UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Centro de Desenvolvimento Tecnológico

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

TESE

POTENCIAL DA LAMA DA DRAGAGEM DO PORTO DE RIO GRANDE, RS, NA OBTENÇÃO DE CERÂMICA ISOLANTE TÉRMICA

Cristina Lemos Goularte

Pelotas, 2022

Cristina Lemos Goularte

POTENCIAL DA LAMA DA DRAGAGEM DO PORTO DE RIO GRANDE, RS, NA OBTENÇÃO DE CERÂMICA ISOLANTE TÉRMICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves

Pelotas, 2022

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

G694p Goularte, Cristina Lemos

Potencial da lama da dragagem do Porto de Rio Grande, RS, na obtenção de cerâmica isolante térmica / Cristina Lemos Goularte ; Margarete Regina Freitas Gonçalves, orientadora. — Pelotas, 2022.

125 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. Sedimento de dragagem. 2. Cerâmica isolante. 3. Resíduo lamoso. 4. Condutividade térmica. 5. Porosidade. I. Gonçalves, Margarete Regina Freitas, orient. II. Título.

CDD : 620.11063

Elaborada por Simone Godinho Maisonave CRB: 10/1733

Cristina Lemos Goularte

POTENCIAL DA LAMA DA DRAGAGEM DO PORTO DE RIO GRANDE, RS, NA OBTENÇÃO DE CERÂMICA ISOLANTE TÉRMICA

Tese apresentada como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa tese: 30/11/2022.

Banca examinadora:

_____

Drª. Margarete R. F. Gonçalves (Orientadora), UFPEL
Doutora em Engenharia, área de concentração Ciência dos Materiais, UFGRS, Porto Alegre, Brasil.

_____

Dr. Rubens Camaratta, UFPEL
Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

_____

Dr. Cezar Augusto Burkert Bastos, FURG.
Doutor em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

_____

Dr. Felipe Kessler, FURG
Doutor em Química, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

Agradecimentos

Agradeço a minha família pelo incentivo e compreensão durante essa caminhada, em especial a meus pais, esposo e filhos.

As minhas amigas Juliana Teixeira e Rita Gnutzmann por todo carinho, apoio, atenção e companheirismo ao longo desta caminhada.

A minha querida “tia” Isabel Machado pelo incondicional apoio durante toda a realização deste trabalho.

A prof. Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves, tanto por acreditar no meu potencial quanto por ser uma pessoa atenciosa e dedicada que, através de ensinamentos, apoio e amizade permitiu que este trabalho fosse desenvolvido.

A prof. Dra Ana Maria Volkmer Azambuja por mais este apoio, ensinamento e colaboração tanto no planejamento quanto nas análises estatísticas realizadas.

Ao prof. Dr. Cezar Bastos, diretor da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Rio Grande, pela disponibilização tanto das instalações do Laboratório de Geotecnia e Construção Civil, quanto do Laboratório de Análise de Tensões para a realização dos ensaios.

Aos técnicos e laboratoristas da Escola de Engenharia, Engenheiros Luciano, Régis, Júlio, Tales e Bruno pelo auxílio na realização dos ensaios, confecção e usinagem de peças.

Ao laboratório de Físico-Química Aplicada e Tecnológica da Escola de Química e Alimentos da FURG em conjunto ao Engenheiro Eliézer pela realização de ensaios.

Aos Centro Multiusuários da FURG, CEME-SUL e Central Analítica, bem como a seus técnicos também pela colaboração na realização dos ensaios.

Ao laboratório do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, Alegrete como também ao Engenheiro Marcelo Oliveira pela colaboração na realização dos ensaios térmicos.

A Universidade Federal de Pelotas juntamente ao curso de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais pela acolhida

Obrigada

Para minha família, Celso, Giovanna, Mateus e Tiago.

RESUMO

O presente trabalho, avaliou o potencial de obtenção de cerâmicas isolantes térmicas a partir da lama extraída da dragagem do canal de acesso ao porto de Rio Grande/RS, considerando suas características argilosas e possibilidades de incorporação em massas cerâmicas. A manutenção periódica do calado no canal de acesso ao Porto de Rio Grande, RS, remove grandes volumes de sedimentos, os quais têm sido tradicionalmente descartados, chegando a 49,5 milhões de m^3 de material dragado entre os anos de 1998 e 2020, estimando-se o descarte de 2,6 milhões de toneladas de sedimentos apenas na dragagem de 2019-2020, apontando em alguns trechos teores de argila acima de 50% no material dragado. Solos argilosos são materiais base na fabricação cerâmica, que utiliza matéria-prima de natureza heterogênea possibilitando a introdução de resíduos em suas composições, o que leva a reduções na extração de novas matérias-primas, possibilitando atribuição de propriedades como controle de plasticidade e acréscimo de porosidade, essa última, destacando-se como importante característica nas cerâmicas isolantes. Para a realização dessa pesquisa foram utilizadas como matérias-primas: lama da dragagem, argila vermelha e serragem de madeira, sendo estas caracterizadas por meio de ensaios de fluorescência de raios X, distribuição granulométrica, limites de plasticidade e de liquidez, difração de raios X, TG e DTA. Foram estudadas sete formulações conformadas por prensagem a 20 MPa, 8% de umidade e queimadas à temperatura máxima de 900°C. Para as cerâmicas produzidas foram determinadas retração linear, perda ao fogo, absorção de água, porosidade, massa específica aparente, resistência mecânica à flexão a três pontos e condutividade térmica, realizando também análise microestrutural. Os dados obtidos foram comparados através de normas técnicas com parâmetros exigidos para materiais cerâmicos ou isolantes térmicos, além de um isolante térmico comercial. Pode ser observado que a lama da dragagem possui características granulométricas, plásticas, químicas, mineralógicas e térmicas análogas a matéria-prima tradicional utilizada na produção de cerâmica vermelha. Na caracterização das cerâmicas produzidas com as sete formulações pode-se observar em todas as propostas o atendimento aos parâmetros de absorção de água pela NBR 15270 e resistência mecânica tanto por normativas técnicas de outros materiais isolantes, quanto em comparação ao isolante comercial. A utilização da serragem de madeira mostrou-se eficiente na formação de poros, também observados nas formulações que continham a lama, sendo identificada nestas amostras os maiores percentuais de retração linear e perda ao fogo. Para a condutividade térmica não foi identificada diferença significativa entre o isolante comercial e as formulações estudadas, obtendo-se para estas uma condutividade térmica inferior a 0,26W/mK nas temperaturas analisadas (25°C e 57°C), demonstrando a capacidade da utilização da lama da dragagem na produção de cerâmicas isolantes térmicas.

Palavras-chave: sedimento de dragagem; resíduo lamoso; serragem de madeira; porosidade; condutividade térmica; cerâmica isolante.

ABSTRACT

The present work evaluated the potential of obtaining thermal insulating ceramics from the mud extracted from the dredging of the access channel to the port of Rio Grande/RS, considering its clayey characteristics and possibilities of incorporation into ceramic masses. The periodic maintenance of the draft in the access channel to the Port of Rio Grande, RS removes large volumes of sediments, which have been traditionally discarded, reaching 49.5 million m3 of dredged material between 1998 and 2020, estimated if the disposal of 2.6 million tons of sediments only in the dredging of 2019-2020, indicating clay contents above 50% in the dredged material, with new dredging in the contracting process 2022/2023 describing the removal of 2 million meters cubic. Clay soils are base materials in ceramic manufacturing, which uses raw materials of a heterogeneous nature, allowing the introduction of residues in their compositions, which leads to reductions in the extraction of new raw materials, allowing the attribution of properties such as plasticity control and addition of porosity, the latter, standing out as an important characteristic in insulating ceramics. To carry out this research, the following raw materials were used: dredging mud, red clay and wood sawdust, which were characterized by X-ray fluorescence tests, granulometric distribution, plasticity and liquidity limits, ray diffraction. X, TG and DTA. Seven formulations formed by pressing at 20MPa, 8% humidity and fired at a maximum temperature of 900°C were studied. For the ceramics produced, linear shrinkage, water absorption, porosity, mechanical resistance to bending at three points and thermal conductivity were determined, also performing microstructural analysis. The data obtained were compared through technical standards with parameters required for ceramic materials or thermal insulators, in addition to a commercial thermal insulator. It can be observed that the dredging mud has granulometric, plastic, chemical, mineralogical and thermal characteristics like the traditional raw material used in the production of red ceramic. In the characterization of the ceramics produced with the seven formulations, it is possible to observe in all proposals the compliance with the parameters of water absorption by NBR 15270 and mechanical resistance, both by technical regulations of other insulating materials, and in comparison, to commercial insulators. A higher porosity was also observed in the formulations that contained the mud, and an increase in porosity in the samples that contained wood sawdust, being identified in these samples the highest percentages of linear shrinkage and loss on fire. For thermal conductivity, no significant difference was identified between the commercial insulator and the studied formulations, obtaining for these a thermal conductivity lower than 0.26W/mK at the analyzed temperatures (25°C and 57°C), demonstrating the ability of the use of dredging mud in the production of thermal insulating ceramics.

Keywords: dredging sediment; muddy residue; wood sawdust; porosity; thermal conductivity; insulating ceramic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da placa quente protegida.....38

Figura 2 - Lama da dragagem da região do Porto Novo, do canal do porto de Rio Grande, RS, coletada em 17/09/2019 - (coordenada: -32.041063, -52.073465) 41

Figura 3 – Volume dragado entre 1998 e 2017 nos canais do Porto de Rio Grande 43

Figura 4 - Etapas realizadas no desenvolvimento da pesquisa 45

Figura 5 – Bloco de concreto celular utilizado na pesquisa.....49

Figura 6 – Micrografia eletrônica de varredura mostrando a superfície interna de um poro do concreto celular - ampliação 30X 52

Figura 7 – Micrografia eletrônica de varredura mostrando a superfície interna de um poro do concreto celular - ampliação 200X 52

Figura 8 – Micrografia eletrônica de varredura mostrando a superfície interna de um poro do concreto celular - ampliação 5000X 53

Figura 9 – Molde metálico conformação corpos-de-prova, dimensões de 1,2cm X 8,5cm x 1,2 cm 55

Figura 10 – Molde metálico conformação corpos-de-prova, dimensões 7,0cm X 7,0cm x 3,0 cm 55

Figura 11 – Composição de imagem com as etapas de obtenção dos corpos de prova desde o preparo do material, conformação, secagem e queima. 56

Figura 12 – (A) Lama da dragagem – lama; (B) Ensaio de sedimentação da lama ..62

Figura 13 – Distribuição granulométrica da lama obtida na dragagem, amostras A, B e C coletadas individualmente do volume total recebido. 63

Figura 14 – Distribuição granulométrica da argila vermelha 66

Figura 15 – (A) Peneiramento da serragem de madeira; (B) material retido por peneira 67

Figura 16 – Distribuição granulométrica da serragem de madeira utilizada no experimento.....68

Figura 17 – Imagem morfológica da serragem de madeira, ampliada 30X por MEV. 69

Figura 18 – Difratogramas de Raios X de amostras da lama da dragagem.....75

Figura 19 – Difratograma de Raios X da argila vermelha.....77

Figura 20 – Curva termogravimétrica (TG) e termogravimetria derivada (DTG) obtidas para a lama da dragagem. 78

Figura 21 - Curva termogravimétrica (TG) e termogravimetria derivada (DTG) obtidas para argila vermelha.....79

Figura *22* - Curva termogravimétrica (TGA) e *termogravimetria derivada* (DTG) obtidas para a serragem. 80

Figura 23 – Imagem dos corpos de prova das formulações F6, F7 e F8, obtidos com 10% de serragem madeira 81

Figura 24 – Imagens do processo de sinterização dos corpos de prova no formo tipo mufla – anterior e posterior a queima.....82

Figura 25 – Retração linear e Umidade de conformação para as formulações estudadas.....83

Figura 26 – Comportamento de retração linear e perda ao fogo para as formulações estudadas.....86

Figura 27 – Análise conjunta da absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e perda ao fogo (PF) 88

Figura 28 – Análise conjunta da massa específica aparente (Mea), porosidade aparente (PA) e perda ao fogo (PF). 90

Figura 29 – (A) Ensaio resistência mecânica a flexão à 3 pontos; (B) corpos de prova ensaiados.....91

Figura 30 – Comportamento conjunto da massa específica aparente e resistência mecânica.....92

Figura 31 – Análise comportamental da variação dos parâmetros de resistência mecânica, porosidade aparente e perda ao fogo para as formulações testadas. 93

Figura 32 – Difratograma de raios X da formulação F1, com 100% de lama da dragagem. Quartzo (Q), Feldspato (F) e Hematita (H). 94

Figura 33 – Comportamento da condutividade térmica e da porosidade aparente ...97

Figura 34 – Micrografias obtidas com ampliação de 5000X - F1, F2, F3, F4, F5, F9 e F10. 101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Compilação referente a composição química (%) de argilas vermelhas proveniente dos trabalhos de vários autores. 22

Tabela 2 -Compilação referente a composição granulométrica (%) de argilas vermelhas proveniente dos trabalhos de vários autores. 22

Tabela 3 – Condutividade térmica de alguns materiais de construção adaptados da NBR 15220/2005. 34

Tabela 4 – Condutividade térmica e parâmetros microestruturais de isolantes comerciais 34

Tabela 5 - Composição química (%) de sedimentos de dragagem em regiões portuárias 42

Tabela 6- Caracterização física do material lamoso do canal de acesso ao Porto de Rio Grande, RS 42

Tabela7 - Composição química do bloco de concreto celular, obtido por FRX (% em peso) 49

Tabela 8 - Porosidade Aparente (PA) obtida para a Cerâmica Isolante Comercial 50

Tabela 9 - Condutividade Térmica (**λ**) do bloco de concreto celular 51

Tabela 10 - Formulação de massas cerâmicas com lama (% em massa) 54

Tabela 11 – Determinação experimental da pesquisa – corpos de prova por formulação 60

Tabela 12 – Frações Granulométricas identificadas para o Sedimento de Dragagem 63

Tabela 13 – Limites de Consistência obtidos para a lama de dragagem 64

Tabela 14 – Frações Granulométricas identificadas para a Argila Vermelha 65

Tabela 15 – Limites de Consistência obtidos para argila vermelha 66

Tabela 16 – Frações Granulométricas identificadas para a serragem de madeira 68

Tabela 17 – Frações Granulométricas da lama da dragagem em comparação com a serragem de madeira 69

Tabela18 -Composição química elementar da lama por EDS (% em peso) 70

Tabela19 – Composição química da lama por Fluorescência de Raios X – FRX (% em peso) 70

Tabela 20 – Determinação de cloretos pelo método de Mohr 72

Tabela 21 – Composição química da argila vermelha por fluorescência de raios X FRX (% em peso) 73

Tabela 22 – Fórmulas químicas das fases mineralógicas identificadas na análise da Difração de Raios X para a lama da dragagem.....75

Tabela 23 – Fórmulas químicas das fases mineralógicas identificadas na análise da Difração de Raios-X para a argila vermelha comercial 77

Tabela 24 – Formulações definidas para o desenvolvimento final da pesquisa.....82

Tabela 25 – Umidade de conformação e valores de retração linear das formulações testadas.....83

Tabela 26 – Perda ao fogo das formulações testadas 85

Tabela 27 - Absorção de Água dos corpos de prova das formulações testadas.....86

Tabela 28 - Porosidade Aparente dos corpos de prova das formulações testadas...87

Tabela 29 – Massa específica aparente das formulações testadas.....89

Tabela 30 - Resistência mecânica dos corpos de prova das formulações testadas. 91

Tabela 31 – Fórmulas químicas das fases mineralógicas identificadas na análise mineralógica da formulação F1 94

Tabela 32 - Condutividade térmica (**λ**) das formulações testadas.....96

Tabela 33 - Análise comparativa da condutividade térmica (λ), porosidade aparente (%) e massa específica aparente (g/cm^3).....99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

ANICER –Associação Nacional da Indústria Cerâmica

ETE – Estação de tratamento de efluentes

ETA – Estação de tratamento de água

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

IP – Índice de plasticidade

NBR – Norma brasileira

FDX – Fluorescência de Raio-X

EDS – Espectrômetro de energia dispersiva

DRX – Difração de Raios-X

ANOVA - *analysisofvariance*

RL – Retração linear

Pf – Perda ao fogo

AA – absorção de água

PA – Porosidade Aparente

Mea – Massa específica aparente

SUMÁRIO

1 Introdução 11

1.1 Objetivos 18

1.2 Estrutura do trabalho 19

2 Revisão bibliográfica 18

2.1 Materiais cerâmicos 18

2.1.1 Efeito da composição química e da granulometria das matérias primas nas massas cerâmicas 21

2.1.2 Efeitos da presença de sais solúveis e voláteis nas massas cerâmicas 24

2.2 Compósitos cerâmicos com resíduos 26

2.3 Cerâmicas isolantes 30

2.4 Condutividade térmica 33

2.4.1 Mecanismos de transmissão de calor 34

2.4.2 Determinação da condutividade térmica 36

2.5 Sedimentos de dragagem portuária 40

3 Materiais e métodos 45

3.1 Caracterização das matérias primas 46

3.1.1 Caracterização Física 46

3.1.2 Composição Química 47

3.1.3 Caracterização Mineralógica 47

3.1.4 Caracterização Térmica 48

3.2 Cerâmica isolante comercial 48

3.2.1 Caracterização do bloco de concreto celular 49

3.3 Formulação de massas cerâmicas 53

3.4 Obtenção dos corpos de prova 54

3.5 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos corpo-de-prova 57

3.6 Análise estatística de variância ANOVA 60

4 Resultados e Discussão 62

4.1 Caracterização das Matérias-Primas. 62

4.1.1 Caracterização Física 62

4.1.2 Composição Química 70

4.1.3 Caracterização Mineralógica 74

4.1.4 Caracterização Térmica 78

4.2 Obtenção de formulações de massas cerâmicas constituídas de lama da dragagem, argila vermelha e serragem de madeira. 80

4.3 Propriedades físicas e mecânica dos corpos de prova 83

4.3.1 Retração Linear (RL) 83

4.3.2 Perda de Massa ao Fogo (PF) 85

4.3.3 Absorção de Água (AA) 86

4.3.4 Porosidade Aparente (PA) 87

4.3.5 Massa Específica Aparente (M_{ea}) 89

4.3.6 Resistência Mecânica 91

4.4 Caracterização mineralógica da formulação F1 (100% lama da dragagem) 94

4.4.1 Condutividade Térmica 95

4.4.2 Análise Microestrutural 100

5 Conclusões 102

Sugestões Trabalhos Futuros 105

Referências Bibliográficas 106

Apêndice 116

1 Introdução

As atividades portuárias desempenham um significativo papel no desenvolvimento local, regional e nacional, sendo estas possibilitadas pela realização das dragagens periódicas que garantem a manutenção das cotas navegáveis, importantes ao acesso de grandes embarcações. Ainda que existam políticas sobre conservação e sustentabilidade dos recursos naturais e suas utilizações benéficas (CONAMA 454/2012), os sedimentos extraídos no processo de dragagem ainda são tratados, exclusivamente, como rejeito e o descarte, na ampla maioria dos casos, é feito em águas sob jurisdição nacional, em área previamente licenciada (HERMANNS, 2017).

O Porto de Rio Grande, localizado no sul do estado do Rio Grande do Sul, é de relevante importância no setor portuário nacional, promovendo a sexta maior movimentação portuária entre os portos públicos brasileiros no primeiro semestre de 2022, segundo dados publicados pela ANTAC (Agência Nacional de Transportes Aquaviários). Essa atuação exerce influência direta na economia local, regional e nacional, respondendo pela continuidade de inúmeros empregos diretos e indiretos. Devido sua importância, a manutenção para o acesso portuário é periódica e os volumes dragados têm relação direta com o tipo de serviço necessário, intervalo entre cada procedimento e quantidade de material sedimentado que precisa ser retirado para restabelecimento do calado.

Segundo a Superintendência do Porto de Rio Grande, entre os anos de 1998 e 2020 foram extraídos aproximadamente 49,5 milhões de metros cúbicos de sedimento nos processos de dragagem, executados em intervalos máximos de aproximadamente dois anos. Considerando apenas o último evento, concluído no início do ano de 2020, a partir do volume dragado e densidade estimada do material, estima-se um descarte aproximado de 2,6 milhões de toneladas de material lamoso (NOVO, 2020).

Estudos anteriores proporcionaram conhecimentos importantes sobre a lama extraída, tais como a inexistência de contaminantes e metais pesados, bem como sua granulometria e comportamento úmido, possibilitando sua classificação como um material argiloso de alta plasticidade (BURGUEÑO *et al., 2008;* VALÉRIO *et al.,*2017; MACHADO, BASTOS E FAGUNDES, 2019).

Embora já existam pesquisas realizadas com o sedimento da dragagem proveniente do estuário da Lagoa dos Patos com intuito de caracterização deste material, bem como seu estudo para utilização no enriquecimento do solo em lavouras, persiste ainda uma grande necessidade de ampliar o conhecimento sobre esse material, analisando-o, por exemplo, como matéria prima ou aditivo com potencial de produção industrial.

Segundo Alves e Baldo (1997), por conter basicamente alumina (Al_2O_3), sílica (SiO_2), pequenas quantidades de elementos alcalinos (K, Na, Li), alcalinos terrosos (Ca, Mg) e ferro, os solos argilosos são materiais estratégicos na produção cerâmica, tanto na conformação a verde quanto nas características de resistência e estabilidade a ela atribuídas após a sinterização. Além disso, de acordo com Zimmer (2010), pela natureza heterogênea das massas utilizadas na indústria cerâmica, há uma grande possibilidade na utilização de resíduos em suas composições, o que se torna interessante frente a possibilidade de imobilização de elementos ou redução de volume de alguns descartes, mas, também, pela característica de alguns resíduos de não requererem preparação preliminar complexa para sua utilização.

Diversos trabalhos têm apresentado de forma positiva que a utilização de resíduos incorporados as massas cerâmicas podem influenciar tanto nas características da matéria prima, quanto no produto cerâmico obtido, como, por exemplo, o acréscimo de porosidade descrito por Menezes, Neves e Ferreira (2002), ocasionado pela inserção de resíduos orgânicos combustíveis nas massas cerâmicas, como serragem de madeira e casca de arroz. Um acréscimo na porosidade do material cerâmico pode tornar-se uma característica interessante para a produção de materiais cerâmicos utilizados para o isolamento térmico, já que a transferência de calor que ocorre através dos poros é lenta e ineficiente. (CALLISTER, 2002 - p.454).

O lodo oriundo do sistema de tratamento de água e esgoto, que apresenta uma composição química similar a das argilas utilizadas como matéria prima cerâmica, também têm apresentado resultados positivos como aditivos cerâmicos, onde o acréscimo de porosidade também foi observado. (SILVA, CHINELATTO e CHINELATTO; 2015, AREIAS, VIEIRA, MANHÃES e INTORNE, 2017, TARTARI, MODENES, PIANARO e DIAZ-MORA, 2011).

Sedimentos de dragagens de estuários portuários, também considerados resíduos, têm sido estudados em diversos países com o propósito de aplicação na

indústria cerâmica, seja como matéria-prima ou como material de adição, e os resultados obtidos demonstraram capacidade de atendimento aos parâmetros necessários em propriedades como resistência mecânica e absorção de água.

Hamer e Karius (2002) apresentaram em escala industrial um estudo utilizando o sedimento de dragagem do porto da cidade de Bremen e do porto da cidade de Bremerhaven, ambos na Alemanha, em formulações de massas utilizadas na produção de tijolos cerâmicos, demonstrando o potencial deste material através do atendimento a propriedades físicas como resistência mecânica e absorção de água conforme DIN 105/1989.

Pesquisas semelhantes apresentando a utilização dos resíduos de dragagens marinhas e estuarinas na fabricação cerâmica são descritas por Baruzzo e*t al.* (2006), Romero e*t al.* (2008), Yeboah e*t al.* (2011), Salim *et al.* (2012), Bertelsen *et al.* (2015), Belmonte e Bertelsen (2016), Baksa e*t al.* (2018), Boudjenane, Benyerou e Belhadri (2018), apontando vantagens na estabilização e imobilização de metais pesados, redução na extração de recursos naturais e atendimento a propriedades normatizadas para produtos como blocos cerâmicos, tijolos de alta densidade e ladrilhos.

No Brasil, Santos *et al.* (2017) demonstraram êxito na formulação de massas cerâmicas com a incorporação de resíduos de dragagem fluvial e Mymrin *et al.* (2019) com a incorporação de resíduo de dragagem marinha, ambos descrevendo a possibilidade de utilização destes materiais e atribuindo vantagens econômicas à produção, não só pela redução do descarte dos sedimentos dragados como, também, pela redução na extração de argila de jazidas naturais, o que se torna interessante quando associado ao alto consumo nacional de argilas utilizado para a fabricação cerâmica.

Em comparação com os sedimentos dos rios, os sedimentos marinhos contêm uma maior quantidade de sais solúveis, cloretos, e, em alguns locais, presença de metais pesados (BARKSA *et al.* 2018). Romero *et al.* (2008) agregaram de forma positiva a utilização destes materiais em formulações cerâmicas devido ao processo de sinterização na fabricação cerâmica, no qual contaminantes orgânicos são oxidados e metais contaminantes têm a possibilidade de serem convertidos em compostos imóveis estáveis ou volatilizados.

Além da ampliação na conscientização relacionada a impactos produtivos, diversas políticas de proteção ambiental foram desenvolvidas ao longo das últimas

décadas. Na perspectiva da utilização de resíduos como novas fontes de materiais, destaca-se a resolução CONAMA 454/2012, que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional, como se pode conferir em seu artigo 15 a seguir transcrito.

> Art. 15 - O empreendedor deverá considerar, previamente a decisão sobre a disposição, a possibilidade da utilização benéfica do material dragado, de acordo com sua caracterização e classificação, bem como a avaliação ambiental e a análise da viabilidade econômica e operacional das opções de disposição, atendidas as regulamentações especificas e pertinentes. (Resolução CONAMA 454 de 2012)

Estudos preliminares apresentados por Goulart *et al.* (2020) para material argiloso depositado na orla da praia do Cassino, área vizinha ao local de estudo desse trabalho, de características físicas semelhantes ao sedimento lamoso extraído nas dragagens, descrevem que a absorção de água e a resistência mecânica dos produtos cerâmicos obtidos a partir do material depositado atenderam à parâmetros normativos da NBR 15270 – Blocos Cerâmicos. Os estudos relatados, mesmo que preliminares, sugerem a possibilidade da utilização do sedimento oriundo da dragagem na produção de cerâmica vermelha.

Em vista das considerações acima descritas, identifica-se significativo potencial na viabilidade de utilização da lama obtida no processo de dragagem como matéria prima para a indústria cerâmica, destacando-se sua classificação como material argiloso, análogo a matéria-prima tradicionalmente utilizada nessa indústria, bem como o grande volume de resíduo atualmente descartado (aproximadamente 300 mil toneladas/ano considerando o material dragado entre 1998 e 2020).

A possível utilização deste grande volume de sedimento na produção cerâmica, proporcionará uma redução na extração natural de argilas, cujo consumo nacional é de aproximadamente 7,8 milhões de toneladas/mês de matéria-prima (argila) para a fabricação de blocos e tijolos, de acordo com dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica – ANICER, gerando um impacto sustentável à sua utilização. Cabe ainda ressaltar a existência regional de indústrias cerâmicas próximas a região dragada que poderão tornar-se consumidores diretos desta nova fonte de matéria prima.

Ao possibilitar essa utilização, o material dragado não mais seria descartado em águas costeiras, o que também contribuiria para diminuir os questionamentos sobre as deposições de lama ocorrentes periodicamente na praia do Cassino, que causam impactos ambientais e socioeconômicos. A desconfiança da sociedade das possíveis características poluentes da lama leva a várias solicitações de intervenção ao poder público frente ao descarte atualmente utilizado.

Diante da natureza argilosa e plástica do resíduo lamoso em estudo, da considerável produção cerâmica industrial brasileira e do grande volume de resíduos do sistema portuário marítimo-fluvial no país, o presente estudo apresenta relevância como temática de investigação em ciência e engenharia de materiais porque busca a obtenção de novas fontes de matéria prima cerâmica, a redução da extração de argila e a conseqüente proteção ao meio ambiente.

1.1 Objetivos

Avaliar o potencial de utilização da lama extraída na dragagem do canal de acesso ao Porto de Rio Grande, RS, para obtenção de cerâmicas isolantes térmicas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objeto geral desse trabalho será necessário o desenvolvimento das etapas a seguir descritas:

- Determinar a compatibilidade do resíduo da dragagem do canal de acesso ao Porto de Rio Grande como matéria prima para indústria cerâmica;
- Elaborar formulações de massas cerâmicas constituídas de lama pura, lama com agente formador de poros e lama com argila vermelha e agente formador de poros;
- Caracterizar física e mecanicamente os produtos obtidos com as formulações propostas;
- Identificar dentre as formulações estudadas que utilizam a lama da dragagem como matéria prima, as que apresentam melhor desempenho térmico;

1.2 Estrutura do trabalho

A estrutura da tese foi organizada em cinco capítulos conforme descritos a seguir.

O primeiro capítulo aborda a introdução, objetivo geral e específico e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre materiais cerâmicos, cerâmicas com resíduo, cerâmicas isolantes; condutividade térmica e sedimentos de dragagens portuárias

O terceiro capítulo contém a descrição da parte experimental da pesquisa, a metodologia utilizada para a caracterização das matérias primas utilizadas, o isolante térmico comercial adotado como comparativo ao material produzido e a caracterização das propriedades físico-mecânicas analisadas.

No quarto capítulo são apresentados os resultados de caracterização física e mecânica dos compósitos cerâmicos obtidos acompanhados de um estudo estatístico.

Ao final, no quinto e último capítulo são descritas as conclusões obtidas.

O trabalho ainda conta com algumas considerações finais, referências bibliográficas e apêndice.

2 Revisão bibliográfica

Como embasamento referencial, nesse capítulo, apresentar-se-ão conteúdos sobre a composição dos materiais cerâmicos, cerâmica com resíduos, cerâmica isolante, condutividade térmica e sedimentos de dragagem portuária.

2.1 Materiais cerâmicos

Cerâmicos são materiais compostos por elementos metálicos e não metálicos, com estrutura amorfa ou cristalina, tendo os argilominerais como matéria prima, material de extração direta e normalmente de baixo custo (CALLISTER, 2002).

A utilização do material argiloso da forma como extraído, sem melhoria ou adequação à qualidade final do produto, fez com que produtos cerâmicos fossem produzidos há milênios. Essa possibilidade de obtenção de matéria prima, associada ao desenvolvimento científico do setor fizeram com que a produção cerâmica brasileira evoluísse, tanto na diversificação de produtos quanto em padrão de qualidade a nível mundial (ABCERAM, 2020).

A produção de materiais cerâmicos é extremamente ampla, podendo ser subdividida em segmentos como porcelanas, cerâmicas vermelhas, isoladores elétricos, isolantes térmicos, refratários, abrasivos e cerâmicas de alta tecnologia ou avançada.

Além da argila, na fabricação de cerâmicos outros minerais não argilosos podem ser adicionados a matéria prima básica, tais como o quartzo e o feldspato. Essas misturas buscam na maioria dos casos a adequação de características como, redução do ponto de fusão, correção da trabalhabilidade, formação de fase vítrea e redução da porosidade (CALLISTER, 2002).

O comportamento dos materiais cerâmicos é resultado de diversos fatores, a matéria prima utilizada através da sua composição química, composição física (composição granulométrica) e mineralogia, do processo de conformação das massas e programa de sinterização, o que acaba por modificar características no produto obtido, como resistência, formação microestrutural e comportamento térmico.

2.1.1 Efeito da composição química e da granulometria das matérias primas nas massas cerâmicas

Segundo Santos (1989), as argilas, matéria prima base para a produção cerâmica tradicional, são materiais finos de partículas inferiores a 2μm constituídos essencialmente por argilominerais e outros minerais, além de matéria orgânica, sais solúveis e impurezas. Os argilominerais são silicatos de alumínio hidratados compostos basicamente por alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2), podendo conter pequenas quantidades de elementos alcalinos (K, Na, Li), alcalinos terrosos (Ca, Mg) e ferro, que, em contato com a água adquirem plasticidade, endurecendo após a secagem e queima.

A presença de impurezas na forma de óxidos como cálcio (CaO), sódio (NaO_2), potássio (K_2O) e magnésio (MgO), possuem a capacidade de redução no ponto de fusão da sílica, portanto considerados elementos fundentes, onde a redução no ponto de fusão promove vitrificação em menores temperaturas, proporcionando um maior preenchimento dos poros durante a sinterização (CALLISTER, 2002).

Em geral, as argilas são materiais muito heterogêneos, cujas características dependem de sua formação geológica e localização da extração (MACEDO *et al.*, 2008), tornando-se desta forma praticamente indispensável o conhecimento da composição das propriedades tecnológicas das matérias-primas para a busca da qualidade do produto a ser produzido. Como exemplo, citam-se os trabalhos de Borloni *et al.* (2006), Moraes e Sposto (2006), Macedo *et al.* (2008), Freitas *et al.* (2009), Brito *et al.* (2015), Santos *et al.* (2017) e Figueiredo *et al.* (2018) que descreveram a necessidade do conhecimento da composição química, mineralógica e granulométrica da matéria prima, assim como as variáveis do processo de conformação e ciclo de queima, por serem estes fatores que influenciam propriedades físico-mecânicas e, a qualidade dos produtos cerâmicos.

A Tabela 1 apresenta exemplos da composição química de argilas vermelhas usadas na fabricação de cerâmica tradicional. Observa-se que todas as argilas possuem maiores teores de sílica e alumina, mas, também, altos teores de óxidos fundentes, principalmente o ferro, elemento responsável por atribuir o tom avermelhado as cerâmicas.

Tabela 1– Compilação referente a composição química (%) de argilas vermelhas proveniente dos trabalhos de vários autores.

Locais	Fonte	SiO_2	AlO_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	Na_2O	TiO_2	MgO
Colatina - ES	Reis, Sadrillo e Diaz, 2016	42,42	31,05	9,37	0,99	0,21	0,18	1,39	0,59
Campos dos Goytacazes - RJ	Vieira e Pinheiro, 2011	48,84	25,94	9,14	1,91	0,3	0,46	1,3	0,83
Campos dos Goytacazes - RJ	Vieira e Pinheiro, 2011	55,75	21,48	8,55	2,27	0,39	0,74	1,18	0,98
Campos dos Goytacazes - RJ	Pereira *et al.*, 2011	43,59	25,64	10,38	1,63	0,15	Traços	1,55	0,66
Bacias Hidrográficas - PB	Macedo *et al.*, 2008	54,86	25,84	6,65	1,08	0,16	0,86		0,77
Sumé, Massaranduva e Mulungu - PB	Ramos *et al.*, 2010	48,08	21,34	10,94	2,8	1,52	*	1,28	2,05
São Domingos do Sul - RS	Perez *et al.*, 2010	60,62	23,36	3,89	1,37	*	0,03		0,43
Tambaú - SP	Tanno *et al.*, 2016	62	10,4	5,72	6,28	3,05	0,62	0,56	*

A Tabela 2 demonstra algumas composições granulométricas de matérias primas utilizadas para a produção de cerâmica tradicional, podendo ser identificado uma ampla variação granulométrica.

Tabela 2 -Compilação referente a composição granulométrica (%) de argilas vermelhas proveniente dos trabalhos de vários autores.

Locais	Fonte	ø<2μm	2μm<ø<20μm	ø>20μm
Colatina - ES	Reis, Sadrillo e Diaz, 2016	7%-14%	48%-72%	14%-45%
Campos dos Goytacazes - RJ	Vieira e Pinheiro, 2011	47,00%	25,00%	28,00%
Campos dos Goytacazes - RJ	Vieira e Pinheiro, 2011	18,00%	25,00%	57,00%
Campos dos Goytacazes - RJ	Pereira *et al.*, 2011	53,80%	34,30%	11,90%
Bacias Hidrográficas - PB	Macedo *et al.*, 2008	8,00%	57,00%	35,00%
Sumé, Massaranduva e Mulungu - PB	Ramos *et al.*, 2010	20,80%	*	*
São Domingos do Sul - RS	Perez *et al.*, 2010	43,90%	26,40%	29,70%

A distribuição granulométrica de uma massa cerâmica interfere significativamente sobre a plasticidade, onde o tamanho, o formato, a rugosidade e a homogeneização das massas possuem relação com a densificação do material por seu consequente contato entre partículas, pontos estes onde ocorrem as reações de sinterização (SANTOS *et al.,*2017). Além disto, os tamanhos de partículas interferem no empacotamento definindo a quantidade e tipo de poros que terão influência na retração linear e na absorção de água da cerâmica verde (não queimada). A porosidade gerada a verde (formada no processo de conformação) pode ser modificada pela sinterização, reduzindo a porosidade aberta e, por consequência, a absorção de água (BARKSA *et al.*, 2018, BOUDJENANE, BENYEROU e BELHADRI, 2018, BELMONTE e BERTELSEN, 2016).

Na produção de materiais cerâmicos à possibilidade de obtenção de dois tipos de porosidade: porosidade aberta e porosidade fechada. Poros abertos possuem conectividade entre si e a superfície, já os poros fechados são considerados isolados.

Frente a mesma relação entre formação da porosidade e temperatura de sinterização, Romero *et al.* (2008) descreveram que a redução da porosidade aberta, que ocorre no processo de elevação da temperatura de sinterização, é obtida com o aumento da pressão do gás no interior dos poros fechados, promovendo uma aproximação das partículas, expandindo desta forma os poros fechados pré-existentes. A expansão dos poros fechados altera a porosidade de aberta para fechada, formada então por poros maiores, isolados e esféricos, o que contribui significativamente na condutividade térmica, podendo atribuir características isolantes ao material.

Além da granulometria, a composição química das matérias primas também influencia a microestrutura do material cerâmico. Isto ocorre devido as diversas transformações ao longo do processo de queima, onde elementos como a sílica e o alumínio necessitam de maiores temperaturas para formação de fase líquida, enquanto outros óxidos se fundem a temperaturas relativamente menores, formando novas fases proporcionando uma reorganização estrutural, a qual produz materiais com diferentes densidades e porosidades, fatores relevantes relacionados a resistência mecânica das cerâmicas (MORAES e SPOSTO, 2006; SANTOS *et al.,* 2017; PETTERLE *et al., 2018*).

Cabe ainda ressaltar que outros fatores como conformação e temperatura de queima são relevantes no processo de produção cerâmica, influenciando também nas propriedades físicas e microestruturais dos materiais produzidos.

Os aspectos acima mencionados, granulometria e composição química das matérias primas demonstram sua importância pela capacidade de atribuir porosidade quando se trata de produção de cerâmicas isolantes, produtos estes pesquisados nesse trabalho.

2.1.2 Efeitos da presença de sais solúveis e voláteis nas massas cerâmicas

As argilas, normalmente, contêm sais em sua composição, formados principalmente pela presença de sódio, cálcio, magnésio, potássio, cloretos, sulfatos e carbonatos (MENEZES *et al.,* 2006), conforme formação geológica ou local de deposição. Semelhante as argilas, sedimentos provenientes de estuários, devido a sua comunicação com o mar e influência frente às marés, apresentam, com certa variação, presença de sais nos sedimentos lamosos.

Os sais presentes na matéria prima argilosa e/ou material cerâmico quando em contato com água formam uma solução aquosa, podendo movimentar-se de uma parte para outra da estrutura através da rede capilar do material. A cristalização destes sais se forma pela evaporação da solução aquosa, podendo ocorrer na superfície ou em regiões próximas a esta, mas depende do gradiente de umidade entre o ambiente e o material. Em locais de elevada umidade os sais não chegaram a cristalizar, depositando-se como um "gel" cuja viscosidade depende da composição e concentração da solução. (MENEZES *et al.,* 2006).

A cristalização de sais na superfície das peças cerâmicas (eflorescências) não produz esforços mecânicos importantes causando apenas degradação microestrutural e estética. Já quando a cristalização se dá no interior do material (subflorescências), nos poros e rede capilar, podem ser produzidos esforços mecânicos consideráveis, causando sérios danos a resistência e durabilidade das peças. (MENEZES *et al.,*2006).

Diversos estudos tentam correlacionar a aptidão a eflorescências com o teor de sais nas matérias primas ou produtos cerâmicos, mas sem conclusão sobre esta relação. Florêncio (2000) e Menezes *et al.* (2006) caracterizaram a presença de sais solúveis presentes na matéria-prima apenas como um indicativo para sua formação,

tendo ainda que serem considerados parâmetros como porosidade, absorção de água e granulometria, além dos processos de fabricação como conformação, secagem e queima como fatores relevantes na formação de eflorescências.

Além das eflorescências, sais solúveis presentes na massa cerâmica quando não se tornam totalmente insolúveis ou são depositados nas superfícies durante o processo da queima podem causar outros defeitos no produto, tais como opacidade, pontos negros, desvitrificação e enrugamento das bordas (ABREU *et al.*, 2004). Destacam-se como sais solúveis de maiores danos, os sulfatos: Na_2SO_4, $CaSO_4$, $MgSO_4$, entre outros.

Outro fator relevante à presença de sais é a possibilidade da liberação de SO_2, SO_3, Cl e F, que são gases ácidos e tóxicos que podem ocasionar problemas ao forno e ao meio ambiente (FLORÊNCIO, 2000). A mesma preocupação foi apresentada por Romero *et al.* (2008) e Belmonte, Bertelsen e Gieysztor (2016) quando relataram o impacto da presença variável de cloreto solúvel no sedimento marinho, podendo este causar corrosão nos fornos, emitindo ácido durante a queima além da possibilidade de promover eflorescências indesejadas no produto cerâmico.

Em relação a estes relevantes fatores, corrosão dos fornos e formação de eflorescências, foi apresentado por Hamer e Karius (2002) o processo de uma filtragem em um sistema de exaustão de ar, buscando capturar os contaminantes voláteis liberados sob as condições físicas de queima no interior dos fornos, injetando elementos como $Ca(OH)_2$ na corrente de gás de combustão de forma a neutralizar componentes ácidos como HF, HCl e SO_2, concluindo com a necessidade de adequação correta do elemento neutralizador, mas demonstrando viabilidade de aplicação do sistema proposto.

Belmonte, Bertelsen e Gieysztor (2016) descreveram a variação na presença de cloretos em sedimentos dragados, tanto relacionado ao local de extração do material como em relação a mesma região de dragagem. Essa variação oscila até a presença de aproximadamente 1% de Cl^-, superando o limite considerado seguro pelos próprios autores para sua utilização na fabricação cerâmica de 1000mg/Kg (0,1%). No entanto, estudos posteriores não detectaram eflorescência superficial nas amostras, mesmo as caracterizadas com alto teor de cloreto.

Devido às implicações oriundas da presença de sais nas massas cerâmicas, regulamentações como a norma Portuguesa NP 80 de 1964 determinam como limite

máximo de sais solúveis totais permitido para tijolos cerâmicos um percentual de 0,5% em massa, e a norma Europeia EN 771-1 (2011) define como limites possíveis para o teor de sais de Na^+, K^+ e Mg^+ para tijolos cerâmicos o valor de 0,25% em massa, dependendo da classificação de uso dos produtos. No Brasil ainda não existe regulamentação normatizada que trate exclusivamente deste item.

Ainda que não se tenha uma normativa brasileira, trabalhos como os de Abreu *et al.* (2004) apresentaram um estudo relacionado a remoção de sais solúveis presentes no resíduo de cromo proveniente da indústria de curtume, de forma a possibilitar sua utilização na indústria cerâmica. No processo foi utilizada a técnica de lavagem prévia do resíduo em laboratório com filtração a vácuo, que se mostrou eficiente para a remoção do excesso de sais chegando à redução de mais de 85% do total de sais presentes na amostra inicial.

Com a mesma proposta de evitar os impactos negativos devido aos sais (sulfatos) presentes na matéria prima, foi descrito por Pereira, Bernardin e Riella (2000) a possibilidade de eliminação de eflorescências em peças não esmaltadas por meio da adição de carbonato de bário à massa cerâmica. O resultado mostrou que o carbonato de bário reagiu quimicamente com os sulfatos presentes, sendo estes convertidos em sulfatos de bário que, por serem insolúveis em água, não contribuíram para a formação das eflorescências por sulfatos.

Entretanto, nem sempre a presença de sais solúveis é tida como algo prejudicial na produção cerâmica, conforme descrevem Magaldi *et al.* (2016) em seu estudo para obtenção de cerâmica porosa através da adição e posterior remoção térmica de cloreto de sódio, um sal solúvel. Esta técnica utilizada consiste na escolha de um material de sacrifício, cloreto de sódio, que ao longo do processo é retirado do material produzido através da vaporização na sinterização, processo que promoveu com êxito a formação de poros.

2.2 Compósitos cerâmicos com resíduos

Processos industriais produzem resíduos em diversas quantidades, ainda sem políticas de reciclagem ou reutilização, ocupam grandes espaços, e, nem mesmo, possuem correta destinação ambiental. Segundo Zimmer (2010), algumas sobras desses processos industriais geraram materiais que após estudos se demonstraram adequados como adição a formulações de massas cerâmicas, sendo capazes de

produzir produtos duráveis, estáveis e de boas propriedades. Como exemplos de resíduos de processos industriais adicionados à produção cerâmica, podem ser facilmente encontrados estudos de massas cerâmicas aditivadas com cinzas, pó de rochas, lodos de estações de tratamento de efluentes urbanos, borra de petróleo, chamote cerâmico, pó de madeira, vidro, entre outros.

Na busca por superar o desafio relacionado às sobras dos processos produtivos e na tentativa de atender a política nacional de resíduos sólidos (Lei 12.305/2010), pesquisas tecnológicas buscam a reutilização destes materiais como novas fontes de matérias primas ou como aditivos em processos produtivos. Partindo desta necessidade, diversos estudos têm sido realizados referentes à adição de sobras oriundas de processos produtivos na fabricação cerâmica que são as cerâmicas aditivadas com resíduos.

Como a indústria cerâmica possui um elevado volume produtivo, com alta capacidade de adequação ao longo das etapas de produção, acaba por ser a indústria que mais se destaca na utilização de resíduos industriais e urbanos, permitindo a incorporação de materiais orgânicos e inorgânicos às massas cerâmicas, cuja utilização é estudada por diversos pesquisadores que buscam nestes materiais características que possam ser atribuídas aos produtos cerâmicos finais, bem como a possibilidade de redução de materiais tradicionalmente descartados (MENEZES *et al*., 2002).

No processo de fabricação, a própria indústria cerâmica gera diversos resíduos. Alguns são aproveitados com reintrodução direta (peças apenas conformadas) e outros, oriundos do processo de sinterização, são transformados em “chamote”, resíduo cerâmico de grande volume residual que, além do custo produtivo gerado, também, gera um problema ambiental com seu descarte.

A análise de custo para a reutilização destes resíduos muitas vezes é identificada como impedimento a sua reintrodução ao processo produtivo, principalmente para resíduos que necessitam um preparo para serem incorporados às massas cerâmicas. Casagrande *et al.* (2008) e Castro, Soares e Nascimento (2012) descrevem essa necessidade, neste caso buscando um equilíbrio entre a reutilização dos resíduos cerâmicos e a manutenção das propriedades físico-mecânicas.

Da mesma forma que as demais etapas do processo de fabricação cerâmica, a adição de resíduos às massas influencia nas propriedades das composições e dos

corpos cerâmicos, como por exemplo, redução na temperatura de sinterização, alteração na plasticidade e acréscimo na porosidade, propriedade desejável tanto em relação à produção de filtros quanto em isolantes térmicos (MENEZES *et al*., 2002; DUTRA *e* PONTES, *2002;* DUTRA, PONTES e JÚNIOR, 2003).

Outra possibilidade estudada foi a utilização de resíduos de placas cerâmicas de revestimento como aditivo na fabricação de pavimentos cerâmicos “ecológicos”, sendo apresentada por Modesto *et al.* (2003) com resultados em atendimento aos requisitos das normas brasileiras de certificação de produtos cerâmicos acabados para as massas consideradas.

Carvalho *et al.* (2015) apresentaram a valorização de resíduos para fabricação de novos materiais como potenciais e viáveis fontes de matéria prima, onde a reutilização do resíduo cerâmico conhecido por “casca cerâmica”, gerado ao longo de um processo produtivo industrial foi utilizado como aditivo na fabricação de filtros cerâmicos refratários, produzindo um material com razoável eficiência de filtragem (1,7Kg/s), sem defeitos e de excelente acabamento superficial.

Ainda quanto ao emprego de resíduos inorgânicos, estudos mostram que a incorporação de cinzas na produção de materiais cerâmicos é estudada há várias décadas. O grande interesse neste resíduo é explicado pela semelhança química que a maior parte destes materiais tem com a matéria prima base da produção cerâmica, as argilas, como a presença de SiO_2, Al_2O_3 e óxidos fundentes em sua composição.

A cinza da queima do carvão mineral, como a maioria das cinzas, apresenta a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e alguns óxidos fundentes na sua composição e, geralmente, granulometria superior a 2μm, características estas compatíveis a produção cerâmica de um material de menor densificação e maior porosidade. Estudos feitos por Kniess *et al.* (2003); Negreiros (1994) e Skoronski *et al*. (2015) demonstraram que a adição deste resíduo às massas cerâmicas não compromete propriedades como resistência mecânica e absorção de água, sendo considerado de utilização viável, atendendo em grande maioria dos casos, parâmetros previamente estudados para produtos definidos, além de ser uma importante alternativa para gestão deste resíduo, gerado muitas vezes pela própria indústria cerâmica durante a sinterização.

Podem ser citados estudos realizados com a utilização das cinzas geradas pelo processo de incineração de resíduos sólidos urbanos - Coutinho e Vieira (2016), pelo

bagaço da cana de açúcar - Borlini *et al.* (2006), pela queima da lenha ou do pó de madeira - Medeiros *et al.* (2010) e pela queima da casca de arroz - Quintana *et al.* (1999), Gonçalves e Bergmann (2006) e Menezes *et al.* (2008).

Além de resíduos inorgânicos, também, resíduos orgânicos são incorporados à massa cerâmica. Os resíduos de celulose e bagaço de cana estão entre os materiais orgânicos com possibilidade de utilização, mas, a serragem ou pó de madeira é o resíduo orgânico mais incorporado no processo de produção cerâmica promovendo após o processo de queima, um acréscimo na porosidade do produto (GONÇALVES e BERGMANN, 2006; AMBRÓSIO, SILVA E DUAILIBI, 2004; DUTRA e PONTES, 2002).

Também, como resíduos orgânicos são usados resíduos provenientes de estações de tratamento, denominados “lodo”. Menezes, Neves e Ferreira (2002) identificaram em suas pesquisas que quando incorporado lodos das estações de tratamento de efluentes (ETE) às formulações de massas cerâmicas ocorreram alterações nas propriedades finais do produto cerâmico, principalmente relacionadas a resistência mecânica e a porosidade associada à formação excessiva de poros devido a volatilização do resíduo na queima. Este resultado, também foi descrito por Vieira, Margem e Monteiro (2008); Vitorino, Monteiro e Vieira (2009) e Tartari *et al.* (2011), cujos estudos foram realizados utilizando o lodo de estações de tratamento de água (ETA) nas formulações de massas cerâmicas, provocando um aumento da absorção de água com, consequentemente, redução na resistência mecânica.

Ainda que atribuindo características semelhantes às cerâmicas pela incorporação dos dois tipos de lodo das estações de tratamento, água e esgoto, uma maior influência nas propriedades mecânicas foi observada com a utilização do lodo da ETE como aditivo, o que foi atribuído a maior presença de matéria orgânica, contribuindo para o acréscimo da porosidade e a, conseqüente, redução da resistência mecânica (SILVA, CHINELATTO, A.L.; CHINELATTO, A.S.A.,2015); (AREIAS *et al.,* 2017).

Embora a utilização dos sedimentos provenientes dos processos de tratamento de efluentes ou de água altere a microestrutura dos materiais cerâmicos (VIEIRA, MARGEM e MONTEIRO, 2008) e, por consequência, suas propriedades, a utilização desses resíduos em pequenos percentuais tem possibilitado a manutenção dos parâmetros normativos.

As pesquisas apresentadas apontam uma ampla variedade de resíduos que foram incorporados às massas cerâmicas, demonstrando sua possibilidade de aplicação dentro de limites estabelecidos nos estudos, enfatizando a influência tanto no comportamento das massas como nas propriedades finais dos produtos cerâmicos, conforme cada resíduo aditivado.

Observa-se que os resíduos orgânicos adicionados ao processo de formulação de massas cerâmicas são removidos durante a queima, produzindo espaços vazios, os quais terão relação direta às características do resíduo aditivado influenciando na formação de porosidade aberta ou fechada desenvolvidas nas peças cerâmicas. Esta técnica pode ser considerada como a primeira forma para obtenção de cerâmica porosa, característica relevante na produção de materiais isolantes térmicos.

2.3 Cerâmicas isolantes

Materiais isolantes térmicos são aqueles cuja característica básica é a resistência a transferência calor entre um sistema e um meio ou entre dois meios. Materiais cerâmicos são descritos como aqueles com grande eficiência de isolamento para temperaturas superiores a 150°C devido a sua baixa condutividade frente aos metais e alta condutividade térmica se comparada aos polímeros (VIVALDINI *et al.*,2014).

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM), os materiais isolantes podem ser divididos em três grandes grupos: isolantes refratários; isolantes térmicos não refratários; e fibras ou lãs cerâmicas.

Os materiais isolantes refratários são reconhecidos por sua capacidade de resistência a altas temperaturas e a ataques químicos e são constituídos por argila sílico-aluminosa, bem como por materiais compostos majoritariamente por sílica, alumina, magnesita (MgO), carbeto de silício (SiC), zircônia (ZrO_2), mulita, dentre outros (SANTOS,1989, CALLISTER, 2002; ABCERAM, 2020).

Os materiais isolantes não refratários, dependendo do produto, podem ser utilizados até uma temperatura de 1100°C, sendo estes compostos por vermiculita expandida, sílica diatomácea, diatomito, silicato de cálcio, lã de vidro e lã de rocha. Já as fibras ou lãs cerâmicas podem ser compostas por sílica, sílica-alumina, alumina e

zircônia, chegando a atender uma temperatura de serviço de 2000°C conforme composição (ABCERAM, 2020).

Na produção de isolantes térmicos uma relevante propriedade a ser considerada é a condutividade térmica (λ), parâmetro que define o fluxo de energia através de um material, onde o processo de transferência de energia térmica é desenvolvido principalmente por condução e radiação. A condução é a transferência de energia através da vibração dos átomos em relação as suas posições de equilíbrio (fônons), diferente da radiação onde a transferência térmica ocorre por meio da propagação, absorção e emissão de fótons (VIVALDINI *et al.*, 2014).

A condutividade térmica está associada a microestrutura dos materiais, onde uma maior densidade proporciona valores de condutividade elevados frente a materiais menos densos, o que explica a alta porosidade em isolantes térmicos, e isto se deve a ineficiência na transferência de calor no interior dos poros, que contém, geralmente, ar estagnado, elemento de baixa condutividade térmica (0,026W/mK) (CARTER; NORTON.; 2007; CALLISTER, 2002).

Em virtude desta característica térmica do ar, Dutra e Pontes (2002) também descreveram a possibilidade de obtenção de dois tipos de porosidade nos materiais isolantes: porosidade aberta e porosidade fechada, atribuindo aos poros fechados a maior contribuição na capacidade isolante, necessária aos isolantes térmicos.

Para a produção de cerâmicas porosas são utilizadas técnicas como adição de agente espumante, decomposição de hidróxidos, réplica com esponjas poliméricas e incorporação de materiais orgânicos ao corpo cerâmico.

A produção de porosidade através de agente espumante consiste em sua incorporação em uma suspensão cerâmica, a qual é vigorosamente agitada para incorporação de ar, formando assim uma espuma, que, após a remoção da fase líquida produz uma estrutura de poros fechados em sua maioria (ROMANO; PANDOLFELLI, 2006).

Já a produção de porosidade através da decomposição de hidróxidos é obtida pela geração de vazios produzida pela redução de volume de alguns materiais, utilizando compostos de baixo custo e matérias-primas que podem, facilmente, serem incorporadas a produção cerâmica. Segundo Villas Bôas, Salomão e Pandolfelli (2007), a utilização do hidróxido de alumínio e magnésio (hidrotalcita – $Mg_4Al_2CO_3(OH)_{12}.3H_2O$) é um exemplo de material utilizado para incorporação de

poros através de sua decomposição térmica. O estudo feito pelos referidos pesquisadores demonstrou que sua utilização promove porosidade tanto a temperatura de sinterização de 1100°C, quanto em temperaturas mais elevadas (1550°C), estando o volume de poros diretamente associado ao volume de hidrotalcita adicionado.

A técnica da réplica com a utilização de esponjas poliméricas, consiste na introdução de uma suspensão ou pasta cerâmica em uma esponja, que, após a etapa de secagem é removida no processo de queima resultando em um material de microestrutura porosa (porosidade aberta) semelhante à matriz original (DUTRA E PONTES, 2002; ROMANO E PANDOLFELLI, 2006).

A incorporação de produtos orgânicos a massa cerâmica é vista como um dos primeiros métodos ou técnica utilizada na produção de porosidade nas cerâmicas, processo no qual o material incorporado é removido durante a queima. Cabe ressaltar que a microestrutura porosa obtida está diretamente relacionada com as dimensões das partículas incorporadas (DUTRA E PONTES, 2002; DUTRA, PONTES E JUNIOR, 2003 e ROMANO E PANDOLFELLI, 2006).

Ambrósio, Silva e Duailibi (2004), Gonçalves e Bergmann (2006) e Júnior *et al*. (2006) apresentaram estudos relacionados a produção de cerâmicas isolantes utilizando o pó de madeira como agente formador de poros, concluindo ser este um material satisfatório na produção de materiais porosos. Ambrósio, Silva e Duailibi (2004) destacam ainda a influência direta da temperatura e tempo de queima das peças na formação dos poros, onde, temperaturas maiores provocaram um acréscimo na densidade dos materiais e, consequente, redução na porosidade.

Entretanto, outros agentes formadores de poros têm se mostrado viáveis, como a utilização de NaCl, estudado por Magalgi *et al*. (2016), ou $CaCO_3$, utilizado no trabalho de Arcaro *et al.* (2016). O NaCl teve sua fusão a 800°C e sua remoção térmica a 1450°C, já o $CaCO_3$ teve sua decomposição entre 700°C e 800°C. Em ambas as pesquisas, os materiais foram adicionados a matéria-prima e, posteriormente, removidos no processo de queima produzindo materiais cerâmicos porosos a partir dos agentes incorporados.

A produção de materiais isolantes térmicos é de grande interesse comercial para a indústria cerâmica que vem buscando atender normas mais exigentes relacionadas ao conforto térmico das edificações e a economia de energia, fatores

associados a um consumidor cada vez mais exigente. Como exemplos de produtos isolantes térmicos em produção citam-se tijolos, blocos, placas, lã cerâmica, manta de fibra cerâmica, fita cerâmica, flocos de fibras cerâmicas, entre outros.

2.4 Condutividade térmica

A condutividade térmica é a propriedade física de um material homogêneo e isótropo, no qual se verifica um fluxo de calor constante (NBR 15220/2005), ou seja, representa a capacidade de um material em conduzir uma maior ou menor quantidade de calor.

Quando um material é submetido a um acrécimo de calor, seus átomos vibram em maior intensidade, seus elétrons livres tem um ganho de energia cinética, logo migram para áreas mais frias provocando choques nos átomos vizinhos transformando energia cinética em energia térmica (CALLISTER, 2002).

Essa transferência de energia térmica ou transmissão de calor através da estrutura dos materiais é um somatório de vários subprocessos, podendo ser descritos como principais a condução e radiação, e que, medidas identificam a capacidade dos materiais em conduzir ou isolar essa transferencia, identificando sua condutividade térmica. Nos materiais porosos ou de alta permeabilidade a convecção do gás no seu interior, também pode contribuir significativamente na consutividade térmica.

Nos materiais cerâmicos há poucos elétrons livres em sua estrutura atômica, promovendo uma baixa transferência de energia térmica, motivo pelo qual apresentam baixos valores de condutividade térmica se comparado aos metais, como pode ser observado na Tabela 3, na qual estão apresentados valores de condutividade térmica para diversos materiais tradicionalmente utilizados na contrução civil.

Grande parte dos materiais isolantes cerâmicos disponíveis no mercado são compostos por sílica e alumina, e apresentam diferentes valores de condutividade térmica. Essa variação da condutividade é relacionada por Vivaldini *et al.* (2014) por suas diferenças na geometria e formato (tijolos ou mantas), bem como parâmetros microestruturais (tamanho de poros). A Tabela 4 descreve faixas de condutividade térmica identificada entre 800°C e 1200°C para tijolos e mantas cerâmicas isolantes térmicas comerciais (VIVALDINI *et al.,*2014).

Tabela 3 – Condutividade térmica de alguns materiais de construção adaptados da NBR 15220/2005.

Materiais	Condutividade térmica (W/m°C)
Tijolos e telhas de barro	0,90
Placas de fibrocimento	0,65
Placas de gesso	0,35
Concreto	1,40
Alumínio	230,00
Aço, ferro fundido	55,00
Lã de vidro	0,045
Lã de rocha	0,045
Vidro comum	1,00

Fonte: Neves (2018)

Tabela 4 – Condutividade térmica e parâmetros microestruturais de isolantes comerciais

Tipo de Material	Faixa de Porosidade (%)	Faixa de tamanho de poros	Condutividade térmica (W/mK)
Tijolos	50 - 85	centena de mícrons até milímetros	0,2 – 1,5
Mantas Cerâmicas Fibrosas	85 - 98	Diâmetro da fibra 5 até 30 µm	0,08 – 0,4

Fonte: Vivaldini et al., (2014)

2.4.1 Mecanismos de transmissão de calor

Na produção de cerâmicas isolantes a condutividade térmica (λ) é a propriedade mais relevante a ser considerada, porque é o parâmetro que define o fluxo de energia através de um material, onde o processo de transferência de energia térmica é desenvolvido principalmente por condução (para temperaturas de até 800º C) e radiação (para temperaturas maiores que 800º C).

A condução é a transferência de energia através da vibração dos átomos em relação às suas posições de equilíbrio (fônons), diferente da radiação onde a transferência térmica ocorre por meio da propagação, absorção e emissão de fótons, como também da transferência térmica que ocorre pelo movimento de elétrons livres (VIVALDINI *et al.*, 2014).

Fônons são vibrações atômicas ordenadas que ao se propagarem através do material, transferem energia de um ponto a outro, desenvolvendo-se de regiões mais quentes, onde a concentração de fônons é maior, em direção a regiões mais frias. Com a elevação da temperatura passam a ocorrer interações entre os fônons o que acaba por dificultar a propagação de energia, justificando o decréscimo da condutividade térmica com a elevação da temperatura (CALLISTER, 2002; VIVALDINI *et al*., 2014).

Para a definição dos reais valores de condutividade térmica dos materiais cerâmicos, também, deve ser considerado o direcionamento do fluxo de calor e as intensidades de temperaturas de trabalho.

Condução

O fenômeno de condução se dá predominantemente em meios sólidos e a transferência de calor é calculada através da lei de Fourier, representada pela equação (1).

$$Q_\lambda = -\lambda A \frac{dT}{dx} \qquad (1)$$

Onde:

Q_λ – Taxa de transferência de calor (W)

λ - Condutividade térmica (W/m°C);

A - Área da superfície transversal ao fluxo de calor (m²);

$\frac{dT}{dx}$ - Gradiente de temperatura (°C/m²).

Radiação

A transferência de calor por radiação térmica ocorre quando corpos com diferentes temperaturas estão separados pelo ar ou por outro meio. Este processo de troca de calor é fruto da natureza eletromagnética da energia, que ao ser absorvida provoca efeitos térmicos, o que permite sua transferência sem a necessidade de meio físico, ocorrendo inclusive no vácuo (ÇENGEL; GHAJAR, 2015). Ainda de acordo com os autores, a energia ao ser emitida por uma superfície se propaga de maneira uniforme em todas as direções e, por consequência, as trocas de calor dependem da posição e da distância de uma superfície em relação a outra.

De acordo com Vivaldini *et al*. (2014), durante o processo de transferência térmica por radiação parte da energia é absorvida e parte é transmitida. Logo, a utilização de materiais com maior capacidade de absorção e espalhamento da radiação por sua microestrutura, impedem sua transmissão através do material, característica que isolante que pode ser potencializada pela existência de espaços vazios, reduzindo a condutividade térmica e proporcionando maior característica isolante aos materiais.

Para o cálculo da transferência de calor por radiação utiliza-se a equação (2), que descreve a condutividade térmica gerada entre a superfície do material onde a radiação incide (face quente) e a outra face (face fria).

$$\lambda_{rad} = \frac{16\,\sigma\,n^2 T^3}{3\,\beta} \qquad (2)$$

Onde:

λ_{rad} – Condutividade térmica (W/m°C)

σ - Constante de Stefan-Boltzmann (W/m^2K^4)

n – Índice de refração do material

T – Temperatura absoluta (K)

β – Coeficiente de extinção médio (m^{-1}) (depende do material)

Além dos mecanismos de transmissão de calor, estudos mostram que a temperatura de sinterização e a microestrutura formada durante o processo de obtenção do material cerâmico interferem diretamente na condutividade térmica.

A forma como as fases, sólida e porosa, da microestrutura se apresentam é fundamental para a definição de maior ou menor condução térmica do material. No tocante a porosidade, os materiais que possuem fase porosa predominante com poros fechados apresentam menor condução térmica.

2.4.2 Determinação da condutividade térmica

Inúmeros são os métodos normatizados utilizados para a medição da condutividade térmica, divididos segundo Fonseca (1999) em diretos e indiretos. Os métodos diretos medem a condutividade térmica a partir de resultados experimentais,

como por exemplo, o método da placa quente protegida. Já os indiretos medem experimentalmente uma ou mais propriedades do material e definem a condutividade térmica através dos dados obtidos.

Baseado nos métodos diretos, a medição da condutividade térmica, λ, pode ser efetuada em regime permanente ou transiente. Nos métodos transientes ou dinâmicos a realização é mais rápida com a medição de temperaturas em uma única posição ao longo do tempo, porém mais difícil se comparado ao regime permanente que pode ser modelado mais facilmente, embora exigindo várias horas para estabelecimento do regime (RIBEIRO *et al.,* 2014).

Nos métodos em regime permanente o tempo não interfere, ou seja, a temperatura não varia ao longo do tempo e é possível medir somente a condutividade térmica em um regime estacionário de calor. Desta forma, o modelo e o método são embasados na transferência unidimensional em regime permanente, onde o comportamento do fluxo de calor depende da diferença de temperatura e da resistência térmica do material, de acordo com a equação (3).

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R} = \frac{\Delta T}{R} \qquad (3)$$

Onde:

Q - Fluxo de calor (W/m²);

T_1 - Temperatura face 1 (°C);

T_2 - Temperatura face 2 (°C);

ΔT - Diferença de temperatura (°C);

R - Resistência térmica (m²°C/W).

Dentre os métodos em regime permanente usados para a medição de condutividade térmica citam-se: método da placa quente protegida e método fluximétrico.

Método da placa quente protegida

De acordo com a norma NBR 15220 (ABNT, 2005), este método é usado para a medição, em regime permanente, da resistência térmica e da condutividade térmica de materiais sólidos ou granulares, compactados ou não. Geralmente este método é

utilizado para ensaiar materiais com baixa condutividade térmica ou isolantes (SIMIONI, 2005).

Resumidamente, o equipamento consiste em uma placa quente, que é envolta com duas amostras de espessuras conhecidas, que por sua vez, são recobertas com placas frias como pode ser observado na Figura 1. A placa quente emite calor que flui através das amostras até que atinja o regime permanente, para então determinar-se a diferença de temperatura entre a face em contato com a placa fria e a face em contato com a placa aquecedora.

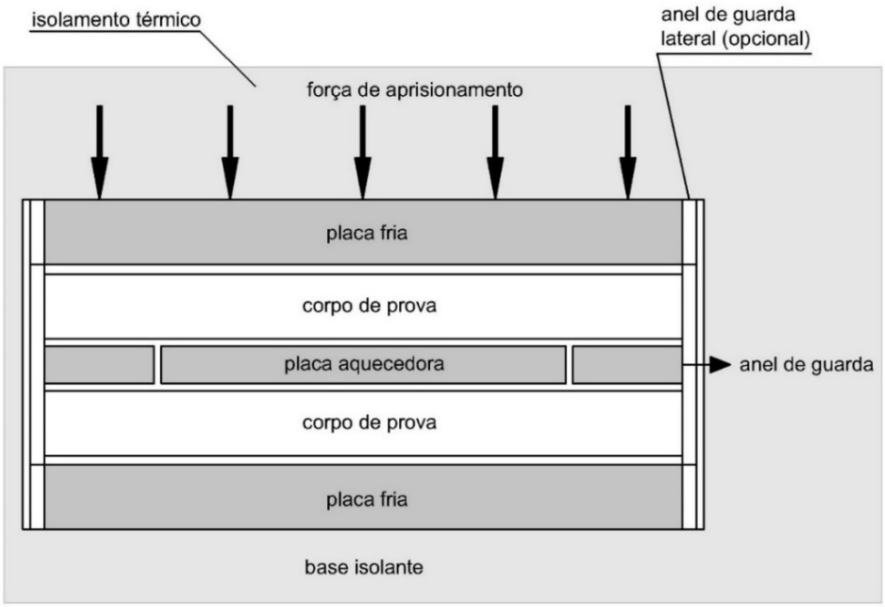


Figura 1 - Esquema da placa quente protegida
Fonte: Adaptado da NBR 15220-4 (ABNT, 2005)

Desta forma, a condutividade térmica é determinada através da equação (4) e medindo-se o fluxo de calor liberado pela placa quente. Quando se atinge o regime permanente, há uma diferença de temperatura constante entre as faces dos corpos de prova que têm espessura igual a “*e*”.

$$\lambda = \frac{Q\mathrm{e}}{A\Delta T} \qquad (4)$$

Onde:

λ - Condutividade térmica (W/m°C);

Q - Fluxo de calor (W);

e - Espessuras das amostras (m);

A - Área de geração de fluxo de calor (m²);

ΔT - Diferença das temperatura entre as faces opostas das amostras (°C).

Método Fluximétrico

Este método é empregado em diversos materiais e também em isolantes térmicos utilizados na construção civil, possibilitando medir a resistência térmica dos corpos-de prova em regime estacionário e deduzir através de calculos matemáticos a condutividade térmica.

Os equipamentos utilizados neste método são mais simples do que os utilizados no método da placa quente protegida, assim como sua operação, sendo indicada para materiais isolantes de edificações, tendo limitada a temperatura operação a 80°C.

De acordo com a norma NBR15220 (ABNT, 2005), o método consiste em aplicar uma densidade de fluxo de calor constante e unidirecional, através da zona central de um fluxímetro posicionado na zona central de um corpo de prova em forma de placas. Após atingir um regime permanente é possível se obter a densidade do fluxo de calor que atravessa o corpo-de-prova e a diferença de temperaturas entre as suas faces, efetuando-se o cálculo da resistência térmica do corpo de prova pelo quociente da diferença de temperatura e da densidade de fluxo de calor. O cálculo da resistência térmica é apresentado na equação (5).

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \qquad (5)$$

Onde:

R – Resistência térmica (m²°C/W)

ΔT - Diferença de temperatura entre as faces do corpo-de-prova (°C)

Q - Fluxo de calor (W/m²)

A condutividade térmica é determinada matematicamente levando em conta a espessura do corpo de prova e a resistência térmica previamente obtida, utilizando a equação (6).

$$\lambda = \frac{e}{R} \qquad (6)$$

Onde:

λ - Condutividade térmica (W/m°C);

e - Espessura do corpo de prova (m);

R - Resistência térmica (m²°C/W).

2.5 Sedimentos de dragagem portuária

Dragagem é a remoção de sedimentos dos leitos de rios ou canais com a finalidade de alargamento, aprofundamento ou manutenção das vias navegáveis.

Este processo é regido por licenciamento ambiental, onde a resolução do CONAMA 454/2012 estabelece diretrizes gerais para o gerenciamento do sedimento a ser dragado, como referido no Art. 16, a seguir:

> Art. 16 - A disposição do material dragado no solo ou em águas sob jurisdição nacional considerará a sua caracterização e classificação, as técnicas e metodologias de disposição e as características físicas, químicas e biológicas da área de disposição. (CONAMA, Resolução 454/2012)

Hermanns (2017) descreve que a alternativa de gestão para esse material deve levar em consideração fatores ambientais, ecológicos, tecnológicos, econômicos e sociopolítico, e não apenas um aspecto do problema. A possibilidade de descarte em terra é importante para um eventual aproveitamento do material em processos produtivos, tais como na indústria cerâmica, por exemplo.

A dragagem realizada com maior frequência no canal de acesso ao Porto de Rio Grande é conhecida como dragagem de manutenção, devido a necessidade de remoção dos sedimentos depositados ao longo do estuário, o que possibilita a manutenção do calado e o acesso de grandes embarcações ao sistema portuário.

Conforme estudos apresentados por Antiqueira e Calliari (2005), Valério, Alves e Fontoura (2017), Silva *et al.* (2019) e Machado, Bastos e Fagundes (2019) o resíduo proveniente do processo de dragagem pode ser composto por argila, silte e areia, apresentando uma tendência a maior presença de material fino em locais de moderada hidrodinâmica, bem como em lâminas d'água mais espessas. O resíduo

(Figura 2) obtido da região do Porto Novo é denominado de sedimento lamoso ou lama.

Figura 2 - Lama da dragagem da região do Porto Novo, do canal do porto de Rio Grande, RS, coletada em 17/09/2019 - (coordenada: -32.041063, -52.073465)

Diversos estudos têm sido realizados com sedimentos provenientes dos processos de dragagem, como os apresentados por Yeboah *et al.* (2001), Olin-Estes e Palermo (2001), Romero *et al.* (2008), Salim *et al.* (2012), Scremim (2014) e Santos *et al.* (2017), onde apresentam possibilidades de utilização desse material como substituto ou aditivo às argilas nos processos cerâmicos. Porém, em vista de variações naturais de composição relacionadas diretamente aos contextos geográficos e geológicos de obtenção desses resíduos, além da ausência de procedimentos e requisitos padrões para sua utilização, torna-se indispensável a avaliação específica e rotineira do potencial de reutilização desses materiais (OLIN-ESTES e PALERMO, 2001).

Essa potencialidade foi apresentada por Yeboah *et al.* (2011) quando demonstraram a viabilidade da utilização dos resíduos de dragagem como aditivos em formulações cerâmicas, onde parâmetros como retração linear na secagem, limites de absorção de água e resistência mecânica foram atendidos conforme ASTM C67, sendo considerado um material promissor alternativo.

Sedimentos de dragagem geralmente são compostos por partículas minerais variando entre areia, silte e argila, além de matéria orgânica (SANTOS *et al.,* 2017*;* MACHADO *et al.,*2019). Como tendem a apresentar alguma proporção de materiais finos, argilosos e siltosos, a presença de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) é predominante, além de óxidos, ferro e magnésio. Esta composição química similar a

apresentada pelas argilas é identificada em diversos resíduos de dragagens marinhas, conforme Tabela 5, e reforça as observações feitas por Barksa *et al*. (2018) em relação as semelhanças nas propriedades obtidas para os produtos cerâmicos produzidos com resíduos de dragagem frente aos produzidos com argilas de extração tradicional.

Tabela 5 - Composição química (%) de sedimentos de dragagem em regiões portuárias

Estuários	SiO_2	AlO_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	Na_2O	SO_3	TiO_2	P_2O_5	MnO	MgO
Porto Bremer- Alemanha - 2002	63	11	8,3	1,6	1,8	1,9	0,3	nd	nd	sv	0,9
Estuário Santander - Espanha - 2008	47,13	11,73	21,55	1,62	1,41	1,08	nd	0,63	0,23	0,31	1,46
Porto Savannh - USA 2011	52,7	17,6	8,41	1,34	1,76	0,5	0,64	0,89	0,24	0,23	1,56
Estuário Kuala Perlis - Malasia - 2012	57,88	17,4	5,26	2,08	0,77	1,44	nd	0,79	0,16	0,05	2,48

*nd – não detectado

Fonte: Salim et al. (2012) e Romero et al. (2008)

A Tabela 6 apresenta as composições granulométricas mais recentes identificadas nos sedimentos lamosos oriundos do canal de acesso ao sistema portuário de Rio Grande pesquisados por Valério, Alves e Fontoura (2016) e Machado, Bastos e Fagundes (2019), nas quais foi observado que estes possuíam cerca de 80% de material fino (silte e argila) com características de alta plasticidade (IP>15%). Cabe ressaltar que estas informações de conhecimento preliminare são compatíveis com as características dos materiais utilizados na produção cerâmica.

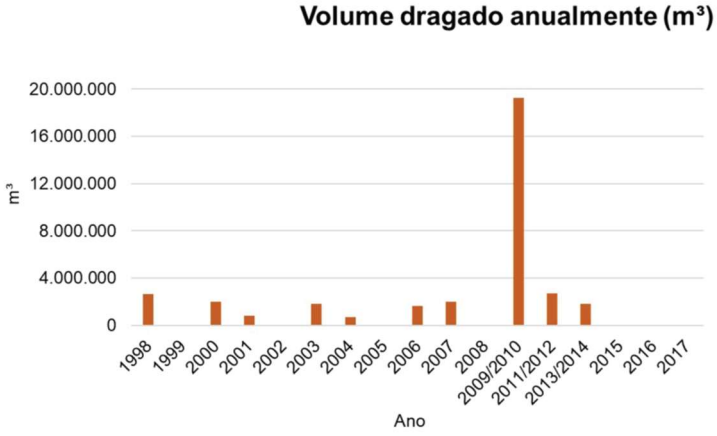
Tabela 6- Caracterização física do material lamoso do canal de acesso ao Porto de Rio Grande, RS

	Granulometria			Limites Consistência		
Material	% Argila	% Silte	% Areia	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Porto Novo 03 (2016)	62	26	12	73	44	29
Porto Novo 04 (2016)	58	24	18	62	39	23
# 2A Superporto (2016)	58	20	22	65	45	20
Sedimento Dragagem (2019)	48	36	16	67	44	23

Fonte: *Valério, Alves e Fontoura (2016); Machado, Bastos e Fagundes (2019).*

Segundo Villwock, Nicolodi e Calliari (2021), o resíduo proveniente do melhoramento do sistema portuário do Rio Grande através das dragagens já teve seu material reutilizado, principalmente nas ilhas do terrapleno leste e oeste, sendo após o ano 2000 realizado apenas o descarte dos sedimentos dragados diretamente em águas sob jurisdição nacional, em local previamente licenciado.

A possibilidade de reutilização deste material é de extrema importância, considerando o volume continuamente gerado que, segundo Calliari *et al.* (2016) entre os anos de 1940-2000 foram mais de 16 milhões de m^3 de sedimentos removidos. Segundo Silva (2019), entre os anos 1998 e 2017 houve um padrão relativamente homogêneo referente a periodicidade das dragagens, retirando neste período um volume aproximado de 35 milhões de metros cúbicos de sedimentos (Figura 3).



Ano	Volume (m³)
1998	2.626.413,10
1999	0,00
2000	1.987.158,34
2001	840.653,31
2002	0,00
2003	1.846.363,00
2004	686.506,30
2005	0,00
2006	1.630.592,00
2007	1.990.831,00
2008	0,00
2009/2010	19.285.192,57
2011/2012	2.729.875,00
2013/2014	1.796.189,90
2015	0,00
2016	0,00
2017	0,00

Figura 3 – Volume dragado entre 1998 e 2017 nos canais do Porto de Rio Grande
Fonte: (SILVA, 2019) e (VILLWOCK, NICOLODI E CALLIARI, 2021).

Devido a necessidade de atendimento a ampla expansão do setor portuário, no período de 2018 a 2020, a última dragagem realizada no Porto de Rio Grande removeu aproximadamente 16 milhões de metros cúbicos de sedimentos, atingindo a cota navegável, ou calado, de 15 metros, permitindo o recebimento de embarcações de até 366m.

O processo contínuo de extração e geração de sedimentos pode ser caracterizado como uma fonte natural de obtenção de matéria-prima residual que apresenta características similares aos materiais utilizados pela indústria cerâmica. Soma-se a isto o termo de referência publicado pela Portos-RS em setembro de 2022, edital de pregão eletrônico 0002/2022, descrevendo a contratação do serviço de dragagem de manutenção dos canais externo e interno de acesso ao Porto, e os

berços e canal do Porto Novo, identificando a necessidade de remover 2 milhões de m^3 de sedimentos.

Cabe ressaltar que as propriedades das argilas, matéria-prima tradicional da produção cerâmica, estão relacionadas ou vinculadas ao seu local de extração, visto que a formação da rocha de origem define suas características físicas, químicas e mineralógicas. A caracterização dos solos transportados, resíduos de dragagem, por exemplo, é acrescida de uma maior complexidade em relação a outros solos que possuem locais definidos de formação. Isto ocorre devido a possibilidade da concentração de solos transportados de áreas diversas, ao longo de rios e canais em direção ao mar, apresentando, portanto, características variáveis a cada coleta desta matéria prima.

3 Materiais e métodos

Para atingir o objetivo geral do trabalho foi desenvolvida a pesquisa experimental apresentada no fluxograma da figura 04.

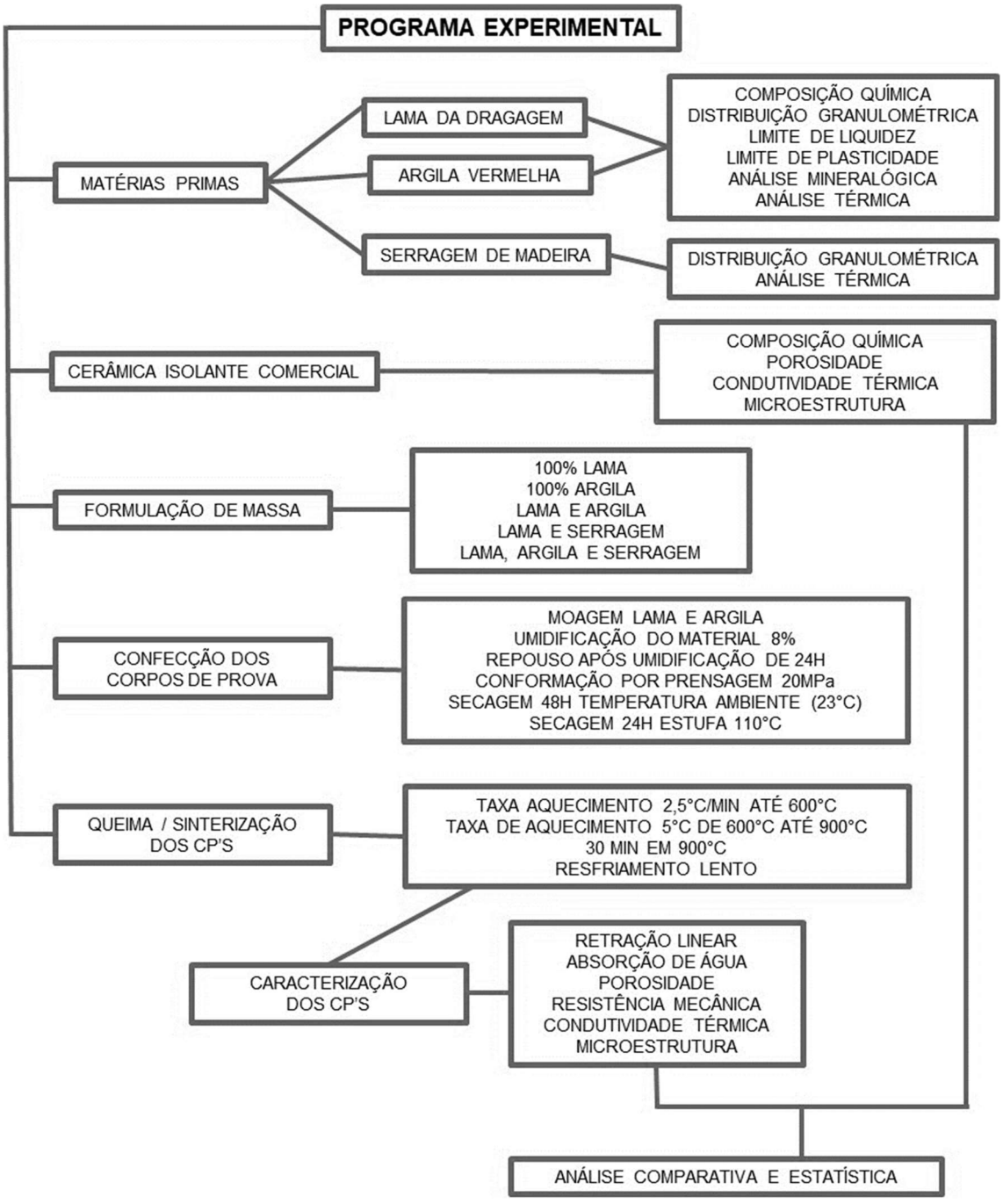


Figura 4 - Etapas realizadas no desenvolvimento da pesquisa

Na execução das etapas do trabalho foram utilizados lama de dragagem, serragem de madeira e argila vermelha, atendendo aos métodos e normas a seguir descritos.

3.1 Caracterização das matérias primas

No desenvolvimento da pesquisa foi utilizada lama doada pelo Porto de Rio Grande, RS, material removido durante o processo de dragagem do canal de acesso ao Porto, mais especificamente da região em frente ao Porto Novo (latitude:32.041063; longitude:-52.073465), no dia 17 de setembro de 2019, sendo recebido e acondicionado em caixas cobertas para a utilização nesta pesquisa.

A serragem de madeira foi doada por uma indústria local madeireira e foi retirada junto a serra utilizada para o corte de madeiras de pinus e eucalipto.

A argila vermelha utilizada foi de uso comercial, tendo sido doada por uma indústria regional produtora de cerâmica vermelha.

Todos os materiais utilizados foram caracterizados como descrito a seguir.

3.1.1 Caracterização Física

A lama da dragagem e a argila vermelha foram caracterizadas quanto à distribuição granulométrica (NBR 7181/2018), limite de liquidez – LL (NBR 6459/2017) e limite de plasticidade – LP (NBR 7180/2016). A serragem de madeira foi caracterizada somente quanto a distribuição granulométrica (NBR 7181/2018).

Os ensaios de caracterização física foram feitos no Laboratório de Geotecnia e Concreto Prof. Cláudio R. R. Dias, da Universidade Federal de Rio Grande – FURG.

Para a caracterização granulométrica da lama da dragagem foram utilizadas três amostras extraídas de diferentes pontos do reservatório no qual estava acondicionava. Para a argila vermelha também foram utilizadas três amostras removidas do material recebido. As amostras foram secas e preparadas conforme NBR 6457/2016, sendo utilizado um pistilo e um almofariz, mantendo o cuidado no processo de desagregação das partículas para evitar a quebra dos grãos.

A caracterização granulométrica da serragem de madeira foi obtida por peneiramento com agitação mecânica, onde foram utilizadas as mesmas peneiras do ensaio granulométrico realizado na lama de dragagem e argila vermelha. Para a realização dos ensaios a serragem foi, primeiramente, seca ao ar e após em estufa a 60°C por um período de 24hs, até atingir a manutenção da massa entre pesagens.

Para a determinação dos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) da lama da dragagem e argila vermelha foram utilizadas amostras preparadas conforme NBR 6457/2016, sendo utilizado 200g de material passante na peneira de malha 0,42mm, o qual foi previamente destorroado com o auxílio de um pistilo e um almofariz, mantendo-se o cuidado para evitar a quebra dos grãos.

3.1.2 Composição Química

A caracterização química da lama de dragagem e da argila vermelha foi realizada através de Espectrometria por Fluorescência de Raios X, com resultados qualitativos e quantitativos.

Para a realização do ensaio foram utilizadas amostras de material passantes na peneira # 325, seguindo os procedimentos do Laboratório de Análises Químicas da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), onde foi realizado o ensaio em modo *screening* em equipamento da marca Bruker – modelo S2 Ranger.

3.1.3 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica da lama de dragagem e da argila vermelha foi obtida por difração de raios X e posterior análise em software específico para identificação das composições mineralógicas do material.

Os ensaios foram realizados no centro de microscopia eletrônica (CEME-SUL) da FURG, equipamento D8 Advance Bruker com tubo de cobre (Cu) e comprimento de onda (λ): 1,5418 Å.

As amostras ensaiadas foram previamente secas, destorroadas com auxílio de um pistilo e almofariz, passadas na peneira # 200 e secas à 100°C para envio ao

laboratório, onde o ensaio foi realizado com passo para 0,02°, tempo de 2s e faixa angular de 10 a 90°.

Para a identificação das fases cristalinas, a análise dos dados foi realizada através do *software X'Pert HighScorePlus,* através da base de dados gratuita *Crystallography Open Database* (COD) para identificação das fases cristalinas.

3.1.4 Caracterização Térmica

A lama, a argila vermelha e a serragem de madeira foram caracterizadas por Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG).

O ensaio térmico foi realizado no Laboratório de Análises Térmicas no Centro Integrado de Análises da FURG (CIA-FURG) em um analisador termogravimétrico da marca Shimadzu, modelo TGA-50.

Para realização dos ensaios com a lama e a argila vermelha, o material foi previamente seco, destorroado com auxílio de um pistilo e almofariz. O material passante na peneira # 200 foi encaminhado ao laboratório, onde o ensaio foi realizado com taxa de aquecimento de 10°C/min desde a temperatura ambiente até 1000°C.

Já a serragem de madeira foi previamente seca a 60°C e peneirada, sendo encaminhado ao laboratório material passante peneira # 40, utilizando mesma taxa de aquecimento e limites de temperatura.

A análise termogravimétrica (TG) realizada permite observar as faixas de temperatura em que ocorrem perda de massa ou transformações endotérmicas e exotérmicas, transformações que podem ser associadas ao comportamento dos minerais que compõe o material. A termogravimetria derivada (DTG) identifica a temperatura onde ocorre de forma mais acelerada a perda de massa.

3.2 Cerâmica isolante comercial

Tendo em vista o interesse dessa pesquisa em obter uma cerâmica isolante térmica proposta com a lama de dragagem para o ramo da construção civil, foi escolhida para fins comparativos uma cerâmica isolante comercial adquirida diretamente no comércio local. O material escolhido foi um bloco de concreto celular (Figura 5), fabricado pela empresa Celucon – Módulos de concreto celular, localizada

no Morro da Fumaça em Santa Catarina, composto por uma mistura de areia, cal, cimento, gesso e pó de alumínio obtido sobre processo de autoclavagem.

O bloco de concreto celular utilizado é um elemento de vedação, com dimensões de 50 mm x 300mm x 600mm (espessura, altura e comprimento respectivamente), densidade de 480Kg/m^3, coeficiente de condutividade térmica de 0,15 W/mK, nível de isolamento acústico de 51db, resistência mecânica a compressão de 1,5MPa e resistência ao fogo garantida por um comportamento incombustível por até 6 horas a 1200°C, conforme dados da indústria.

Figura 5 – Bloco de concreto celular utilizado na pesquisa

3.2.1 Caracterização do bloco de concreto celular

De forma a obter um maior conhecimento sobre o isolante térmico comercial utilizado foram realizados ensaios de caracterização química, física, térmica e microestrutural.

Parte do bloco foi previamente desagregada e destorroada com auxílio de um pistilo e almofariz, obtendo-se um material fino passante na malha 200 para a determinação da composição química, realizada por meio de Fluorescência de Raios X, com resultados qualitativos e quantitativos, sendo o ensaio realizado conforme descrito no item 3.1.2, p.47. Os resultados estão apresentados na Tabela 7, onde é possível identificar que o cálcio e a sílica são os principais constituintes.

Tabela7 - Composição química do bloco de concreto celular, obtido por FRX (% em peso)

CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SO	K_2O	Outros Óxidos
60,84	32,24	2,60	1,74	1,31	0,68	0,59

A grande quantidade dos óxidos de cálcio e de silício identificados na análise é justificada pela composição das suas matérias-primas (cal, cimento e gesso). O pó de alumínio reage com o conteúdo alcalino do cimento durante seu processo de hidratação gerando bolhas de gás hidrogênio que ficam aprisionadas produzindo um material de alta porosidade, promovendo poros fechados que, por consequência, atuam na redução da condutividade térmica. Além disto, a boa distribuição dos poros com formatos arredondados resulta em ganhos de resistência mecânica.

Para a caracterização física dos blocos de concreto celular determinou-se a porosidade aparente em quatro amostras de 5cm x 10cm x espessura do bloco, removidas das peças adquiridas com auxílio de uma serra. A determinação da porosidade aparente (poros abertos e fechados) foi realizada pelo princípio de Arquimedes e os ensaios realizados no Laboratório de Geotecnia e Concreto da Universidade Federal de Rio Grande – FURG. A determinação da porosidade aparente (PA) consiste na obtenção da massa seca, úmida e imersa de amostras e o cálculo é feito a partir da equação 7. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos.

$$PA\ (\%) = \frac{PU-Ps}{PU-P}\ x\ 100 \qquad (7)$$

Onde:

Pu – Peso da amostra úmida (g)

Ps– Peso da amostra seca (g)

Pi– Peso da amostra imersa (g)

Tabela 8 - Porosidade Aparente (PA) obtida para a Cerâmica Isolante Comercial

Bloco de concreto celular	**PA (%)**
Amostra 1	37,33
Amostra 2	36,93
Amostra 3	36,92
Amostra 4	37,09
MED	**37,07**
C.V	**0,01**

Os resultados da Tabela 8 mostram que o bloco isolante possui elevado grau de porosidade aparente (37,07%), que lhe conduz a uma condição de material isolante.

A medição da condutividade térmica do bloco de concreto celular foi feita pelo Método da Placa Quente Protegida, descrita no item 2.4.2, p.35, sendo as amostras extraídas do bloco adquirido com auxílio de uma serra nas dimensões de 7cm x 7cm x espessura do bloco. Os ensaios foram feitos no Laboratório de Mecânica Aplicada no Campus Alegrete da UNIPAMPA.

O ensaio de condutividade térmica foi realizado em duas faixas de temperatura. Na primeira foi utilizada um gradiente térmico de 30°C, sendo 10°C na placa inferior e 40°C na placa superior, obtendo-se a condutividade para a temperatura média de 25ºC entre as faixas adotadas. Na segunda faixa foi adotado um gradiente térmico de 35°C, sendo 40°C na placa inferior e 75°C na placa superior, sendo obtida a condutividade térmica para temperatura média de 57ºC. Para o ensaio um algoritmo de controle de temperatura manteve o sistema em equilíbrio. O ensaio foi realizado no equipamento da marca LaserComp, modelo FOX 304 e os dados tratados pelo software Wintherm 32v3 Version 3.31.97 que acompanha o equipamento. Os resultados de condutividade térmica das amostras nas duas temperaturas médias estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Condutividade Térmica (**λ**) do bloco de concreto celular

	λ (W/mK)	
Amostras	Temperatura média 25ºC	Temperatura média de 57°C
cp1	0,2566	0,2837
cp2	0,2560	0,2903
cp3	0,2731	0,2978
cp4	0,2820	0,3013
Média	**0,2704**	**0,2965**

Como última etapa de caracterização do bloco de concreto celular foi realizado uma análise microestrutural buscando observar a formação e porosidade - formato dos poros e conectividade (porosidade aberta ou fechada). As imagens foram obtidas através da Microscopia Eletrônica de Varredura com sistema de análise por dispersão de energia (MEV-EDS), em um equipamento da marca Jeol, modelo JSM - 6610LV,

no CEME-SUL da FURG. A figuras 6 a 8 apresentam as micrografias obtidas na estrutura da cerâmica isolante.

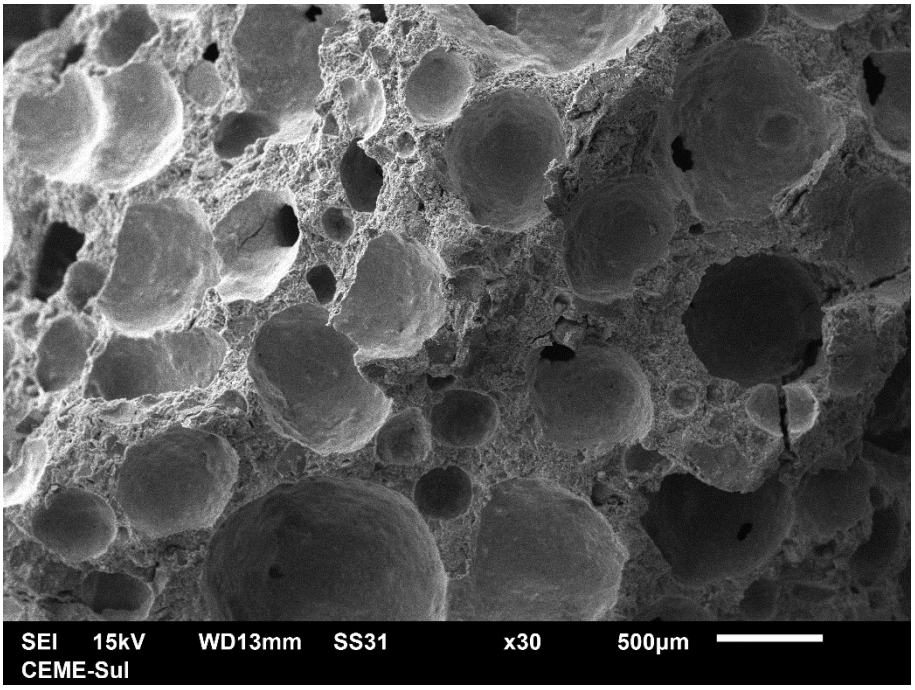


Figura 6 – Micrografia eletrônica de varredura mostrando a superfície interna de um poro do concreto celular - ampliação 30X

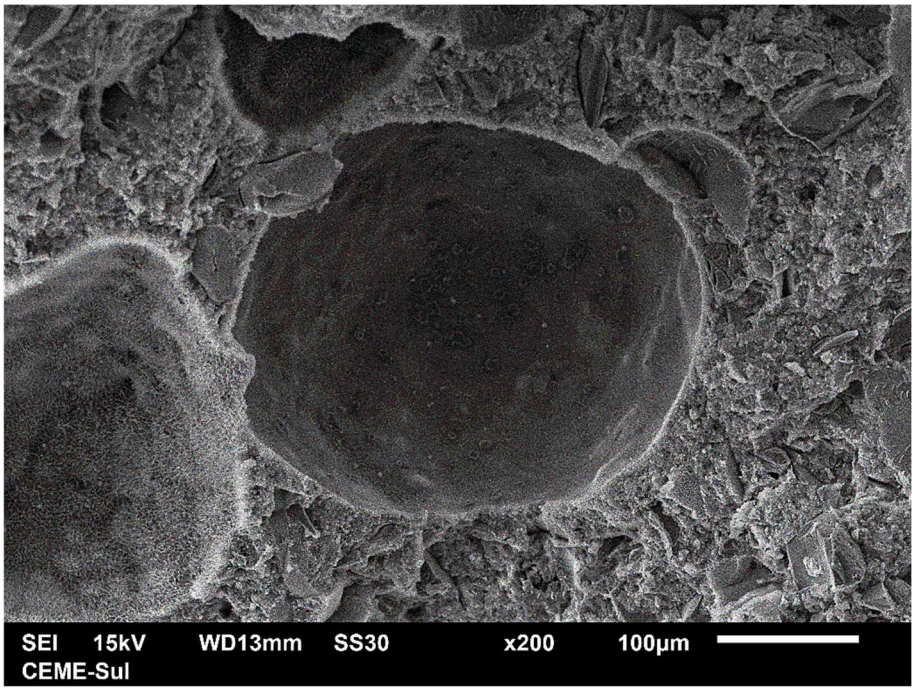


Figura 7 – Micrografia eletrônica de varredura mostrando a superfície interna de um poro do concreto celular - ampliação 200X

Nas micrografias, mesmo com baixa amplitude (30 e 200X), identifica-se uma densa rede de poros de diversos tamanhos, de formato regular e disseminados, podendo ser observada algumas conectividades entre os poros. A estrutura de poros identificada nas micrografias apresenta células isoladas que possibilitam a redução a condutividade térmica do bloco.

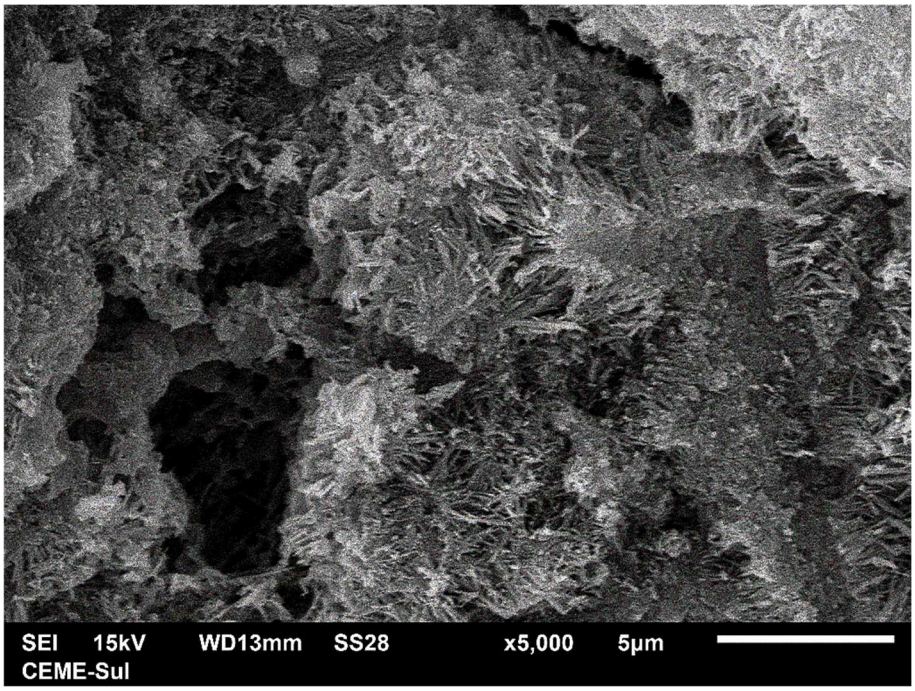


Figura 8 – Micrografia eletrônica de varredura mostrando a superfície interna de um poro do concreto celular - ampliação 5000X

3.3 Formulação de massas cerâmicas

Para a execução dessa etapa foram propostas formulações de massa utilizando a lama da dragagem, a serragem de madeira como agente porogênico e uma argila vermelha utilizada de forma industrial.

O percentual dos constituintes das formulações foi definido considerando trabalhos relacionados com a adição de materiais residuais às massas cerâmicas, tais como o de Dutra e Pontes (2002), Ambrósio, Silva e Duailibi (2004), Medeiros *et al.* (2010), Castro, Soares e Nascimento (2012), Coutinho e Vieira (2016), Areias et *al.* (2017), Ferreira (2019) e Ferreira, Campos Filho e Dutra (2022), nos quais foram

atribuídos aos resíduos a responsabilidade pela formação de peças porosas, utilizando percentuais que variaram entre 2,5% e 30% em massa.

A serragem de madeira utilizada como agente porogênico teve sua primeira proposta de utilização em percentuais de 10% e 20% compostas com a lama da dragagem e a argila vermelha. Além disso, também foram formuladas massas puras de lama e argila vermelha que foram utilizadas como parâmetro. A Tabela 10 apresenta as formulações inicialmente propostas.

Tabela 10 - Formulação de massas cerâmicas com lama (% em massa)

Formulação	Lama	Argila vermelha	Serragem de madeira
F1	100%	-	-
F2	-	100%	-
F3	10%	90%	
F4	20%	80%	
F5	90%	-	10%
F6	80%	-	20%
F7	80%	10%	10%
F8	10%	80%	10%

Para a homogeneização das massas cerâmicas foi proposta a umidade experimental de 8%, estando alinhada a faixa de umidade indicada por Santos (1989), para conformação por prensagem, bem como utilizada por Goes *et al.* (2014), Santos R.C. *et al.* (2017), Coutinho e Vieira (2016), Areias *et al.* (2017) e Santos O.C. *et al*. (2017), em massas cerâmicas que possuíam, características similares as presentes nas massas propostas, tais como: alto teor de ferro presente na argila vermelha, matéria orgânica e alto teor de argila presenta na lama da dragagem.

3.4 Obtenção dos corpos de prova

Para a conformação dos corpos de prova, a lama da dragagem e a argila vermelha foram previamente destorroadas em um moinho de bolas, por um período de 2 horas, e o material moído seco em estufa a 60°C, por 24 horas. Após, foi feita a homogeneização das matérias-primas com o teor de umidade de 8%.

Os corpos de prova foram moldados em formas de aço em duas dimensões, sendo uma menor (Figura 9) nas dimensões de 1,2 cm x 8,5 cm x 1,2 cm (largura,

comprimento e altura, respectivamente) e outra maior (Figura 10) nas dimensões de 7,0 cm x 7,0 cm x 3,0 cm (largura, comprimento e altura, respectivamente).

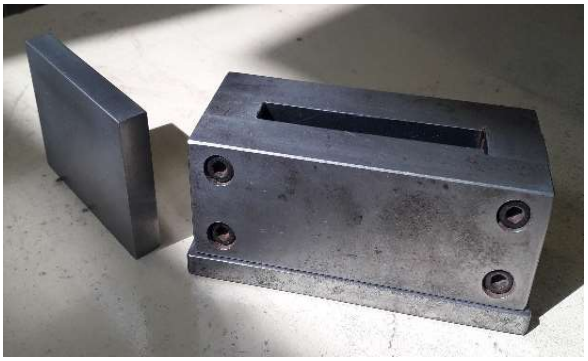


Figura 9 – Molde metálico conformação corpos-de-prova, dimensões de 1,2cm X 8,5cm x 1,2 cm

Figura 10 – Molde metálico conformação corpos-de-prova, dimensões 7,0cm X 7,0cm x 3,0 cm

Foram utilizados 22g de material seco no preparo dos corpos de prova moldados na forma de menor dimensão e 264g de material seco para cada corpo de prova moldado na forma de maior dimensão.

Os corpos de prova foram conformados por prensagem uniaxial e carga de 20MPa, sendo utilizado para os de menor dimensão uma prensa hidráulica da marca Bovenau, modelo P15 ST, e para os de maior dimensão uma prensa hidráulica da marca EMIC, modelo DL3000 e célula de carga com capacidade máxima de 300KN. Os equipamentos descritos pertencem ao Laboratório de Geotecnia e Concreto Professor Cláudio R.R. Dias da FURG.

No molde metálico de menor dimensão (Figura 9) foram conformados 10 corpos de prova por formulação, os quais foram usados para a determinação da retração linear e resistência mecânica à flexão a três pontos. Após esta fase da

caracterização, cada corpo de prova gerou duas novas amostras que foram utilizadas para determinar a porosidade (aberta e fechada) e a absorção de água. Como última etapa, foi utilizada uma amostra de cada formulação para a análise microestrutural.

No molde metálico de maior dimensão (Figura 10) foram moldados 3 corpos de prova por formulação que foram usados para a análise da condutividade térmica.

Após conformados, inicialmente, todos os corpos de prova foram secos a temperatura ambiente de 23ºC por 24 horas e, posteriormente, eles foram secos em estufa a temperatura de 110°C por mais 24 horas.

Para a queima dos corpos de prova foi utilizado um forno de calcinação tipo Mufla Pechini, da marca Linn Elektro Therm, modelo KK 170.16 SO 1059, existente no Laboratório de Geotecnia e Concreto Professor Cláudio R.R. Dias da FURG. Os corpos de prova secos foram sinterizados na temperatura indicada pela indústria fornecedora da argila vermelha, que foi de 900ºC, com uma taxa de aquecimento controlada de 2,5°C/min até 600°C e 5°C/min até atingir a temperatura máxima, sendo mantido nesta por 30 minutos para posterior resfriamento.

A figura 11 apresenta de forma composta algumas etapas do processo descrito na obtenção dos corpos de prova.

Figura 11 – Composição de imagem com as etapas de obtenção dos corpos de prova desde o preparo do material, conformação, secagem e queima.

3.5 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos corpo-de-prova

Os corpos de prova das sete formulações (F1, F2, F3, F4, F5, F9 e F10) foram analisados fisicamente quanto a retração linear, perda de massa ao fogo, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, mecanicamente quanto à resistência mecânica à flexão a 3 pontos e termicamente quanto à condutividade térmica

A retração linear, processo de variação dimensional, foi medida tanto na etapa de secagem (RLs) quanto após a queima (RLq). Para obtenção das medidas foi utilizado um paquímetro com sensibilidade mínima de 0,05mm, sendo a propriedade calculada pelas equações (8) e (9) (SANTOS, 1989). A retração linear total das peças foi determinada pelo somatório das duas variações dimensionais obtidas, sendo identificada como retração linear (RL).

$$RLs(\%) = \frac{Lu-}{Lu} x100 \qquad (8)$$

$$RLq(\%) = \frac{Ls-Lq}{Ls} x100 \qquad (9)$$

Onde:

Lu – Comprimento úmido (cm) após a moldagem

Ls – Comprimento seco (cm)

Lq – Comprimento após a queima (cm)

A perda de massa ao fogo (Pf) foi determinada pela diferença entre a massa seca dos corpos de prova anterior a queima e a massa posterior a queima, conforme equação (10).

$$Pf\ (\%) = \frac{ms-m}{mq}\ x\ 100 \qquad (10)$$

Onde:

ms – Massa seca (g)

mq – Massa posterior queima (g)

A determinação da absorção de água (AA) foi realizada conforme a NBR 15270-2/2017- Componentes cerâmicos – Parte 2: Métodos de Ensaio, e obtida a partir da equação (11) considerando a massa úmida e a massa seca de cada corpo-de-prova.

$$AA(\%) = \frac{mu-ms}{ms} x100 \qquad (11)$$

Onde:

mu – Massa úmida (g)

ms – Massa seca (g)

A porosidade aparente (PA) foi determinada pelo método gravimétrico de Arquimedes, conforme descrito no item 3.2, e expresso na equação (12), em amostras secas a 60°C e imersas em água por 24 horas (massa úmida e massa imersa).

$$PA\ (\%) = \frac{mu-ms}{mu-mi}\, x\ 100 \qquad (12)$$

Onde:

mu – Massa da amostra úmida (g)

ms– Massa da amostra seca (g)

mi– Massa da amostra imersa (g)

A massa específica aparente (Mea) foi obtida a partir da razão entre a massa seca do corpo de prova e seu volume aparente, conforme expressa a equação (13).

$$\rho = \frac{ms}{mu-mi}\ x\ \gamma a \qquad (13)$$

Onde:

ρ – Massa específica aparente (g/cm^3)

ms – Massa seca (g)

mu – Massa úmida (g)

mi– Massa da amostra imersa (g)

γ_a – Massa específica da água (g/cm^3)

Para a determinação da resistência mecânica à flexão a 3 pontos (RM) utilizou-se uma prensa universal, marca INSTRON, modelo 8801, existente no Laboratório de Análises de Tensões – Policab da FURG, conforme a NBR 15310/2009- Componentes cerâmicos -Anexo C. Do ensaio foi obtida a força necessária à ruptura enquanto a tensão de ruptura das amostras de seção retangular foi obtida através da aplicação da equação (14).

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \qquad (14)$$

Onde:

σ - Tensão de ruptura (N/cm^2)

F - Força aplicada (N)

b e *h* - Dimensões da seção retangular (cm)

L -Comprimento do vão utilizado (cm)

A condutividade térmica (λ) dos corpos de prova foi determinada conforme foi feito com o bloco de concreto celular, utilizando-se do método da placa quente protegida. Para tanto, foi usado um equipamento da marca LaserComp, modelo FOX 304, que determina a condutividade térmica de acordo com a norma American Society for Testing and Materials (ASTM) C 518 e a International Organization for Standardization (ISO) 8301, existente no Laboratório de Mecânica Aplicada no Campus Alegrete da UNIPAMPA. O ensaio foi realizado utilizando dois gradientes de temperatura, um entre 10°C e 40°C, e outro entre 40°C e 75°C, obtendo-se valores de condutividade térmica para as temperaturas médias dos intervalos utilizados(25°C e 57°C).

Em especial, considerando a relevância da lama da dragagem na obtenção de cerâmica isolante térmica, para a formulação F1 (composta de 100% de lama) foi realizada uma análise da composição mineralógica por Difração de Raios X, realizada e analisada conforme descrito no item 3.1.3, p.47. Para a realização do ensaio foi removida uma parte da amostra após a queima, desagregada até a obtenção de uma amostra com material passante na peneira # 200, sendo o ensaio realizado com passo para 0,02°, tempo de 2s e faixa angular de 10 a 90°.

A análise da microestrutura foi feita por Microscopia Eletrônica de Varredura com sistema de análise por dispersão de energia (MEV-EDS), em um equipamento da marca Jeol, modelo JSM - 6610LV, no CEME-SUL da FURG. Nessa análise buscou-se verificar a característica da fase (ou estrutura) porosa formada no interior do corpo de prova. Os corpos-de-prova foram removidos a partir de amostras utilizadas no ensaio de resistência mecânica, sendo utilizado uma serra possibilitando a remoção de uma fatia de face plana. As imagens produzidas foram obtidas da face interna dos corpos-de-prova.

Para a realização dos experimentos foram produzidos 10 corpos de prova por formulação nas dimensões de 1,2cm x 8,5cm x 1,2cm e 3 corpos de prova por formulação nas dimensões de 7cm x 7cm x 3cm, distribuídos conforme demonstrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Determinação experimental da pesquisa – corpos de prova por formulação

Ensaio	**Corpos de prova por formulação**	**Total de corpos de prova para as 8 formulações**	**Determinação**
Retração linear	10	80	Variação dimensional (RL %)
Absorção Água			Absorção de água (AA %) NBR 15270-2/2017
Porosidade			Porosidade aparente (PA %) - Método gravimétrico de Arquimedes
Resistência Mecânica			Resistência mecânica (σ -N/cm^2) NBR 15310/2009
Perda ao Fogo			Variação de massa (PF %)
Massa Específica Aparente			Massa Específica Aparente (Mea) (ASTM, 1977) C373-72 - (g/cm^3)
Condutividade térmica	3	24	Condutividade térmica - (ASTM) C 518 e (ISO) 8301 (λ -W/m°C)
Microestrutura	*	*	Análise microestrutural - MEV (utilizar 1 CP de cada formulação)
Total de CP's		**104**	

3.6 Análise estatística de variância ANOVA

Nos dados obtidos na caracterização física, mecânica e térmica dos corpos de prova foi realizado um estudo estatístico pela metodologia ANOVA (Analysis of Variance) de uma via considerando nível de significância α de 5%, utilizando-se o

teste F para a comparação entre as variâncias. Em casos em que foi verificada diferença significativa da variável nas diferentes formulações, foi aplicado o teste de comparação entre médias conhecido como Teste de Tukey.

Também, foi aplicado uma matriz de correlação entre todos os parâmetros físicos determinados em todas as formulações, buscando alguma correlação entre as propriedades físico-mecânicas, possibilitando observar a relação direta ou indireta entre alguns parâmetros descritos em bibliografias ou observados em pesquisas.

A partir deste estudo foi possível observar o comportamento entre as formulações para cada parâmetro estudado, buscando identificar entre as formulações a existência ou não de diferenças significativas, que em conjunto com os resultados obtidos confrontados com normas ou referências bibliográficas permitiram identificar tanto um melhor ou pior desenvolvimento, quanto agrupar formulações que significativamente apresentaram mesmo comportamento com formulações diferentes.

4 Resultados e Discussão

A seguir são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento da pesquisa, considerando os objetivos específicos propostos.

4.1 Caracterização das Matérias-Primas.

4.1.1 Caracterização Física

Lama da Dragagem

A caracterização granulométrica da lama da dragagem (Figura 12) foi executado conforme descrito no item 3.1.1, p.46, sendo o ensaio granulométrico realizado primeiramente por sedimentação visto não haver fração de pedregulho (o que dispensa o peneiramento grosso) (Figura 12B) e, posteriormente, por peneiramento, sendo os dados obtidos utilizados na produção das curvas granulométricas (Figura 13) das três amostras ensaiadas.

(A)

(B)

Figura 12 – (A) Lama da dragagem – lama; (B) Ensaio de sedimentação da lama

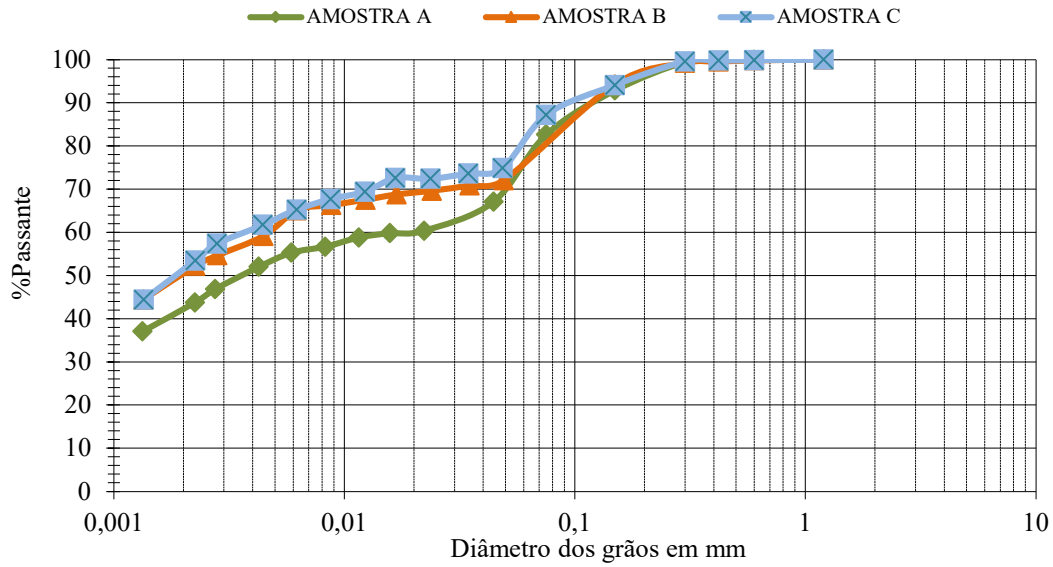


Figura 13 – Distribuição granulométrica da lama obtida na dragagem, amostras A, B e C coletadas individualmente do volume total recebido.

A Tabela 12 apresenta as frações granulométricas identificadas que, juntamente com a curva de distribuição, permitem classificar a lama da dragagem como uma argila-silto-arenosa, estando esta classificação alinhada a identificada por Valério, Alves e Fontoura (2016) e Machado, Bastos e Fagundes (2019) para materiais também provenientes do canal de acesso ao Porto.

Tabela 12 – Frações Granulométricas identificadas para o Sedimento de Dragagem

Faixas Granulométricas NBR 6502	**Amostra A**	**Amostra B**	**Amostra C**	**Média**
Areia (0,06mm< ø < 2mm)	22%	24%	20%	22%
Silte (0,002mm< ø < 0,06mm)	36%	24%	28%	29%
Argila (ø < 0,002mm)	42%	52%	52%	49%

Cabe salientar que a dragagem de portos marinhos ou estuários remove o solo residual carreado pelas correntes e que a composição granulométrica destes materiais depende de diversos fatores como: a hidrodinâmica do local, profundidade e heterogeneidade do solo transportado, o que dificulta similaridade entre materiais dragados de diferentes portos, ou até ao longo do mesmo porto, enseada ou baia.

Na comparação entre as análises da lama da dragagem com matérias primas usadas para a produção de cerâmica vermelha foram observadas semelhanças em composições granulométricas descritas por Brito *et al.* (2015) para argilas da Paraíba,

Pereira *et al.* (2011) para a argila do Campos dos Goytacazes no Rio de Janeiro e Perez *et al.* (2010) para massas cerâmicas de São Domingos do Sul no Rio Grande do Sul, comparativamente aos aproximados 50% de material argiloso identificado na lama estudada.

A maior presença de material argiloso nas matérias-primas promove uma maior trabalhabilidade nas massas cerâmicas, promovendo maior densificação no material devido ao maior contato entre as partículas, pontos onde ocorrem as reações químicas no processo de queima, condição que favorece a formação de fase líquida e preenchimento de vazios. (Santos *et al.* 2017 e Prado *et al.* 2008).

Essa habilidade em ser conformado e manter a estrutura desejada, atribuem aos materiais argilosos uma característica importante na produção cerâmica, a trabalhabilidade que pode ser determinada através dos limites de consistência (limite de liquidez – LL e limite de plasticidade – LP).

Silva *et al.* (2011) descrevem que a plasticidade de uma argila depende não só da sua composição granulométrica, mas também de fatores como o tipo de argilominerais e o teor de matéria orgânica que compõe a massa, além da sua aptidão a absorção de água.

Já Vieira e Pinheiro (2011) descrevem que o limite de liquidez busca a identificação da quantidade máxima de água que o material suporta sem alterar seu estado plástico, e o limite de plasticidade a quantidade mínima de água necessária para o material alcançar seu estado plástico, sendo o índice de plasticidade (IP) a diferença dessas duas grandezas.

Os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) da lama foram determinados conforme descrito no item 3.1.1, p.47. A tabela 8 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 13 – Limites de Consistência obtidos para a lama de dragagem

	LL	LP	IP
Amostra A	68,0%	44,0%	24,0%
Amostra B	65,0%	39,0%	26,0%
Média	66,0%	41,0%	25,0%

A análise dos resultados da Tabela 13 mostrou que para a lama o índice de plasticidade médio é de 25%, o que permite identificar, segundo Caputo (1996) e Das (2007), que o material é de alta plasticidade visto que o IP é superior a 15%.

Outro fator relevante na identificação do comportamento plástico do material é a sua possibilidade de conformação, tendo em visto que a extrusão é o processo de conformação mais utilizado na indústria da cerâmica vermelha. Marsigli e Dondi (1997) descreveram que uma argila deve apresentar para uma extrusão aceitável um índice de plasticidade (IP) entre 10% e 34% e um limite de plasticidade (LP) entre 18% e 31%, devendo, no entanto, para uma ótima extrusão, atender a um IP entre 15% e 25% e um LP entre 18% e 25%. Esses limites também são descritos por Abajo (2000), diferindo apenas no índice de plasticidade com IP>10%, mas LP entre 18% e 25%.

A partir das definições de Marsigli e Dondi (1997) e de Abajo (2000) pode-se concluir que o índice de plasticidade obtido para a lama (25%) atende ao parâmetro definido para um material ótimo à extrusão e que o seu elevado limite de plasticidade (39%-44%) a conduz a uma maior dificuldade na secagem das peças, devido a necessidade de maior umidade na conformação. Cabe ressaltar que esta condição pode ser corrigida pela constante prática de ajustes em formulações de massas na indústria cerâmica, capazes de ajustar características previamente identificadas através de composição utilizando diferentes matérias primas.

A alta plasticidade da lama se justifica pela presença de argilominerais e, possivelmente, também, pela presença da matéria orgânica.

Argila Vermelha

O ensaio granulométrico foi executado conforme metodologia descrita, sendo realizado primeiramente por peneiramento grosso, seguido da sedimentação e, posteriormente, por peneiramento fino, sendo os dados obtidos utilizados na produção de curvas granulométricas (Figura 14) e na determinação dos índices de consistência (Tabela 14).

Tabela 14 – Frações Granulométricas identificadas para a Argila Vermelha

Faixas Granulométricas NBR6502	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Média
Pedregulho (ø>2mm)	2%	2%	2%	2%
Areia (0,06mm<ø< 2mm)	28%	24%	26%	26%
Silte (0,002mm< ø < 0,06mm)	28%	32%	30%	30%
Argila (ø < 0,002mm)	42%	42%	42%	42%

De acordo com as frações granulométricas identificadas na Tabela 9, a argila vermelha pode ser classificada como um material argiloso (42%), mesma classificação obtida para a lama da dragagem (49% de argila, 29% de silte e 22% de areia).

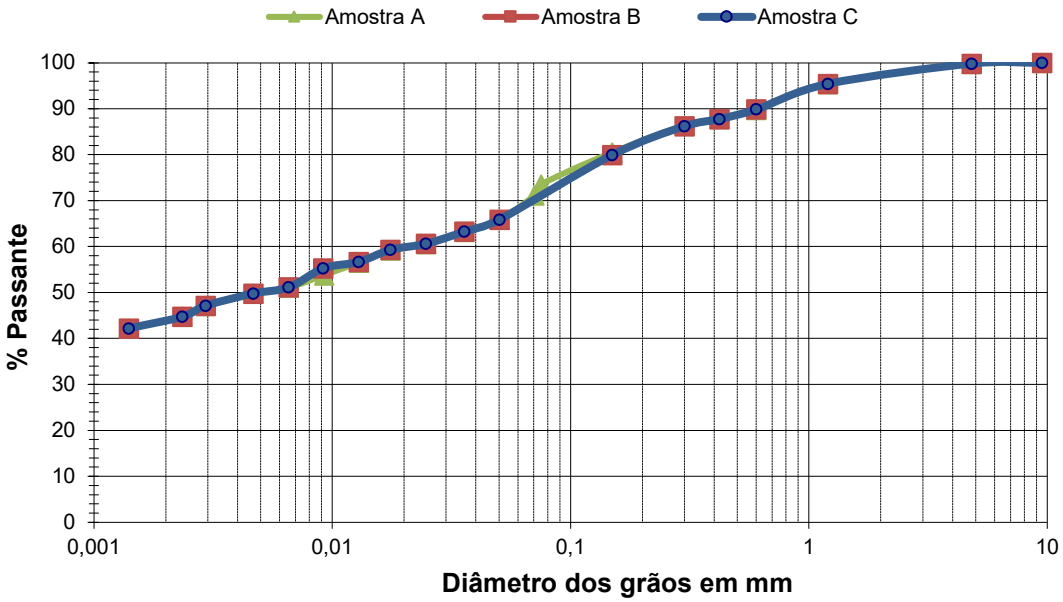


Figura 14 – Distribuição granulométrica da argila vermelha

De acordo com Vieira e Pinheiro (2011), a presença de areia nas formulações cerâmicas é importante para o ajuste de trabalhabilidade e da plasticidade e, também, na redução da retração que ocorre na secagem e queima. No entanto, a presença de areia em maiores volumes e diâmetros promove o risco de aparecimento de trincas causadas pela transformação do quartzo durante a queima.

A trabalhabilidade da argila vermelha, também, foi analisada. A Tabela 15 apresenta os limites de consistência obtidos, para os quais obteve-se um limite liquidez (LL) de 40% e limite de plasticidade (LP) de 18%, parâmetros este que, segundo Marsigli e Dondi (1997) e Abajo (2000), atenderiam aos intervalos percentuais para uma ótima moldagem por extrusão.

Tabela 15 – Limites de Consistência obtidos para argila vermelha

	LL	LP	IP
Amostra A	42,0%	18,0%	23,0%
Amostra B	38,0%	18,0%	21,0%
Média	40,0%	18,0%	22,0%

A análise da trabalhabilidade da argila vermelha (Tabela 15) mostra um índice de plasticidade médio de 22% possibilitando sua caracterização como uma argila de alta plasticidade (IP>15%), mas de inferior trabalhabilidade em relação a lama da dragagem (IP 25%). A maior plasticidade da lama da dragagem pode ser justificada pela maior quantidade de matéria orgânica em sua composição (Santos, 1989).

Serragem de madeira

A utilização da serragem de madeira como aditivo orgânico gerador de porosidade em massas cerâmicas já foi estudada por Ferreira (2019), Dutra e Pontes (2002), Dutra e Pontes e Junior (2003). Não há uniformidade quanto a um ótimo percentual para adição da serragem visto que a utilização deste material altera propriedades como porosidade, absorção de água, condutividade e resistência mecânica, parâmetros que tem importância diretamente vinculada a necessidade do material produzido.

A distribuição granulométrica foi obtida por peneiramento com agitação mecânica (Figura 15-A), onde foram utilizadas, para fim comparativo, as mesmas peneiras do ensaio granulométrico realizado na lama de dragagem e argila vermelha.

(A)

(B)

Figura 15 – (A) Peneiramento da serragem de madeira; (B) material retido por peneira

Com a pesagem do material retido em cada peneira (Figura 15-B) mediu-se a distribuição granulométrica e determinaram-se as frações granulométricas (Tabela 16) presentes na serragem utilizada.

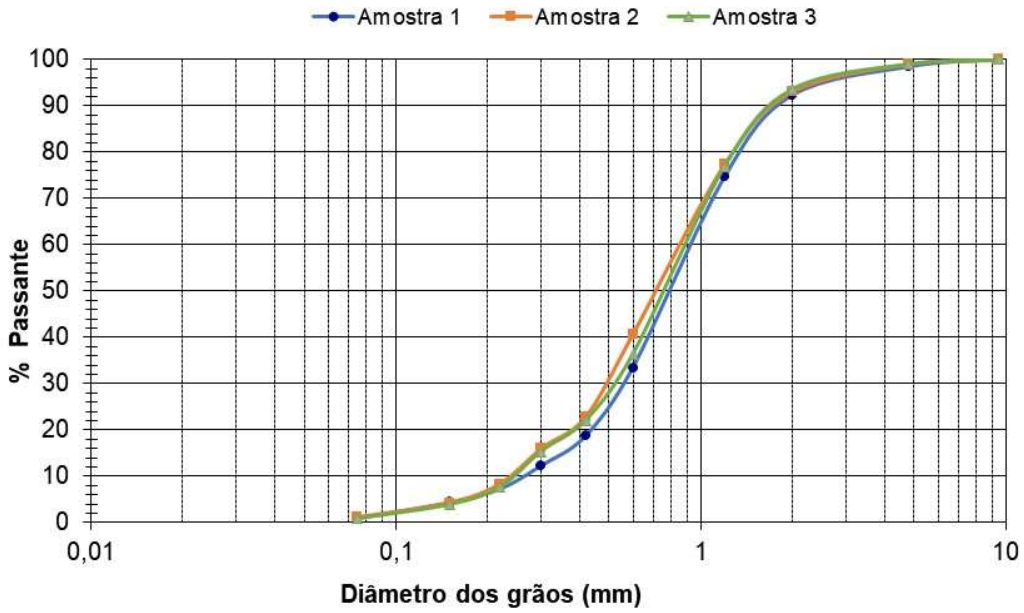


Figura 16 – Distribuição granulométrica da serragem de madeira utilizada no experimento

Tabela 16 – Frações Granulométricas identificadas para a serragem de madeira

Faixas Granulométricas NBR 6502	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
ø>2mm	7,74%	6,89%	6,37%	7,00%
0,6mm<ø<2mm	58,76%	52,50%	57,25%	56,17%
0,6mm<ø<0,2mm	26,18%	32,30%	28,73%	29,07%
ø<0,2mm	7,32%	8,31%	7,65%	7,76%

Analisando-se as curvas granulométricas da Figura 16 e os valores de frações granulométricas a partir da NBR 6502 (solos) apresentados da Tabela 16, verificou-se que a serragem de madeira apresentou, quase que em sua totalidade, granulometria inferior a 4,2mm e que cerca de 56% do material ficou compreendido entre os diâmetros de 0,6mm e 2mm, podendo esta ser comparável a granulometria de uma areia grossa

As faixas granulométricas da serragem de madeira foram comparadas as da lama de dragagem conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Frações Granulométricas da lama da dragagem em comparação com a serragem de madeira

	Faixas Granulométricas	**Lama da dragagem**	**Serragem de Madeira**
Pedregulho	ø > 2mm	0%	7,00%
Areia Grossa	0,6 mm< ø < 2mm	0%	56,17%
Areia Média	0,2 mm< ø < 0,6mm	3%	29,07%
Areia Fina	0,06 mm< ø < 0,2mm	19%	7,76%
Silte	0,002 mm< ø < 0,06mm	29%	
Argila	ø < 0,002mm	49%	

Na análise comparativa entre as faixas granulométricas da Tabela 17, identificou-se que 97% das partículas da lama da dragagem são inferiores a 0,2mm, enquanto para a serragem de madeira mais de 90% é superior a este limite. Esses resultados mostraram a efetiva presença de maiores tamanhos de partículas na serragem de madeira se comparados as partículas da lama da dragagem.

No entanto, para evitar possíveis defeitos ocasionados na microestrutura das peças promovidos por poros originados por partículas de grande tamanho, optou-se por trabalhar com partículas de serragem de madeira com tamanhos menores que 0,42mm, limite máximo da composição granulométrica da lama da dragagem.

É importante ressaltar que a geometria das partículas da serragem de madeira não possui formato esférico (Figura 17), mas sim formato alongado, o que, possivelmente, deverá contribuir para a formação de poros mais irregulares.

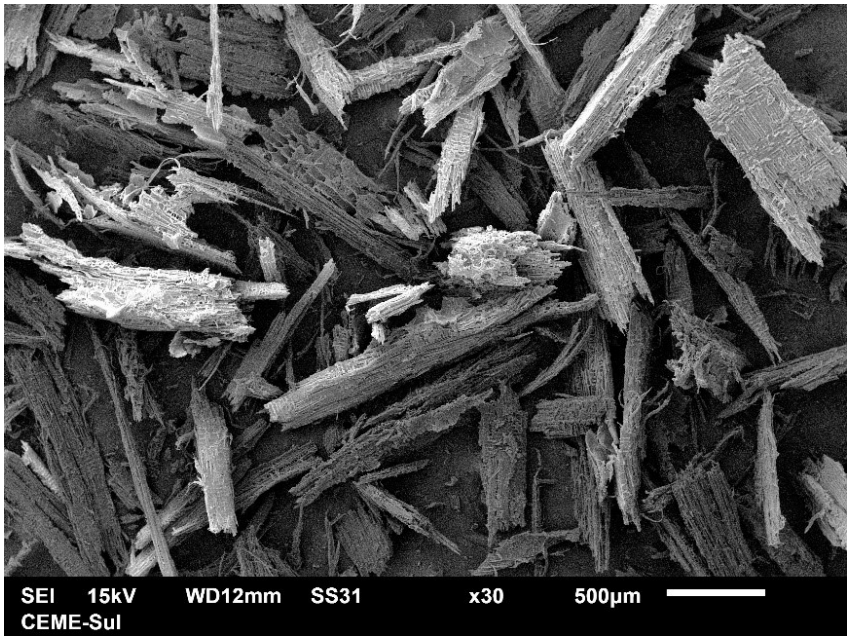


Figura 17 – Imagem morfológica da serragem de madeira, ampliada 30X por MEV.

4.1.2 Composição Química

Lama da Dragagem

A fim de um conhecimento prévio da lama oriundo do processo de dragagem, em uma amostra de material obtida anteriormente ao material utilizado neste trabalho, foi realizado um ensaio de Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) no CEME-SUL da FURG. A análise realizada em uma área da amostra apresentou os elementos indicados na Tabela 18, com maior presença de Si, Al e Fe, seguido por pequenas proporções de elementos como sódio (Na), potássio (K), magnésio (Mg) e cálcio (Ca).

Tabela18 -Composição química elementar da lama por EDS (% em peso)

O	C	Si	Al	Fe	Cl	Na	K	Mg	Ca	Ti
44,77	20,67	15,72	5,66	3,99	3,4	2,73	1,09	0,87	0,69	0,4

A análise prévia da lama de dragagem foi comparada com valores indicados por Santos (1989) e Callister (2002) para a composição de uma argila para uso em formulação cerâmica. De acordo com os pesquisadores, a argila usada como matéria prima básica para a produção dos materiais cerâmicos tem em sua composição uma maior presença de alumínio e sílica, podendo conter pequenas quantidades de elementos como sódio, potássio, cálcio, magnésio e ferro entre outros. O comparativo indicou uma similaridade química entre a lama da dragagem a argila utilizada como matéria prima na fabricação cerâmica, não só pela presença de sílica e alumina, elementos dominantes em materiais terrosos, mas também pela presença de óxidos considerados fundentes. Esse resultado motivou o desenvolvimento do presente trabalho.

De posse do material utilizado nessa tese, para a caracterização química da lama da dragagem foi realizado um ensaio de fluorescência de raios X (FRX) descrito no item 3.1.2, p. 47, sendo o resultado obtido reproduzido na Tabela 19.

Tabela19 – Composição química da lama por Fluorescência de Raios X – FRX (% em peso)

SiO_2	AlO_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	Cl	SO_3	TiO_2	P_2O_5	MnO	ZrO_2	Outros óxidos
54,28	16,08	14,37	4,12	2,35	2,35	2,25	1,58	1,24	0,29	0,1	$\geq$0,1

Assim como já identificado na análise prévia da lama de dragagem por EDS, a composição química obtida por FRX mostrou-se similar à de uma matéria prima tradicional utilizada na produção cerâmica, com a presença de sílica (SiO_2) e alumina (AlO_3) além de outros óxidos como o potássio, cálcio e o ferro. A presença de óxido de ferro (Fe_2O_3) confere a cor avermelhada as peças após a queima, atribuindo a este material característica de coloração identificada especialmente na produção cerâmica tradicional vermelha.

Santos (1989) descreve a capacidade dos óxidos alcalinos (Na_2O e K_2O) e alcalinos terrosos (CaO e MgO) em promover a formação da fase líquida, os chamados de óxidos fundentes, geralmente promovendo a queima destas massas a temperaturas até 1000°C, o que se torna interessante do ponto de vista industrial devido a possibilidade de produção a um menor custo energético, por consequência ambiental e financeiro.

A presença de cloretos identificada na lama é incomum quando se trata de matérias primas cerâmicas convencionais, mas coerente ao local de extração deste material – um estuário marinho. Florêncio (2000), Hamer e karius (2002), Romero *et al.* (2008) e Belmonte, Bertelsen e Gieystor (2016), também, descreveram sua preocupação frente a possibilidade de formação de gases tóxicos durante a queima das peças cerâmicas que contém sais solúveis em sua composição, devido a possibilidade de liberação de alguns gases que, segundo os autores, poderiam ocasionar desde problemas aos fornos até ao meio ambiente.

Florêncio (2000) e Menezes *et al.* (2006) descreveram ainda a impossibilidade de relacionar diretamente a presença de sais solúveis nas massas cerâmicas a formação de eflorescências, tratando essa presença apenas como um indicativo a sua ocorrência, não sendo identificada nenhuma regulamentação normatizada no Brasil que trate do tema, ainda que a norma Portuguesa NP 80 (1964) e a norma Europeia EM 771-1 (2011) tragam limites de 0,5% e 0,25% em massa, respectivamente.

No entanto, estudos apresentados por Belmonte, Bertelsen e Gieystor (2016) identificaram a presença de aproximadamente 1% de cloretos na matéria-prima analisada (sedimentos de dragagem), não sendo detectado eflorescência superficial nas amostras produzidas. Magaldi *et al.* (2016) utilizaram a adição de cloreto de sódio (NaCl) na formulação de massa, obtendo uma cerâmica porosa através da remoção

térmica do sal aditivado, ocorrido durante a queima, obtendo êxito na proposta de produção de uma cerâmica porosa.

Contudo, como complementação à caracterização química foi realizada a quantificação de cloretos através do Método de Mohr, tendo sido realizado em forma de triplicata buscando a quantificação de cloretos livres e totais presentes na amostra da lama. A identificação de cloretos livres visa determinar a quantidade de íons cloros não alocados em reticulo cristalino, ou seja, íons mais disponíveis para a evolução gasosa O método Mohr é extensivamente empregado para determinação de cloreto, o qual baseia-se na titulação da amostra (solução contendo o cloreto) com uma solução de $AgNO_3$ em presença de K_2CrO_4, como indicador. (DA CRUZ E CLAIN, 2010)

A quantificação dos cloretos foi realizada pelo laboratório de Físico-Química Aplicada e Tecnológica (LAFQAT) da Escola de Química e Alimentos da FURG, sendo os dados obtidos apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Determinação de cloretos pelo método de Mohr

Amostras	% de Cl Livre	% de Cl Total
1	1,17	2,92
2	1,16	2,97
3	1,18	2,75
Média	**1,17**	**2,88**
Desvio Padrão	0,008	0,11

Analisando-se os resultados da Tabela 20, foi possível identificar a presença de 2,88% de cloretos totais (Cl^-) e 1,17% de cloretos livres. O percentual identificado para a presença de cloretos totais é próximo ao percentual identificado no ensaio de fluorescência de raios X (2,35%).

Para a determinação de Cl livre, foi aplicado um método de preparo de amostras baseado em lixiviação. Para isso, aproximadamente 1,0g de amostra foi pesado diretamente em um béquer, seguido da adição de 20mL de água destilada e encaminhada ao aquecimento com agitação por 30 min. Em seguida, a solução foi filtrada a vácuo e a solução resultante foi transferida para um balão volumétrico de 50mL e seu volume final completado com água destilada. Antes da titulação com

$AgNO_3$ para determinação de Cl, o pH da solução foi ajustado para o neutro com adição de NaOH 0,1 M.

Para a determinação de Cl total, foi aplicado um método de preparo de amostras baseado em decomposição, adaptado de Oreste *et al*. (2017). Para isso, aproximadamente 0,5 g de amostra foi pesado diretamente em um frasco volumétrico, seguido da adição de 10mL de HNO_3, 10mL de HF e encaminhada ao banho ultrassônico com aquecimento por 3 h. Após esse período, a solução foi avolumada a 50mL com água destilada. Antes da titulação com $AgNO_3$ para determinação de Cl, uma alíquota de 5mL da solução foi transferida para outro frasco volumétrico e seu volume final de 50mL foi completado com água destilada (aplicando um fator de diluição de 10 vezes), além de um ajuste de pH para o neutro com adição de NaOH 5M.

Considerando a identificação apenas dos cloretos livres, o resultado obtido (1,17%) supera os limites identificados nas normas Portuguesa e Europeia, mas se aproxima do percentual identificado por Belmonte, Bertelsen e Gieysztor (2016) que foi de 1%, onde não foi identificada a formação de eflorescências nas peças produzidas.

Argila Vermelha

Seguindo a metodologia proposta, para a caracterização da composição química da argila vermelha uma amostra foi encaminhada ao Laboratório Novonano grupo de tecnologias aplicadas em materiais avançados – UFPEL para a realização do ensaio de fluorescência de raios X, sendo o resultado obtido apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 – Composição química da argila vermelha por fluorescência de raios X FRX (% em peso)

SiO_2	AlO_3	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	CaO	MnO	ZrO	VO	SrO_2	ZnO	Outros Óxidos
57,31	18,75	13,69	6,26	2,06	1,25	0,29	0,17	0,08	0,04	0,03	0,07

A composição química da argila vermelha identificou como principais óxidos o SiO_2, AlO_3, Fe_2O_3 e K_2O seguidos de outros em pequenas quantidades, demonstrando similaridade a uma típica composição química de argilas utilizadas como material

básico à produção cerâmica. Destaca-se que este material é utilizado industrialmente na produção de cerâmica vermelha o que justifica o alto teor de ferro identificado.

Comparando-se a composição química da lama de dragagem com a da argila vermelha pode-se identificar uma grande similaridade entre os óxidos de silício, alumínio, ferro e potássio, indicando uma possível utilização da lama como matéria prima para produção cerâmica.

4.1.3 Caracterização Mineralógica

Lama da Dragagem

A análise da composição mineralógica da lama da dragagem foi realizada conforme descrito no item 3.1.3, p.47. No entanto, após análise dos dados recebidos, observou-se uma grande diferença os picos de difração do quartzo que apresentaram uma grande intensidade frente aos demais identificados. Buscando uma maior fidelização na identificação dos picos (ou fases que compõe esse material) foi aplicada uma segunda metodologia, produzindo uma nova amostra, a qual foi identificada como amostra B, sendo a primeira analisada identificada como amostra A.

Para amostra A o material foi destorroado, peneirado em #200 e seco em estufa a temperatura de 100°C por 48 horas. Já para a amostra B o material foi destorroado, peneirado em #200, seco em estufa 60°C por 24h, e, posteriormente, misturado em solução com água destilada e defloculante (hexametafosfato de sódio) da qual somente o material em suspensão (materiais mais finos) foi utilizado para a realização do ensaio de difração de raios x. O material obtido deste processo foi novamente seco, destorroado.

O preparo feito na amostra B preparada com a solução defloculante buscou a redução da presença do quartzo na amostra, que se apresenta principalmente na fração de areia, contribuindo assim para redução da diferença de intensidade dos picos, auxiliando na análise das demais possíveis fases mineralógicas presentes no material. A figura 18 apresenta os resultados de DRX das amostras A e B.

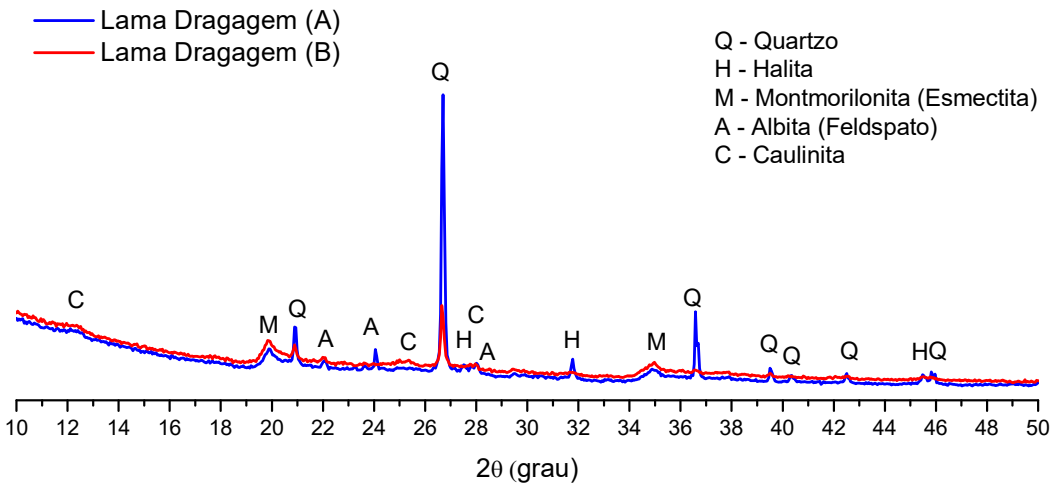


Figura 18 – Difratogramas de Raios X de amostras da lama da dragagem

Na análise dos difratogramas da figura 18 foram identificadas como fases mineralógicas presentes na lama da dragagem o quartzo (COD 01-085-0794), a halita (COD 01-07-0751), a albita (COD 00-041-1480), a montmorilonita (COD 00-029-1499) e a caulinita (COD 00-029-1488), cujas fórmulas químicas estão apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Fórmulas químicas das fases mineralógicas identificadas na análise da Difração de Raios X para a lama da dragagem

Símbolo	Mineral	Fórmula	Ref. Cod.
Q	Quartzo	SiO_2	01-085-0794
H	Halita	NaCl	01-07-0751
A	Albita	(Na, Ca) Al (Si, Al)3º8	00-041-1480
M	Montmorilonita	$Na_{0.3}$ (Al, Mg)$_2Si_4O_{10}$ (OH)$_2$ ·8H_2O	00-029-1499
C	Caulinita	$Al_2Si_2O_5$ (OH)$_4$	00-029-1488

A sílica presente na lama da dragagem é proveniente do quartzo, da albita, da montmorilonita e da caulinita. A albita é um silicato de alumínio calco-sódico pertencente à família dos feldspatos, que, atua como fundente em massas cerâmicas, ou seja, reduz a temperatura necessária a formação de fase líquida durante o processo de queima. A Montmorilonita pertence ao grupo das esmectitas, geralmente promove alta plasticidade nas argilas que a possui em sua composição, característica identificada no material analisado (IP>15%). A caulinita, como a montmorilonita,

pertence ao grupo dos filossilicatos, atribuindo plasticidade as massas cerâmicas, além de contribuir positivamente nas propriedades físico-mecânicas das cerâmicas (SANTOS, 1989).

Apesar dos altos teores de ferro identificados através da Fluorescência de Raios X, não foi possível observar a presença deste elemento em nenhuma fase cristalina identificada. Segundo Brito *et al.* (2015), o Fe_2O_3 presente na amostra poderia estar associado ao argilomineral do grupo da esmectita.

Santos (1989) descreveu para os sedimentos marinhos a presença da ilita, a montmorilonita e a clorita como principais argilominerais componentes nos sedimentos analisados, aparecendo a caulinita em poucos casos, embora em sedimentos marinhos mais antigos a montmorilonita possa apenas ser identificada em pequenas quantidades, e a caulinita poderá ser ausente ou em constará em mínimas quantidades.

Considerando que a lama de dragagem utilizada nesse trabalho é um sedimento de estuário marinho e que foram identificadas como fases mineralógicas o quartzo, a halita, a albita (feldspato) além dos argilominerais como a esmectita e a caulinita, foi possível concluir que a mineralogia encontrada está, em parte, alinhada a descrição feita por Santos (1989) para sedimentos de origem similar.

Além disto, as fases mineralógicas identificadas para a lama da dragagem são, em grande parte, análogas as identificadas em Suelen (2010) e Valério (2017) para os sedimentos de área marinha extraídos entre Torres e o canal de acesso ao Porto de Rio Grande, descrevendo como fases majoritárias a esmectita, a ilita, a caulinita e o quartzo.

O quartzo, feldspatos e esmectitas em conjunto com outros minerais, também, são observados em matérias primas cerâmicas estudadas por Brito *et al.* (2015), Reis, Sagrillo e Diaz (2016), Santos *et al.* (2017) e Figueiredo *et al.* (2018).

No entanto a presença da halita (NaCl), ainda que não componha tradicionalmente as massas cerâmicas, está alinhada a origem estuarina do material lamoso, apresentando em sua composição os chamados sais solúveis, que, segundo Florêncio (2000), indicam a possibilidade de formação das florescências (cristalização dos sais pela evaporação da solução aquosa), podendo causar além da degradação microestrutural e estética, sérios danos estruturais (MENEZES *et al.*, 2006), conforme discutido no item 2.1.2.

Argila Vermelha

A análise realizada na argila vermelha está representada no difratograma apresentado na figura 19 sendo identificadas como fases mineralógicas o quartzo (COD.01-086-629), a anortita (COD 01-070-0287) e a microclina (COD 01-071-0955), estando suas fórmulas químicas apresentadas na Tabela 23.

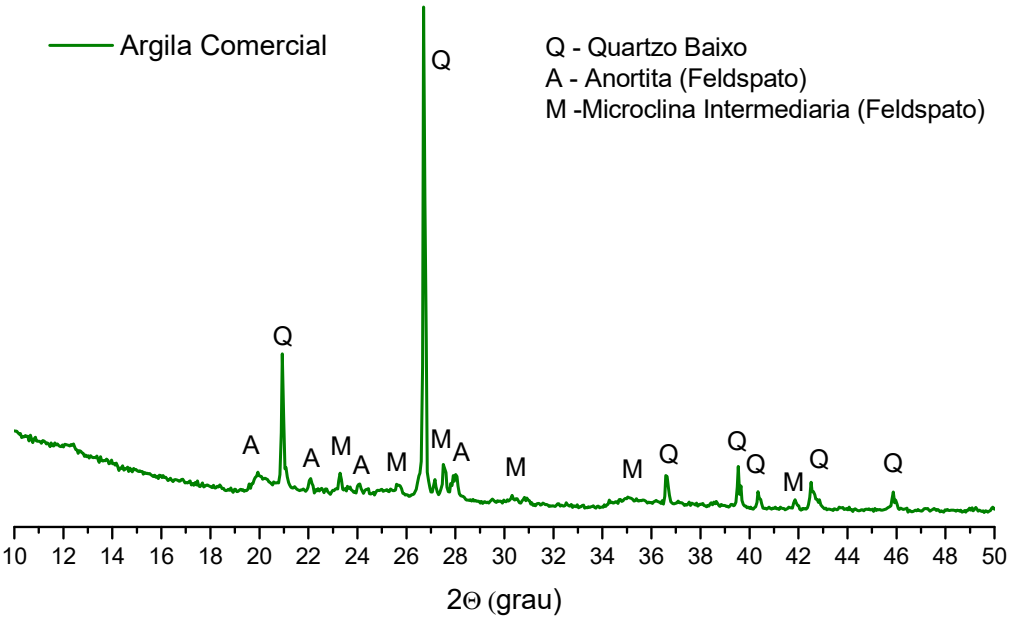


Figura 19 – Difratograma de Raios X da argila vermelha

Tabela 23 – Fórmulas químicas das fases mineralógicas identificadas na análise da Difração de Raios-X para a argila vermelha comercial

Símbolo	Mineral	Fórmula	Ref. Cod.
Q	Quartzo	SiO_2	01-086-1629
M	Microclina Intermediária	$K(AlSi_3O_8)$	01-071-0955
A	Anortita	$CaAl_2Si_2O_8$	01-070-0287

A análise da composição mineralógica da argila vermelha mostrou a presença elevada de quartzo e de picos de pequena intensidade de feldspatos, mineralogia presente na maioria das massas cerâmicas tradicionais.

4.1.4 Caracterização Térmica

Lama da Dragagem

O ensaio térmico foi realizado conforme descrito no item 3.1.4, p.47. A figura 20 apresenta a termogravimetria derivada (DTG) obtida para lama da dragagem, onde verifica-se os primeiros picos nas temperaturas de 80°C, 114°C e 150°C. Segundo Santos (1989), Brito *et al.* (2015) e Figueiredo *et al.* (2018) estes picos identificados podem estar associados a perda de água livre e adsorvida.

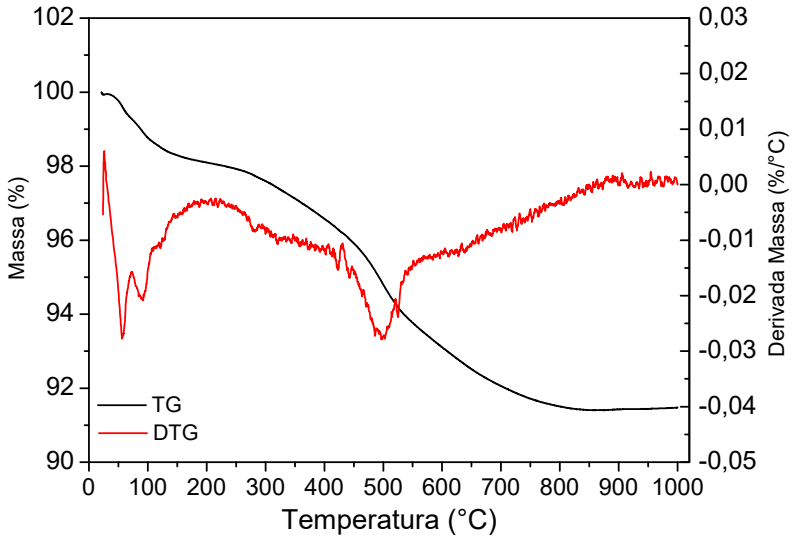


Figura 20 – Curva termogravimétrica (TG) e termogravimetria derivada (DTG) obtidas para a lama da dragagem.

Já o movimento observado entre 200°C e 300°C, possivelmente, possa ser relacionado a queima de matéria orgânica, que ocorre até 400°C. O pico observado a temperatura de 500°C pode estar associado a desidroxilação dos argilominerais, que ocorre nas esmectitas ricas em ferro entre 500°C e 550°C e nas caulinitas iniciando em 450°C, e, finalizando, em 600°C, comportamento descrito por Santos (1989) e identificado por Gama *et al.* (2017) para esmectitas e caulinitas.

Quanto a variação de massa, a análise por TG identificou uma redução de aproximadamente 8%, valor este bem inferior aos identificados por outros pesquisadores para matérias-primas argilosas similares. Como exemplos citam-se: 40% de perda identificado por Areias *et al.* (2017), 16% e 21% identificados por Brito *et al.* (2015) e 13% identificado por Reis, Sagrillo e Diaz (2016)

Argila vermelha

A figura 21 apresenta a termogravimetria derivada (DTG) referente a argila vermelha, podendo ser identificado um pico a 100°C, possivelmente, associado a perda de água livre e adsorvida, e outro a 500°C, provavelmente, decorrente da desidroxilação dos argilominerais.

Quanto à variação de massa, na análise da curva por termogravimetria (TG) pode ser observada uma perda de massa inferior a 6%, o que pode ser associada a uma baixa presença de matéria orgânica no material.

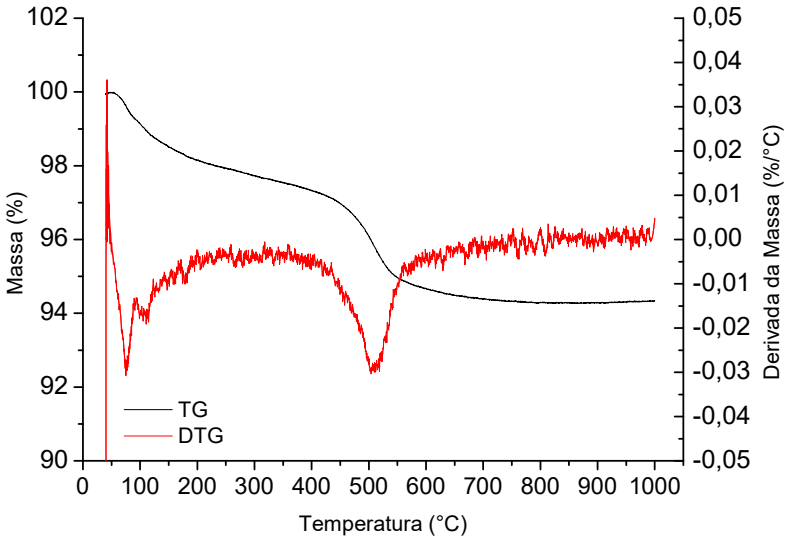


Figura 21 - Curva termogravimétrica (TG) e termogravimetria derivada (DTG) obtidas para argila vermelha

Serragem de madeira

Quanto a análise da termogravimetria derivada (DTG) da serragem de madeira, mostrada na figura 22, pode-se observar que a decomposição do material se inicia de forma mais acentuada a partir dos 250°C sendo praticamente concluída aos 400°C, faixa de degradação das hemiceluloses e celuloses (PEREIRA *et al.*, 2013), apresentando até esta temperatura uma perda de massa (TG) de aproximadamente 80%, perdendo ainda mais 10% de massa até os 600°C, o que está diretamente associada a natureza orgânica do material analisado.

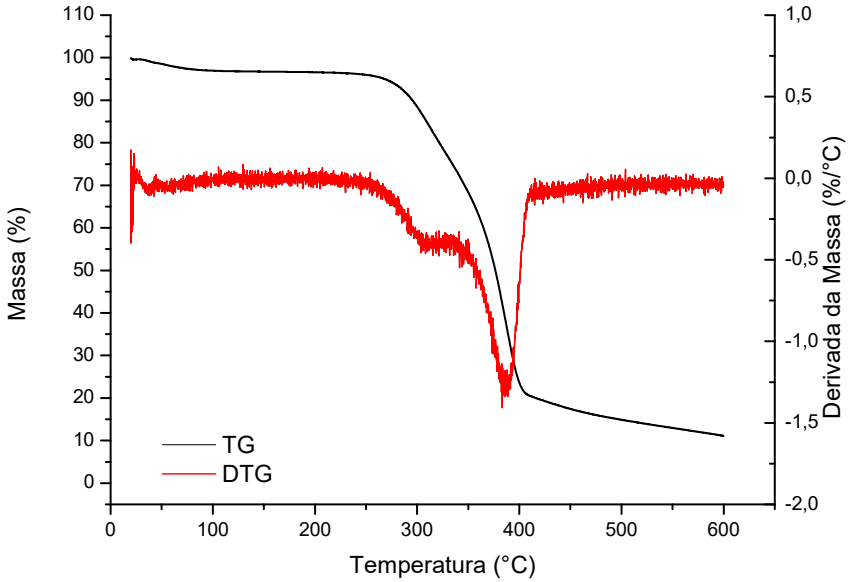


Figura 22 - Curva termogravimétrica (TGA) e *termogravimetria derivada* (DTG) obtidas para a serragem.

4.2 Obtenção de formulações de massas cerâmicas constituídas de lama da dragagem, argila vermelha e serragem de madeira.

No desenvolvimento da pesquisa foi identificada uma dificuldade na homogeneização das massas das formulações F5 e F6 que continham percentuais de serragem de madeira de 10% e 20% em peso, respectivamente. A baixa massa específica da serragem de madeira frente as demais matérias-primas representou um grande volume que impossibilitou a sua efetiva umidificação e a manutenção da estrutura dos corpos de prova conformados, fazendo com que estes se desagregassem ao serem removidos dos moldes. Em função disto, fez-se a correção da quantidade de serragem de madeira das formulações F5 e F6, reduzindo as dosagens de 10% para 5% e de 20% para 10%, respectivamente. Além da redução da quantidade de serragem de madeira, também, foram propostas duas novas composições de massa, as formulações F9 e F10, ambas contendo lama da dragagem, argila vermelha e serragem de madeira, estando as novas formulações apresentadas na Tabela 24.

Todas as formulações foram umidificadas com 8% de água em peso. Após a conformação foi obtida a massa dos corpos-de-prova, sendo aferidas novamente após o processo de secagem (anterior a queima). Pela diferença de massa entre a moldagem e após a secagem das amostras foi observada uma variação na umidade de cada formulação no intervalo 8,17% a 10,14% em massa, em detrimento dos 8% de água utilizados na umidificação das massas.

Essas diferenças podem estar relacionadas com uma maior presença de umidade nas matérias-primas, tanto pela presença de matéria orgânica, quanto pela manutenção de algum teor de umidade residual nas amostras de lama e argila vermelha possibilitado pela temperatura de secagem destes materiais (60°C).

Durante a produção dos corpos de prova foi observado que as formulações que continham a adição de 10% de serragem de madeira (F6, F7 e F8), após a queima ficavam extremamente frágeis (Figura 23), ocorrendo esfarelamento parcial das estruturas obtidas, o que impossibilitou a realização dos ensaios técnicos, motivo pelo qual decidiu-se pela remoção destas formulações na continuidade da pesquisa.

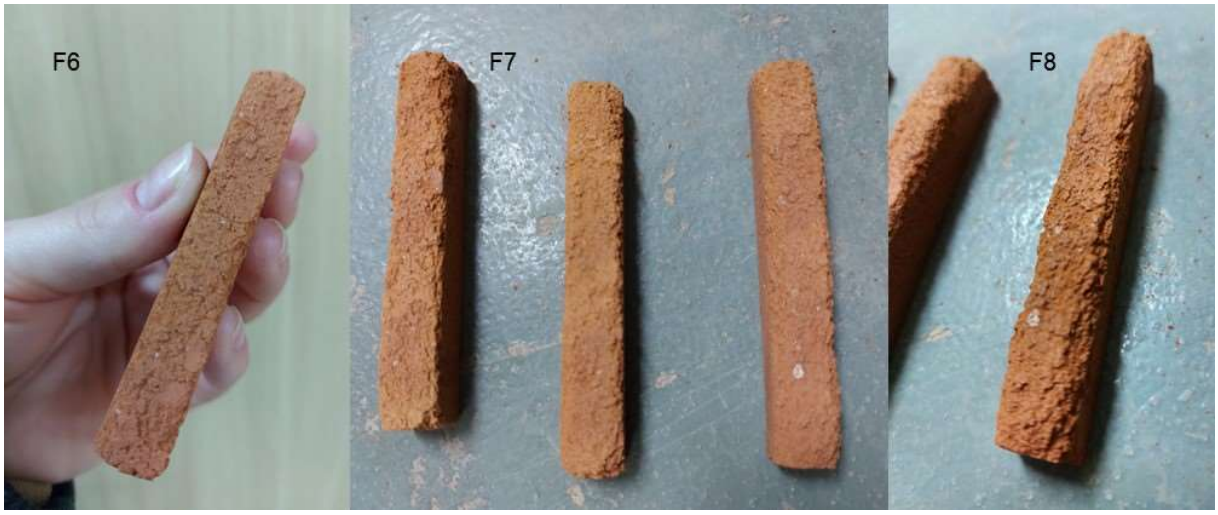


Figura 23 – Imagem dos corpos de prova das formulações F6, F7 e F8, obtidos com 10% de serragem madeira

O resultado da primeira etapa de experimentação da pesquisa identificou a possibilidade de continuidade apenas com as formulações F1, F2, F3, F4, F5, F9 e F10 (Tabela 24), as quais foram caracterizadas física, mecânica, térmica e microestruturalmente.

Tabela 24 – Formulações definidas para o desenvolvimento final da pesquisa

Formulações	Lama da dragagem	Argila vermelha	Serragem de madeira
F1	100%		
F2		100%	
F3	10%	90%	
F4	20%	80%	
F5	95%		5%
F9	85%	10%	5%
F10	10%	85%	5%

Nas imagens da figura 24 pode ser observado corpos de prova de todas as formulações no interior do forno, organizados da formulação F1 a F10, do fundo para a porta do forno. É possível identificar em corpos de prova ainda não queimados uma coloração mais escura nas amostras que contém a lama da dragagem, pura ou em grandes percentuais (F1, F5 e F9). A coloração avermelhada após a queima, característica das cerâmicas vermelhas, é identificada em todas as amostras, sendo de maior intensidade nas formulações F1, F5 e F9, podendo ser atribuída ao maior percentual de FeO_2 identificado na composição química do sedimento da dragagem.

Figura 24 – Imagens do processo de sinterização dos corpos de prova no formo tipo mufla – anterior e posterior a queima

4.3 Propriedades físicas e mecânica dos corpos de prova

Os corpos de prova das formulações F1, F2, F3, F4, F5, F9 e F10 foram caracterizados quanto as seguintes propriedades físicas: a retração linear, perda ao fogo, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, resistência mecânica e microestrutura.

4.3.1 Retração Linear (RL)

A Tabela 25 e a figura 25 apresentam a média dos resultados obtidos para a retração linear de secagem e queima nas formulações testadas. Também é apresentada a retração linear total, somando os resultados da retração linear na secagem e queima.

Tabela 25 – Umidade de conformação e valores de retração linear das formulações testadas

Formulações (%) (Lama da dragagem/Argila Vermelha/ Serragem madeira)	**U (%)**	**RLS (%)**	**RLQ (%)**	***RL (%)**
F1 (100 / 0 / 0)	9,42	0,69	1,69	2,37
F2 (0 / 100 / 0)	8,27	0,76	-0,10	0,66
F3 (10 / 90 / 0)	8,17	0,62	-0,18	0,44
F4 (20 / 80 / 0)	8,34	0,59	-0,04	0,55
F5 (95 / 0 / 5)	9,42	0,57	2,29	2,87
F9 (85 / 10 / 5)	10,14	0,66	1,79	2,45
F10 (10 / 85 / 5)	10,08	0,84	0,16	1,00

*RL = RLS + RLQ

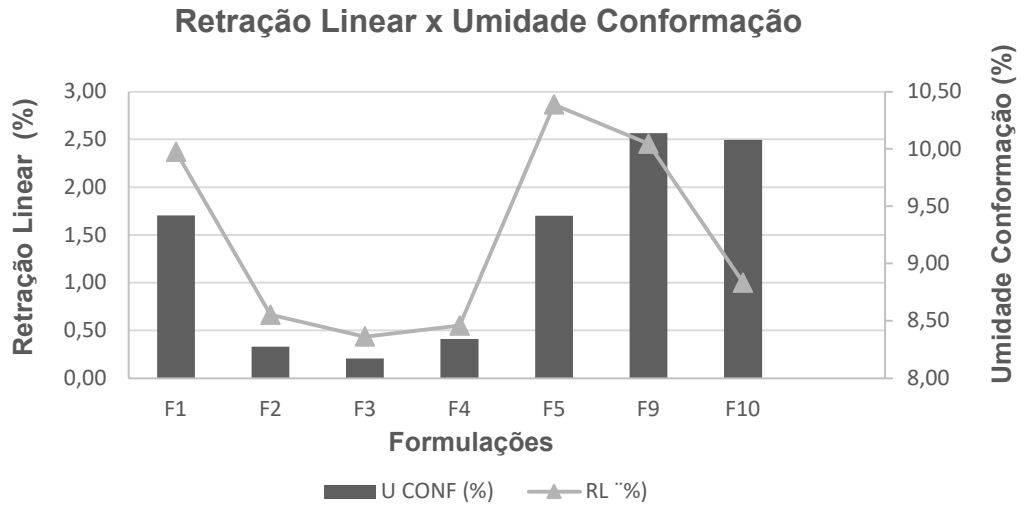


Figura 25 – Retração linear e Umidade de conformação para as formulações estudadas

A figura 25 apresenta o comportamento das formulações correlacionando a umidade de conformação e a retração linear (secagem e queima). Nas formulações F1 e F5, para as quais foi identificada estatisticamente uma idêntica umidade de conformação, a formulação F5 apresentou uma maior retração linear, provavelmente, favorecida pela presença de serragem de madeira, material orgânico que foi adicionado à matéria orgânica já identificada na lama da dragagem.

Nas formulações F9 e F10, com similares umidades de conformação, a formulação F9 que possui a maior presença da lama da dragagem em sua composição apresentou retração linear superior a identificada na formulação F10, na qual a argila vermelha se apresenta em maior quantidade. Isto indica que a lama da dragagem foi o agente porogênico de maior intensidade, já que nas duas formulações foi utilizado o mesmo percentual de serragem de madeira.

A diferença de comportamento entre a retração linear de secagem e a de queima sugere que retração linear de queima é aumentada nas formulações que contém maior presença de matéria orgânica e serragem de madeira, podendo se atribuir a essas matérias primas o desenvolvimento dos maiores percentuais de contração linear de queima.

Utilizando o estudo ANOVA (*Analysis of Variance*), complementada pela comparação das médias realizada através do teste de Turkey, ambos com significância de 5%, foram comparadas retrações lineares de secagem e queima entre as sete formulações. Percebeu-se que para a retração linear de secagem não é identificado diferença significativa entre todas as formulações. Já na retração linear de queima foram identificadas diferenças significativas entre as formulações, determinando como significativamente maior a retração apresentada pela F5 (95% lama da dragagem e 5% de serragem de madeira).

Quando comparadas as retrações lineares de secagem e de queima foi observada diferença significativa entre as sete formulações. Após a aplicação do teste de Tukey, comparando a média das retrações lineares, percebeu-se que não há diferenças significativas entre as formulações F3 e F4 (p=0,95) e F1 e F9 (p=0,99), identificando a retração linear média obtida para F5 significativamente maior que todas as demais formulações.

4.3.2 Perda de Massa ao Fogo (PF)

A interferência do material orgânico e da serragem de madeira nas formulações, também pode ser identificada pelo percentual de perda ao fogo (PF) obtido para cada formulação, pois trata-se da diferença de massa obtida para as peças anterior e posterior a queima onde os materiais orgânicos tendem a serem consumidos e a presença de água eliminada. A Tabela 26 apresenta os valores de perda ao fogo obtidos.

Tabela 26 – Perda ao fogo das formulações testadas

Formulações (%)	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**	**F9**	**F10**
PF (%)	8,10	4,42	4,68	5,12	12,52	12,15	9,26

O percentual de perda ao fogo identificado para a formulação F1 (8,10%) está alinhado a perda de massa de 8% identificada para a lama da dragagem na análise térmica. Já para a argila vermelha comercial foi identificada uma perda ao fogo na formulação F2 de 4,42%, percentual próximo aos quase 6% observados na análise térmica.

A figura 26 apresenta o comportamento das formulações correlacionando a perda ao fogo e a retração linear (secagem e queima). As formulações que contém serragem de madeira em sua composição apresentaram os maiores percentuais de perda ao fogo e retração linear, seguida da formulação composta somente de lama. As formulações que contém grande parte de argila vermelha sem agente porogênico (serragem de madeira) apresentaram os menores percentuais de perda ao fogo e menor retração linear.

A análise de perda ao fogo identificou a efetiva presença de matéria orgânica na formulação F1 (100% de lama da dragagem) quando comparada com a formulação F2 (100% de argila vermelha), e do acréscimo dos valores de perda ao fogo nas formulações F5, F9 e F10, nas quais ocorreu a adição de serragem de madeira. Observa-se que tanto para o comportamento da perda ao fogo quando a retração linear, a presença de serragem de madeira, material orgânico que foi adicionado à matéria orgânica já identificada na lama da dragagem favoreceram as variações identificadas.

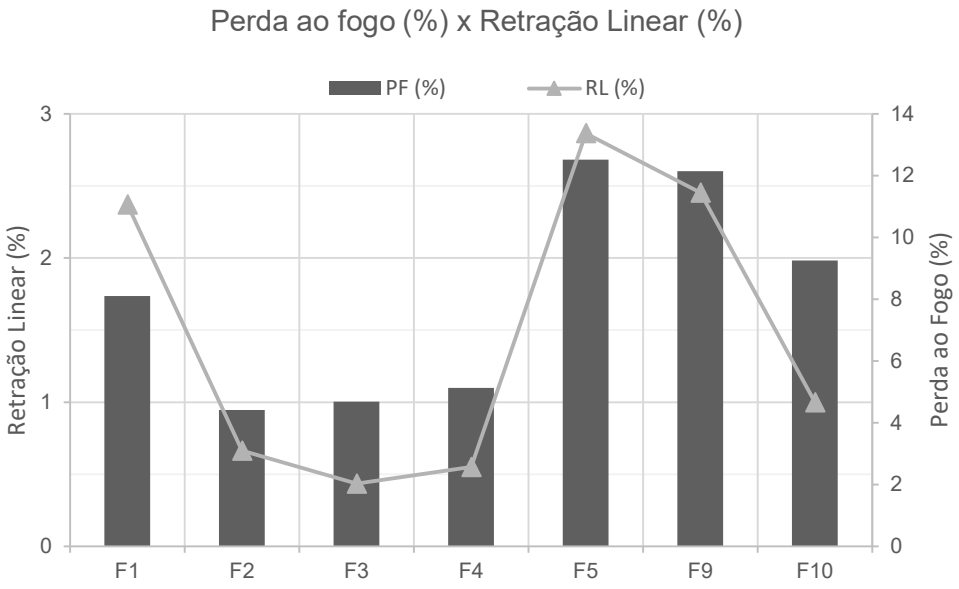


Figura 26 – Comportamento de retração linear e perda ao fogo para as formulações estudadas

Com base na análise de variância, foi possível identificar a inexistência de diferenças significativas entre as formulações F3 e F4, como também entre a F5 e F9 quando comparado os percentuais de perda ao fogo (PF) obtidos para todas as formulações estudadas.

4.3.3 Absorção de Água (AA)

Os valores obtidos para a absorção de água dos corpos de prova das formulações testadas estão descritos na Tabela 27, na qual é possível identificar uma variação entre 12,65% e 21,37%.

Tabela 27 - Absorção de Água dos corpos de prova das formulações testadas.

Formulações (%) (Lama da dragagem/Argila Vermelha/ Serragem madeira)	**AA (%)**
F1 (100 / 0 / 0)	16,15
F2 (0 / 100 / 0)	12,65
F3 (10 / 90 / 0)	13,19
F4 (20 / 80 / 0)	13,88
F5 (95 / 0 / 5)	21,37
F9 (85 / 10 / 5)	21,31
F10 (10 / 85 / 5)	17,24

Entre as formulações pesquisadas, o menor percentual de absorção de água foi identificado na formulação F2 (12,65%) constituída de 100% argila vermelha, seguido das formulações F3 e F4 (13,19% e 13,88%, respectivamente) que agregaram lama da dragagem a sua composição, continuado pela F1 (16,15%) proposta com 100% de lama da dragagem e finalizado pelas formulações F10, F9 e F5 (17,24%, 21,31% e 21,37%, respectivamente) que tiveram em suas composições de massa 5% de serragem de madeira.

Os resultados obtidos para a absorção de água mostram que a matéria orgânica da lama da dragagem (8,1%) e a serragem de madeira (5%) atuaram efetivamente como agentes formadores de poros abertos e que propiciaram aumento da absorção de água nas formulações pesquisadas.

Com base no estudo realizado a partir do teste ANOVA (Analysis of Variance), foi possível identificar a inexistência de diferenças significativas entre os percentuais de absorção de água, tanto entre as formulações F3 e F4, como também entre as formulações F5 e F9, demonstrando para esses pares o mesmo comportamento frente ao parâmetro analisado.

4.3.4 Porosidade Aparente (PA)

Os valores obtidos para a porosidade aparente dos corpos de prova das formulações testadas estão descritos na Tabela 28, na qual é possível identificar uma variação entre 24,44% e 33,38%.

Tabela 28 - Porosidade Aparente dos corpos de prova das formulações testadas.

Formulações (%) (Lama da dragagem/Argila Vermelha/ Serragem madeira)	**PA (%)**
F1 (100 / 0 / 0)	28,96
F2 (0 / 100 / 0)	24,44
F3 (10 / 90 / 0)	25,24
F4 (20 / 80 / 0)	26,25
F5 (95 / 0 / 5)	33,38
F9 (85 / 10 / 5)	33,34
F10 (10 / 85 / 5)	29,12

Analogamente ao comportamento da absorção de água, a porosidade aparente é maior nas formulações F10 (29,12%), F9(33,34%) e F5 (33,38%) que continham em suas massas matéria orgânica da lama da dragagem e serragem de madeira.

Assim como na absorção de água, a matéria orgânica da lama da dragagem (8,1%) e a serragem de madeira (5%) atuaram efetivamente como agentes formadores de poros abertos propiciando o aumento da porosidade aparente observada nas formulações pesquisadas.

A figura 27 apresenta graficamente uma análise conjunta entre os valores de absorção de água, porosidade aparente e perda ao fogo.

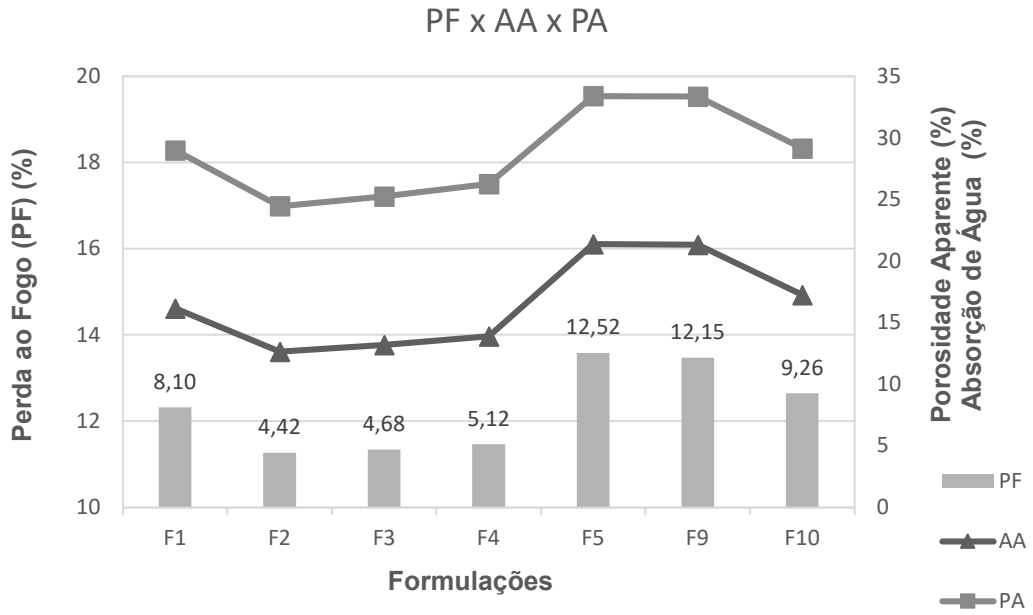


Figura 27 – Análise conjunta da absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e perda ao fogo (PF)

Logo, os dados obtidos indicam de forma positiva a eficiência na incorporação de agentes orgânicos na produção de porosidade em cerâmicas, podendo este comportamento ser observado de forma direta entre as formulações F1 e F5, como também entre as formulações F3 e F10, isto porque estas formulações diferem entre si apenas na substituição de 5% da lama ou argila pela serragem de madeira, o que atribuiu nas formulações que contém o agente porogênico um acréscimo de 15% na porosidade aparente.

Analisando-se, comparativamente, a porosidade aparente das formulações testadas, que apresentaram variação entre 24,44% e 33,38%, com o valor médio da porosidade das amostras do bloco de concreto celular (37,07%, Tabela 20, p. 66),

usado como parâmetro nessa pesquisa, identificou-se valores menores para as formulações pesquisadas.

Entre as formulações foi possível identificar a partir do teste ANOVA (Analysis of Variance), que para a porosidade aparente obtida não foi identificada diferença significativa ($p>0,05$) entre as formulações F3 e F4, bem como entre as formulações F5 e F9, demonstrando comportamento significativamente igual entre esses pares para o parâmetro estudado.

4.3.5 Massa Específica Aparente (M_{ea})

Na Tabela 29, conjuntamente com a perda de massa ao fogo e a porosidade aparente, estão apresentados os valores de massa específica aparente das formulações estudadas. Os valores obtidos para massa específica variaram entre 1,57g/cm^3 a 1,94g/cm^3, demonstrando uma maior densificação nas formulações que contém a argila vermelha (F2, F3 e F4), seguida da formulação F1 (100% lama). As menores densidades foram apresentadas pelas formulações que continham serragem de madeira em sua composição.

Tabela 29 – Massa específica aparente das formulações testadas

Formulações (%)	**F1**	**F2**	**F3**	**F4**	**F5**	**F9**	**F10**
Mea (g/cm^3)	1,80	1,94	1,92	1,89	1,57	1,57	1,69
Perda de Massa ao Fogo (%)	8,10	4,42	4,68	5,12	12,52	12,15	9,26
Porosidade Aparente (%)	28,96	24,44	25,24	26,25	33,38	33,34	29,12

A massa específica identificada para a formulação F1 (100% lama da dragagem), 1,80g/cm^3 é similar a identificada por Hamer e Karius (2002) e Belmonte *et al.* (2016) para cerâmicas também obtidas a partir de sedimentos marinhos. Para a formulação composta integralmente por argila vermelha, foi identificada uma massa específica aparente de 1,94g/cm^3, semelhante as identificadas por Goes *et al.* (2014) e Brito *et al.* (2015) também para cerâmicas vermelhas. Já para as cerâmicas aditivadas com serragem foi identificada uma massa específica entre 1,57 e 1,69 g/cm^3, alinhada ao intervalo de 1,41 e 1,53 g/cm^3 identificados por Ferreira (2019) e Dutra e Pontes (2002) para cerâmicas também aditivadas com serragem.

A massa específica identificada para a argila vermelha é resultado de uma melhor distribuição granulométrica se comparada com a lama da dragagem, produzindo um melhor empacotamento dos materiais, promovendo uma maior densificação no processo de sinterização, fator que pode ser também observado nas formulações que receberam serragem de madeira como agente porogênico, onde a formulação que continha maior percentual de argila vermelha promoveu uma maior densificação.

Em análise estatística foi possível identificar a partir do teste ANOVA (Analysis of Variance) para as sete formulações, que para a massa específica aparente obtida não foi identificada diferença significativa ($p>0,05$) entre as formulações F2 e F3, bem como entre as formulações F5 e F9. A massa específica da formulação F2 apresentou-se significativamente maior que as demais, enquanto a F5 possui massa específica significativamente menor em relação as demais composições estudadas.

A figura 28 apresenta uma comparação entre os valores de massa específica aparente, perda ao fogo e porosidade aparente. Como já esperado, a análise mostra uma relação inversa entre a massa específica aparente e os demais parâmetros, ou seja, quanto menor está for, maior é a perda ao fogo e a porosidade aparente.

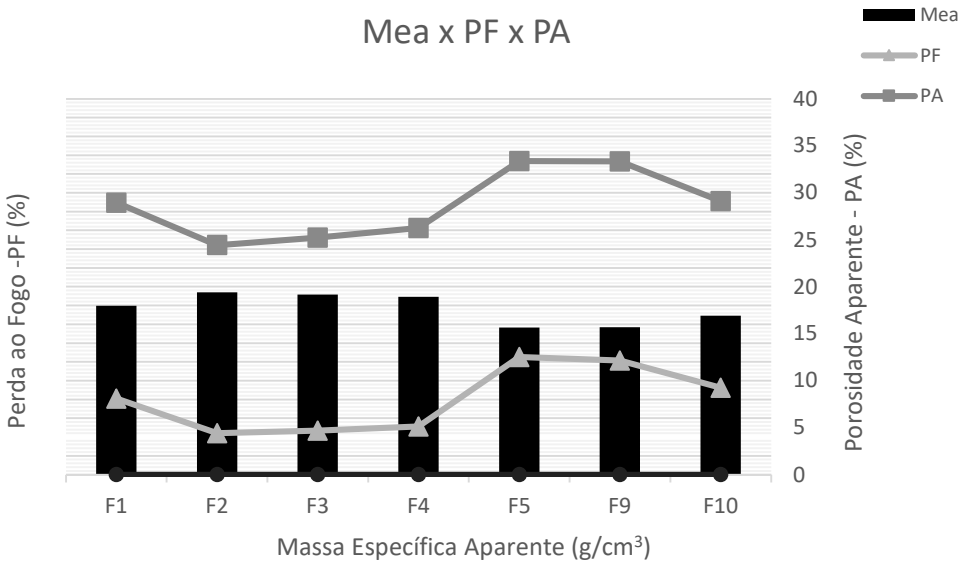


Figura 28 – Análise conjunta da massa específica aparente (Mea), porosidade aparente (PA) e perda ao fogo (PF).

Na comparação entre as massas específicas das formulações estudadas (1,57 a 1,94g/cm^3) com a do bloco de concreto celular, verificou-se que a massa específica

do bloco (0,48g/cm^3) é significativamente menor. A justificativa para isto, possivelmente, está tanto na microestrutura do bloco que possui poros arredondados e grandes e em grande quantidade, como visto nas figuras 17 e 18, p. 67, quanto nas matérias-primas que compõe o material, diferente das utilizadas nas formulações estudadas.

4.3.6 Resistência Mecânica

O ensaio de resistência mecânica, flexão à 3 pontos, foi realizado conforme demonstrado na Figura 29 e os dados obtidos estão dispostos na Tabela 30.

(A)

(B)

Figura 29 – (A) Ensaio resistência mecânica a flexão à 3 pontos; (B) corpos de prova ensaiados

Tabela 30 - Resistência mecânica dos corpos de prova das formulações testadas.

Formulações (%) (Lama da dragagem/Argila Vermelha/ Serragem madeira)	**TR (MPa)**
F1 (100 / 0 / 0)	3,28
F2 (0 / 100 / 0)	4,58
F3 (10 / 90 / 0)	3,33
F4 (20 / 80 / 0)	3,36
F5 (95 / 0 / 5)	1,68
F9 (85 / 10 / 5)	1,60
F10 (10 / 85 / 5)	2,47

Entre as formulações pesquisadas, os menores valores de resistência mecânica foram identificados nas formulações F9, F5 e F10 (1,60 MPa, 1,68 MPa e 2,47 MPa, respectivamente) que continham em suas composições 5% de serragem de madeira, na sequência valores maiores de resistência são observados nas formulações F1, F3 e F4 (3,28 MPa, 3,33 MPa, e 3,36 MPa, respectivamente) que possuíam lama da dragagem nas suas composições de massa, e, por fim, com o maior valor de resistência tem-se a formulação F2 (4,58 MPa) constituída com 100% de argila vermelha.

Os valores obtidos para a massa específica aparente (Tabela 30 p.86) são apresentados juntamente aos valores de resistência mecânica na figura 30, permitindo identificar uma relação direta entre esses parâmetros. Essa relação pode ser justificada por uma maior densificação nas formulações de maior massa específica aparente, reduzindo os vazios promovendo maior resistência mecânica.

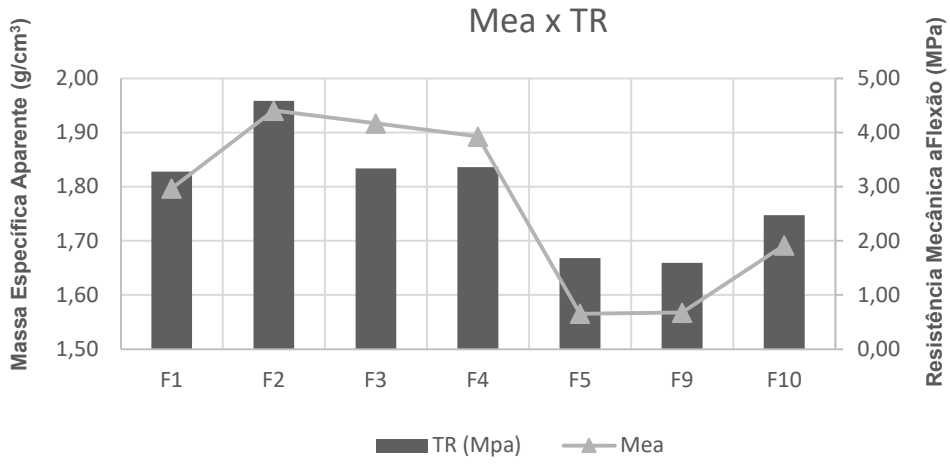


Figura 30 – Comportamento conjunto da massa específica aparente e resistência mecânica

Já, ao analisar-se na figura 31 os resultados de resistência mecânica com os de perda ao fogo (Tabela 27 p. 82), identificou-se uma relação inversamente proporcional entre os dois parâmetros, ou seja, menores valores de resistência estão vinculados às massas com maior perda ao fogo, especificamente, as constituídas com serragem de madeira, e que à medida que a perda ao fogo diminui cresce a resistência mecânica, como é o caso das formulações constituídas com lama de dragagem e argila vermelha. Esta situação se repete quando se analisa as resistências mecânicas com a porosidade aparente, conforme também demostrado na figura 31.

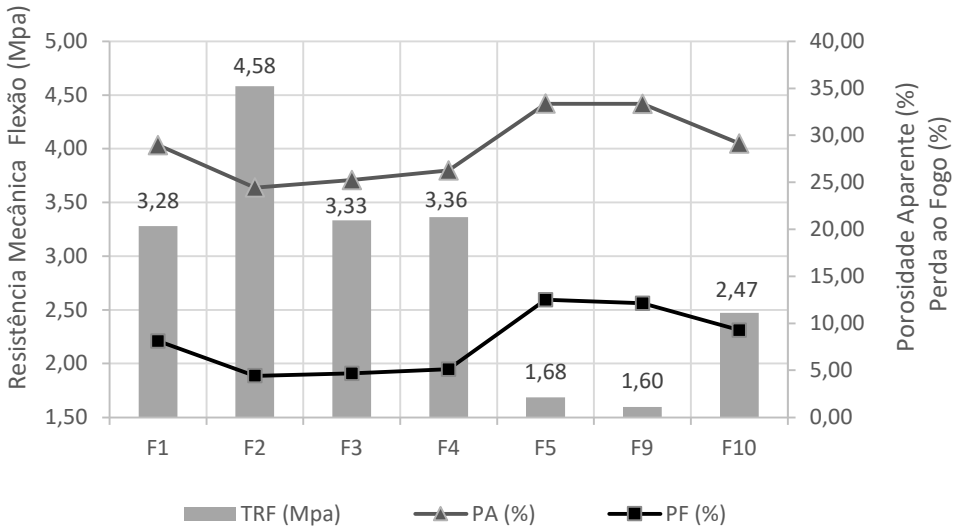


Figura 31 – Análise comportamental da variação dos parâmetros de resistência mecânica, porosidade aparente e perda ao fogo para as formulações testadas.

Estes resultados corroboram com os apresentados pelos pesquisadores Dutra e Pontes (2002), Ambrósio, Silva e Duailibi (2004) e Areias *et al.* (2017) que relataram em seus trabalhos que a porosidade promove fragilidade nas peças cerâmicas causando redução na sua capacidade de resistência mecânica.

Na análise comparativa entre valores de normas de resistência mecânica para materiais isolantes térmicos, tais como, o valor de >0,245 MPa solicitado na NBR11625/2015 (Isolantes térmicos pré-moldados de sílica diatomácea) e o valor de >0,31 MPa descrito na NBR 16279/2014 (Isolantes térmicos rígidos moldados em placas a base de perlita expandida), verificou-se que as formulações testadas obtiveram valores muito superiores às exigidas (variação de 1,6 MPa a 4,58 MPa). Essa situação, também, se verificou ao comparar-se o valor de resistência mecânica do bloco de concreto celular, igual a 1,5 MPa, conforme NBR 13438/2 - Bloco de concreto celular autoclavado, com os valores das formulações testadas (variação de 1,6 MPa a 4,58 MPa)

Após a aplicação do estudo de variância realizado entre as formulações, para os resultados de resistência pode-se identificar a inexistência de diferenças significativas ($p>0,05$) para o comportamento mecânico, tanto para as formulações F3 e F4, como também entre as formulações F5, F9 e F10, demonstrando um comportamento semelhante entre as formulações associadas.

4.4 Caracterização mineralógica da formulação F1 (100% lama da dragagem)

A figura 32 apresenta o difratograma de raios-X do sedimento da dragagem (formulação F1) após a queima em 900°C.

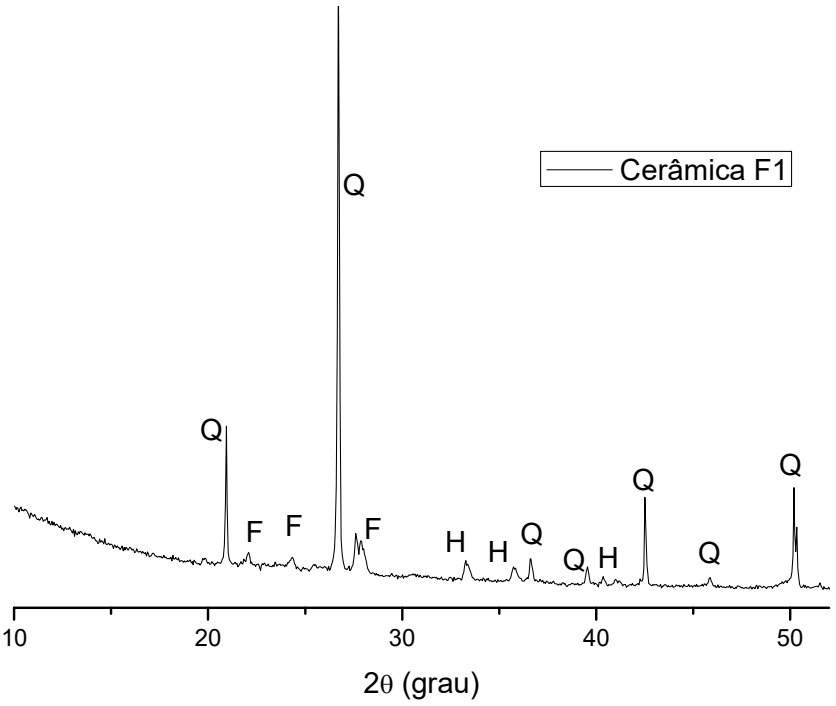


Figura 32 – Difratograma de raios X da formulação F1, com 100% de lama da dragagem. Quartzo (Q), Feldspato (F) e Hematita (H).

No difratograma da figura 32 foram identificadas como fases cristalinas presentes na cerâmica produzida a partir da lama da dragagem o quartzo baixo (COD 01-086-1629), a hematita (COD 01-084-0308) e a albita - feldspato (COD 01-089-6423), cujas fórmulas químicas estão apresentadas na Tabela 31.

Tabela31 – Fórmulas químicas das fases mineralógicas identificadas na análise mineralógica da formulação F1

Símbolo	Mineral	Fórmula	Ref. Cod.
Q	Quartzo	SiO_2	01-086-1629
H	Hematita	Fe_2O_3	01-084-0308
F	Albita	$Na\ (\ AlSi_3O_8\ )$	01-089-6423

O difratograma da figura 32 mostra que para a temperatura de 900°C é identificado quartzo baixo, feldspato (albita) e hematita (óxido de ferro).

Em comparação ao difratograma obtido para a lama da dragagem (figura 18, p.75), os picos da caulinita, da montmorilonita e da halita não foram mais detectados, o que se justifica pela transformação dos argilominerais, tanto da caulinita em metaculinita amorfa (entre 500 e 600°C), quanto pelas esmectitas, com a destruição da sua estrutura entre 800°C e 900°C. (SANTOS *et al.*, 2013 e GONÇALVES *et al.,* 2014). Esse comportamento de desidroxilação dos argilominerais é identificado na análise térmica realizada na lama da dragagem (Figura 20, p.78). onde observa-se uma perda de massa e uma reação endotérmica na faixa dos 500°C, promovendo a desestruturação destas fases cristalinas

O feldspato sódico ainda identificado, justifica-se devido a sua temperatura de fusão ser superior a 1000°C, superior a temperatura de queima. A identificação da hematita explica-se pelo alto teor de ferro (16,08%) identificado na análise química da lama (Tabela 19, p. 70), principal fase responsável pela cor avermelhada identificada nas amostras que contém lama em sua composição, visualizada na figura 24 (p.82).

As fases mineralógicas desenvolvidas pela lama da dragagem após a queima a 900°C demonstram similaridade com fases mineralógicas identificadas por Viegas *et al., 2020* e Santos *et a.,* 2017 para cerâmicas vermelhas, indicando a capacidade da lama da dragagem como matéria prima produtora de cerâmica vermelha.

4.4.1 Condutividade Térmica

Materiais cerâmicos são considerados materiais tradicionalmente isolantes devido à baixa condutividade térmica, que, segundo a NBR 15220-3/2005 é de 0,90 W/mK para produtos cerâmicos como tijolos e telhas.

A Tabela 32 apresenta o desempenho térmico dos corpos de prova das formulações testadas, cuja condutividade térmica variou de 0,20 W/mK a 0,26 W/mK, que se comparados a condutividade térmica descrita pela norma NBR 15220-3/2005 para materiais cerâmicos, as obtidas representam um valor aproximadamente 75% menor, indicando um comportamento isolante para todas as formulações.

Tabela 32 - Condutividade térmica (**λ**) das formulações testadas

Pode	Amostras	λ (W/mK)	
		25º C	**57º C**
F1 (100 / 0 / 0)	A1	0,2666	0,2186
	A2	0,2651	0,2172
	A3	0,2166	0,2175
	Média	**0,2494**	**0,2178**
F2 (0 / 100 / 0)	B1	0,2462	0,2015
	B2	0,2490	0,2043
	B3	0,2461	0,2019
	Média	**0,2471**	**0,2026**
F3 (10 / 90 / 0)	C1	0,2451	0,2018
	C2	0,2439	0,2004
	C3	0,2426	0,2001
	Média	**0,2439**	**0,2008**
F4 (20 / 80 / 0)	D1	0,2477	0,2041
	D2	0,2481	0,2043
	D3	0,2528	0,2085
	Média	**0,2495**	**0,2056**
F5 (95 / 0 / 5)	E1	0,2432	0,2426
	E2	0,2479	0,2413
	E3	0,2430	0,2441
	Média	**0,2447**	**0,2427**
F9 (85 / 10 / 5)	K1	0,2540	0,2332
	K2	0,2552	0,2340
	K3	0,2546	0,2369
	Média	**0,2546**	**0,2347**
F10 (10 / 85 / 5)	L1	0,2632	0,2283
	L2	0,2569	0,2290
	L3	0,2627	0,2247
	Média	**0,2609**	**0,2273**

Também, foi observado que para todas as formulações testadas houve uma redução na média da condutividade térmica com o acréscimo da temperatura (de 25ºC para 57ºC), o que pode ser explicado pelo fenômeno da condução na transferência de energia, onde a vibração ordenada dos átomos (fônons) é aumentada com o acréscimo de temperatura, e a interação dos fônons dificulta a propagação de energia causando uma redução na condutividade térmica. A redução na condutividade térmica

em materiais cerâmicos também foi identificada por Vivaldini *et al.* (2014) e Lima (2018).

Por fim, ao ser analisada comparativamente a condutividade de todas as formulações testadas, cuja variação foi de 0,20 W/mK (25ºC) a 0,26 W/mK (%57º C) com o desempenho térmico do isolante comercial, o bloco de concreto celular, cuja condutividade térmica média varia de 0,2704 W/mK (25°C) a 0,2965 W/mK (57°C), foi possível identificar que as cerâmicas obtidas apresentaram melhor comportamento térmico.

Considerando que a porosidade aparente é um parâmetro definidor da condutividade térmica, elaborou-se o gráfico apresentado na figura 33 para analisar o quanto este foi significativo no desempenho térmico das formulações. A análise foi feita considerando apenas os maiores valores de condutividade, ou seja, os obtidos na temperatura média de 25º C.

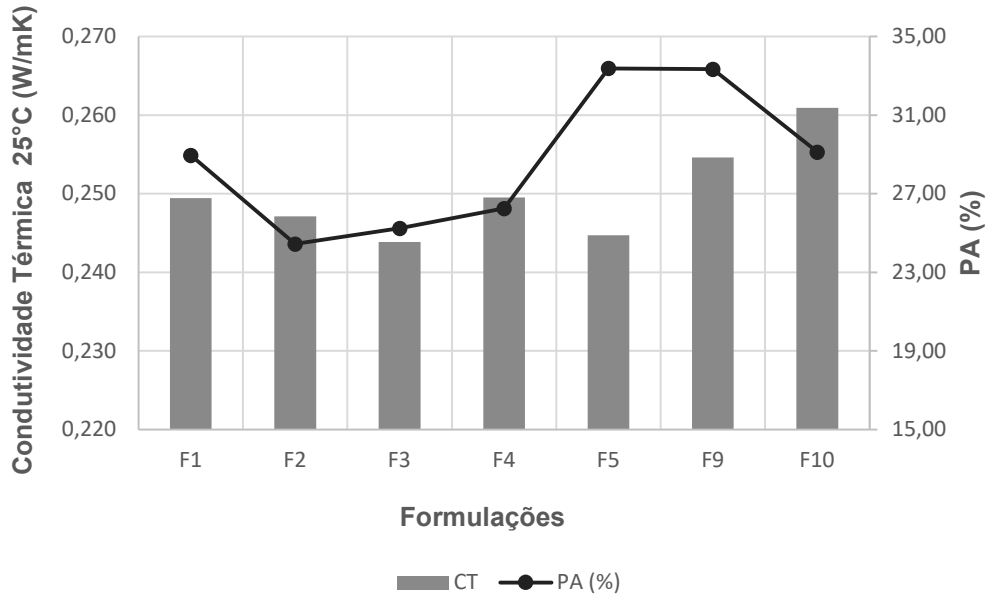


Figura 33 – Comportamento da condutividade térmica e da porosidade aparente

Analisando-se as formulações F1 (100% lama da dragagem) e F2 (100% argila vermelha), percebe-se que a condutividade térmica da F1 é maior que a da F2, indicando que a formulação F2 é mais isolante térmica (conduz menos). Nesse caso ocorreu uma relação direta entre a porosidade e a condutividade, visto que a porosidade aparente da formulação F1 é maior que a da formulação F2. A justificativa para isto está na característica das matérias-primas, ou seja, na formulação F1 a

matéria orgânica na lama da dragagem ao ser queimada gerou gases que possivelmente deram origem a poros abertos e na formulação F2, devido a menor presença de matéria orgânica, possivelmente, deram origem a uma maior quantidade de poros fechados.

Na comparação entre a formulação F3 (10% de lama da dragagem + 90% de argila vermelha) e a formulação F4 (20% de lama da dragagem + 80% de argila vermelha) identificou-se que o aumento da quantidade de lama da dragagem não trouxe efetiva variação no valor da condutividade térmica, ficando igual a 0,2439W/mK para a F3 e 0,2447 W/mK para a F4. A justificativa para isto está no fato da presença da argila vermelha em grande quantidade nas duas formulações o que gerou uma estrutura porosa similar nas duas formulações.

A análise das formulações F3 (10% de lama de dragagem + 90% de argila vermelha) e F5 (95% de lama da dragagem + 5% de serragem de madeira), cujos valores de porosidade aparente foram de 25,44% para a F3 e 33,34% para a F5, apresentaram os menores valores de condutividade térmica dentre as formulações testadas, iguais a 0,2439 W/mK para a F3 e 0,2447 W/mK para a F5. A justificativa para esses resultados está na composição das formulações, ou seja, na formulação F3 a predominância da argila vermelha foi o fator determinante para a condutividade e na formulação F5 os agentes porogênicos utilizados, a matéria orgânica da lama da dragagem e a serragem de madeira, foram os responsáveis pela condutividade térmica obtida.

Contudo, ressalta-se o fato de que apenas uma maior porosidade não significa um melhor comportamento térmico, o que pode ser observado ao comparar-se as formulações F5 (95% de lama da dragagem + 5% de serragem de madeira) e F10 (10% de lama da dragagem + 85% de argila vermelha + 5% de serragem de madeira). Nesse caso, o efeito maior de redução da condutividade está na presença da argila vermelha que por natureza é um material isolante térmico.

No entanto, quando se analisa as formulações F1 (100% lama de dragagem) e F5 (95% de lama da dragagem + 5% de serragem de madeira), cuja diferença entre elas é apenas a substituição de 5% da lama da dragagem por serragem de madeira, é possível identificar que o aumento da porosidade aparente em F5 propiciou um ganho efetivo no comportamento térmico, com a redução do valor da condutividade térmica.

Na comparação entre as formulações F9 (85% de lama da dragagem + 10% de argila vermelha + 5% de serragem) e F10 (10% de lama da dragagem + 85% de argila vermelha + 5% de serragem de madeira), percebe-se que em detrimento da maior porosidade aparente da F9, originada principalmente pela maior quantidade de matéria orgânica da lama da dragagem comparativamente a argila vermelha, a condutividade foi inferior a formulação F10. A justificativa está na reduzida quantidade de argila vermelha presente na formulação F9.

Por fim, analisando-se a condutividade térmica de todas as formulações na figura 33, verifica-se que as formulações F3 (10% de lama de dragagem + 90% de argila vermelha) e F5 (95% de lama da dragagem + 5% de serragem de madeira) são as mais indicadas para a obtenção de cerâmica isolante, pois possuem menor valor de condutividade térmica, e que a formulação F5 é a única que agrega a sua condição de bom isolamento o caráter de proteção ambiental. Ressalta-se que a possibilidade de identificação das formulações F3 e F5 pela condutividade térmica foi possível devido ao fato de que todas as formulações analisadas atenderam aos demais parâmetros estudados (retração linear, absorção de água e resistência mecânica).

Como uma última análise, fez-se a comparação entre o desempenho térmico conjuntamente a porosidade e massa específica aparente das formulações testadas com menor condutividade térmica (F3 e F5) com a cerâmica isolante comercial, o bloco de concreto celular. A Tabela 33 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 33 - Análise comparativa da condutividade térmica (λ), porosidade aparente (%) e massa específica aparente (g/cm^3).

	λ (W/mK)		**Porosidade Aparente (%)**	**Massa Específica Aparente (g/cm^3)**
Amostras	Temperatura média 25ºC	Temperatura média 57°C		
Bloco de concreto celular	0,2704	0,2965	37,07	0,48
F3 (10% de lama de dragagem + 90% de argila vermelha)	0,2439	0,2008	25,24	1,92
F5 (95% de lama da dragagem + 5% serragem de madeira)	0,2447	0,2427	33,38	1,57

A análise comparativa dos valores da Tabela 33 mostra que as duas formulações testadas (F3 e F5) apresentam desempenho térmico melhor que o do

bloco de concreto celular, mesmo sendo identificado para as cerâmicas produzidas menor porosidade e maior massa específica aparente.

Ainda que seja possível identificar numericamente uma menor condutividade térmica para as formulações F3 e F5, estatisticamente pode-se constatar que inexiste diferença significativa ($p>0,05$) para o comportamento térmico (25°C) identificado para todas as formulações estudadas. Esse comportamento é mantido mesmo quando inserido o isolante térmico comercial, mantendo-se inexistência de diferenças significativas na condutividade térmica entre as formulações analisadas e o isolante térmico comercial

Portanto as análises finais de condutividade térmica permitem descrever que todas as formulações produzidas apresentam condutividade térmica de igual comportamento a condutividade térmica definida para isolante térmico comercial utilizado como comparativo. A identificação deste comportamento térmico, associado as propriedades físicas analisadas, demonstra, a possibilidade de escolha por qualquer uma das formulações que utilizem a lama da dragagem como matéria-prima para a produção de cerâmica isolante térmica, podendo associar a esta utilização a possibilidade em promover um grande impacto na preservação ambiental.

4.4.2 Análise Microestrutural

De forma complementar as análises feitas nas formulações, foram produzidas imagens morfológicas em amostras extraídas de corpos de prova utilizados no ensaio de resistência mecânica. A figura 34 apresenta micrografias de amostras das sete formulações.

Analisando-se as micrografias das sete formulações identifica-se pouca presença de espaços vazios (poros), podendo ser realizada alguma observação nas composições F5, F9 e F10, amostras que continham matéria orgânica da lama da dragagem e serragem de madeira em suas formulações. A dificuldade na visualização de porosidade nas formulações analisadas pode ser justificada pelo preparo das amostras, produzidas a partir de uma serra, cujo movimento possivelmente promoveu um polimento na superfície das peças.

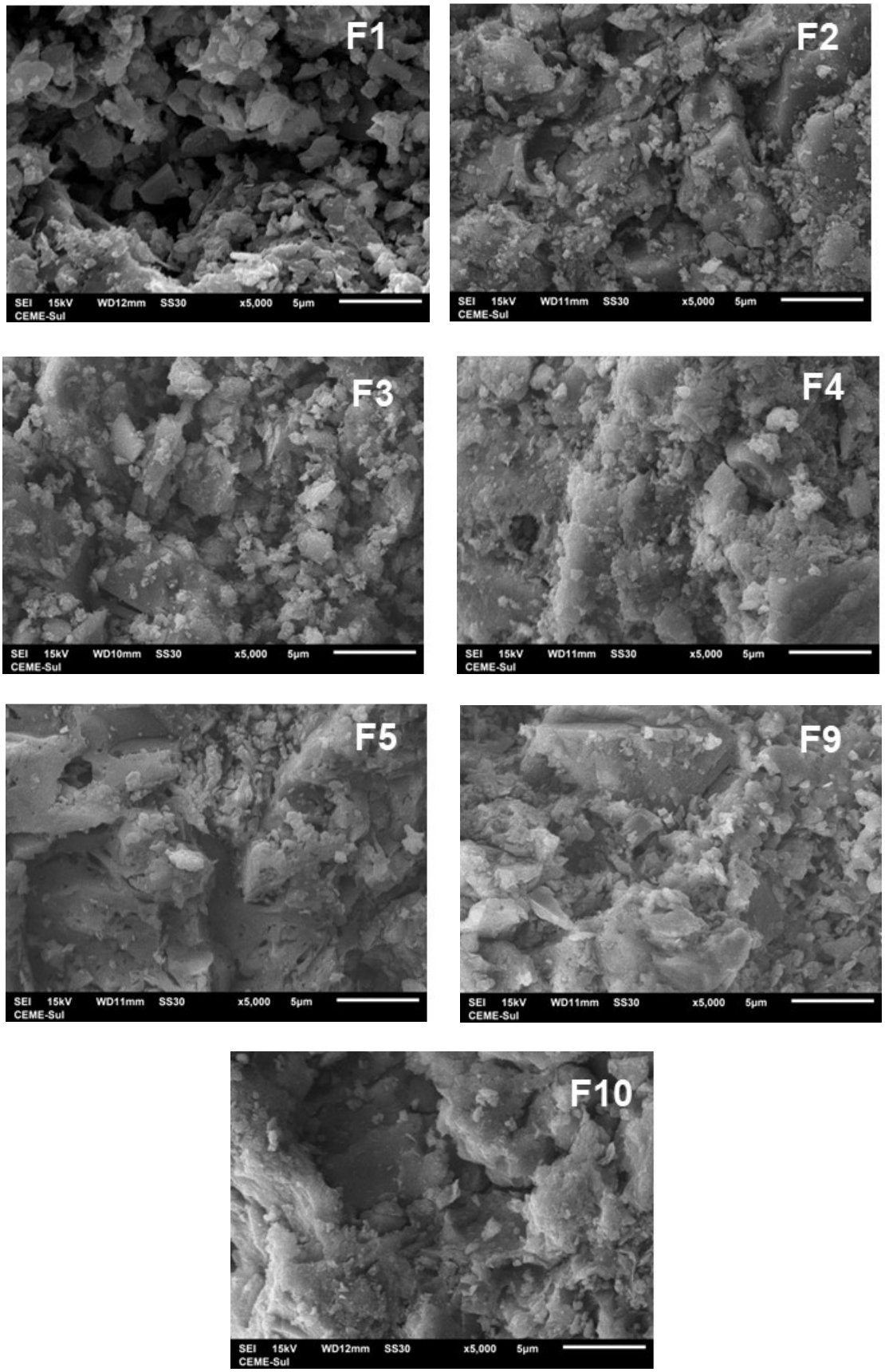


Figura 34 – Micrografias obtidas com ampliação de 5000X - F1, F2, F3, F4, F5, F9 e F10.

5 Conclusões

Este trabalho teve por objetivo avaliar o potencial de utilização da lama extraída da dragagem do canal de acesso ao porto de Rio Grande, RS, na obtenção de cerâmicas isolantes térmicas, e, com base nos resultados obtidos destaca-se as seguintes conclusões:

1. A compatibilidade física da lama da dragagem foi identificada através de sua composição granulométrica que permitiu sua caracterização como uma argila-silto-arenosa, apresentando capacidade de conformação tanto por prensagem como por extrusão, conformação tradicional ao mercado produtor de cerâmica vermelha.

2. A compatibilidade química da lama da dragagem foi identificada a partir de sua composição química que é similar a observada nas matérias primas tradicionais de cerâmica vermelha. Contudo a presença registrada de cloretos na sua composição, justificada pelo local de extração, a difere das matérias primas tradicionais da indústria cerâmica, necessitando de um maior estudo relacionado a sua interferência ou não na produção cerâmica.

3. A compatibilidade mineralógica da lama da dragagem existe porque esta possui composição análoga a maioria das matérias primas cerâmicas, sendo composta majoritariamente por quartzo, feldspato e argilominerais. Cabe registrar a identificação da halita (NaCl), mineral identificado associado a origem estuarina da lama, não componente tradicional das massas cerâmicas.

4. A obtenção de material cerâmico foi possível a partir de sete formulações constituídas com lama da dragagem, argila vermelha e serragem de madeira. Para cada formulação foram elaboradas diferentes proporções, sendo identificado como valor limitante para a serragem de madeira o percentual de 10%.

5. Na análise das propriedades físicas das cerâmicas obtidas com as formulações testadas foram identificadas maiores retrações nas amostras que continham material orgânico provenientes da lama da dragagem e serragem de madeira, variando entre 1,00% e 2,87%. Observou-se que a maior parte da retração ocorreu na etapa de queima, sem diferença significativa entre as sete formulações para retração linear na secagem.

6. Quanto à absorção de água, foi identificado que os percentuais obtidos nas formulações (variáveis de 12,65% a 21,37%) atendem os limites de 8% a 25% estabelecidos pela NBR 15270/2017 - Componentes cerâmicos

7. No tocante à porosidade aparente identificou-se que a presença da lama da dragagem propiciou a formação de espaços vazios na microestrutura das cerâmicas obtidas, fato este ocasionado pela presença de matéria orgânica na lama. Além disto, também, atuou como agente porogênico a serragem de madeira.

8. Quanto à resistência mecânica a flexão a 3 pontos as cerâmicas obtidas apresentaram valores entre 1,60MPa e 4,58MPa, que atendem aos limites normativos identificados para outros materiais isolantes térmicos, tais como 0,245MPa solicitado na NBR11625/2015 (Isolantes térmicos pré-moldados de sílica diatomácea) e 0,31MPa descrito na NBR 16279/2014 (Isolantes térmicos rígidos moldados em placas a base de perlita expandida).

9. Além disto, os valores de resistência mecânica cerâmicas obtidas (valores entre 1,60 MPa e 4,58 MPa), também, foram superiores ao valor mínimo indicado para o parâmetro referencial, o bloco de concreto celular, que é de 1,5 MPa, segundo a NBR 13438/21 (Bloco de concreto celular autoclavado).

10. A condutividade térmica das formulações pesquisadas variou de 0,20W/mK a 0,26 W/mK, sendo estes valores menores que o descrito pela norma NBR 15220-3/2005 – Desempenho térmico de edificações, para materiais similares, o que indica um comportamento isolante para todas as formulações.

11. Também, foi observado uma redução na média da condutividade térmica com o acréscimo da temperatura (de 25ºC para 57ºC) em todas as formulações testadas, indicando o bom desempenho térmico das cerâmicas obtidas frente aos aumentos de temperatura.

12. A análise comparativa dos resultados de condutividade térmica das sete formulações mostrou que a F3 (10% de lama de dragagem + 90% de argila vermelha) e a F5 (95% de lama da dragagem + 5% de serragem de madeira) foram as que apresentaram o menor valor de condutividade.

13. A análise comparativa da condutividade térmica do bloco de concreto celular, cerâmica comercial utilizada como parâmetro, com as duas formulações que

apresentaram menor condutividade térmica (F3 e F5) mostrou o superior desempenho térmico das cerâmicas experimentais.

14. Após análise estatística dos resultados de condutividade térmica pode-se constatar a inexistência de diferença significativa entre todas as formulações analisadas, bem como o isolante comercial comparativo, demonstrando a característica isolante térmica das formulações propostas.

15. Devido ao atendimento normativo de todos os parâmetros analisados em conjunto com o comportamento térmico para todas as formulações analisadas, as formulações que contém em sua formulação maiores percentuais de lama da dragagem, cabe a ênfase de que, além de atender ao parâmetro de do bom desempenho térmico, teria maior impacto na preservação ambiental.

16. Resumidamente, a partir do desenvolvimento dessa tese, pode-se concluir que as proposições feitas no trabalho originaram formulações de massa cerâmica com lama da dragagem capazes de gerar cerâmicas isolantes térmicas destinadas a construção civil.

Sugestões Trabalhos Futuros

- Ampliar o estudo utilizando diferentes percentuais de lama de dragagem em formulações cerâmicas;
- Estudar o comportamento da lama de dragagem na produção de materiais cerâmicos utilizando diferentes pressões de conformação e umidades iniciais
- Estudar a promoção de porosidade aberta e fechada através da utilização de serragem de madeira com diferentes granulometrias;
- Verificar o comportamento térmico em maiores temperaturas para as cerâmicas produzidas com diferentes composições de lama e serragem de madeira;
- Verificar a possibilidade de formação de florescências nas cerâmicas produzidas com a lama da dragagem.

Referências Bibliográficas

ABAJO, M. F.- **Manual Sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos**. Ed. Beralmar S.A. p.129-130.Espanha, 2000.

ABCERAM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – **Informações técnicas.** Disponível em: https://abceram.org.br. Acesso em: 26 de março de 2020.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Componentes cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. NBR 15310.** Rio de Janeiro. 53p. 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Componentes cerâmicos- Blocos e tijolos para alvenaria – Parte 2 – Métodos de ensaio. NBR 15270-2.** Rio de Janeiro. 35p. 2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Desempenho térmico de edificações – Parte 4 – Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. NBR 15220-4.** Rio de Janeiro. 16p. 2005.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água: NBR 6458**. Rio de Janeiro. 10p. 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo – Análise granulométrica: NBR 7181**. Rio de Janeiro. 12p. 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo – Determinação do limite de liquidez: NBR 6459**. Rio de Janeiro, 5p. 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo – Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180**. Rio de Janeiro. 3p. 2016.

ABREU M. A. *et al*.; **A importância da remoção de sais solúveis do resíduo de cromo da indústria de curtume para uso em cerâmica.** ICTR 2004 – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. Florianópolis (SC), p. 3616-3625. 2004.

ALVES, W. A.; BALDO, J.B.; **Potencial de utilização de um resíduo argiloso na fabricação de revestimento cerâmico. Parte I – Caracterização.** Cerâmica Industrial, 2, 5/6, 1997.

AMBRÓSIO, M.C.R.; SILVA, F.T.; DUAILIBI, J.Fh.; **Blocos cerâmicos de alta porosidade.** Cerâmica Industrial, v.9, n.4, julho/agosto, p. 40-46, 2004.

ANTIQUEIRA, J.A.F. e CALLIARI, L.J. **Características sedimentares da desembocadura da laguna dos patos.** Gravel, n. 3, p.39-46, 2005. ISSN 1678-5975.

ARCARO, S.; ALBERTIN, A.; CESCONETO, F.R.; MAIA, B.G.O.; SILIGARDI, C.; OLIVEIRA, A.P.N. **Isolantes térmicos produzidos a partir de resíduos sólidos industriais.** Cerâmica, V.62, p.32-37, 2016.

AREIAS, I.O.R. *et al*.; **Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) em cerâmica vermelha.** Cerâmica, v.63, n.367, p. 343-349, 2017. http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633672004.

BARKSA, P. *et al*.; **An Evaluation of Marine Sediments in Terms of their usability in the Brick Industry: Case Study Port of Koper**. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. V.6, n.1, pp 78-88, 2018. Doi: https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d5.0183.

BARUZZO, D. *et al*.; **Possible production of ceramic tiles from marine dredgini spoils alone and mixed with other waste materials.** Journal of Hazardous Materials, B.134, p. 202–210, 2006. doi:10.1016/j.jhazmat.2005.10.053.

BELMONTE, L.J.; BERTELSEN, I.M.G.; **Evaluation of the potential for using Greenlandic marine sediments for brick production.** International Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering: Conference workshop on Cold Region Engineering. p.1-6. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. Dinamarca. 2016.

BERTELSEN, I.M.G.*;* BELMONTE, L.; CHEN, W.; OTTOSEN, L.M.; **Properties of bricks produced from greenlandic marine sediments.** 23rd International conference on port and ocean engineering under Arctic conditions – POAC'15. Noruega. 2015.

BORLONI, M.C. *et al*.; **Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas e mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar.** Revista Matéria, Rio Janeiro, v.11, n.4, p.435-443, 2006. Disponível em: http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10799. Acessoem: 01 abril 2020. ISSN 1517-7076.

BOUDJENANE, N.; BENYEROU, D.; BELHADRI, M.; **Design of the bricks based on the marine sediments of Bethioua Port.** Proceedings of Euro-Mediterranean conference for environmental integration – EMCEI-1, V.I e II, p. 1341-1343, Tunísia, 2018. ISSN 2522-8714 e ISSN 2522-8722. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70548-4

BRITO, I.P. *et al*. – **Avaliação de novos depósitos de argilas do Estado da Paraíba visando sua aplicação como matérias-primas cerâmicas.** Cerâmica, São Paulo, V. 61, n. 360, p.391-398. 2015. http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613601926.

BURGUEÑO, L.E.T.; TEIXEIRA, L.S.; SILVA, J.B.; DIAS, C.R.R.; **Estudo da ocorrência de contaminantes nos sedimentos de dragagem, dispostos em bacias de sedimentação, no Porto de Rio Grande, RS.** III SEMENGO - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica. Universidade Federal de Rio Grande – FURG. Rio Grande, 2008. Disponível em: https://semengo.furg.br/secao-tecnicas. Acesso em: 19 de maio 2020.

CALLIARI, L. *et al.,* **Mud deposits at Cassino beach: Natural versus antrophic.** PIANC-COPEDEC IX, Rio de Janeiro, 20p. 2016

CALLISTER, W.D.; **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução.** 5° ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos - LTC. 2002. 589p. ISBN-10: 8521612885 E ISBN-13: 978-8521612889

CAPUTO, H.P., **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Vol I. 6ª ed. Rio de Janeiro, de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos - LTC. 1988. 234p.

CARVALHO, A.C. *et al*.; **Resíduo industrial como matéria prima alternativa para a produção de filtros cerâmicos refratários.** Cerâmica, V.61, p.383-390, 2015. http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613591895

CARTER, C.B. NORTON, M.G.; **Ceramic Materials – Science and Engineering.** 2° ed. New York. Springer New York Heidelberg Dordrecht London. 2013. 766p. ISBN 978-1-4614-3522-8 ISBN 978-1-4614-3523-5 (eBook); DOI 10.1007/978-1-4614-3523-5

CASAGRANDE, M.C. *et al*.; **Reaproveitamento de resíduos sólidos industriais: processamento e aplicações no setor cerâmico.** Cerâmica Industrial, v.13, n.1/2, p.34-42. 2008.

CASTRO, R.J.S.; SOARES, R.A.L.; NASCIMENTO, R.M.; **Produção de revestimento cerâmico semi poroso com a adição de chamote de telhas.** Revista Matéria, Rio Janeiro, v.17, n.4, artigo 11487, p.1166-1175, 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/rmat/v17n4/07.pdf. Acesso em: 23 de janeiro 2020. ISSN 1517-7076.

CEN – European Committee for Standardization. **Specification for masonry units. Part 1. Clay masonryunits. EN – 771-1.** p.74**.** Bruxelas, 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução N° 454 de 01 de novembro de 2012.** Brasília. Publicação DOU, de 08/11/2012, Seção 1, pág. 66.

COUTINHO, N.C.; VIEIRA, C.M.F.; **Caracterização e incorporação de cinza de resíduo sólido urbano em cerâmica vermelha.** Cerâmica, V.62, p.249-255, 2016. http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623631985.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, Afshin J. **Heat and mass transfer – fundamentals & applications.** 5ª edição. McGraw-Hill, New York. 2015. 1208p.

DA CRUZ, J.N.; CLAIN, A.F. **A Interferência do pH na Análise de Cloreto pelo Método de Mohr**. Revista Eletrônica TECCEN, v. 3, n. 3, p. 29-44, 2010.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson, 2007.

DIAS, C.R.R.; KERSTNER, V.T.; PEDREIRA, C.L.S.; **Estudo geotécnico do solo formado em bacia de despejo de rejeitos de dragagem em Rio Grande.** I Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica - SEMENGO. Universidade Federal de Rio Grande – FURG. Rio Grande, 2004. Disponível em: https://semengo.furg.br/secao-tecnicas. Acesso em: 09 de agosto 2019.

DONDI, M; MARSIGLI, M.; FABBRI, B. **Recycling of industrial and urban wastes in brick production – A review.** Tile e Brick International. V. 13, n.03, p. 218-225. 1997.

DUTRA, R.P.S.; PONTES, L.R.A; **Obtenção e análise de cerâmicas porosas com a incorporação de produtos orgânicos ao corpo cerâmico.** Cerâmica, São Paulo, V. 48, n. 308, p.223-230. 2002**.** https://www.scielo.br/pdf/ce/v48n308/14893.pdf

DUTRA, R.P.S.; PONTES, L.R.A.; JUNIOR, W.R.S.; **Preparação de cerâmicas porosas com a incorporação de aditivos orgânicos ao corpo cerâmico.** Anais do 47° Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa- Paraíba, p. 1927-1941. 2003.

FERREIRA, C.A. **Obtenção de membrana cerâmica porosa a partir da utilização do resíduo de caulim como matéria-prima alternativa e da serragem da madeira como agente porogênico.** João Pessoa, PB. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Programa de Pós- Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade federal da Paraíba.

FERREIRA, C. A., CAMPOS FILHO, J. A. A; DUTRA, R. P. S. (n.d.). **Study of clays with the addition of wood waste using the fast-firing sintering process**. Retrieved July 11, 2022, from https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:50002866

FIGUEIREDO, J.M.R. *et al*. - **Influência da composição e das variáveis de processamento de formulações à base de argilas - uso em materiais refratários.** Cerâmica, São Paulo, v. 64, n. 369, p.10-19. 2018. http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643692169.

FLORÊNCIO, R.V.S; **A relação sais solúveis-eflorescências nas matérias primas argilosas do subgrupo Itararé destinadas a fabricação de cerâmica estrutural.** Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, 14. São Pedro – SP. 2000.

FONSECA, M.R.G. “Isolantes Térmicos fabricados a partir de cinza de casca de arroz: obtenção, caracterização de propriedades e sua relação com a microestrutura”. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de

Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

FREITAS, C.S.R. *et al*.; **Influência de diferentes processos de conformação nas características finais de produtos cerâmicos.** Cerâmica Industrial, São Paulo, v.14, n.3, p. 15-18, 2009.

GOES, J. R. *et al*.-**Avaliação da potencialidade de argilas da formação geológica Calumbi e Riachuelo em Sergipe para aplicação em revestimento cerâmico.** Cerâmica, São Paulo, V. 60, n. 354, p.211-217. 2014.

GONÇALVES, M.R.F.G.; BERGMANN, C.P.; **Isolantes térmicos de cinza de casca de arroz: obtenção e correlação de suas propriedades com a microestrutura**. Cerâmica Industrial, v.11, n.1, p.38-43, 2006.

GONÇALVES W.P *et al.,* **Avaliação da influência de diferentes tratamentos térmicos sobre as transformações das fases esmectitas.** Cerâmica, São Paulo, V. 60, n. 354, p.316-322. 2014.

GOULART, T.A. *et al.,* **Análise de retração em corpos de prova para a produção cerâmica com lama da praia do cassino em Rio Grande, RS.** 19ª Mostra da Produção Universitária – MPU, Universidade Federal de Rio Grande. Rio Grande. 2020. ISNN 2317-4420.

HAMER, K; KARIUS, V. **Brick production with dreged harbour sediments. an industrial-scale experiment.** Waste Management, V.22, p.521-530, 2002.

HERMANNS, L. **Estratégias ambientais para utilização de material de dragagem**. Porto Alegre, 2017. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

IGPAI – **Inspeção geral dos produtos agrícolas e industriais – Portugal – Tijolos para alvenaria: características e ensaio**s. Np 80. Lisboa. 1964.

JUNIOR, R.A. *et al.* **Desenvolvimento de materiais cerâmicos de dupla camada com adição de diferentes materiais orgânicos.** Revista eletrônica de materiais e processos, V.9, n.1, p.10-15. 2014. ISSN 1809-8797.

KOEHLER, P.H.W.; ASMUS, M. L. **Gestão ambiental integrada em portos organizados: uma análise baseada no caso do porto de Rio Grande, RS – Brasil**. Revista da Gestão Costeira Integrada.v.10. DOI: 10.5894/rgci171. 2010.p. 54.

KNIESS, C. *et al*.; **Influência da adição de cinzas pesadas de carvão mineral nas propriedades mecânicas e físicas de materiais cerâmicos.** Anais do 47° Congresso Brasileiro de Cerâmica. João Pessoa- Paraíba, p. 1243-1254. 2003.

LIMA, Y.C.C., **Formulação, caracterização e análise de condutividade térmica de um compósito cerâmico a base de argilas e vermiculita.** Teresina, 2018.

Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia dos Materiais, Instituto Federal do Piauí.

MACEDO, R.S. *et al*. - **Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha.** Cerâmica, São Paulo, V. 54, n. 332, p.411-417. 2008.

MACHADO, A.L.; BASTOS, C.A.B; FAGUNDES, D.F. **Caracterização geotécnica de material de dragagem do canal de acesso ao Porto de Rio Grande.** X Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul. Universidade Federal de Santa Maria. UFSM. Santa Maria. RS. 2019.

MAGALDI, R.M. *et. al*; **Preparação de cerâmicas porosas de céria-samária por meio da adição e remoção térmica de cloreto de sódio.** 60° Congresso Brasileiro de Cerâmica, p. 1360-1371. Águas Claras de Lindóia, SP. 2016.

MAIA, F.S. **Avaliação de massas cerâmicas, processamento e propriedades dos produtos de cerâmica vermelha do pólo cerâmico de Campos dos Goytacazes.** Campos dos Goytacazes, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

MEDEIROS, E.N.M *et al*.; **Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica. Utilização da técnica de planejamento.** Cerâmica, v.56, n.340, p.309-404, 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_issues&pid=0366-6913&lng=pt&nrm=iso Acesso em: 23 janeiro 2020.

MENEZES, R.R. *et al*.; **Obtenção de mulita porosa a partir da sílica da casca de arroz e do acetato de alumínio.** Cerâmica, v.54, n.330, p.245-252, 2008.

MENEZES, R.R; NEVES, G.A.; FERREIRA, H.C. **O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.2, p.303-313. 2002. Disponível em: http://www.agriambi.com.br. Acesso em: 19 de maio de 2020.

MENEZES, R.R. *et al*. - **Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção – revisão.** Cerâmica, São Paulo, V. 52, n. 321, p.37-49. 2006.

MODESTO, C. *et al*.; **Obtenção e caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais.** Cerâmica Industrial, v.8, n.4, p.14-18. 2003.

MORAES, D.M.; SPOSTO, R.M. **Propriedades Tecnológicas e Mineralógicas das Argilas e suas Influências na Qualidade de Blocos Cerâmicos de Vedação que Abastecem o Mercado do Distrito Federal.** Cerâmica Industrial, V.11, n. 05/06, p.35-38. 2006.

MYMRIN, V. *et al.* – **Overburden soil and marine dredging sludge utilization for production of new composites as highly efficient environmental management.**

Journal of Environmental Management, V.236, p.206-2013. 2019. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.065

NEGREIROS, F.T. **Fabricação de materiais cerâmicos com argila e cinzas de carvão mineral.** 1994**.** Dissertação (Mestre em engenharia) – Programa de pós-graduação em engenharia de produção e sistemas – UFSCAR, Santa Catarina.

NEVES, E.L.B. **Desempenho térmico de paredes de blocos de argamassa de cimento e garrafas PET preenchidas com cinzas da casca de arroz.** Pelotas, 2018. Dissertação (Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais – UFPEL, Pelotas, Rs.

NOVO, S. **Histórico de dragagem do Porto de Rio Grande.** Destinatário: Celso Luís da silva Pedreira. Rio Grande, 05 de março de 2020. Correspondência de e-mail.

OLIN-ESTES, T.J.; PALERMO, M.R.; **Recovery of dredged material for beneficial use: the future role ofphysicalseparation processes**. Journal of Hazardous Materials. V.85, n1-2, p.39-51, 2001.https://doi.org/*10.*1016*/*S0304-3894*(*01*)*00220-5*.*

ORESTE, E.Q. *et al.,* **Decomposição ácida assistida por ultrassom para a determinação de Cu, Fe, Mg e Zn por F AAS em cerâmicas de uso doméstico**. Química Nova, v 40, p. 310-316, 2017

PEREIRA.B.L.C., *et al.* – **Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termogravimetria e calorimetria.** Revista Árvore Viçosa, n 03, p.567-276. 2013.

PEREIRA, F.R.; BERNARDIN, A.M.; RIELLA, H.G. **Eliminação de sulfatos solúveis (eflorescências) nos produtos cerâmicos não esmaltados com adição de carbonato de bário.** Cerâmica e Informação, n 08, p.21-25. 2000.

PEREIRA, P.S. *et al*. – **Caracterização de argila utilizada para fabricação de cerâmica vermelha.** 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica. P. 807-8015. Porto de Galinhas – PE. 2011.

PEREZ, C.A.S *et al*. **Caracterização de massas cerâmicas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha em São Domingos do Sul – RS.** Cerâmica Industrial, V.15, n. 01/02, p.38-43. 2010.

PETTERLE, A.R**.** *et al.* **Placas cerâmicas contendo lodo de ETA e cinza de casca de arroz: Correlação de suas propriedades físico-químicas com sua microestrutura.** Química nova, V41, n. 10, p.1117-1126, 2018.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F.G. **Importância da composição Granulométrica de Massas para a Cerâmica Vermelha.** Cerâmica Industrial, V.02, n. 01/02, p.31-35. 1997.

PRADO, A.C.A. *et al.,* **Influência da distribuição granulométrica na estabilidade dimensional de placas cerâmicas de base vermelha.** Revista Cerâmica, São Paulo, V. 54, n. 332, p.466-471. 2008.

QUINTANA, L.M.H. *et al*.; **Utilização da cinza da casca de arroz na produção de cerâmica vermelha.** Anais do 43° Congresso Brasileiro de Cerâmica. Florianópolis-Santa Catarina, p. 15001-15010. 1999.

RAMOS, S.O *et al*; **Caracterização de argilas utilizadas em cerâmica estrutural.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.5, n. 3, p. 65-70. 2010. ISSN 1809-8797.

REIS, A.S.; SAGRILLO, V.P.D.; DIAZ, F.R.D. **Caracterização e propriedades cerâmicas das argilas usadas em cerâmica vermelha no estado do Espírito Santo.** 22° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal – Rio Grande do Norte, p.822-832. 2016.

RIBEIRO, L.C. *et al.,* **Medição da condutividade térmica de materiais sólidos não condutores.** 13° POSMEC – Simpósio do programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Uberlândia – Minas Gerais, 2003. Acesso link em 19/07/2022. https://www.researchgate.net/publication/237501063

ROMANO, R.C.O.; PANDOLFELLI, V.C.; **Obtenção e propriedades de cerâmicas porosas pela técnica de incorporação de espuma.** Cerâmica, v.52, n.322, p. 213-219, 2006.

ROMERO, M. *et al*., **Sintering behaviour of ceramic bodies from contaminated marine sediments.** Ceramics International, v.34, p. 1917-1924, 2008. Doi: 10.1016/j.ceramint.2007.07.002

SALIM, W.S.W. *et al*., **The preliminary investigation on the dreged marine sedimentos Kuala perlis as a potential brick material.** 2nd International conference on biotechnology and environment management – IPCBEE. V.42. Singapura. 2012. Doi: 10.7763/IPCBEE. 2012. V42. 6

SANTOS, P. S., **Ciência e Tecnologia de Argilas**, V. 01, 2ª Ed., Edgar Blücher, S. Paulo, SP ,1989.

SANTOS, R.C. *et al,* **Interação entre características de argilas e parâmetros de processamento sobre propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos.** Cerâmica, São Paulo, V. 63, n. 367, p.361-368. 2017. http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633672126

SANTOS S.C.A. *et al.,* **Estudo cinético do processo de desidroxilação da caulinita.**
57º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Natal, RN, Brasil. p. 1775-1787. 2013.

SANTOS, O.C. *et al.,* **Caracterização de sedimento proveniente de dragagem de canais pluviais do município de salvador – BA visando sua utilização em**

cerâmica estrutural. Cerâmica, São Paulo, V. 63, n. 365, p.99-108. 2017. http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132017633652016

SCREMIM, C.B. **Novos compósitos para materiais de construção civil contendo sedimentos de dragagem de porto marítimo, cinza de madeira de Bracatinga e cal residual.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 83. 2014.

SILVA, M.J.B. *et al.*, **Análise do processo de assoreamento no trecho I do canal de acesso ao porto de Rio Grande entre os anos de 2010 e 2018.** Revista Mundi Engenharia, tecnologia e Gestão, Paranaguá, PR. V.4, n.2, p.146 (1-15).

SILVA, C.R.L.; CHINELATTO, A.L.; CHINELATTO, A.S.A., **Viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em massa cerâmica para produção de blocos.** Cerâmica, v.61, n.357, p. 31-40, 2015. http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613571863

SIMIONI, W. S. **Análise de Erros na Medição de Condutividade Térmica de Materiais Através do Método Fluximétrico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 116. 2005.

SKORONSKI, E. *et al*.; **Avaliação das propriedades físicas de revestimentos cerâmicos produzidos com resíduo da indústria cerâmica (cinza pesada de carvão mineral).** Revista Matéria, Rio Janeiro, v.20 n.1, p.239-244, 2006. Disponível em: https://www.scielo.br/pdf/rmat/v20n1/1517-7076-rmat-20-01-00239.pdf. Acesso em: 23 janeiro 2020. ISSN 1517-7076.

SUÉLEN, C.C.S., **A influência do El Niño e da La Niña nos depósitos lamíticos e na dispersão sedimentar na praia do Cassino e na desembocadura da Lagoa dos Patos, Rio Grande, RS-Brasil**. Porto Alegre, 2010. Dissertação (Mestrado em Geociências) Programa de Pós-Graduação em Geociências Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TANNO, L.C. *et. al.*; **O polo de cerâmica vermelha de Tambaú (SP): Caracterização do sistema de suprimento mineral e desafios para seu aprimoramento.** Cerâmica Industrial, V.21, n. 04, p.30-35. 2016.

TARTARI, R. *et al*.; **Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte II: Incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha.** Cerâmica, v.57, n.344, p. 387-394, 2011.

TEIXEIRA, L.S.; DIAS, C.R.R., **Estudo das propriedades químicas dos rejeitos de dragagem para utilização como solo fabricado para fins agrícolas.** II SEMENGO - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*.* Universidade Federal de Rio Grande – FURG. Rio Grande*,* 2006. Disponível em: https://semengo.furg.br/secao-tecnicas. Acesso em: 19 de maio 2020.

VALÉRIO, B.S.B.; ALVES, A.M.L.; FONTOURA, J.A.S., **Caracterização geotécnica do fundo lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul o Sul (RS).** VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica -VII SEMENGO. Universidade Federal de Rio Grande – FURG. Rio Grande, 2016. Disponível em: https://semengo.furg.br/secao-tecnicas. Acesso em: 11 de junho 2018.

VALÉRIO, B.S.B.; ALVES, A.M.L.; FONTOURA, J.A.S., **Caracterização geotécnica do fundo lagunar entre Rio Grande e São Lourenço do Sul (RS).** Revista de Engenharia e Tecnologia. ISSN 2176-7270. V.9, n.2, p.142-154. 2017. Disponível em: https://www.revistas2.uepg.br/index.php/ret/article/view/11273/209209209724. Acesso em: 19 de maio 2020.

VIEGAS, *et al.,* **A influência da temperatura nas transformações de fases minerais presentes na lama vermelha – redução da hematita a magnetita.** Revista Matéria, Rio Janeiro, ISSN 1517-7076. v.25, n.1, 2020. https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0920

VIEIRA, C.M.F.; MONTEIRO, S.N.; **Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com lodo de ETA.** Revista Matéria, Rio Janeiro, ISSN 1517-7076. v.11, n.3, p. 217-222, 2006. Disponível em: http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10985. Acesso em: 19 abril 2020.

VIEIRA, C.M.F.; PINHEIRO, R.M. **Avaliação de argilas cauliníticas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha.** Cerâmica, v.57, n.343, p. 319-323, 2009

VILLAS BÔAS, M.O.C.; SALOMÃO, R.; PANDOLFELLI, V.C. **Cerâmicas porosas para aplicação em altas temperaturas.** Cerâmica, v.53, n.328, p. 361-367, 2007.

VILLWOCK, B., NICOLODI, J.L., CALLIARI, L.J. **Potencialidade de utilização da ilha do terrapleno de leste para a deposição de sedimentos dragados no porto de Rio Grande, Brasil.** Pesquisas em Geociências. V.4, n.3. 2021. E- ISSN 1807-9806.

VIVALDINI, D.O. *et al.*; **Revisão: Fundamentos e materiais para o projeto da microestrutura de isolantes térmicos refratários de alto desempenho.** Cerâmica, v.60, n.354, p. 297-309, 2014

VITORINO, J.P.D.; MONTEIRO, S.N.; VIEIRA, C.M.F. **Caracterização e incorporação de resíduos provenientes de estação de tratamento de água em cerâmica argilosa.** Cerâmica, v.55, n.336, p. 385-392, 2009.

YEBOAH, N.N. *et al*.; **Investigating the Potential for Producing Fired Bricks from Savannah Harbor Dredged Sediment.** Geo-Frontiers 2011 – Advances in Geotechnical Engineering. P. 1245-1254. 2011. ISBN (print): 97870784411650

ZIMMER, A. **Ceramic Materials – capítulo 11 – Ceramics products from Waste.** 1.ed, Croácia: Wilfried Wunderlich, 2010. p. 215-228. ISBN 978-953-307-145-9.

Apêndice

Apêndice A – Dados referentes a ensaios laboratoriais formulação F1

FORMULAÇÕES	CORPO DE PROVA Número		Massa Úmida (moldg.) m_0 (g)	Massa Seca (110ºC) m_1 (g)	Umidade de Conf. U(%)	Após Moldag. L_0 (mm)	Após Estufa (110ºC) L_1 (mm)	Retração Linear de Secagem R_s (%)	Após Estufa (110ºC) L_s (mm)	Massa após queima m_2 (g)	Após queima L_q (mm)	Retração Linear de Queima R_q (%)	DIMENSÕES Distância Apoios L (mm)	Altura a (mm)	Largura b (mm)	Célula Carga Força Máx (N)	Tensão de Ruptura T_R (Mpa)	Temp. de Queima T (°C)	APÓS A QUEIMA Massa Imersa M_i (g)	Massa Saturada M_u (g)	Massa Seca M_s (g)	Absorção de Água A_a (%)	Porosidade Aparente P_a (%)	Densidade Aparente M_{ea}	Perda ao Fogo Pf(%)
F1	A1	A	22,89	20,76	10,26	83,90	83,20	0,83	83,20	19,20	81,70	1,80	70,00	11,00	12,40	57,17	4,00	900 ºC	6,14	11,69	10,11	15,63	28,47	1,82	7,51
		B																	5,77	10,95	9,57	14,42	26,64	1,85	
	A2	A	23,04	20,94	10,03	83,80	83,30	0,60	83,30	19,29	81,80	1,80		11,10	12,40	66,06	4,54		6,00	11,38	9,92	14,72	27,14	1,84	7,88
		B																	5,98	11,21	9,84	13,92	26,20	1,88	
	A3	A	22,85	20,97	8,97	83,80	83,40	0,48	83,40	19,39	81,70	2,04		11,70	12,10	58,50	3,71		6,06	11,74	10,06	16,70	29,58	1,77	7,53
		B																	5,92	11,35	9,79	15,93	28,73	1,80	
	A4	A	23,14	21,02	10,09	84,00	83,10	1,07	83,10	19,29	82,00	1,32		11,10	12,50	38,92	2,65		5,21	9,85	8,56	15,07	27,80	1,84	8,23
		B																	6,81	13,01	11,25	15,64	28,39	1,81	
	A5	A	23,59	21,40	10,23	83,90	83,10	0,95	83,10	19,60	81,95	1,38		11,35	12,35	42,77	2,82		6,15	11,83	10,20	15,98	28,70	1,80	8,41
		B																	5,99	11,47	9,97	15,05	27,37	1,82	
	A6	A	22,79	20,66	10,31	83,90	83,10	0,95	83,10	18,95	81,95	1,38		10,90	12,00	36,88	2,72		6,26	11,95	10,38	15,13	27,59	1,82	8,28
		B																	5,44	10,55	9,07	16,32	28,96	1,77	
	A7	A	23,22	21,34	8,81	83,90	83,50	0,48	83,50	19,55	82,00	1,80		11,40	12,10	51,17	3,42		5,33	10,32	8,82	17,01	30,06	1,77	8,39
		B																	6,82	12,99	11,25	15,47	28,20	1,82	
	A8	A	23,20	21,39	8,46	83,95	83,60	0,42	83,60	19,60	82,00	1,91		11,40	12,10	45,96	3,07		6,94	13,41	11,46	17,02	30,14	1,77	8,37
		B																	5,24	10,11	8,65	16,88	29,98	1,78	
	A9	A	23,08	21,28	8,46	83,90	83,45	0,54	83,45	19,52	82,00	1,74		11,30	12,10	45,18	3,07		5,26	10,40	8,70	19,54	33,07	1,69	8,27
		B																	6,85	13,19	11,31	16,62	29,65	1,78	
	A10	A	23,14	21,31	8,59	83,95	83,50	0,54	83,50	19,57	82,10	1,68		11,40	12,50	43,15	2,79		5,38	10,53	8,87	18,71	32,23	1,72	8,17
		B																	6,76	13,12	11,19	17,25	30,35	1,76	
	MÉD.	A			9,42			0,69				1,69					3,28					16,15	28,96	1,80	8,10
	C.V.	A			9%			35%				14%					19%					9%	6%	2%	4%

Apêndice B – Dados referentes a ensaios laboratoriais formulação F2

FORMULAÇÕES	CORPO DE PROVA Número		Massa Úmida (moldg.) m_0 (g)	Massa Seca (110ºC) m_1 (g)	Umidade de Conf. U(%)	Após Moldag. L_0 (mm)	Após Estufa (110ºC) L_1 (mm)	Retração Linear de Secagem R_s (%)	Após Estufa (110ºC) L_s (mm)	Massa após queima m_2 (g)	Após queima L_q (mm)	Retração Linear de Queima R_q (%)	DIMENSÕES Distância Apoios L (mm)	Altura a (mm)	Largura b (mm)	Célula Carga Força Máx (N)	Tensão de Ruptura T_R (Mpa)	Temp. de Queima T (°C)	APÓS A QUEIMA Massa Imersa M_i (g)	Massa Saturada M_u (g)	Massa Seca M_s (g)	Absorção de Água A_a (%)	Porosidade Aparente P_a (%)	Densidade Aparente M_{ea}	Perda ao Fogo Pf(%)
F2	B1	A	22,73	21,06	7,93	83,70	83,10	0,72	83,10	20,28	83,10	0,00	70,00	10,80	12,50	57,79	4,16	900 ºC	6,66	13,12	11,19	17,25	29,88	1,73	3,70
		B																	5,94	11,15	9,76	14,24	26,68	1,87	
	B2	A	23,11	21,27	8,65	83,70	83,00	0,84	83,00	20,49	83,00	0,00		10,90	12,60	67,28	4,72		5,43	10,21	8,95	14,08	26,36	1,87	3,67
		B																	7,31	13,39	11,99	11,68	23,03	1,97	
	B3	A	23,12	21,11	9,52	83,50	82,70	0,96	82,70	20,14	82,6	0,12		11,4	12,3	80,29	5,27		5,91	10,90	9,68	12,60	24,45	1,94	4,59
		B																	6,70	12,19	10,93	11,53	22,95	1,99	
	B4	A	23,15	21,21	9,15	83,50	82,70	0,96	82,70	20,18	82,8	-0,12		10,6	12,5	82,33	6,16		6,18	11,31	10,10	11,98	23,59	1,97	4,86
		B																	6,45	11,92	10,59	12,56	24,31	1,94	
	B5	A	23,1	21,15	9,22	83,50	82,70	0,96	82,70	20,2	82,9	-0,24		10,3	12,2	68,56	5,56		5,85	10,90	9,61	13,42	25,54	1,90	4,49
		B																	6,80	12,35	11,09	11,36	22,70	2,00	
	B6	A	23	21,56	6,68	83,45	83,10	0,42	83,10	20,51	83,3	-0,24		10,5	12,4	37,93	2,91		6,40	11,91	10,46	13,86	26,32	1,90	4,87
		B																	6,47	11,82	10,54	12,14	23,93	1,97	
	B7	A	23,04	21,51	7,11	83,40	83,00	0,48	83,00	20,5	83,1	-0,12		10,7	12,7	45,16	3,26		6,61	11,92	10,77	10,68	21,66	2,03	4,70
		B																	6,23	11,56	10,22	13,11	25,14	1,92	
	B8	A	23,03	21,52	7,02	83,45	83,00	0,54	83,00	20,52	83,3	-0,36		10,5	12,4	38,01	2,92		5,27	9,83	8,64	13,77	26,10	1,89	4,65
		B																	7,59	13,76	12,36	11,33	22,69	2,00	
	B9	A	23,05	21,53	7,06	83,45	83,00	0,54	83,00	20,5	83,1	-0,12		10,4	12,4	47,71	3,74		6,74	12,23	10,98	11,38	22,77	2,00	4,78
		B																	6,16	11,28	10,05	12,24	24,02	1,96	
	B10	A	22,61	20,48	10,40	83,50	82,50	1,20	82,50	19,69	82,4	0,12		10,3	12,1	87,05	7,12		5,49	10,09	8,95	12,74	24,78	1,95	3,86
		B																	6,54	11,86	10,69	10,94	21,99	2,01	
	MÉD.	A			8,27			0,76				-0,10					4,58					12,65	24,44	1,94	4,42
	C.V.	A			16%			34%				-165%					26%					12%	8%	3%	11%

Apêndice C – Dados referentes a ensaios laboratoriais formulação F3

FORMULAÇÕES	CORPO DE PROVA Número		Massa Úmida (moldg.) m_0 (g)	Massa Seca (110ºC) m_1 (g)	Umidade de Conf. U(%)	Após Moldag. L_0 (mm)	Após Estufa (110ºC) L_1 (mm)	Retração Linear de Secagem R_s (%)	Após Estufa (110ºC) L_s (mm)	Massa após queima m_2 (g)	Após queima L_q (mm)	Retração Linear de Queima R_q (%)	DIMENSÕES Distância Apoios L (mm)	Altura a (mm)	Largura b (mm)	Célula Carga Força Máx (N)	Tensão de Ruptura T_R (Mpa)	Temp. de Queima T (°C)	APÓS A QUEIMA Massa Imersa M_i (g)	Massa Saturada M_u (g)	Massa Seca M_s (g)	Absorção de Água A_a (%)	Porosidade Aparente P_a (%)	Densidade Aparente M_{ea}	Perda ao Fogo Pf(%)
F3	C1	A	22,84	21,08	8,35	83,70	83,10	0,72	83,10	20,19	83,00	0,12	70,00	11,00	12,40	47,18	3,30	900 ºC	5,65	10,77	9,30	15,81	28,71	1,82	4,22
		B																	6,95	12,77	11,37	12,31	24,05	1,95	
	C2	A	23,09	21,26	8,61	83,60	83,10	0,60	83,10	20,38	83,00	0,12		11,00	12,20	57,06	4,06		6,29	11,86	10,35	14,59	27,11	1,86	4,14
		B																	6,40	11,89	10,50	13,24	25,32	1,91	
	C3	A	23,01	21,03	9,42	83,50	82,80	0,84	82,80	19,98	82,9	-0,12		10,3	12,5	64,40	5,10		7,25	13,33	11,90	12,02	23,52	1,96	4,99
		B																	5,25	9,85	8,63	14,14	26,52	1,88	
	C4	A	22,95	20,94	9,60	83,50	82,80	0,84	82,80	19,88	82,9	-0,12		11,4	12,3	58,75	3,86		6,66	12,36	10,97	12,67	24,39	1,92	5,06
		B																	5,73	10,67	9,45	12,91	24,70	1,91	
	C5	A	23,24	21,55	7,84	83,55	83,00	0,66	83,00	20,53	83,2	-0,24		10,8	12,6	34,10	2,44		5,04	9,60	8,30	15,66	28,51	1,82	4,73
		B																	7,79	14,18	12,71	11,57	23,00	1,99	
	C6	A	22,99	21,39	7,48	83,50	83,10	0,48	83,10	20,37	83,3	-0,24		10,5	12,4	40,13	3,08		6,38	11,70	10,41	12,39	24,25	1,96	4,77
		B																	6,40	11,81	10,44	13,12	25,32	1,93	
	C7	A	23,12	21,49	7,58	83,50	83,10	0,48	83,10	20,46	83,3	-0,24		10,5	12,4	38,68	2,97		6,35	11,66	10,40	12,12	23,73	1,96	4,79
		B																	6,46	11,98	10,57	13,34	25,54	1,91	
	C8	A	23,15	21,54	7,47	83,50	83,10	0,48	83,10	20,49	83,4	-0,36		10,7	12,4	39,11	2,89		6,91	12,65	11,25	12,44	24,39	1,96	4,87
		B																	5,95	11,03	9,76	13,01	25,00	1,92	
	C9	A	23,11	21,44	7,79	83,50	83,00	0,60	83,00	20,48	83,4	-0,48		10,6	12,5	34,75	2,60		6,76	12,40	11,07	12,01	23,58	1,96	4,48
		B																	6,02	11,33	9,90	14,44	26,93	1,86	
	C10	A	23,15	21,52	7,57	83,50	83,10	0,48	83,10	20,49	83,3	-0,24		10,5	12,4	39,64	3,04		6,18	11,48	10,12	13,44	25,66	1,91	4,79
		B																	6,66	12,26	10,89	12,58	24,46	1,94	
	MÉD.	A			8,17			0,62				-0,18					3,33					13,19	25,24	1,92	4,68
	C.V.	A			10%			23%				-105%					24%					9%	6%	3%	7%

Apêndice D – Dados referentes a ensaios laboratoriais formulação F4

FORMULAÇÕES	CORPO DE PROVA Número		Massa Úmida (moldg.) m_0 (g)	Massa Seca (110ºC) m_1 (g)	Umidade de Conf. U(%)	Após Moldag. L_0 (mm)	Após Estufa (110ºC) L_1 (mm)	Retração Linear de Secagem R_s (%)	Após Estufa (110ºC) L_s (mm)	Massa após queima m_2 (g)	Após queima L_q (mm)	Retração Linear de Queima R_q (%)	DIMENSÕES Distância Apoios L (mm)	Altura a (mm)	Largura b (mm)	Célula Carga Força Máx (N)	Tensão de Ruptura T_R (Mpa)	Temp. de Queima T (°C)	APÓS A QUEIMA Massa Imersa M_i (g)	Massa Saturada M_u (g)	Massa Seca M_s (g)	Absorção de Água A_a (%)	Porosidade Aparente P_a (%)	Densidade Aparente M_{ea}	Perda ao Fogo Pf(%)
F4	D1	A	23,11	21,32	8,40	83,60	83,00	0,72	83,00	20,29	83,00	0,00	70,00	10,90	12,00	49,44	3,64	900 ºC	4,89	9,24	8,01	15,36	28,28	1,84	4,83
		B																	7,78	14,47	12,75	13,49	25,71	1,91	
	D2	A	22,91	21,11	8,53	83,70	83,10	0,72	83,10	20,12	83,00	0,12		10,90	12,00	54,15	3,99		5,50	10,35	9,07	14,11	26,39	1,87	4,69
		B																	7,03	13,14	11,56	13,67	25,86	1,89	
	D3	A	23,15	21,01	10,19	83,60	82,90	0,84	82,90	20,02	82,95	-0,06		11,7	12,5	60,77	3,73		6,57	12,17	10,77	13,00	25,00	1,92	4,71
		B																	5,94	11,09	9,74	13,86	26,21	1,89	
	D4	A	22,95	20,86	10,02	83,70	82,90	0,96	82,90	19,79	82,95	-0,06		10,5	12,6	65,36	4,94		6,68	12,46	10,95	13,79	26,12	1,89	5,13
		B																	5,71	10,56	9,35	12,94	24,95	1,93	
	D5	A	22,86	21,32	7,22	83,55	83,15	0,48	83,15	20,16	83,3	-0,18		10,2	12,4	35,94	2,93		6,92	12,86	11,33	13,50	25,76	1,91	5,44
		B																	5,72	10,69	9,34	14,45	27,16	1,88	
	D6	A	23,18	21,57	7,46	83,55	83,20	0,42	83,20	20,38	83,2	0,00		10,7	12,3	43,70	3,26		6,00	11,13	9,80	13,57	25,93	1,91	5,52
		B																	6,76	12,66	11,10	14,05	26,44	1,88	
	D7	A	23,09	21,43	7,75	83,55	83,20	0,42	83,20	20,31	83,2	0,00		10,7	12,7	38,09	2,75		6,38	11,80	10,45	12,92	24,91	1,93	5,23
		B																	6,33	11,92	10,40	14,62	27,19	1,86	
	D8	A	22,49	20,81	8,07	83,50	83,00	0,60	83,00	19,75	83,2	-0,24		10,4	12,6	41,74	3,22		7,22	13,39	11,78	13,67	26,09	1,91	5,09
		B																	5,17	9,53	8,46	12,65	24,54	1,94	
	D9	A	23,15	21,45	7,93	83,50	83,15	0,42	83,15	20,31	83,2	-0,06		10,7	12,5	33,75	2,48		7,39	13,69	12,07	13,42	25,71	1,92	5,31
		B																	5,34	10,15	8,76	15,87	28,90	1,82	
	D10	A	23,07	21,39	7,85	83,55	83,25	0,36	83,25	20,26	83,2	0,06		10,7	12,5	36,72	2,69		5,95	11,17	9,76	14,45	27,01	1,87	5,28
		B																	6,75	12,59	11,02	14,25	26,88	1,89	
	MÉD.	A			8,34			0,59				-0,04					3,36					13,88	26,25	1,89	5,12
	C.V.	A			12%			35%				-252%					22%					6%	4%	2%	6%

Apêndice E – Dados referentes a ensaios laboratoriais formulação F5

FORMULAÇÕES	CORPO DE PROVA Número		Massa Úmida (moldg.) m_0 (g)	Massa Seca (110ºC) m_1 (g)	Umidade de Conf. U(%)	Após Moldag. L_0 (mm)	Após Estufa (110ºC) L_1 (mm)	Retração Linear de Secagem R_s (%)	Após Estufa (110ºC) L_s (mm)	Massa após queima m_2 (g)	Após queima L_q (mm)	Retração Linear de Queima R_q (%)	DIMENSÕES Distância Apoios L (mm)	Altura a (mm)	Largura b (mm)	Célula Carga Força Máx (N)	Tensão de Ruptura T_R (Mpa)	Temp. de Queima T (°C)	APÓS A QUEIMA Massa Imersa M_i (g)	Massa Saturada M_u (g)	Massa Seca M_s (g)	Absorção de Água A_a (%)	Porosidade Aparente P_a (%)	Densidade Aparente M_{ea}	Perda ao Fogo Pf(%)
F5	E1	A	23,12	21,06	9,78	84,00	83,40	0,71	83,40	18,48	81,50	2,28	70,00	12,00	12,00	45,60	2,77	900 ºC	5,33	11,03	9,26	19,11	31,05	1,62	12,25
		B																	5,51	11,43	9,59	19,19	31,08	1,62	
	E2	A	23,29	21,14	10,17	83,90	83,40	0,60	83,40	18,58	81,70	2,04		12,00	12,00	39,06	2,37		5,31	10,97	9,19	19,37	31,45	1,62	12,11
		B																	5,67	11,68	9,80	19,18	31,28	1,63	
	E3	A	23,29	21,39	8,88	83,90	83,50	0,48	83,50	18,80	81,10	2,87		12,50	12,00	35,88	2,01		5,37	11,36	9,38	21,11	33,06	1,57	12,11
		B																	5,66	11,70	9,84	18,90	30,79	1,63	
	E4	A	23,33	21,40	9,02	83,90	83,50	0,48	83,50	18,80	81,30	2,63		12,50	12,00	38,75	2,17		5,19	10,95	9,01	21,53	33,68	1,56	12,15
		B																	5,88	12,25	10,22	19,86	31,87	1,60	
	E5	A	23,26	21,11	10,18	84,00	83,50	0,60	83,50	18,39	81,90	1,92		12,50	12,10	19,01	1,06		6,02	12,77	10,50	21,62	33,63	1,56	12,88
		B																	4,65	9,95	8,09	22,99	35,09	1,53	
	E6	A	23,29	21,07	10,54	83,90	83,30	0,72	83,30	18,35	81,45	2,22		12,40	12,00	25,53	1,45		5,15	10,86	8,98	20,94	32,92	1,57	12,91
		B																	5,59	11,83	9,72	21,71	33,81	1,56	
	E7	A	23,30	21,10	10,43	84,00	83,40	0,71	83,40	18,43	81,60	2,16		12,50	12,00	18,04	1,01		6,30	13,19	10,93	20,68	32,80	1,59	12,65
		B																	4,52	9,72	7,86	23,66	35,77	1,51	
	E8	A	23,24	21,42	8,50	84,00	83,60	0,48	83,60	18,74	81,80	2,15		13,00	12,40	22,29	1,12		4,76	10,42	8,32	25,24	37,10	1,47	12,51
		B																	6,16	13,08	10,69	22,36	34,54	1,54	
	E9	A	23,39	21,57	8,44	84,00	83,60	0,48	83,60	18,83	81,60	2,39		12,80	12,40	26,90	1,39		5,18	11,03	9,05	21,88	33,85	1,55	12,70
		B																	5,78	12,41	10,11	22,75	34,69	1,52	
	E10	A	23,37	21,59	8,24	84,00	83,60	0,48	83,60	18,80	81,70	2,27		12,50	12,00	26,73	1,50		5,85	12,54	10,22	22,70	34,68	1,53	12,92
		B																	5,08	10,91	8,90	22,58	34,48	1,53	
	MÉD.	A			9,42			0,57				2,29					1,68					21,37	33,38	1,57	12,52
	C.V.	A			9%			19%				12%					36%					8%	5%	3%	3%

Apêndice F – Dados referentes a ensaios laboratoriais formulação F9

FORMULAÇÕES	CORPO DE PROVA Número		Massa Úmida (moldg.) m_0 (g)	Massa Seca (110ºC) m_1 (g)	Umidade de Conf. U(%)	Após Moldag. L_0 (mm)	Após Estufa (110ºC) L_1 (mm)	Retração Linear de Secagem R_s (%)	Após Estufa (110ºC) L_s (mm)	Massa após queima m_2 (g)	Após queima L_q (mm)	Retração Linear de Queima R_q (%)	DIMENSÕES Distância Apoios L (mm)	Altura a (mm)	Largura b (mm)	Célula Carga Força Máx (N)	Tensão de Ruptura T_R (Mpa)	Temp. de Queima T (°C)	APÓS A QUEIMA Massa Imersa M_i (g)	Massa Saturada M_u (g)	Massa Seca M_s (g)	Absorção de Água A_a (%)	Porosidade Aparente P_a (%)	Densidade Aparente M_{ea}	Perda ao Fogo Pf(%)
F9	K1	A	23,34	21,37	9,22	83,90	83,50	0,48	83,50	18,88	81,50	2,40	70,00	12,50	12,00	37,82	2,12	900 ºC	6,00	12,53	10,42	20,25	32,31	1,60	11,65
		B																	5,08	10,65	8,81	20,89	33,03	1,58	
	K2	A	23,19	21,21	9,34	83,90	83,40	0,60	83,40	18,76	81,50	2,28		12,40	12,00	34,78	1,98		5,00	10,60	8,66	22,40	34,64	1,55	11,55
		B																	6,07	12,52	10,51	19,12	31,16	1,63	
	K3	A	23,35	21,03	11,03	83,90	83,40	0,60	83,40	18,48	82,10	1,56		12,20	12,00	23,19	1,36		5,89	12,28	10,21	20,27	32,39	1,60	12,13
		B																	4,95	10,60	8,61	23,11	35,22	1,52	
	K4	A	23,26	20,93	11,13	84,00	83,50	0,60	83,50	18,35	82,00	1,80		12,30	12,10	21,63	1,24		5,08	10,74	8,85	21,36	33,39	1,56	12,33
		B																	5,75	12,11	9,97	21,46	33,65	1,57	
	K5	A	23,23	21,02	10,51	83,90	83,40	0,60	83,40	18,44	82,00	1,68		11,50	12,10	21,49	1,41		6,02	12,61	10,44	20,79	32,93	1,58	12,27
		B																	4,83	10,32	8,40	22,86	34,97	1,53	
	K6	A	23,35	21,59	8,15	84,00	83,50	0,60	83,50	18,86	82,20	1,56		12,80	12,20	19,34	1,02		4,21	9,16	7,37	24,29	36,16	1,49	12,64
		B																	6,83	14,50	11,92	21,64	33,64	1,55	
	K7	A	23,29	21,57	7,97	84,00	83,50	0,60	83,50	18,82	82,20	1,56		12,60	12,10	19,68	1,08		5,38	11,54	9,40	22,77	34,74	1,53	12,75
		B																	5,67	12,17	9,86	23,43	35,54	1,52	
	K8	A	23,49	21,66	8,45	84,00	83,50	0,60	83,50	18,94	82,10	1,68		12,50	12,10	23,62	1,31		4,84	10,30	8,42	22,33	34,43	1,54	12,56
		B																	6,30	13,38	10,96	22,08	34,18	1,55	
	K9	A	23,34	20,69	12,81	83,90	83,10	0,95	83,10	18,23	81,60	1,81		11,90	11,85	31,96	2,00		4,26	8,88	7,39	20,16	32,25	1,60	11,89
		B																	6,17	12,76	10,76	18,59	30,35	1,63	
	K10	A	23,15	20,53	12,76	83,90	83,05	1,01	83,05	18,13	81,70	1,63		11,70	11,90	37,93	2,44		5,82	12,08	10,19	18,55	30,19	1,63	11,69
		B																	4,48	9,41	7,85	19,87	31,64	1,59	
	MÉD.	A			10,14			0,66				1,79					1,60					21,31	33,34	1,57	12,15
	C.V.	A			18%			26%				17%					25%					8%	5%	3%	4%

Apêndice G – Dados referentes a ensaios laboratoriais formulação F10

FORMULAÇÕES	CORPO DE PROVA Número		Massa Úmida (moldg.) m_0 (g)	Massa Seca (110ºC) m_1 (g)	Umidade de Conf. U(%)	Após Moldag. L_0 (mm)	Após Estufa (110ºC) L_1 (mm)	Retração Linear de Secagem R_s (%)	Após Estufa (110ºC) L_s (mm)	Massa após queima m_2 (g)	Após queima L_q (mm)	Retração Linear de Queima R_q (%)	DIMENSÕES Distância Apoios L (mm)	Altura a (mm)	Largura b (mm)	Célula Carga Força Máx (N)	Tensão de Ruptura T_R (Mpa)	Temp. de Queima T (°C)	APÓS A QUEIMA Massa Imersa M_i (g)	Massa Saturada M_u (g)	Massa Seca M_s (g)	Absorção de Água A_a (%)	Porosidade Aparente P_a (%)	Densidade Aparente M_{ea}	Perda ao Fogo Pf(%)
F10	L1	A	23,33	21,39	9,07	83,90	83,30	0,72	83,30	19,49	83,00	0,36	70,00	11,90	12,40	35,63	2,13	900 ºC	5,20	10,59	8,94	18,46	30,61	1,66	8,88
		B																	6,35	12,87	10,88	18,29	30,52	1,67	
	L2	A	23,36	21,38	9,26	83,90	83,30	0,72	83,30	19,45	83,00	0,36		11,90	12,40	28,31	1,69		6,22	12,44	10,65	16,81	28,78	1,71	9,03
		B																	5,36	11,01	9,22	19,41	31,68	1,63	
	L3	A	23,28	21,00	10,86	83,70	83,00	0,84	83,00	19,01	82,90	0,12		11,50	12,10	39,34	2,58		5,95	11,90	10,24	16,21	27,90	1,72	9,48
		B																	5,36	10,83	9,26	16,95	28,70	1,69	
	L4	A	23,27	21,03	10,65	83,70	82,90	0,96	82,90	19,08	82,90	0,00		11,50	12,50	37,84	2,40		5,73	11,67	9,92	17,64	29,46	1,67	9,27
		B																	5,61	11,18	9,64	15,98	27,65	1,73	
	L5	A	23,32	21,10	10,52	83,70	83,00	0,84	83,00	19,10	82,90	0,12		11,50	12,30	37,81	2,44		6,70	13,45	11,56	16,35	28,00	1,71	9,48
		B																	4,64	9,41	8,06	16,75	28,30	1,69	
	L6	A	23,44	21,75	7,77	83,90	83,40	0,60	83,40	19,63	83,40	0,00		12,00	12,50	24,42	1,42		7,28	14,56	12,45	16,95	28,98	1,71	9,75
		B																	4,39	9,08	7,57	19,95	32,20	1,61	
	L7	A	23,35	21,72	7,50	83,95	83,45	0,60	83,45	19,58	83,40	0,06		12,00	12,50	16,40	0,96		7,47	15,01	12,78	17,45	29,58	1,69	9,85
		B																	4,19	8,63	7,20	19,86	32,21	1,62	
	L8	A	23,13	20,75	11,47	83,60	82,80	0,96	82,80	18,86	82,60	0,24		11,10	12,10	54,03	3,81		5,23	10,40	9,03	15,17	26,50	1,75	9,11
		B																	5,65	11,45	9,77	17,20	28,97	1,68	
	L9	A	23,14	20,66	12,00	83,60	82,70	1,08	82,70	18,82	82,50	0,24		11,10	11,95	49,12	3,50		5,22	10,47	9,00	16,33	28,00	1,71	8,91
		B																	5,64	11,34	9,72	16,67	28,42	1,71	
	L10	A	23,07	20,66	11,67	83,70	82,80	1,08	82,80	18,84	82,70	0,12		11,10	12,00	53,34	3,79		5,21	10,47	8,96	16,85	28,71	1,70	8,81
		B																	5,72	11,30	9,78	15,54	27,24	1,75	
	MÉD.	A			10,08			0,84				0,16					2,47					17,24	29,12	1,69	9,26
	C.V.	A			16%			21%				82%					25%					8%	5%	2%	4%