

**CENTRO UNIVERSITÁRIO
ANTÔNIO EUFRÁSIO DE TOLEDO DE PRESIDENTE PRUDENTE**

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO LODO DE ETA E DA CINZA DO BAGAÇO DA
CANA NAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS CERÂMICOS**

Felipe Pires Chaves

Presidente Prudente/SP
2018

**CENTRO UNIVERSITÁRIO
ANTÔNIO EUFRÁSIO DE TOLEDO DE PRESIDENTE PRUDENTE**

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO LODO DE ETA E DA CINZA DO BAGAÇO DA
CANA NAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS CERÂMICOS**

Felipe Pires Chaves

Trabalho de Curso apresentado como requisito parcial de Conclusão do Curso para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Dr. Elton Aparecido Prado dos Reis.

Presidente Prudente/SP
2018

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO LODO DE ETA E DA CINZA DO BAGAÇO DA
CANA NAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS CERÂMICOS**

Trabalho de Curso apresentado como requisito
parcial para obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Prof. Dr. Elton Aparecido Prado dos Reis
Orientador

Prof. Dr. Silvio Rainho Teixeira
Examinador

Prof. Ms. Alonso Droppa Junior
Examinador

Presidente Prudente, 27 de novembro de 2018.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Paulo e Angela, que me ensinaram desde os primeiros passos e não mediram esforços para a conclusão da minha graduação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me abençoar, guiar e proteger durante toda a graduação.

Aos meus pais, Paulo e Angela, pelo amor e apoio incondicionais.

Aos meus avós, Lourdes e Nelson (em memória), Yolanda e João, pelos valores transmitidos à família.

Aos meus irmãos, Vinícius e Amanda, por todos os auxílios e momentos compartilhados.

À minha namorada, Lissa, pelo imenso carinho e suporte em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Elton, por compartilhar tanto conhecimento e possibilitar o desenvolvimento deste trabalho, mostrando-se uma pessoa ímpar.

Ao Prof. Dr. Silvio, grande apoiador das atividades de pesquisa desenvolvidas, sendo inclusive banca deste trabalho.

Ao Prof. Ms. Alonso, professor e auxiliador durante a graduação, e também banca deste trabalho.

Aos pesquisadores Gleyson, Luís Fernando e Wagner, pelo auxílio nas atividades e técnicas laboratoriais.

Ao Prof. Dr. João Osvaldo e ao auxiliar Victor, que viabilizaram a realização da análise textural.

Ao coordenador do curso de Engenharia Civil, Prof. Ms. Marcos, por toda a atenção e colaboração durante a graduação.

Aos professores do curso de Engenharia Civil, que tive a honra de conhecer, pelo empenho e dedicação nas disciplinas ministradas.

Aos estagiários docentes Rodrigo e Yan, pela colaboração nas atividades laboratoriais.

Aos amigos, Danilo, Giovana, Gustavo, João e Leonardo, pelo companheirismo durante a graduação.

Ao Centro Universitário Antônio Eufrásio de Toledo de Presidente Prudente, pelo apoio concedido por meio da bolsa do Programa de Iniciação Científica Toledo (PICT) e por possibilitar o desenvolvimento das atividades de pesquisa durante a graduação.

À Sabesp, representada por Gilmar José Peixoto, pelo apoio e fornecimento do lodo de ETA.

À Olaria Indianense, pelo fornecimento da argila.

À Umoe BioEnergy, pelo fornecimento da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de compósitos obtidos a partir de argila com a inserção de lodo de ETA e cinza do bagaço da cana. A argila, o lodo e a cinza foram submetidas à análise de difração de raios X e análises térmicas (TG e DSC), sendo a argila também submetida à análise textural. Para a confecção das amostras, a argila e o lodo foram destorroados, e a cinza foi peneirada. Foram desenvolvidos três tipos de amostras: de argila, de argila e lodo, e amostras de argila e lodo, com a inserção de cinza do bagaço da cana. As amostras foram prensadas em triplicata, e após a prensagem, foram sinterizadas e submetidas aos ensaios de módulo de ruptura à flexão em três pontos, retração linear de queima, perda de massa ao fogo, porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente, sendo também realizada análise de difração de raios X. Para o lodo de ETA, foram identificados picos semelhantes à argila, principalmente pela presença de caulinita e quartzo. Enquanto que para a cinza, verificou-se a predominância da fase cristalina de quartzo. As análises térmicas indicaram a presença de materiais orgânicos no lodo e na cinza, e corroboraram os picos identificados no DRX. A partir da análise textural, verificou-se que a argila analisada apresentou a predominância de frações argilosas. Os compósitos desenvolvidos apresentaram picos semelhantes de difração, apesar das diferentes composições. A incorporação do lodo, de maneira geral, resultou em diminuição da resistência mecânica e aumento na absorção de água. Apesar desse comportamento, a amostra com menor percentual de lodo apresentou valores de absorção de água e resistência mecânica de acordo com os limites estabelecidos pela literatura. A inserção de cinza resultou em menor resistência mecânica e maiores índices de absorção e porosidade nos compósitos. Porém, a inserção de maneira ponderada, com controle sobre os procedimentos, pode resultar em propriedades satisfatórias.

Palavras-chave: Lodo de ETA. Cinza do bagaço da cana. Cerâmica. Resíduos. Compósitos

ABSTRACT

This present work aimed at the development of composites made with clay with the insertion of water treatment plant (WTP) sludge and sugarcane bagasse ash. Clay, sludge and ash were submitted to X-ray diffraction (XRD) and thermal analyzes (TG and DSC), and clay was also submitted to texture analysis. For the samples preparation, the clay and the sludge were crushed in a laboratory mill, and the ash was sieved. Three types of samples were developed: clay only, clay and sludge, and clay and sludge, with the sugarcane bagasse ash insertion. The samples were pressed in triplicate, and after pressing, they were sintered and submitted to three-point flexural strength, linear shrinkage, weight loss on ignition, apparent porosity, water absorption, apparent density, and X-ray diffraction. For the WTP sludge, peaks similar to clay were identified, mainly due to the presence of kaolinite and quartz. As for the ash, a predominance of the crystalline phase of quartz was verified. Thermal analyzes indicated the presence of organic matter in the sludge and ash, and corroborated the peaks identified in the XRD. From the texture analysis, it was verified that the clay analyzed presented predominance of clay fractions. The composites showed similar diffraction peaks, despite the different compositions. Sludge incorporation generally resulted in decreased mechanical strength and increased water absorption. Besides that, the sample with the lowest percentage of sludge presented water absorption and mechanical strength values according to the limits established in the literature. The insertion of sugarcane bagasse ash resulted in lower mechanical strength and higher water absorption and apparent porosity in the composites. Nevertheless, the insertion in limited quantities, with controlled procedures, can result in satisfactory properties.

Keywords: Water treatment plant sludge. Sugarcane bagasse ash. Ceramic. Waste. Composites.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AA – Absorção de Água

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica

CBC – Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar

COGEN – Associação da Indústria de Cogeração de Energia

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CP – Corpo de prova

DRX – Difração de raios X

DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial

DTG – Termogravimetria Derivada

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETA – Estação de Tratamento de Água

JCPDS - Joint Committee on Powder Diffraction Standards

MEA – Massa Específica Aparente

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MRF – Módulo de Ruptura de Flexão

NBR – Norma Brasileira

PA – Porosidade Aparente

PAC – Policloreto de alumínio

PF – Perda de Massa ao Fogo

RL – Retração Linear

RLq – Retração Linear de Queima

Sabesp – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

TG – Análise Termogravimétrica

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E TABELAS

FIGURAS

FIGURA 1 – Diagrama granulométrico de Winkler.....	16
FIGURA 2 – Principais processos de tratamento da água em uma ETA de sistema convencional	17
FIGURA 3 – Decantador existente na ETA de Presidente Prudente.....	19
FIGURA 4 – Momento de lavagem do decantador da ETA de Presidente Prudente, sendo possível visualizar o lodo gerado.....	20
FIGURA 5 – Argila coletada junto à Olaria Indianense	25
FIGURA 6 – Amostra de lodo de ETA coletada	26
FIGURA 7 – Amostra de cinza do bagaço da cana coletada	27
FIGURA 8 – Fotografias de cada um dos materiais antes e após processo de secagem.....	28
FIGURA 9 – Fotografia do lodo após o destorroamento	29
FIGURA 10 – Agitador de peneiras de marca LUCADEMA (à esquerda) utilizado para o peneiramento da cinza do bagaço da cana e a fração de cinza retida na peneira de 270 <i>mesh</i> (à direita).....	30
FIGURA 11 – Prensa manual (à esquerda) e fotografia (superior direita) e representação (inferior direita) da matriz de três corpos de prova utilizadas para a conformação das amostras	32
FIGURA 12 – Fotografias dos corpos de prova após prensagem	33
FIGURA 13 – Forno do tipo mufla com as amostras em seu interior, para o processo de sinterização	34
FIGURA 14 – Fotografias dos corpos de prova após sinterização.....	35
FIGURA 15 – Corpo de prova posicionado para ensaio à flexão de três pontos na máquina universal de ensaios, modelo EMIC 23-100	36
FIGURA 16 – Disposição e informações sobre o ensaio de flexão de três pontos (à esquerda) e diagramas de força cortante e momento fletor correspondentes para o ensaio (à direita).....	37
FIGURA 17 – Microscópio eletrônico de varredura utilizado para análise	41
FIGURA 18 – <i>Sputter</i> utilizado para a metalização das amostras.....	42

FIGURA 19 – Difratorômetro XRD 6000 utilizado para as análises de difração de raios X nas amostras	43
FIGURA 20 – Equipamento SDT Q600 utilizado para as análises térmicas (TG e DSC)	44
FIGURA 21 – Difratogramas da argila analisada em pó (a) e orientada (b).....	46
FIGURA 22 – Difratograma do lodo de ETA	48
FIGURA 23 – Difratograma da cinza do bagaço da cana	49
FIGURA 24 – Curva de DSC da argila	50
FIGURA 25 – Curva de DSC do lodo de ETA	51
FIGURA 26 – Curva de DSC da cinza do bagaço da cana	52
FIGURA 27 – Curvas de TG e DTG da argila	53
FIGURA 28 – Curvas de TG e DTG do lodo de ETA	54
FIGURA 29 – Curvas de TG e DTG da cinza do bagaço da cana	55
FIGURA 30 – Difratogramas das amostras 90/10 CBC, 50/50 CBC e 50/50 X após queima	57
FIGURA 31 – Retração Linear de Queima das amostras	59
FIGURA 32 – Resultados das Perdas de Massa ao Fogo das amostras.....	60
FIGURA 33 – Resultados de Porosidade Aparente dos materiais	61
FIGURA 34 – Valores de Absorção de Água das amostras analisadas.....	63
FIGURA 35 – Massa Específica Aparente das amostras.....	64
FIGURA 36 – Valores dos Módulos de Ruptura à Flexão das amostras.....	65
FIGURA 37 – Dados referentes ao Módulo de Ruptura à Flexão juntamente dos dados de Absorção de Água das amostras.....	67
FIGURA 38 – Micrografia da seção transversal da amostra 90/10 CBC. (a) Ampliação de 56 X; (b) Ampliação de 300 X e (c) Ampliação de 1000 X.....	68
FIGURA 39 – Espectro 1 de EDS da seção transversal da amostra 90/10 CBC	69
FIGURA 40 – Espectro 2 de EDS da seção transversal da amostra 90/10 CBC	70
FIGURA 41 – Micrografia da seção transversal da amostra 50/50 CBC. (a) Ampliação de 100 X e (b) Ampliação de 500 X	71
FIGURA 42 – Micrografia da seção transversal da amostra 50/50 CBC. (a) Ampliação de 3000 X e (b) Ampliação de 10000 X	72
FIGURA 43 – Micrografia da seção transversal da amostra 50/50 CBC com aplicação de 1000 X.....	74
FIGURA 44 – Espectro 1 de EDS da seção transversal da amostra 90/10 CBC	74

FIGURA 45 – Espectro 2 de EDS da seção transversal da amostra 90/10 CBC75

FIGURA 46 – Micrografia da seção transversal da amostra 50/50 X. (a) Ampliação de 100 X; (b) Ampliação de 1000 X; (c) Ampliação de 5000 X e (d) Ampliação de 10000 X.....76

TABELAS

TABELA 1 - Composição granulométrica para produtos da indústria da cerâmica vermelha..... 16

TABELA 2 - Composição química (%) da fração inorgânica de cinza, de acordo com trabalhos da literatura.....24

TABELA 3 - Amostras de estudo com suas respectivas constituições de cada material, em porcentagem.....31

TABELA 4 - Frações percentuais da argila obtidos na análise textural.....56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 Argila	14
2.2 Lodo da Estação de Tratamento de Água	17
2.3 Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar	22
3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS	25
3.1 Materiais	25
3.1.1 Argila	25
3.1.2 Lodo da Estação de Tratamento de Água	26
3.1.3 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar	26
3.2 Método de Preparação	27
3.2.1 Secagem	27
3.2.2 Destorroamento	28
3.2.3 Peneiramento	29
3.2.4 Preparação das amostras	30
3.3 Métodos de Caracterização	35
3.3.1 Módulo de ruptura à flexão (MRF)	35
3.3.2 Retração Linear (RL)	38
3.3.3 Perda de Massa ao Fogo (PF)	38
3.3.4 Porosidade Aparente (PA)	39
3.3.5 Absorção de Água (AA)	40
3.3.6 Massa Específica Aparente (MEA)	40
3.3.7 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	40
3.3.8 Difração de raios X	42
3.3.9 Análise Termogravimétrica (TG)	43
3.3.10 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	44
3.3.11 Análise Textural	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 Matérias-primas	46
4.1.1 Difração de raios X	46

4.1.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	49
4.1.3 Análise Termogravimétrica (TG).....	53
4.1.4 Análise Textural.....	56
4.2 Compósitos Desenvolvidos.....	57
4.2.1 Difração de raios X.....	57
4.2.2 Retração Linear de Queima (RLq).....	58
4.2.3 Perda de Massa ao Fogo (PF).....	60
4.2.4 Porosidade Aparente (PA).....	61
4.2.5 Absorção de Água (AA).....	62
4.2.6 Massa Específica Aparente (MEA).....	64
4.2.7 Módulo de Ruptura à Flexão (MRF).....	65
4.2.8 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	67
5 CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS.....	80
ANEXOS.....	85

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos devido à extração de matérias-primas, aos processos industriais e à utilização dos produtos em nossa sociedade é uma realidade. A Indústria da Construção Civil, por exemplo, é responsável pela geração dos resíduos da construção e demolição (RCD), que representam cerca de 50 a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos no Brasil (BRASIL, 2005, p. 13).

Newell (2018, p. 16), no contexto de ciência dos materiais, indica que para proporcionar um desenvolvimento tecnológico positivo para a sociedade e para o meio ambiente alguns aspectos devem ser considerados no projeto de materiais. Dentre eles podem ser destacados a busca por oportunidade de reciclagem dos materiais existentes e a seleção de recursos renováveis.

No âmbito da construção civil, Keeler e Burke (2010, p. 170-173) enfatizam a necessidade de amenizar a utilização dos recursos naturais, com projetos e métodos construtivos que levem em consideração a eficiência dos recursos empregados. Os autores indicam que esta eficiência deve contemplar fatores como a durabilidade, a quantidade de resíduos gerados e o conteúdo de material reciclado presente nos produtos utilizados na edificação.

Dentro desses contextos de ciência dos materiais e construção civil apresentados, encontram-se as pesquisas com foco no desenvolvimento de materiais a partir da utilização de resíduos, com grande importância ambiental e tecnológica.

Este trabalho teve por objetivo desenvolver e caracterizar materiais cerâmicos obtidos a partir da mistura de argila com lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) e cinza do bagaço da cana-de-açúcar, em diferentes proporções, visando sua aplicação na construção civil.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Argila

A argila é um material natural, de granulometria fina, que, quando umedecido com água, geralmente obtém plasticidade. São compostas por pequenas partículas cristalinas de argilominerais, minerais não argilosos, matéria orgânica e materiais residuais (SANTOS, 1989, p. 1).

Os argilominerais são constituídos por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, exercendo grande influência nas principais propriedades das argilas, como resistência mecânica, plasticidade, compactação e retração linear, e conseqüentemente, em suas aplicações. A diferenciação entre os argilominerais ocorre pelo tipo de estrutura apresentada e por suas possibilidades de substituições iônicas (SANTOS, 1989, p. 1; TEIXEIRA, 2006, p. 7-8).

Por algumas de suas propriedades como plasticidade, resistência mecânica após a queima e técnicas relativamente simples de processamento, a argila é utilizada como principal matéria-prima de diversos produtos cerâmicos. Dentre eles, destaca-se a indústria da cerâmica vermelha, responsável pela fabricação de vários produtos empregados na construção civil, como tijolos, telhas e placas cerâmicas (VIEIRA, HOLANDA, PINATTI, 2000, n.p.; TEIXEIRA, 2006, p. 24).

Segundo a Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER)¹, a partir de dados divulgados pelo IBGE, constatou-se no ano de 2008 um faturamento total anual de R\$ 18 bilhões para o segmento da cerâmica vermelha, com uma produção mensal de 5 bilhões de peças, entre tijolos e telhas, levando a um consumo de cerca de 10 milhões de toneladas de argila por mês. Além disso, o setor gerou 293 mil empregos diretos e cerca de 900 mil empregos indiretos, representando 4,8% da Indústria da Construção Civil, o que demonstra a importância do setor para o país.

A indústria da cerâmica vermelha apresenta uma estrutura empresarial com predominância de pequenos empreendimentos familiares, como olarias, e cerâmicas de pequeno e médio porte. As indústrias geralmente são instaladas próximas às jazidas e aos mercados consumidores, devido à redução nos custos de transporte. As pequenas e médias empresas do setor exercem o papel de extratores

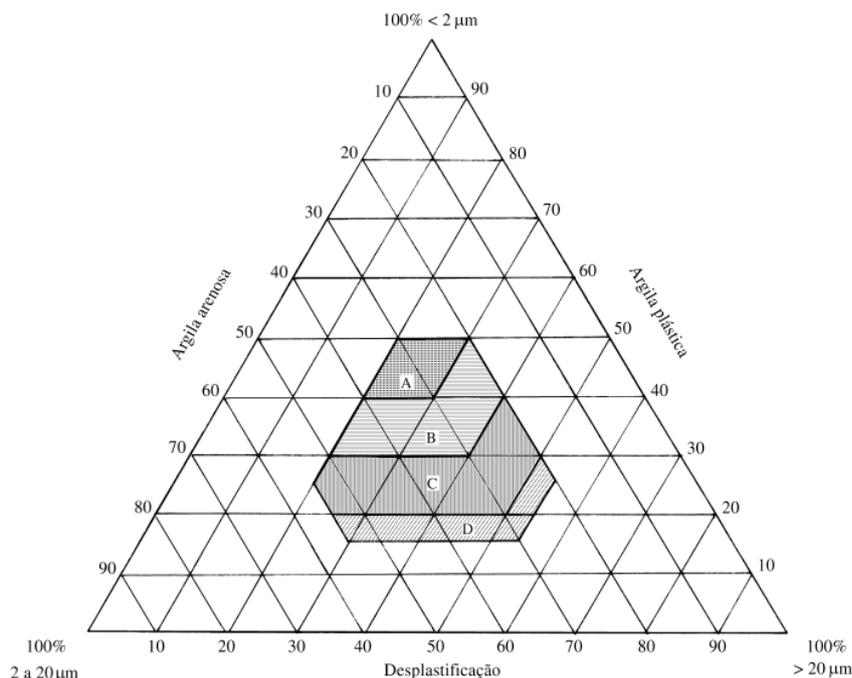
¹ Disponível em: <http://anicer.com.br/setor/>

próprios de jazidas e de extratores terceirizados para a cerâmica técnica e avançada, enquanto que as grandes empresas atuam como mineradoras ligadas aos produtores de cerâmica técnica e avançada (SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL, 2018, p. 27).

Em vista da fabricação dos produtos cerâmicos, se faz de grande importância o conhecimento das características das argilas utilizadas. As argilas são constituídas de materiais argilosos e não plásticos. Os materiais não plásticos exercem o papel de desplastificantes das massas argilosas, facilitando a conformação de argilas mais plásticas, por exemplo. Materiais como areias e óxido de ferro podem ser citados como não plásticos (PRACIDELLI, MELCHIADES, 1997, p. 31).

Argilas que apresentam granulometrias mais finas, com grãos de tamanho abaixo de 2 μm , com boa plasticidade e alta resistência a seco e após queima, são denominadas argilas plásticas ou também “argilas gordas”, necessitando, no entanto, de quantidades maiores de água para adquirir a plasticidade ideal. Enquanto que argilas com maiores índices de impurezas são denominadas “argilas magras”. Dessa forma, é importante realizar uma mistura de uma massa cerâmica com estes diferentes tipos de materiais, visto uma melhor distribuição granulométrica de acordo com a aplicação, processamento e qualidade desejados (PRACIDELLI, MELCHIADES, 1997, p. 31-33).

Para isso, o Diagrama de Winkler, apresentado na Figura 1, e a Tabela 1 podem ser utilizados como ferramentas, pois fornecem as regiões com suas respectivas faixas de granulometria ideais para determinados tipos de produtos da cerâmica vermelha.

FIGURA 1 – Diagrama granulométrico de Winkler

Fonte: PRACIDELLI, MELCHIADES, 1997, p. 32.

TABELA 1 – Composição granulométrica para produtos da indústria da cerâmica vermelha

Tipos de produto	Composição granulométrica (%)		
	< 2 μm	2 a 20 μm	> 20 μm
(A) Materiais de qualidade com dificuldade de produção	40 a 50	20 a 40	20 a 30
(B) Telhas, capas	30 a 40	20 a 50	20 a 50
(C) Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
(D) Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	25 a 55

Fonte: PRACIDELLI, MELCHIADES, 1997, p. 32.

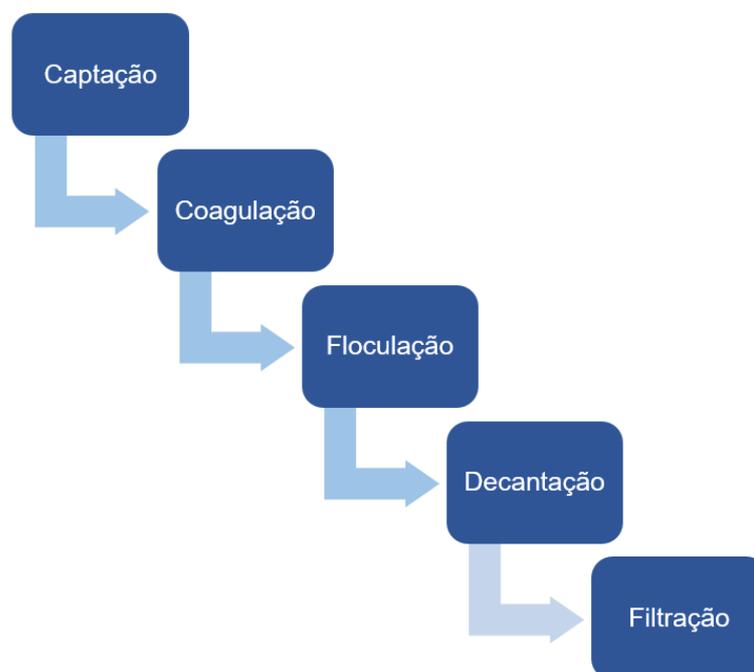
As argilas são matérias-primas naturalmente heterogêneas. Por isso, as cerâmicas vermelhas produzidas podem apresentar variações em suas composições. Dessa forma, os materiais cerâmicos têm sido objetos de pesquisas no que se refere a aplicação de resíduos, porque permitem a reciclagem e inertização destes rejeitos e a conservação dos recursos naturais argilosos (DONDI, MARSIGLI, FABBRI, 1997, p. 218).

2.2 Lodo da Estação de Tratamento de Água

O sistema de abastecimento de água é um serviço essencial para a vida urbana dos seres humanos. O tratamento das águas é um processo primordial para este sistema, pois tem como função processar as águas inadequadas para o consumo humano, para que apresentem a qualidade exigida pelos padrões de potabilidade. Dentre os subsistemas envolvidos no abastecimento de água, as Estações de Tratamento de Água (ETAs) são as principais responsáveis por este processo (REALI, 1999, p. 2; HOWE et al., 2016, p. 1).

A maioria das ETAs utiliza o sistema tradicional de tratamento, também denominado completo ou convencional. Neste sistema, a água bruta captada passa pelos processos de coagulação, floculação, decantação e filtração, conforme ilustrado pela Figura 2 (PEIXOTO, 2008, p. 15).

FIGURA 2 – Principais processos de tratamento da água em uma ETA de sistema convencional



Fonte: Elaborada pelo autor, a partir das informações de PEIXOTO, 2008.

A captação deve ser realizada de forma a garantir a quantidade suficiente e melhor qualidade possível da água, minimizando o arraste de materiais sólidos. As águas podem ser divididas em águas superficiais e subterrâneas, de

acordo com o local de sua fonte. As águas superficiais são aquelas que acumulam na superfície, como os rios, lagos e mares. Águas subterrâneas são aquelas existentes entre as camadas dos solos, que podem ser trazidas à superfície através de poços (BITTENCOURT, PAULA, 2014, p. 137-138; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, s.d., n.p.; HOWE et al., 2016, p. 9).

O processo de coagulação consiste na adição de coagulantes químicos, a fim de desestabilizar os materiais de impureza suspensos e dissolvidos na água, condicionando-os para o processo de floculação. A fim de garantir a uniformidade no processo, a coagulação demanda uma mistura rápida e uma grande energia de agitação. Entre os coagulantes usualmente utilizados, podem ser citados o sulfato de alumínio, o cloreto férrico e o policloreto de alumínio (PAC). A floculação tem por objetivo a aglomeração das partículas desestabilizadas em partículas cada vez maiores e densas, denominadas flocos. Isto ocorre por meio da diminuição da agitação da água nos floculadores (BITTENCOURT, PAULA, 2014, p. 139; HOWE et al., 2016, p. 128-129).

Na decantação, ocorre a sedimentação dos flocos formados, pela ação das forças gravitacionais. Este processo geralmente se dá em grandes estruturas abertas, denominadas decantadores ou tanques de sedimentação, em que o fluxo da água é predominantemente lento. A Figura 3 mostra um dos decantadores da ETA de Presidente Prudente (BITTENCOURT, PAULA, 2014, p. 140-141; HOWE et al., 2016, p. 173-174).

FIGURA 3 – Decantador existente na ETA de Presidente Prudente



Fonte: O autor.

A filtração consiste em um processo de remoção de partículas sólidas ainda existentes na água após a decantação. Trata-se de um procedimento importante, principalmente no tratamento de águas superficiais, que tendem a apresentar maiores quantidades de matéria orgânica, micro-organismos e sedimentos. Um dos métodos mais comuns de filtração em ETAs é a filtração granular rápida, em que se utiliza um meio poroso de materiais granulares como areia e antracito. Após a filtração, a água segue para processos de correções de pH, fluoretação e desinfecção, e continua rumo ao sistema de abastecimento da população (BITTENCOURT, PAULA, 2014, p. 141; HOWE et al., 2016, p. 213-214).

Como previamente abordado, durante o tratamento da água, flocos de impurezas são formados e se sedimentam no processo de decantação. Esses flocos dão origem ao resíduo denominado lodo de ETA. Normalmente, o lodo permanece nos decantadores por períodos entre 1 e 4 meses, variando com a forma de operação da estação. Após este período, são realizadas lavagens nos decantadores e o lodo gerado é comumente descartado no corpo receptor mais próximo, sem tratamentos. A lavagem dos decantadores pode ser observada na Figura 4, a seguir (PEIXOTO, 2008, p. 15).

FIGURA 4 – Momento de lavagem do decantador da ETA de Presidente Prudente, sendo possível visualizar o lodo gerado



Fonte: O autor.

Esta forma de disposição é alarmante, pois pode provocar a degradação da qualidade ambiental, alterando características dos corpos receptores, como destacado por Reali (1999, p. 8-15). Também deve ser salientado que, de acordo com a norma NBR 10004:2004, o lodo de ETA é caracterizado como resíduo sólido classe II A, não inerte, por isso é recomendável o seu tratamento antes de qualquer disposição no meio.

Segundo o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto, publicado pelo Ministério das Cidades, no ano de 2016 foram tratados aproximadamente 12 bilhões de metros cúbicos de água em ETAs, em todo o país. Estes dados mostram-se importantes, visto que, como descrito, a geração de lodo é inerente ao processo de tratamento de água nas estações de ciclo completo.

De acordo com Tsutiya e Hirata (2001, p. 2), estima-se a geração de cerca de 90 toneladas de lodo por dia, nos municípios atendidos pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp).

Diante deste cenário de geração e disposição do lodo de ETA, algumas alternativas têm sido estudadas visando outras destinações, aplicações e reciclagem deste resíduo. Entre as alternativas para destinação, podem ser destacadas a

disposição em aterros sanitários e em alguns tipos de solos. No entanto, a disposição em aterros não se trata de uma resolução definitiva, e a presença química de alumínio no lodo pode provocar danos aos solos (REALI, 1999, p. 27).

De forma geral, os lodos gerados apresentam porções acima de 90% de umidade, por isso, a fim de reduzir o volume e os custos de transporte do resíduo, indicam-se processos de espessamento e desidratação para redução da quantidade de água presente (REALI, 1999, p. 3-4).

Na área de materiais, vários autores têm estudado a possibilidade de utilização do lodo. Deve-se destacar que as características dos lodos gerados em ETAs variam de acordo com a qualidade da água bruta captada e dos produtos utilizados durante o seu tratamento. Também podem haver variações da água captada de um mesmo manancial, visto que as características do local de fonte podem alterar-se ao longo do ano (REALI, 1999, p. 30).

No entanto, alguns autores realizaram estudos a fim de caracterizar o lodo no escopo local. Monteiro et al. (2008) estudaram os efeitos da incorporação do lodo de ETA com argilas da região de Campos dos Goytacazes/RJ utilizadas para a confecção de cerâmicas vermelhas. Os autores verificaram semelhanças na composição mineralógica do lodo quando comparado com a argila, e constataram a possibilidade de incorporação do lodo em pequenas porcentagens. Tartari et al. (2011) caracterizaram o lodo da ETA localizada no rio Tamanduá, em Foz do Iguaçu/PR, e apuraram que o resíduo pode ser adicionado a massas argilosas, porém não como um componente preponderante.

A fim de analisar a viabilidade de utilização do lodo de São Leopoldo/RS em produtos cerâmicos para aplicação na construção civil, Santos et al. (2000) constataram similaridades na composição química do resíduo com relação a argilas utilizadas para este fim. Teixeira (2006) realizou estudos de caracterização de vários resíduos, entre eles, o lodo da Estação de Tratamento de Água de Presidente Prudente/SP. Durante o estudo, o autor destacou a semelhança da composição mineralógica do resíduo com as argilas caulínicas, utilizadas pelas cerâmicas e identificou a presença de partículas de argila, produtos químicos (provenientes dos coagulantes) e matéria orgânica na composição do lodo.

2.3 Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta nativa do sudeste da Ásia, sendo trazida ao Brasil no ano de 1532, por Martim Afonso de Sousa. Desde então, tem sido um produto extremamente relacionado a economia do país. O Programa Nacional do Álcool (Proálcool) é um exemplo de sua importância econômica. O Proálcool foi um programa estabelecido pelo presidente Geisel, no ano de 1975, que tinha como propósito a mistura obrigatória de 20% de álcool na gasolina. A expansão da agricultura na época, os altos índices de importação de petróleo e a crise nos preços deste, foram fatores importantes para o estabelecimento do programa (BRASIL, 2007, p. 10; GOLDEMBERG, NIGRO, COELHO, 2008, p. 5).

O Brasil é apontado como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma safra de 633,3 milhões de toneladas, no período de 2017/2018. Dentre as aplicações da cana, destaca-se a sua utilização como matéria-prima para a produção de açúcar e álcool. Na safra 2017/2018 da cana-de-açúcar foram produzidos aproximadamente 37,9 milhões de toneladas de açúcar e 27,8 bilhões de litros de etanol (BRASIL, 2007, p. 10; CONAB, 2018, p. 8)

Nas usinas de açúcar e destilarias de álcool, a cana-de-açúcar passa por diversos processamentos, dentre eles, a moagem. Este processo é de vital importância pois permite a extração de seu caldo, contudo, gera resíduos denominados de bagaço da cana. O bagaço é um material fibroso, que contém principalmente lignina, celulose e materiais inorgânicos. No entanto, a composição exata do bagaço difere de acordo com alguns fatores, como o solo em que a cana é cultivada e suas condições de análise (TEIXEIRA et al., 2011, p. 177, 183).

Este resíduo possui diversos usos, como a alimentação animal e produção de combustível. Porém, cerca de 90% do bagaço produzido é utilizado para a produção de energia nas próprias usinas, em um sistema de cogeração de energia (CONAB, 2011, p. 22).

A Associação da Indústria de Cogeração de Energia (COGEN) define o termo cogeração como “a produção simultânea e de forma sequenciada, de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível”².

² Disponível em: <http://www.cogen.com.br/cogeracao/conceito-e-tecnologias>

Nas usinas, o bagaço é submetido à queima nas caldeiras, e o vapor resultante de sua queima é utilizado para movimentar as turbinas para a geração de energia elétrica e utilização nos processos industriais. Em usinas mais modernas, a energia elétrica produzida na queima do bagaço ultrapassa a quantidade utilizada internamente, sendo o excedente vendido para as concessionárias de energia. O poder calorífico inferior do bagaço é de 2.130 kcal/kg. Realizando uma comparação com o poder calorífico inferior do óleo diesel (10.100 kcal/kg), é possível afirmar que o bagaço apresenta um potencial energético de grande interesse (TEIXEIRA et al., 2011, p. 183; MACEDO, 2009, p. 36; EPE, 2017, p. 226).

No entanto, a queima do bagaço nas caldeiras gera outro resíduo, denominado cinza do bagaço da cana. Considerando a queima de 95% do bagaço produzido, estima-se que para cada tonelada de cana-de-açúcar produzida, são gerados 260 kg de bagaço e 6,2 kg de cinza, de acordo com levantamento realizado pela FIESP/CIESP (2001, p. 54). Estabelecendo uma relação entre a estimativa presente na literatura e a produção de cana-de-açúcar na safra de 2017/2018, pode-se estimar uma geração de 3,73 milhões de toneladas de cinza do bagaço da cana em todo o país, na última safra.

Teixeira et al. (2011, p. 184) identificaram que a maior parte da cinza, por volta de 65% em massa, é composta por materiais inorgânicos, enquanto que os materiais orgânicos representam cerca de 35% de sua composição. A presença de matéria orgânica na cinza pode ser explicada devido à combustão incompleta dos materiais orgânicos presentes no bagaço. Os materiais inorgânicos são provenientes dos componentes do solo absorvidos pelas raízes da cana e de areias que não foram removidas durante sua lavagem. É válido ressaltar que assim como ocorre no bagaço, fatores como as características da caldeira e a temperatura de queima influenciam na composição da cinza (TEIXEIRA et al., 2011, p. 184; MACEDO, 2009, p. 39).

Como pode ser visualizado na Tabela 2, dentre os constituintes inorgânicos, a sílica (SiO_2) apresenta-se como o principal componente encontrado na cinza, estando também presentes óxidos de ferro, alumínio e magnésio, em menores porcentagens. A presença de sílica em grandes quantidades na cinza é de grande interesse, visto suas aplicações na fabricação de materiais isolantes térmicos, refratários, vidros e fibras de reforço em cerâmicas (TEIXEIRA et al., 2011, p. 184; ASKELAND, WRIGHT, 2015, p. 480).

TABELA 2 – Composição química (%) da fração inorgânica de cinza, de acordo com trabalhos da literatura

Componentes	BORLINI et al. (2004)	TEIXEIRA et al. (2008)	SCHETTINO, HOLANDA (2015)
SiO ₂	77,50	85,58	85,55
Al ₂ O ₃	4,70	5,25	2,29
Fe ₂ O ₃	3,80	1,31	1,21
K ₂ O	5,40	3,46	1,33
CaO	2,30	2,08	4,05
MgO	3,00	1,09	-
MnO	0,30	0,08	0,08
TiO ₂	0,30	0,32	0,20
P ₂ O ₅	2,30	0,54	3,01
SO ₃	-	-	2,28
ZrO ₂	0,06	-	-

Fonte: Dados encontrados em BORLINI et al. (2004), TEIXEIRA et al. (2008) e SCHETTINO, HOLANDA (2015).

Diante da presença de componentes orgânicos e inorgânicos na cinza do bagaço da cana, torna-se relevante a separação das duas frações na busca por aplicações adequadas para cada uma delas. A separação de ambas frações pode ser feita por processos de peneiramento ou hidrociclones, devido às diferenças na granulometria e na densidade dos materiais (TEIXEIRA et al., 2011, p. 178).

Pesquisas indicam a possibilidade de utilização da fração inorgânica na indústria cerâmica, para a produção de cerâmicas vítreas e como material não-plástico em massas cerâmicas de tijolos. Enquanto que a fração orgânica pode ser utilizada na fabricação de briquetes, por exemplo (TEIXEIRA et al., 2011, p. 178).

3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A seguir, é apresentada a metodologia utilizada na preparação da argila, do lodo de ETA e da cinza do bagaço da cana para a produção das amostras de estudo.

3.1 Materiais

3.1.1 Argila

A argila utilizada foi fornecida pela Olaria Indianense, do município de Indiana/SP. Ressalta-se que a argila analisada foi coletada na região de Presidente Epitácio/SP, e é utilizada pela olaria para a fabricação de produtos comerciais no ramo da construção civil, como tijolos e telhas.

O material coletado foi armazenado em recipientes plásticos, evitando o contato com o ambiente. A Figura 5 permite a visualização da argila coletada.

Posteriormente, a argila foi quebrada manualmente em partículas menores, para aumento da área de contato e melhor difusão de calor durante o posterior processo de secagem.

FIGURA 5 – Argila coletada junto à Olaria Indianense



Fonte: O autor.

3.1.2 Lodo da Estação de Tratamento de Água

O lodo oriundo do tratamento de águas foi fornecido pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), que é responsável pela Estação de Tratamento de Água de Presidente Prudente/SP.

O resíduo permanece nos decantadores da estação até a lavagem, que ocorre geralmente a cada 30 dias. Na lavagem, o lodo segue a destinação escolhida pela empresa responsável, sendo possível a coleta do resíduo neste momento. A amostra de lodo coletada foi manualmente homogeneizada para os processos posteriores. A Figura 6 permite a visualização de parte da amostra coletada.

FIGURA 6 – Amostra de lodo de ETA coletada



Fonte: O autor.

3.1.3 Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

A cinza do bagaço da cana-de-açúcar foi doada pela Usina Umoe BioEnergy, presente no município de Sandovalina/SP. Parte da amostra coletada de cinza do bagaço da cana pode ser visualizada na Figura 7.

FIGURA 7 – Amostra de cinza do bagaço da cana coletada



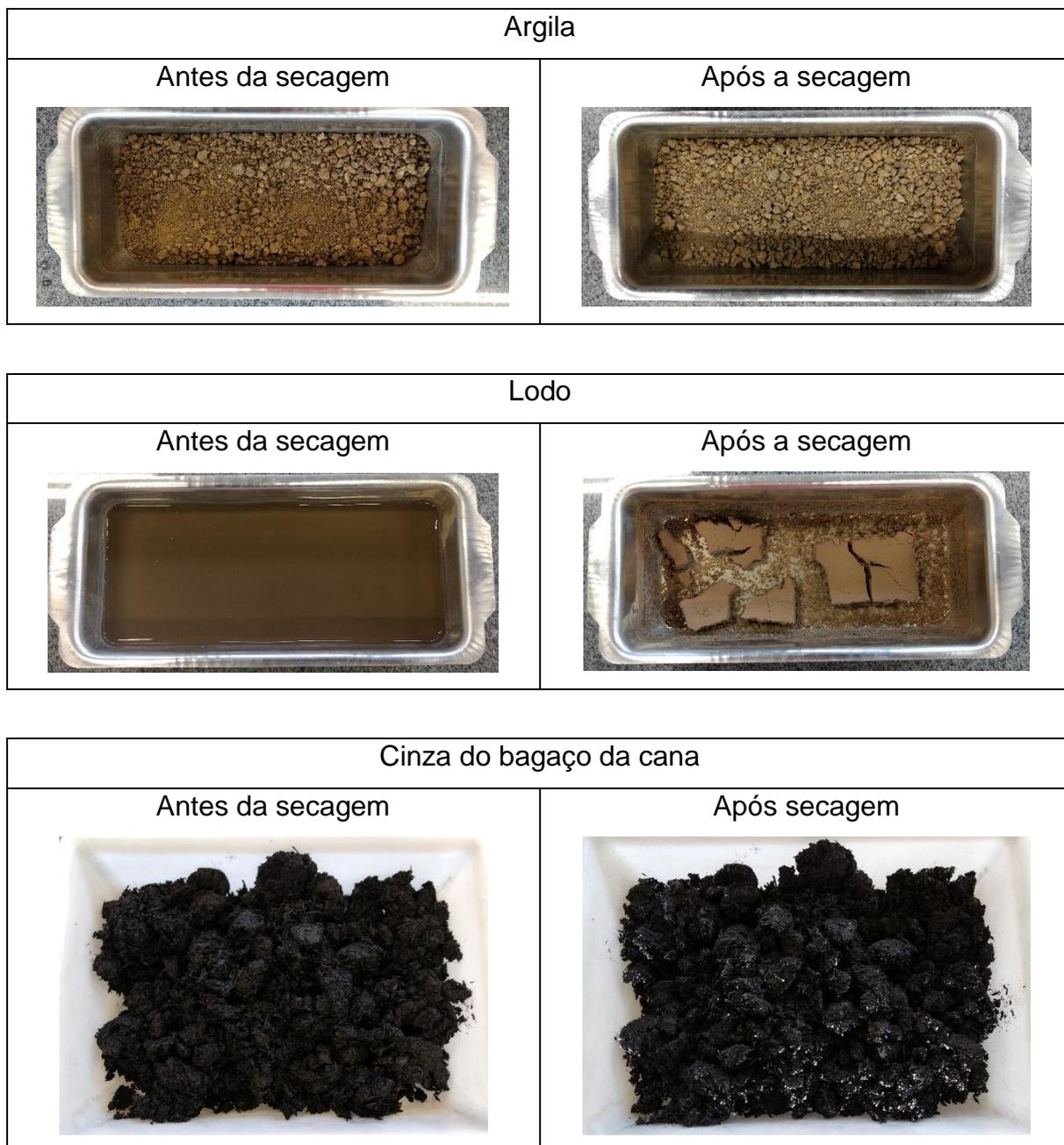
Fonte: O autor.

3.2 Método de Preparação

3.2.1 Secagem

As amostras de argila, lodo e cinza passaram por processo de secagem, em estufa de secagem e esterilização com circulação e renovação de ar SP-102, de marca SP LABOR. Para todas as amostras, a temperatura de secagem foi mantida em 105°C ($\pm 5^\circ\text{C}$), por 24 horas.

O processo de secagem tem por objetivo a eliminação e determinação do percentual de umidades das amostras. A Figura 8 mostra as fotografias de cada um dos materiais antes e após o processo de secagem.

FIGURA 8 – Fotografias de cada um dos materiais antes e após processo de secagem

Fonte: O autor.

3.2.2 Destorroamento

A argila e o lodo foram destorroados em moinho de martelos MA-880, de marca MARCONI, pertencente ao departamento de Física da FCT/Unesp de Presidente Prudente.

Este procedimento permite a diminuição e controle da granulometria das amostras, o que acarreta em melhor trabalhabilidade dos materiais durante a mistura e rendimento nas análises de caracterização. A Figura 9 apresenta uma fotografia do lodo após o destorroamento.

FIGURA 9 – Fotografia do lodo após o destorroamento



Fonte: O autor.

3.2.3 Peneiramento

A cinza do bagaço da cana passou por processo de peneiramento utilizando-se de agitador de peneiras de marca LUCADEMA, com sequência de peneiras de 60, 100, 120 e 270 *mesh*.

O intuito deste processo é separar a fração retida na peneira de 270 *mesh* (0,053 mm), pois, como verificado por Teixeira et al. (2011), as frações mais finas de cinza tendem a apresentar maiores porções de materiais inorgânicos, como a sílica, sendo objeto de estudo deste trabalho a influência desta fração nas propriedades do material final.

O conjunto de peneiras e o agitador utilizados podem ser visualizados na Figura 10, juntamente com a fotografia da cinza retida na peneira de 270 *mesh*.

FIGURA 10 – Agitador de peneiras de marca LUCADEMA (à esquerda) utilizado para o peneiramento da cinza do bagaço da cana e a fração de cinza retida na peneira de 270 mesh (à direita)



Fonte: O autor.

3.2.4 Preparação das amostras

Após os procedimentos de preparação da argila, do lodo e da cinza (matérias-primas), deu-se início à preparação das amostras.

Primeiramente, foram determinadas as proporções das amostras de estudo, definindo-se a produção de três tipos de amostras. A amostra 100/0 abrange materiais produzidos exclusivamente a partir de argila, como amostra de referência.

As amostras 90/10 X, 70/30 X e 50/50 X são materiais constituídos de argila e lodo de ETA. E por fim, as amostras 90/10 CBC, 70/30 CBC e 50/50 CBC são materiais produzidos a partir de uma matriz de argila e lodo de ETA, com a inserção de 10% em massa de cinza do bagaço da cana, sobre esta matriz.

Todas as amostras e suas respectivas proporções (em porcentagem) de cada material podem ser visualizados na Tabela 3.

TABELA 3 – Amostras de estudo com suas respectivas constituições de cada material, em porcentagem

Amostra	Argila (%)	Lodo (%)	Cinza do bagaço da cana (%)
100/0	100	-	-
90/10 X	90	10	-
70/30 X	70	30	-
50/50 X	50	50	-
90/10 CBC	90	10	10
70/30 CBC	70	30	10
50/50 CBC	50	50	10

Fonte: O autor.

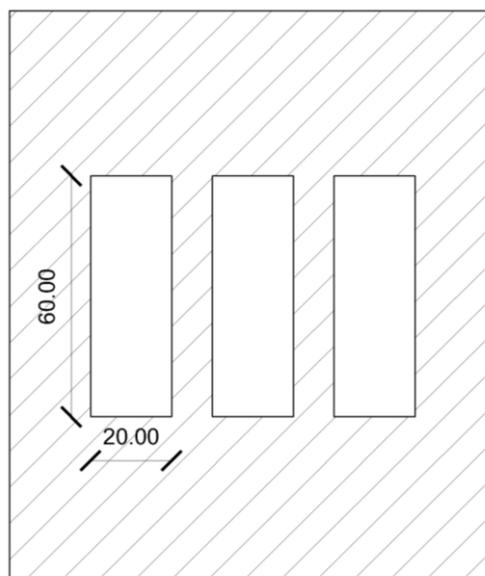
A produção dos diferentes tipos de amostras tem como objetivo permitir o estudo da influência de cada um dos materiais constituintes e a interferência de suas proporções nas propriedades dos compósitos. Cada amostra foi constituída de três corpos de prova (triplicata), a fim de garantir a validade dos resultados obtidos nas análises.

Após a mistura dos materiais nas proporções definidas, realizou-se o processo de adição de percentual em massa de água destilada em cada uma das amostras. A adição de água tem por objetivo a adequação das umidades das amostras para o processo de prensagem. O percentual de água adicionado foi de 20% sobre a massa das amostras, sendo este percentual definido a partir de testes prévios, buscando as características desejadas para a prensagem. As amostras permaneceram por 24 horas em embalagens plásticas fechadas, para que a umidade permanecesse nas misturas.

Passado este período, realizou-se a prensagem das amostras em prensa manual de marca SCHULZ, com uma matriz de três corpos de prova com dimensões de 60 mm x 20 mm x 5 mm. Os CPs foram prensados de forma uniaxial com 7 ton, com pressão de compactação de 19 MPa. Esta pressão de compactação é proporcional às áreas dos CPs, e foi determinada baseando-se em Teixeira (2006).

A prensa manual e a matriz utilizadas para a conformação e prensagem dos corpos de prova podem ser visualizadas na Figura 11.

FIGURA 11 – Prensa manual (à esquerda) e fotografia (superior direita) e representação (inferior direita) da matriz de três corpos de prova utilizadas para a conformação das amostras



Fonte: O autor.

A Figura 12 permite a visualização das amostras após a prensagem.

FIGURA 12 – Fotografias dos corpos de prova após prensagem

Fonte: O autor.

Após a prensagem, os corpos de prova foram secos em estufa de secagem e esterilização com circulação e renovação de ar SP-102, de marca SP LABOR, à temperatura de 105°C (\pm 5°C), por 24 horas, visando a eliminação da umidade presente nas amostras.

Posteriormente, os corpos de prova foram sinterizados em forno do tipo mufla, modelo EDG 3000 ($T_{\text{máx}}$ de 1200°C), com taxa de aquecimento de 10°C/min, até a temperatura de 950°C, permanecendo 30 minutos à 110°C e 120 minutos na temperatura final de 950°C. O forno tipo mufla utilizado com as amostras em seu interior pode ser observado na Figura 13.

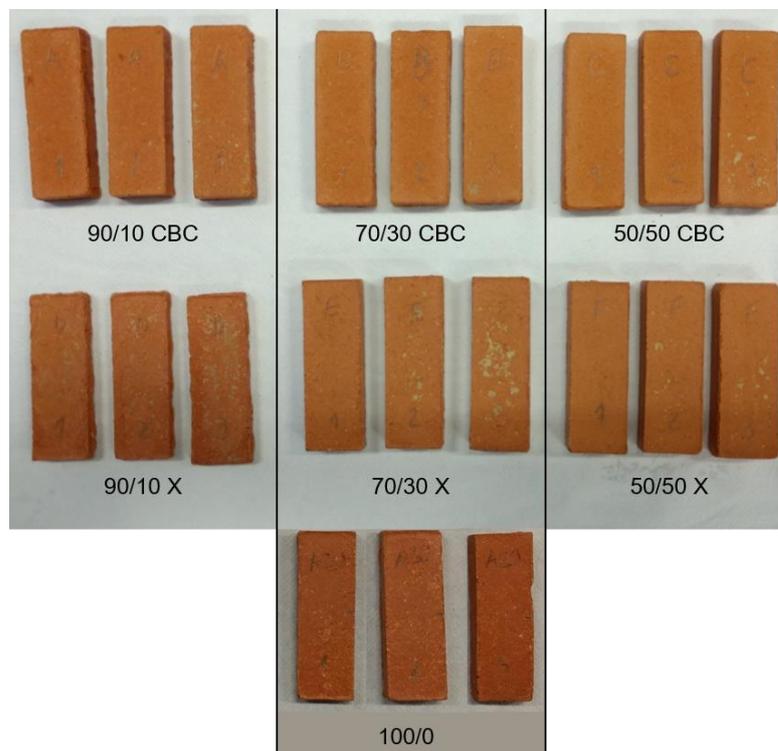
FIGURA 13 – Forno do tipo mufla com as amostras em seu interior, para o processo de sinterização



Fonte: O autor.

A temperatura de sinterização foi determinada baseando-se em Teixeira et al. (2002), que indicaram esta temperatura como adequada, visto os resultados para o material desenvolvido pelos autores. Além disso, esta é uma temperatura comum de queima para cerâmica vermelha (SANTOS, 1989, p. 177).

Os corpos de prova após o processo de sinterização podem ser visualizados na Figura 14.

FIGURA 14 – Fotografias dos corpos de prova após sinterização

Fonte: O autor.

3.3 Métodos de Caracterização

A seguir, são apresentados os métodos de caracterização das matérias-primas e dos compósitos de argila, lodo de ETA e cinza do bagaço da cana produzidos.

As técnicas de módulo de ruptura à flexão, retração linear, perda de massa ao fogo, porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente foram baseadas nos procedimentos descritos por Santos (1989) e Teixeira (2006). As demais técnicas foram desenvolvidas com base nas metodologias usuais e normas pertinentes.

3.3.1 Módulo de ruptura à flexão (MRF)

A resistência mecânica dos materiais foi analisada por meio do módulo de ruptura à flexão em três pontos, que segundo Teixeira (2006, p. 45), determina a

tensão máxima em um material não-dúctil, considerando a tensão nas fibras externas, em um carregamento de três pontos.

As amostras sinterizadas foram submetidas ao ensaio na máquina universal de ensaios, modelo EMIC 23-100, eletromecânica, microprocessada, de marca INSTRON/EMIC, com o módulo de flexão, conforme Figura 15. As dimensões dos corpos de prova foram medidas com paquímetro da marca STARRETT, e fornecidas (altura e largura) para o *software Bluehill*.

FIGURA 15 – Corpo de prova posicionado para ensaio à flexão de três pontos na máquina universal de ensaios, modelo EMIC 23-100



Fonte: O autor.

Cada corpo de prova é posicionado sobre os dois apoios do módulo da máquina, distantes 40 mm entre si. O cutelo acoplado à máquina é alinhado com o centro do CP, e aplica uma força com velocidade de descida de 1 mm/min, até a ruptura do material. A área de seção do material foi indicada para o *software*, que mede as forças aplicadas durante o ensaio, e calcula as respectivas tensões e deformações causadas às amostras.

De acordo com Callister e Rethwisch (2015, p. 414-415), a tensão de flexão (σ_{rf}) é obtida a partir da espessura do corpo de prova, do momento fletor (M) e momento de inércia (I) da seção transversal, conforme:

$$\sigma_{rf} = \frac{M.c}{I} \quad (\text{Equação 1})$$

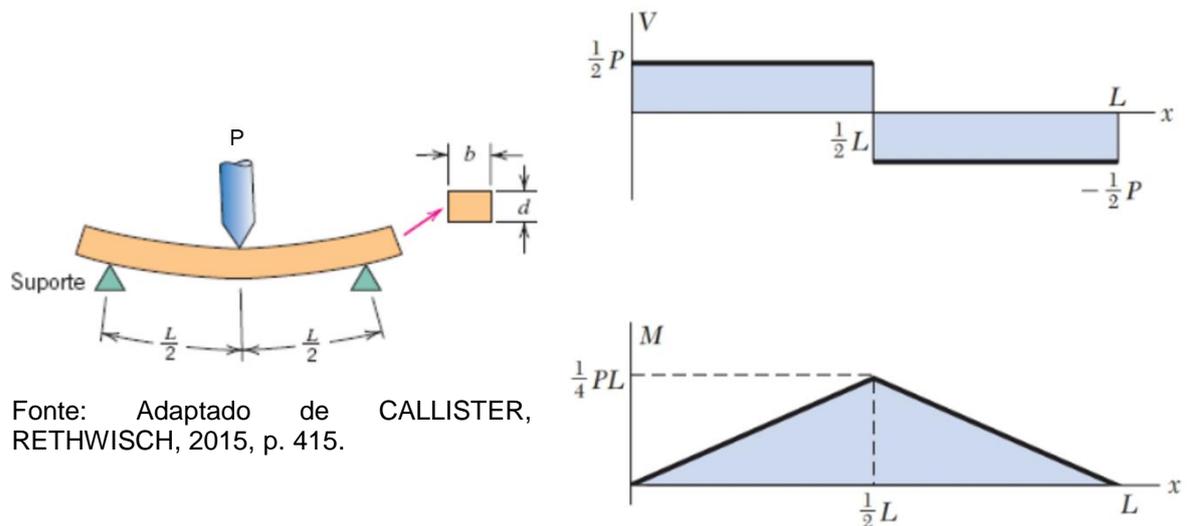
Onde: c é a distância do centro do corpo de prova até sua extremidade.

Para materiais que apresentam seções transversais retangulares, como é o caso das amostras analisadas, podem ser feitas alterações na Equação 1 apresentada, de forma a simplificá-la em função da carga de ruptura (F), distância entre apoios (L), largura (b) e espessura (d) do corpo de prova:

$$\sigma_{rf} = \frac{3.F.L}{2.b.d^2} \quad (\text{Equação 2})$$

Os esforços de força cortante e momento fletor atuantes em um ensaio de flexão de três pontos podem ser visualizados na Figura 16, a seguir.

FIGURA 16 – Disposição e informações sobre o ensaio de flexão de três pontos (à esquerda) e diagramas de força cortante e momento fletor correspondentes para o ensaio (à direita)



Fonte: Adaptado de CALLISTER, RETHWISCH, 2015, p. 415.

Fonte: Adaptado de BEER et al., 2015, p. 330.

3.3.2 Retração Linear (RL)

A retração ou dilatação linear é a variação percentual do comprimento de cada amostra, que pode ser de secagem, de queima (sinterização) ou total (soma das anteriores). É obtida por meio de medições dos comprimentos dos corpos de prova após prensagem, após secagem e após sinterização (TEIXEIRA, 2006, p. 44).

O processo de retração linear em materiais argilosos pode ser explicado pela formação da fase líquida por parte de sua massa durante o processo de queima. Essa fase ocupa os poros entre as outras partículas, aumenta a densidade e diminui as dimensões da peça, resultando em sua retração. Além disso, a retração também pode estar relacionada à eliminação de componentes do material, devido às elevadas temperaturas de queima (CALLISTER, RETHWISCH, 2015, p. 444-445).

Para a determinação das retrações, os comprimentos dos corpos de prova foram medidos com paquímetro de marca STARRETT, após a prensagem, secagem e sinterização. A retração linear de queima (RL_q) foi determinada pela expressão:

$$RL_q(\%) = \frac{C_s - C_q}{C_s} \cdot 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: C_s é o comprimento após secagem e C_q é o comprimento após sinterização/queima.

3.3.3 Perda de Massa ao Fogo (PF)

A perda de massa ao fogo é caracterizada pela diminuição percentual da massa da amostra sinterizada (m_q) em relação à massa da amostra seca (m_s) (TEIXEIRA, 2006, p. 44).

As amostras foram pesadas em balança semi-analítica BL3200H de marca SHIMADZU, após serem prensadas, após secagem em estufa e após sinterização em mufla. A partir da coleta dos dados, a perda de massa ao fogo foi calculada conforme:

$$PF(\%) = \frac{m_s - m_q}{m_s} \cdot 100 \quad (\text{Equação 4})$$

3.3.4 Porosidade Aparente (PA)

Os autores Askeland e Wright (2015, p. 488) definem porosidade aparente como “uma medida da quantidade de poros interconectados e determina a permeabilidade ou a facilidade com que os fluidos escoam através da peça cerâmica porosa”.

A porosidade aparente dos corpos de prova foi determinada conforme procedimento a seguir. Primeiramente, os corpos de prova secos foram pesados em balança semi-analítica BL3200H, de marca SHIMADZU, sendo determinadas suas massas secas (m_s).

Após a pesagem, foram colocados em bandeja plástica. Nesta bandeja, adicionou-se água fervente, de forma que os corpos de prova permanecessem imersos por 24 horas. Após este período, com um pano úmido, retirou-se o excesso de água dos CPs, levando-os novamente para pesagem em balança semi-analítica, determinando suas massas úmidas (m_u).

Para a determinação da massa imersa (m_i) dos CPs, utilizou-se do conceito do princípio de Arquimedes, a partir de um sistema de balança hidrostática, descrito por Teixeira (2006). Utilizando-se do sistema, os corpos de prova foram imersos em água, permitindo a identificação de suas massas imersas, visto que o volume deslocado do fluido se iguala ao volume aparente (V_{ap}) do corpo de prova. Assim, tem-se que:

$$V_{ap} = \frac{(m_u - m_i)}{\rho_{\text{água}}} \quad (\text{Equação 5})$$

Levando em consideração a massa específica da água ($\rho_{\text{água}}$) igual a 1 g/cm³.

Dessa forma, determinou-se a porosidade aparente das amostras, de acordo com a expressão:

$$PA(\%) = \frac{m_u - m_s}{V_{ap}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Os valores de massa específica aparente, absorção de água e porosidade aparente podem ser relacionados, permitindo o estudo da porosidade apresentada pelo material após o seu processamento. A porosidade é uma característica de grande importância para os materiais cerâmicos, visto a sua influência em suas propriedades, como a resistência mecânica.

3.3.5 Absorção de Água (AA)

A partir do procedimento descrito para a determinação da porosidade aparente, pode-se calcular a absorção de água das amostras. O índice de absorção de água indica a massa percentual de água absorvida pelo corpo de prova, em relação à sua massa seca, sendo calculada conforme a expressão:

$$AA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (\text{Equação 7})$$

3.3.6 Massa Específica Aparente (MEA)

A massa específica aparente (MEA) de um material cerâmico pode ser definida como a razão entre a massa do componente cerâmico seco e o seu volume exterior, incluindo os poros (ASKELAND, WRIGHT, 2015, p. 489).

A massa específica aparente das amostras pode ser calculada, conforme:

$$MEA = \frac{m_s}{V_{ap}} \quad (\text{Equação 8})$$

3.3.7 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

A utilização do microscópio eletrônico de varredura permite o estudo da microestrutura dos materiais desenvolvidos, sendo possível verificar a interação entre seus componentes e as alterações estruturais decorrentes das diferentes constituições das amostras (SMITH, HASHEMI, 2012, p. 118).

As amostras 90/10 CBC, 50/50 CBC e 50/50 foram submetidas à análise estrutural por meio do MEV, sendo também submetidas ao mapeamento por espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

As amostras 50/50 CBC e 50/50 foram selecionadas para o estudo por apresentarem as maiores proporções dos três materiais, e conseqüentemente permitindo a visualização de mais pontos de interação entres estes. A amostra 90/10 CBC foi analisada por apresentar o melhor comportamento mecânico dentre as amostras com os três materiais (argila, lodo e cinza), sendo possível comparar a sua morfologia às outras amostras.

A análise foi realizada junto ao Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (LabMMEV) na FCT/Unesp de Presidente Prudente, com microscópio eletrônico de varredura da marca CARL ZEISS, modelo EVO LS 15, que pode ser visualizado na Figura 17.

FIGURA 17 – Microscópio eletrônico de varredura utilizado para análise



Fonte: FCT/Unesp de Presidente Prudente.

As amostras foram submetidas à metalização com alvo de ouro em equipamento *sputter* de marca QUORUM, para a realização da análise de microscopia. A Figura 18 mostra o equipamento *sputter* utilizado.

FIGURA 18 – *Sputter* utilizado para a metalização das amostras



Fonte: O autor.

3.3.8 Difração de raios X

A análise de difração de raios X foi realizada com o objetivo de identificar as fases cristalinas dos materiais. Amostras de argila (em pó e orientada), lodo de ETA e cinza do bagaço da cana foram submetidas à difração de raios X.

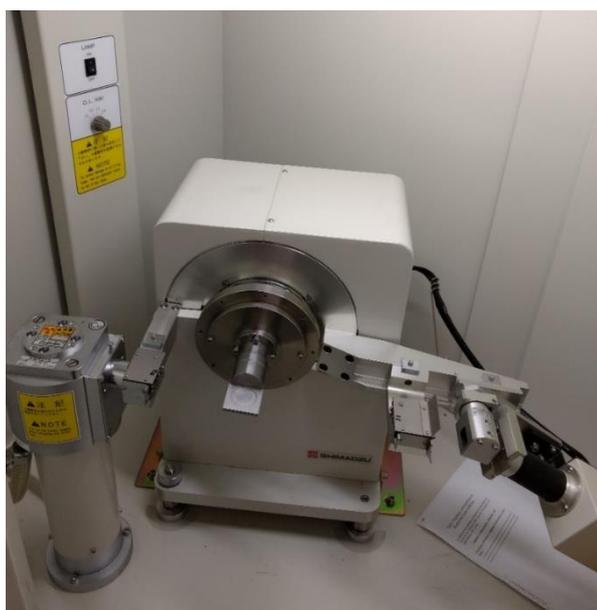
A amostra de argila orientada foi obtida após a análise textural (que será abordada no item 3.3.11), visto que, durante a análise, são separadas as frações de areia e silte, permanecendo apenas as frações argilosas.

A amostra contendo apenas as partículas de argila foi disposta sobre uma lâmina de vidro, formando uma película. Esta disposição possibilita com que as lamelas dos minerais de argila permaneçam orientadas (paralelas entre si), de forma a intensificar seus picos. Portanto, a amostra de argila orientada foi analisada com o objetivo de identificar de maneira mais proeminente os argilominerais presentes (EMBRAPA, 1997, p. 203).

Assim como na análise de microscopia eletrônica de varredura, as amostras 90/10 CBC, 50/50 CBC e 50/50 também foram estudadas, a fim de verificar as possíveis mudanças de fase em sua constituição, após o processo de sinterização, complementando as outras técnicas.

As análises foram realizadas em um equipamento da marca SHIMADZU, modelo XRD 6000, que pode ser visualizado na Figura 19. Este equipamento é pertencente ao Laboratório de Raio-X do Departamento de Física, Química e Biologia da FCT/UNESP de Presidente Prudente

FIGURA 19 – Difratômetro XRD 6000 utilizado para as análises de difração de raios X nas amostras



Fonte: O autor.

3.3.9 Análise Termogravimétrica (TG)

A análise termogravimétrica possibilita a identificação da perda de massa em função da temperatura, permitindo estudos da presença de umidade e da degradação do material.

As amostras das matérias-primas (argila, lodo de ETA, cinza do bagaço da cana) foram analisadas em equipamento SDT Q600, de marca TA Instruments, com faixa de temperatura de 25 a 1200°C, cadinho de alumina, atmosfera de ar (100 mL/min) e taxa de aquecimento de 20°C/min. O equipamento utilizado pode ser visto na Figura 20.

FIGURA 20 – Equipamento SDT Q600 utilizado para as análises térmicas (TG e DSC)



Fonte: O autor.

3.3.10 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A calorimetria exploratória diferencial é obtida a partir dos dados de diferença de fluxo de calor do material conforme o aumento da temperatura. É uma análise de relevância no estudo de cerâmicas, pois permite o acompanhamento das reações e mudanças sofridas pelo material durante a queima (SANTOS, 1989, p. 277-278).

Amostras de argila, lodo de ETA e cinza foram submetidas à análise. O equipamento e as especificações para esta técnica são os mesmos apresentados na análise termogravimétrica.

3.3.11 Análise Textural

A análise textural realizada teve por objetivo a identificação das concentrações das frações de argila, silte e areia em amostras da argila coletada. O conhecimento destas concentrações é importante, visto que a granulometria dos materiais utilizados tem influência direta na preparação e nas propriedades das

amostras, como destacado por Teixeira (2006, p. 41) e Pracidelli e Melchades (1997, p. 31).

A análise foi realizada junto ao Laboratório de Sedimentologia e Análise de Solo da FCT/Unesp de Presidente Prudente, por meio do Método da Pipeta, de acordo com o Manual de Métodos e Análises de Solo (EMBRAPA, 1997, p. 27-32).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises realizadas são apresentados a seguir. Primeiramente, são discutidos os resultados obtidos para as matérias-primas, para que sirvam de referência. Posteriormente, são abordados os resultados e propriedades dos compósitos desenvolvidos.

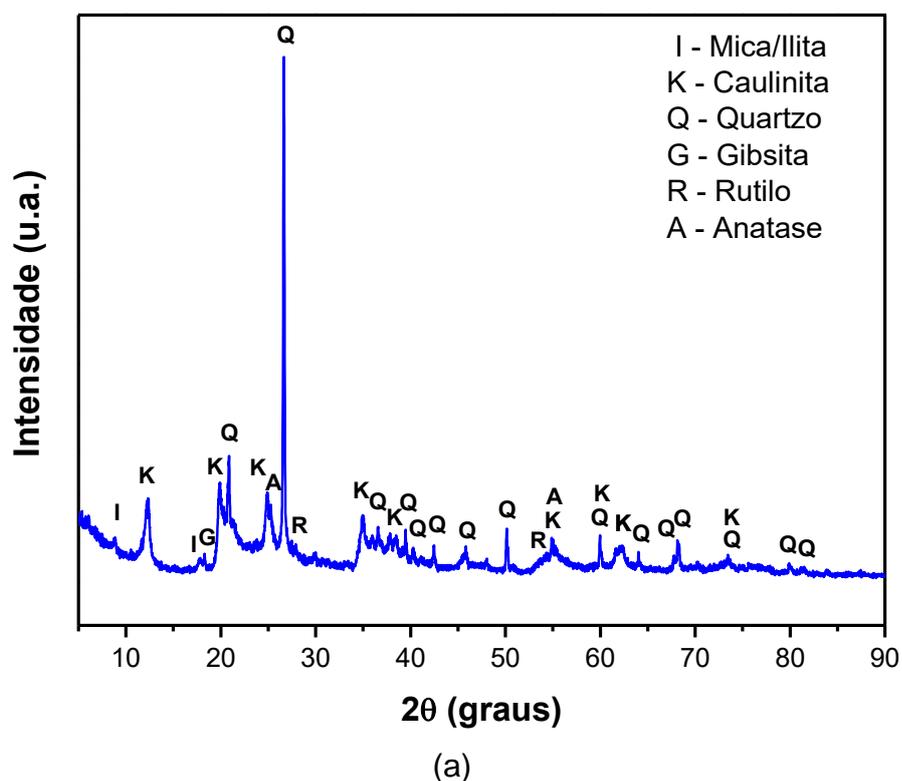
Os valores limites de resistência à flexão e absorção de água indicados por Santos (1989) e abordados nas comparações deste trabalho encontram-se indicados no Anexo A.

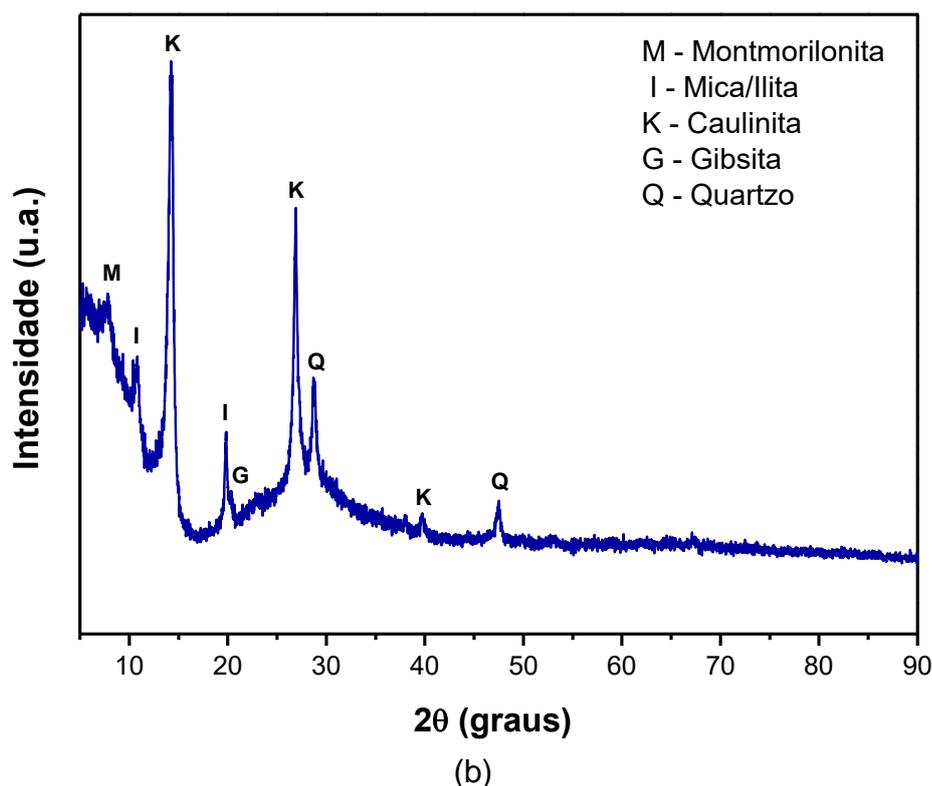
4.1 Matérias-primas

4.1.1 Difração de raios X

Os difratogramas da argila em pó (a) e orientada (b) podem ser observados na Figura 21.

FIGURA 21 – Difratogramas da argila analisada em pó (a) e orientada (b)





Fonte: O autor.

Na amostra em pó, podem ser verificados picos de difração que indicam a presença dos argilominerais mica/ilita (ficha JCPDS 9-343) e caulinita (ficha JCPDS 1-527) e também de quartzo (ficha JCPDS 46-1045), gibbsite (ficha JCPDS 7-324), rutilo (ficha JCPDS 86-146) e anatase (ficha JCPDS 71-1167).

Esta constituição é semelhante à de argilas analisadas por Teixeira, Souza e Moura (2001) e Teixeira (2006), ambos os trabalhos com amostras da região de Indiana/SP e Souza (2008), que também analisou amostras de argila da região de Presidente Epitácio/SP.

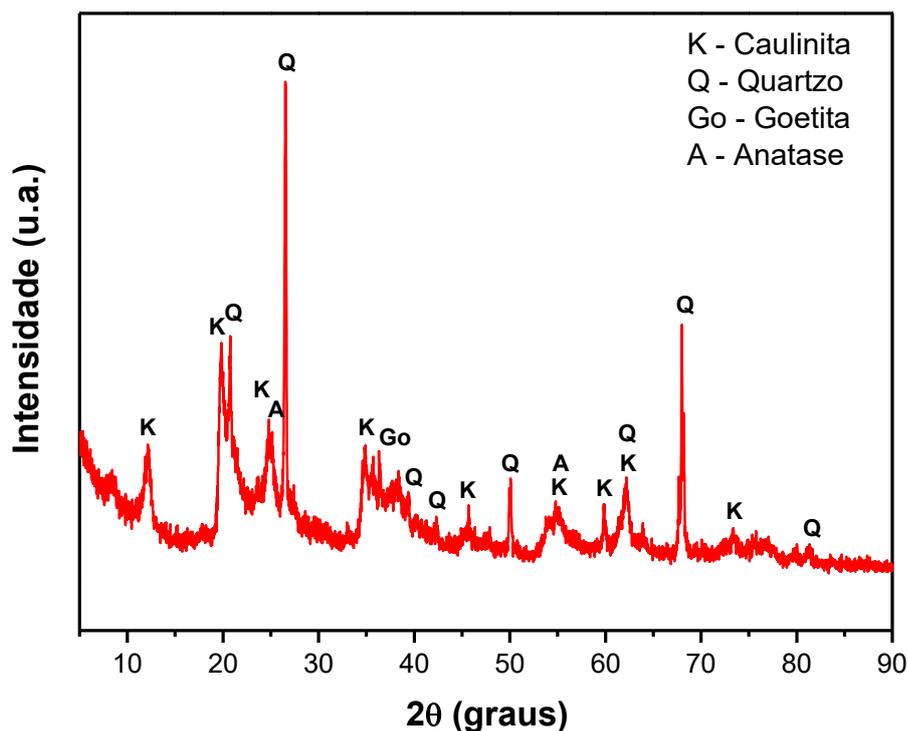
No entanto, esses argilominerais não se restringem as argilas no âmbito regional. Monteiro et al. (2008), por exemplo, analisaram amostras de argila da região de Campo dos Goytacazes/RJ com composições similares.

O difratograma da amostra orientada apresenta picos dos argilominerais caulinita e mica/ilita mais proeminentes do que os verificados na amostra em pó, ao mesmo tempo em que diversos picos de quartzo não foram mais verificados. Este comportamento também foi verificado por Souza et al. (2011, p. 2776), e indica que o quartzo existente na argila estava concentrado principalmente nas frações siltsas e arenosas.

Além disso, a análise da amostra orientada possibilitou a identificação da montmorilonita (ficha JCPDS 12-232), que não havia sido verificada no difratograma anterior.

A Figura 22 apresenta o difratograma do lodo de ETA analisado.

FIGURA 22 – Difratograma do lodo de ETA

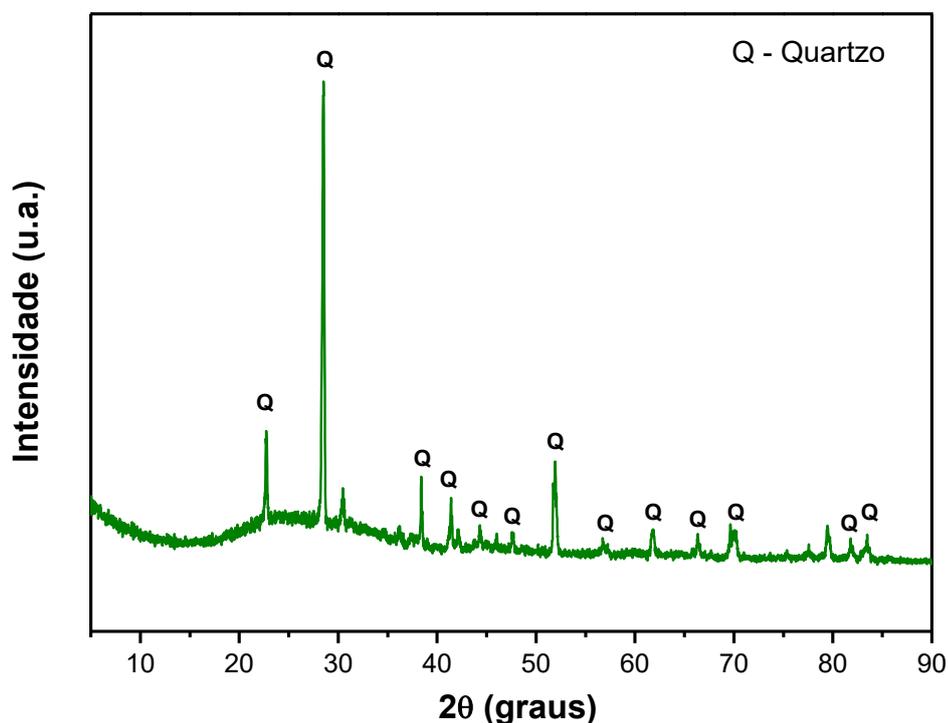


Fonte: O autor.

Verifica-se a presença de picos de caulinita (ficha JCPDS 1-527), quartzo (ficha JCPDS 46-1045), anatase (ficha JCPDS 71-1167) e possíveis picos de goetita (ficha JCPDS 3-251).

A composição da amostra de lodo de ETA de Presidente Prudente apresenta semelhanças com os picos identificados para a amostra da argila analisada, principalmente pela presença em ambos de caulinita e quartzo. Este comportamento reforça a possibilidade de aplicação do resíduo junto a massas cerâmicas, como divulgado por outros trabalhos da literatura.

O difratograma da cinza do bagaço da cana pode ser visualizado na Figura 23.

FIGURA 23 – Difratoograma da cinza do bagaço da cana

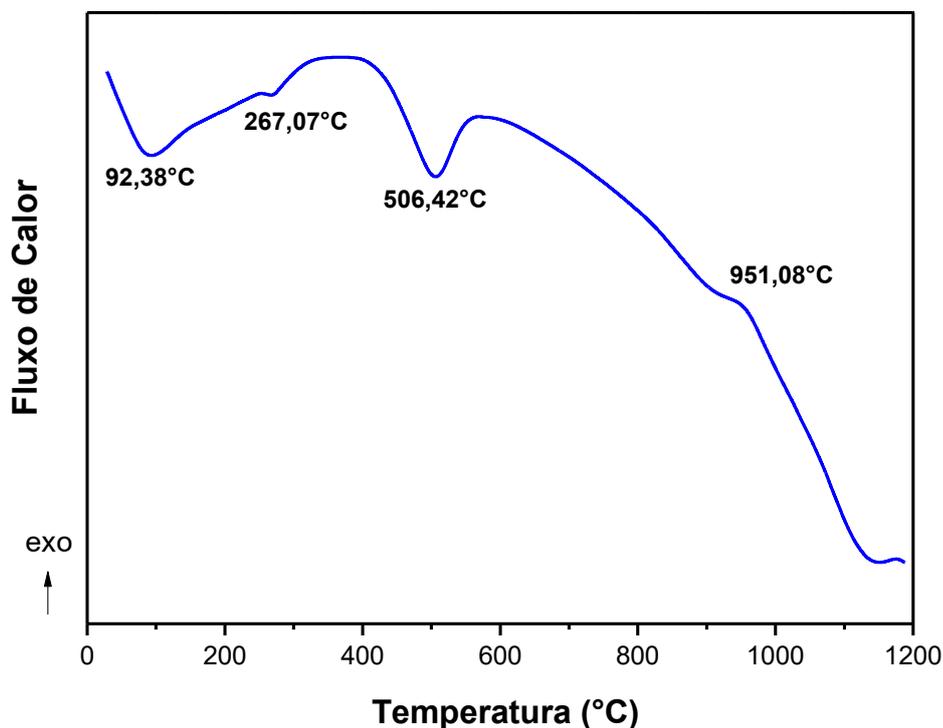
Fonte: O autor.

A partir do difratograma da cinza do bagaço da cana-de-açúcar, verifica-se que a cinza analisada apresenta o quartzo (ficha JCPDS 86-1629) como principal fase cristalina, sendo também observada uma banda próxima de 30° indicando a presença de uma fase amorfa.

A existência de quartzo nesta fração de CBC reforça a presença de materiais inorgânicos nas frações mais finas do resíduo, conforme indicado por Teixeira et al. (2011, p. 188) e vai de acordo com as composições químicas presentes na literatura (Tabela 2) que apontam para a grande concentração de sílica na cinza.

4.1.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A Figura 24 apresenta a curva de DSC da amostra de argila analisada.

FIGURA 24 – Curva de DSC da argila

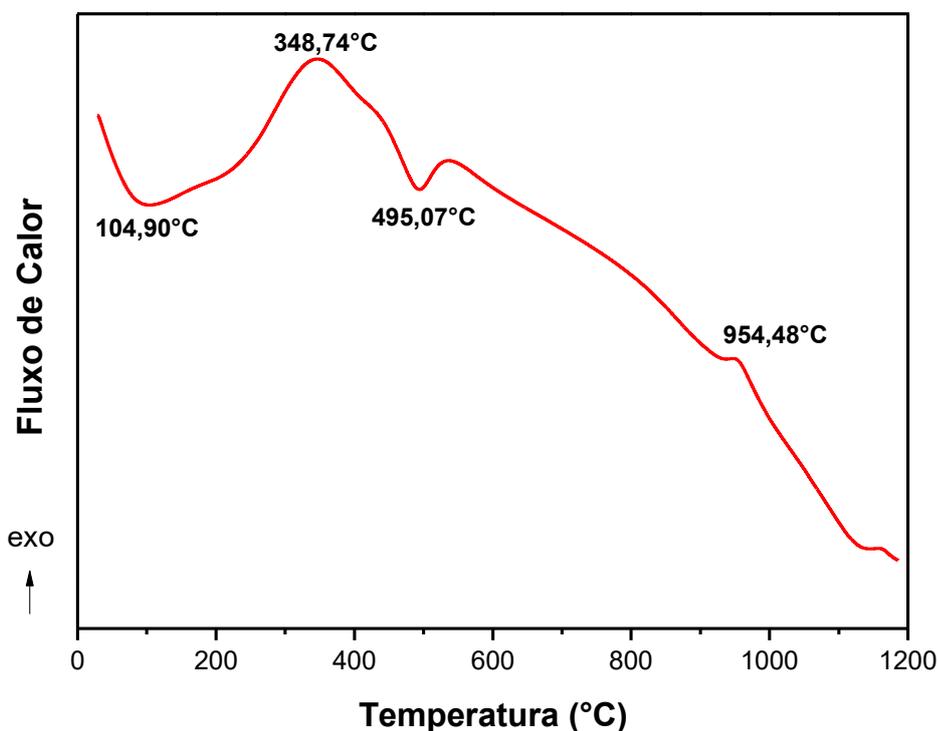
Fonte: O autor.

A partir da curva de DSC da argila, podem ser observados quatro eventos, com temperaturas de pico em 92,38°C, 267,07°C, 506,42°C e 951,08°C, respectivamente. No primeiro evento, verifica-se um comportamento endotérmico relacionado à perda de água livre do material (TEIXEIRA et al., 2011, p. 563).

O segundo evento também é caracterizado por um pico endotérmico. Este comportamento está relacionado à perda das hidroxilas dos hidróxidos de alumínio presentes na argila, conforme verificado no difratograma da Figura 21 (SOUZA et al., 2011, p. 2776).

O terceiro pico endotérmico relaciona-se à perda das hidroxilas da caulinita, argilomineral presente no material, conforme comprovado pelo DRX (Figura 21), resultando na formação da metacaulinita. Por fim, um comportamento exotérmico é verificado no quarto evento, o que indica a cristalização da metacaulinita previamente formada, resultando na formação da mulita (SOUZA et al., 2011, p. 2776).

A Figura 25 apresenta a curva de DSC do lodo de ETA.

FIGURA 25 – Curva de DSC do lodo de ETA

Fonte: O autor.

Conforme pode ser visto na curva de DSC apresentada, verifica-se na amostra de lodo de ETA um primeiro evento endotérmico com temperatura de pico em 104,90°C, relacionado à eliminação de sua água higroscópica (KIZINIEVIC et al., 2013, p. 466).

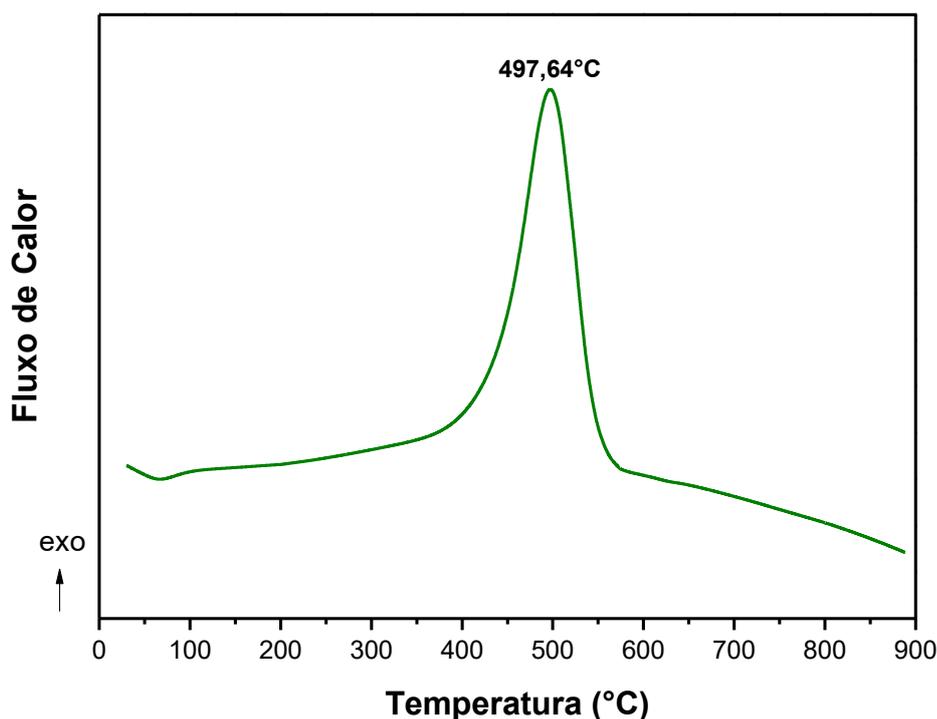
No entanto, uma banda exotérmica mais acentuada pode ser observada na temperatura de 348,74°C. Como verificado por outros autores (MONTEIRO et al., 2008, p. 1282; KIZINIEVIC et al., 2013, p. 466-467; LING et al., 2017, p. 304), na faixa de temperatura entre 200 e 450°C ocorrem as reações de combustão da matéria orgânica, fato que caracteriza este comportamento exotérmico presente na amostra estudada. Este comportamento mais acentuado do lodo em comparação com a argila também foi observado por Teixeira et al. (2011, p. 563), e possivelmente indica uma maior presença de matéria orgânica no resíduo.

Devido à presença de caulinita no lodo, comprovada pela análise de DRX (Figura 22), sua curva de DSC apresentou comportamento endotérmico na transição da caulinita para metacaulinita em 495,07°C e comportamento exotérmico

em 954,48°C na formação da mulita, eventos também observados na amostra de argila (MONTEIRO et al., 2008, p. 1282; LING, et al., 2017, p. 305).

A curva de DSC para a cinza do bagaço da cana pode ser visualizada na Figura 26.

FIGURA 26 – Curva de DSC da cinza do bagaço da cana



Fonte: O autor.

A curva de DSC da cinza do bagaço da cana apresentou apenas um evento exotérmico muito acentuado, com temperatura de pico em 497,64°C. Este comportamento está possivelmente relacionado com a combustão de matéria orgânica e do carvão residuais presentes na cinza. Amostras de cinza analisadas por Teixeira, Pena e Miguel (2010) e Faria, Gurgel e Holanda (2012) apresentaram pico exotérmico em temperatura semelhante.

Apesar do processo de queima do bagaço ser realizado nas usinas, resíduos de materiais orgânicos podem estar contidos nas cinzas, principalmente devido ao grande volume de bagaço queimado (TEIXEIRA, PENA, MIGUEL, 2010, p. 806).

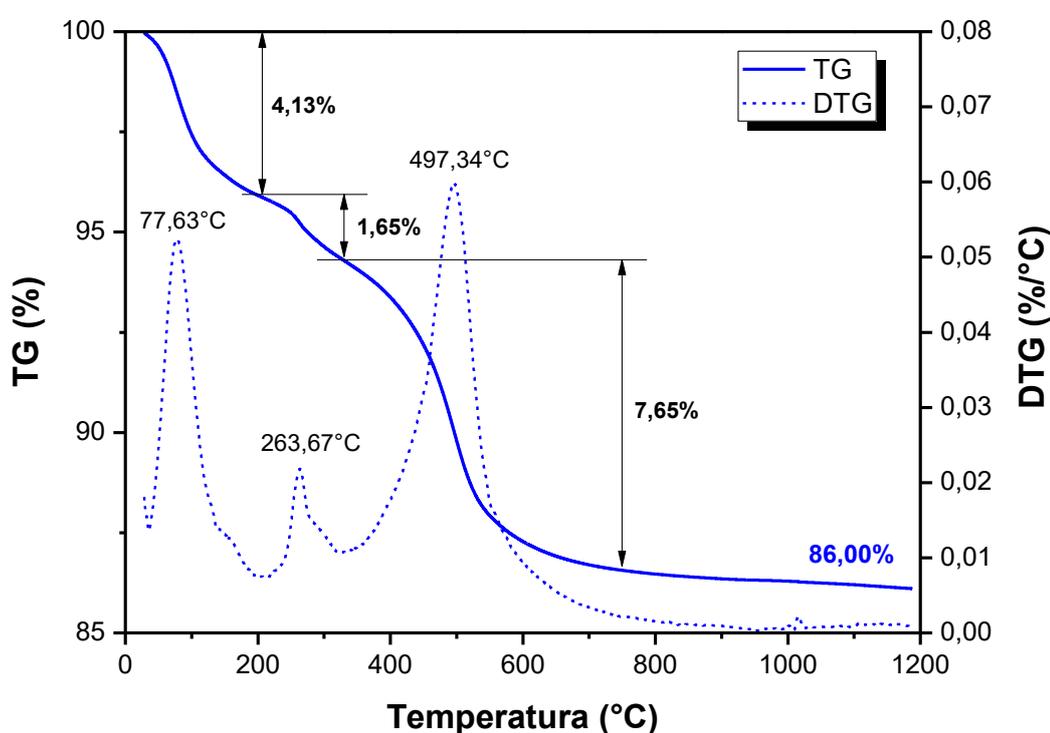
A presença deste pico exotérmico acentuado resultou em uma possível sobreposição ao pico de transição quartzo $\alpha - \beta$, normalmente presente em 573°C

(GENG, SUN, 2018, p. 153), resultando em sua não observância na amostra analisada.

4.1.3 Análise Termogravimétrica (TG)

Na Figura 27 podem ser visualizadas as curvas de TG e DTG da argila.

FIGURA 27 – Curvas de TG e DTG da argila



Fonte: O autor.

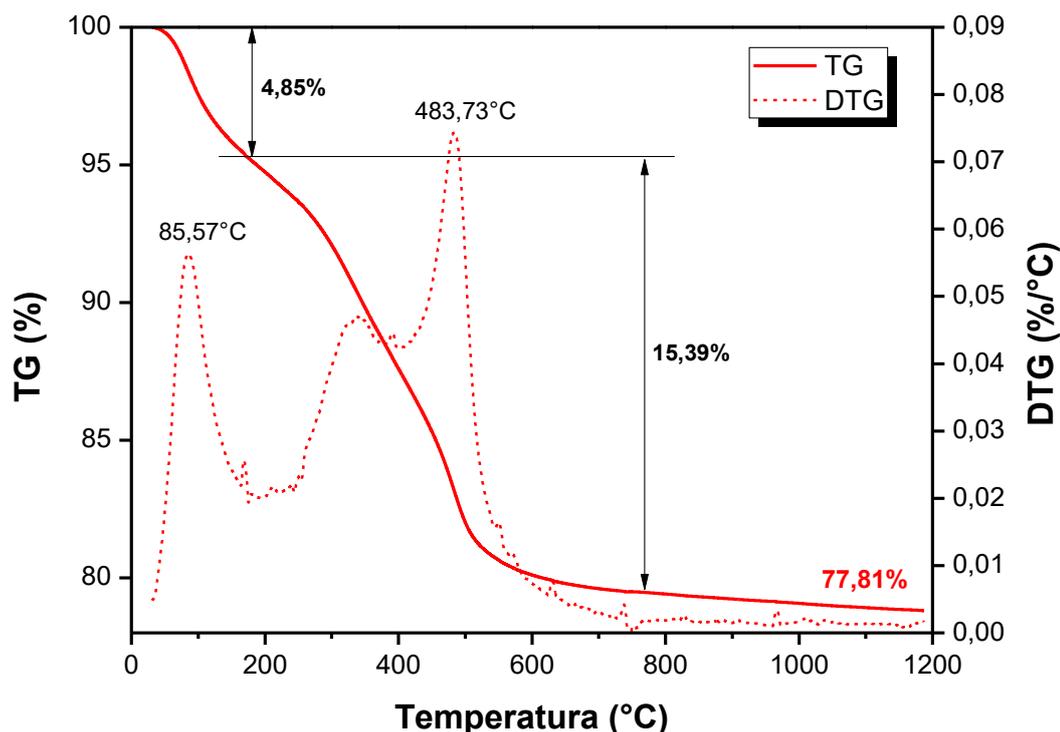
Como pode ser verificado na Figura 27, a argila apresentou uma perda de massa de 4,13%, com seu maior estágio de perda em 77,63°C. Esta perda está provavelmente ligada à eliminação da água do material, como verificado no DSC. A segunda perda de massa, em torno dos 200°C e 300°C, relaciona-se à eliminação das hidroxilas dos hidróxidos de alumínio, conforme verificado através do pico endotérmico na curva de DSC (Figura 24) (SOUZA et al., 2011, p. 2776).

Outra perda de massa é encontrada entre as temperaturas de 400°C e 700°C, com grande perda em 497,34°C, relacionada à eliminação das hidroxilas da

caulinita, comportamento corroborado pelos eventos observados na análise de DSC. A massa residual para amostra de argila foi de 86,00%.

As curvas de TG e DTG da amostra de lodo de ETA podem ser visualizadas na Figura 28.

FIGURA 28 – Curvas de TG e DTG do lodo de ETA

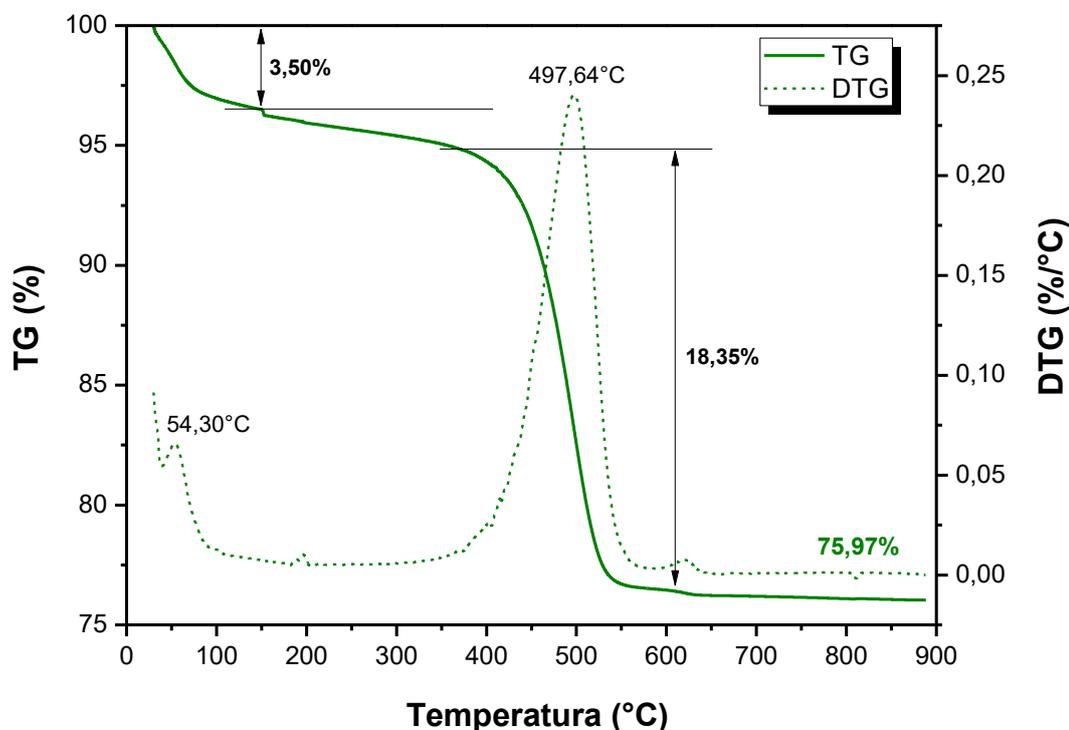


Fonte: O autor.

Assim como na argila, a amostra de lodo apresenta uma perda de massa (4,85%) relacionada à sua perda de água. Porém, diferentemente da argila, observa-se no lodo apenas mais um patamar de uma grande perda de massa, de 15,39%.

Este grande patamar é resultado de uma provável sobreposição das perdas relacionadas à eliminação da matéria orgânica e a transição da caulinita para metacaulinita no material. Essa sobreposição pode ser justificada pela proximidade de temperaturas das reações e a maior intensidade de combustão dos materiais orgânicos no lodo, que resulta em uma massa residual de 77,81%, menor do que a apresentada pela argila.

A Figura 29 apresenta as curvas de TG e DTG da cinza do bagaço da cana.

FIGURA 29 – Curvas de TG e DTG da cinza do bagaço da cana

Fonte: O autor.

Analisando a Figura 29, pode-se verificar que a amostra de cinza sofreu uma perda de massa de 3,50%, possivelmente relacionada à perda de sua umidade, com temperatura de pico em 54,30°C.

Uma grande perda de massa de 18,35% é observada entre as temperaturas de 400°C e 600°C. Esta perda apresenta como temperatura de pico exatamente a mesma temperatura notada para o acentuado comportamento exotérmico na curva de DSC (Figura 26), indicando que a eliminação da matéria orgânica e dos carvões residuais provocou esta intensa perda.

Dessa forma, por meio das análises térmicas pode-se verificar que a cinza analisada, apesar de peneirada, ainda apresenta material orgânico em sua composição.

Teixeira et al. (2011) indicam que o percentual resultante da análise termogravimétrica se refere ao material inorgânico da amostra analisada. Portanto, a amostra de cinza analisada apresenta aproximadamente 76% de material inorgânico.

4.1.4 Análise Textural

Os resultados da análise textural realizada na argila podem ser visualizados na Tabela 4.

TABELA 4 – Frações percentuais da argila obtidos na análise textural

	Frações (%)		
	Argila (< 2 µm)	Silte (2 a 20 µm)	Areia (> 20 µm)
Média das amostras	68,20	25,51	6,29

Fonte: O autor.

Pode-se verificar que a argila analisada apresenta altos valores de frações argilosas (68,20%), resultando em um material de granulometria predominantemente fina. As frações de silte representam 25,51% das amostras e as de areia apenas 6,29%.

De acordo com Pracidelli e Melchiades (1997, p. 31) materiais de granulometria muito fina possuem boa plasticidade, elevadas resistências mecânicas a seco e após a queima. No entanto, devido ao tamanho reduzido de suas partículas, a eliminação da água durante a secagem ocorre com maior dificuldade, o que pode provocar acentuadas retrações e deformações.

Os autores indicam que a utilização de materiais desplastificantes diminuem a interação das argilas com a água, facilitam a trabalhabilidade e reduzem as retrações de secagem e queima das massas cerâmicas. Além disso, destacam a importância da adição deste tipo de material em quantidades moderadas, a fim de não influenciar negativamente a resistência mecânica dos produtos (PRACIDELLI, MELCHIADES, 1997, p. 31-32).

Neste contexto, Souza et al. (2011, p. 2775) destacam que apenas a adição de materiais não plásticos não é suficiente para a qualidade ideal das cerâmicas. A temperatura de queima, o percentual de umidade e a pressão de compactação também influenciam nas propriedades e no processamento dos materiais cerâmicos.

Comparando os dados obtidos na análise textural, com os valores indicados por Pracidelli e Melchades para os produtos da cerâmica vermelha (Tabela 1), verifica-se que a argila analisada apresenta mais frações finas do que o indicado para qualquer produto. Isso indica que a adição de materiais desplastificantes pode resultar em melhores trabalhabilidade e propriedades do material final.

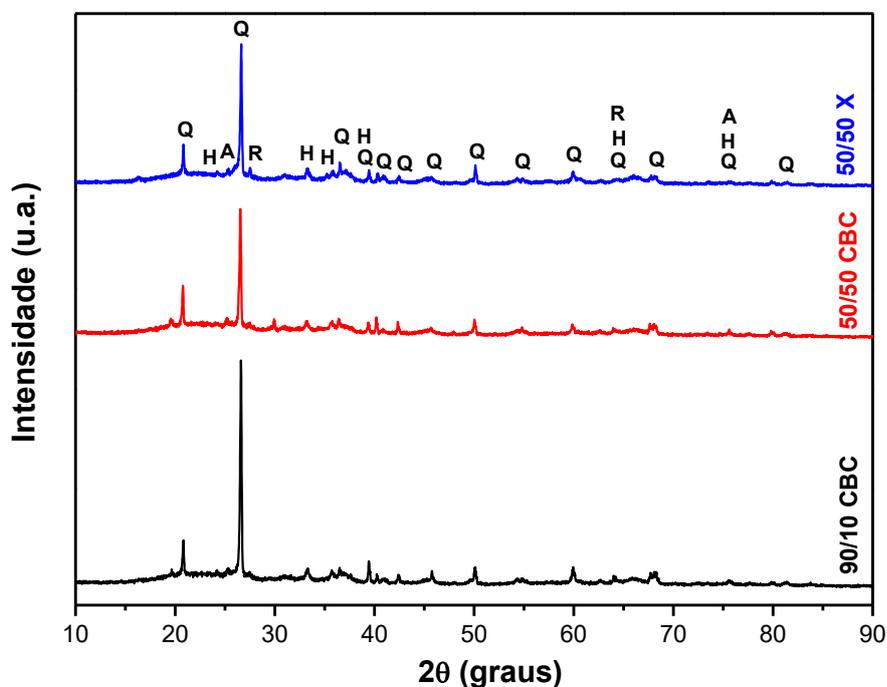
Como não foi possível realizar esta análise no lodo de ETA e na cinza do bagaço da cana, as propriedades apresentadas pelos compósitos podem indicar a atuação ou a não atuação destes como desplastificantes da massa cerâmica.

4.2 Compósitos Desenvolvidos

4.2.1 Difração de raios X

Os difratogramas das amostras 90/10 CBC, 50/50 CBC e 50/50 X podem ser visualizados na Figura 30.

FIGURA 30 – Difratogramas das amostras 90/10 CBC, 50/50 CBC e 50/50 X após queima



Fonte: O autor.

Analisando os difratogramas, pode-se observar a presença de quartzo (ficha JCPDS 46-1045), rutilo (ficha JCPDS 34-180) e anatase (ficha JCPDS 1-562),

previamente observados nas matérias-primas, e também de hematita (ficha JCPDS 13-534).

Segundo Souza et al. (2011), e conforme analisado por Schwertmann e Taylor (1989), a hematita pode ter origem devido à liberação de ferro provocada pela quebra das estruturas de argilominerais, como a illita, ou também formada a partir de hidróxidos de ferro, como a goetita.

Os difratogramas não indicam a presença dos argilominerais caulinita e mica/illita, que haviam sido identificados na argila e no lodo de ETA. Conforme verificado nas análises térmicas (Figuras 24, 25, 27 e 28), suas estruturas foram quebradas em temperaturas anteriores, e por isso, não se encontram mais presentes.

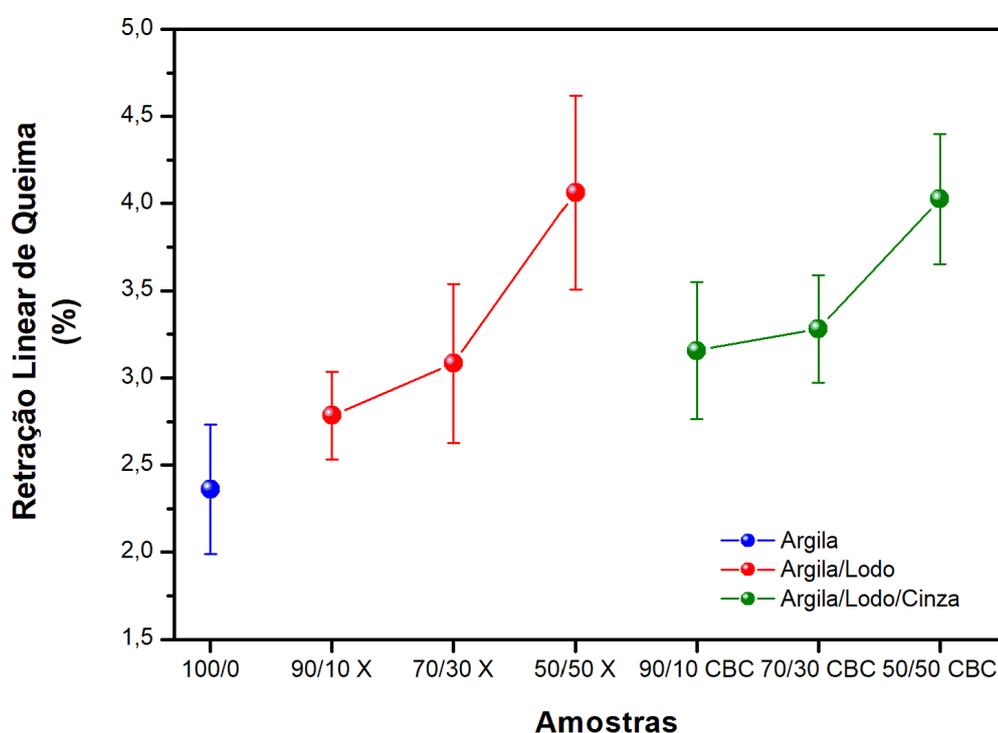
Ainda de acordo com a Figura 30, as diferentes composições analisadas para as amostras 90/10 CBC, 50/50 CBC e 50/50 X não apresentaram grandes mudanças entre si, no que se refere às suas fases cristalinas identificadas.

Um pico próximo dos 20° foi observado para as amostras 50/50 CBC e 90/10 CBC, e um pico em 30° foi observado para a amostra 50/50 CBC. No entanto, estes picos não foram identificados. Propõe-se estudos complementares futuros para a identificação das fases cristalinas relacionadas a estes picos.

4.2.2 Retração Linear de Queima (RLq)

Os resultados para retração linear de queima das amostras encontram-se na Figura 31, a seguir.

FIGURA 31 – Retração Linear de Queima das amostras



Fonte: O autor.

Verifica-se que as amostras com lodo apresentaram maiores valores de retração linear de queima, quando comparadas com a amostra de argila. Observa-se que este aumento está relacionado com o percentual de lodo nas amostras, visto que quanto maior o percentual do resíduo, maior a retração apresentada.

A retração linear de queima nas amostras pode ser justificada pelas reações relacionadas aos argilominerais presentes na argila e no lodo e também pela combustão dos materiais orgânicos. Portanto, o aumento da retração nas amostras com maiores concentrações de lodo está possivelmente relacionado à presença de matéria orgânica no resíduo (KIZINIEVIC et al., 2013, p. 468).

Comparando os valores obtidos para as amostras sem cinza e com cinza, verifica-se que a incorporação da cinza não provocou alterações significativas na retração dos materiais. Isto indica que a incorporação de cinza sobre a matriz argila/lodo não resultou na atuação da cinza como desplastificante na queima das amostras.

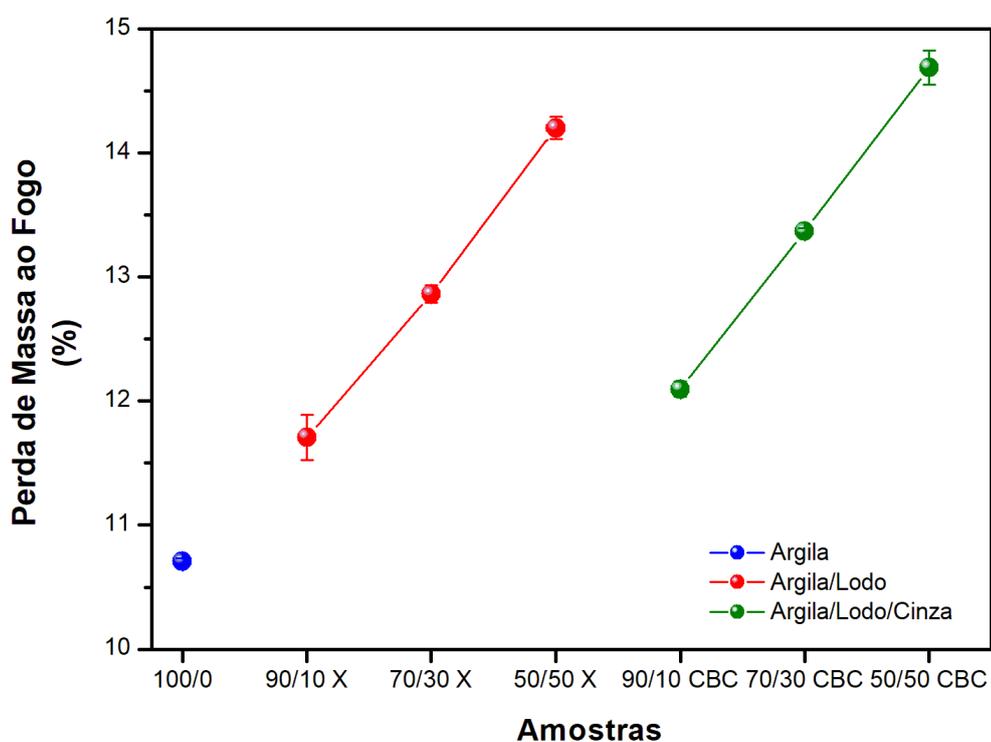
Este comportamento se justifica pela quantidade de cinza incorporada (10% em massa sobre a matriz), e também ao peneiramento realizado, que resultou

na utilização de frações mais finas da cinza nas amostras. A incorporação em maiores quantidades e de outras frações granulométricas da cinza podem alterar este comportamento, porém com prováveis influências negativas na resistência mecânica.

4.2.3 Perda de Massa ao Fogo (PF)

Na Figura 32 podem ser visualizadas as perdas de massa ao fogo das amostras.

FIGURA 32 – Resultados das Perdas de Massa ao Fogo das amostras



Fonte: O autor.

A partir da Figura 32, observa-se que a amostra 100/0 apresentou o menor valor de perda de massa ao fogo, com uma perda de aproximadamente 10,71%.

As amostras com lodo de ETA apresentaram um aumento na perda de massa. Assim como observado na retração linear, este aumento deve-se possivelmente à eliminação da matéria orgânica presente no lodo, durante a queima

dos corpos de prova. García et al. (2012, p. 346) também verificaram este comportamento, principalmente nas amostras com proporções de lodo acima de 10%.

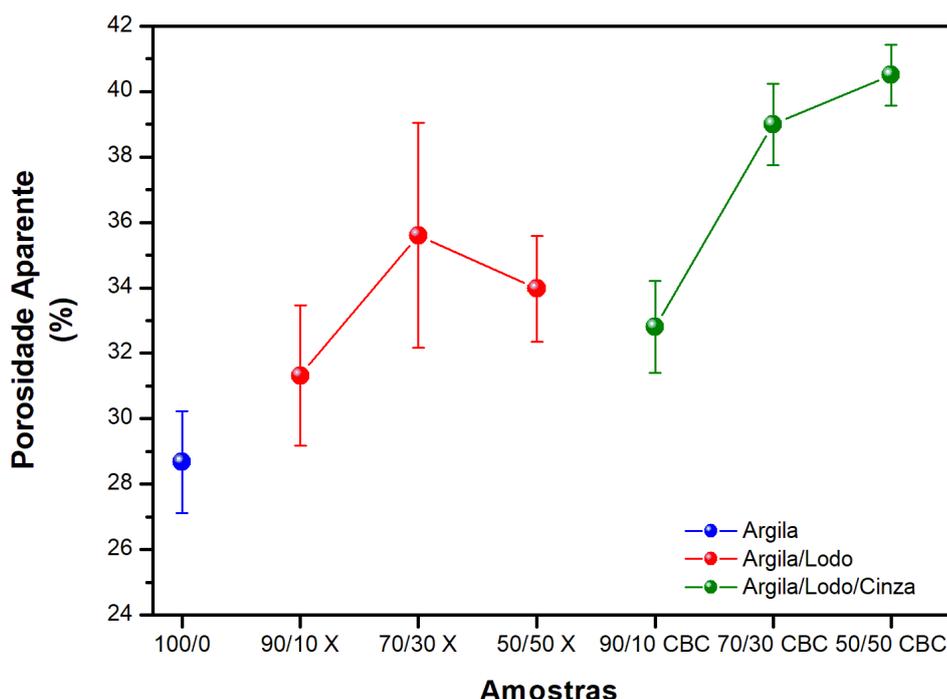
As amostras com cinza do bagaço da cana apresentaram uma média de aumento na perda de massa de 3,56%, possivelmente relacionado à matéria orgânica presente em sua constituição, conforme verificado pelas análises térmicas (Figuras 26 e 29).

Portanto, a partir destes resultados juntamente com as análises térmicas previamente realizadas, pode-se verificar que as perdas de massa ao fogo das amostras estão relacionadas à umidade presente nos materiais, às reações características dos argilominerais presentes na argila e no lodo e à eliminação dos componentes orgânicos, que mostraram acentuar as perdas principalmente com o aumento da incorporação dos resíduos.

4.2.4 Porosidade Aparente (PA)

Na Figura 33 estão indicados os valores de porosidade aparente das amostras.

FIGURA 33 – Resultados de Porosidade Aparente dos materiais



Fonte: O autor.

A partir dos resultados, observa-se que, de maneira geral, a inserção dos resíduos resultou no aumento da porosidade aparente dos materiais. Este aumento na porosidade pode estar relacionado com a decomposição da matéria orgânica presentes no lodo e na cinza, também verificada na perda de massa ao fogo das amostras.

Comportamento semelhantes foram observados por Teixeira et al. (2011, p. 564) em amostras de argila com lodo de ETA, e por Kazmi et al. (2016, p. 36) em materiais desenvolvidos com argila e cinza do bagaço da cana.

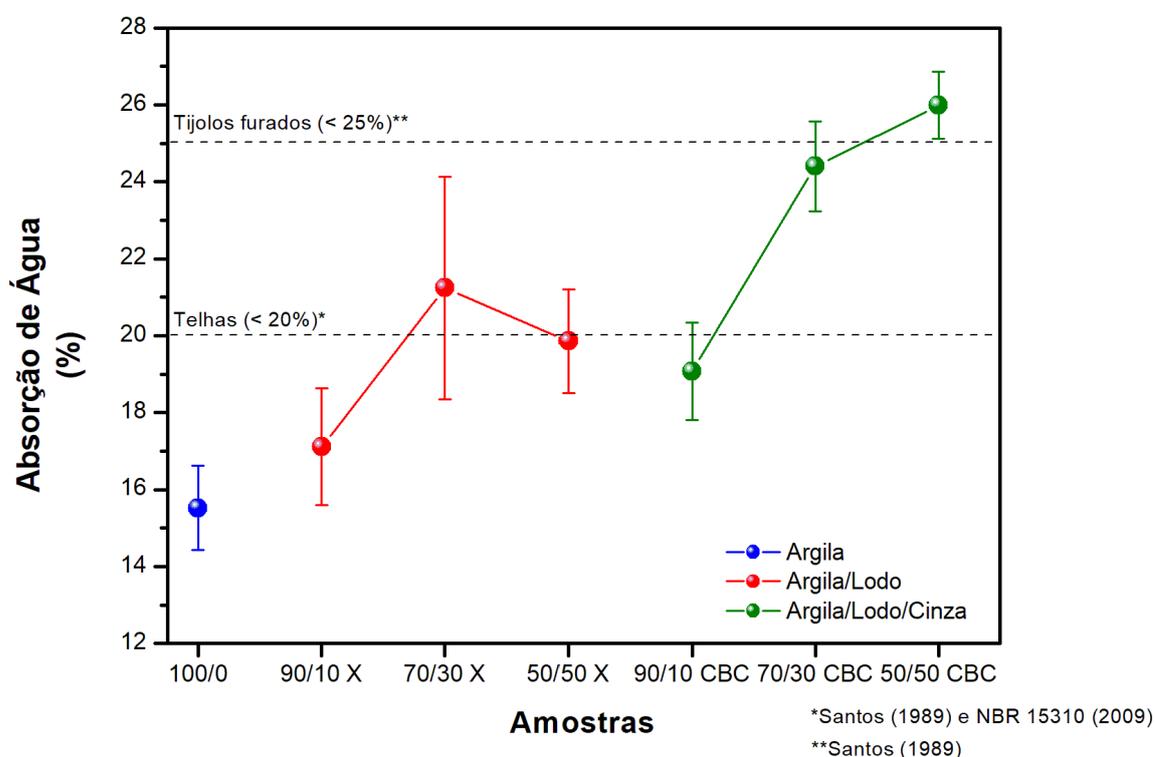
No entanto, um comportamento diferenciado foi verificado para a amostra 50/50 X. Esta amostra apresentou uma menor porosidade aparente quando comparada com a amostra 70/30 X.

Este comportamento pode estar vinculado a dois fatos distintos. Uma possibilidade está relacionada à não homogeneidade das amostras, devido à sua preparação e mistura, resultando em melhores propriedades. Outra alternativa seria a possibilidade da presença de 50% de lodo de ETA na amostra ter provocado mudanças na interação da matriz de argila com lodo, apresentando alterações em suas propriedades. São propostos futuros estudos para verificação da reprodutibilidade e estudo conclusivo do fato observado.

4.2.5 Absorção de Água (AA)

Os dados de absorção de água coletados para as amostras encontram-se indicados na Figura 34.

FIGURA 34 – Valores de Absorção de Água das amostras analisadas



Fonte: O autor.

Como pode ser verificado na Figura 34, de forma geral, a inserção do lodo de ETA e da cinza do bagaço da cana resultou em um aumento na absorção de água das amostras.

Assim como verificado nas análises de perda de massa ao fogo e porosidade aparente, este comportamento está possivelmente relacionado com a presença dos componentes orgânicos nos resíduos, que durante o processo de queima são eliminados, resultando na formação de poros nos materiais, e consequentemente provocando o aumento de absorção de água.

A NBR 15310 estabelece como 20% o limite máximo admissível de absorção de água para as telhas cerâmicas. Analisando os resultados obtidos para as amostras, verifica-se que as amostras 100/0 e 90/10 X encontram-se abaixo desse limite, mesmo considerando o seu desvio padrão.

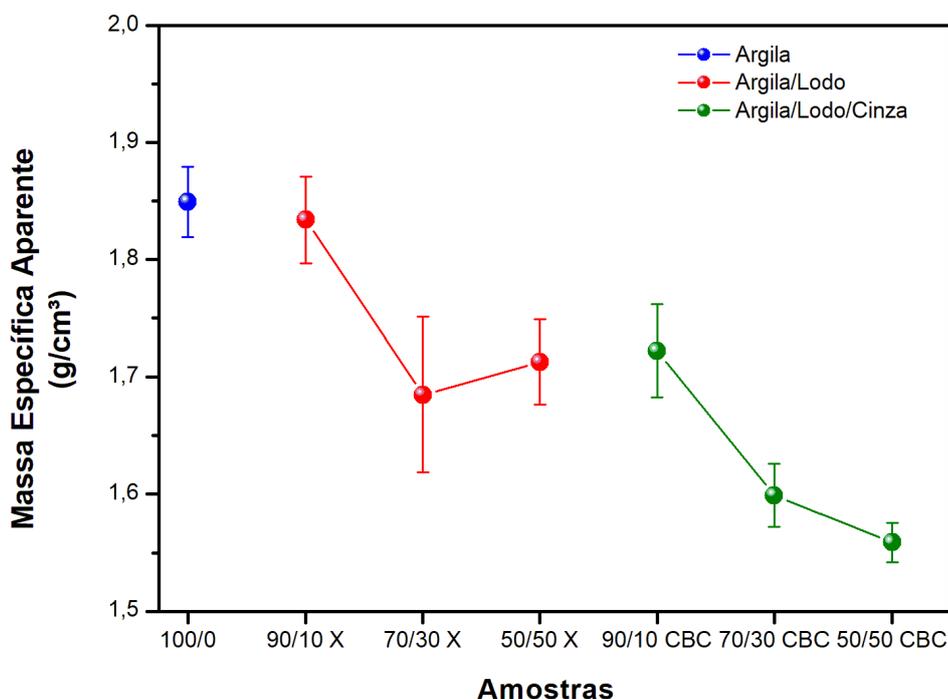
As amostras 50/50 X e 90/10 CBC apresentam seus valores médios também de acordo com a norma, porém a variabilidade apresentada indica que podem haver peças com absorção acima de 20%.

Os valores limites indicados por Santos (1989) para telhas também são de 20% para absorção de água, portanto, neste caso estão de acordo com a NBR 15310. No que se refere à tijolos furados, todas as amostras (exceto a 50/50 CBC) encontram-se abaixo do limite máximo indicado por Santos (1989) de 25%.

4.2.6 Massa Específica Aparente (MEA)

A Figura 35 apresenta a massa específica aparente dos materiais analisados.

FIGURA 35 – Massa Específica Aparente das amostras



Fonte: O autor.

Com base nos resultados, verifica-se que a amostra 90/10 X apresentou valores próximos da amostra 100/0, indicando que a inserção de 10% de lodo junto da argila provocou apenas uma pequena diminuição (0,84%) em sua massa específica aparente. Todavia, considerando a margem de erro, estes valores encontram-se dentro de uma mesma faixa de valores.

Os dados de massa específica aparente corroboram o comportamento verificado para as amostras nas análises de porosidade aparente e absorção de água.

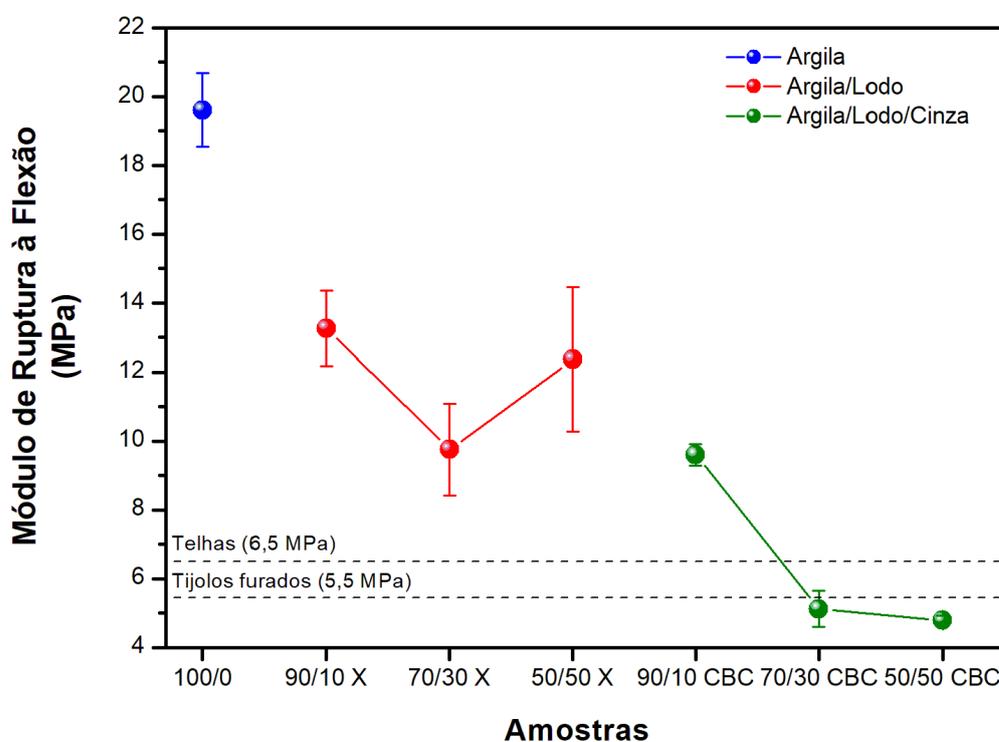
A partir destas três análises, pode-se observar que a redução da massa específica aparente das amostras é acompanhada de um crescimento nos índices de absorção de água e porosidade aparente, justificado pela formação de poros durante o processo de queima das amostras. Comportamentos semelhantes foram observados em trabalhos anteriormente publicados para amostras de argila e lodo (CHAVES, REIS, 2017, n.p.)

Além disso, para os materiais analisados, a massa específica aparente tende a diminuir conforme a presença dos resíduos. Destaca-se como exceção a este comportamento a amostra 50/50 X, como previamente indicado.

4.2.7 Módulo de Ruptura à Flexão (MRF)

A Figura 36 apresenta os resultados obtidos para a resistência à flexão das amostras.

FIGURA 36 – Valores dos Módulos de Ruptura à Flexão das amostras



Fonte: O autor.

A partir dos resultados obtidos, pode-se verificar que a amostra 100/0, constituída apenas de argila (sem resíduos), apresentou o maior valor dentre as amostras, com resistência média de 19,61 MPa.

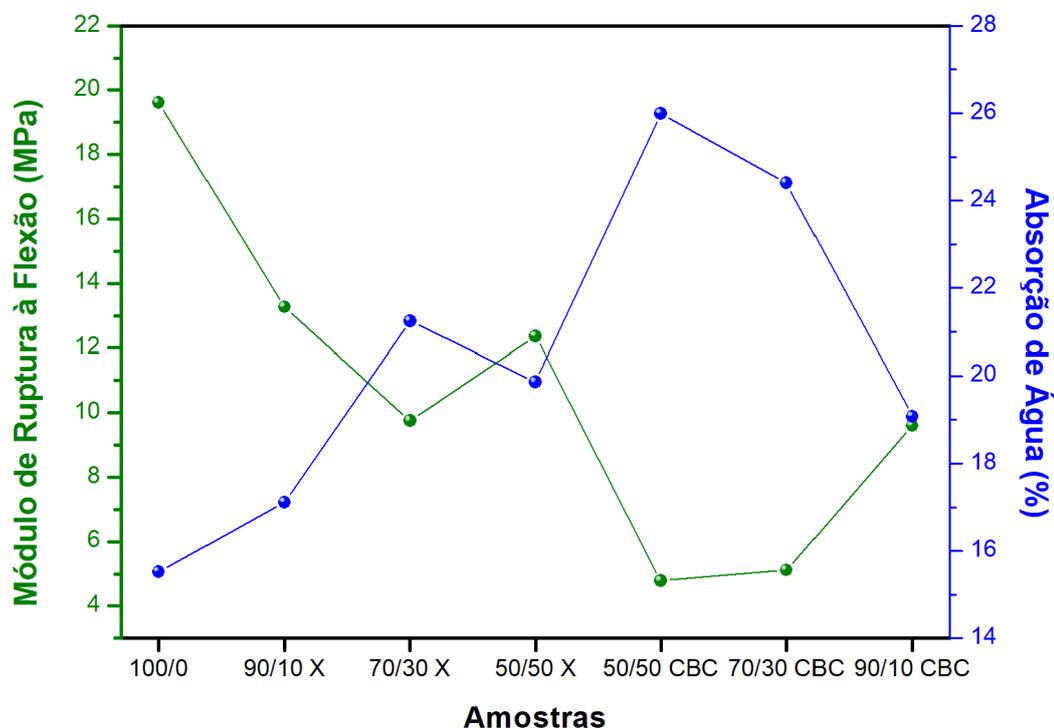
As amostras com a presença de lodo de ETA, sem a inserção de cinza, apresentaram diminuição na resistência à flexão, quando comparada à amostra 100/0. O menor valor dentre as amostras com lodo foi verificado para a amostra com 30% (70/30 X), com módulo de ruptura em torno de 9,76 MPa. A amostra com 50% de lodo (50/50 X) apresentou resistência de aproximadamente 12,36 MPa, superior à amostra com 30% de resíduo.

Analisando as amostras com a inserção de cinza do bagaço da cana, verifica-se diminuição da resistência mecânica se comparadas às amostras de argila e lodo.

Estes comportamentos indicam uma relação entre a absorção de água e a resistência mecânica das amostras. A absorção de água, por sua vez, está relacionada à porosidade aparente dos materiais. Segundo Callister e Rethwisch (2015, p. 418) os poros diminuem a área da seção transversal em que a carga é aplicada e exercem o papel de concentradores de tensões, por isso a porosidade provoca efeitos negativos na resistência à flexão de cerâmicas.

A Figura 37 permite a visualização de ambas as propriedades para as amostras de estudo.

FIGURA 37 – Dados referentes ao Módulo de Ruptura à Flexão juntamente dos dados de Absorção de Água das amostras



Fonte: O autor.

A Figura 37 possibilita uma comparação qualitativa entre as propriedades de absorção de água e resistência à flexão das amostras. Não há a intenção de uma análise quantitativa entre ambas, visto que não há uma relação conclusiva neste aspecto.

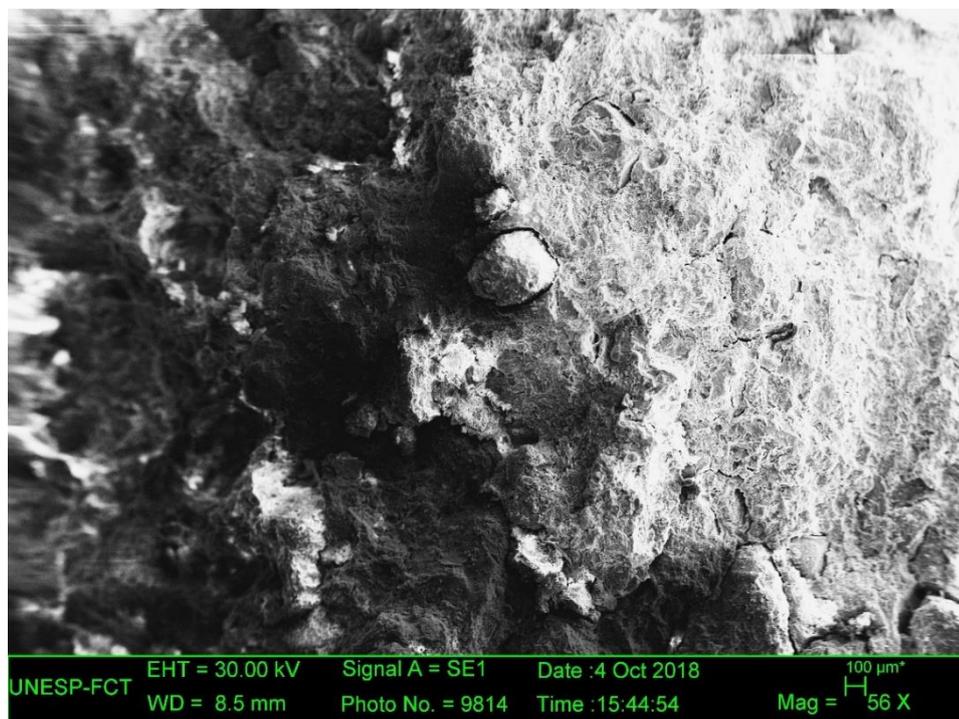
Apesar da diminuição da resistência mecânica para as amostras com os resíduos, todas as amostras constituídas de argila e lodo (90/10 X, 70/30 X, 50/50 X) e a amostra 90/10 CBC apresentaram resistência à flexão superior aos valores mínimos indicados por Santos (1989) para massas cerâmicas utilizadas para a fabricação de tijolos furados e telhas.

4.2.8 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

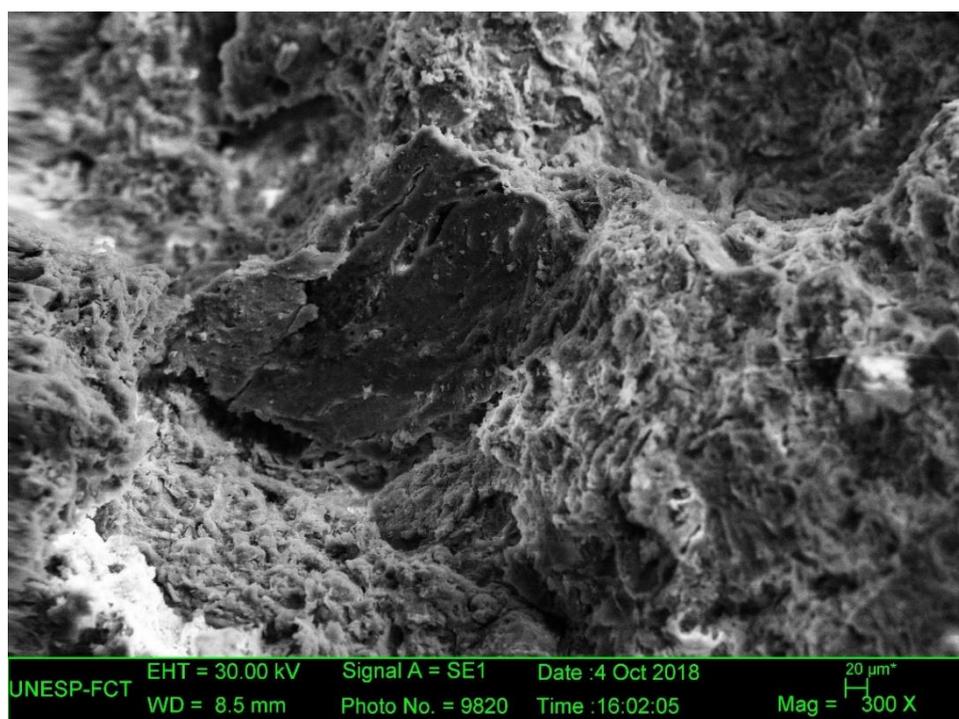
Na Figura 38 são apresentadas micrografias da seção transversal da amostra 90/10 CBC, em diferentes ampliações, e nas Figuras 39 e 40 são

apresentados os espectros de EDS de partes da seção transversal analisada para a mesma amostra.

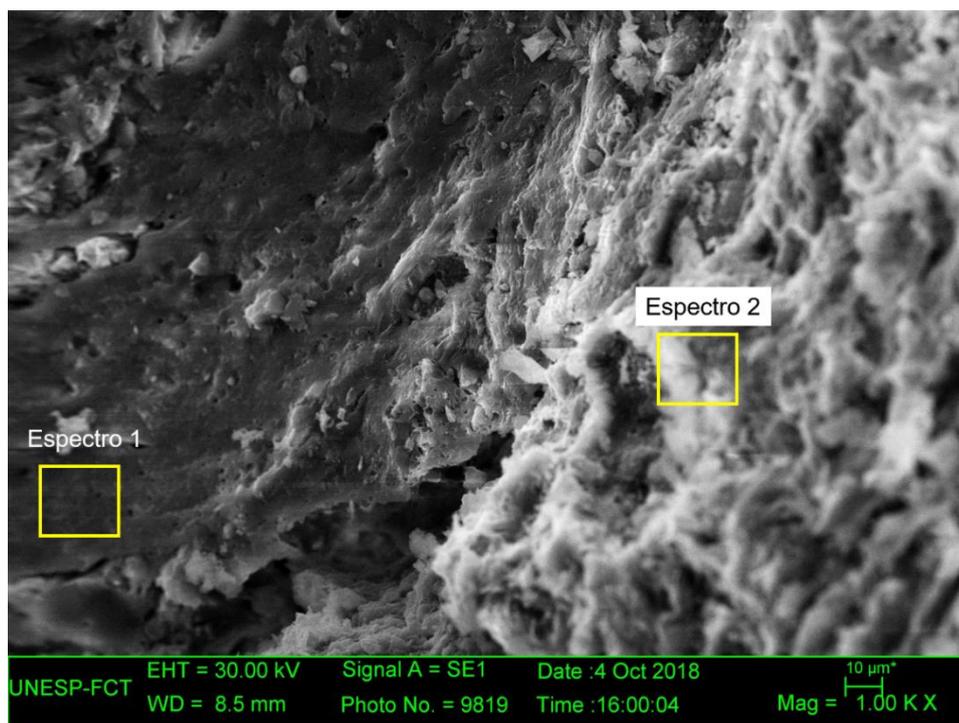
FIGURA 38 – Micrografia da seção transversal da amostra 90/10 CBC. (a) Ampliação de 56 X; (b) Ampliação de 300 X e (c) Ampliação de 1000 X



(a)



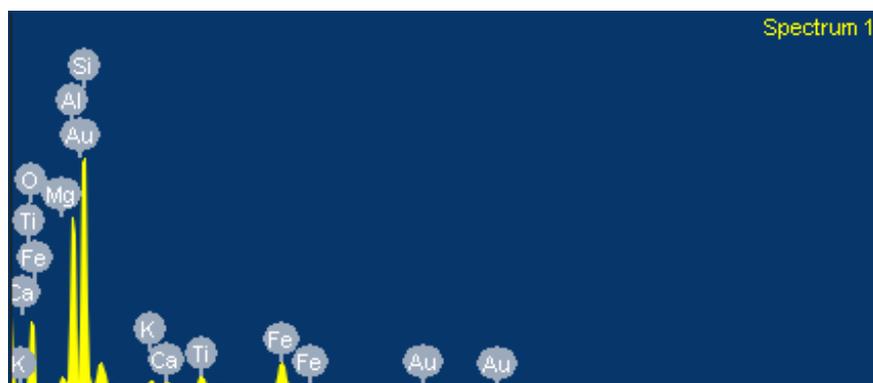
(b)



(c)

Fonte: O autor.

FIGURA 39 – Espectro 1 de EDS da seção transversal da amostra 90/10 CBC



Fonte: O autor.

FIGURA 40 – Espectro 2 de EDS da seção transversal da amostra 90/10 CBC

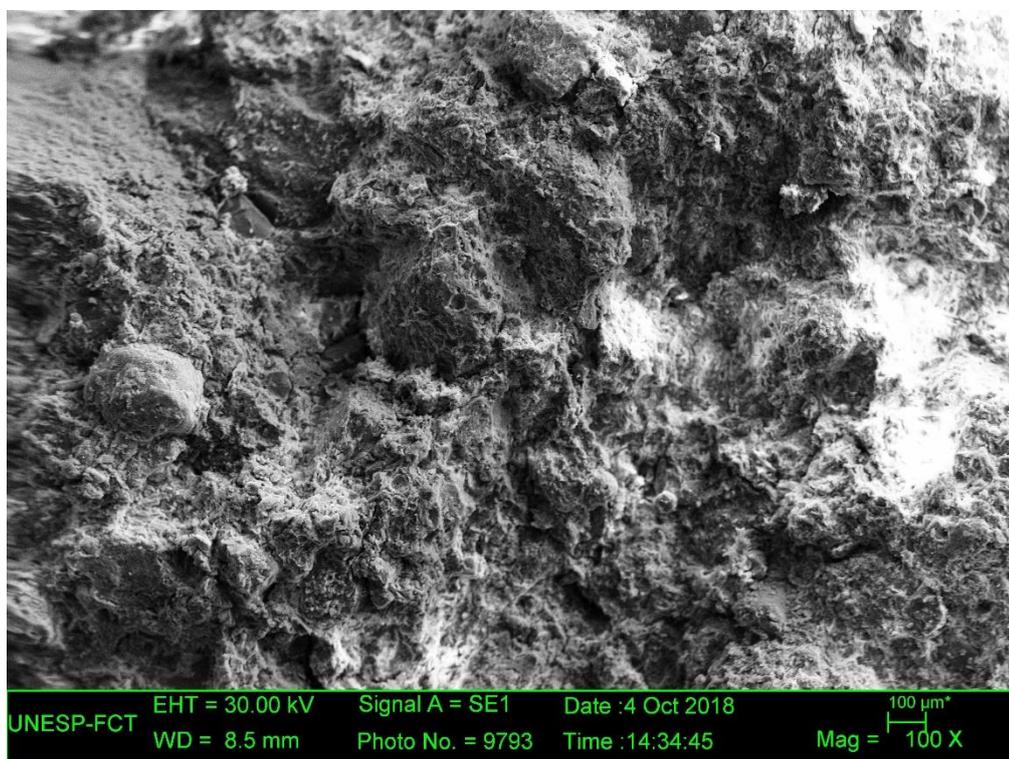
Fonte: O autor.

A partir das micrografias, verifica-se a presença de estruturas em formatos diferenciados na seção transversal da amostra, possivelmente relacionados aos três diferentes materiais incorporados na amostra.

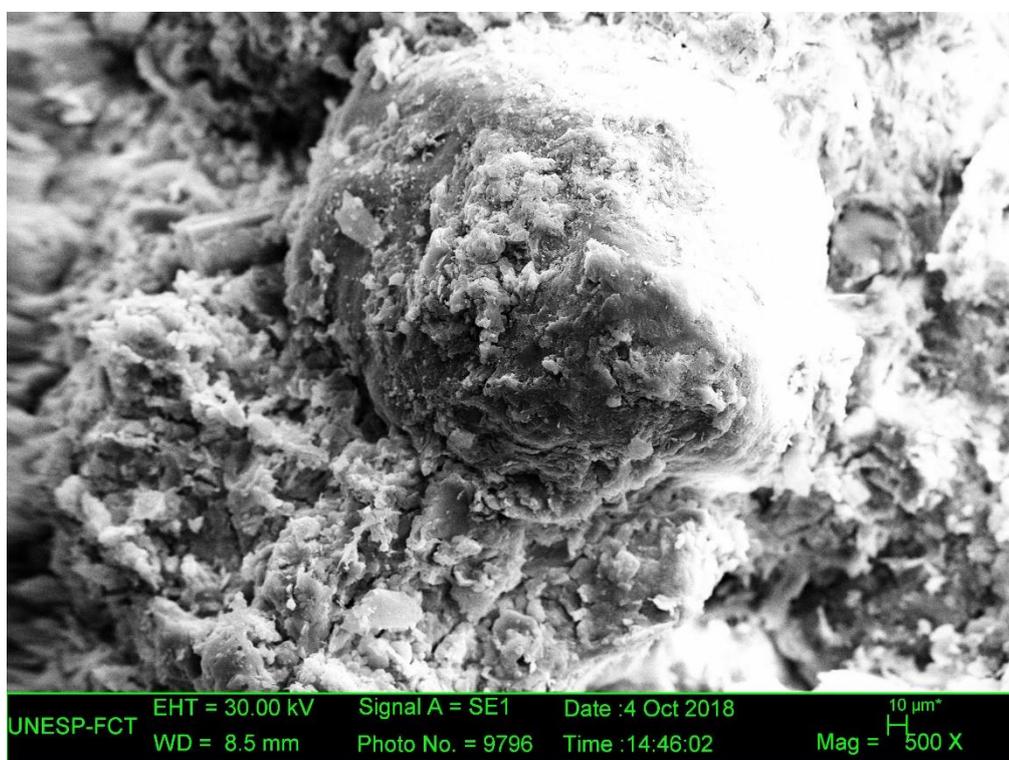
Os dois espectros indicam a presença dos elementos alumínio, oxigênio e silício em maiores quantidades, corroborando os picos identificados nos DRX para a argila, o lodo e a cinza, pela presença do quartzo e da caulinita, por exemplo.

Na Figura 41 são apresentadas micrografias da seção transversal da amostra 50/50 CBC, em diferentes ampliações.

FIGURA 41 – Micrografia da seção transversal da amostra 50/50 CBC. (a) Ampliação de 100 X e (b) Ampliação de 500 X



(a)



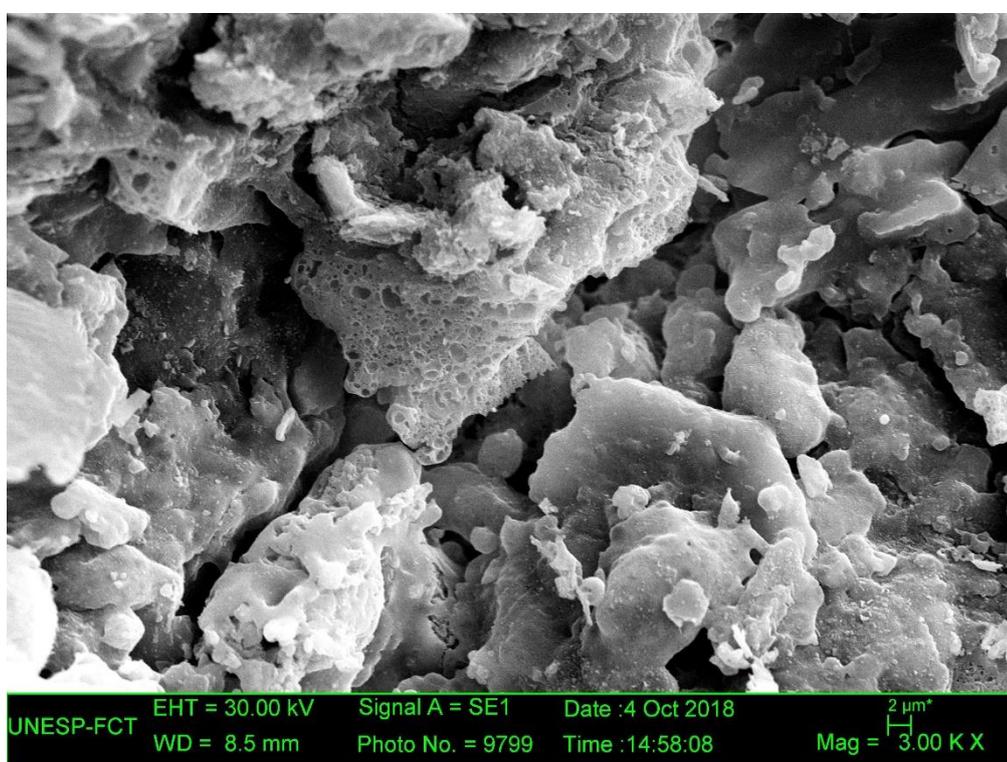
(b)

Fonte: O autor.

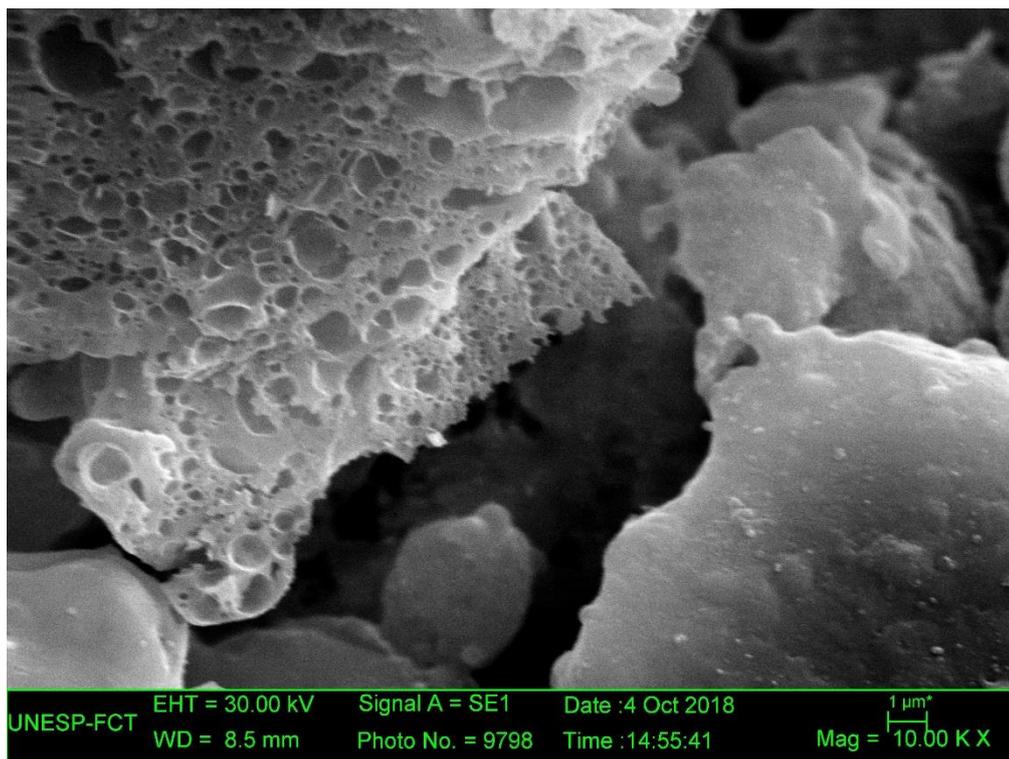
Como pode ser visualizado na Figura 41 (a), apesar de apresentar estruturas diferentes entre si, os materiais apresentam em sua generalidade uma superfície homogênea.

A Figura 42, a seguir, apresenta outras micrografias da seção transversal da amostra 50/50 CBC.

FIGURA 42 – Micrografia da seção transversal da amostra 50/50 CBC. (a) Ampliação de 3000 X e (b) Ampliação de 10000 X



(a)



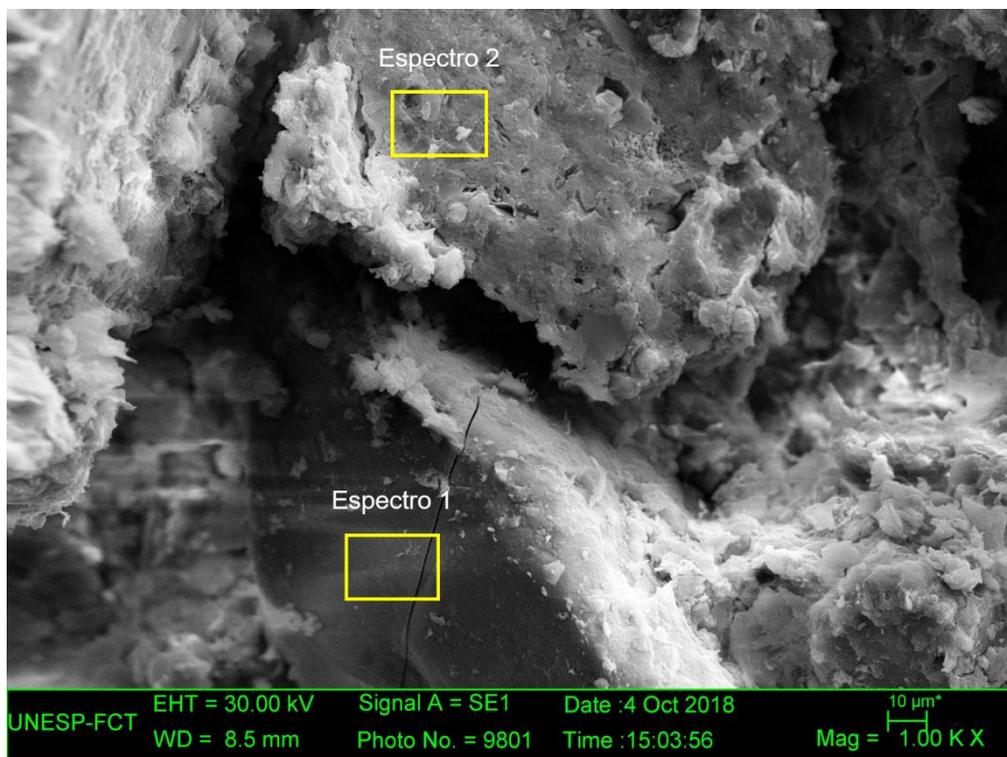
(b)

Fonte: O autor.

Analisando a Figura 42, podem ser observadas estruturas porosas que não foram visualizadas nas outras amostras, como verificado nas ampliações de 3000 X e 10000 X. Os elevados valores de porosidade aparente apresentados pela amostra 50/50 CBC podem estar relacionados a este tipo de estrutura observada.

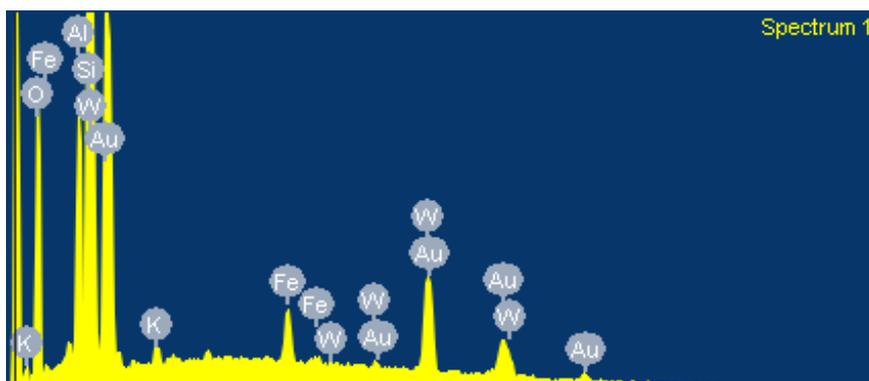
Outra micrografia realizada para a amostra 50/50 CBC pode ser visualizada na Figura 43, juntamente de dois espectros de EDS da amostra (Figuras 44 e 45).

FIGURA 43 – Micrografia da seção transversal da amostra 50/50 CBC com aplicação de 1000 X



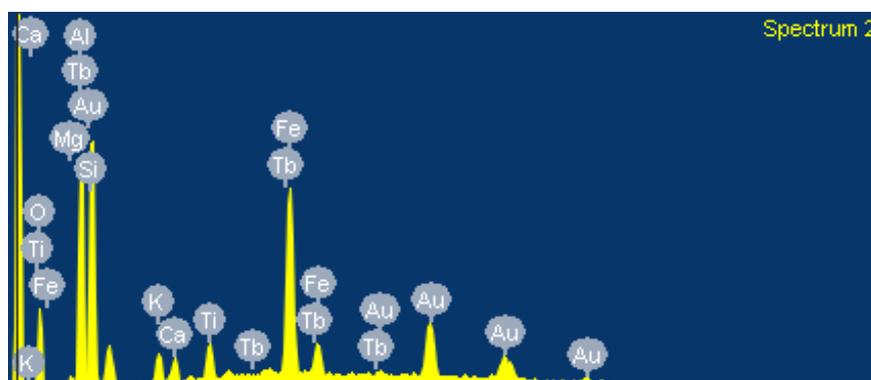
Fonte: O autor.

FIGURA 44 – Espectro 1 de EDS da seção transversal da amostra 90/10 CBC



Fonte: O autor

FIGURA 45 – Espectro 2 de EDS da seção transversal da amostra 90/10 CBC



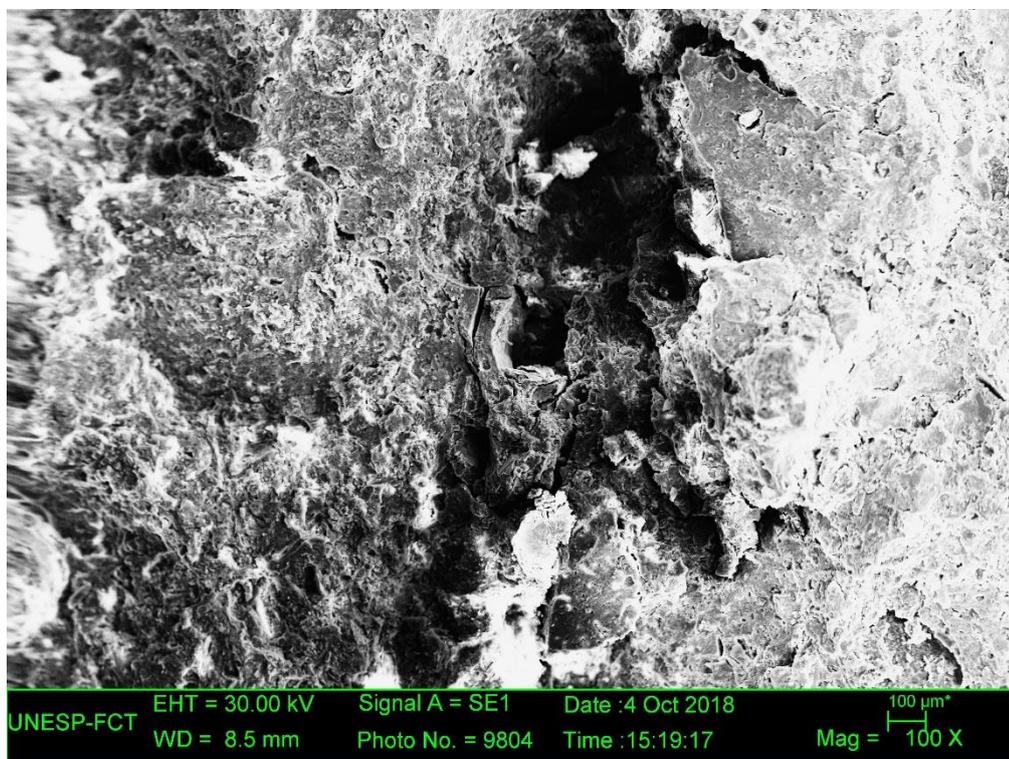
Fonte: O autor.

Nesta micrografia pode-se observar uma estrutura de coloração mais escura e com um formato de “grão”, comprovada por uma trinca em seu sentido transversal. A partir do espectro 1, verifica-se que esta região apresenta oxigênio e silício em grandes quantidades.

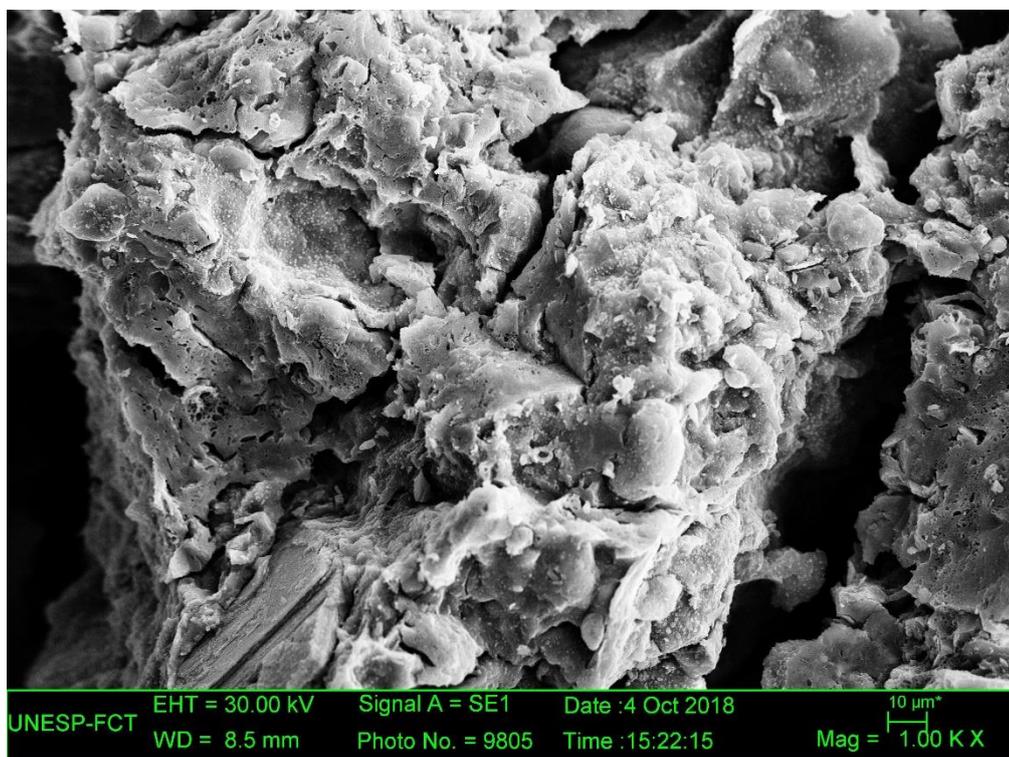
O espectro 2 apresenta uma composição muito semelhante à observada nos espectros da amostra 90/10 CBC, com a presença de alumínio, oxigênio, silício e ferro, além de apresentar morfologia também semelhante. Isto indica que esta região provavelmente refere-se à matriz das amostras.

Na Figura 46 são apresentadas micrografias da seção transversal da amostra 50/50 X, em ampliações de 100 X, 1000 X, 5000 X e 10000 X.

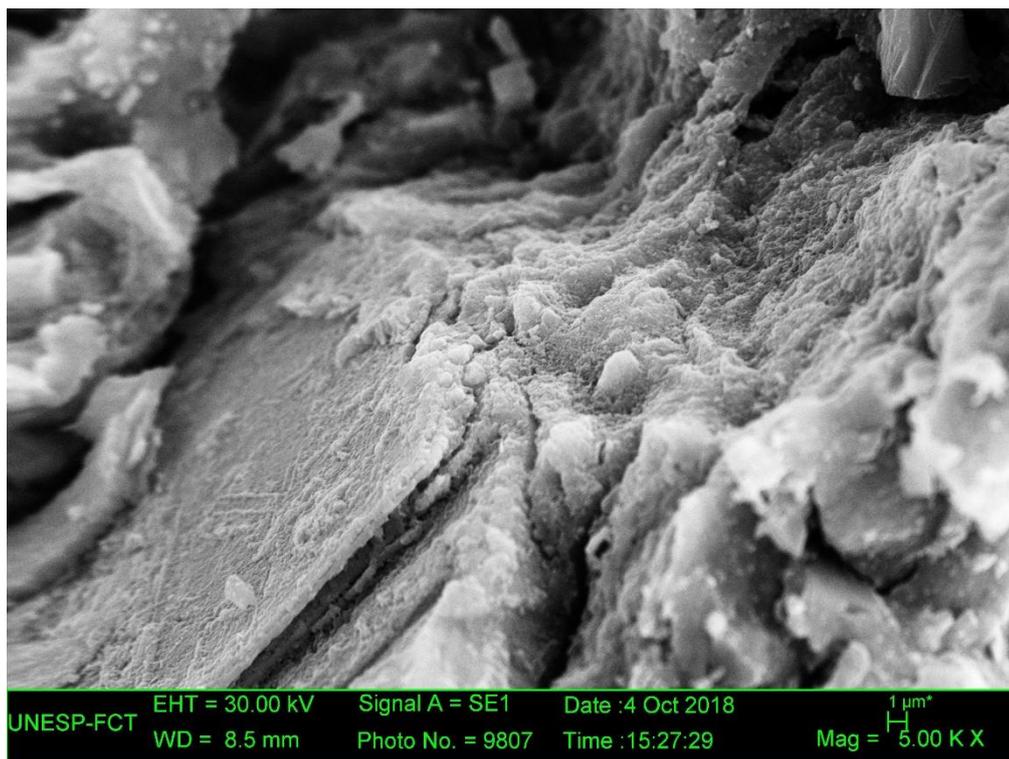
FIGURA 46 – Micrografia da seção transversal da amostra 50/50 X. (a) Ampliação de 100 X; (b) Ampliação de 1000 X; (c) Ampliação de 5000 X e (d) Ampliação de 10000 X



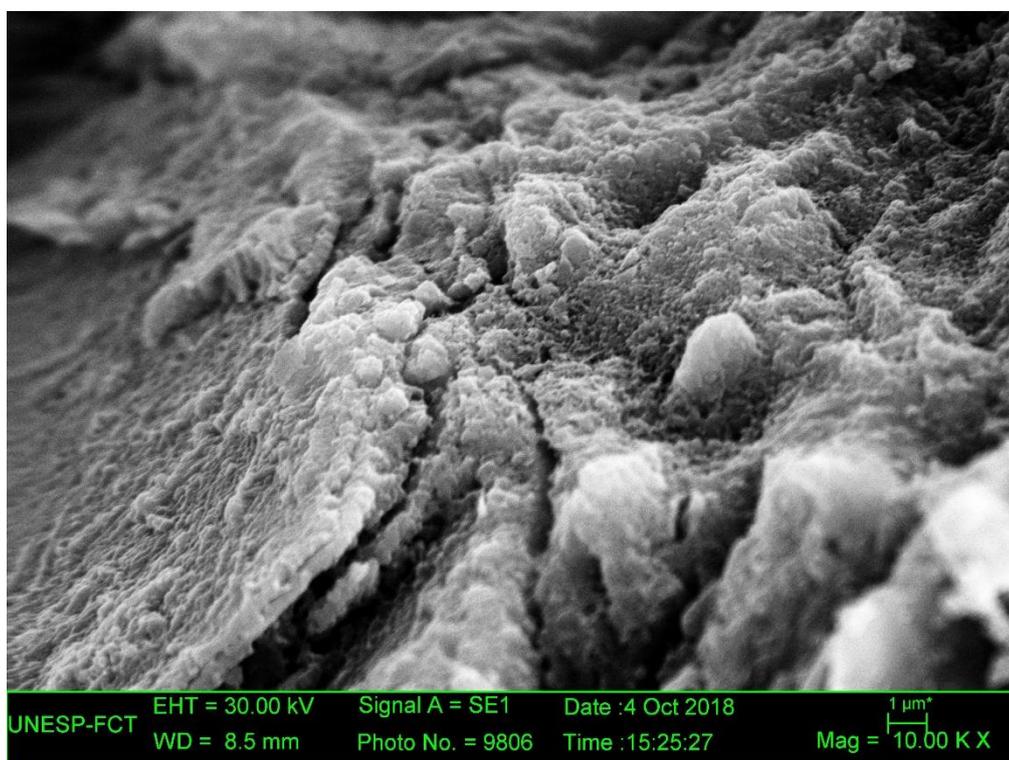
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: O autor.

As micrografias realizadas para a amostra 50/50 X, permitem a visualização de uma região com trincas (a), resultantes da fratura do corpo de prova. Na Figura 46 (b), podem ser observadas estruturas similares às verificadas para as amostras 90/10 CBC e 50/50 CBC, sendo assim possivelmente relacionada à matriz de argila/lodo.

5 CONCLUSÃO

A argila coletada e analisada apresenta caulinita, mica/ilita, gibsita e quartzo em sua composição e mostra grande concentração de frações argilosas. O lodo de ETA de Presidente Prudente também exhibe a presença de caulinita e quartzo, o que evidencia a semelhança do resíduo com argilas utilizadas para a fabricação de cerâmicas.

A cinza do bagaço da cana apresenta o quartzo como principal fase cristalina. As análises térmicas indicam a presença de matéria orgânica na cinza, mesmo após o processo de peneiramento.

De maneira geral, os compósitos constituídos de argila e lodo apresentam aumento na perda de massa e na porosidade, resultando em menores valores de resistência mecânica.

Apesar disso, todos os compósitos de argila e lodo apresentaram resistência à flexão superiores aos valores limites indicados pela literatura para massas cerâmicas utilizadas na fabricação de telhas. Destacam-se os materiais com 10% de lodo, com resultados de absorção de água abaixo do limite estabelecido para telhas e os maiores valores de resistência à flexão dentre os compósitos.

A inserção de cinza sobre as matrizes de argila/lodo mostra-se prejudicial às propriedades físicas dos materiais, reduzindo a resistência mecânica e aumentando a absorção de água e porosidade. Porém, apesar desta influência, os materiais com 10% de cinza incorporada à matriz apresentaram valores de absorção de água e de resistência mecânica dentro dos limites indicados pela literatura para telhas.

Dessa forma, verifica-se que a utilização dos resíduos lodo de ETA e cinza do bagaço da cana junto da argila pode ser realizada, desde que em proporções controladas. A produção de materiais com a presença dos resíduos pode reduzir os impactos ambientais causados e permitir a aplicação dos rejeitos. São propostos futuros estudos para a verificação da durabilidade dos materiais desenvolvidos, relacionando-a com a resistência e porosidade dos compósitos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Água superficial**. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua/agua-superficial>. Acesso em: 28 de out. de 2018.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2015. 648 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15310: Componentes cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2009. 47 p.
- BEER, F.P.; JOHNSTON, E. R. J.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais**. Porto Alegre: AMGH, 2015. 838 p.
- BITTENCOURT, C.; PAULA, M. A. S. de. **Tratamento de água e efluentes: fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos**. São Paulo: Érica, 2014. 184 p.
- BORLINI, M. C.; SALES, H. F.; VIEIRA, C. M. F.; CONTE, R. A.; PINATTI, D. G.; MONTEIRO, S. N. **Use of Biomass Ashes as an Addition to Red Ceramics**. In: Global Symposium on Recycling, REWA'S 2004, Madrid, 2004. 8 p.
- BORLINI, M. C.; MENDONÇA, J. L. C. C.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Influência da Temperatura de Sinterização nas Propriedades Físicas, Mecânicas e Microestruturais de Cerâmica Vermelha Incorporada com Cinza do Bagaço de Cana de Açúcar. **Revista Matéria**, v. 11, p. 435-443, 2006.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Ministério do Meio Ambiente. **Áreas de manejo de resíduos da construção civil e resíduos volumosos: orientação para o seu licenciamento e aplicação da Resolução Conama 307/2002**. Brasília: MCIDADES/MMA, 2005. 45 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Balanco nacional de cana-de-açúcar e agroenergia**/Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Produção e Agroenergia. Brasília: MAPA/SPA, 2007. 139 p.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2016**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018. 220 p.
- CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 817 p.
- CHAVES, F. P.; REIS, E. A. P. Estudo da obtenção de materiais cerâmicos provenientes da adição de lodo de ETA à argila: caracterização mecânica. In: **ETIC –**

Encontro Toledo de Iniciação Científica “Prof. Dr. Sebastião Jorge Chammé”, 13, 2017. Presidente Prudente. n.p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **A Geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil – Análise do Desempenho da Safra 2009-2010**. Brasília, 2011. 157 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, v. 4 – Safra 2017/2018, n. 4**. Brasília, 2018. 73 p.

DONDI, M.; MARSIGLI, M.; FABBRI, B. Recycling of Industrial and Urban Wastes in Brick Production – A Review. **Tile Brick Int**, v. 13, n. 3, p. 218-309, 1997.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Brasileiro de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 2 ed., 1997. 212 p.

Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balço Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Rio de Janeiro: EPE, 2017. 292 p.

FARIA, K. C. P.; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. **Journal of Environmental Management**, v. 101, p. 7-12, 2012.

FIESP/CIESP. Federação e Centro das Indústrias do Estado de São Paulo. **Ampliação da oferta de energia através da biomassa**. Setembro de 2001.

FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 490-496, 2011.

GARCÍA, C. M.; QUESADA, D. E.; VILLAREJO, L. P.; GODINO, F. J. I.; IGLESIAS, F. A. C. Sludge valorization from wastewater treatment plant to its application on the ceramic industry. **Journal of Environmental Management**, v. 95, p. 343-348, 2012.

GENG, J.; SUN, Q. Effects of high temperature treatment on physical-thermal properties of clay. **Thermochimica Acta**, v. 666, p. 148-155, 2018.

GOLDEMBERG, J.; NIGRO, F. E. B.; COELHO, S. T. **Bioenergia o estado de São Paulo: situação atual, perspectivas, barreiras e propostas**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2008. 152 p.

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; TCHOBANOGLUS, G. **Princípios de tratamento de água**. São Paulo: Cengage Learning, 2016. 624 p.

KAZMI, S. M. S.; ABBAS, S.; SALEEM, M. A.; MUNIR, M. J.; KHITAB, A. Manufacturing of sustainable clay bricks: Utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 29-41, 2016.

KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Porto Alegre: Bookman, 2010. 356 p.

KIZINIEVIC, O.; ZURAUSKIENE, R. KIZINIEVIC, V.; ZURAUSKAS, R. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 464-473, 2013.

LING, Y. P.; THAM, R. H.; LIM, S. M.; FAHIM, M.; OOI, C. H.; KRISHNAN, P.; MATSUMOTO, A.; YEOH, F. Y. Evaluation and reutilization of water sludge from fresh water processing plant as a green clay substituent. **Applied Clay Science**, v. 143, p. 300-306, 2017.

MACEDO, P. C. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista UNESP – Campus de Ilha Solteira, 2009.

MONTEIRO, S. N.; ALEXANDRE, J.; MARGEM, J.I.; SÁNCHEZ, R.; VIEIRA, C.M.F. Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. **Construction and Building Materials**, v.22, p. 1281-1287, 2008.

NEWELL, J. **Fundamentos da moderna engenharia e ciência dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 281 p.

OLIVEIRA, E. M. S.; HOLANDA, J. N. F. Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 54, p. 167-173, 2008.

PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENORIO, J. A. S. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, v. 54, p. 63-76, 2008.

PEIXOTO, G. J. **Avaliação da aplicação de lodo de ETA no adensador de um lodo de uma ETE de lodos ativados**. 2008. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – FEIS – UNESP – Campus de Ilha Solteira, 2008.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da Composição Granulométrica de Massas para Cerâmica Vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 2, n. 1, 1997.

REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro, RJ: ABES, 1999. 240 p.

SANTOS, I. S. S. dos; RAMIRES, M. V. V.; KAZMIERCZAK, C. S.; SILVA, H. C. da; KERN, A. P.; CAMARGO, S. A. Caracterização e identificação do resíduo: Lodo da estação de tratamento do município de São Leopoldo. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 2000. 8 p.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas**. Vol. 1. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 408 p.

SCHETTINO, M. A. S.; HOLANDA, J. N. F. Characterization of sugarcane bagasse ash waste for Its Use in Ceramic Floor Tile. **Procedia Materials Science**, v.8, p. 190-196, 2015.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron Oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Mineral in Soil Environments**. Soil Science Society of America Book Series. 1989.

SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL. **Anuário Estatístico: Setor Transformação Não Metálicos**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2018. 89 p.

SOUZA, A. E. de. **Argilominerais: Influência dos Aditivos (Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar e Rocha Sedimentar) no Processo de Sinterização**. 2008. 105 f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências, UNESP – Campus de Bauru, 2008.

SOUZA, A. E.; TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; COSTA, F. B.; LONGO, E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 2774-2780, 2011.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos da engenharia e ciência dos materiais**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2012. 707 p.

TARTARI, R.; MORA, N. D.; MÓDENEZ, A. N.; PIANARO, S. A. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha. Parte I: Caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 343, 2011.

TARTARI, R.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A.; MORA, N. D. 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 misturas de argilas para produção de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 57, p. 387-394, 2011.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A.; MOURA, C. A. I. Mineralogical characterization of clays used in the structural ceramic industry in west of S. Paulo State, Brazil. **Cerâmica**, v. 47, p. 204-207, 2001.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A.; SOUZA N. R.; JOB A. E.; GOMES H. M.; HEITZMANN NETO J. F. Caracterização de resíduo de estações de tratamento de água (ETA) e de esgoto (ETE) e o estudo da viabilidade de seu uso pela indústria cerâmica. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, 38., 2002, Cancun, México. **Anais...** Cancun, 2002. 7 p.

TEIXEIRA, S. R. **Caracterização de argilas usadas para produção de cerâmica vermelha e estudo das alterações nas suas propriedades pela adição de resíduos sólidos**. 2006. 181 f. Tese (Livre-Docência em Física) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP – Campus de Presidente Prudente, 2006.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, A. E.; SANTOS, G. T. A.; PEÑA, A. F. V.; MIGUEL, A. G. Sugarcane bagasse ash (SCBA) as a potential quartz replacement in red ceramic. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 91, p. 1883-1887, 2008.

TEIXEIRA, S. R.; PENA, A. F. V.; MIGUEL, A. G. Briquetting of charcoal from sugarcane bagasse fly ash (scbfa) as an alternative fuel. **Waste Management**, v. 30, p. 804-807, 2010.

TEIXEIRA, S. R.; SANTOS, G. T. A.; SOUZA, A. E.; ALESSIO, P.; SOUZA, S. A.; SOUZA, N. R. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment sludge on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, v. 53, p. 561-565, 2011.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, A. E. de; PEÑA, A. F. V.; LIMA, R. G. de; MIGUEL, A. G. Use of Charcoal and Partially Biomaterial in Fly Ash to Produce Briquettes: Sugarcane Bagasse. In: MANZANERA, M (Ed.). **Alternative Fuel**, InTech, 2011. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/alternative-fuel/use-of-charcoal-and-partially-pirolysed-biomaterial-in-fly-ash-to-produce-briquettes-sugarcane-bagas>. Acesso em: 5 de abril de 2018.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2001. 9 p.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F. de; PINATTI, D. G. Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ. **Cerâmica**, São Paulo, v. 46, n. 297, 2000.

WENG, C. H.; LIN, D. F.; CHIANG, P. C. Utilization of sludge as brick materials. **Advances in Environmental Research**, v. 7, p. 679-685, 2003.

ANEXOS

ANEXO A – Valores limites de resistência à flexão e absorção de água recomendados para massas cerâmicas utilizadas na fabricação de produtos cerâmicos

Produto cerâmico	Resistência à flexão (MPa)	Absorção de água (%)
Tijolos furados	> 5,5	< 25,0
Telhas	> 6,5	< 20,0

Fonte: Adaptado de Santos (1989).