. 2. Cerâmicas porosas. 3. Resíduos industriais. 4. Resíduos sólidos. 5. Basalto. 6. Cal. - I. Título.

CDD 23. ed. 620.140287

Bibliotecária Elisângela Just Steiner - CRB 14/1576  
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Sara Medeiros dos Santos Pizzatto

Desempenho de placas cerâmicas porosas obtidas a partir de resíduo de beneficiamento de basalto e lama de cal para emprego em fachada ventilada.

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 09 de abril de 2020.

**Banca Examinadora:**

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Kétner Bendo Demétrio**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

**Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Documento assinado digitalmente  
Antonio Pedro Novaes de Oliveira  
Data: 09/04/2020 18:02:07-0300  
CPF: 472.409.039-15

**Prof. Dr. Antônio Pedro Novaes de Oliveira**

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC



*Aos meus amados pais Paulo e Clotilde, meu esposo e amigo  
Fernando Otavio e a minha amada filha Maria Clara.*



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, meu agradecimento é inteiramente a Ele, Deus que sempre está comigo, em todos os momentos.

Aos seres que aqui habitam, agradeço aos meus pais Paulo e Clotilde, meu esposo Fernando, minha filha Maria Clara e meus sogros Maria Irene e Izael por todo incentivo e compreensão.

A Universidade do Extremo Sul Catarinense, que com muita competência, me proveu os laboratórios e materiais necessários para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), meus agradecimentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo e ao meu coorientador: Prof. Dr. Eduardo Junca, toda a minha gratidão. Obrigada por todo o conhecimento compartilhado, por toda a dedicação como professor e como amigo.

Agradecimentos ao PPGCEM, aos professores e a funcionária Vivian Souza, por toda a gentileza. Agradeço também a Prof. Dra. Sabrina Arcaro e ao Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira por toda contribuição em sempre ajudar e cooperar nos experimentos em laboratório e palavras de incentivo. Aos colegas da pós-graduação, em especial, Ana Carolina Feltrin e Fabio Elyseu pelo apoio e dedicação. Ao Prof. Mateus Milanez, meu agradecimento pelo apoio.

Agradecimentos ao LDCM no Senai, ao LACER na Escola de Engenharia da UFRS e ao POLICOM, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC pelos ensaios realizados.



“Todos os homens desejam naturalmente saber”.

(Aristóteles)



## RESUMO

Desde a virada do milênio, o Brasil vem experimentando um crescimento notório no setor da construção civil, possibilitando a realização de projetos com sistemas construtivos com melhor desempenho e maior eficiência energética. Com o crescimento do setor industrial, as quantidades de rejeitos tornaram-se maiores e o descarte inadequado tornou-se preocupante. Apostando em soluções eficazes para reduzir os impactos ambientais e a redução de custos, o aproveitamento de resíduos industriais destinados à construção civil, tornou-se viável. Com base nestas análises, este trabalho, apresenta a proposta de um estudo, com foco no desempenho térmico e mecânico, do emprego de resíduo de basalto e lama de cal na obtenção de placas cerâmicas porosas no sistema de fachada ventilada. Este sistema é considerado uma solução construtiva sustentável. Para isso, foi desenvolvida uma composição cerâmica. O resíduo do basalto que é um pó fino gerado a partir do beneficiamento da rocha basáltica, foi usado em substituição de 100% do feldspato, um fundente na composição cerâmica. Para se obter a porosidade desejada, foi introduzida a lama de cal na formulação das massas cerâmicas. A lama de cal possui alto teor de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), um gerador de poros. Para as formulações elaboradas foi realizado um planejamento experimental, em que foram adicionadas ao pó cerâmico três diferentes proporções de lama de cal (20, 30 e 40%) e três temperaturas de queima (900, 1000 e 1100 °C). A formulação que apresentou a melhor relação foi a F40T1100 (40% de lama de cal e temperatura de 1100 °C). Para a avaliação do desempenho, as placas obtidas foram submetidas a ensaios de resistência mecânica, ensaio ecotoxicológico, porosidade, absorção de água e isolamento térmico. As placas cerâmicas porosas apresentaram resistência mecânica à flexão de  $5,13 \pm 1,29$  MPa, porosidade total de 42,61% e absorção de água de 26,54%. O ensaio ecotoxicológico do resíduo de basalto atestou toxicidade de 99,99% e a lama de cal apresentou toxicidade de 99%, segundo os parâmetros de confiabilidade conforme os pós-testes de Dunnet. Para a melhor condição experimental, os resultados do ensaio não atestaram toxicidade, concluindo-se que se obteve um resultado aceitável de imobilização dos resíduos empregados. Para o ensaio de isolamento térmico com a cabine, os resultados mostraram que, quando analisados em termos de diferença de temperatura entre o interior da estufa e a simulação de um cômodo dentro de uma edificação, ocorreu maior redução da temperatura com o uso do sistema de fachada ventilada estudado ( $\Delta T_5 = 65,7$  °C), comparativamente ao

sistema de fachada ventilada comercial ( $\Delta T5 = 56 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e em relação à fachada convencional ( $\Delta T5 = 49,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Os resultados também mostraram que, quando analisados em termos de diferença de temperatura entre a face analisada e a temperatura interna da estufa, a condução de calor do material F40T1100 foi menor que o da amostra comercial testada. O resultado das médias  $\Delta T2$  da amostra F40T1100 apresentou valor de  $25,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , representando, assim, melhor desempenho em isolamento térmico do que as amostras Eliane ( $23,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), que foram utilizadas como referência para comparação de dados.

**Palavras-chave:** Fachada ventilada. Cerâmicas porosas. Resíduos.

## ABSTRACT

Since the turn of the millennium, Brazil has been experiencing a notable growth in the civil construction sector, making it possible to carry out projects with building systems with better performance and greater energy efficiency. With the growth of the industrial sector, the quantities of tailings have become greater and inadequate disposal become a concern. Betting on effective solutions to reduce environmental impacts and cost reduction, the use of industrial waste destined for civil construction has become feasible. Based on these analyzes, this work presents the proposal of a study, focusing on thermal and mechanical performance, on the use of basalt residue and lime mud in obtaining porous ceramic plates in the ventilated facade system. This system is considered as a sustainable constructive solution. For this, a ceramic composition was developed. The basalt residue, which is a fine powder generated from the processing of basaltic rock, was used to replace 100% of feldspar, a flux mineral in the ceramic composition. To obtain the desired porosity, lime mud was introduced in the formulation of the ceramic masses. Lime mud has a high content of calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ), a pore generator. For the elaborated formulations, an experimental planning was carried out, in which three different amounts of lime mud (20, 30 and 40%) were added to the ceramic powder and three firing temperatures (900, 1000 and 1100 °C). The experimental condition that presented the best relation was F40T1100 (40% of lime mud and temperature of 1100 °C). For the performance evaluation, the obtained plates were subjected to mechanical strength, ecotoxicological test, porosity, water absorption and thermal insulation. The porous ceramic tiles presented bending strength of  $5.13 \pm 1.29$  MPa, total porosity of 42.61% and water absorption of 26.54%. The ecotoxicological test of the basalt residue confirmed 99.99% toxicity and the lime mud showed 99% toxicity, according to the reliability parameters according to the Dunnet post-tests. For the best experimental condition, the test results did not attest toxicity, concluding that an acceptable result of immobilization of the residues employed was obtained. For the thermal insulation test with the cabin, the results showed that, when analyzed in terms of temperature difference between the interior of the greenhouse and the simulation of a room inside a building, a greater reduction in temperature occurred with the use of the ventilated facade studied ( $\Delta T_5 = 65.7$  °C), compared to the commercial ventilated facade system ( $\Delta T_5 = 56$  °C) and in relation to the traditional facade ( $\Delta T_5 = 49.1$  °C). The results

also showed that, when analyzed in terms of temperature difference between the analyzed face and the internal temperature of the oven, the heat conduction of the F40T1100 material was lower than that of the commercial sample tested. The result of the  $\Delta T_2$  averages of the sample F40T1100 showed a value of 25.1 °C, thus representing a better performance in thermal insulation than the Eliane samples (23.1 °C), which were used as a reference for data comparison.

**Keywords:** Ventilated facade. Porous ceramics. Residues.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Imagens de edificações situadas no Brasil com emprego de sistema de fachada ventilada. ....	34
Figura 2 - Efeito chaminé da fachada ventilada. ....	36
Figura 3 - Componentes da fachada ventilada.....	38
Figura 4 - Processo Kraft e resíduos gerados. ....	55
Figura 5 - Fluxograma das etapas de trabalho.....	59
Figura 6 – Imagens mostrando o aspecto físico/morfológico das matérias-primas secas em estufa. ....	61
Figura 7 - Caracterização dos resíduos.....	62
Figura 8 - Morfologia geral da plântula de <i>Lactuca sativa</i> L.....	66
Figura 9 - Caracterização das massas F20, F30 e F40.....	72
Figura 10 – Imagem mostrando corpos cerâmicos retangulares obtidos por prensagem uniaxial. ....	74
Figura 11 - Caracterização dos corpos de prova das condições experimentais estudadas. ....	75
Figura 12 – Imagens dos corpos de prova ensaiados, a verde, a seco e sinterizados.....	79
Figura 13 – Ensaio de caracterização.....	80
Figura 14 – Imagens das amostras submetidas a caracterização mecânica - módulo de elasticidade.....	82
Figura 15 – Imagens das amostras para ensaios de condutividade térmica. ....	84
Figura 16 – Imagens das amostras fixadas na estrutura metálica acoplada no aparato térmico, simulando a estrutura do sistema de fachada ventilada. ....	85
Figura 17 - Detalhe da cabine de madeira. Medidas e especificações... ..	86
Figura 18 - Detalhe da estrutura metálica. Medidas e especificações. ... ..	86
Figura 19 – Imagem do aparato térmico desenvolvido. ....	87
Figura 20 - Mecanismo de ajuste das distâncias da estrutura metálica que simula o sistema de fachada ventilada.....	88
Figura 21 - Planta baixa do sistema completo: aparato térmico e estufa. ....	89
Figura 22 - Corte AA referente ao sistema completo: aparato térmico e estufa. ....	90
Figura 23 – Imagem do aparato térmico para ensaio simulando uma fachada convencional. ....	92



Figura 24 – Imagens do aparato térmico para ensaio simulando uma fachada com sistema de fachada ventilada. ....	93
Figura 25 – Imagens de corpos de prova F40T1100 colados na estrutura metálica. ....	93
Figura 26 - Difratoograma de raios X do basalto. ....	97
Figura 27 - Difratoograma de raios X da lama de cal. ....	98
Figura 28 – DSC por fluxo de calor e TGA por variação da massa da amostra do basalto. ....	100
Figura 29 - DSC e TGA da lama de cal. ....	101
Figura 30 - Comportamento do basalto durante o aquecimento até a fusão. ....	102
Figura 31 – Imagens das amostras de <i>Allium cepa</i> L. após 7 dias em exposição aos efluentes. ....	104
Figura 32 – Gráficos com os efeitos tóxicos subcrônicos dos efluentes em bulbos de <i>Allium cepa</i> L. (cebola). ....	105
Figura 33 – Imagens das sementes de <i>Lactuca sativa</i> L. após 3 dias em exposição aos efluentes. ....	106
Figura 34 – Gráficos que evidenciam os efeitos tóxicos subcrônicos dos efluentes em sementes de <i>Lactuca sativa</i> L. ....	107
Figura 35 - Distribuição granulométrica das massas formuladas. ....	109
Figura 36 - DSC e TGA para as formulações F20, F30 e F40. ....	111
Figura 37 - Curva de expansão linear das formulações. ....	112
Figura 38 - Difratoogramas de raios X das formulações estudadas. ....	114
Figura 39 - Resultados das variáveis de resposta das formulações estudadas. ....	119
Figura 40 - Superfície de resposta para a porosidade. ....	122
Figura 41 - Superfície de resposta para a resistência mecânica à flexão. ....	124
Figura 42 – Imagens das amostras após 7 dias em exposição ao efluente. ....	129
Figura 43 – Gráficos dos efeitos tóxicos subcrônicos dos efluentes em bulbos de <i>Allium cepa</i> L. (cebola). ....	130
Figura 44 – Imagens das amostras após 3 dias em exposição ao efluente. ....	131
Figura 45 – Gráficos dos efeitos tóxicos subcrônicos do efluente em sementes de <i>Lactuca sativa</i> L. ....	132
Figura 46 - Imagem de MEV do corpo de prova F40T1100. ....	134
Figura 47 - Imagem de MEV do corpo de prova F40T1100, com diferentes tipos de poros: (a) poros residuais decorrentes do processo de	



prensagem e (b) poros gerados a partir da descarbonatação do calcáreo. .... 134

Figura 48 - Resultados de  $\Delta$  das temperaturas do termopar T2 – revestimento para as amostras F40T1100 e para as amostras Eliane *Laminum* em função da temperatura da estufa (T1 – estufa). .... 141

Figura 49 - Resultados dos  $\Delta$  das temperaturas do termopar T4 – parede gesso para a fachada convencional, fachada ventilada: amostras Eliane *Laminum* e fachada ventilada: amostras F40T1100, em função da temperatura da estufa (T1 – estufa). .... 142

Figura 50 - Resultados dos  $\Delta$  das temperaturas do termopar T4 – parede gesso para as fachadas ventiladas: amostras Eliane *Laminum* e amostras F40T1100, em função da temperatura da estufa (T1 – estufa). .... 143

Figura 51 - Resultados dos  $\Delta$  das temperaturas do termopar T5 – caixa madeira para a fachada convencional, fachada ventilada: amostras Eliane *Laminum* e fachada ventilada: amostras F40T1100, em função da temperatura da estufa (T1 – estufa). .... 144

Figura 52 - Resultados dos  $\Delta$  das temperaturas do termopar T4 – parede gesso para as fachadas ventiladas: amostras Eliane *Laminum* e amostras F40T1100, em função da temperatura da estufa (T1 – estufa). .... 146



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos revestimentos cerâmicos prensados.....	44
Tabela 2 - Composições das formulações F20, F30 e F40, com a incorporação de lama de cal (% em massa).....	69
Tabela 3 - Planejamento fatorial com as duas variáveis: teor de lama de cal e temperatura de sinterização.....	70
Tabela 4 - Códigos das corridas experimentais e das variáveis de resposta. ....	71
Tabela 5 - Tabela de calibração dos termopares. Temperatura real e temperaturas dos termopares em °C. ....	91
Tabela 6 - Composição química (% em massa) dos resíduos.....	96
Tabela 7 - Distribuição granulométrica dos resíduos. ....	99
Tabela 8 – Especificação de pH dos efluentes basalto e lama de cal e grupo controle - água.....	103
Tabela 9 – Parâmetros de confiabilidade conforme pós testes de Dunnet. ....	103
Tabela 10 - Composição química a verde das formulações (% em massa). ....	108
Tabela 11 - Resultados de densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> ) e de porosidade (%) para teor de lama de cal versus temperatura de sinterização para as 6 formulações em estudo.....	116
Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência mecânica à flexão (MPa) para teor de lama de cal versus temperatura de sinterização para as 6 condições experimentais em estudo. ....	117
Tabela 13 - Análise de variância para a porosidade. ....	121
Tabela 14 - Análise de variância para resistência mecânica à flexão..	123
Tabela 15 - Valores de densidade aparente (Dap), porosidade (P) e absorção de água (Abs) da amostra F40T1100. ....	127
Tabela 16 - Resultados das médias das temperaturas (°C) coletadas do FieldLogger – DataLogger para os três ensaios realizados com a cabine e a estufa. ....	137
Tabela 17 - Resultado dos $\Delta$ das temperaturas (°C) de T2, T4 e T5 em função da temperatura T1.....	139



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT NBR - Associação Brasileira de Normas Técnicas Norma Brasileira

ASTM - American Society for Testing and Materials

UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
1.1	OBJETIVOS .....	32
1.1.1	Objetivo geral.....	32
1.1.2	Objetivos específicos.....	32
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>33</b>
2.1	FACHADAS VENTILADAS.....	33
2.1.1	Conceito e breve histórico.....	33
2.1.2	Classificação e sistema de fixação.....	36
2.1.3	Material empregado como revestimento .....	38
2.1.4	Vantagens e desvantagens.....	39
2.1.5	Inovações no sistema de fachada ventilada .....	40
2.2	CERÂMICA .....	42
2.2.1	Breve histórico e cenário atual .....	42
2.2.2	Placa cerâmica para revestimento.....	43
2.2.3	Cerâmica porosa .....	44
2.2.4	Inovações no uso da cerâmica porosa .....	48
2.3	ISOLANTES TÉRMICOS.....	50
2.4	RESÍDUOS SÓLIDOS .....	52
2.4.1	Resíduo de beneficiamento de basalto .....	52
2.4.2	Resíduo de lama de cal .....	55
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>59</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	61
3.1.1	Caracterização química.....	62
3.1.2	Caracterização mineralógica .....	63
3.1.3	Caracterização física .....	63
3.1.4	Caracterização térmica .....	63
3.1.5	Caracterização ambiental .....	64
3.2	FORMULAÇÕES DAS MASSAS CERÂMICAS.....	67
3.2.1	Tratamento térmico.....	69
3.2.2	Planejamento estatístico.....	69
3.2.3	Preparação da massa cerâmica .....	71
3.2.4	Caracterização química.....	73
3.2.5	Caracterização física .....	73
3.2.6	Caracterização térmica .....	73
3.2.7	Processamento da placa cerâmica .....	73
3.2.8	Sinterização dos corpos de prova .....	74
3.2.9	Caracterização dos corpos de prova sinterizados .....	75



3.2.9.1	Caracterização mineralógica .....	75
3.2.9.2	Porosidade .....	76
3.2.9.3	Caracterização mecânica .....	77
3.3	DEFINIÇÃO DA MELHOR CONDIÇÃO EXPERIMENTAL .....	78
3.4	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA MELHOR CONDIÇÃO EXPERIMENTAL .....	78
<b>3.4.1</b>	<b>Porosidade .....</b>	<b>80</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Absorção de água.....</b>	<b>80</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Caracterização mecânica .....</b>	<b>81</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Caracterização ambiental .....</b>	<b>82</b>
<b>3.4.5</b>	<b>Caracterização microestrutural .....</b>	<b>83</b>
<b>3.4.6</b>	<b>Ensaio térmico.....</b>	<b>83</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>95</b>
4.1	COMPORTAMENTO QUÍMICO E FÍSICO DOS RESÍDUOS E DAS FORMULAÇÕES .....	95
<b>4.1.1</b>	<b>Caracterização dos resíduos .....</b>	<b>95</b>
4.1.1.1	Caracterização química .....	95
4.1.1.2	Caracterização mineralógica .....	96
4.1.1.3	Caracterização física.....	98
4.1.1.4	Caracterização térmica .....	99
4.1.1.5	Caracterização ambiental.....	102
<b>4.1.2</b>	<b>Caracterização das massas cerâmicas.....</b>	<b>107</b>
4.1.2.1	Caracterização química .....	107
4.1.2.2	Caracterização física.....	109
4.1.2.3	Caracterização térmica .....	110
<b>4.1.3</b>	<b>Caracterização dos corpos de prova sinterizados .....</b>	<b>113</b>
4.1.3.1	Caracterização mineralógica .....	113
4.1.3.2	Porosidade .....	115
4.1.3.3	Caracterização mecânica .....	117
4.2	DEFINIÇÃO DA MELHOR FORMULAÇÃO .....	118
4.3	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA MELHOR CONDIÇÃO EXPERIMENTAL .....	127
<b>4.3.1</b>	<b>Porosidade e absorção de água.....</b>	<b>127</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Caracterização mecânica .....</b>	<b>128</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Caracterização ambiental .....</b>	<b>128</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Caracterização microestrutural .....</b>	<b>133</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Ensaio térmico.....</b>	<b>135</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>149</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>153</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Com a evolução tecnológica nas mais variadas etapas da construção civil no Brasil, constata-se a necessidade de se desenvolver novas soluções para os sistemas construtivos. Levando em consideração os aspectos econômicos, procuram-se projetos e especificações de materiais que reduzam o custo de instalação e reduzam o desperdício de materiais, coligados aos novos conceitos impostos pelas tendências da arquitetura atual.

A fachada é um dos elementos básicos para a valorização do edifício. Suas funções assumem um papel muito mais amplo que apenas a estética da edificação. Os sistemas de revestimento têm um efeito significativo no desempenho e na durabilidade das fachadas dos edifícios, contribuindo para a estanqueidade, valorização imobiliária e no acabamento estético (SILVA; THOMAZ; OLIVEIRA, 2018).

Dentre as inovações mais recentes ocorridas em fachadas, está o sistema de fachadas ventiladas. Este sistema é caracterizado pela existência de ventilação em uma câmara de ar e suas vantagens abrangem conforto térmico e acústico, rápida execução e redução no prazo de construção (GONÇALVES; LOPES, 2019). Atualmente pode ser empregado em diferentes materiais de revestimento, entre eles, painéis de fibrocimento, alumínio composto, placas de pedra natural, como mármore e granito, metal, e o porcelanato (SILVA; THOMAZ; OLIVEIRA, 2018).

Os materiais porcelânicos são tipicamente utilizados como revestimento em fachadas ventiladas. Possuem como características alta resistência mecânica, alta resistência ao manchamento, baixa porosidade, conforme determina a ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997c).

O sistema de fachadas ventiladas traz consigo inúmeras vantagens, porém, o preço é bastante elevado, se comparado com soluções tradicionais, o que dificulta a inserção no mercado brasileiro. O sistema possui um sistema de fixação composto por uma subestrutura metálica, o que permite a instalação de grandes formatos de placas cerâmicas. O peso da placa cerâmica tem grande influência no dimensionamento desta subestrutura metálica. Os materiais porcelânicos são materiais densos, exigindo uma estrutura mais reforçada e, como consequência direta, o custo elevado do sistema.

A indústria cerâmica vem inovando com a produção de novos produtos que aliam características sustentáveis e evolutivas. O emprego de materiais porosos como revestimento no sistema de fachada ventilada é uma alternativa viável para resolver esta relação peso *vs* custo. Os mesmos possuem a característica de baixa densidade e leveza, diminuindo o peso da subestrutura metálica, resultando na redução direta de matérias-primas, diminuindo o custo do sistema.

Dentre as inovações tecnológicas na produção de novos produtos na indústria cerâmica, está a produção de revestimentos cerâmicos a partir de resíduos. Nos materiais cerâmicos, a porosidade é alcançada a partir da inserção de geradores de poros, como por exemplo, a lama de cal. A lama de cal é um resíduo rico em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presente no setor de papel e celulose no Brasil. É gerado em grande quantidade na região do planalto catarinense. Este resíduo apresenta uma crescente quantidade de geração, perfazendo-se a necessidade de se obter alternativas de reuso ambientalmente correta para o mesmo.

O resíduo de beneficiamento de basalto utilizado em substituição do fundente na massa cerâmica, é proveniente de uma rocha ígnea

eruptiva, o basalto. Este resíduo é gerado em grande quantidade no setor da mineração. O basalto é constituído basicamente por minerais de silício, alumínio e ferro, na forma de piroxênios (augita) e plagioclásios, e magnetita (SCHIAVON; REDONDO; YOSHIDA, 2007).

A construção civil comporta-se como uma grande geradora de impactos ambientais. Estimativas apontam que a cadeia produtiva da construção civil consome entre 20 e 50% de recursos naturais extraídos no planeta (BRASILEIRO; MATOS, 2015). Por estes motivos, é de fundamental importância o desenvolvimento de materiais inovadores e alternativos, que incluam em suas composições estes resíduos gerados.

O uso de resíduos em substituição de matérias-primas naturais visa diminuir o valor total do sistema de fachada ventilada, uma vez que o valor da matéria-prima é substancialmente maior que o valor do resíduo.

Com base nesta explanação, a proposta do trabalho em questão, é utilizar o resíduo de beneficiamento de basalto e a lama de cal, no processamento de um produto cerâmico, a ser implantado no sistema de fachadas ventiladas, buscando-se reduzir a densidade, em relação às placas atualmente empregadas, mantendo-se a resistência mecânica mínima requerida para esta aplicação e usando resíduos que possam reduzir o custo melhorando a sustentabilidade no setor da construção civil.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver e avaliar propriedades térmicas e mecânicas de placas cerâmicas porosas para fachada ventilada, aplicadas no setor da construção civil, contendo resíduo de beneficiamento de basalto e lama de cal.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os resíduos de beneficiamento de basalto e lama de cal;
- Avaliar o efeito do teor de lama de cal e da temperatura de sinterização na resistência mecânica e porosidade da composição cerâmica estudada;
- Avaliar o desempenho da melhor condição experimental.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais assuntos que foram utilizados para embasar este trabalho.

### 2.1 FACHADAS VENTILADAS

As empresas da construção civil, com o passar dos anos, vêm enfrentando mudanças no perfil do consumidor e exigências por inovação tecnológica.

A grande incidência de patologias em revestimentos aderidos na fachada e a demora na conclusão da obra fazem com que soluções inovadoras se façam cada vez mais presentes na especificação de projetos arquitetônicos e, conseqüentemente, na execução da obra. Como alternativa tornou-se cada vez mais frequente a especificação de elementos industrializados não aderidos e de fácil desconstrução na especificação de fachadas.

O sistema de fachadas ventiladas está se tornando popular entre os arquitetos no Brasil.

#### 2.1.1 Conceito e breve histórico

Os primeiros testemunhos sobre paredes com câmara de ar datam do século XIX, em concreto da obra *Views of Picturesque Cottages with Plans*, em 1850, de William Atkinson (SARRABLO, 2008).

O primeiro projeto assinalado como sendo uma fachada dupla, ou *double skin façades*, fachadas compostas por dois planos de vidros, é o da "fábrica de bichinhos de pelúcia" Steiff Firma, em Giengen an der Brenz

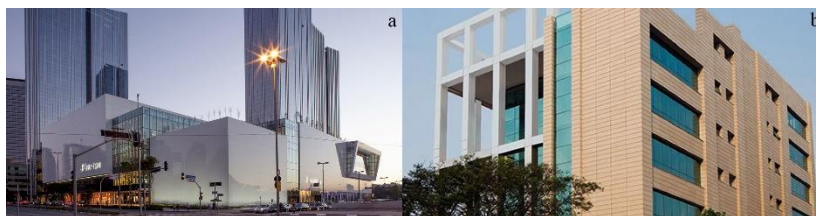
na Alemanha. O prédio é datado de 1903 e não possui a autoria registrada por um profissional, porém supõe-se que a autoria do projeto seja de Richard Steiffum, sobrinho da fundadora da empresa (KREBS, 2016).

Atualmente, este sistema é empregado em países europeus, onde empresas exploram este mercado e possuem tecnologia de execução para o sistema. No Brasil, este tipo de sistema é pouco difundido e ainda não está submetido a uma norma específica. Uma das desvantagens para a aceitação deste sistema no mercado nacional é o preço elevado. Porém, é possível desenvolver um sistema de fachada ventilada apropriado para a utilização, a partir de tecnologia existente no país (MÜLLER; ALARCON, 2006).

De acordo com Medeiros (2016, apud RIBEIRO *et al.*, 2019), no Brasil foram realizados, após o ano 2000, os primeiros projetos utilizando o sistema de fachadas ventiladas. Recentemente, houve um aumento significativo na implantação de projetos deste segmento no país.

A Figura 1 mostra exemplos de edificações em que foram empregados o sistema de fachadas ventiladas.

Figura 1 – Imagens de edificações situadas no Brasil com emprego de sistema de fachada ventilada.



- a) Edifício JK Iguatemi. São Paulo/SP  
Fonte: ELIANE, 2019
- b) Ed. Brigadeiro, Sede da Goodyear. São Paulo / SP  
Fonte: HUNTERDOUGLAS, 2019

Em se tratando do conceito de fachada ventilada, o mesmo é uma vertente do sistema de Fachada Cortina (*curtain-wall*). O sistema de fachada cortina é definido pela norma Brasileira ABNT NBR 10821:2017 como sendo:

“Esquadrias interligadas e estruturadas, com função de vedação, que formam um sistema contínuo, desenvolvendo-se no sentido da altura e/ou da largura da fachada da edificação, sem interrupção, por pelo menos dois pavimentos” (ABNT, 2017).

Para a norma Americana ASTM E 631-93a, a fachada-cortina é definida como “parede exterior não aderida, segura e suportada por membros estruturais do edifício” (ASTM, 1998).

Segundo a norma Italiana UNI 11018:2003, a fachada ventilada é um tipo de fachada de barreira avançada (“*Facciate a Schermo Avanzato*”) (UNI, 2003).

O sistema de fachada cortina é caracterizado por ser um sistema não aderido. É instalado por meio de *inserts* metálicos ou subestrutura metálica com uma câmara de ar. No caso do sistema de fachadas ventiladas, o ar nesta câmara é renovado constantemente, a partir de um escoamento ascendente de ar com o aquecimento. Também contribuem para a ventilação, diferenças de pressão no interior da câmara de ar ventilada devido à ação do vento (MÜLLER; ALARCON, 2006).

Toda fachada ventilada é considera fachada cortina, mas não o inverso.

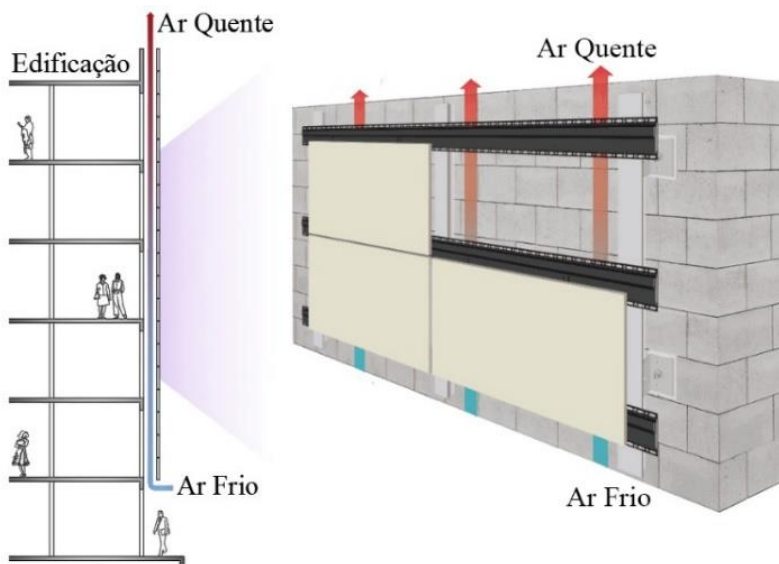
## 2.1.2 Classificação e sistema de fixação

A fachada ventilada é um sistema que inova o conceito de fachada de um empreendimento. As fachadas passam a ser soluções construtivas caracterizadas pela eficiência energética, resistência, uniformidade e conforto nos ambientes internos.

A fachada é classificada como sendo ventilada por apresentar um afastamento entre o revestimento externo e a base do suporte do edifício.

Por meio desta câmara de ar ocorre a ventilação, o chamado efeito chaminé. O ar frio entra pela parte inferior e o ar aquecido (quente) é removido pela parte superior e pelas juntas, conforme Figura 2. Estas juntas devem permanecer abertas. Desta forma, permite a ventilação contínua no sentido vertical.

Figura 2 - Efeito chaminé da fachada ventilada.



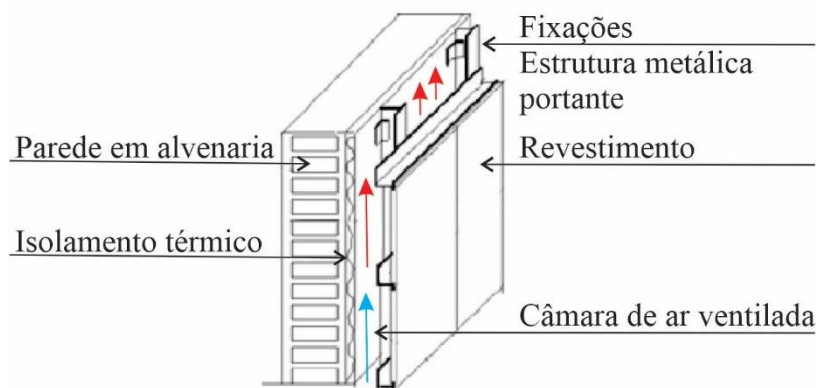
Fonte: Adaptado de ELIANE, 2019

Dos componentes da fachada ventilada, pode-se elencar as seguintes partes:

- pano interior, também chamado de muro de suporte: trata-se da parede em alvenaria confinada e apoiada na estrutura portante do edifício. Serve como base para a fixação da subestrutura metálica do sistema;
- Isolamento térmico: é uma capa contínua a toda a altura do suporte. Costuma-se utilizar isolantes de poros fechados, como espuma de poliuretano, mas pode-se usar isolantes de poros abertos, a lã mineral;
- Câmara de ar ventilada: sua função principal é eliminar, por convecção, o excesso de calor e umidade acumulados na câmara e impedir a passagem da água da chuva para o interior do edifício, drenando o que consegue infiltrar-se. É onde ocorre a ventilação contínua do sentido vertical. Esta cavidade de ar possui espessura média de 100 a 150 mm, ou seja, afastamento médio entre as duas estruturas;
- Fixações: o sistema de fixação é composto por perfis verticais em alumínio e *inserts* metálicos em aço inoxidável;
- Revestimento ou pano exterior: o revestimento externo é composto por placas modulares de grandes formatos, em vários tipos de materiais. Define a imagem externa do edifício ao mesmo tempo que configura a câmara de ar ventilada. As juntas destas placas devem permanecer abertas, a fim de que o ar frio entre pela abertura inferior e o ar quente saia pela abertura superior, criando o efeito chaminé (SARRABLO, 2008).

A Figura 3 apresenta os componentes da fachada ventilada.

Figura 3 - Componentes da fachada ventilada.



Fonte: Adaptado de MÜLLER; ALARCON, 2006

### 2.1.3 Material empregado como revestimento

São diversos os tipos de materiais utilizados para compor o revestimento do sistema de fachadas ventiladas. Esta classificação é de extrema importância, pois irá determinar o sistema de fixação que se propõe especificar para uma determinada obra.

Os materiais apresentados atualmente como sendo os mais utilizados na indústria da construção civil são: cerâmica / porcelanato, painéis de alumínio composto, placas fenólicas, placas cimentícias, cerâmica extrudada, madeira e vidro.

Os materiais cerâmicos recebem um reforço composto, constituído por uma tela de fibra de vidro e resina polimérica aderida à placa cerâmica. A combinação desses componentes visa garantir a segurança do material após a instalação, evitando a liberação de fragmentos do material cerâmico utilizado na fachada em caso de fratura (RIBEIRO *et al.*, 2019).

### 2.1.4 Vantagens e desvantagens

O sistema de fachadas ventiladas apresenta várias vantagens quando comparadas com o sistema de revestimentos tradicionalmente aderidos. A respeito do desempenho das fachadas ventiladas, existem duas vantagens principais. A primeira é o de reduzir problemas ocorridos devido à umidade. Em segundo, o desempenho energético da fachada ventilada é superior ao das fachadas convencionais sob a exposição à radiação solar. Este sistema inovador tem sido apontado como um sistema que pode auxiliar a atingir os níveis satisfatórios de eficiência energética (RIBEIRO *et al.*, 2019).

É importante salientar que a cerca de 30 anos as fachadas ventiladas estão sendo inseridas no mercado brasileiro, portanto ainda não existem sistemas desta tipologia que tenham cumprido com a vida útil da edificação conforme descrição da ABNT NBR 15575-1:2013, que tem como especificação de 40 a 60 anos (ABNT, 2013).

O sistema de fachada ventilada apresenta as seguintes vantagens:

- Economia de energia: redução de aproximadamente 30 a 50% do consumo de energia da edificação;
- Promove o isolamento térmico: baixa dispersão de calor em períodos frios. Baixa absorção de calor em meses quentes;
- Não deterioração das características estéticas e técnicas com o decorrer do tempo; resistente à poluição e corrosão;
- Baixa absorção de água, impede a entrada da água pluvial na estrutura da edificação, eliminando problemas de umidade, eflorescência ou infiltrações nas vedações externas;

- Alta resistência a ataques químicos e ao choque térmico;
- Possibilidade de aplicação em obras de *retrofit*: pode ser utilizado em reformas de fachadas de edifícios sem necessidade de remover o revestimento antigo;
- Promove o isolamento acústico;
- Redução dos efeitos de dilatação térmica da estrutura do edifício;
- Método de construção a seco (COLINART; BENDOUMA; GLOUANNEC, 2019; ELIANE, 2019; GONÇALVES; LOPES, 2019; SARRABLO, 2008).

Quanto às desvantagens das fachadas ventiladas, pode-se citar:

- Custo econômico elevado;
- Pouca especificação para a instalação desse sistema no Brasil;
- Ausência de norma Brasileira e de requisitos de desempenho que agreguem valor comercial ao produto;
- Necessidade de mão de obra qualificada e com experiência (ELIANE, 2019; GONÇALVES; LOPES, 2019; SARRABLO, 2008).

### **2.1.5 Inovações no sistema de fachada ventilada**

O desenvolvimento de produtos para um mercado consumidor globalizado e de novas tecnologias, fizeram da virada do milênio e das primeiras décadas deste século um campo fértil para experimentações e consolidações nas áreas da arquitetura e engenharia. A concretização da sustentabilidade como conceito projetual, em que o desenvolvimento de edificações seguindo metodologias com baixo impacto ambiental, mais

eficientes quanto ao uso da água e menor consumo de energia, tendem a proporcionar conforto aos usuários.

Para estes projetos inovadores, é comum a presença de envoltórios ventilados que vêm a contribuir para que, na execução e funcionalidade destas edificações, ocorra o cumprimento destes requisitos, sobretudo levando-se em consideração maior grau de eficiência energética.

Maciel; Carvalho (2019) compararam o benefício de consumo de energia de fachadas ventiladas *versus* fachadas revestidas de edifícios residenciais de vários andares em 16 cidades diferentes do Brasil. Todas estas cidades se beneficiaram energeticamente ao longo do ano. Os maiores benefícios energéticos foram alcançados nas regiões climáticas mais quentes, ou seja, quanto mais quente a região, maior o benefício energético das fachadas ventiladas. O sistema de fachadas ventiladas provou ser vantajoso em termos de desempenho energético, térmico e financeiro, contribuindo para o menor impacto ambiental ao longo do ciclo de vida do edifício, oferecendo economia de energia elétrica entre 8 e 43% ao ano.

Santa Cruz Astorqui e Porrás-Amores (2017) propuseram discutir a viabilidade de se adicionar uma segunda câmara de ar paralela à existente. Atualmente, as fachadas ventiladas são compostas por uma câmara de ventilação. Esta segunda câmara estaria interconectada com a existente pela parte inferior da fachada e com um dispositivo na parte superior para regular o fluxo de ar nas câmaras. O objetivo dos autores é avaliar o potencial deste sistema na melhoria da eficiência energética do edifício, utilizando um modelo estável de dinâmica de fluidos computacional. O estudo foi realizado em diferentes épocas do ano. Os resultados mostraram que o sistema proposto permite um aumento de

38% de eficiência no verão e 333% no inverno, comparando-se a uma fachada ventilada convencional.

Colinart, Bendouma e Glouannec (2019) optaram por aplicar o sistema de fachada ventilada a fim de explorar as vantagens em obras de *retrofit*. Trata-se de um edifício de ensino médio – escola, construído em 1959, renovado com elementos de fachada ventilada pré-fabricada. Temperatura, umidade relativa e fluxo de calor foram testados. O desempenho do edifício renovado foi discutido com base na análise de dois anos de medição. Os resultados apontaram que a resistência térmica medida *in situ* de elementos de fachadas ventiladas pré-fabricadas pode ser avaliada de maneira confiável no inverno. Notou-se que a aplicação do isolamento térmico externo não leva a grandes patologias relacionadas à umidade no envelope do edifício adaptado. Observou-se que o conforto higrotérmico é alcançado na maior parte do tempo de ensino.

## 2.2 CERÂMICA

### 2.2.1 Breve histórico e cenário atual

O termo “cerâmica” vem da palavra grega *keramikos*, o que significa “matéria queimada”. A cerâmica é o material mais antigo produzido pelo homem. O uso da cerâmica como revestimento teve início no século XIV, na Pérsia. A origem do nome azulejo provém dos árabes. É uma derivação do termo *azuleicha*, que significa pedra polida. Os islâmicos difundiram a arte do azulejo e os árabes levaram para a Espanha e toda a Europa (ANFACER, 2019; CALLISTER, JR., 2008; OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

No século XVII, os primeiros revestimentos cerâmicos chegaram ao Brasil em estilo barroco e serviam como material decorativo. O uso do azulejo tornou-se habitual no século XIX, revelando-se um bom revestimento por conta do clima (ANFACER, 2019).

Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor e o segundo maior consumidor mundial de revestimentos cerâmicos. Itália e Espanha são os dois países líderes em produção (ANFACER, 2019).

O Brasil possui produção concentrada em Santa Catarina, na região de Criciúma, especialmente com tecnologia via úmida, e no Estado de São Paulo, onde a produção está distribuída em Mogi Guaçu, Santa Gerturdes e na região metropolitana de São Paulo, utilizando produção com tecnologia via úmida e via seca. O Nordeste pode vir a se tornar um polo em futuro próximo. A região possui condições favoráveis e um mercado consumidor (ANFACER, 2019).

### **2.2.2 Placa cerâmica para revestimento**

A produção de azulejos está crescendo em todo o mundo. A intensa inovação no processo produtivo ocorreu nas últimas décadas e renovou os ciclos de fabricação, introduzindo revoluções tecnológicas muito rapidamente, trazendo grandes mudanças nos produtos cerâmicos, dando origem a novos produtos como a monoporosa e o grês porcelanato (DONDI; RAIMONDO; ZANELLI, 2014).

Segundo a norma Brasileira ABNT NBR 13816:1997, as placas cerâmicas para revestimento são definidas como sendo:

“Material composto de argila e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes, sendo conformadas por

extrusão ou prensagem, podendo também ser conformadas por outros processos. As placas são então secadas e queimadas à temperatura de sinterização. Podem ser esmaltadas ou não esmaltadas. As placas são incombustíveis e não são afetadas pela luz” (ABNT, 1997a).

As placas cerâmicas para revestimento são classificadas de acordo com a norma Brasileira ABNT NBR 13817:1997, conforme Tabela 1.

Segundo a norma, a classificação pode ocorrer segundo os critérios de método de fabricação (prensado, extrudado e outros) e os grupos de absorção de água (ABNT, 1997b).

Tabela 1 - Classificação dos revestimentos cerâmicos prensados.

Tipo de corpo <sup>1</sup>	Classe <sup>2</sup>	Absorção de água (%) <sup>2</sup>	Módulo de resistência à flexão (MPa) <sup>3</sup>
Altamente vitrificado	BIa	$0 < \text{Abs} \leq 0,5$	$\geq 35$
Vitrificado	BIb	$0,5 < \text{Abs} \leq 3$	$\geq 30$
Semi vitrificado	BIIa	$3 < \text{Abs} \leq 6$	$\geq 22$
Semi poroso	BIIb	$6 < \text{Abs} \leq 10$	$\geq 18$
Poroso	BIII	$\text{Abs} > 10$	$\geq 12$

Fonte: ABNT NBR 13818:1997 – (ABNT, 1997c)

### 2.2.3 Cerâmica porosa

Um material é constituído por uma fração sólida, que pode ou não consistir de uma ou de várias fases e de espaços vazios. Estes espaços

<sup>1</sup> Determinação dos dados de acordo com (DONDI; RAIMONDO; ZANELLI, 2014).

<sup>2</sup> Determinação dos dados de acordo com a tabela 2 da ABNT NBR 13817:1997.

<sup>3</sup> Determinação dos dados de acordo com o anexo T da ABNT NBR 13818:1997.

vazios, são denominados de poros. A porosidade é dada como a relação entre o volume ocupado pelo ar existente na massa granular e o volume total ocupado por esta massa. Estes poros desempenham um papel importante, algumas vezes desejados e outras tendo que ser eliminados (FONSECA *et al.*, 2016).

A cerâmica porosa é um componente vital para várias aplicações na engenharia. Estes materiais são promissores para diversas aplicações funcionais e estruturais, como isolamento térmico, absorventes, filtrações e suportes de catalisadores, devido a sua alta porosidade, baixa densidade, boa resistência, leveza, estabilidade térmica eminente e alta estabilidade química. Desta forma, resulta em uma ampla pesquisa em novos métodos de processamento, que permitam produzir peças com uma variedade maior de morfologia e propriedades. Por meio da modificação e otimização das técnicas de processamento, estes materiais podem ser projetados para apresentar propriedades para uma aplicação específica, e podem ser adaptados para possuir as propriedades desejadas por intermédio do controle da microestrutura (HAMMEL; IGHODARO; OKOLI, 2014; HAO *et al.*, 2019; VAKIFAHMETOGLU; ZEYDANLI; COLOMBO, 2016).

A cerâmica porosa não se forma apenas pela composição química da matriz cerâmica, mas também pelas características de porosidade, como exemplo a distribuição de tamanho de poros, tortuosidade, área superficial específica, porosidade fechada ou aberta, alinhada ou graduada. Todos são determinados pelo processo de fabricação selecionado (VAKIFAHMETOGLU; ZEYDANLI; COLOMBO, 2016).

Durante a queima, mudanças significativas podem ocorrer no tamanho de partículas, morfologia e no tamanho dos poros. O nível de

porosidade e a conectividade dos poros, diâmetro, forma e distribuição, afetam a condutividade térmica e o isolamento térmico da cerâmica porosa (HAN *et al.*, 2017).

Conforme a IUPAC<sup>4</sup>, a porosidade é classificada em microporos (diâmetro < 2 nm), mesoporos (2 nm < diâmetro < 50 nm) e macroporos (diâmetro > 50 nm) (VAKIFAHMETOGLU; ZEYDANLI; COLOMBO, 2016).

O material pode ser distinguido entre estruturas porosas abertas e fechadas, entre porosidade alinhada e graduada. Os poros abertos estão em conexão com o exterior. Os poros conectados com a superfície são condutores de material entre o interior e o exterior da estrutura. As cerâmicas porosas abertas apresentam uma alta permeabilidade com uma área de superfície acessível. Os poros fechados não são conectados com a superfície, mas podem estar conectados entre si internamente. Os mesmos podem ser causados pela evolução de gases da fase sólida e estes gases não conseguem sair da estrutura, formando, assim, os poros, ou podem ser causados pelo fechamento de poros abertos, devido à evolução da sinterização. As cerâmicas porosas fechadas são caracterizadas como isolantes térmicos. A porosidade alinhada fornece propriedades anisotrópicas, o que pode ser vantajoso quando a permeabilidade axial máxima é desejada. A porosidade graduada pode ser favorável quando se pretende que uma superfície porosa seja acoplada a outro material. Logo, a combinação de tamanho e morfologia de poros em uma estrutura amplia as opções de aplicações que podem ser executadas utilizando-se a

---

<sup>4</sup> IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry: União Internacional de Química Pura e Aplicada.

cerâmica porosa (MAURATH; WILLENBACHER, 2017; VAKIFAHMETOGLU; ZEYDANLI; COLOMBO, 2016).

Os revestimentos cerâmicos são classificados de acordo com a adequação ao local de aplicação do produto. Os revestimentos de parede, ou azulejos, necessitam de alta porosidade, para garantir baixa retração de queima, alta estabilidade dimensional e facilidade de instalação. Os produtos com propriedades de baixa porosidade apresentam alta resistência mecânica e baixa absorção de água, sendo utilizados em pisos (ZAUBERAS *et al.*, 2004).

No projeto de composições para azulejos, são necessários quatro ingredientes básicos: argila, agentes de fluxo, enchimento e aditivos (DONDI; RAIMONDO; ZANELLI, 2014):

- Argila: estabiliza as suspensões no processo via úmido. Garante a plasticidade necessária para moldar. Durante a queima, atua como agente de fluxo;
- Agentes de fluxo: são os fundentes, formando uma fase líquida a alta temperatura que permite densificar o corpo cerâmico por fluxo viscoso. Os feldspatos são os fundentes mais utilizados;
- Enchimento: o chamado esqueleto, fornece uma estrutura de granulação grossa, contrastando deformações durante a secagem e queima. O material mais utilizado é o quartzo;
- Aditivos: o agente gerador de poros que desenvolve a porosidade durante a queima e promove a sinterização por difusão da superfície. Geralmente os carbonatos desempenham este papel.

Os corpos porosos são dirigidos a revestimento de parede fabricados pela tecnologia monoporosa, em ciclo rápido, ou pela

tecnologia de biqueima rápida, em ciclo duplo rápido para corpos coloridos e corpos brancos. As programações de queima industrial estão em temperaturas entre 1000 a 1140 °C (DONDI; RAIMONDO; ZANELLI, 2014).

A tecnologia monoporosa apresenta vantagens notáveis em termos de custo e produtividade, pois permite queimar ao mesmo tempo corpo e esmalte. Porém, devido ao rápido ciclo de queima, a temperaturas elevadas, a decomposição térmica da calcita ocorre e pode se sobrepor à fusão do esmalte. Caso o CO<sub>2</sub> liberado pela decomposição do CaCO<sub>3</sub> passar por este esmalte fundido, poderá ocasionar defeitos superficiais, como furos. Para evitar estes defeitos (furos), a cinética de decomposição da calcita ou da dolomita deve ser acelerada por meio da redução do tamanho de partículas de carbonato, promovendo a permeabilidade do gás e limitando a quantidade de carbonato no lote (DONDI; RAIMONDO; ZANELLI, 2014).

#### **2.2.4 Inovações no uso da cerâmica porosa**

As cerâmicas porosas têm sido amplamente exploradas pela comunidade científica por oferecer diversas aplicações na engenharia.

Rambaldi, Prete e Bignozzi (2015) investigaram o desempenho acústico e térmico de placas cerâmicas e sistemas de placas (placas acopladas a outros materiais como fibra de vidro, cortiça ou borracha). As propriedades acústicas e térmicas foram investigadas em termos de condutividade térmica e redução de ruído ao caminhar. Estas propriedades foram testadas em várias placas de grês porcelânico comercial com composição, microestrutura e porosidades diferentes. Observou-se que os materiais estudados apresentaram propriedades

acústicas e térmicas bastante diferentes, dependendo da porosidade total e distribuição do tamanho dos poros. Para os sistemas de placas, as propriedades de isolamento acústico e térmico foram aprimoradas, quando a borracha foi usada como material resiliente da camada inferior.

Zilli *et al.* (2014) tiveram como objetivo produzir e caracterizar espumas cerâmicas a partir de resíduos de garrafas de vidro, lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE) e grafite como agente formador de poros para obtenção de materiais com porosidade controlada para aplicações como isolamento térmico. Os resultados obtidos mostraram que foi possível produzir isolantes térmicos com esta composição. Portanto, estes materiais mostraram ser fortes candidatos em aplicações com uma combinação adequada de condutividade térmica, porosidade e resistência mecânica.

Pachla *et al.* (2019) desenvolveram um produto com bom desempenho térmico-acústico para ser usado como materiais para vedação, produzido com um compósito a partir de uma matriz cimentícia e casca de arroz. Concretos, argamassas e pastas de cimento com elevada porosidade apresentam bons resultados de desempenho térmico-acústico, portanto os autores definiram como matriz do compósito uma pasta de cimento com ar incorporado, chamado de concreto celular. A quantidade de poros e a dimensão dos poros são fatores importantes para a capacidade dos materiais absorverem o som e servirem como isolantes térmicos. Desta forma, a casca de arroz foi incorporada à matriz do concreto celular a fim de aumentar a dimensão dos poros originais da matriz. Como conclusão, os autores afirmaram que o aumento da dimensão dos poros gerados pela adição da casca de arroz acarretou uma melhoria significativa na absorção acústica do produto. Quanto à condutividade

térmica, o compósito apresentou uma redução em seu desempenho em comparação à matriz. O que pode ser explicado pela retenção de água pelas fibras.

Como apresentado, a porosidade melhora o isolamento térmico e acústico dos materiais, fazendo, assim, com que novas pesquisas sejam executadas na área.

### 2.3 ISOLANTES TÉRMICOS

Os materiais cerâmicos são tipicamente isolantes térmicos. Estes materiais dificultam a dissipação de calor, exercendo uma barreira à passagem do calor entre dois meios, que de forma natural teriam a tendência de se igualarem as suas temperaturas. A condutividade térmica ( $k$ ) é a principal propriedade física dos materiais para isolamento térmico. Isolantes térmicos são materiais que possuem baixa condutividade térmica. Este parâmetro define o fluxo de energia através de um material que é aquecido em uma de suas faces e, sendo assim, quanto menor a condutividade, menor o fluxo através do material, o que reduz a quantidade de energia que está deixando o sistema (ARCARO *et al.*, 2016; CALLISTER, JR., 2008; VIVALDINI *et al.*, 2014).

A condutividade térmica pode variar dependendo da composição química e da estrutura de poros do material. O ar apresenta baixa condutividade térmica, portanto é considerado um bom isolante térmico. Neste caso, e considerando a convecção e a umidade presentes em sistemas com ar confinado, o meio é a utilização de materiais porosos ou celulares com poros fechados. O ar ou outros gases da decomposição de agentes espumantes ou formadores de poros permanecem enclausurados e estanques no interior dos poros formados. Materiais com a presença de

$\text{CaCO}_3$  favorecem a obtenção de cerâmicas porosas, devido à liberação de  $\text{CO}_2$  e formação de  $\text{CaO}$  durante sua calcinação, a cerca de  $700\text{ }^\circ\text{C}$  (ARCARO *et al.*, 2016; ZENIKHERI *et al.*, 2016).

A introdução de porosidade no material causa um enorme efeito no comportamento térmico, pois três propriedades físicas (condutividade térmica, capacidade calorífica e densidade) são reduzidas. A porosidade total é um dos principais fatores de projeto para a geração de microestruturas otimizadas utilizadas em isolamento térmico. A porosidade total de uma microestrutura, em conjunto com a presença de trincas e defeitos na porção sólida do material, reduz a condutividade térmica em relação ao sólido completamente denso, ou seja, quanto maior a porosidade total e maior a concentração de defeitos na porção sólida, menor a condutividade térmica. É importante ressaltar que esse fato interfere na resistência mecânica do material, a qual decai com a presença destes dois fatores (VIVALDINI *et al.*, 2014).

Entre os materiais geralmente usados para a fabricação de materiais porosos, pode-se citar: alumina, mulita, carbetto de silício, zircônia parcialmente estabilizada, hidroxiapatita e alguns sistemas compósitos, como: carbetto de silício-alumina, alumina-zircônia, alumina-mulita e mulita-zircônia. Pode-se obter materiais porosos a partir de vidros e vitrocerâmicos, que são materiais vítreos ou parcialmente cristalinos (ARCARO *et al.*, 2016).

## 2.4 RESÍDUOS SÓLIDOS

### 2.4.1 Resíduo de beneficiamento de basalto

O basalto é um termo usado para rochas vulcânicas de cor cinza, escura, retiradas da lava derretida após a solidificação. Amostras de sistemas basálticos foram encontrados na Terra, Lua, Marte e asteroides (BRAINARD ABRAHAM *et al.*, 2019; EMBEY-ISZTIN, 2007).

Os basaltos pertencem à categoria das rochas ígneas, formadas pelo resfriamento e decorrente solidificação do magma. O mesmo é constituído basicamente por minerais de silício, alumínio e ferro, na forma de piroxênios (augita) e plagioclásios e magnetita (SCHIAVON; REDONDO; YOSHIDA, 2007).

Na construção civil, o basalto é utilizado na estrutura e revestimento de paredes exteriores como pedra decorativa, pavimentação de calçadas e escadas. É um componente de britagem, onde a brita é utilizada para vários seguimentos como componente asfáltico, agregado na composição do concreto. Existem ainda outros usos como: pequenas rochas são adicionadas em aquários para equilíbrio do pH da água e se utiliza o pó de basalto na agricultura.

Esta pedra é um material que funde facilmente e possui propriedades mecânicas específicas, alta resistência e baixa abrasividade. A composição do basalto pode ser alterada com adição de carbonatos naturais (dolomita, calcário), escória metalúrgica e outros ingredientes (PAVLOVIC *et al.*, 2019).

Assim como os carbonatos e rochas carbonáticas, feldspatos e rochas feldspáticas, silicatos de metais alcalinos terrosos (wollastonita, diopsídio, talco), o resíduo de beneficiamento de basalto é qualificado

como componente fundente. Por ser componente fundente, apresenta aplicação na cerâmica. Na cerâmica gresificada, o componente fundente determina a quantidade de fase vítrea e da sua temperatura de formação, diminuindo a porosidade do produto e acentuando a retração de queima. Na cerâmica não-gresificada, participa na reação da formação de silicato e sílico-aluminato cristalino que assegura a resistência mecânica e a coesão do produto. Na massa crua, atua como desplastificante. Os elementos fundentes também possuem a característica de reduzir a temperatura de sinterização, ou seja, os fundentes favorecem a formação de fase líquida durante a queima e visam reduzir a temperatura de consolidação do corpo cerâmico (FRANCISCO MARCIANO MOTTA *et al.*, 2002; SILVA *et al.*, 2019; SIMÃO *et al.*, 2015).

O resíduo de beneficiamento de basalto provém da britagem da rocha basáltica. A britagem é responsável pelo tamanho e pela forma dos fragmentos de minério. A britagem é o primeiro processo de fragmentação. Após o minério ser extraído da mina, os blocos são direcionados ao britador. A função do britador é reduzir a granulometria, tornando adequada para a alimentação dos moinhos ou para a sua utilização direta. Após este processo, o material é direcionado à moagem. A moagem é considerada a sequência natural do processo de britagem. É o último estágio da redução granulométrica na cominuição dos minérios.

O resíduo de basalto vem sendo explorado na comunidade científica em diversas finalidades. Mendes, Morales e Reis (2016) propuseram o uso de resíduo de basalto como matéria-prima para cerâmica vermelha. A experiência mostrou ser promissora, pois o pó basáltico apresenta características químicas e físicas semelhantes à de outras matérias-primas e contribui para o processamento cerâmico pela

redução das retrações na secagem e na queima. O desempenho mecânico do composto com o pó basáltico equivale ao da mistura sem o pó. Propriedades do corpo cerâmico, como densidade, absorção de água e resistência mecânica, não são afetados de forma significativa pelo uso do pó basáltico como matéria-prima.

Li *et al.* (2019) desenvolveram uma argamassa reforçada com fibra de basalto. Foram investigadas misturas de argamassa com várias proporções água/cimento e conteúdo de fibra de basalto. Os resultados foram promissores, pois mostraram que o teor de fibra de basalto tem alguns efeitos sobre a densidade de empacotamento e sobre a espessura do filme de água da mistura de argamassa produzida. O teor de fibra de basalto tem efeitos na trabalhabilidade, fluidez, coesão e adesividade da argamassa reforçada com fibra de basalto.

Abu Safiah e Hamzawy (2019) estudaram cerâmica de vidro piroxênica nanométrica preparada por cristalização de vidro de basalto saudita. Como conclusão, a vitrocerâmica do vidro basáltico obteve uma boa dureza e resistência ao desgaste e à abrasão, além de ser ecológica, podendo ser utilizado como revestimento em alguns metais, em células a combustível de óxido sólido (SOFCs), como selante entre conectores e células de combustível.

O setor de agregados para a construção civil apresentou em 2014 uma demanda da ordem de 302 milhões de toneladas de brita. No Brasil, 5% da brita produzida vem de basalto/diabásio. Toneladas de resíduos são gerados. O presente trabalho visa reutilizar este resíduo de forma inovadora (ANEPAC, 2019; MORAIS *et al.*, 2016).

Para o presente trabalho, o “resíduo de beneficiamento de basalto” será denominado “basalto”.

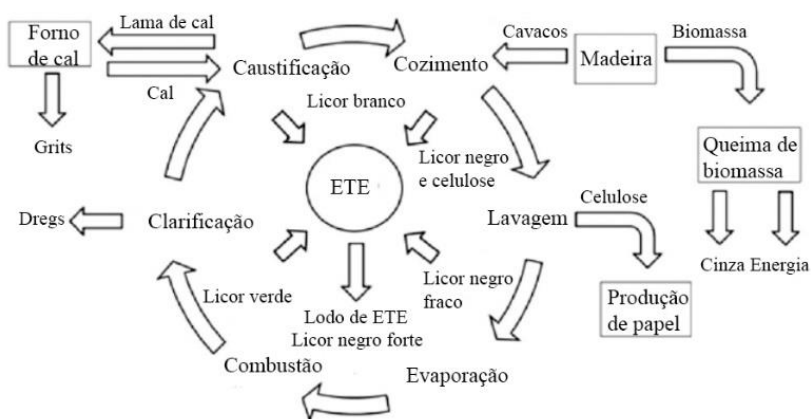
## 2.4.2 Resíduo de lama de cal

A produção industrial de celulose, em 2017, alcançou 19,5 milhões de toneladas. Com relação à produção de papel, foram 10,5 milhões de toneladas fabricadas. O Brasil ocupa a segunda posição no *ranking* de maiores produtores mundiais de celulose e continua entre os dez principais produtores mundiais de celulose. Estima-se que a produção de resíduos exceda um milhão de toneladas métricas por ano (IBÁ, 2018; SIMÃO *et al.*, 2018).

Cinzas, resíduos de licor verde, grão de abate, lama de cal e lodo de fábricas de celulose de estações de tratamento de águas residuais (ETAR) são substâncias inorgânicas e orgânicas geradas em fábricas de papel de celulose (SIMÃO *et al.*, 2018).

O processo de obtenção de celulose mais utilizado atualmente no país é o método Kraft, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Processo Kraft e resíduos gerados.



Fonte: Adaptado de SIMÃO *et al.*, 2018

O processo é dividido em seis etapas principais: polpação, lavagem, evaporação, combustão, clarificação e caustificação. A lama de cal e os *dregs* são formados na etapa de caustificação (MILAK *et al.*, 2019; SIMÃO *et al.*, 2018).

A lama de cal é composta principalmente por calcita e quartzo. Atua como um agente porogênico se for utilizada em uma composição e exposta a altas temperaturas, pois é essencialmente composta de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Algumas rotas de reciclagem da lama de cal incluem a agricultura, construção e tecnologia ambiental (CORRÊA *et al.*, 2019; JENA; DASH; RATH, 2019; MILAK *et al.*, 2019; SIMÃO *et al.*, 2018).

Diversos estudos têm sido feitos com este resíduo pela comunidade acadêmica. Milak *et al.* (2019), por exemplo, realizaram um estudo para obtenção de cerâmicas porosas a partir de resíduos do processo Kraft, utilizando fibras poliméricas para a interconectividade dos poros. Como conclusão, os resíduos confirmaram a potencialidade de substituição das matérias-primas comerciais na produção de cerâmicas porosas e as fibras mostraram ser eficazes para a interconectividade dos poros, refletindo-se em aumento da porosidade. A cerâmica porosa apresentou elevada porosidade proporcionada pelo incremento da lama de cal e boa resistência mecânica à compressão.

Farage *et al.* (2019) avaliaram o uso de resíduos sólidos com grãos alcalinos, escórias e subprodutos da lama de cal gerada em fábricas de celulose Kraft, como materiais de cobertura intermediária em aterros municipais. Três unidades experimentais simulando células de aterro sanitário foram montadas e monitoradas durante 6 meses. A substituição do solo pelas misturas de resíduos de grãos e lama de cal tem forte

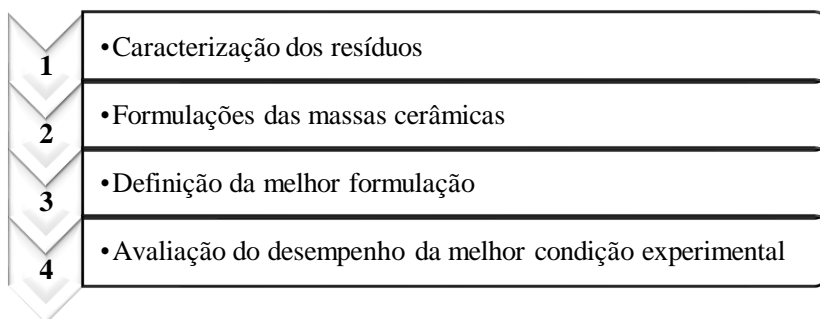
potencial para ser usado como cobertura intermediária em aterros sanitários municipais. Porém, a concentração de sódio deve ser considerada devido aos riscos de toxicidade para os microrganismos ativos no tratamento biológico do lixiviado.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos empregados para o desenvolvimento deste trabalho, em que envolve as etapas relacionadas às matérias-primas, o processamento e os ensaios realizados. As atividades executadas estão organizadas conforme o fluxograma mostrado na Figura 5, e que foi dividido em quatro etapas.

Figura 5 - Fluxograma das etapas de trabalho.



Fonte: Do Autor (2019)

Para o trabalho em questão foram utilizadas as seguintes matérias-primas: argila plástica, caulim, quartzo, basalto e lama de cal.

Uma composição cerâmica pode ser produzida principalmente com argilas, quartzo e feldspato e cada um destes elementos desempenha um papel fundamental na composição. A argila plástica é responsável pela plasticidade. A argila plástica e o caulim (material rico em argila caulínica) permitem que a formulação seja moldada, ou seja, funcionem como ligantes dos constituintes no estado verde. O caulim também equilibra a composição química da formulação cerâmica. O quartzo mantém a forma da estrutura cerâmica durante a queima e atua como

elemento estrutural. O feldspato reduz o ponto de fusão da mistura; trata-se de um agente de fluxo, ou seja, material transportador de elementos alcalinos para reduzir a temperatura de sinterização, tendo, ainda, influência na vitrificação da estrutura cerâmica. O resíduo de lama de cal possui alto teor de carbonato de cálcio, que funciona como agente gerador de poros (NGAYAKAMO; PARK, 2018; SIMÃO *et al.*, 2015).

Nas formulações em estudo, o feldspato foi substituído pelo basalto.

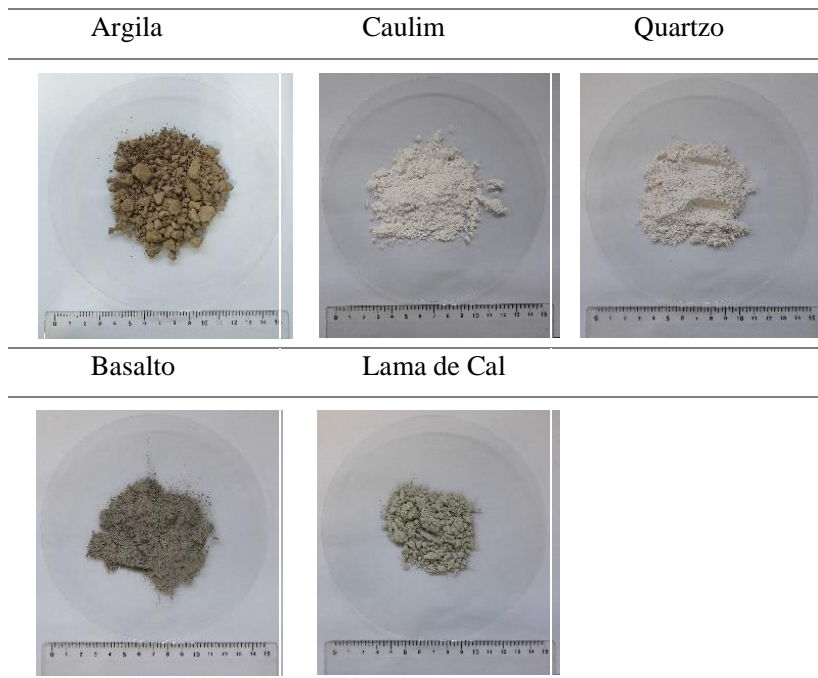
As matérias-primas comerciais, argila plástica (ou apenas argila neste trabalho), caulim e quartzo, foram fornecidos pela empresa Colorminas Colorifício e Mineração de Içara – SC. O basalto foi coletado e cedido pela empresa SBM Mineração, localizada no município de Urussanga – SC. A lama de cal é um resíduo da indústria de papel e celulose proveniente de uma empresa localizada no planalto catarinense e foi cedida para a realização deste trabalho.

O beneficiamento das matérias-primas comerciais (argila, caulim e quartzo) consistiu na secagem em estufa de laboratório, CienlaB, modelo CE-220/100 por 24 h a 105 °C e armazenamento em sacos plásticos devidamente lacrados.

Para o basalto, foram coletados cerca de 50 kg e para o resíduo de lama de cal, no estado de fornecimento, foram coletados cerca de 30 kg, ambos em forma de pó. Após a coleta, os resíduos foram depositados em recipientes para secagem em estufa a 105 °C durante 24 h para eliminar a umidade residual. Ao final, os resíduos foram colocados em sacos plásticos devidamente fechados para sua posterior utilização e se evitar a contaminação.

As matérias-primas utilizadas no presente estudo estão apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Imagens mostrando o aspecto físico/morfológico das matérias-primas secas em estufa.

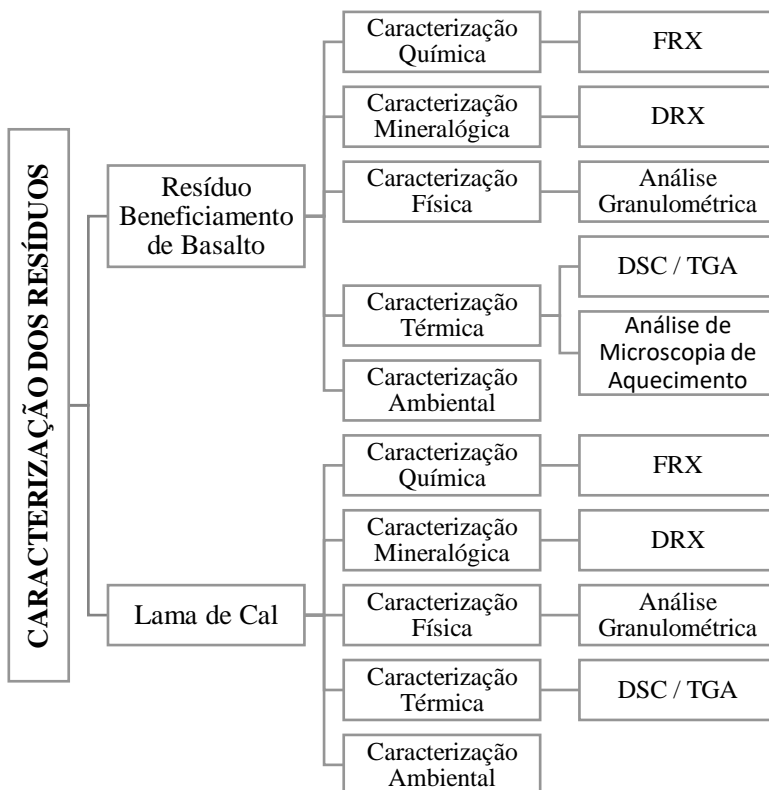


Fonte: Do Autor (2019)

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

A Figura 7 mostra as análises feitas para o basalto e para a lama de cal.

Figura 7 - Caracterização dos resíduos.



Fonte: Do Autor (2019)

### 3.1.1 Caracterização química

A análise por Fluorescência de Raios X (FRX) foi realizada em um equipamento da PANALYTICAL, modelo WRFDX AXIOS MAX, no laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) no SENAI, situado no município de Criciúma – SC.

### 3.1.2 Caracterização mineralógica

A análise por DRX, Difração de Raios X, do basalto foi executado no Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER, na Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Foi utilizado um Difratorômetro de Raios X, Phillips, modelo X'Pert MDP (tubo de Raios X com radiação  $\text{Cu K}\alpha$ ), em um intervalo de leitura de 5 a  $75^\circ$  ( $2\theta$ ) e velocidade de  $0,05^\circ/\text{s}$ , fendas (*slits*):  $1/2^\circ$ , janela (*window*): 20 mm.

A análise por DRX da lama de cal foi executada no Parque Científico e Tecnológico – IParque da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, no Laboratório de Caracterização de Materiais do IDT. Foi utilizado um Difratorômetro de Raios X da SHIMADZU, modelo XRD 6000, com radiação incidente  $\text{Cu K}\alpha$  ( $1,5406 \text{ \AA}$ ), em um intervalo de leitura de 3 a  $80^\circ$  ( $2\theta$ ) e velocidade de  $2^\circ/\text{min}$ .

### 3.1.3 Caracterização física

A distribuição granulométrica dos materiais envolvidos foi determinada por difração a laser em analisador de tamanhos de partículas da CILAS, modelo PSA 1064. As análises foram feitas no IParque/UNESC, no Laboratório de Caracterização de Materiais do IDT.

### 3.1.4 Caracterização térmica

As técnicas de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise termogravimétrica (TGA) foram realizadas em equipamento da TA Instruments, modelo SDT Analyzer Q600, com taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , com atmosfera de ar sintético. Para este ensaio foi utilizado

um cadinho de alumina e 10 mg de material. Como referência, foi utilizado um cadinho de alumina vazio.

Para o basalto, a temperatura inicial foi de 25 °C, com temperatura final de 1295 °C. Para a lama de cal o ensaio iniciou com temperatura de 30 °C, com término em 1495 °C.

A análise dilatométrica permite determinar a temperatura de amolecimento das matérias-primas estudadas. Esta análise foi realizada para o basalto, por se tratar de um material fundente. Foi realizada em equipamento da Expert System Solutions S.R.L., modelo Misura 3 HSM 1600-50, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

As análises térmicas foram executadas no Parque Científico e Tecnológico – IParque da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, no Laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec).

### **3.1.5 Caracterização ambiental**

A caracterização ambiental ocorreu por ensaio ecotoxicológico utilizando *Allium cepa* L. (cebola) e *Lactuca sativa* L. (alface) como bioindicadores. Os bioensaios são ferramentas importantes para se avaliar a potencial toxicidade de contaminantes ambientais. O *Allium cepa* L. como bioindicador fornece evidências significativas dos efeitos tóxicos e genotóxicos de um contaminante ambiental por vários critérios, como: bioacumulação de contaminantes nas raízes, inibição do crescimento radicular e inibição da germinação de sementes. A *Lactuca sativa* L. está entre os organismos-teste utilizados para se avaliar a fitotoxicidade causada por elementos em solos que são poluentes em potencial (ANDRADE; DAVIDE; GEDRAITE, 2010; BORTOLOTTO *et al.*, 2017).

Primeiramente, foi misturado 50 g do basalto em 1 L de água destilada em uma vidraria e foi devidamente fechada. O mesmo ocorreu com a lama de cal. As misturas permaneceram em mesa agitadora microprocessada Quimis, modelo Q225M, com velocidade de 100 rpm por 24 h. A filtração destas soluções ocorreu com auxílio de uma bomba de vácuo, Primatec. Esses lixiviados foram usados ao longo do estudo. O pH dos lixiviados foi determinado com o uso de fita universal de pH MColorpHast.

A inibição do crescimento radicular em *Allium cepa* L. foi observada para examinar a toxicidade subcrônica no efluente. Para este ensaio, com o auxílio de um bisturi, foi removido todo o material constituído por raízes velhas presas ao bulbo. Foram removidas as cascas (catafilo externo) secas da cebola. Foram utilizados 7 bulbos para cada resíduo e para o grupo controle. Em tubos cônicos tipo falcon, os bulbos foram expostos a 50 mL do efluente de cada resíduo e do grupo controle, à temperatura ambiente, por 7 dias em local fechado e ao abrigo da luz. O grupo de controle negativo corresponde a água mineral comercial. As soluções de efluentes foram substituídas diariamente. Ao final do período de exposição, o comprimento da raiz mais longa de cada bulbo e a massa total de todas as raízes foram medidas e comparadas ao grupo controle.

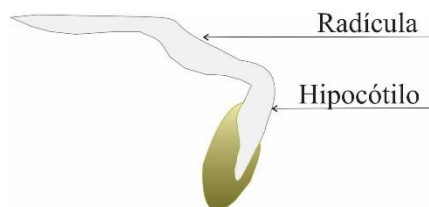
Para a análise do crescimento radicular, foi removido com um bisturi o material constituído de raízes novas que estavam presas ao prato (disco) do bulbo. Foi registrado o número de raízes crescidas em cada bulbo. Com auxílio de um paquímetro digital Caliper 150 mm (6"), com precisão de 0,01 mm, foi coletado o tamanho da maior raiz e com uma balança analítica eletrônica, Bioprecisa, modelo FA-2104N, com leitura de 0,0001 g, foi obtida a massa de todas as raízes. Foi realizada a análise

estatística usando-se a análise de variância (ANOVA), complementada com os pós-testes de Dunnet dos parâmetros: número de raízes, massas das raízes e comprimento da maior raiz, em relação às amostras de controle.

Para o ensaio com *Lactuca sativa* L., foi cortado um disco de papel filtro e disposto em placa de Petri (90 mm). Com auxílio de uma pipeta automática, o papel foi embebido em 2 mL da amostra do efluente em estudo. Cada efluente (lama de cal e basalto) e grupo de controle foram colocados em uma placa de Petri. Para o grupo de controle foi usada a água mineral comercial. Foi colocado sobre cada placa 10 sementes de alface *grand rapids* TBR, de Feltrin Sementes, que foram expostas à temperatura ambiente por 3 dias em local fechado e ao abrigo da luz.

Para a análise do crescimento da raiz primária, foram registrados o número de sementes germinadas e não germinadas em cada placa e o crescimento das mudas. Para cada raiz germinada foi medida a radícula e o hipocótilo com o uso de um paquímetro digital Caliper 150 mm (6”), com precisão de 0,01 mm. A Figura 8 demonstra uma raiz germinada de *Lactuca sativa* L com o hipocótilo e a radícula.

Figura 8 - Morfologia geral da plântula de *Lactuca sativa* L.



Fonte: Do Autor (2019)

Foi realizada a análise estatística usando-se a análise de variância (ANOVA) complementada com os pós-testes de Dunnet da porcentagem

de germinação e o crescimento em cada tratamento, sempre comparados ao grupo controle.

Todos os resultados dos bioensaios foram analisados no *software* GraphPad Prism 5.0. Os ensaios foram executados no Laboratório de Desenvolvimento de Biomateriais e Materiais Antimicrobianos (LADEBIMA), localizado no IParque/UNESC.

### 3.2 FORMULAÇÕES DAS MASSAS CERÂMICAS

Após a caracterização dos resíduos, foi definida a formulação da massa cerâmica com a substituição do feldspato pelo basalto.

A composição base de massa cerâmica usada neste trabalho tem como referência o estudo de Zanelli *et al.* (2011), no qual foram usadas formulações típicas contendo 30 – 40% de componente plástico – argilas, 45 – 55% de fundente – feldspato, e 5 – 20% de esqueleto estrutural – quartzo.

Sobre a formulação base, a formulação base de estudo substituindo-se o feldspato por basalto foi determinada, contendo 40% de argila, 12% de caulim, 3% de quartzo, 45% de basalto (porcentagem em massa de cada matéria-prima). A formulação base foi testada com a adição de 45% do basalto. O basalto é um componente que apresenta boa resistência à massa cerâmica quando incorporado em uma composição.

Em seguida, foi incorporado ao pó cerâmico três diferentes proporções de lama de cal, um resíduo rico em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), a fim de atuar como agente porogênico.

A porosidade pode ser melhorada ajustando-se a quantidade de agente formador de poros. A adição de agentes formadores de poros é um

método simples e eficaz para aumento de porosidade em massas cerâmicas (ZONG; WAN; CANG, 2019).

O objetivo foi desenvolver cerâmicas porosas utilizando-se matérias-primas comercializadas de baixo custo. Para tanto, buscou-se desenvolver uma massa cerâmica por se tratar de uma massa que apresenta elevada resistência mecânica (SÁNCHEZ, 2017), permitindo, assim, apresentar teor mais elevado de porosidade em relação a outras massas cerâmicas.

Considerando-se que o aumento do teor de lama de cal aumentaria a porosidade e, portanto, reduziria a densidade do material, reduzindo o peso deste material no sistema de fachada ventilada, mas também reduziria a resistência mecânica da mesma, o objetivo foi avaliar três composições com diferentes proporções de lama de cal, a fim de encontrar o teor de lama de cal ideal que permitisse obter-se uma material de elevada porosidade, mas ao mesmo tempo com resistência mecânica suficiente aos propósitos deste trabalho.

Milak *et al.* (2019) analisaram o desempenho da lama de cal na composição de cerâmicas porosas. O melhor resultado foi obtido para a formulação contendo 21,6% de lama de cal. Baseado nesses resultados, como ponto de partida, foi incorporado à composição 20% de lama de cal, usando-se como referência os resultados de Milak *et al.* (2019). Foi realizado um planejamento estatístico, tendo como ponto central o uso de 30% de incorporação de lama de cal na composição estudada. Para a terceira formulação foi determinada a incorporação de 40% de lama de cal. As formulações foram tituladas como F20, F30 e F40. A Tabela 2 mostra as formulações com a incorporação de lama de cal para a formulação base a ser estudada.

Tabela 2 - Composições das formulações F20, F30 e F40, com a incorporação de lama de cal (% em massa).

Materiais	F20	F30	F40
Argila	33,33	30,78	28,57
Caulim	10,00	9,23	8,57
Quartzo	2,50	2,30	2,15
Basalto	37,50	34,61	32,14
Lama de cal	16,67	23,08	28,57
<b>TOTAL</b>	100	100	100

Fonte: Do Autor (2019)

### 3.2.1 Tratamento térmico

Conforme Fonseca *et al.* (2016), no processo de sinterização, quando é aumentada a temperatura de queima, os poros tendem a diminuir em quantidade. No entanto, a presença de agentes porogênicos ou materiais vítreos, por exemplo, pode mudar este comportamento. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar três diferentes temperaturas de queima, a fim de encontrar a fração ideal de porosidade.

As temperaturas de sinterização foram definidas experimentalmente e foi realizado por meio de ensaio de dilatometria/curva de retração, conforme item 3.2.6. As temperaturas de sinterização a serem testadas nas formulações foram 900, 1000 e 1100 °C.

### 3.2.2 Planejamento estatístico

Um experimento planejado visa a utilização de técnicas para se definir características da qualidade e todos os possíveis fatores que podem afetar estas características. Pretende-se obter a máxima porosidade com

um valor mínimo de resistência mecânica à flexão, que permita o manuseio, transporte, fixação e manutenção da placa cerâmica no sistema de fachada ventilada.

As formulações foram definidas a partir de um planejamento estatístico. Para o trabalho, optou-se pelo método experimento fatorial  $2^k$ , ou seja, teve k fatores, com dois níveis cada. Levou-se em consideração dois fatores (variáveis): teor de lama de cal e temperatura de sinterização. A lama de cal atua como agente porogênico em composições cerâmicas, influenciando na porosidade do material, enquanto a temperatura de sinterização interfere na densificação do material, sobretudo na fase contínua, neste caso, influenciando na resistência mecânica do corpo cerâmico. Estes fatores foram variados em dois níveis (-1 e +1), de modo a se obter um planejamento fatorial de  $2^2$ .

A Tabela 3 apresenta as corridas experimentais executadas neste trabalho.

Tabela 3 - Planejamento fatorial com as duas variáveis: teor de lama de cal e temperatura de sinterização.

Corridas	Fatores (variáveis)	
	Teor de lama de cal (%)	Temperatura de sinterização (°C)
1	20	900
2	40	900
3	20	1100
4	40	1100
5	30	1000
6	30	1000

Fonte: Do Autor (2019)

Como variável de resposta foi medida a porosidade (P) e a resistência mecânica à flexão (RMF) das placas cerâmicas. A Tabela 4 mostra as experiências possíveis e as variáveis de resposta.

Tabela 4 - Códigos das corridas experimentais e das variáveis de resposta.

Corridas	Tratamento	Resposta	
		P	RMF
1	F20T900	P_F20T900	RMF_F20T900
2	F40T900	P_F40T900	RMF_F40T900
3	F20T1100	P_F20T1100	RMF_F20T1100
4	F40T1100	P_F40T1100	RMF_F40T1100
5	F30T1000_05	P_F30T1000_05	RMF_F30T1000_05
6	F30T1000_06	P_F30T1000_06	RMF_F30T1000_06

F: formulação; T: temperatura; P: porosidade; RMF: resistência mecânica à flexão

Fonte: Do Autor (2019)

Foram obtidos 6 respostas de porosidade, classificadas em P\_F20T900, P\_F40T900, P\_F20T1100, P\_F40T1100, P\_F30T1000\_05 e P\_F30T1000\_06 e 6 respostas de resistência mecânica à flexão, classificadas como RMF\_F20T900, RMF\_F40T900, RMF\_F20T1100, RMF\_F40T1100, RMF\_F30T1000\_05, RMF\_F30T1000\_06, conforme mostrado na Tabela 4.

### 3.2.3 Preparação da massa cerâmica

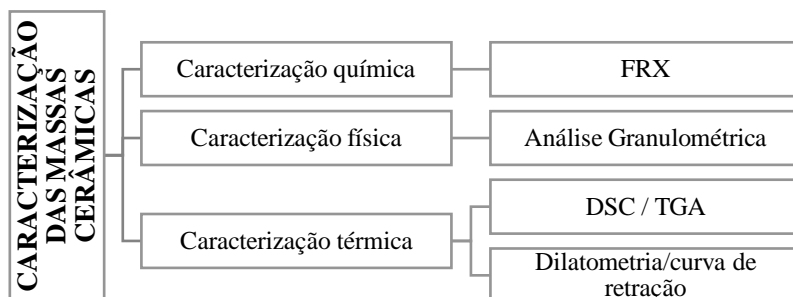
Para o presente trabalho foi utilizado o processo via úmido na preparação das massas cerâmicas. A obtenção das peças ocorreu conforme processamento cerâmico tradicional.

Após a preparação e secagem das matérias-primas individuais e caracterização dos resíduos, foram realizadas as dosagens das massas cerâmicas por pesagem de acordo com as formulações propostas elencadas na Tabela 3. A argila, após secagem em estufa, passou por destorroamento em almofariz com pistilo de porcelana, Chiarotti.

A preparação de uma suspensão de barbotina ocorreu com 50% de teor de sólidos, em agitador de Servitech CT-054, por 15 min. A suspensão foi colocada em estufa a uma temperatura de 105 °C e foi deixada por 24 h. Após a secagem, o pó passou por destorroamento em almofariz com pistilo de porcelana, Chiarotti.

Na etapa de umidificação, foi acrescentado 10% de água com o auxílio de um pulverizador, com a intenção de granular a massa. Em seguida, o pó passou por uma peneira de 32 mesh, com abertura de 0,5 mm, com a finalidade de granulação. Em seguida, o pó foi colocado em saco plástico fechado para homogeneização por um período mínimo de 24 h. Após a umidificação, as massas cerâmicas foram submetidas às caracterizações, conforme Figura 9.

Figura 9 - Caracterização das massas F20, F30 e F40.



Fonte: Do Autor (2019)

### **3.2.4 Caracterização química**

Primeiramente, as massas cerâmicas das formulações F20, F30 e F40 foram submetidas à caracterização química, conforme descrito no item 3.1.1.

### **3.2.5 Caracterização física**

Em seguida, as massas cerâmicas das formulações F20, F30 e F40 foram submetidas à caracterização física e foi executada segundo o item 3.1.3.

### **3.2.6 Caracterização térmica**

A caracterização térmica por DSC e TGA das massas cerâmicas das formulações F20, F30 e F40 foi feita conforme o item 3.1.4.

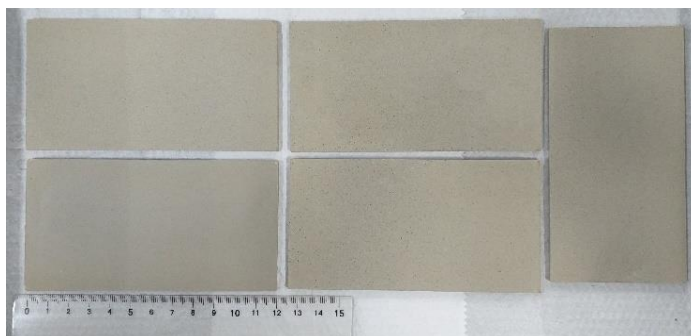
As temperaturas de sinterização foram definidas experimentalmente por meio de uma amostra compactada com dimensões de aproximadamente 15 mm x 5 mm x 3 mm, uma para cada formulação (F20, F30 e F40). As amostras foram submetidas ao ensaio de dilatométrica óptica em equipamento da Expert System Solutions S.R.L., modelo Misura 3 HSM 1600-50, com taxa de aquecimento de 10 °C/min até a temperatura de 1200 °C, executado no Laboratório de Cerâmica Técnica - CerTec.

### **3.2.7 Processamento da placa cerâmica**

As massas cerâmicas das formulações F20, F30 e F40 foram conformadas pelo processo de prensagem uniaxial. A prensagem ocorreu

no CerTec. A conformação foi realizada em prensa hidráulica laboratorial da Gabrielli, modelo GT 0785. A prensagem foi realizada em três estágios. Dois dos estágios foram executados com desaeração de 50 bar. O último estágio de compactação usou pressão manométrica de 60 bar, o que compreende uma pressão específica de 29,81 MPa. Foram obtidos corpos cerâmicos retangulares, conforme mostra a Figura 10, com dimensões aproximadas de 120 mm x 62 mm x 3 mm.

Figura 10 – Imagem mostrando corpos cerâmicos retangulares obtidos por prensagem uniaxial.



Fonte: Do Autor (2019)

Após a prensagem, os corpos cerâmicos foram secados em estufa de laboratório a 80 °C durante 24 h.

### **3.2.8 Sinterização dos corpos de prova**

A sinterização foi realizada em um forno de queima rápida, FORTELAB, modelo QR-1300/3, no Laboratório de Valoração de Resíduos – LabValora, pertencente ao IDT/UNESC. As temperaturas de sinterização foram definidas experimentalmente, por meio do ensaio de

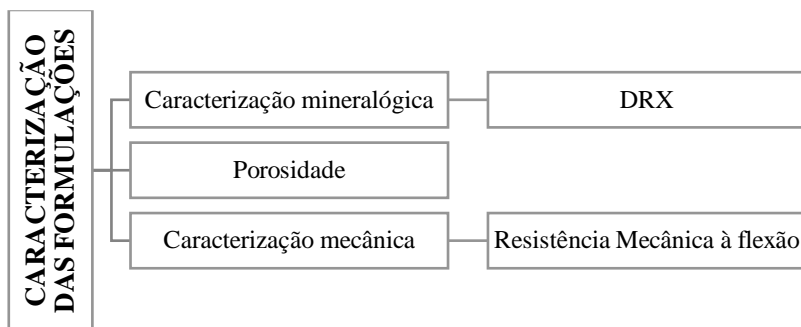
dilatometria óptica. Neste ensaio foi obtido a curva de retração do material em função da temperatura, conforme o item 3.2.6.

Os corpos de prova das formulações F20, F30 e F40 foram queimadas em três temperaturas: 900, 1000 e 1100 °C, com taxa de queima de 10 °C/min. O patamar de sinterização para todas as formulações foi de 5 min, resfriados inercialmente.

### 3.2.9 Caracterização dos corpos de prova sinterizados

A Figura 11 relaciona os ensaios de caracterização feitos para as 6 condições experimentais: F20T900, F40T900, F20T1100, F40T1100, F30T1000\_05 e F30T1000\_06.

Figura 11 - Caracterização dos corpos de prova das condições experimentais estudadas.



Fonte: Do Autor (2019)

#### 3.2.9.1 Caracterização mineralógica

A difração de raios X (DRX) foi executada no Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER, na Escola de Engenharia da Universidade

Federal do Rio Grande do Sul. Foi utilizado um Difratorômetro de Raios X, Phillips, modelo X'Pert MDP (tubo de Raios X com radiação Cu K $\alpha$ ), em um intervalo de leitura de 5 a 75° (2 $\theta$ ) e velocidade de 0,05 °/1s, fendas (*slits*): 1/2°, janela (*window*): 20 mm.

### 3.2.9.2 Porosidade

A porosidade total ( $\mathcal{E}_t$ ) é a soma dos volumes de poros abertos e fechados presentes na amostra do material. O cálculo da porosidade total foi obtido por meio da relação entre a densidade aparente a seco e a densidade real. A porosidade total foi determinada por meio da Equação 1 (AKIYOSHI *et al.*, 2001).

$$\mathcal{E}_t (\%) = 100 \times \left( 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} \right)$$

Equação 1

Onde:

$\mathcal{E}_t$  = porosidade total, em %;

$\rho_{ap}$  = densidade aparente a seco, em g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_{real}$  = densidade real, g/cm<sup>3</sup>.

A densidade aparente a seco ( $\rho_{ap}$ ) foi determinada pelo método geométrico. Três corpos cerâmicos de cada formulação foram medidos com paquímetro digital Caliper 150 mm (6"), com precisão de 0,01 mm. A massa da amostra foi determinada em balança digital, Marte, modelo BL3200H, com leitura de 0,01 g. A densidade foi determinada conforme Equação 2 (AKIYOSHI *et al.*, 2001).

Equação 2

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v}$$

Onde:

$\rho_{ap}$  = densidade aparente, em g/cm<sup>3</sup>;

$m$  = massa corpo de prova, em g;

$v$  = volume do corpo de prova cm<sup>3</sup>.

A densidade real ( $\rho_{real}$ ) foi obtida por picnometria a gás Hélio, em equipamento QUANTACHROME, modelo ULTRAPYC 1200e, o qual determina o volume real de um sólido, por variação da pressão de gás em uma câmara de volume conhecido. Essa técnica pode ser utilizada para materiais porosos. A densidade real foi medida para cada temperatura de sinterização. Cinco leituras foram realizadas em cada caso. O ensaio foi executado no CerTec.

### 3.2.9.3 Caracterização mecânica

A resistência mecânica à flexão (MRF) após a sinterização dos corpos de prova foi avaliado a três pontos, com base na ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997c).

Foram ensaiados 4 corpos de prova cerâmicos retangulares (com dimensões médias de 120 mm x 62 mm x 3 mm) para cada condição experimental estudada (F20T900, F40T900, F20T1100, F40T1100, F30T1000\_05 e F30T1000\_06).

Para a realização do ensaio de resistência mecânica à flexão, foi utilizada uma máquina de ensaios universal EMIC, modelo DL 10000, no Laboratório de Ensaios Mecânicos, pertencente ao IDT / UNESC.

### 3.3 DEFINIÇÃO DA MELHOR CONDIÇÃO EXPERIMENTAL

Após a caracterização dos corpos de prova, com os resultados de porosidade e resistência mecânica à flexão dos corpos de prova das 6 formulações, a formulação mais adequada aos objetivos deste trabalho foi definida, com o intuito de obter uma massa cerâmica porosa com resultado satisfatório de resistência mecânica.

Os resultados das variáveis de resposta obtidos foram analisados com auxílio do *software* Estatística versão 7 (*StatSoft Inc., US*). Tomou-se como padrão para se obter um nível de significância superior a 95%, um valor  $p \leq 0,05$ .

Foram avaliados os dados de todos os corpos de prova de todas as formulações estudadas.

Para a definição da melhor condição experimental, foi analisado os dados da análise de variância para a porosidade e para resistência mecânica à flexão, bem como o gráfico de superfície de resposta da porosidade e da resistência mecânica à flexão.

### 3.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA MELHOR CONDIÇÃO EXPERIMENTAL

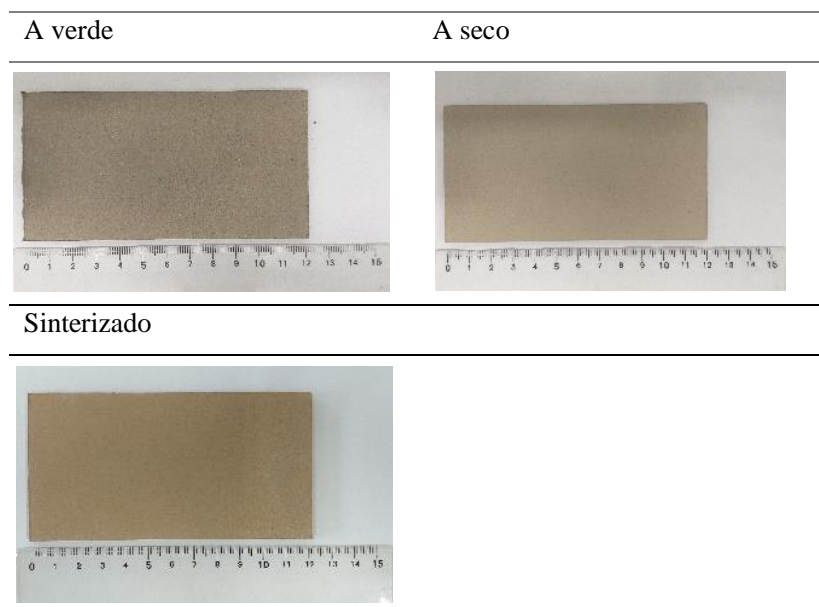
Após a definição da melhor condição experimental (composição e temperatura de sinterização), foram produzidos novos corpos de prova

com a melhor condição experimental a fim de se efetuar a avaliação do desempenho das placas obtidas.

A preparação da massa cerâmica, bem como o seu processamento, seguiram as mesmas etapas descritas nos itens 3.2.3 e 3.2.7.

A sinterização dos corpos de prova foi realizada segundo apresentado no item 3.2.8, a 1100 °C. Foram obtidos corpos cerâmicos retangulares, com dimensões aproximadas de 120 mm x 62 mm x 3 mm, conforme a Figura 12.

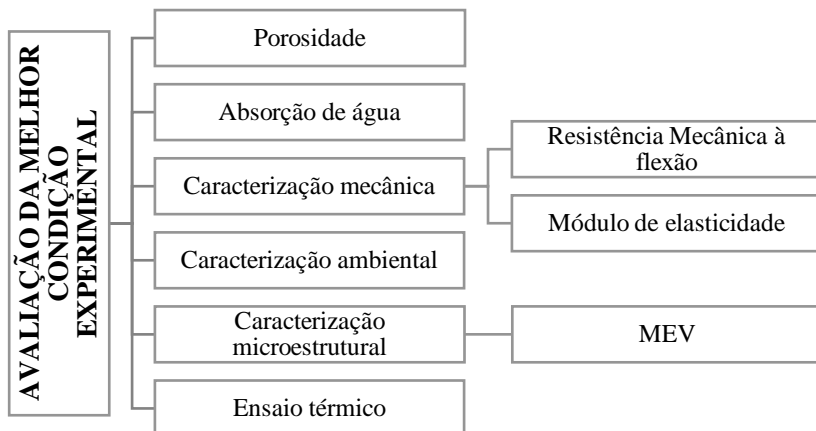
Figura 12 – Imagens dos corpos de prova ensaiados, a verde, a seco e sinterizados.



Fonte: Do Autor (2019)

Em seguida, os corpos de prova com a melhor condição experimental foram submetidos aos ensaios de desempenho, conforme Figura 13.

Figura 13 – Ensaio de caracterização.



Fonte: Do Autor (2019)

### 3.4.1 Porosidade

A porosidade total, a densidade aparente a seco e a densidade real foram determinadas conforme descrito no item 3.2.9.2.

### 3.4.2 Absorção de água

A determinação da absorção de água dos corpos cerâmicos foi executada seguindo os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaio, Anexo B. Na realização deste ensaio, foram utilizados 4 corpos de prova. O ensaio foi feito no CerTec.

O valor de absorção de água (Abs) foi obtido por meio da Equação 3, segundo ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997c).

$$Abs = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100$$

Onde:

$Abs$  = absorção de água, em %;

$m_1$  = massa seca, em g;

$m_2$  = massa saturada, em g.

### 3.4.3 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica dos corpos cerâmicos porosos se deu através dos seguintes ensaios: resistência mecânica à flexão e módulo de elasticidade.

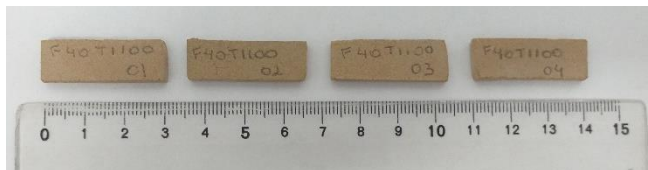
Para a resistência mecânica à flexão, 4 corpos cerâmicos foram avaliados, segundo o item 3.2.9.3.

O módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young, é a medida da rigidez de um material. O mesmo é obtido através da relação entre a tensão e a deformação para uma deformação elástica (CALLISTER, JR., 2008).

A medida desta propriedade foi conseguida utilizando-se um equipamento Sonelastic (ATCP Engenharia Física), localizado no CerTec. Este equipamento é um analisador de vibrações transitórias, o qual o *software* permite o cálculo dos módulos de elasticidade para as frequências encontradas e selecionadas, utilizando valores de massa do corpo de prova. Este equipamento identifica quais são as frequências de vibração e os amortecimentos, mediante o processamento da resposta acústica do corpo a uma excitação mecânica por impulso.

As amostras apresentaram dimensões médias de 30 mm x 10 mm x 3 mm, conforme demonstrados na Figura 14.

Figura 14 – Imagens das amostras submetidas a caracterização mecânica - módulo de elasticidade.



Fonte: Do Autor (2019)

As massas dos corpos de prova foram medidas em uma balança analítica Shimadzu, modelo AUY220, com leitura de 0,0001 g. Os 4 corpos de provas foram medidos conforme método geométrico, utilizando-se de um paquímetro digital Caliper 150 mm (6”), com precisão de 0,01 mm.

### 3.4.4 Caracterização ambiental

Foi colocado o corpo de prova cerâmico em 1 L de água destilada em um bécker e a caracterização ambiental seguiu todos os passos de execução conforme item 3.1.5. Para o grupo de controle negativo foi usado apenas água mineral comercial. O pH do lixiviado foi determinado por meio da fita universal de pH, MColorpHast.

Foram utilizados 7 bulbos para o efluente do corpo de prova e 7 bulbos para o grupo controle por 7 dias em local fechado e ao abrigo da luz. A solução do efluente foi substituída diariamente.

A análise do crescimento radicular seguiu conforme item 3.1.5.

Para o ensaio com *Lactuca sativa* L., os passos foram executados conforme item 3.1.5. Foi colocado sobre cada placa 10 sementes de alface *grand rapids* TBR, de Feltrin Sementes, exposto à temperatura ambiente por 3 dias em local fechado e ao abrigo da luz.

A análise do crescimento da raiz primária seguiu conforme item 3.1.5.

### **3.4.5 Caracterização microestrutural**

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos corpos cerâmicos queimados tem o objetivo de se avaliar as mudanças da microestrutura com a quantidade de resíduo incorporada e temperatura final de patamar. A avaliação da microestrutura foi feita em microscópio eletrônico de varredura (MEV), Zeiss, modelo EVO MA10, no CerTec.

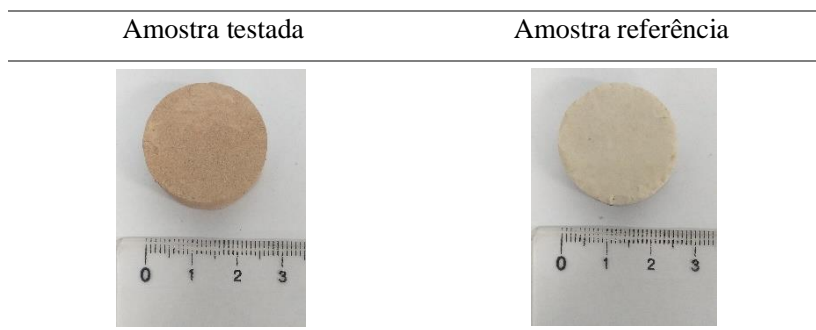
### **3.4.6 Ensaio térmico**

Para este item, dois diferentes ensaios foram realizados.

Para o primeiro ensaio, o da condutividade térmica, os corpos cerâmicos porosos testados foram medidos em um analisador de condutividade, TCi Thermal Conductivity Analyzer (C-Therm Technologies), localizado no laboratório de Pesquisa em Polímeros e Compósitos – UFSC. A medida foi realizada em temperatura ambiente e baseada na norma Americana ASTM D7984-16 (ASTM, 2016). Utilizou-se um sensor de reflectância de calor de apenas um lado da amostra, em que se aplicou uma fonte de calor constante e momentânea. As amostras tiveram as faces lixadas e polidas. Para este ensaio, foram utilizadas amostras em forma de discos com diâmetro de aproximadamente 25 mm e espessura de 10 mm, segundo a Figura 15. Foram realizadas medições

em cada superfície plana das amostras. Como referência, foram testadas amostras de um porcelanato técnico esmaltado com aproximadamente 25 mm x 10 mm de espessura, fabricante Eliane para comparação.

Figura 15 – Imagens das amostras para ensaios de condutividade térmica.

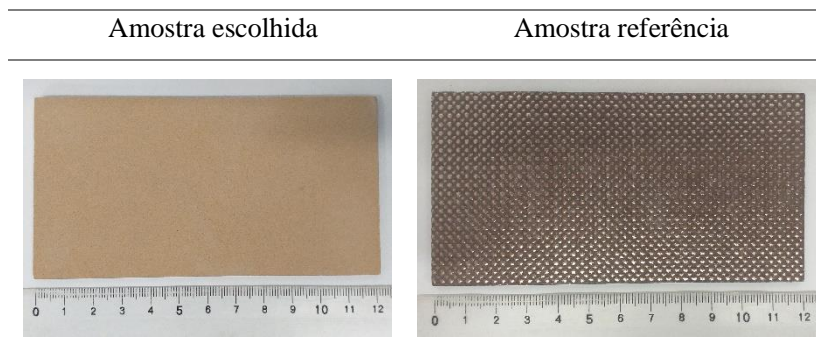


Fonte: Do Autor (2019)

O segundo ensaio foi executado para avaliar as potencialidades de isolamento térmico do material em estudo. A fachada ventilada é considerada uma solução construtiva sustentável, que alia inovação e eficiência energética, auxiliando na melhoria do conforto térmico em uma edificação. Para tanto, foi projetada e construída uma cabine, um “aparato térmico”. Este aparato teve como finalidade simular uma edificação, em que foi empregado o sistema de fachada ventilada a fim de atestar o conforto térmico dentro da mesma e atestar a capacidade de isolamento térmico do corpo cerâmico. Para este sistema idealizado foram utilizados 28 corpos cerâmicos da formulação escolhida com dimensões aproximadas de 120 mm x 62 mm x 3 mm e 28 amostras do porcelanato Laminum, da Eliane, conforme a Figura 16, empregado comercialmente em fachadas ventiladas, com dimensões aproximadas de 120 mm x 62

mm x 3 mm, utilizado como referência, como comparação. Os ensaios ocorreram no Laboratório de Cerâmica do Idt, no IParque.

Figura 16 – Imagens das amostras fixadas na estrutura metálica acoplada no aparato térmico, simulando a estrutura do sistema de fachada ventilada.

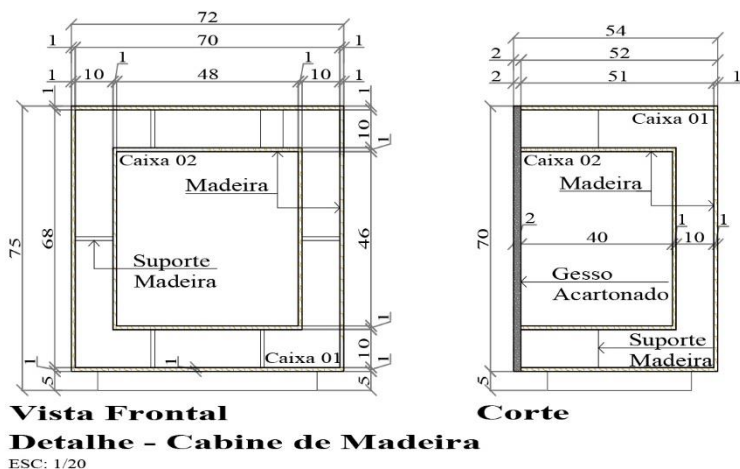


Fonte: Do Autor (2019)

Os componentes que compuseram este ensaio foram: o aparato térmico, composto pela cabine de madeira (Figura 17), a estrutura metálica (Figura 18) e a estufa odontológica Odontobrás, modelo – EL – 1.3.

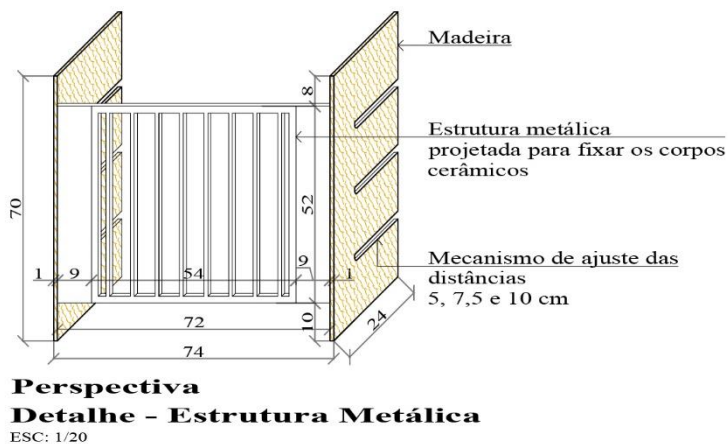
Para medição da temperatura, utilizou-se 5 termopares do tipo K. O módulo de leitura e registro de variáveis utilizadas foi o FieldLogger – Data Logger Industrial Multicanais – Novus.

Figura 17 - Detalhe da cabine de madeira. Medidas e especificações.



Fonte: Do Autor (2019)

Figura 18 - Detalhe da estrutura metálica. Medidas e especificações.



Fonte: Do Autor (2019)

O “aparato térmico” foi composto por duas caixas de madeira. A “caixa 01” foi projetada com a intenção de simular uma edificação e também reduzir os possíveis efeitos térmicos do ambiente externo. A

“caixa 02”, posicionada dentro da caixa 01, foi projetada para simular um cômodo dentro da edificação. Ambas as caixas foram projetadas com uma das faces sendo em material cerâmico, simulando uma parede em alvenaria. O material empregado foi o gesso acartonado, com espessura de 2 cm, devido a praticidade de manuseio e corte da peça. A estrutura metálica foi projetada para fixar os corpos cerâmicos, simulando o sistema de fachada ventilada. A Figura 19 mostra o aparato térmico desenvolvido.

Figura 19 – Imagem do aparato térmico desenvolvido.



Est.: Estrutura

Fonte: Do Autor (2019)

Para o ensaio, foi padronizado 1 mm como junta de dilatação e permaneceram abertas. Foram utilizados espaçadores em MDF, para simular os espaçadores comerciais. Os corpos cerâmicos foram colados com selante refratário, totalmente rígido após a cura, resistente a altíssimas temperaturas, até 1500 °C, Soudal Brasil.

Para simular o efeito chaminé, foram estabelecidas três distâncias, 5, 7,5 e 10 cm, a fim de avaliar se o distanciamento da câmara de ar em relação à cabine influencia no conforto térmico da caixa 02 e no material. Este ajuste das distâncias é possível ser visualizado na Figura 20.

Para simular adequadamente o efeito chaminé, a câmara de ar permaneceu aberta na parte inferior e superior, permitindo a ventilação contínua no sentido vertical. O ar frio entrando pela parte inferior e o ar quente sendo removido pela parte superior.

Figura 20 - Mecanismo de ajuste das distâncias da estrutura metálica que simula o sistema de fachada ventilada.



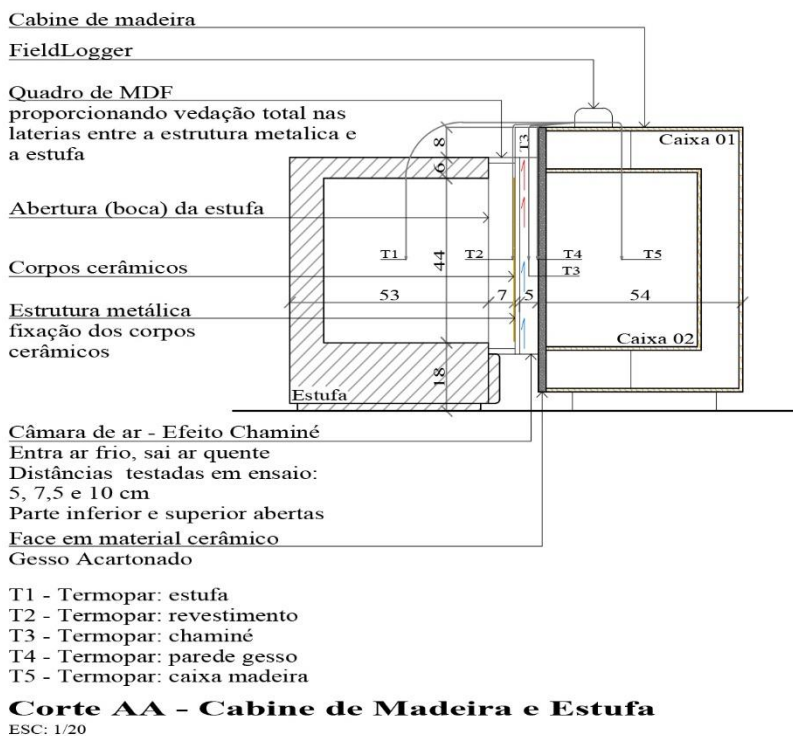
Fonte: Do Autor (2019)

A estufa utilizada foi ajustada com temperatura constante de 75 °C, com precisão de controle em ponto de  $\pm 15$  °C. Esta temperatura foi



posicionado entre a estrutura metálica e a estufa, vedado com selante refratário, Soudal Brasil.

Figura 22 - Corte AA referente ao sistema completo: aparato térmico e estufa.



Fonte: Do Autor (2019)

Inicialmente, os 5 termopares tipo K foram calibrados. Cada um foi conectado ao FieldLogger – Data Logger Industrial Multicanais – Novus para coletar os dados da medição das temperaturas da calibração.

Num recipiente refratário, foi aquecido cerca de 200 mL de água, até o ponto de ebulição (100 °C). Foi mergulhado cada termopar na água. Com o FieldLogger – Data Logger foi medido a temperatura da água. Em

um outro recipiente bécker, foram adicionados cubos de gelo e água, obtendo-se temperatura de fusão da água (0 °C). Com o FieldLogger – Data Logger, foi medido a temperatura da água para cada termopar. Foi feito o gráfico da diferença de temperatura no termopar em função da temperatura da água. Utilizando os resultados do ajuste dos dados a uma reta do tipo  $y = ax + \beta$ , pode-se encontrar o valor da temperatura de referência. A Tabela 5 mostra as temperaturas de calibração dos 5 termopares.

Tabela 5 - Tabela de calibração dos termopares. Temperatura real e temperaturas dos termopares em °C.

TReal	T1 Estufa	T2 Revestimento	T3 Chaminé	T4 Parede gesso	T5 Caixa madeira
0	4,89	3,38	5,65	3,80	6,08
100	100,39	98,86	100,43	100,4	100,36

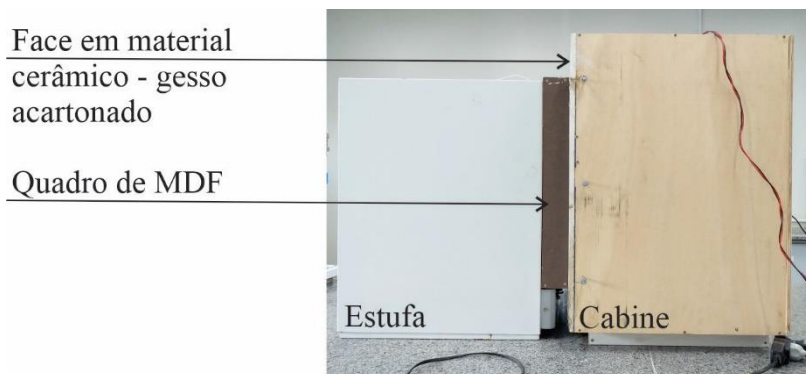
Fonte: Do Autor (2019)

Em seguida, foram definidas a localização dos 5 termopares, conforme Figura 22. Os termopares foram posicionados no centro de cada face a fim de se minimizar o efeito de borda. Foi posicionado um termopar dentro da estufa, no centro da mesma, um termopar no revestimento a ser avaliado, posicionado no centro, um termopar no centro da câmara de ar (chaminé), um termopar no centro da parede de gesso acartonado e um termopar dentro da caixa 02, posicionado no centro.

Primeiramente foi executado um ensaio sem o uso da estrutura metálica que simula o sistema de fachada ventilada, conforme Figura 23. Este ensaio foi executado para simular uma fachada convencional, a fim de comparativo de dados com o sistema de fachada ventilada. Nesta

situação, utilizou-se três termopares, foi posicionado um termopar dentro da estufa, no centro, um termopar no centro da parede de gesso acartonado e um termopar dentro da caixa 02, no centro. A medição da temperatura ocorreu nos 3 termopares por meio do FieldLogger – Data Logger.

Figura 23 – Imagem do aparato térmico para ensaio simulando uma fachada convencional.



Fonte: Do Autor (2019)

Em seguida, foi executado o ensaio com a fachada ventilada com as amostras do porcelanato Laminum, da Eliane, segundo Figura 24. Para este, os 5 termopares foram posicionados nos locais padronizados, conforme Figura 22. Para o efeito chaminé, foram simuladas 3 distâncias 5, 7,5 e 10 cm. Foram executados 3 ensaios, com cada distância distinta e foram coletadas as temperaturas por meio do FieldLogger – Data Logger.

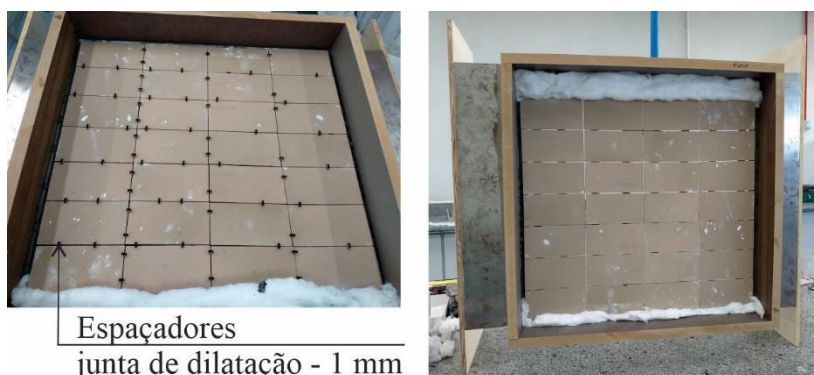
Figura 24 – Imagens do aparato térmico para ensaio simulando uma fachada com sistema de fachada ventilada.



Fonte: Do Autor (2019)

Em uma etapa posterior, foi executado o ensaio com os corpos cerâmicos em estudo. A Figura 25 mostra a montagem dos corpos cerâmicos porosos na estrutura metálica. Para o ensaio da fachada ventilada, com as amostras em estudo, foram utilizados os 5 termopares e para o efeito chaminé foram simuladas as distâncias de 5, 7,5 e 10 cm, com todos os dados das temperaturas sendo coletados por meio do FieldLogger – Data Logger.

Figura 25 – Imagens de corpos de prova F40T1100 colados na estrutura metálica.



Fonte: Do Autor (2019)

Todos os dados foram coletados e, em uma etapa posterior, apresentados e discutidos.

Para análise dos dados extraídos dos termopares T2 - revestimento, T4 – parede de gesso e T5 – caixa madeira e registrados pelo FieldLogger – Data Logger, foi calculado a variação  $\Delta$  que representa a redução de temperatura de cada termopar em relação a temperatura do termopar T1 – estufa.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do estudo experimental realizado.

### **4.1 COMPORTAMENTO QUÍMICO E FÍSICO DOS RESÍDUOS E DAS FORMULAÇÕES**

#### **4.1.1 Caracterização dos resíduos**

Nesta etapa serão apresentados e discutidos os resultados referentes à caracterização do basalto e lama de cal.

##### **4.1.1.1 Caracterização química**

O ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) foi realizado com o intuito de conhecer a composição química do basalto e da lama de cal. A Tabela 6 apresenta os elementos constituintes de cada material.

Verifica-se que o basalto é formado majoritariamente de silício, alumínio, cálcio, ferro, magnésio e sódio. Os demais podem ser caracterizados como quantidades residuais. O resíduo apresenta baixa perda ao fogo.

A lama de cal possui predominantemente cálcio em sua composição. O elevado teor deste elemento está associado à presença de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), na forma de calcita, conforme detectado por difração de raios X, como mostra a Figura 24. O resíduo apresentou elevada perda ao fogo, devido principalmente à liberação de  $\text{CO}_2$  proveniente da decomposição de calcita para a formação de  $\text{CaO}$ . A

reação de decomposição do  $\text{CaCO}_3$  pode ser observado na Equação 4 (CHÁVEZ GUERRERO *et al.*, 2017).

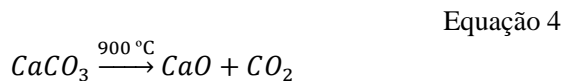


Tabela 6 - Composição química (% em massa) dos resíduos.

Elementos	Resíduos (% em massa)	
	Basalto	Lama de cal
$\text{Al}_2\text{O}_3$	18,03	0,28
$\text{CaO}$	10,90	52,47
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	9,35	0,16
$\text{K}_2\text{O}$	0,70	0,11
$\text{MgO}$	4,08	0,52
$\text{MnO}$	0,14	< 0,05
$\text{Na}_2\text{O}$	3,14	2,00
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,30	0,78
$\text{SiO}_2$	52,01	1,35
$\text{TiO}_2$	1,28	< 0,05
Perda ao fogo	0,08	42,28

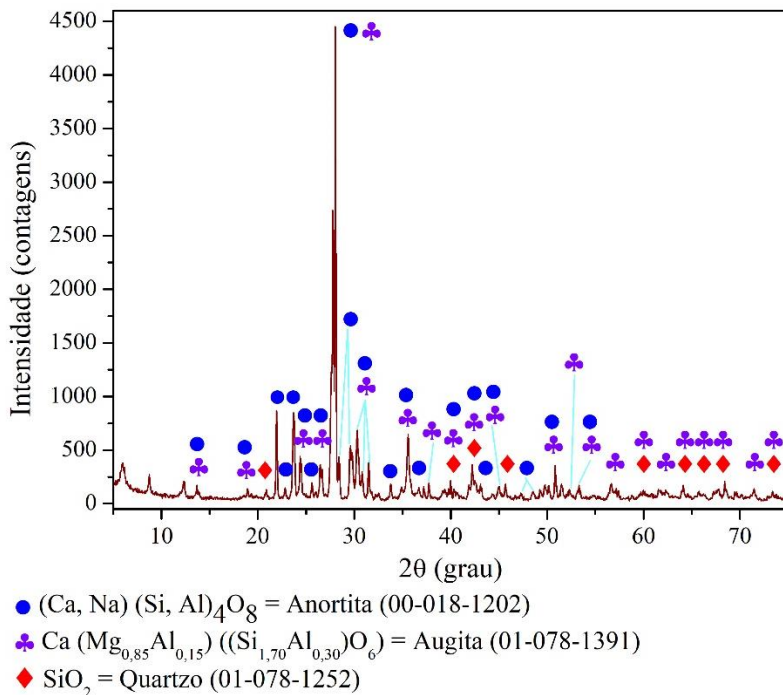
Fonte: Do Autor (2019)

#### 4.1.1.2 Caracterização mineralógica

Para o basalto, a análise dos difratogramas demonstra a formação da fase anortita ((Ca, Na) (Si, Al)<sub>4</sub>O<sub>8</sub>), presente no grupo dos plagioclásios, que está de acordo com os teores de cálcio encontrados no FRX deste resíduo, conforme Tabela 6. Chen *et al.* (2017) e Schiavon, Redondo e Yoshida (2007) em seus estudos também constataram a

presença de plagioclásios em suas amostras de basalto. Além disso, é observada a presença de augita ( $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ ), que é um mineral piroxênio e ocorre principalmente como cristais tabulares espessos em basaltos e várias rochas ígneas de cor escura (BRITANNICA, 2019). Yilmaz, Özkan e Günay (1996) detectaram a presença de augita em suas amostras de basalto. O quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) também foi detectado. A Figura 26 apresenta os difratogramas de raios X do basalto.

Figura 26 - Difratograma de raios X do basalto.

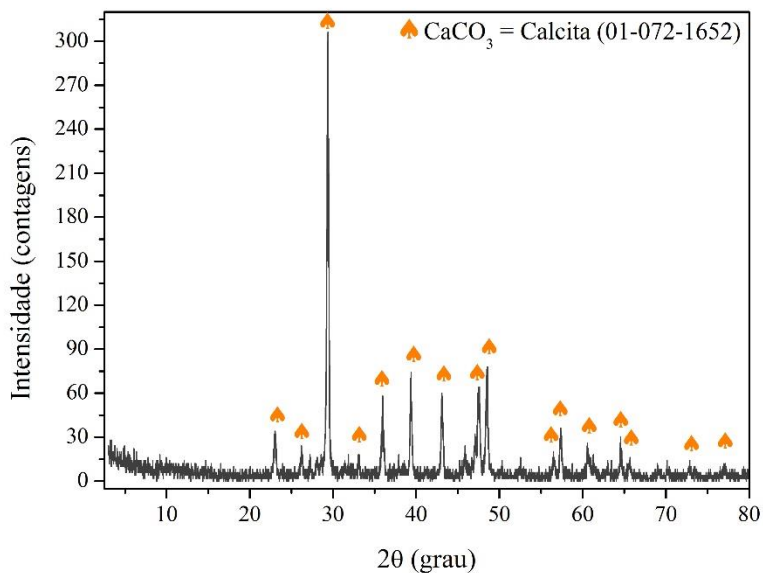


Fonte: Do Autor (2019)

A presença de cálcio no resíduo de lama de cal detectada no FRX, conforme Tabela 6, pode também ser conferida na análise mineralógica,

conforme mostrado na Figura 27, que mostra a presença da fase calcita ( $\text{CaCO}_3$ ).

Figura 27 - Difratoograma de raios X da lama de cal.



Fonte: Do Autor (2019)

#### 4.1.1.3 Caracterização física

A Tabela 7 mostra os resultados da análise granulométrica dos resíduos. Pode-se observar que o resíduo de beneficiamento de basalto apresenta tamanho médio de partículas ( $d_{50}$ ) em torno de 23,41  $\mu\text{m}$  e a lama de cal apresenta tamanho médio de partículas ( $d_{50}$ ) de 21,28  $\mu\text{m}$ ; 100% das partículas estão abaixo de 140 e de 71  $\mu\text{m}$ , respectivamente, referente ao basalto e lama de cal.

A distribuição granulométrica da massa cerâmica interfere na estabilidade dimensional à medida que o tamanho, o formato, a rugosidade e a homogeneização do pó determinam o preenchimento do molde de prensagem. O tamanho das partículas influencia na formação da estrutura porosa e no tamanho dos poros. Além disso, ter partículas finas em quantidade suficiente faz com que o compacto sinterize adequadamente (VIEIRA *et al.*, 2006; HUBADILLAH *et al.*, 2016; PRADO *et al.*, 2008).

Tabela 7 - Distribuição granulométrica dos resíduos.

Quantidade de partículas (%)	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	
	Basalto	Lama de cal
10	2,88	3,30
50	23,41	21,28
90	64,78	39,99

Fonte: Do Autor (2019)

#### 4.1.1.4 Caracterização térmica

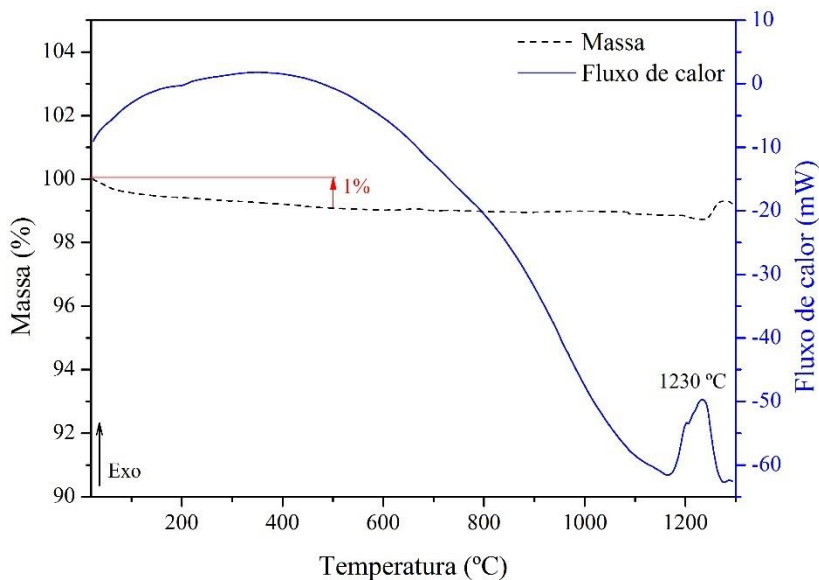
O comportamento térmico dos resíduos foi avaliado por calorimetria diferencial por varredura (DSC), análise termogravimétrica (TGA) e microscopia de aquecimento.

A Figura 28 apresenta o DSC e TGA do basalto.

Observa-se que nas primeiras etapas de aquecimento ocorre a eliminação de água adsorvida na superfície das partículas. As curvas de perda de massa em função da temperatura evidenciam leve perda de massa de 1% até aproximadamente 500 °C, podendo estar associada ao fato de que as temperaturas compreendidas entre 200 e 500 °C ocorrem

reações de oxidação de matéria orgânica. Posteriormente, a massa do resíduo se manteve estável até 1230 °C. Um pico exotérmico a 1230 °C pode estar relacionado a um efeito de cristalização. Este aparecimento sugere que pelo menos uma fase cristalina seja formada durante o aquecimento. O resultado do DRX constata a presença da fase augita na amostra de basalto. Segundo Gill (2014), quando piroxênios cristalizam a partir de líquidos magmáticos basálticos, a parte superior do *solvus* (linha que separa a região de solução sólida de dois sólidos) é cortada pelo *solidus* do basalto, explicando a coexistência de cristais de augita, podendo ocorrer a temperaturas entre 1200 e 1300 °C.

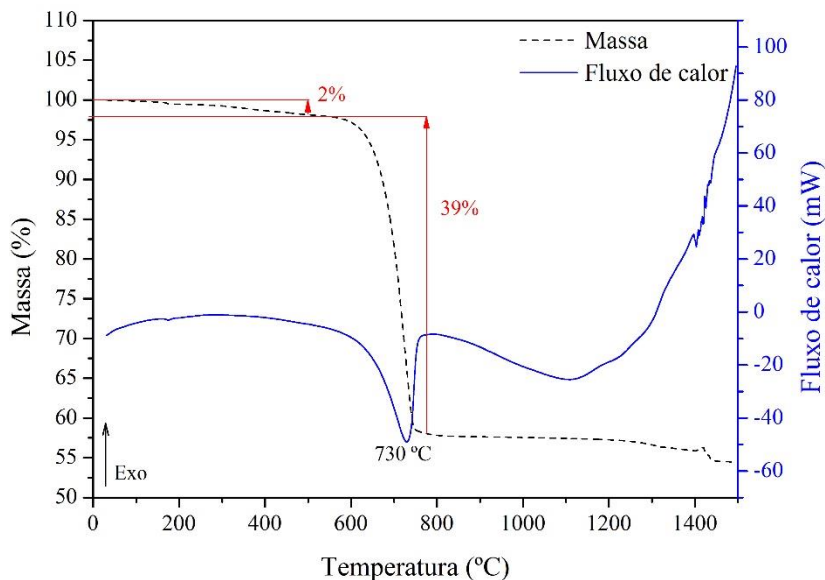
Figura 28 – DSC por fluxo de calor e TGA por variação da massa da amostra do basalto.



Fonte: Do Autor (2019)

A Figura 29 apresenta o DSC e o TGA da lama de cal. Consta-se que até aproximadamente 500 °C ocorre perda em massa de 2% associada à decomposição de matéria orgânica. Um pico endotérmico intenso ocorre em torno de 730 °C, devido principalmente à decomposição do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$  - calcita). Este evento proporcionou uma grande perda de massa, em torno de 39%. Esta alta perda de massa pode estar relacionada principalmente à decomposição do carbonato de cálcio para a formação de  $\text{CaO}$  e a liberação de  $\text{CO}_2$ , conforme cita Zenikheri *et al.* (2016). Estes resultados estão em concordância com os resultados de DRX, segundo Figura 27. No total, a perda de massa foi de 44%, próximo ao listado na perda ao fogo da análise química exposto na Tabela 6 (42,28%).

Figura 29 - DSC e TGA da lama de cal.

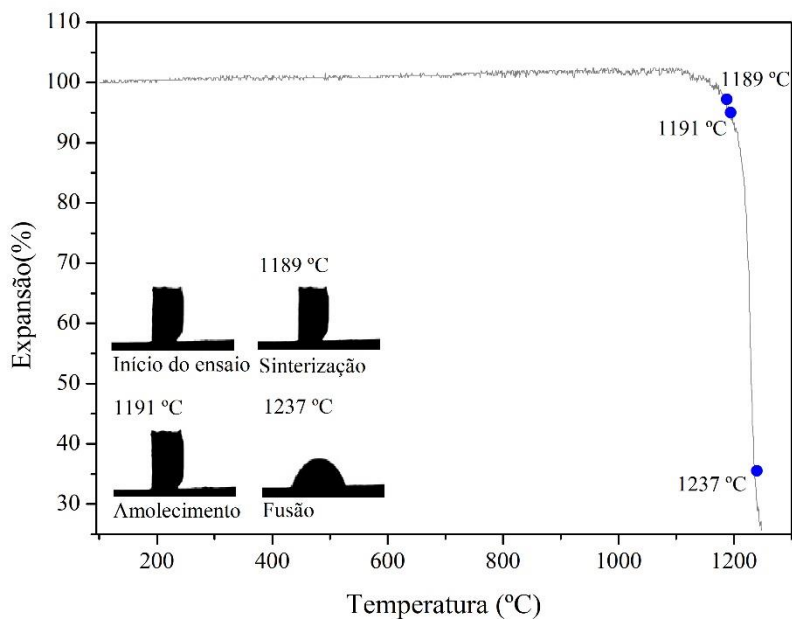


Fonte: Do Autor (2019)

A Figura 30 apresenta a análise de microscopia de aquecimento do basalto.

A aproximadamente 1189 °C inicia um processo de elevada retração associado à sinterização do basalto. O amolecimento ocorre quando o material começa a perder forma, em torno de 1191 °C, e a fusão do material ocorre a aproximadamente 1237 °C.

Figura 30 - Comportamento do basalto durante o aquecimento até a fusão.



Fonte: Do Autor (2019)

#### 4.1.1.5 Caracterização ambiental

Na Tabela 8 são mostrados os parâmetros determinados de pH do basalto, da lama de cal e do grupo controle - água.

Tabela 8 – Especificação de pH dos efluentes basalto e lama de cal e grupo controle - água.

	Basalto	Lama de Cal	Controle - água
pH	6	11	7

Fonte: Do Autor (2019)

Segundo a ABNT NBR 10004:2004, um resíduo é caracterizado como corrosivo se a amostra apresentar pH inferior ou igual a 2, ou ser superior ou igual a 12,5 (ABNT, 2004). No caso das amostras de basalto e lama de cal, ambos não se enquadram nestas condições, conforme exposto na Tabela 8, portanto não são qualificados como sendo corrosivos.

Para a análise de toxicidade do basalto e lama de cal, utilizou-se como parâmetro de confiabilidade  $* = p < 0,05$  (95% de confiabilidade que o material seja tóxico se comparado com o grupo controle – água). Este parâmetro foi usado tanto para a *Allium cepa* L. (cebola) quanto para a *Lactuca sativa* L. (alface).

Esta abordagem usou as plantas superiores *Allium cepa* L. (cebola) e *Lactuca sativa* L. (alface) para análise dos efeitos subcrônicos.

A Tabela 9 elenca os níveis de confiabilidade conforme os pós-testes de Dunnet.

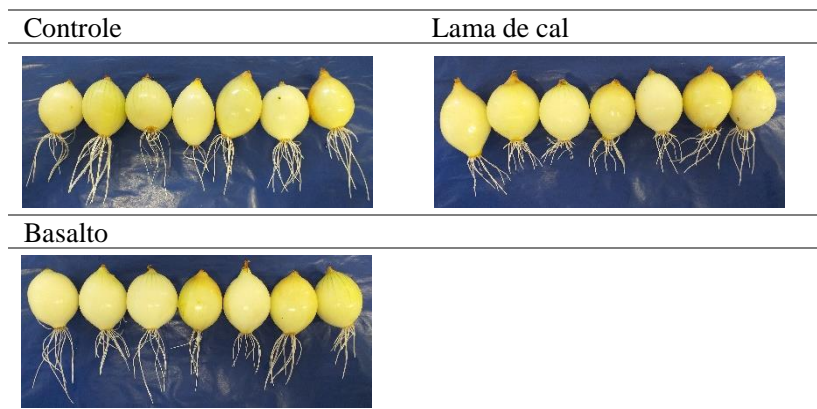
Tabela 9 – Parâmetros de confiabilidade conforme pós testes de Dunnet.

Parâmetros	Valores de p	Confiabilidade
**	$p < 0,01$	99%
***	$p < 0,001$	99,9%
****	$p < 0,0001$	99,99%

Fonte: Do Autor (2019)

A Figura 31 demonstra as 7 *Allium cepa* L. (cebola) para o grupo controle, para o basalto e a lama de cal expostas aos efluentes, após 7 dias em local fechado e ao abrigo da luz.

Figura 31 – Imagens das amostras de *Allium cepa* L. após 7 dias em exposição aos efluentes.

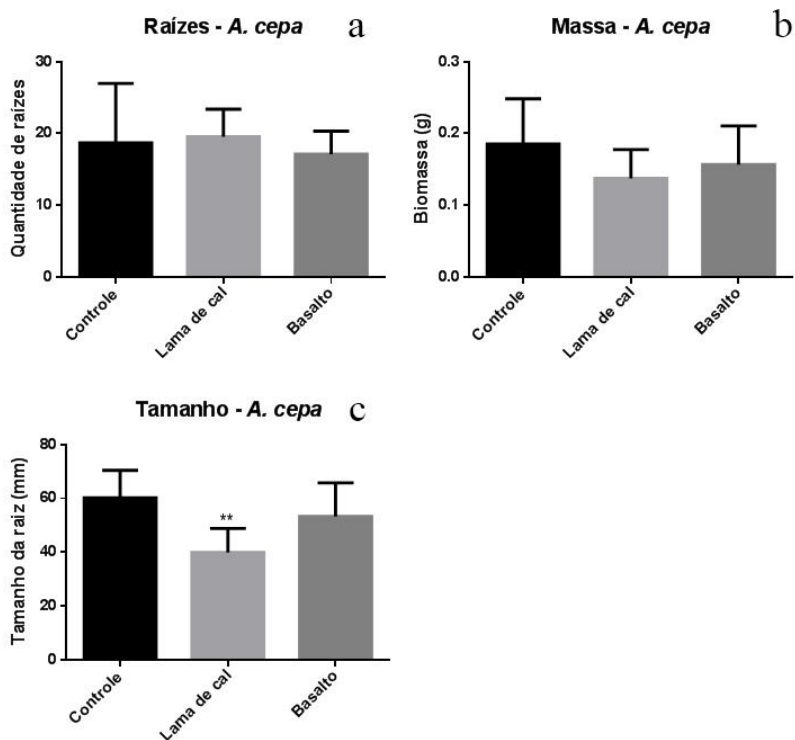


Fonte: Do Autor (2019)

Quando as *Allium cepa* L. (7 cebolas para cada resíduo e para o grupo controle) foram expostas por 7 dias a cada um dos efluentes, as raízes obtiveram crescimento similar ao grupo controle, ou seja, a exposição aos resíduos não influenciou na germinação das sementes, conforme mostrado na Figura 32a. As raízes dos recém-nascidos apresentaram uma diminuição no comprimento, segundo Figura 32c, e também na massa quando comparadas às encontradas no grupo controle, conforme Figura 32b. Estas evidências indicam que os efluentes estudados podem ser tóxicos para as plantas superiores.

De acordo com os valores de confiabilidade expostos na Tabela 9, a lama de cal demonstra ser tóxica com 99% (\*\*) de confiabilidade, conforme evidencia a Figura 32c.

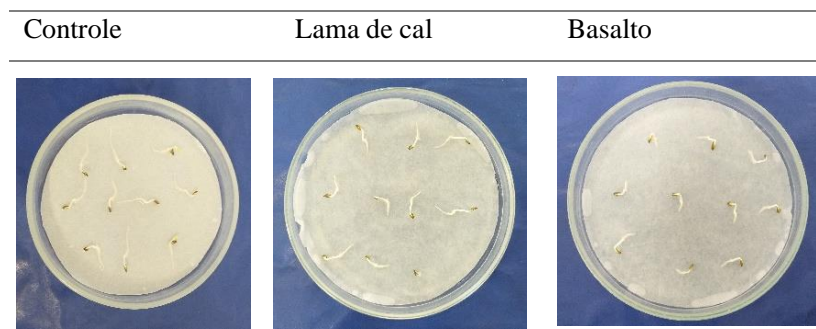
Figura 32 – Gráficos com os efeitos tóxicos subcrônicos dos efluentes em bulbos de *Allium cepa* L. (cebola).



Fonte: Do Autor (2019)

Para o ensaio com as sementes de *Lactuca sativa* L, é possível observar a germinação das raízes na Figura 33, onde a mesma demonstra as 10 sementes de *Lactuca sativa* L. para o grupo controle, para o basalto e para a lama de cal expostas aos efluentes, após 3 dias em local fechado e ao abrigo da luz.

Figura 33 – Imagens das sementes de *Lactuca sativa* L. após 3 dias em exposição aos efluentes.

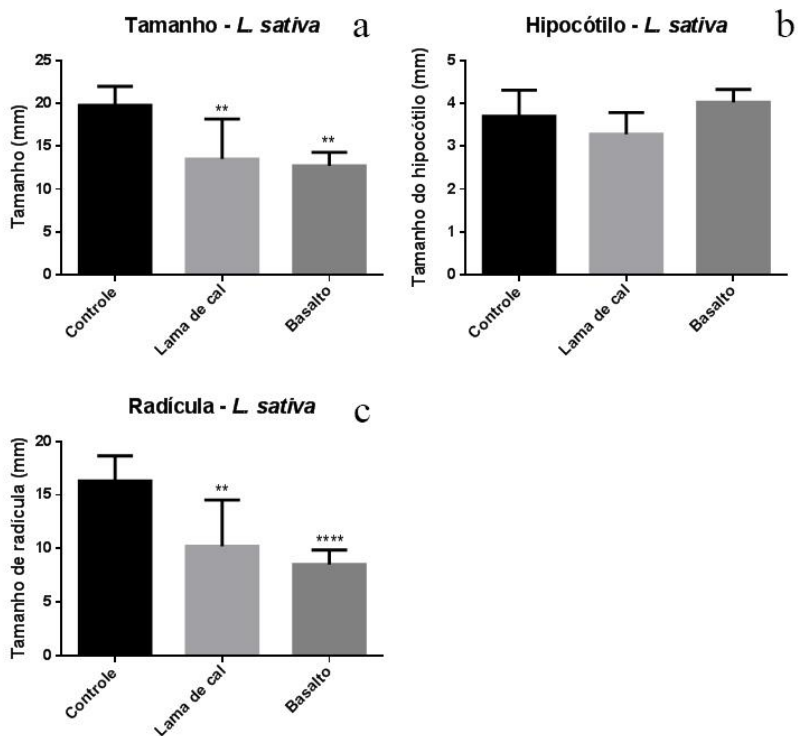


Fonte: Do Autor (2019)

Quando as *Lactuca sativa* L. (10 sementes para cada resíduo e para o grupo controle) foram expostas por 3 dias aos efluentes, a germinação das raízes foi comparável aos resultados do grupo controle, ou seja, todas as sementes de ambos os resíduos germinaram. Porém, em termos de crescimento, apresentaram uma diminuição principalmente nas radículas, conforme mostrado na Figura 34c, quando comparadas com as encontradas no grupo controle. Conforme os resultados expostos na Figura 34a, é possível afirmar que ocorreu uma diminuição do crescimento total das raízes de ambos os resíduos, quando comparados ao do grupo controle.

Conforme indicado na Figura 34c, a lama de cal apresentou ser tóxica com 99% (\*\*) de confiabilidade e o basalto apresentou ser tóxico com 99,99% (\*\*\*\*) de confiabilidade, de acordo com a Tabela 9.

Figura 34 – Gráficos que evidenciam os efeitos tóxicos subcrônicos dos efluentes em sementes de *Lactuca sativa* L.



Fonte: Do Autor (2019)

## 4.1.2 Caracterização das massas cerâmicas

### 4.1.2.1 Caracterização química

A caracterização química das formulações F20, F30 e F40 a verde estão elencadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição química a verde das formulações (% em massa).

Elementos	Formulações (% em massa)		
	F20	F30	F40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,83	15,73	14,14
CaO	13,39	16,49	19,70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,07	3,67	3,39
K <sub>2</sub> O	0,55	0,53	0,48
MgO	1,74	1,64	1,57
MnO	0,06	0,06	0,06
Na <sub>2</sub> O	1,44	1,46	1,50
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,27	0,34	0,42
SiO <sub>2</sub>	49,88	45,98	42,88
TiO <sub>2</sub>	0,92	0,83	0,76
Perda ao fogo	10,83	13,26	15,10

Fonte: Do Autor (2019)

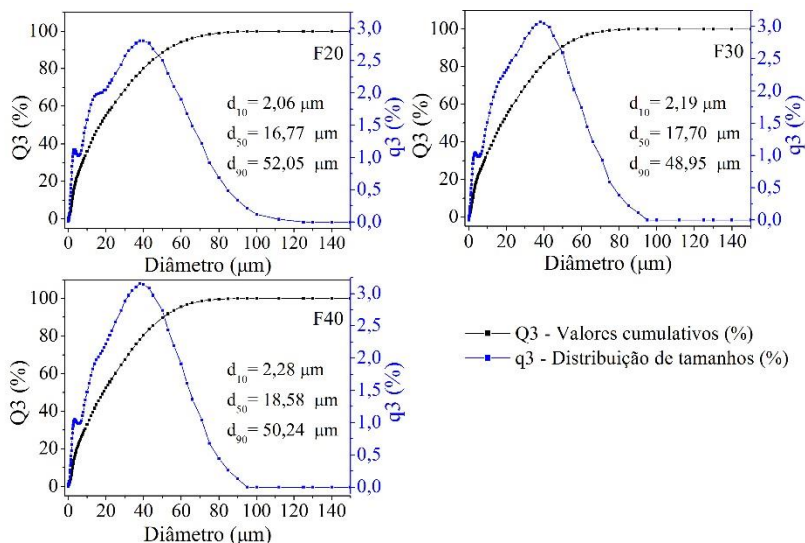
Para as formulações estudadas, se verifica a presença majoritária de silício, seguido de alumínio e cálcio, para as três formulações. Nota-se que estes elementos, que atuam como óxidos refratários, diminuíram gradativamente em quantidade com o aumento de lama de cal nas formulações. O cálcio e o sódio, que atuam como agentes de fluxo, aumentaram progressivamente de F20 para F40. Estes elementos podem modificar o comportamento térmico do material, aumentando a retração linear, ou seja, aumentando a sinterabilidade da massa (SIMÃO *et al.*, 2015).

Para este trabalho, a intenção é aumentar a porosidade por meio da decarbonatação causada pelo aumento do teor de calcita, gerando pequenos poros.

#### 4.1.2.2 Caracterização física

A Figura 35 apresenta a distribuição granulométrica das formulações (F20, F30 e F40).

Figura 35 - Distribuição granulométrica das massas formuladas.



Fonte: Do Autor (2019)

A formulação F20 apresenta 100% das partículas menores que 112 µm; F30 e F40 estão abaixo de 90 µm.

A análise demonstra quantidade de partículas finas, o que pode indicar um bom nível de cominuição das matérias-primas. Quanto menor o tamanho das partículas, maior será a área superficial. A granulometria fina pode favorecer a reatividade entre as partículas na etapa de sinterização. A reatividade das partículas menores ajuda nas transformações físico-químicas em elevadas temperaturas, possibilitando

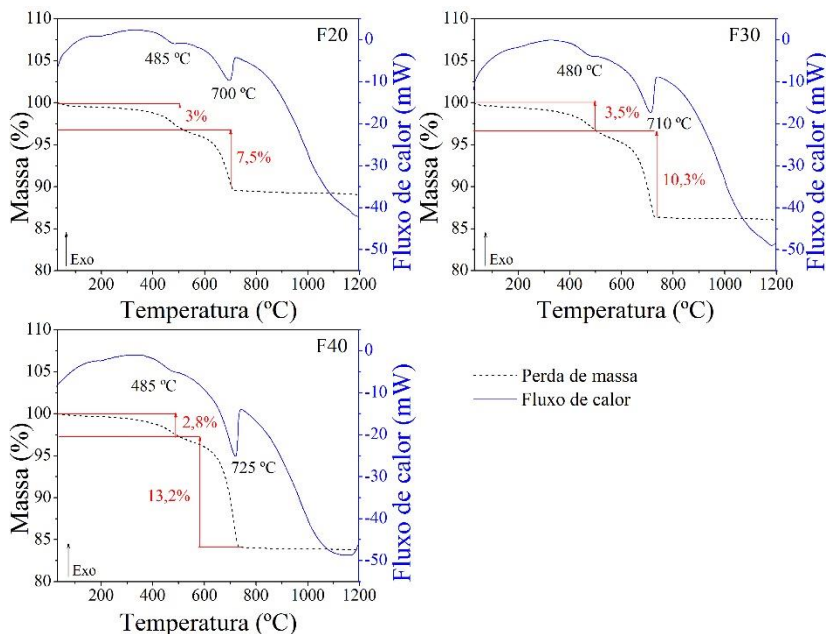
o aparecimento de novas fases cerâmicas e a densificação das placas cerâmicas.

#### 4.1.2.3 Caracterização térmica

O comportamento térmico das formulações F20, F30 e F40 a verde foi analisado por calorimetria diferencial de varredura (DSC) e análise termogravimétrica (TGA), representado na Figura 36.

As formulações F20, F30 e F40 apresentam, para os estágios iniciais do aquecimento, a água adsorvida na superfície da argila sendo removida. Uma variação exotérmica entre 200 e 450 °C ocorre, com perda de massa associada à decomposição de matéria orgânica. Entre 450 e 550 °C ocorre a desidroxilação (perda de hidroxila OH<sup>-</sup>) do mineral argiloso; esta reação é endotérmica. A temperaturas próximas a 700 até 900 °C ocorre a decomposição do CaCO<sub>3</sub> (calcita), com liberação de CO<sub>2</sub>, o qual está associado a um efeito endotérmico. A decomposição do CaCO<sub>3</sub> produz CaO. Esta transformação, como as reações de oxidação da matéria orgânica e inversão de quartzo, leva a uma expansão progressiva da amostra. Este evento ocasiona grande perda em massa nas formulações. A formulação F40 atinge a maior perda em massa, 13,2%. Por volta de 1200 °C, tem início a fusão da composição. A análise feita está de acordo com Barba *et al.* (1997), Costa, Sakihama e Salomão (2018) e Zenikheri *et al.* (2016). A perda de massa total das formulações foi de 10,5% para F20, 13,8% para F30 e 16% para F40, valores bem próximos dos encontrados na perda ao fogo da análise química apresentados na Tabela 10.

Figura 36 - DSC e TGA para as formulações F20, F30 e F40.

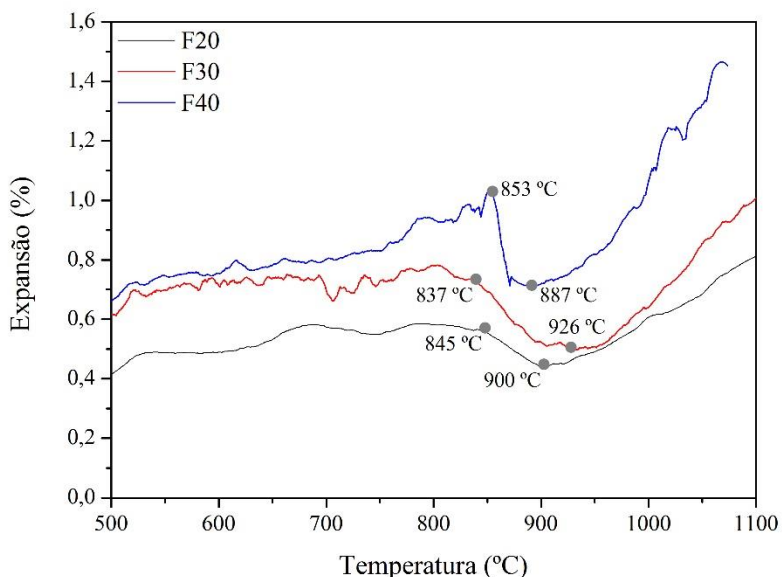


Fonte: Do Autor (2019)

Por meio do ensaio de dilatometria óptica, as temperaturas de sinterização foram definidas experimentalmente, conforme mostrado na Figura 37. A expansão térmica sofre alterações ao longo das diferentes faixas de temperatura. Pode-se observar que a aproximadamente 845 °C para a formulação F20, 837 °C para F30 e 853 °C para F40 o material inicia o processo de sinterização e atinge a menor expansão em 900 °C para F20, 926 °C para F30 e 887 °C para F40. A sinterização deve ocorrer por fase líquida considerando a presença de agentes de fluxo, como discutido anteriormente. Na sinterização por fase líquida, um líquido está presente, seja por intermédio da fusão de um dos constituintes ou por produto de uma reação entre os constituintes do material, sendo o

responsável maior pela redução da porosidade. A fase líquida é transitória e pode fluir para as fases sólidas; assim, a formação de poros é inevitável a altas temperaturas (SILVA; ALVES JÚNIOR, 1998; ZHAO *et al.*, 2019).

Figura 37 - Curva de expansão linear das formulações.



Fonte: Do Autor (2019)

Após atingir a máxima retração durante a sinterização, cada composição volta a expandir, aumentando a porosidade do material. Ocorre o fenômeno de aprisionamento de gases gerados no aquecimento – a liberação de  $\text{CO}_2$  oriundo da decomposição de  $\text{CaCO}_3$ . Com o aumento da temperatura, estes gases expandem, gerando porosidade fechada. Esta expansão ocorre pela presença de materiais amorfos na composição (OLIVEIRA; VIDAL; RIBEIRO, 2012; RANGEL *et al.*, 2018).

A partir das curvas de expansão apresentadas na Figura 37, as temperaturas de sinterização selecionadas foram 900 e 1100 °C, além do ponto central (do planejamento experimental) a 1000 °C. Buscou-se um intervalo entre a temperatura na fase inicial de sinterização das formulações até uma temperatura na faixa de expansão. A porosidade do material pode aumentar com o incremento da temperatura, por estar na faixa de expansão. Tendo em vista que se deseja obter placas cerâmicas porosas e que a porosidade é um fator predominante, a extensão na faixa de expansão foi ampliada a fim de gerar porosidade ao material.

### **4.1.3 Caracterização dos corpos de prova sinterizados**

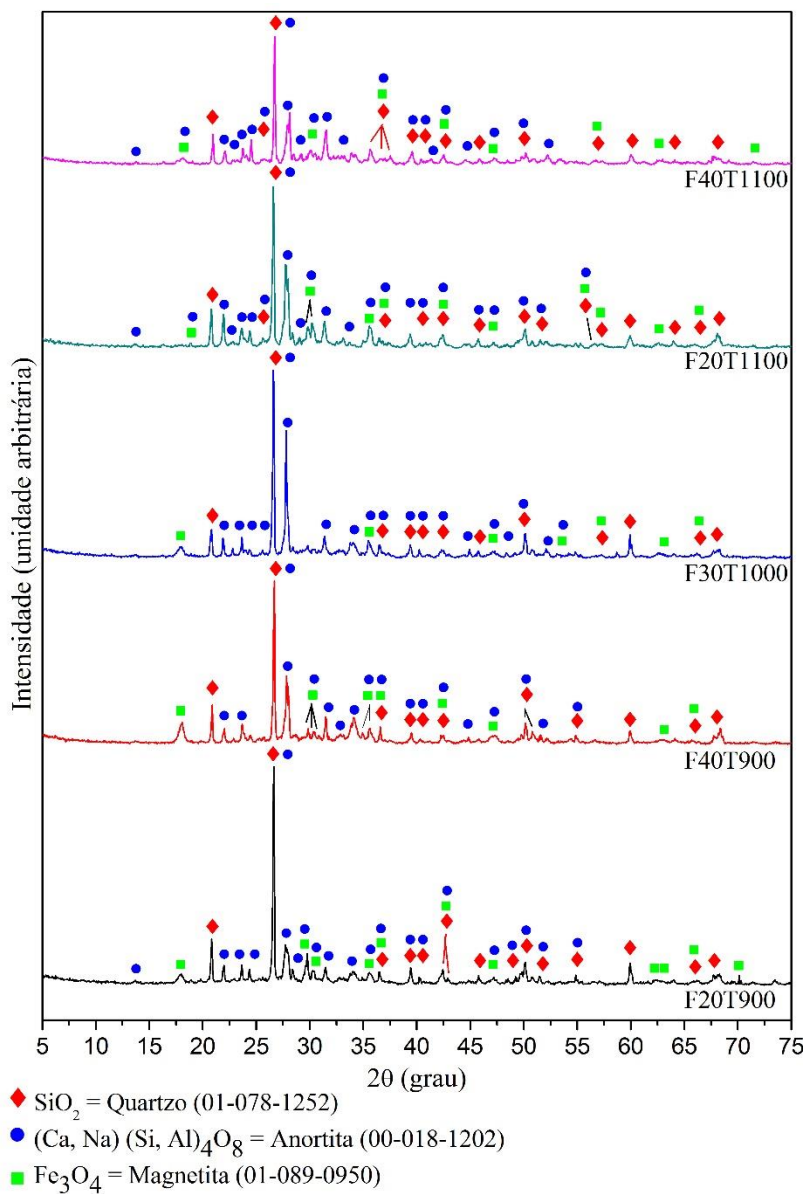
A avaliação do efeito do teor de lama de cal e da temperatura de sinterização nas características finais das 6 formulações foi feita a partir da caracterização mineralógica, porosidade e resistência mecânica à flexão.

#### **4.1.3.1 Caracterização mineralógica**

A análise mineralógica para as formulações F20T900, F40T900, F20T1100, F40T1100 e F30T1000 é apresentada na Figura 38.

De acordo com os picos característicos, foi constatado a presença de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), que se apresenta de forma bem definida. Este resultado está de acordo com a composição química de cada formulação, demonstrada na Tabela 10, em que todas apresentam a presença majoritária de silício nas respectivas formulações. Além disso, as amostras contêm anortita ( $(\text{Ca,Na})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$ ) e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) como minerais associados.

Figura 38 - Difratogramas de raios X das formulações estudadas.



Fonte: Do Autor (2019)

Os difratogramas de raios X das formulações estudadas apresentam tendência majoritária esperadas. Com o aumento da temperatura, diminui a intensidade dos picos de quartzo nas formulações, o quartzo tende a diminuir para a formação de novas fases. Com o aumento da temperatura, a anortita tende a aumentar e apresentam picos mais intensos e definidos. As fases de anortita são influenciadas em temperatura mais elevada. Este comportamento é o esperado para materiais cerâmicos com esta tipologia de composição. Zaiou *et al.* (2016) apresentaram padrões de difração de raios X de amostras de anortita sinterizadas em diferentes temperaturas, em que atesta a evolução no número de intensidade dos picos de difração com o aumento da temperatura.

A anortita é um mineral baseado no sistema alumina-sílica, obtida a alta temperatura a partir de misturas de caulim e carbonato de cálcio, minerais estes encontrados nas formulações em estudo. A presença de anortita aumenta a resistência e a estabilidade química do material e diminui o coeficiente de expansão térmica, eleva a resistência a choques térmicos e reduz a constante dielétrica (ROUABHIA; NEMAMCHA; MOUMENI, 2018).

A magnetita é um dos óxidos de ferro. Conforme a Tabela 6, foi identificado na composição química do basalto a presença de 9,35% de ferro. A magnetita é um material magnético estável à temperatura ambiente, adequado para muitas aplicações tecnológicas.

#### 4.1.3.2 Porosidade

A Tabela 11 apresenta as médias dos resultados experimentais de densidade aparente a seco e porosidade total dos corpos de prova para as

6 formulações, mostrando a influência do teor de lama de cal e da temperatura de sinterização. A partir destes dados, pode-se notar que o aumento do teor de lama de cal nas formulações reduz gradativamente a densidade aparente. A formulação com teor de lama de cal de 40% (F40T900 e F40T1100) apresentou menor densidade aparente que as demais.

Sampaio, Pinheiro e Holanda (2007) afirmaram que a massa específica verde industrial mínima para fabricação de grês porcelanato é da ordem de 1,89 g/cm<sup>3</sup>. As formulações sinterizadas F40T900 e F40T1100 apresentou densidade aparente com média de 1,56 g/cm<sup>3</sup>. Desta forma conclui-se, que ocorreu uma diminuição significativa neste parâmetro, como esperado, este é o intuito deste trabalho, obter placas cerâmicas mais leves.

Tabela 11 - Resultados de densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>) e de porosidade (%) para teor de lama de cal versus temperatura de sinterização para as 6 formulações em estudo.

Teor de lama de cal (%)	Temperatura de sinterização (°C)		
	900	1000	1100
20	D = 1,765 ±0,020		D = 1,732 ±0,030
	P = 36,80 ±0,84		P = 38,83 ±1,26
30		D = 1,621 ±0,040	
		P = 41,88 ±1,49	
		D = 1,654 ±0,009	
		P = 41,31 ±0,33	
40	D = 1,560 ±0,009		D = 1,560 ±0,010
	P = 42,72 ±0,36		P = 45,58 ±0,50

Fonte: Do Autor (2019)

Os valores de porosidade total também aumentaram gradativamente com maior incorporação do teor de lama de cal nas formulações, conforme mostrado na Tabela 11. Neste quesito, a temperatura de sinterização também influencia a porosidade; nota-se que quanto maior a temperatura, maior a porosidade. A formulação F40 queimada a 1100 °C apresentou o maior valor de porosidade total das condições estudadas.

#### 4.1.3.3 Caracterização mecânica

Os resultados de resistência mecânica à flexão são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência mecânica à flexão (MPa) para teor de lama de cal *versus* temperatura de sinterização para as 6 condições experimentais em estudo.

Teor de lama de cal (%)	Temperatura de sinterização (°C)		
	900	1000	1100
20	2,40 ±1,02		7,46 ±2,29
30		1,96 ±0,95	
		3,66 ±0,19	
40	N.D.		5,20 ±0,79

N.D.: Não Determinado

Fonte: Do Autor (2019)

Observa-se que o aumento do teor de lama de cal nas formulações estudadas provoca diminuição da resistência mecânica à flexão do material. Isso é esperado, pois com o aumento de porosidade nos materiais cerâmicos a resistência mecânica à flexão dos materiais tende a

diminuir. Observa-se também que a temperatura de sinterização influencia no aumento da resistência mecânica à flexão. Os melhores resultados de resistência mecânica foram alcançados em temperaturas mais elevadas (formulações F20 e F40 a 1100 °C). A explicação é que, com o aumento da temperatura, a fase contínua do material atinge maior densificação e apresenta maior resistência mecânica à flexão.

#### 4.2 DEFINIÇÃO DA MELHOR CONDIÇÃO EXPERIMENTAL

Os resultados de porosidade e resistência mecânica à flexão das 3 formulações estudadas nas 3 temperaturas de processamento empregadas foram analisados, a fim de se definir a melhor condição experimental a ser adotada para o presente trabalho, considerando-se os objetivos deste trabalho, isto é, obter uma massa cerâmica porosa que apresente resultado satisfatório de resistência mecânica.

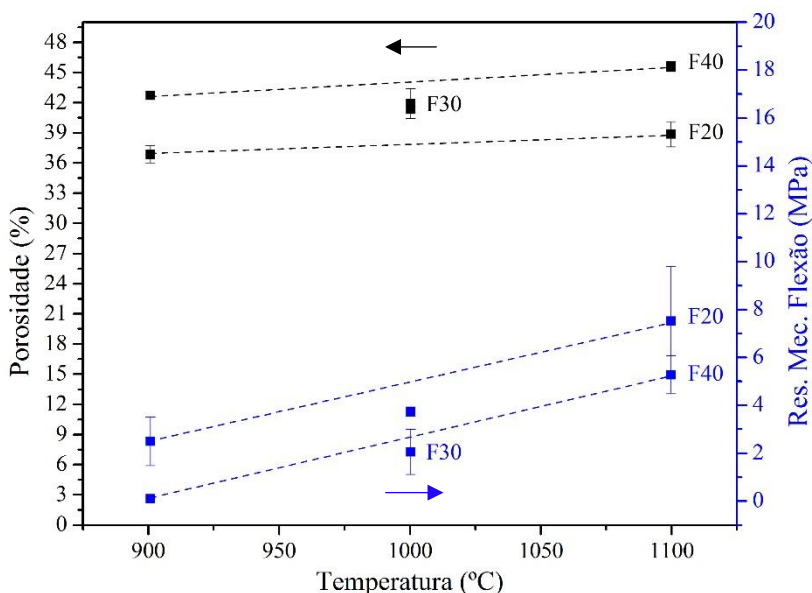
A Tabela 11 e a Tabela 12 apresentam os resultados experimentais de porosidade total e resistência mecânica à flexão dos corpos de prova obtidos, para os teores de lama de cal e temperaturas de sinterização investigados.

O aumento do teor de lama de cal nas formulações gerou um aumento de porosidade. Isso ocorre, pois, o  $\text{CaCO}_3$  é um agente gerador de poros. Nota-se também, que com o aumento da temperatura, ocorreu um aumento da porosidade, pois, devido a formação de fase líquida, a porosidade do material pode aumentar com o incremento da temperatura, por estar na faixa de expansão (MILAK *et al.*, 2019). Pode-se concluir, que o maior teor de lama de cal e a maior temperatura de sinterização influenciaram significativamente no aumento da porosidade da

formulação. A condição experimental F40T1100 apresentou a maior porosidade entre aquelas estudadas.

A Figura 39 demonstra os resultados das variáveis de resposta com o desvio padrão para cada formulação estudada.

Figura 39 - Resultados das variáveis de resposta das formulações estudadas.



Fonte: Do Autor (2019)

A resistência mecânica à flexão diminui com o aumento de teor de lama de cal, sobretudo devido ao aumento da porosidade. Os poros reduzem a área da seção cruzada na qual a carga é aplicada e os mesmos atuam como concentradores de tensão (PINHEIRO e HOLANDA, 2010; SCHULLER, BIANCHI e AGUIAR, 2008). Com o aumento da temperatura, a resistência mecânica à flexão aumenta. Um parâmetro de processamento que influencia fortemente as propriedades mecânicas é a

temperatura de queima. Com o aumento da temperatura, valores de absorção de água e porosidade aparente diminuem, contribuindo para uma maior densificação e aumento da resistência mecânica. As formulações F20T1100 e F40T1100 apresentaram maiores valores de resistência mecânica à flexão.

A Tabela 13 apresenta a análise de variância para a porosidade. Trata-se de um modelo linear, com efeitos individuais sem estarem cruzados. A relação entre teor de lama de cal e temperatura de sinterização não se mostram representativas. É possível analisar que a porosidade aumenta significativamente com o aumento do teor de lama de cal. Isso pode ser comprovado pela análise estatística, através da soma quadrática, onde foram verificadas as influências das variáveis independentes, ou seja, teor de lama de cal e temperatura de sinterização, na propriedade da porosidade das formulações estudadas. Pode-se afirmar que ambos fatores interferem na porosidade, pois apresentaram valor de P significativo ( $p\text{-valor} \leq 0,05$ ), ou seja, o valor p menor que 0,05 representa o nível de confiança de 95% ao afirmar que o resultado é verdadeiro. Tanto o teor de lama de cal (confiança 100%), quanto a temperatura de sinterização (confiança 99,96%) apresentaram um valor de P menores que 0,05. Pode-se afirmar também, através do fator de Fisher, que o teor de lama de cal interfere mais significativamente na porosidade do que a temperatura de sinterização. Quanto maior o valor de F, significa que os quadrados médios do modelo são maiores que os quadrados médios residuais, significando assim, que mais significativo é o valor de P. O teor de lama de cal apresentou valor F de 149,1735, um valor bem superior ao da temperatura de sinterização que apresentou um valor F de 22,169, mostrando, assim, que a variável teor de lama de cal influencia em maior

grandeza na porosidade das formulações. O coeficiente de determinação *R-square* foi de 0,93043, indicando o bom ajuste do modelo aos dados experimentais.

Tabela 13 - Análise de variância para a porosidade.

Fatores	SS	df	MS	F	p
(1) Teor de lama de cal	120,4865	1	120,4865	149,1735	0,000000
(2) Temperatura de sinterização	17,9058	1	17,9058	22,169	0,000409
Relação entre (1) e (2)	0,5292	1	0,5292	0,6552	0,432817
Erro	10,5	3	0,8077		
Total SS	150,9278	17			

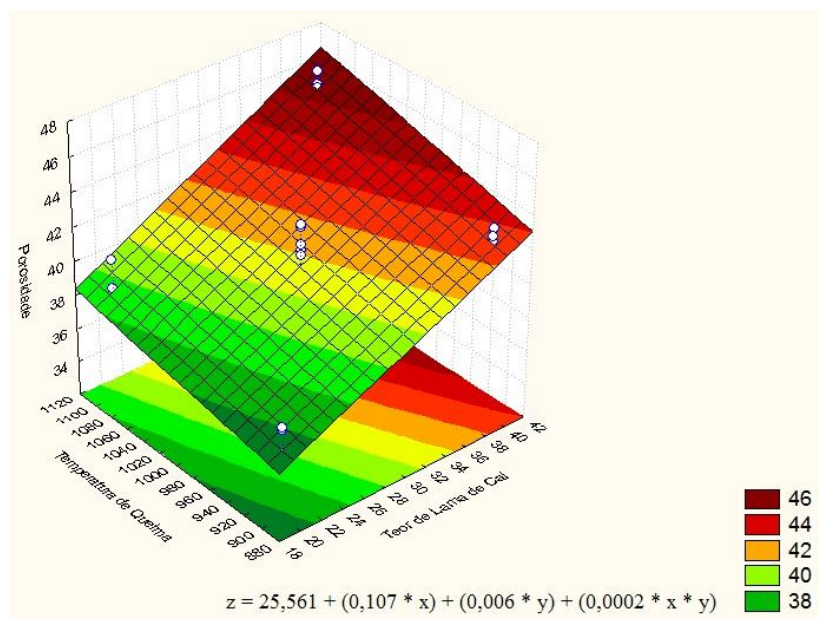
SS: soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: médias quadráticas; F: fator de Fisher; p: teste de confiabilidade.

Fonte: Do Autor (2019)

A Figura 40 apresenta o gráfico de superfície de resposta que representa a influência do teor de lama de cal e da temperatura de sinterização na porosidade. O gráfico de superfície é empregado para examinar as relações entre uma ou mais variáveis de resposta em um conjunto quantitativo de fatores experimentais.

A superfície de resposta indica que o aumento do teor de lama de cal aumenta a porosidade, como seria esperado. A temperatura de sinterização também influencia na porosidade, porém com menor intensidade.

Figura 40 - Superfície de resposta para a porosidade.



Fonte: Do Autor (2019)

A Equação 5 refere-se ao modelo de regressão quadrático que melhor se exprime o comportamento de porosidade, de acordo com os intervalos avaliados para o teor de lama de cal e para a temperatura de sinterização.

Equação 5

$$z = 25,561 + (0,107 \times x) + (0,006 \times y) + (0,0002 \times x \times y)$$

Onde:

z = porosidade, em %;

x = teor de lama de cal, em %;

y = temperatura de sinterização, em °C.

Com a Tabela 14 é possível analisar que a resistência mecânica à flexão é significativamente aumentada pelo aumento da temperatura de sinterização. Observando a soma quadrática, foram verificadas as influências das variáveis independentes, na propriedade da resistência mecânica à flexão. Contudo, pode-se afirmar que ambos fatores influenciam na resistência mecânica à flexão, pois apresentam valor de P significativo ( $p\text{-valor} \leq 0,05$ ), representando nível de confiança de 95%. A temperatura de sinterização apresentou uma confiabilidade de 99,999% e o teor de lama de cal apresentou confiabilidade de 99,37%. O fator de Fisher, demonstra que a temperatura de sinterização interfere mais significativamente na resistência mecânica à flexão, em que apresentou valor F de 51,077, superior ao valor F do teor de lama de cal com 10,599, mostrando assim, que a variável temperatura de sinterização, influencia mais significativamente na resistência mecânica à flexão das formulações. O coeficiente de determinação *R-square* foi de 0,83128.

Tabela 14 - Análise de variância para resistência mecânica à flexão.

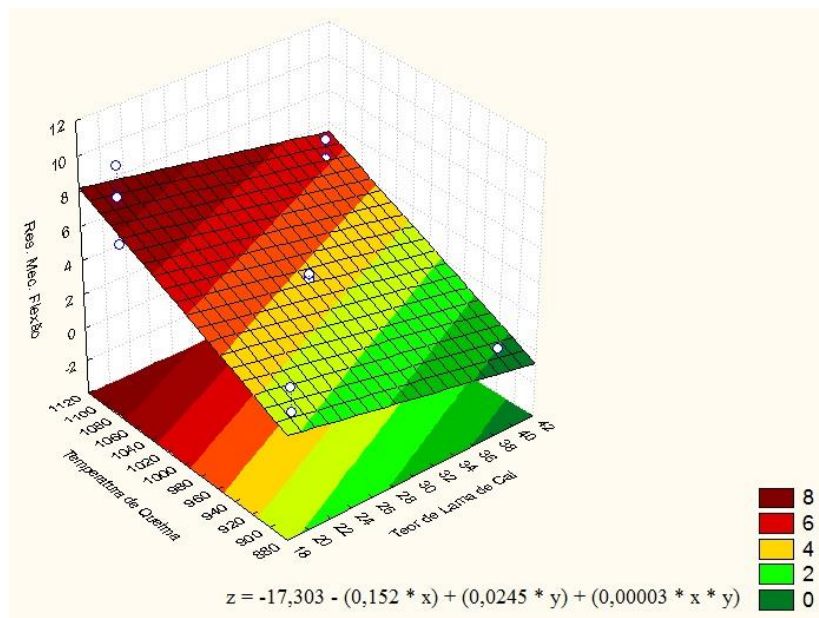
Fatores	SS	df	MS	F	p
(1) Teor de lama de cal	16,3515	1	16,35147	10,59987	0,006259
(2) Temperatura de sinterização	78,7927	1	78,7927	51,07749	0,000008
Relação entre (1) e (2)	0,0148	1	0,01483	0,00961	0,923395
Erro	20,0539	13	1,54261		
Total SS	118,8573	17			

SS: soma quadrática; df: graus de liberdade; MS: médias quadráticas; F: fator de Fisher; p: teste de confiabilidade.

Fonte: Do Autor (2019)

A Figura 41 apresenta o gráfico de superfície de resposta, que indica que quanto maior a temperatura de sinterização, maior a resistência mecânica à flexão.

Figura 41 - Superfície de resposta para a resistência mecânica à flexão.



Fonte: Do Autor (2019)

O modelo matemático que melhor explica o comportamento de resistência mecânica à flexão em relação ao teor de lama de cal e à temperatura de sinterização, de acordo com os intervalos avaliados, é o modelo de regressão quadrático, conforme Equação 6.

Equação 6

$$z = -17,303 - (0,152 \times x) + (0,0245 \times y) + (0,00003 \times x \times y)$$

Onde:

$z$  = resistência mecânica à flexão, em MPa;

$x$  = teor de lama de cal, em %;

$y$  = temperatura de sinterização, em °C.

A finalidade do presente trabalho é obter um corpo cerâmico poroso que apresente baixa densidade, baixa condutividade térmica, isolamento térmico adequado e apresente resistência mecânica apropriada para a fixação no sistema de fachada ventilada, manuseio e transporte. Geralmente, os materiais empregados no sistema de fachada ventilada são submetidos a esforços de flexão causados pelo vento, além do aspecto de segurança relacionado ao impacto. A flexibilidade de um corpo demonstra a sua resistência quando o mesmo é submetido ao mesmo tempo à compressão e à tração resultantes da aplicação de uma carga em sua superfície (IAMAGUTI, 2001). No caso das fachadas ventiladas, as placas revestem as fachadas de edificações e são fixadas por ancoragem metálica, sem argamassa; neste sentido, esforços de flexão e impacto causados pela ação do vento ou de chuva de granizo devem ser consideradas.

Em se tratando da porosidade, o maior valor da variável de resposta de todas as condições experimentais estudadas foi da F40T1100. Para Obada *et al.* (2016), cerâmicas porosas são geralmente entendidas como materiais com níveis de porosidade superiores a 30%. A condição experimental F40T1100, apresentou porosidade de 45,58%, caracterizando-a, portanto, como porosa.

Para a resistência mecânica à flexão, os maiores valores desta variável de resposta foram obtidos para as formulações F20 e F40

queimadas a 1100 °C. No Brasil, não se tem uma normativa específica para os elementos que compõe o sistema de fachadas ventiladas. Os revestimentos aplicados no sistema são utilizados também em outros setores da construção civil e suas propriedades não são voltadas para este uso em específico. Desta forma, não foi identificado um valor de resistência mecânica à flexão para ser tomado como referência.

Claramunt e Ardanuy (2017) relataram que para a aplicação de placas de cimento em fachadas ventiladas é necessário que a força aplicada a ser suportada por essas placas seja suficiente para tolerar ventos com pressão de 0,5 kN/m<sup>2</sup>, com um fator de segurança de 1,5. Para isto, placas quadradas de 100 cm x 100 cm x 1 cm deveriam apresentar no mínimo 9 MPa de resistência mecânica à flexão.

Noor-E-Khuda, Albermani e Veidt (2017) investigaram a aplicação da resistência mecânica à flexão de granitos em fachadas. Os resultados obtidos variaram de 7,74 a 16,77 MPa.

Para AECweb (2020), um material conhecido por sua versatilidade e que pode ser utilizado em fachadas ventiladas, paredes diafragmas, *brises* e afins, são as placas cimentícias, uma mistura de cimento Portland, agregados leves e aditivos, podendo também receber reforços de fibras, fios ou telas de fibra de vidro. Estas placas são agrupadas na classe A, indicadas para ambientes externos e classe B se limitando a ambientes internos e externos, desde que não haja exposição a intempéries. Cada classe é dividida conforme a resistência mecânica à flexão. No caso da classe A, as placas cimentícias estão atestadas com resistência mecânica à flexão de 4 a 13 MPa. Brasiplac (2020) e ECOPLAC (2020) são exemplos de indústrias que atuam no mercado da construção civil brasileiro de produção de placas cimentícias para esta aplicação e que

apresentam resistências mecânica à flexão, na condição saturada, de 5 MPa.

Como, neste trabalho, busca-se desenvolver uma placa cerâmica porosa para uso em sistemas de fachada ventilada, optou-se por definir a condição experimental F40T1100, ou seja, teor de lama de cal de 40% e temperatura de sinterização de 1100 °C, por apresentar o maior valor de porosidade 45,58% e um valor satisfatório de resistência mecânica à flexão de  $5,20 \pm 0,79$  MPa.

#### 4.3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA MELHOR CONDIÇÃO EXPERIMENTAL

A condição experimental F40T1100 foi avaliada com relação à porosidade, absorção de água, caracterização mecânica, caracterização ambiental, caracterização microestrutural e isolamento térmico.

##### 4.3.1 Porosidade e absorção de água

A Tabela 15 mostra que F40T1100 apresenta baixa densidade aparente, elevada absorção de água e porosidade elevada.

Tabela 15 - Valores de densidade aparente (Dap), porosidade (P) e absorção de água (Abs) da amostra F40T1100.

	Dap (g/cm <sup>3</sup> )	P (%)	Abs (%)
F40T1100	1,66 ±0,01	42,61 ±0,38	26,54 ±0,40

Fonte: Do Autor (2019)

### 4.3.2 Caracterização mecânica

Os corpos de prova F40T1100 apresentaram média de resistência mecânica à flexão de  $5,13 \pm 1,29$  MPa.

Além da resistência mecânica à flexão, o módulo de elasticidade dos corpos de prova F40T1100 foi avaliado. Esta propriedade está relacionada à rigidez do material ou a resistência do material à deformação elástica. Quanto maior for o módulo, mais rígido será o material. A presença de porosidade, trincas e partículas cristalinas de natureza diferente pode alterar o módulo de elasticidade do material. O aumento da porosidade de um corpo cerâmico deve levar à diminuição da rigidez, provocando a queda do módulo de elasticidade (DAL BÓ *et al.*, 2017).

Os corpos de prova F40T1100 apresentaram valores médios de módulo de elasticidade de  $6,73 \pm 1,75$  GPa. Os valores obtidos para o módulo de Young em testes com diversos produtos comerciais do tipo grês porcelanato variam de 66 a 74 GPa (LUZ; RIBEIRO, 2005). Assim, pode-se dizer que os corpos de prova F40T1100 são menos rígidos do que placas de grês porcelanato comerciais e, portanto, são mais quebradiços.

### 4.3.3 Caracterização ambiental

O ensaio ecotoxicológico utilizando *Allium cepa* L. (cebola) e *Lactuca sativa* L. (alface) como bioindicadores, como descrito no item 3.4.4, foi realizado para os corpos de prova F40T1100 e obteve-se pH = 11. Sendo assim, os corpos de prova da condição experimental F40T1100 podem ser considerados como não corrosivos, pois, segundo a ABNT NBR 10004:2004, uma amostra deve apresentar pH inferior ou igual a 2,

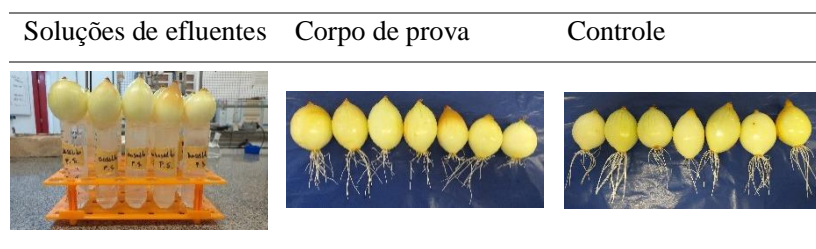
ou ser superior ou igual a 12,5 para ser considerado corrosivo (ABNT, 2004).

Para a análise de toxicidade da condição experimental F40T1100, foram utilizadas plantas superiores para analisar os efeitos subcrônicos.

Como parâmetro de confiabilidade, utilizou-se  $p < 0,05$  (95% de confiabilidade que o material seja tóxico se comparado com o grupo controle – água). A Tabela 9 mostra os níveis de confiabilidade conforme os pós-testes de Dunnet. Este parâmetro foi usado tanto para a *Allium cepa* L. (cebola) quanto para a *Lactuca sativa* L. (alface).

A Figura 42 demonstra as 7 *Allium cepa* L. (cebola) para o grupo controle e para o corpo de prova F40T1100 expostas ao efluente após 7 dias.

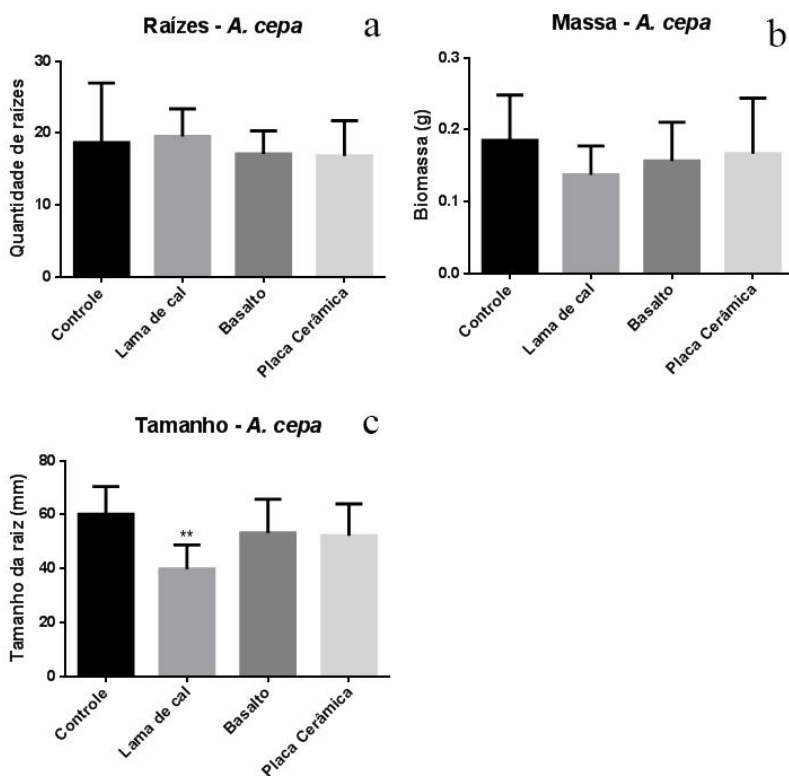
Figura 42 – Imagens das amostras após 7 dias em exposição ao efluente.



Fonte: Do Autor (2019)

Quando as *Allium cepa* L. (7 cebolas para a placa cerâmica e 7 para o grupo controle) foram expostas por 7 dias, o lixiviado do efluente não influenciou na germinação das sementes, ou seja, as raízes apresentaram crescimento comparável ao grupo controle, conforme mostrado na Figura 43a. O basalto e a lama de cal também obtiveram este comportamento.

Figura 43 – Gráficos dos efeitos tóxicos subcrônicos dos efluentes em bulbos de *Allium cepa* L. (cebola).



Fonte: Do Autor (2019)

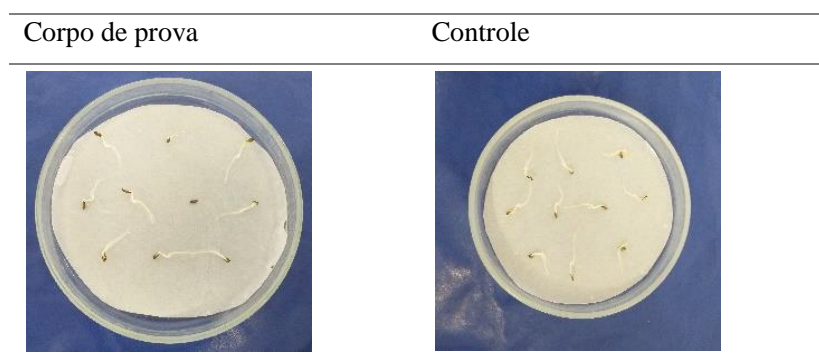
A massa apresentou uma leve diminuição, conforme mostrado na Figura 43b, porém apresentou melhores resultados aos apresentados pelo basalto e lama de cal.

Os melhores resultados estão mostrados na Figura 43c. As raízes dos recém-nascidos apresentaram diminuição no comprimento das raízes para o basalto, bem como para a lama de cal, quando comparados ao grupo controle. Segundo os parâmetros de confiabilidade, conforme os

pós-testes de Dunnet, apresentados na Tabela 9, a lama de cal também demonstrou ser tóxica com 99% (\*\*) de confiabilidade; assim, o efluente estudado poderia ser tóxico para plantas superiores. Quando a caracterização foi executada para o corpo de prova cerâmico da condição experimental F40T1100, as raízes dos recém-nascidos apresentaram uma leve diminuição no comprimento das raízes em comparação ao grupo controle, porém não apresentaram toxicidade. Desta forma, pode-se concluir que o corpo de prova cerâmico não é tóxico para plantas superiores.

A Figura 44 mostra as 10 sementes de *Lactuca sativa* L. para o grupo controle e para o corpo de prova expostas ao efluente após 3 dias.

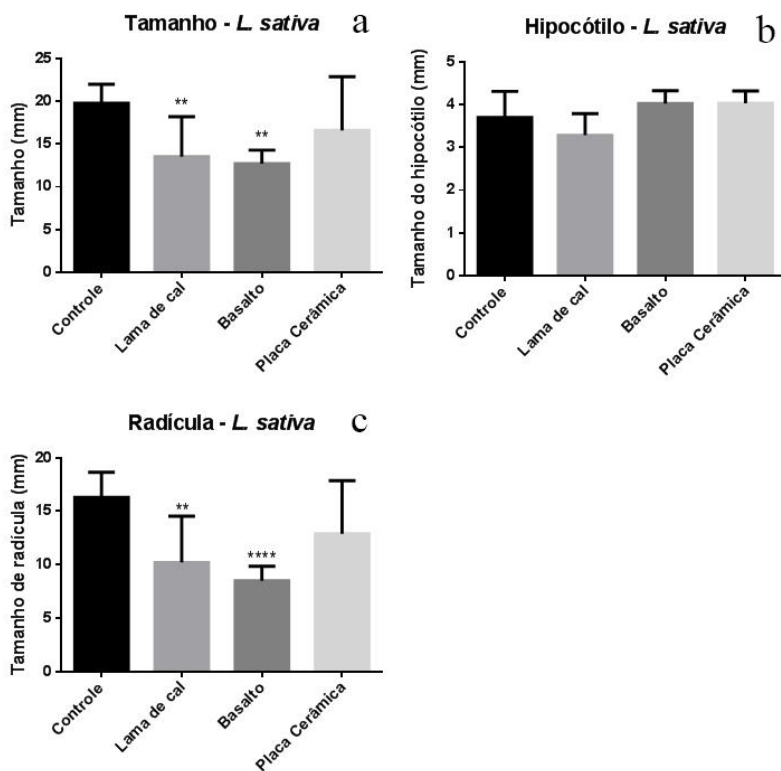
Figura 44 – Imagens das amostras após 3 dias em exposição ao efluente.



Fonte: Do Autor (2019)

A Figura 45 demonstra os efeitos tóxicos das *Lactuca sativa* L. (10 sementes para a placa cerâmica e 10 para o grupo controle) após serem expostas por 3 dias ao efluente.

Figura 45 – Gráficos dos efeitos tóxicos subcrônicos do efluente em sementes de *Lactuca sativa* L.



Fonte: Do Autor (2019)

Os resultados em termos de germinação das raízes para o basalto e a lama de cal permaneceram dentro dos parâmetros comparados ao grupo controle, porém em termos de crescimento, apresentaram uma diminuição principalmente nas radículas. A Figura 45c, mostra que a lama de cal apresentou ser tóxica com 99% (\*\*), e o basalto apresentou ser tóxico com 99,99% (\*\*\*\*), segundo os parâmetros de confiabilidade conforme os pós-testes de Dunnet, apresentados na Tabela 9. Porém, para o corpo

cerâmico F40T1100, houve apenas uma leve diminuição em termos de germinação das raízes e em termos de crescimento das radículas, se comparados ao do grupo controle e não apresentou toxicidade. Desta forma, pode-se concluir que o corpo de prova cerâmico não é tóxico para plantas superiores.

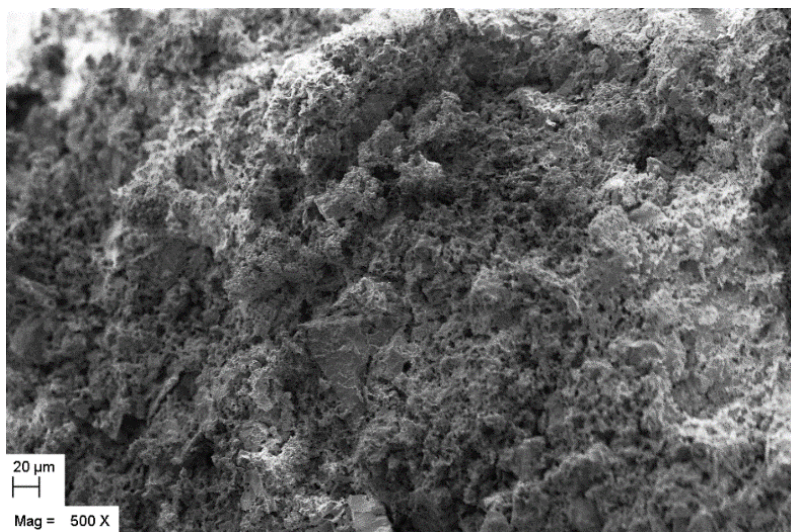
A proposta deste trabalho é substituir matéria-prima comercial por resíduos na composição de uma massa cerâmica porosa. Com este resultado, conclui-se que é possível dar uma aplicação a um resíduo considerado tóxico, obtendo-se como resultado uma placa cerâmica porosa que não apresenta índice de toxicidade considerável. Pode-se dizer, assim, que se obteve um resultado aceitável de imobilização dos resíduos empregados.

#### **4.3.4 Caracterização microestrutural**

A Figura 46 e a Figura 47 apresentam as micrografias (MEV) do corpo de prova cerâmico F40T1100.

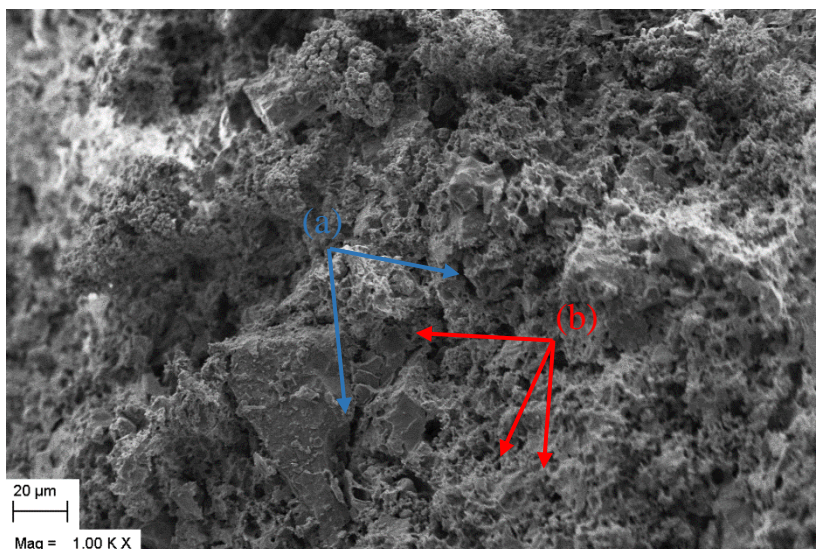
Com o objetivo de se analisar a porosidade do material, a ruptura do corpo de prova ocorreu por fratura. Por meio das imagens de MEV, é possível verificar que a microestrutura do corpo cerâmico é significativamente porosa. Isto ocorreu devido ao aprisionamento do  $\text{CO}_2$  no material durante a sinterização. A Figura 46 mostra que a microestrutura do corpo de prova é homogênea, com a presença de poros em toda a sua extensão.

Figura 46 - Imagem de MEV do corpo de prova F40T1100.



Fonte: Do Autor (2019)

Figura 47 - Imagem de MEV do corpo de prova F40T1100, com diferentes tipos de poros: (a) poros residuais decorrentes do processo de prensagem e (b) poros gerados a partir da descarbonatação do calcáreo.



Fonte: Do Autor (2019)

Na Figura 47 pode-se observar 2 tipos de poros na microestrutura do corpo de prova, os poros residuais, provenientes do processo de compactação (prensagem), que são poros irregulares, e os poros do processo da descarbonatação que possuem formato mais regular. Para estes, o formato e tamanho são semelhantes.

#### 4.3.5 Ensaio térmico

Segundo Vivaldini *et al.* (2014), a eficiência energética de isolantes térmicos cerâmicos pode ser definida pela condutividade térmica ( $k$ ) do material. A porosidade total é uma variável fundamental, pois quanto maior a fração volumétrica de poros, menor a condutividade térmica, causando um enorme efeito no comportamento térmico.

O ensaio de condutividade térmica da amostra F40T1100 apresentou valor de  $0,463 \pm 0,093$  W/mK. Para a amostra do porcelanato técnico esmaltado Eliane, a condutividade térmica obtida foi de  $1,439 \pm 0,167$  W/mK. Como esperado, o valor de  $k$  dos corpos cerâmicos porosos F40T1100 foi menor que o valor da amostra Eliane. Os valores de condutividade de materiais densos (baixa porosidade) são mais elevados (VIVALDINI *et al.*, 2014). A porosidade total, juntamente com a presença de trincas e defeitos em um material, reduz a condutividade térmica em relação a um sólido denso, sobretudo devido ao valor muito baixo de condutividade térmica do ar ( $0,02$  W/mK) (CALLISTER, JR., 2008). No caso de isolantes porosos, valores adequados de condutividade podem ser considerados abaixo de  $0,4$  W/mK (VIVALDINI *et al.*, 2014).

Os ensaios com o aparato térmico (cabine) desenvolvido neste trabalho busca avaliar o desempenho térmico dos materiais estudados. Foram realizados ensaios para a fachada convencional, fachada ventilada:

amostras – Eliane e fachada ventilada: amostras – F40T1100 (amostras em estudo).

A Tabela 16 mostra os resultados das médias das temperaturas dos termopares calibrados, com os resultados das médias das temperaturas para os ensaios com a fachada convencional e com as fachadas ventiladas, com as três distâncias testadas (5, 7,5 e 10 cm) entre a parede de gesso e a estrutura metálica, perfazendo-se o efeito chaminé, conforme Figura 20. Estas distâncias foram testadas a fim de se avaliar o desempenho do sistema com o aumento da câmara de ar.

Os resultados obtidos do ensaio com o sistema de fachada convencional foram utilizados como referência para comparação de dados em relação aos dados obtidos dos ensaios com o sistema de fachada ventilada. Os resultados obtidos do ensaio da fachada ventilada, com as amostras Eliane, serviram como referência para a comparação de dados em relação aos dados obtidos do ensaio com o sistema de fachada ventilada com as amostras Eliane.

Tabela 16 - Resultados das médias das temperaturas (°C) coletadas do FieldLogger – DataLogger para os três ensaios realizados com a cabine e a estufa.

Ensaio realizado	Distância (cm)	T1	T2	T3	T4	T5
		estufa	revestimento	chaminé	parede gesso	caixa madeira
Fachada convencional	-	83,8 ±5,7	-	-	67,3 ±1,9	34,7 ±0,2
Fachada ventilada: amostras Eliane	5	80,4 ±5,7	57,2 ±2,0	20,7 ±0,8	26,2 ±0,5	24,2 ±0,3
	7,5	80,4 ±5,8	58,0 ±2,1	20,1 ±0,8	25,3 ±0,5	24,8 ±0,3
	10	81,1 ±6,0	57,4 ±2,2	20,2 ±0,6	25,2 ±0,5	24,9 ±0,1
Fachada ventilada: amostras F40T1100	5	85,1 ±5,3	57,7 ±1,9	22,2 ±0,8	23,0 ±0,9	19,9 ±0,3
	7,5	85,6 ±5,6	57,4 ±1,9	21,0 ±1,0	22,8 ±0,7	20,1 ±0,1
	10	87,0 ±6,2	58,1 ±2,0	20,8 ±0,9	25,5 ±1,0	20,4 ±0,3

T: média da temperatura referente para cada termopar (°C)

Fonte: Do Autor (2019)

A partir dos resultados das médias das temperaturas de cada termopar, foi possível calcular a variação para a temperatura do termopar T2 – revestimento, T4 – parede gesso e T5 – caixa madeira, conforme Tabela 17. A variação ( $\Delta$ ) representa a redução de temperatura de cada um destes termopares em relação a temperatura do termopar T1 – estufa. Quanto maior a redução de temperatura, melhor o desempenho térmico da condição empregada.

A transferência de calor entre os corpos de prova (medida através do T2) e a parede de gesso (medido através do T4) ocorre principalmente por radiação térmica. Quanto maior a temperatura, maior a quantidade de calor que o objeto irradia. O aumento da distância entre um material e a fonte de calor diminui a radiação. Com os valores mostrados na Tabela 17, é possível identificar uma tendência de aumento de  $\Delta$  (redução) das temperaturas dos termopares T2, T4 e T5 à medida que a distância entre a parede de gesso e a estrutura metálica aumenta de 5 para 10 cm. Entretanto, estatisticamente, os valores médios são os mesmos. Portanto, pode-se concluir que para os ensaios executados, a variável distância entre a parede de gesso e a estrutura metálica (onde caracteriza-se como sendo a câmara de ar) não é significativa para que seja alcançado melhor desempenho térmico em uma edificação. Para ser significativa, a distância teria que ser aumentada. Em condições reais, o aumento da distância da câmara de ar implicaria numa estrutura metálica mais robusta para suportar o sistema de fachada ventilada, gerando custos e desperdício de área útil no terreno. Portanto, para análise dos gráficos seguintes, utilizou-se como padrão apenas a distância de 5 cm entre a estrutura metálica e a parede de gesso, condição esta, em que se alcança menores custos econômicos.

Tabela 17 - Resultado dos  $\Delta$  das temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) de T2, T4 e T5 em função da temperatura T1.

Ensaio realizado	Dist. (cm)	T1 estufa	T2 revest.	T4 parede gesso	T5 caixa madeira	$\Delta\text{T2}$ revest.	$\Delta\text{T4}$ parede gesso	$\Delta\text{T5}$ caixa madeira
FT	-	83,8 $\pm$ 5,7	-	67,3 $\pm$ 1,9	34,7 $\pm$ 0,2	-	16,4	49,1
Fachada ventilada:	5	80,4 $\pm$ 5,7	57,2 $\pm$ 2,0	26,2 $\pm$ 0,5	24,2 $\pm$ 0,3	23,2	54,2	56,2
amostras Eliane	7,5	80,4 $\pm$ 5,8	58,0 $\pm$ 2,1	25,3 $\pm$ 0,5	24,8 $\pm$ 0,3	22,4	55,1	55,6
	10	81,1 $\pm$ 6,0	57,4 $\pm$ 2,2	25,2 $\pm$ 0,5	24,9 $\pm$ 0,1	23,7	55,8	56,1
Fachada ventilada:	5	85,1 $\pm$ 5,3	57,7 $\pm$ 1,9	23,0 $\pm$ 0,9	19,9 $\pm$ 0,3	27,4	62,1	65,2
amostras F40T1100	7,5	85,6 $\pm$ 5,6	57,4 $\pm$ 1,9	22,8 $\pm$ 0,7	20,1 $\pm$ 0,1	28,2	62,8	65,5
	10	87,0 $\pm$ 6,2	58,1 $\pm$ 2,0	25,5 $\pm$ 1,0	20,4 $\pm$ 0,3	28,9	61,5	66,6

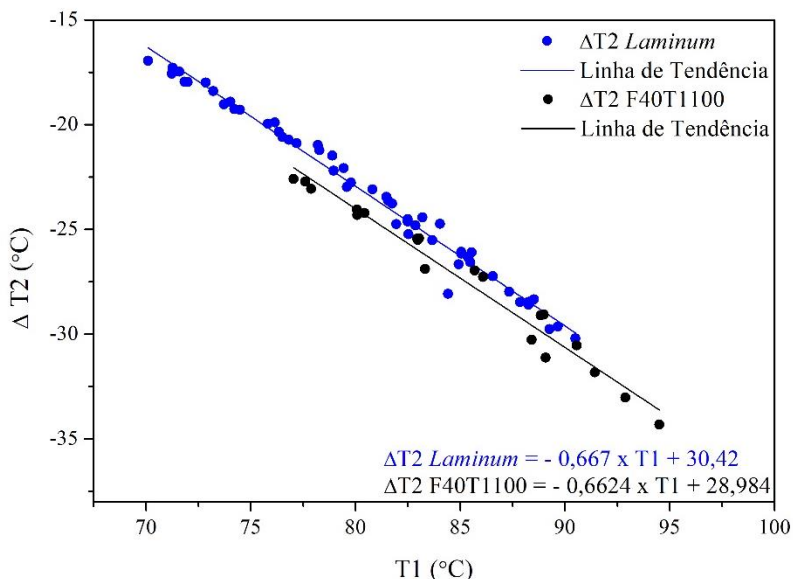
T: temperatura referente para cada termopar ( $^{\circ}\text{C}$ ), Dist.: distância

Fonte: Do Autor (2019)

A transferência de calor nos corpos de prova F40T1100 e nas amostras da Eliane ocorre por condução. Segundo Vivaldini *et al.* (2014), a condução de um material pode ser reduzida, em altas temperaturas, por meio da introdução de poros. Analisando-se o  $\Delta$  (redução) das médias das temperaturas do termopar T2 – revestimento dos ensaios de fachada ventilada das amostras Eliane e das amostras F40T1100, observou-se que a maior redução na temperatura externa do revestimento em função da temperatura da estufa, ocorreu nas amostras F40T1100, com valor de 28,2 °C. As amostras Eliane obtiveram média de 23,1 °C, podendo-se concluir que os corpos cerâmicos porosos F40T1100 atuam de forma mais eficiente no isolamento térmico que as amostras da Eliane (material denso). Esta conclusão vem ao encontro dos respectivos valores de condutividade térmica.

A Figura 48 mostra os resultados de  $\Delta$  (redução) das temperaturas do termopar T2 – revestimento para as amostras F40T1100 e para as amostras Eliane em função da temperatura da estufa (T1 – estufa). Através da linha de tendência, é possível verificar que a redução de temperatura é maior para as amostras F40T1100, demonstrando, assim, que a transferência de calor por condução das amostras F40T1100 é menor do que as apresentadas pelas amostras Eliane.

Figura 48 - Resultados de  $\Delta$  das temperaturas do termopar T2 – revestimento para as amostras F40T1100 e para as amostras Eliane *Laminum* em função da temperatura da estufa (T1 – estufa).

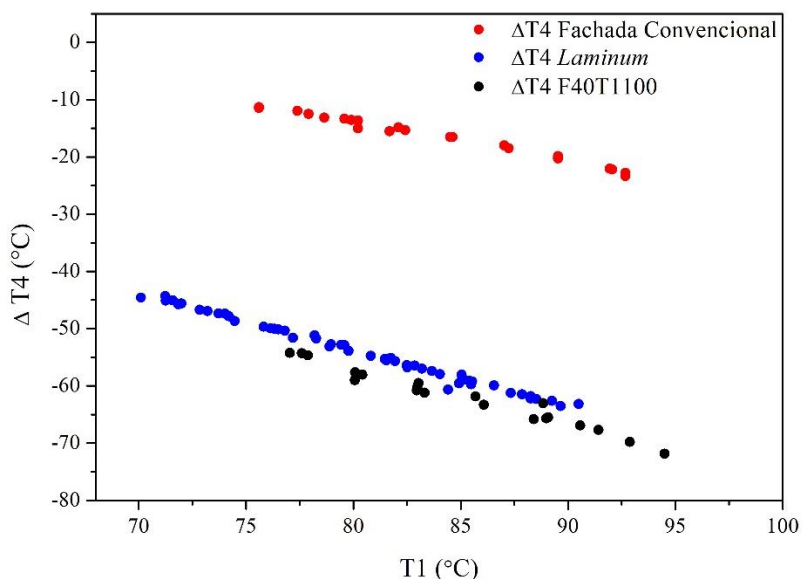


Fonte: Do Autor (2019)

Comparando-se o  $\Delta$  das médias das temperaturas da superfície da parede de gesso (T4 - parede gesso) para os ensaios realizados com a fachada ventilada: amostras – Eliane e fachada ventilada: amostras - F40T1100 com o ensaio fachada convencional, conforme Tabela 17, observa-se que, como esperado, ocorreu maior redução da temperatura da parede de gesso com a existência da fachada ventilada. A redução da temperatura da parede de gesso em função da temperatura da estufa com o ensaio fachada convencional, foi de apenas 16,4 °C e a redução das médias de temperatura para os ensaios com a fachada ventilada são de 55,1 °C para as amostras da Eliane e 62,1 °C para as amostras com os corpos cerâmicos porosos F40T1100.

A Figura 49 mostra os valores de  $\Delta$  das temperaturas da parede de gesso (T4) em função da temperatura da estufa (T1), em que a redução das temperaturas do ensaio fachada convencional apresentam-se bem abaixo das temperaturas do ensaio com as fachada ventiladas, demonstrando-se, assim, o melhor desempenho térmico do uso da fachada ventilada em edificações.

Figura 49 - Resultados dos  $\Delta$  das temperaturas do termopar T4 – parede gesso para a fachada convencional, fachada ventilada: amostras Eliane *Laminum* e fachada ventilada: amostras F40T1100, em função da temperatura da estufa (T1 – estufa).

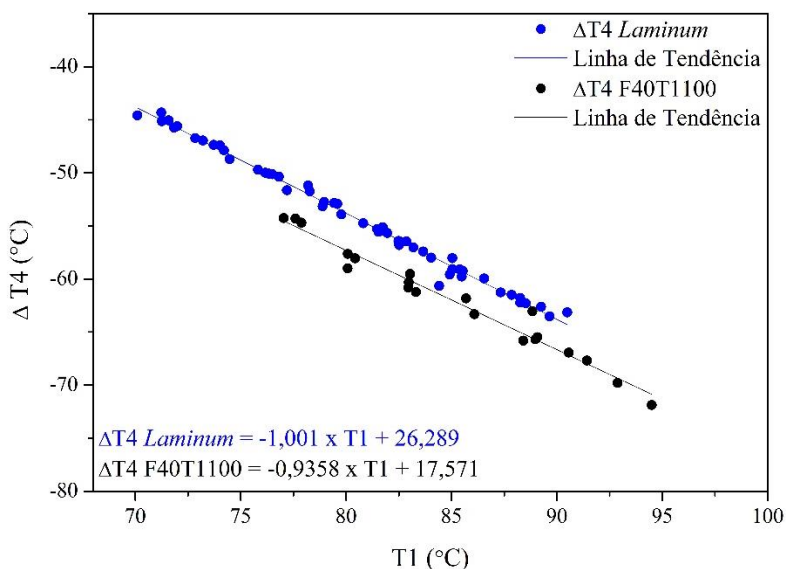


Fonte: Do Autor (2019)

A Figura 50 mostra os resultados das temperaturas da parede de gesso para o ensaio com a fachada ventilada: amostras – Eliane e fachada ventilada: amostras – F40T1100, com as respectivas linhas de tendência. Pode-se concluir que a redução das médias das temperaturas da parede de

gesso em função da temperatura da estufa é ainda maior para o ensaio da fachada ventilada: amostras – F40T1100, comprovando, assim, que os corpos cerâmicos porosos F40T1100 apresentam melhor desempenho de isolamento que as amostras do porcelanato Eliane.

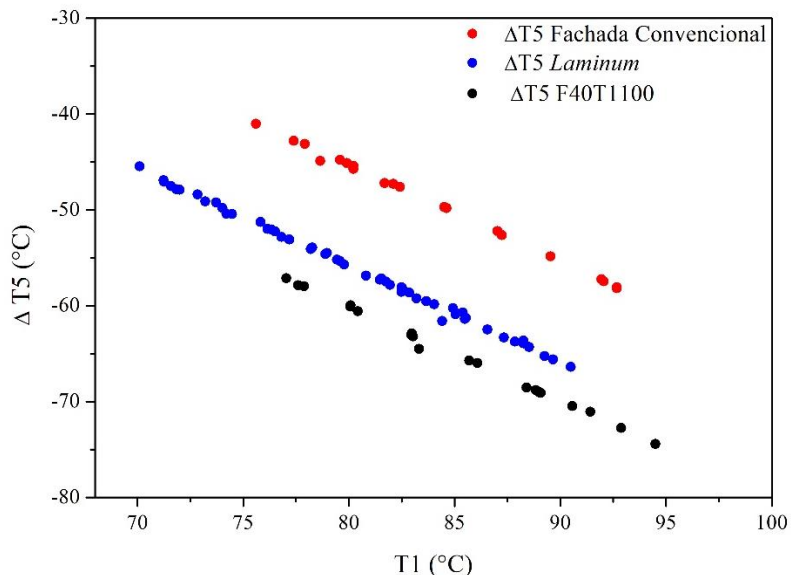
Figura 50 - Resultados dos  $\Delta$  das temperaturas do termopar T4 – parede gesso para as fachadas ventiladas: amostras Eliane *Laminum* e amostras F40T1100, em função da temperatura da estufa (T1 – estufa).



Fonte: Do Autor (2019)

A Figura 51 demonstra os valores dos  $\Delta$  das temperaturas do termopar T5 - caixa madeira para os ensaios fachada convencional e fachadas ventiladas.

Figura 51 - Resultados dos  $\Delta$  das temperaturas do termopar T5 – caixa madeira para a fachada convencional, fachada ventilada: amostras Eliane *Laminum* e fachada ventilada: amostras F40T1100, em função da temperatura da estufa (T1 – estufa).



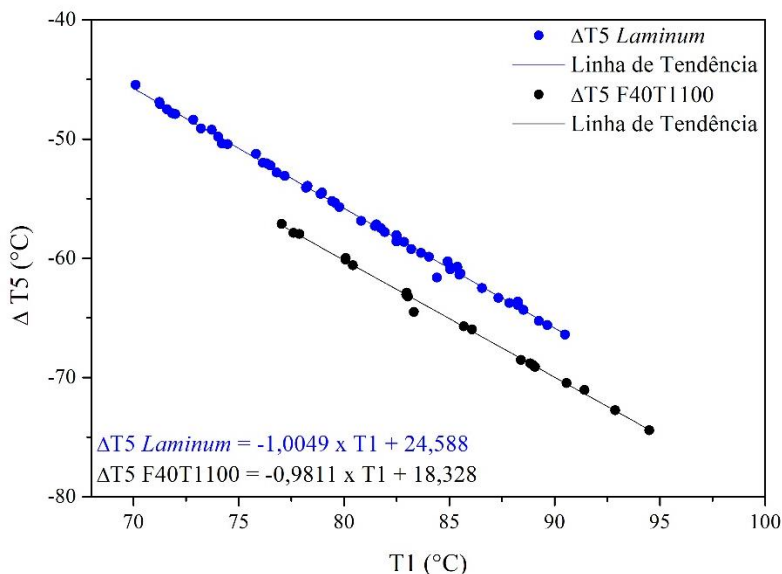
Fonte: Do Autor (2019)

Analisando-se as médias das temperaturas internas da caixa de madeira com o termopar T5 – caixa madeira, expostas na Tabela 17, juntamente com os dados do gráfico elencado na Figura 51, para os ensaios realizados com a fachada ventilada: amostras – Eliane, a fachada ventilada: amostras - F40T1100 e com o ensaio fachada convencional, observou-se que, ocorreu uma redução significativa da temperatura da caixa de madeira com a existência da fachada ventilada, o que já era o esperado. A redução da temperatura da caixa madeira em função da temperatura da estufa com o ensaio fachada convencional, foi de 49,1 °C, as médias de temperatura para o ensaio com a fachada ventilada: amostras

Eliane foi de 56,0 °C e para amostras F40T1100 a média de redução de temperatura foi de 65,7 °C, conforme a Tabela 17. Pode-se concluir que o sistema de fachada ventilada melhora o desempenho térmico do sistema em relação à fachada com o sistema tradicional. O conforto térmico da caixa de madeira com a fachada ventilada é maior do que com a fachada convencional.

A Figura 52 mostra os resultados dos  $\Delta$  das temperaturas do termopar T5 – caixa madeira, com suas devidas linhas de tendência, para os ensaios de fachada ventilada, com as amostras Eliane e com as amostras F40T1100. Os dados evidenciam que a redução das médias das temperaturas da caixa de madeira com o ensaio com as amostras F40T1100 é mais elevada do que com o ensaio com as amostras do porcelanato Eliane, demonstrando-se assim, que os corpos cerâmicos porosos F40T1100 proporcionam a caixa de madeira temperaturas mais agradáveis, comprovando a propriedade de isolante térmico, oferecendo conforto térmico ao ambiente.

Figura 52 - Resultados dos  $\Delta$  das temperaturas do termopar T4 – parede gesso para as fachadas ventiladas: amostras Eliane *Laminum* e amostras F40T1100, em função da temperatura da estufa (T1 – estufa).



Fonte: Do Autor (2019)

Conclui-se que o ensaio térmico com a cabine mostrou que ocorreu maior redução da temperatura no uso do sistema de fachada ventilada em relação a fachada convencional em edificações. Os resultados referentes à redução da temperatura da parede de gesso (que simula a parede externa em alvenaria de uma edificação), em função da temperatura da estufa, mostram que ocorreu conforto térmico de 235,98% da fachada ventilada com as amostras da Eliane e 278,66% da fachada ventilada com as amostras F40T1100 em relação a fachada convencional. Os resultados da redução de temperatura da caixa madeira 02 (caixa de madeira que simula um cômodo dentro de uma edificação), em função da temperatura da estufa, evidenciam que ocorreu redução da temperatura dentro da caixa

de 14,05% da fachada ventilada com as amostras da Eliane e 33,81% da fachada ventilada com as amostras F40T1100 em relação a fachada convencional. Os corpos cerâmicos porosos F40T1100 atuam de forma mais eficientes no isolamento térmico que as amostras da Eliane. As amostras F40T1100 apresentam melhor desempenho em 22,07% em isolamento térmico em relação as amostras da Eliane. Os resultados referentes a redução da temperatura da parede de gesso em relação a temperatura da estufa mostram que os corpos cerâmicos F40T1100 apresentaram conforto térmico de 12,89% em relação as amostras Eliane. Os resultados da redução da temperatura da caixa de madeira 02 em função da temperatura da estufa demonstram que ocorreu redução de temperatura de 17,32% dos corpos cerâmicos F40T1100 em relação as amostras da Eliane.



## 5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como propósito produzir uma placa cerâmica porosa, utilizando basalto e lama de cal, a ser implantado no sistema de fachadas ventiladas.

As análises química e física realizadas nos resíduos confirmaram a potencialidade de substituição das matérias-primas comerciais, diminuindo o custo do material. Para uma composição cerâmica de referência, foi proposto substituir 100% do feldspato pelo resíduo de basalto. Desta forma, a composição das formulações-base foi testada com a adição de 45% do resíduo. A incorporação de lama de cal na formulação-base de 20, 30 e 40% também se mostrou promissora, pois foi obtido a porosidade esperada com este resíduo nos corpos de prova estudados, proporcionando ao material leveza e conforto térmico.

A análise estatística dos dados mostrou que o teor de lama de cal influencia mais significativamente sobre a porosidade do material do que a temperatura de sinterização. Comparando-se os resultados das formulações estudadas, obteve-se um aumento de aproximadamente 16,09% na porosidade da condição experimental F20T900 para F40T900 e um aumento aproximado de 17,38% na porosidade de F20T1100 para F40T1100. O aumento na porosidade de F20T900 para F20T1100 foi de 5,52% e 6,69% de F40T900 para F40T1100.

A resistência mecânica à flexão foi influenciada mais significativamente pela temperatura de sinterização do que pelo teor de lama de cal. O aumento de resistência mecânica à flexão da condição experimental F20T900 para F20T1100 foi de 210,83%, e o aumento da resistência mecânica à flexão de F20T900 para F40T1100 foi de

116,66%. É importante ressaltar que a resistência mecânica à flexão foi reduzida por causa da incorporação da lama de cal, pois ocorreu aumento de vazios na estrutura.

Considerando os objetivos definidos, formulação que apresentou a melhor relação porosidade/resistência mecânica à flexão foi a condição experimental F40T1100, isto é, com 40% de lama de cal e temperatura de sinterização de 1100 °C. Obteve-se porosidade total de 42,61%, densidade aparente de 1,66 g/cm<sup>3</sup>, absorção de água de 26,54% e resistência mecânica à flexão de 5,13 ±1,29 MPa. Os resultados do ensaio ecotoxicológico não atestaram toxicidade, podendo-se dizer que se obteve um resultado aceitável de imobilização dos resíduos empregados.

O ensaio térmico com a cabine desenvolvida para se avaliar o desempenho térmico de cada placa, mostrou que quando analisados os resultados em termos de diferença de temperatura entre o interior da estufa e a simulação de um cômodo dentro de uma edificação, ocorreu maior redução da temperatura com o uso do sistema de fachada ventilada com as amostras em estudo F40T100 ( $\Delta T_5 = 65,7$  °C), em comparação ao sistema de fachada ventilada com as amostras comercial - Eliane ( $\Delta T_5 = 56$  °C) e em relação à fachada convencional ( $\Delta T_5 = 49,1$  °C). Os resultados mostraram que a condução de calor do material F40T1100 é menor que o da amostra comercial testada. Quando analisados em termos de diferença de temperatura entre a face analisada e a temperatura interna da estufa, o resultado das médias  $\Delta T_2$  da amostra F40T1100 apresentou valor de 25,1 °C e as amostras Eliane, que foram utilizadas como referência para comparação de dados, apresentou valor de 23,1 °C, representando, assim, melhor desempenho em isolamento térmico. Isto vem ao encontro dos valores de condutividade térmica, que apresentou

média de  $0,463 \pm 0,093$  W/mK, menor que a amostra do porcelanato referência, com  $1,439 \pm 0,167$  W/mK. A condução de calor foi reduzida por meio da introdução de poros.

Portanto, os resíduos utilizados nesta pesquisa mostraram-se potenciais para a substituição de matérias-primas comerciais na produção de uma placa cerâmica porosa, a ser implantado no sistema de fachadas ventiladas.



## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização da presente pesquisa, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Alternativas para possibilitar o aumento da resistência mecânica à flexão do corpo de prova cerâmico da melhor condição experimental;
- Investigar a distribuição, morfologia e tamanho dos poros formados com a formulação F40T1100 e aprimorar as técnicas para o controle da formação dos poros;
- As placas cerâmicas aplicadas em fachadas ventiladas recebem um reforço composto, constituído por uma tela de fibra de vidro e resina polimérica aderida a placa cerâmica, a sugestão seria o emprego de uma fibra natural para este fim.
- Avaliar as propriedades de isolamento acústico do material em estudo.
- Uma vez que a placa desenvolvida no atual trabalho tem como característica a porosidade, a proposta seria novas técnicas de impermeabilização, eliminando problemas com umidade.



## REFERÊNCIAS

ABU SAFIAH, M. O.; HAMZAWY, E. M. A. Nanometre pyroxenic glass-ceramics prepared by crystallization of Saudi basalt glass. **Ceramics International**, v. 45, n. 4, p. 4482–4486, 1 mar. 2019.

AECWEB. **Placas cimentícias podem ser associadas a sistemas de construção a seco** | AECweb. Disponível em: <[https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/placas-cimenticias-podem-ser-associadas-a-sistemas-de-construcao-a-seco\\_6596\\_10\\_0](https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/placas-cimenticias-podem-ser-associadas-a-sistemas-de-construcao-a-seco_6596_10_0)>. Acesso em: 25 jan. 2020.

AKIYOSHI, M. M. et al. Condutividade térmica e sua correlação com a temperatura e a massa específica volumétrica de materiais refratários sílico-aluminosos e aluminosos. **Cerâmica**, v. 47, n. 301, p. 19–27, mar. 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 631-93a: Standard terminology of building constructions**. [s.l: s.n.].

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7984-16: Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument**. [s.l: s.n.].

ANDRADE, L. F.; DAVIDE, L. C.; GEDRAITE, L. S. The effect of cyanide compounds, fluorides, aluminum, and inorganic oxides present in spent pot liner on germination and root tip cells of *Lactuca sativa*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 73, n. 4, p. 626–631, maio 2010.

ANEPAC. **Mercado: Perspectivas para o setor de agregados**. Disponível em: <<https://www.anepac.org.br/agregados/mercado>>. Acesso em: 5 set. 2019.

ANFACER. **História da Cerâmica**. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/historia-ceramica>>. Acesso em: 30 ago. 2019.

ARCARO, S. et al. Isolantes térmicos produzidos a partir de resíduos sólidos industriais. **Cerâmica**, v. 62, n. 361, p. 32–37, 1 jan. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: [s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13816: Placas cerâmicas para revestimento - Terminologia.** Rio de Janeiro: [s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13817: Placas cerâmicas para revestimento - Classificação.** Rio de Janeiro: [s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro: [s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos Gerais.** Rio de Janeiro: [s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10821: Caixilhos para edificação - Janelas.** Rio de Janeiro: [s.n.].

BARBA, A. et al. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas.** 1ª ed. Castellón. España: [s.n.].

BORTOLOTTI, T. et al. Evaluation of toxic and genotoxic potential of a wet gas scrubber effluent obtained from wooden-based biomass furnaces: A case study in the red ceramic industry in southern Brazil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 143, p. 259–265, 1 set. 2017.

BRAINARD ABRAHAM, C. et al. Basalt fibre reinforced aluminium matrix composites – A review. **Materials Today: Proceedings**, jul. 2019.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178–189, 2015.

BRASIPLAC. **BrasiPlac Placa Cimentúcia - Manual Técnico.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <

content/uploads/2012/09/Catálogo-Placas-Cimentícias-Brasiplac-Plus.pdf>.

Acesso em: 25 jan. 2020.

BRITANNICA, E. **Augite mineral** | **Britannica.com**. Disponível em:

<<https://www.britannica.com/science/augite>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

CALLISTER, JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

CHÁVEZ GUERRERO, L. et al. Synthesis and characterization of calcium hydroxide obtained from agave bagasse and investigation of its antibacterial activity. **Revista Internacional de Contaminacion Ambiental**, v. 33, n. 2, p. 347–353, 2017.

CHEN, X. et al. Study of melting properties of basalt based on their mineral components. **Composites Part B: Engineering**, v. 116, p. 53–60, 1 maio 2017.

CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M. Using vegetable fiber nonwovens cement composites as sustainable materials for applications on ventilated façade systems. In: **Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites**. [s.l.] Elsevier Inc., 2017. p. 385–397.

COLINART, T.; BENDOUMA, M.; GLOUANNEC, P. Building renovation with prefabricated ventilated façade element: A case study. **Energy and Buildings**, v. 186, p. 221–229, 1 mar. 2019.

CORRÊA, T. H. A. et al. Novel nano-sized biphasic calcium phosphate bioceramics ( $\beta$ -CPP/ $\beta$ -TCP) derived of lime mud waste. **Materials Letters**, v. 243, p. 17–20, 15 maio 2019.

COSTA, L. M. M.; SAKIHAMA, J.; SALOMÃO, R. Characterization of porous calcium hexaluminate ceramics produced from calcined alumina and microspheres of Vaterite ( $\mu$ -CaCO<sub>3</sub>). **Journal of the European Ceramic Society**, v. 38, n. 15, p. 5208–5218, 1 dez. 2018.

DAL BÓ, M. et al. An estimate of quartz content and particle size in porcelain

tiles from young's modulus measurements. **Ceramics International**, v. 43, n. 2, p. 2233–2238, 1 fev. 2017.

DONDI, M.; RAIMONDO, M.; ZANELLI, C. Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification. **Applied Clay Science**, v. 96, p. 91–109, 2014.

ECOPLAC. **Ecoplac Cimentícia Decorlit - Manual Técnico**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://divifloor.com.br/uploads/5/5/4/8/55486095/manual-tecnico\\_ecoplac\\_placa-cimenticia-11-13.pdf](http://divifloor.com.br/uploads/5/5/4/8/55486095/manual-tecnico_ecoplac_placa-cimenticia-11-13.pdf)>. Acesso em: 25 jan. 2020.

ELIANE. **Eliane Tec**. Disponível em: <<https://elianetec.com/projetos/fachadas-ventiladas>>. Acesso em: 27 ago. 2019.

EMBEY-ISZTIN, A. Basaltic volcanism on the terrestrial planets: a window to planetary interiors. **Physical Geography Series DEBRECEN**, v. 2, p. 53–57, 2007.

ENTE NAZIONALE ITALIANO DI UNIFICAZIONE. **UNI 11018: Rivestimenti e sistemi di ancoraggio per facciate ventilate a montaggio meccanico - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione - Rivestimenti lapidei e ceramici**. [s.l: s.n.].

FARAGE, R. M. P. et al. Intermediate covering of municipal solid waste landfills with alkaline grits, dregs and lime mud by-products of kraft pulp production. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 117985, dez. 2019.

FONSECA, M. H. DE F. et al. Estudo da influência da porosidade em materiais cerâmicos. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, p. 1341–1352, 2016.

FRANCISCO MARCIANO MOTTA, J. et al. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte II: Os Minerais Industriais e as Massas da Cerâmica Tradicional. **Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 1, 2002.

GILL, R. **Rochas e Processos Ígneos: Um Guia Prático**. Londres: [s.n.].

GONÇALVES, A.; LOPES, R. Analysis of the system of ventilated facades

in residential buildings. **Journal of Exact Sciences-JES**, v. 21, n. 2, p. 5–11, 2019.

HAMMEL, E. C.; IGHODARO, O. L. R.; OKOLI, O. I. Processing and properties of advanced porous ceramics: An application based review. **Ceramics International**, v. 40, n. 10, p. 15351–15370, 1 dez. 2014.

HAN, L. et al. Foam-gelcasting preparation, microstructure and thermal insulation performance of porous diatomite ceramics with hierarchical pore structures. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 37, n. 7, p. 2717–2725, 1 jul. 2017.

HAO, L. et al. Preparation and characterization of porous ceramics with low-grade diatomite and oyster shell. **Materials Chemistry and Physics**, v. 235, 1 set. 2019.

HUBADILLAH, S. K. et al. Effect of kaolin particle size and loading on the characteristics of kaolin ceramic support prepared via phase inversion technique. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 4, n. 2, p. 164–177, 1 jun. 2016.

HUNTERDOUGLAS. **Hunter Douglas Architectural**. Disponível em: <<https://www.hunterdouglas.com.br/ap/enews/sh/terrart-nbk>>. Acesso em: 27 ago. 2019.

IAMAGUTI, A. P. S. **Manual de rochas ornamentais para arquitetos**. São Paulo: [s.n.].

IBÁ. **Setor de base florestal investiu R\$ 7,2 bilhões em 2017**. Disponível em: <<https://www.iba.org/setor-de-base-florestal-investiu-r-7-2-bilhoes-em-2017>>. Acesso em: 11 set. 2019.

JENA, S. K.; DASH, N.; RATH, S. S. Effective utilization of lime mud for the recovery of potash from mica scraps. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 64–76, 10 set. 2019.

KREBS, C. L. M. **Possibilidades para o emprego do sistema de fachada ventilada opaca em edifícios comerciais nas oito zonas bioclimáticas do**

**Brasil.** [s.l: s.n.].

LI, L. G. et al. Basalt fibre-reinforced mortar: Rheology modelling based on water film thickness and fibre content. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116857, dez. 2019.

LUZ, A. P.; RIBEIRO, S. Comportamento mecânico de amostras de grês porcelanato contendo resíduo de vidro como fundente. **49º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, p. 1–12, 2005.

MACIEL, A. C. F.; CARVALHO, M. T. Operational energy of opaque ventilated façades in Brazil. **Journal of Building Engineering**, v. 25, 1 set. 2019.

MAURATH, J.; WILLENBACHER, N. 3D printing of open-porous cellular ceramics with high specific strength. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 37, n. 15, p. 4833–4842, 1 dez. 2017.

MENDES, T. M.; MORALES, G.; REIS, P. J. Use of basaltic waste as red ceramic raw material. **Cerâmica**, v. 62, n. 362, p. 157–162, 1 abr. 2016.

MILAK, G. B. et al. Efeito da temperatura de sinterização e da adição de fibras poliméricas em cerâmica porosa obtida a partir de resíduos do processo Kraft. **Cerâmica**, v. 65, n. 375, p. 416–425, set. 2019.

MORAIS, A. A. C. et al. Análise comparativa da brita calcária, beneficiada de diferentes formas, para utilização em concreto como agregado graúdo. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2016.

MÜLLER, A.; ALARCON, O. E. Desenvolvimento de um sistema de fachada ventilada com placas cerâmicas de grês porcelanato voltado para a construção civil do Brasil. **Cerâmica**, v. 51, n. 320, p. 354–361, 2006.

NGAYAKAMO, B.; PARK, S. E. Evaluation of Tanzania local ceramic raw materials for high voltage porcelain insulators production. **Cerâmica**, v. 64, n. 372, p. 570–576, 1 out. 2018.

NOOR-E-KHUDA, S.; ALBERMANI, F.; VEIDT, M. Flexural strength of

weathered granites: Influence of freeze and thaw cycles. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 891–901, 15 dez. 2017.

OBADA, D. O. et al. Potentials of fabricating porous ceramic bodies from kaolin for catalytic substrate applications. **Applied Clay Science**, v. 132–133, p. 194–204, 1 nov. 2016.

OLIVEIRA, A. P. N. DE; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2 ed. rev. ed. Florianópolis: [s.n.].

OLIVEIRA, V. M. C. A.; VIDAL, A. B.; RIBEIRO, S. Efeitos da temperatura de queima nas propriedades de cerâmicas produzidas a partir de um rejeito argiloso. **56º Congresso Brasileiro de Cerâmica 1º Congresso Latino-Americano de Cerâmica IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials**, p. 2152–2163, 2012.

PACHLA, E. et al. Desempenho térmico-acústico-mecânico de um compósito de matriz cimentícia leve reforçado com casca de arroz. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, 2019.

PAVLOVIC, M. et al. Cavitation wear of basalt-based glass ceramic. **Materials**, v. 12, n. 9, 2019.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 56, n. 339, p. 237–243, jul. 2010.

PRADO, A. C. A. et al. Influência da distribuição granulométrica na estabilidade dimensional de placas cerâmicas de base vermelha. **Cerâmica**, v. 54, n. 332, p. 466–471, dez. 2008.

RAMBALDI, E.; PRETE, F.; BIGNOZZI, M. C. Acoustic and thermal performances of ceramic tiles and tiling systems. **Ceramics International**, v. 41, n. 6, p. 7252–7260, 1 jul. 2015.

RANGEL, E. M. et al. Espumas vítreas produzidas a partir de resíduos sólidos. **Revista Materia**, v. 23, n. 1, 2018.

RIBEIRO, A. et al. Fire exposure behavior of epoxy reinforced with jute fiber

- applied to ceramic tiles for a ventilated facade system. **Materials Research**, v. 22, n. suppl 1, 2019.
- ROUABHIA, F.; NEMAMCHA, A.; MOUMENI, H. Elaboration and characterization of mullite-anorthite-albite porous ceramics prepared from Algerian kaolin. **Ceramica**, v. 64, n. 369, p. 126–132, 1 jan. 2018.
- SAMPAIO, V. G.; PINHEIRO, B. C. A. .; HOLANDA, J. N. F. Granulação a seco de uma massa cerâmica para grês porcelanato. **Cerâmica**, v. 53, n. 327, p. 295–299, set. 2007.
- SÁNCHEZ, E. Considerações Técnicas sobre Produtos de Revestimento Porcelânico e seus Processos de Manufatura. Parte I. **Cerâmica Industrial**, v. 8, n. 2, p. 0–0, 11 jan. 2017.
- SANTA CRUZ ASTORQUI, J.; PORRAS-AMORES, C. Ventilated Façade with double chamber and flow control device. **Energy and Buildings**, v. 149, p. 471–482, 15 ago. 2017.
- SARRABLO, V. **Fachada Ventilada/ Ventilated Façade/ Cortezas Cerámicas**. Casal de Cambra: [s.n.].
- SCHIAVON, M. A.; REDONDO, S. U. A.; YOSHIDA, I. V. P. Caracterização térmica e morfológica de fibras contínuas de basalto. **Ceramica**, v. 53, n. 326, p. 212–217, abr. 2007.
- SCHULLER, D.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Influência de defeitos e diferentes processos de fabricação nas propriedades mecânicas finais de cerâmicas. **Cerâmica**, v. 54, n. 332, p. 435–442, dez. 2008.
- SILVA, A. G. P. DA; ALVES JÚNIOR, C. Teoria de sinterização por fase sólida; uma análise crítica de sua aplicação. **Cerâmica**, v. 44, n. 289, p. 171–176, out. 1998.
- SILVA, L. F. B. DA; THOMAZ, E.; OLIVEIRA, L. A. DE. Ventilated cladding systems: structural and drainability performance criteria. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 341–358, set. 2018.
- SILVA, R. H. L. et al. Use of diopside in ceramic masses for sanitary ware.

- Ceramica**, v. 65, n. 373, p. 1–12, 1 jan. 2019.
- SIMÃO, L. et al. Permeability of porous ceramic based on calcium carbonate as pore generating agent. **Ceramics International**, v. 41, n. 3, p. 4782–4788, 1 abr. 2015.
- SIMÃO, L. et al. Wastes from pulp and paper mills - A review of generation and recycling alternatives. **Ceramica**, v. 64, n. 371, p. 443–453, 1 jul. 2018.
- VAKIFAHMETOGLU, C.; ZEYDANLI, D.; COLOMBO, P. **Porous polymer derived ceramics** *Materials Science and Engineering R: Reports* Elsevier Ltd, , 1 ago. 2016.
- VIEIRA, D. G. et al. Influência da distribuição do tamanho de partículas na porosidade de cerâmicas obtidas por colagem de barbotina. **Revista Univap**, v. 13, p. 360–363, 2006.
- VIVALDINI, D. O. et al. Revisão: Fundamentos e materiais para o projeto da microestrutura de isolantes térmicos refratários de alto desempenho. **Ceramica**, v. 60, n. 354, p. 297–309, 2014.
- YILMAZ, S.; ÖZKAN, O. T.; GÜNAY, V. Crystallization kinetics of basalt glass. **Ceramics International**, v. 22, n. 6, p. 477–481, 1996.
- ZAIYOU, S. et al. Sintering of anorthite based ceramics prepared from kaolin DD2 and calcite. **Ceramica**, v. 62, n. 364, p. 317–322, 1 out. 2016.
- ZANELLI, C. et al. The vitreous phase of porcelain stoneware: Composition, evolution during sintering and physical properties. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 357, n. 16–17, p. 3251–3260, ago. 2011.
- ZAUBERAS, R. T. et al. Planejamento estatístico de experimentos aplicado ao desenvolvimento de formulações para revestimentos cerâmicos. **Cerâmica**, v. 50, n. 313, p. 33–37, mar. 2004.
- ZENIKHERI, F. et al. Elaboration of porous gehlenite and anorthite based ceramics using low price raw materials. **Ceramica**, v. 62, n. 363, p. 242–248, 1 jul. 2016.
- ZHAO, F. et al. A novel and green preparation of porous forsterite ceramics

with excellent thermal isolation properties. **Ceramics International**, v. 45, n. 3, p. 2953–2961, 15 fev. 2019.

ZILLI, M. et al. Produção e caracterização de espumas cerâmicas a partir de resíduos sólidos industriais. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, p. 1545–1552, 2014.

ZONG, Y.; WAN, Q.; CANG, D. Preparation of anorthite-based porous ceramics using high-alumina fly ash microbeads and steel slag. **Ceramics International**, v. 45, n. 17, p. 22445–22451, 1 dez. 2019.