

Caracterização microestrutural e mineralógica da cinza de biomassa decorrente da queima em caldeiras de lavanderia de jeans

Microstructural and mineralogical characterization of biomass ash from burning in jeans laundry boilers

Caracterización microestructural y mineralógica de cenizas de biomasa provenientes de la quema en calderas de lavado de jeans

Recebido: 07/10/2022 | Revisado: 17/10/2022 | Aceitado: 18/10/2022 | Publicado: 23/10/2022

José Henrique da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4321-5816>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: josehenrique_s@outlook.com

Karina Paula Barbosa de Andrade Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4387-945X>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: karinandradelima@gmail.com

Ana Luíza Xavier Cunha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3678-4340>
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
E-mail: analuizaxcunha@gmail.com

Jackson José dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7118-4551>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: jacksonjosesantos@hotmail.com

Janielly Mantovani Cravo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8315-0749>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: janiellymantovani@gmail.com

Raimundo Mainar de Medeiros

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7361-1281>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: mainarmedeiros@gmail.com

Kyriale Vasconcelos Morant Cavalcanti

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0617-5624>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: kyrialem@yahoo.com.br

Felipe Bezerra de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7576-5321>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: felipelimafl@hotmail.com

Romildo Morant de Holanda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7945-3616>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: romildo.morant@ufrpe.br

Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1316-1826>
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil
E-mail: fernanda.wanderley@ufrpe.br

Resumo

O estado de Pernambuco se destaca no cenário nacional como um importante polo do setor de confecções, pelas atividades industriais exercidas no Arranjo Produtivo Local do Agreste do estado. Dentro deste contexto estão as lavanderias de *jeans*, responsáveis pelo beneficiamento das peças e que dependem de uma grande geração de vapor para os seus processos. As lavanderias consomem quantidades expressivas de lenha por mês para a combustão em caldeiras, gerando como resíduo secundário a cinza de biomassa, que tem se mostrado um problema quanto à sua destinação, devido aos descartes irregulares na região. Este trabalho tem por objetivo estudar a microscopia do concreto com incorporação da cinza de biomassa, proveniente da caldeira de uma lavanderia do Agreste de Pernambuco. Para a realização do trabalho, a cinza foi coletada em uma lavanderia localizada em Caruaru-PE, cuja maior fonte energética é a lenha de algaroba, e foram realizadas as caracterizações químicas dos componentes do

concreto, foram utilizadas técnicas como a difração de raio-X (DRX), para a determinação mineralógica, e a microscopia eletrônica de varredura (MEV), para a caracterização microestrutural. Foi verificado que o aumento de ocorrência de etringita tardia diante do acréscimo de cinza no material, além da possível influência do tipo de cimento.

Palavras-chave: Cinza de madeira; Cimento; Etringita; Indústria têxtil.

Abstract

The state of Pernambuco stands out on the national scene as an important pole of the clothing sector, due to the industrial activities carried out in the Agreste Local Productive Arrangement of the state. Within this context are the jeans laundries, responsible for the processing of the pieces and which depend on a large generation of steam for their processes. Laundries consume significant amounts of firewood per month for combustion in boilers, generating biomass ash as secondary waste, which has been shown to be a problem in terms of its destination, due to irregular disposal in the region. This work aims to study the microscopy of concrete with incorporation of biomass ash, from the boiler of a laundry in the Agreste region of Pernambuco. To carry out the work, the ash was collected in a laundry located in Caruaru-PE, whose main energy source is mesquite firewood, and chemical characterizations of the concrete components were carried out, techniques such as X-ray diffraction were used. (XRD), for mineralogical determination, and scanning electron microscopy (SEM), for microstructural characterization. It was verified that the increase in the occurrence of late ettringite in the face of the addition of ash in the material, in addition to the possible influence of the type of cement.

Keywords: Wood ash; Cement; Etringite; Textile industry.

Resumen

El estado de Pernambuco se destaca en el escenario nacional como un polo importante del sector de la confección, debido a las actividades industriales realizadas en el Arreglo Productivo Local Agreste del estado. Dentro de este contexto se encuentran las lavanderías de jeans, encargadas del procesamiento de las piezas y que dependen de una gran generación de vapor para sus procesos. Las lavanderías consumen mensualmente cantidades significativas de leña para la combustión en calderas, generando cenizas de biomasa como residuo secundario, lo que ha demostrado ser un problema en cuanto a su destino, debido a la disposición irregular en la región. Este trabajo tiene como objetivo estudiar la microscopía de hormigón con incorporación de ceniza de biomasa, de la caldera de una lavandería en la región de Agreste, Pernambuco. Para la realización del trabajo, se recolectó la ceniza en un lavadero ubicado en Caruaru-PE, cuya principal fuente de energía es la leña de mezquite, y se realizaron caracterizaciones químicas de los componentes del concreto, se utilizaron técnicas como la difracción de rayos X. (XRD), para determinación mineralógica, y microscopía electrónica de barrido (SEM), para caracterización microestructural. Se verificó el aumento en la ocurrencia de etringita tardía ante la adición de ceniza en el material, además de la posible influencia del tipo de cemento.

Palabras clave: Ceniza de madera; Cemento; Etringita; Industria textil.

1. Introdução

As indústrias são responsáveis por parte da geração dos resíduos na sociedade; muito em função da grande variedade de atividades industriais; fato que gera uma gama de resíduos, constituindo assim o setor como um dos principais agentes de impacto ao meio ambiente (Roy, 2020).

De acordo com Oliveira, Barros, Lucena, Lucena e Patricio (2020), apesar do setor da construção civil provocar impactos ambientais consideráveis, sobretudo através do consumo de recursos naturais, consumo de energia e produção de resíduos, o setor também possui uma grande capacidade de absorver resíduos diversos em seus processos, principalmente com a incorporação desses resíduos aos materiais de matriz cimentícia, como o concreto e a argamassa, seja como adição mineral ao clínquer ou em substituição aos agregados.

Goyal et al., (2019) destacaram que a reutilização dos resíduos sólidos por parte da indústria da construção civil reduz também os custos relativos ao gerenciamento desses materiais, que, por consequência, induz ao desenvolvimento de tecnologias e materiais alternativos. Estes resíduos deixam de ser destinados aos aterros sanitários e são incorporados na produção de artefatos cerâmicos diversos, como blocos, tijolos, telhas, lajotas, bloquetes e tubos.

As escórias siderúrgicas, cinzas volantes, argilas calcinadas e *filler* calcário também vem há décadas sendo utilizados como adição mineral na produção de cimento Portland; onde, entre 1990 e 2018, provocou a redução de 80% para 69% da presença de clínquer no material (SNIC, 2020).

Segundo Nascimento et al., (2019), o uso do *filler* calcário alternativo como substituto parcial do clínquer, na produção do cimento, reduz o consumo energético e a emissão de dióxido de carbono (CO₂), além de reduzir a exploração de calcário e argila, que são as matérias-primas do clínquer.

No agreste de Pernambuco, destacando as cidades de Caruaru, Toritama e Santa Cruz do Capibaribe, há uma consolidada e desenvolvida atividade industrial no setor têxtil e de confecções (Silva et al., 2012). O desenvolvimento desses segmentos da indústria proporcionou também o surgimento de lavanderias industriais na região, principalmente no município de Caruaru, que utilizam a água do rio Ipojuca nas suas atividades, além do consumo de lenha proveniente da região como fonte energética (Ramanathan et al., 2020).

Como constatado por Nascimento (2014), diariamente, há produção de cinzas pelas lavanderias do agreste pernambucano, resultantes da queima da lenha em caldeiras, e em muitas situações esses resíduos são descartados de forma irregular no solo ou nos cursos de água.

Como observado por Pires (2016), o consumo massivo de lenha também é uma realidade em outras regiões produtivas do estado, como o polo gesseiro do Araripe e o polo de cerâmica, resultando em uma grande produção de cinzas pelas indústrias pernambucanas. Segundo Melo (2012), apenas uma lavanderia de médio porte é capaz de produzir 6.500 Kg de cinzas por mês.

Diante disso, faz-se necessário o desenvolvimento de estudos para uma melhor destinação desses resíduos, testando a viabilidade de incorporação das cinzas de biomassa na indústria cimentícia como um *filler* calcário alternativo, devido ao alto teor de carbonato de cálcio, diante da já citada capacidade de aproveitamento de resíduos pelo setor.

Esse estudo pode trazer retorno financeiro às lavanderias da região, agregando valor a um material atualmente descartável; possibilidade de resolução de um passivo ambiental, frente aos descartes inadequados do resíduo; e o desenvolvimento de um material compósito mais sustentável, que atenda às normas técnicas.

2. Metodologia

A pesquisa pode ser classificada como explicativa, onde os resultados são capazes de construir conhecimento científico a partir da identificação “de fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência de fenômenos. De acordo com o delineamento analisado, referente ao planejamento organizacional e quanto a avaliação e interpretação de dados, a pesquisa apresenta caráter experimental (Gil, 2002).

A pesquisa experimental traduz-se na definição do objeto de estudo, determinação de variáveis que podem estar envolvidas, quais serão as formas de controle e avaliação dos efeitos produzidos por estas variáveis (Gil, 2002). De acordo com Pereira, Shitsuka, Parreira e Shitsuka (2018), o método quantitativo se baseia na coleta de dados numéricos, obtendo valores com em suas determinadas unidades, analisados a partir de métodos matemáticos, como estatísticas, porcentagens e métodos analíticos.

Obtenção e análise da cinza

Foi selecionada a lavanderia Nossa Senhora do Carmo, localizada na cidade de Caruaru-PE, onde foram coletados cinco sacos com cinza, cada um contendo cerca de 25 Kg do resíduo.

A cinza coletada foi proveniente da limpeza do cinzeiro da caldeira da empresa e foi transportada para o Laboratório de Materiais de Construção, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Campus Dois Irmãos, e armazenada em sacos lacrados, de modo que reduzisse os efeitos da umidade e outros agentes externos sobre o material.

Constatou-se que a lenha de Algaroba, produzida e adquirida na própria região, correspondia à 70% da fonte energética utilizada na caldeira, como visto na Figura 1; enquanto 30% do material energético era dividido entre resíduos de

movelaria e *pellets* de madeira. Por consequência, a cinza coletada para esse trabalho era o resíduo da combustão de diferentes materiais orgânicos combinados para fins energéticos.

Figura 1: Estoque de lenha de Algaroba da lavanderia Nossa Senhora do Carmo.



Fonte: Arquivo do autor (2020).

A cinza coletada foi submetida à série de peneiras ABNT, dispostas em um agitador elétrico de peneiras, de marca solotest, a fim de executar o ensaio de determinação da composição granulométrica do material.

Seguindo as determinações da NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação, as peneiras utilizadas foram organizadas, respectivamente, de cima para baixo, com as seguintes aberturas de malha: 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 600 μm ; 300 μm ; 150 μm ; e 75 μm (ABNT, 2019).

A cinza passante da peneira de 75 μm foi utilizada para todos os ensaios do estudo, com o intuito de comparação com o cimento, ficando ambos com a mesma granulometria.

Para determinação da composição mineralógica, as cinzas foram submetidas ao difratômetro de raio-X, de marca Bruker, modelo D8 Advance, utilizando os seguintes parâmetros: radiação do $\text{CuK}\alpha$; tensão no tubo de 40 kV; corrente de 40 mA; varredura de $5^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$; e velocidade do goniômetro de $0,02^\circ$ por segundo (passo). O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais, da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA-UFRPE).

Utilizou-se o *software* X'Pert HighScore Plus para identificar os picos obtidos no difratograma, comparando-os com padrões já indexados no programa.

Cimento Portland

O cimento Portland utilizado no trabalho foi do tipo CP II-Z, classe 32, fabricado e doado pela Cimento Elizabeth, localizada no município de Alhandra/PB.

As informações referentes à característica químicas do cimento foram repassadas pelo fabricante por um laudo técnico, e pode ser observado na Tabelas 1.

Tabela 1: Características químicas do CP II-Z.

Características Químicas	Valores Médios (%)	Normas (ABNT)
Perda ao fogo	8,19	NM 18/12
Resíduo insolúvel	11,68	NM 15/12
SiO ₂	20,93	NBR 14656/01
Al ₂ O ₃	5,38	NBR 14656/01
Fe ₂ O ₃	2,17	NBR 14656/01
CaO	53,22	NBR 14656/01
MgO	4,50	NBR 14656/01
SO ₃	3,23	NBR 14656/01
Na ₂ O	0,24	NBR 14656/01
K ₂ O	1,01	NBR 14656/01

Fonte: Adaptada do boletim técnico fornecido pela Elizabeth Cimentos (2019).

Produção do concreto

Foi produzido um concreto padrão de classe C30, conforme a NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência; com resistência característica à compressão de 30 MPa aos 28 dias de moldagem (ABNT, 2015a).

Foi definido um traço padrão a partir de um estudo de dosagem, conforme o método recomendado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, por este ser baseado nos tipos de agregados mais comumente utilizados no Brasil (Rodrigues, 1995).

O concreto padrão produzido serviu para fins comparativos com as diferentes quantidades de cinzas adicionadas ao concreto. Os traços desenvolvidos foram denominados T0, sendo este o traço padrão obtido pelo estudo de dosagem, e T10, T20 e T40, conforme o percentual de cinza utilizado. A Tabela 2 mostra um resumo sobre essas informações.

Tabela 2: Quantitativo de corpos de prova moldados.

Traço	Porcentagem de Cinza	Formato	Quantidade de CPs
T0	0%	Cilíndrico	26
T10	10%	Cilíndrico	26
T20	20%	Cilíndrico	26
T40	40%	Cilíndrico	26

Fonte: Autores (2020).

Análise morfológica e de composição do corpo de prova rompido

Para a caracterização microestrutural dos concretos com cinza foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura, realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais, da UACSA.

Primeiramente, as amostras de concreto foram trituradas manualmente, a fim de que fossem aproveitadas as menores partículas; separou-se uma partícula para cada traço de concreto com cinza; e estas foram dispostas em porta-amostras metálicos, fixadas com o auxílio de fita de carbono, conforme a Figura 2.

Figura 2: Preparação das amostras dos concretos para caracterização.



Fonte: Autores (2020).

Após a preparação inicial das amostras, os porta-amostras foram submetidos à metalização com íons de ouro, sob os seguintes parâmetros: corrente de 40 mA; taxa de deposição de 2,92 Å/s; e tempo de 40 segundos. Na Figura 3 é possível observar a metalizadora utilizada no ensaio.

Figura 3: Amostras no processo de metalização.



Fonte: Autores (2020).

Finalizado o processo de metalização, as amostras foram depositadas no Microscópio Eletrônico de Varredura VEGA3, da TESCAN, com fonte de elétrons de filamento de tungstênio e Espectômetro de Energia Dispersiva acoplado, a fim de determinar a composição elementar do material. A Figura 4 ilustra o MEV utilizado na pesquisa.

Figura 4: MEV com EDS acoplado, do laboratório de caracterização de materiais da UACSA.



Fonte: Autores (2020).

3. Resultados e Discussão

Determinação da composição mineralógica da cinza

Após a caracterização pelo método do DRX e a obtenção do difratograma, utilizou-se o *software* X'Pert HighScore Plus para determinação das fases mineralógicas presentes no resíduo, comparando o difratograma com padrões indexados no programa.

Merrill e Bassett (1975) publicaram a ficha cristalográfica do carbonato de cálcio (CaCO_3), sob o código de referência 01-070-0095, cujos picos de difração correspondiam aos picos obtidos no ensaio aqui aplicado.

Também foi observada a presença de óxido de silício (SiO_2), cujo padrão de difração coincidiu com o padrão presente na ficha cristalográfica publicada por Parise et al., (1994), com código de referência 01-082-1409.

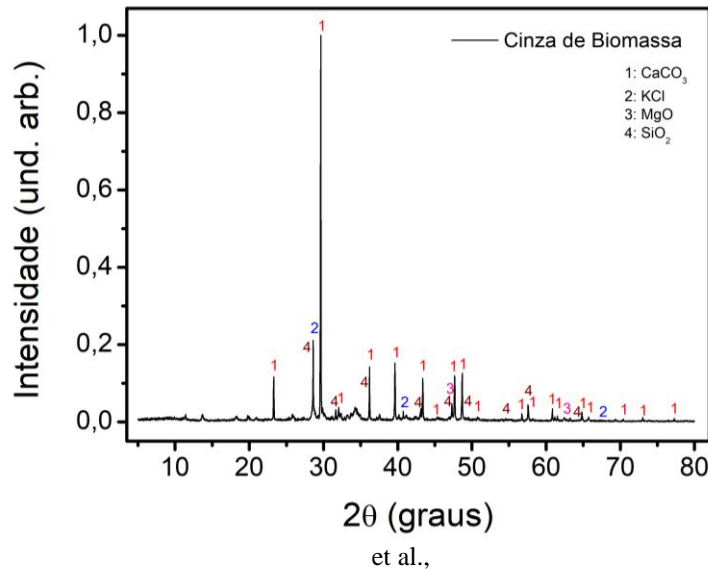
Hanawalt et al. (1938) publicaram a ficha cristalográfica de código 00-001-0786, referente ao cloreto de potássio (KCl). Os picos obtidos pelos pesquisadores correspondiam com picos obtidos nessa pesquisa.

Schiebold (1921) publicou a ficha cristalográfica, cujo código de referência é 01-075-1525, para o óxido de magnésio (MgO). O padrão dos picos de difração publicado no trabalho correspondia a picos encontrados na presente caracterização.

A partir do difratograma obtido e da comparação com os padrões encontrados no *software*, a maior parte dos picos de difração referentes à cinza de biomassa mista foi identificada conforme sua fase característica. A identificação dos picos pode ser observada na Figura 5.

No gráfico, nota-se que a cinza de biomassa mista é um material com uma composição mineralógica multifásica, porém, destaca-se a grande quantidade de picos referentes à fase CaCO_3 , tendo o pico de maior intensidade em $2\theta = 29,6272^\circ$, além da presença considerável de SiO_2 , sendo uma fase representativa no material.

Figura 5: Difratoograma da cinza de biomassa mista com identificação dos picos.



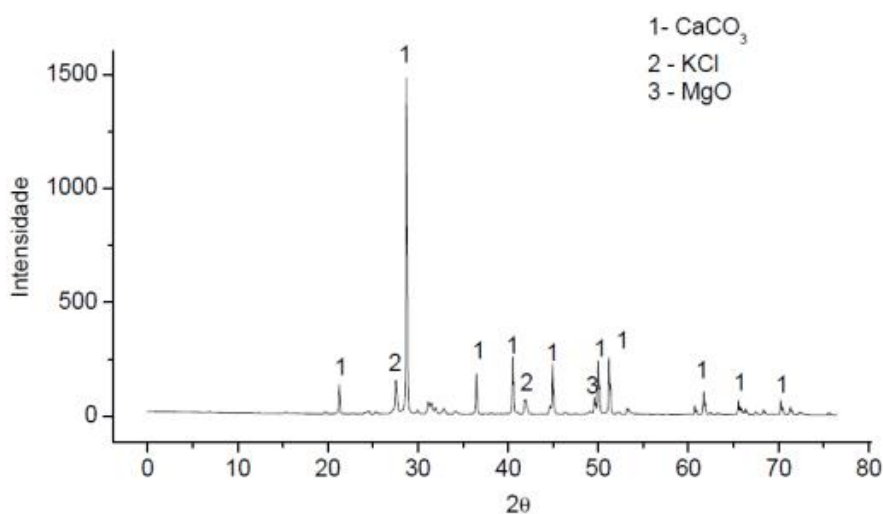
Segundo Borlini *et al.* (2005), a presença de carbonato de cálcio em quantidade elevada está relacionada à quantidade de óxido de cálcio no material, enquanto a presença de óxido de silício está relacionada à fase cristalina da sílica, o quartzo, que reduz a atividade pozolânica do resíduo (Moura *et al.*, 2012).

O padrão de difração encontrado coincide com o padrão obtido por Nascimento (2014), Pires (2016) e Lima (2019), que utilizaram a cinza da lenha de Algaroba em seus respectivos trabalhos.

Apesar da cinza utilizada nesse trabalho não ter sido puramente proveniente da lenha de Algaroba, devido à utilização de outras fontes energéticas pela lavanderia, o fato de a lenha de Algaroba ser responsável por 70% da alimentação da caldeira influenciou diretamente no tipo da cinza coletada, dada a semelhança mineralógica entre o resíduo utilizado nesse trabalho e o resíduo utilizado nos trabalhos citados.

Na Figura 6 é possível analisar o difratograma obtido por Nascimento (2014), cujas fases cristalinas encontradas são CaCO₃, KCl e MgO, também encontradas no ensaio aqui relatado.

Figura 6: Difração de raio-X da cinza de Algaroba.



Fonte: Nascimento (2014).

A quantidade representativa de SiO₂ na cinza de biomassa mista pode estar atrelada à utilização do resíduo de movelaria e dos *pellets* de madeira na alimentação da caldeira, uma vez que a cinza proveniente apenas da lenha de Algaroba possui baixos teores do óxido de silício, conforme Melo (2012) e Leloup (2013).

Na Tabela 3 é possível observar os teores dos óxidos contidos na cinza de Algaroba, determinados pelo método da fluorescência de raio-X (FDX). A comprovação do elevado teor de carbonato de cálcio na CBM confirma o resíduo como um potencial *filler* alternativo, como apontado por Melo (2012).

Tabela 3: FDX da cinza da lenha de Algaroba.

Óxidos	Percentual (%)
CaO	77,85
K ₂ O	13,81
SiO ₂	4,09
Fe ₂ O ₃	2,14
SO ₃	1,60
Sc ₂ O ₃	0,27
MnO	0,12
ZnO	0,10
CuO	0,03

Fonte: Leloup (2013).

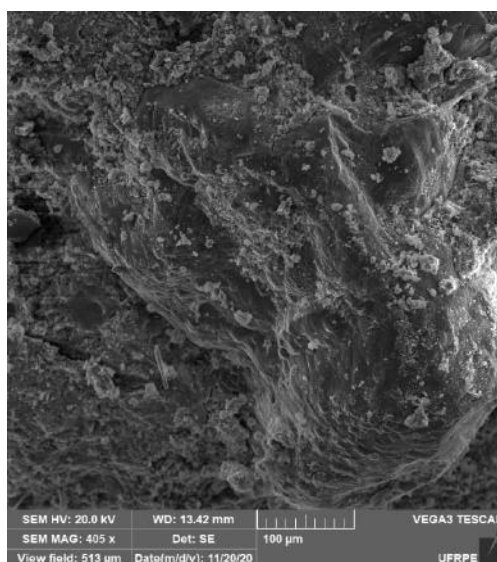
Análise microestrutural do concreto com CBM

Nas Figuras 7, 8 e 9, observa-se as micrografias das partículas da pasta do concreto dos traços T10, T20 e T40 obtidas pela aplicação do MEV. Destaca-se a visualização da mistura dos materiais para cada traço, visto uma maior presença de material granular entre os traços na pasta de cimento endurecida.

Nascimento *et al.* (2019) atribuem essa boa interação física entre cinza e cimento à área superficial específica da cinza, que gira em torno de 4400 cm²/g, isto é, um valor próximo à área superficial específica do cimento utilizado nessa pesquisa que foi de 4546 cm²/g.

Na Figura 7, observa-se as micrografia da partícula da pasta do concreto desenvolvido para o traço com adição de 10% da cinza, obtidas pela aplicação do MEV.

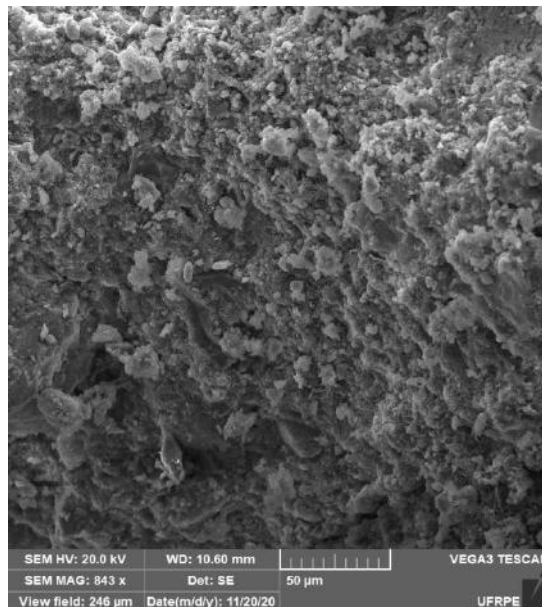
Figura 7: Micrografia da cinza na estrutura do concreto do traço T10, com resolução de 100 µm.



Fonte: Autores (2020).

Na Figura 8, observa-se as micrografia da partícula da pasta do concreto desenvolvido para o traço com adição de 20% da cinza, obtidas pela aplicação do MEV.

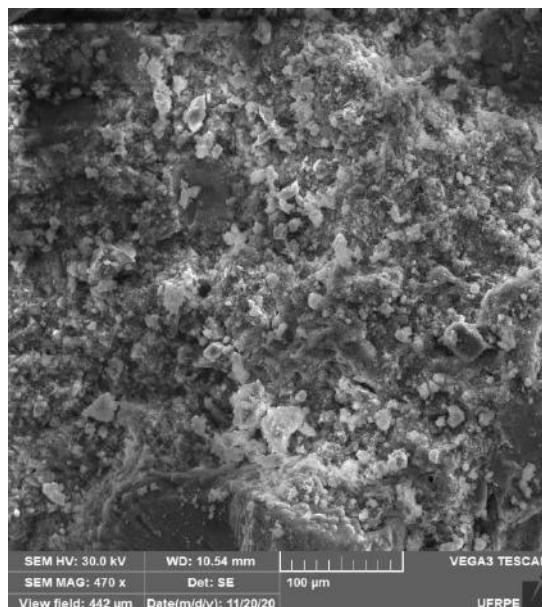
Figura 8: Micrografia da cinza na estrutura do concreto do traço T20, com resolução de 50 μm .



Fonte: Autores (2020).

Na Figura 9, observa-se as micrografia da partícula da pasta do concreto desenvolvido para o traço com adição de 40% da cinza, obtidas pela aplicação do MEV.

Figura 9: Micrografia da cinza na estrutura do concreto do traço T40, com resolução de 100 μm .

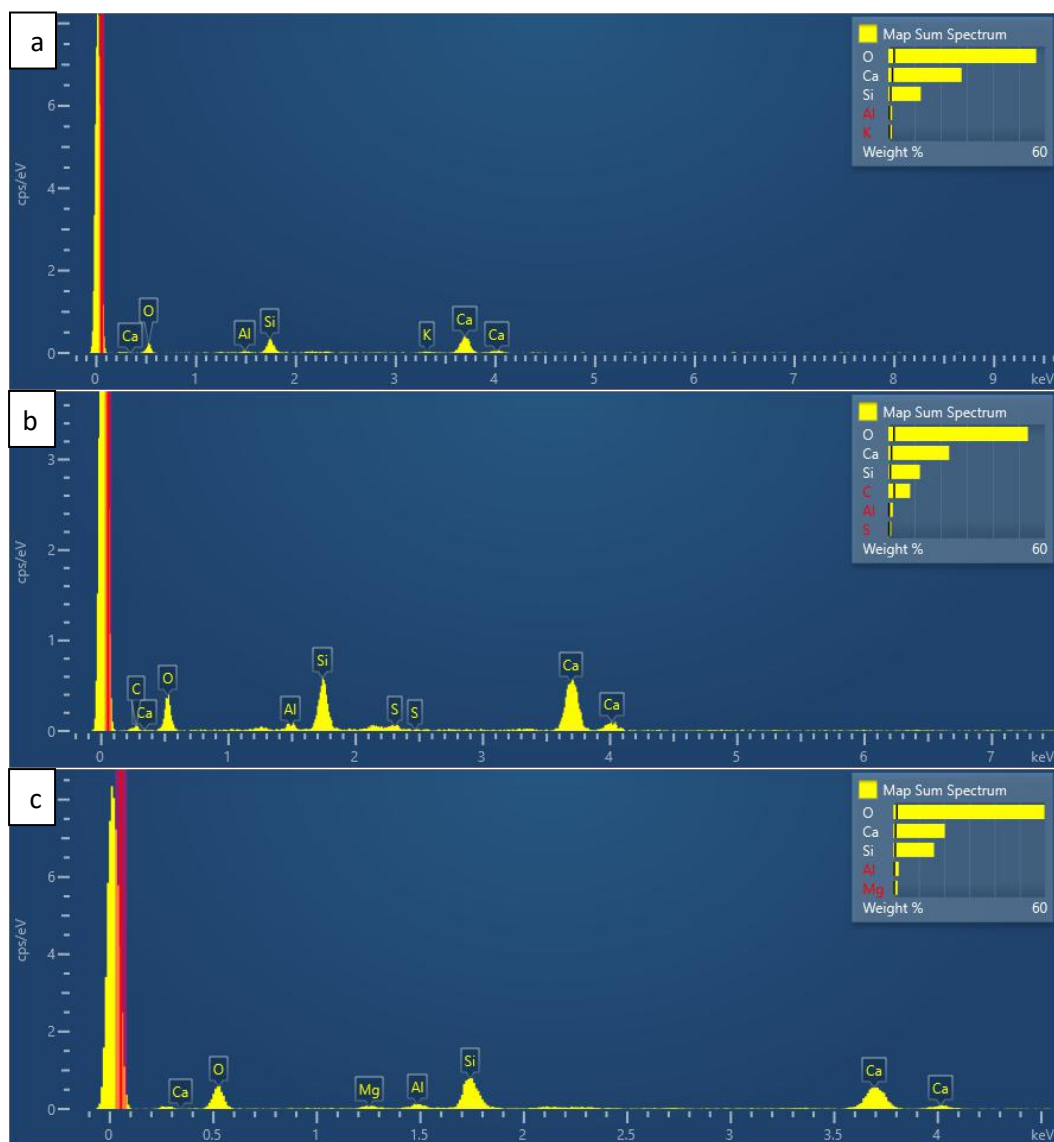


Fonte: Autores (2020).

Na Figura 10, vê-se o resultado da espectrometria por energia dispersiva, obtido através do EDS, para os três traços desenvolvidos. Após o oxigênio, presente em todos os óxidos, notou-se que o cálcio é o elemento mais abundante nos três concretos, confirmando o acréscimo do elemento através da cinza, que tende a ser um *filler* calcário alternativo.

Também foram identificados outros elementos, tais como Si, Al, K, C, S, e Mg, sendo o Si mais relevante, presente na cinza e nos agregados. O aparecimento do Mg no traço com 40% de cinza confirma a observação feita por Nascimento *et al.* (2019), que desenvolveram cimentos substituindo parcialmente o clínquer pela cinza de Algaroba e obtiveram maiores teores de Mg conforme a proporção de cinza no sistema aumentou.

Figura 10: Resultado do EDS para o concreto dos traços: a) T10; b) T20; c) T40.



Fonte: Autores (2020).

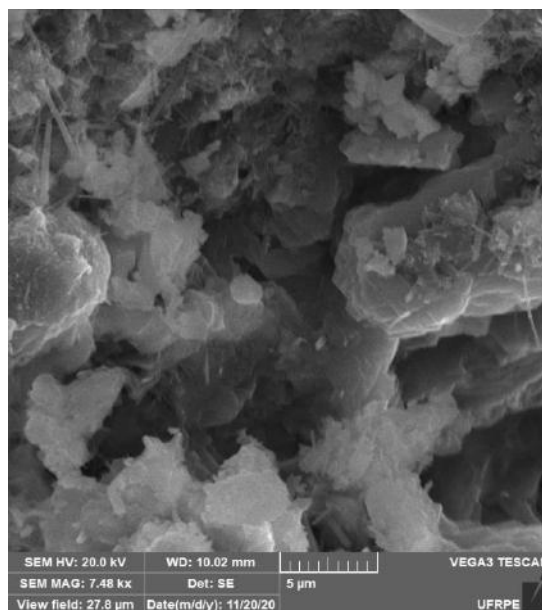
Conforme as Figuras 11, 12 e 13, foi identificada a presença da fase etringita tardia nos três concretos desenvolvidos.

Segundo Katsioti *et al.* (2011), a etringita é um mineral que possui aspecto acicular, formado por sulfoaluminato de cálcio nas primeiras horas da hidratação, a partir da reação entre o gesso e o aluminato de cálcio.

Ainda segundo os autores, a etringita tardia é um caso especial de recristalização da etringita, cuja formação é normalmente associada aos ataques de sulfato do próprio cimento ao concreto, em ambientes de cura de alta umidade e temperatura acima de 70°C (Silva, Fonseca, Bento & Monteiro, 2017) ou com elevado calor de hidratação (Neville, 2016).

Na Figura 11 podemos verificar a presença da etringita tardia no concreto desenvolvido para o traço com adição de 10% da cinza.

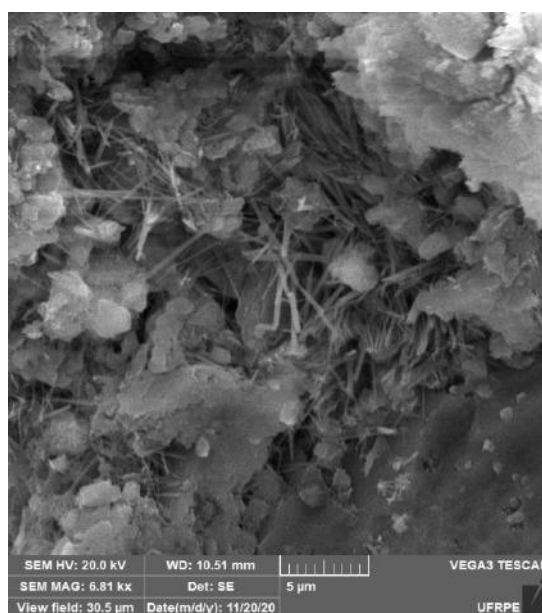
Figura 11: Etringita presente no concreto do traço T10.



Fonte: Autores (2020).

Na Figura 12 podemos verificar a presença da etringita tardia no concreto desenvolvido para o traço com adição de 20% da cinza.

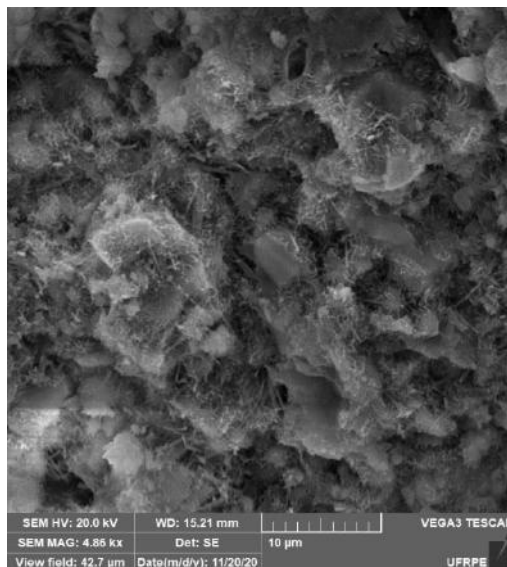
Figura 12: Etringita presente no concreto do traço T20.



Fonte: Autores (2020).

Na Figura 13 podemos verificar a presença da etringita tardia no concreto desenvolvido para o traço com adição de 40% da cinza.

Figura 13: Etringita presente no concreto do traço T40.



Fonte: Autores (2020).

Apesar dos poucos relatos em literatura e do entendimento pouco consistente sobre os mecanismos de formação da etringita tardia, o surgimento dessa fase cristalina normalmente está associado a problemas mecânicos no material, como expansão do concreto e fissuras pelas tensões na microestrutura (Torres & Andrade, 2016).

Destaca-se que o aspecto visual da etringita tardia encontrada no concreto do traço T20 é semelhante ao que Melo (2010) chamou de etringita neoformada em cavidade de pasta.

Nos experimentos realizados por Torres e Andrade (2016), os cimentos dos tipos CP II-E e CP II-F apresentaram teor de SO₃ maior que 3% e se mostraram favoráveis ao desencadeamento de etringita tardia e, conseqüentemente, expansão dos sistemas cimentícios.

O cimento do tipo CP II-Z utilizado nessa pesquisa apresentou teor de SO₃ de 3,23% e, diante das Figuras 11, 12 e 13, a grande presença de etringita tardia coincidiu com o aumento da proporção de cinza no sistema. Possivelmente, essas condições favoreceram o desenvolvimento dessa fase cristalina, além das condições de cura.

4. Conclusão

A cinza de biomassa mista proveniente da caldeira da lavanderia é um material rico em CaCO₃, contendo também outros óxidos, sendo, portanto, compatível com a composição química do cimento. Também é um material menos denso que o cimento, porém, de granulometria semelhante, quando considerado apenas o resíduo pulverulento.

Diante da sua composição química e dos estudos já desenvolvidos até aqui, o resíduo tem melhor aproveitamento como *filler*, quando tem função de adição mineral em sistemas cimentícios e tende a melhor preencher os espaços vazios dos materiais, reforçando as propriedades mecânicas destes.

A etringita tardia identificada pela microscopia, bem como sua maior ocorrência conforme aumento do teor de cinza, para além das condições de cura, pode estar relacionada à presença do resíduo e o tipo de cimento utilizado na produção do concreto. O referido mineral é normalmente associado a problemas estruturais em compósitos de matriz cimentícia, causando expansão e favorecendo fissuras.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a investigação da etringita tardia, devido ao conhecimento limitado sobre a sua formação, recomenda-se investigar a influência da cinza de biomassa na formação dos referidos cristais.

Silva, D. L., Fonseca, J. M. M., Bento, A. J., & Monteiro, E. C. B. (2017). Considerações sobre a formação de etringita tardia (DEF). *Revista Construindo*, 9 (2), p. 36-46.

Silva, M. V. A., Silva, A. L., Brito, D. J. M., Branco, D. K. S., & Ferreira, M. O. (2012). A questão ambiental no polo de confecções de Caruaru: um primeiro ensaio à luz dos instrumentos econômicos de proteção ambiental. *Revista Estudos do CEPE*, 35, p. 108-32.

Sindicato Nacional da Indústria do Cimento [SNIC]. (2017). *Produção Nacional de Cimento por regiões e estados (t)*. <http://www.snic.org.br/numeros/numeros.asp?path=ProducaoRegional2016.gif>.

Torres, I. F., & Andrade, T. (2016). Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife – PE – Brasil. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 9 (3), p. 357-94.