

Potencialidades da cinza de biomassa do beneficiamento de óleo de palma para materiais à base de cimento. Parte I: caracterização microestutural, mineralógica e atividade pozolânica

Potentialities of biomass ash from palm oil processing for cement-based materials. Part I: microstructural, mineralogical and pozzolanic activity characterization

DOI:10.34117/bjdv7n3-487

Recebimento dos originais: 08/02/2021

Aceitação para publicação: 01/03/2021

Marco Antônio Barbosa de Oliveira

Prof. M Sc em Engenharia Civil

Instituição: Instituto Federal do Pará/Campus Belém

Endereço: Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP: 66093-020, Belém, Pará, Brasil

E-mail: marco.barbosa@ifpa.edu.br

Carlos Eduardo Moreira Umbuzeiro

Mestre em Engenharia de Materiais

Instituição: Instituto Federal do Pará

Endereço: Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP: 66093-020, Belém, Pará, Brasil

Welton Raiol de Assunção

Mestre em Engenharia de Materiais

Instituição: Instituto Federal do Pará

Endereço: Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, CEP: 66093-020, Belém, Pará, Brasil

E-mail: wra_engenharia@yahoo.com.br

Bruna Baia da Cunha

Mestre em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

Endereço: Rua Augusto Corrêa, 01, Guamá, CEP: 66075-970, Belém, Pará, Brasil

E-mail: brunabcunha@ufpa.br

Robson da Silva Fernandes

Mestre em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

Endereço: Rua Augusto Corrêa, 01, Guamá, CEP: 66075-970, Belém, Pará, Brasil

E-mail: rsfernandes@ufpa.br

Alcebíades Negrão Macêdo

Prof. Dr. em Engenharia Civil

Instituição: Universidade Federal do Pará

Endereço: Rua Augusto Corrêa, 01, Guamá, CEP: 66075-970, Belém, Pará, Brasil

E-mail: anmacedo@ufpa.br

RESUMO

A biomassa do processo de extração de óleo de palma (dendê) comumente utilizada como combustível em caldeiras produzem elevados volumes de cinzas da queima da biomassa. A biomassa e cinza constituem um resíduo sólido capaz de causar danos e impactos ambientais. As cinzas apresentam potencialidade para uso alternativo em materiais à base de cimento. Esta pesquisa tem a intenção de valorizar as cinzas de biomassa de óleo de palma. Deste modo nesta primeira parte desta pesquisa foi realizada a caracterização por meio de microestrutura eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS) da cinza obtida por resfriamento ao ambiente (lento) e por choque térmico (brusco). Enquanto a análise somente da cinza obtidas a partir de resfriamento choque térmico (brusco) para a difração de raios X (DRX) e atividade pozolânica. Os resultados indicaram a presença de fibras com cavidades na superfície preenchidas por partículas de morfologias globulares com predominância do elemento químico silício (Si) na análise de caracterização elementar por EDS. A difração de raios X apresentou um halo amorfo entre 20° e 30° (2θ) com a identificação de picos das fases de quartzo e de calcita. As amostras com substituição do cimento *Portland* por cinza de biomassa apresentaram atividade pozolânica com índice desempenho de 100%. Desta maneira, a valorização da cinza de biomassa de óleo de palma (dendê) pode apresentar potencialidade para uso como adição mineral em materiais à base de cimento.

Palavras-Chave: Cinza de Biomassa, Óleo de palma, Dendê, Microestrutura, Difração de raios X, Pozolanas.

ABSTRACT

The biomass from the palm oil extraction process commonly used as fuel in boilers produces high volumes of ash from burning biomass. Biomass and ash are a solid waste capable of causing damage and environmental impacts. The ashes have the potential for alternative use in cement-based materials. This research has the intention of valuing palm oil biomass ashes. Thus, in this first part of this research, the characterization was performed by means of scanning electronic microstructure (SEM) and X-ray spectroscopy by dispersive energy (SDE) of the ash obtained by cooling to the environment (slow) and by thermal shock (sudden). While analyzing only the ash obtained from cooling thermal shock (sudden) for X-ray diffraction (XRD) and pozzolanic activity. The results indicated the presence of fibers with cavities on the surface filled by particles of globular morphologies with predominance of the chemical element silicon (Si) in the analysis of elementary characterization by SDE. X-ray diffraction showed an amorphous halo between 20° and 30° (2θ) with the identification of peaks in the quartz and calcite phases. The samples with replacement of Portland cement by biomass ash showed pozzolanic activity with a 100% performance index. In this way, the valorization of palm oil (palm oil) biomass ash may present potentiality for use as mineral addition in cement-based materials.

Keywords: Biomass ash, Palm oil, Dendê, Microstructure, X-ray diffraction, Pozzolana.

1 INTRODUÇÃO

O dendezeiro é uma palmeira originária da África que foi trazida para o Brasil no século XVII, pelos escravos. O dendezeiro pertencente à família das ericáceas, e se propaga por meio de sementes, e constitui atualmente, a oleaginosa cultivada com valor econômico

de maior produtividade do mundo, chegando a produzir mais de 8 toneladas de óleo por hectare ao ano. A cadeia produtiva do dendê ou óleo de palma, que vai da produção agrícola, passando pela extração e refino do óleo, produz insumos e bens de consumo final de alto valor comercial, e que serve de base para as indústrias químicas, farmacêuticas e alimentícias [1].

O relatório preliminar 2019/2020 da Foreign Agricultural Service/USDA aponta que a produção mundial de óleo de palma atingiu 73,23 milhões de toneladas métricas. A Indonésia e a Malásia ocupam as primeiras posições no ranking mundial de produção de óleo de palma, respectivamente, com 43,50 ton e 19,90 ton. A projeção de janeiro/2021 Foreign Agricultural Service/USDA indica uma produção mundial de óleo de palma em 75,46 milhões de toneladas métricas. As estimativas apontam que deverá ocorrer um crescimento para 85 a 110 milhões de toneladas durante o período de 2020 à 2021 [2, 3].

O Brasil ocupa a 9º posição no ranking mundial de produção de óleo de palma responsável por 395,000 ton/ano. O Estado do Pará ocupa a 1º posição nacional de produção de óleo de palma com 3.200,000 t/CFF (cacho de frutos fresco), área plantada de 231.669 hectares e área colhida de 200.000 hectares, deste com 40 mil hectares em áreas de agricultores familiares. No Estado do Pará há instalada dez empresas de pequeno, médio e grande porte, que atuam em 33 municípios, nas regiões de integração do Rio Caeté, Rio Capim, Guajará, Guamá, e principalmente na Tocantina. O município de Tailândia ocupa a 1º posição no ranking estadual com uma produção de 942.084,000 toneladas, que representa 37,03% do total [4].

A partir do processamento dos frutos do dendezeiro tem-se produtos e subprodutos como óleo de palma bruto (20 %), óleo de palmiste (1,5 %), engaços ou cachos vazios, sem frutos (22%), torta de palmiste (3,5 %), cascas da semente (5 %) e fibras de prensagem do mesocarpo (12 %) e o POME (Palm oil mill efluente). O principal produto beneficiado é o óleo de palma, extraído do mesocarpo, e o óleo de palmiste, extraído do endosperma. A casca (endocarpo) da semente, que corresponde a amêndoa. A matriz fibrosa do mesocarpo, que equivale a polpa e o POME, efluentes líquidos [5, 6].

Dentre os resíduos lignocelulósicos gerados tem-se os engaços ou cachos vazios com destaque, haja visto que a cada tonelada de óleo de palma processado são geradas 1,1 toneladas de engaços ou cachos vazios. Estes engaços ou cachos vazios compõe um suporte fibroso que promove sustentação ao fruto e correspondem de 22 a 25 % do peso dos cachos de frutos frescos (CFF) processados [5].

Deste modo no processo produtivo de beneficiamento de óleo de palma há a produção de enorme volume de biomassa seca (resíduos), que se tornam resíduos a partir de restos de fibras e grãos [3]. A biomassa corresponde aos materiais naturais utilizados como combustíveis (resíduos florestais, agrícolas e industriais, para gerar calor e eletricidade. A biomassa vegetal possui características de acordo com o teor de celulose, hemicelulose e lignina [8,9]. As frações de celulose, hemicelulose e lignina correspondem a mais de 90% da massa seca total [10].

Os engaços ou cachos vazios, fibras e cascas possuem destinação como fonte de energia ou combustível nas caldeiras [7]. Os resíduos da agroindústria de dendê (engaços ou cacho vazio, fibra do mesocarpo e casca), quando utilizados como combustível, são incinerados no processo de aquecimento de caldeiras que podem atingir temperaturas de 1000 °C, a fim de produzir vapor para a extração do óleo de palma e a geração de energia elétrica na usina. Entretanto no processo de queima da biomassa surge a cinza da biomassa. Segundo Gobbi [11] e Tonnyayopas *et al.* [12], esta queima resulta na produção de enormes volumes de cinzas (cerca de 5% em massa), dispostos comumente em aterros sanitários.

As cinzas geradas não constituem um produto com visão de retorno financeiro para as agroindústrias de óleo de palma, sendo depositadas em aterros ou locais inapropriados para sua disposição, que resultam em danos ao meio ambiente. E cada vez há um crescimento do volume de biomassa nesta agroindústria, que precisam de soluções eficazes para o reaproveitamento desses resíduos [13,14]. A cadeia produtiva do óleo de palma é geradora de uma variedade de resíduos, que necessitam de gerenciamento eficiente e destinação ambiental adequada [7]. É necessário buscar-se mais alternativas para a utilização dos resíduos lignocelulósicos resultantes do processo de extração de óleo de palma.

As pesquisas com o intuito de mitigar esta problemática visam a utilização das cinzas da biomassa de óleo de palma como material pozolânico alternativo em produtos à base de cimento, por ser um material rico em sílica reativa, que pode substituir parcialmente ao cimento *Portland* e promover sustentabilidade. Essas cinzas apresentam heterogeneidade quanto a composição química, morfologia, forma e tamanhos de partículas, que variam em função da temperatura e tempo de permanência no forno e do tipo de biomassa [15].

Tay [16], observou ao utilizar cinzas de biomassa de óleo de palma sem qualquer tratamento prévio em materiais cimentícios, que possuiu baixas propriedades pozolânicas,

recomendando que a substituição de cimento *Portland* por cinzas de óleo de palma não deve exceder 10% em massa [17].

Tonnayopas *et al.* [12], pesquisou a incorporação de cinzas de óleo de palma em concretos nos teores entre 5% a 30% por massa de cimento *Portland*, em que constatou a redução na resistência à compressão nas idades inferiores a 21 dias, porém melhores desempenhos nas idades acima de 28 dias para teores entre 5% e 15%, provavelmente devido a reação pozolânica. Muthusamy e Azzimah [18], avaliou a utilização de cinzas de óleo de palma em concretos leves, e obteve melhores resistências à compressão com 20% de substituição do cimento *Portland*.

A utilização da cinza de óleo de palma também se mostrou eficaz na melhoria da durabilidade de materiais cimentícios, pois contribuiu para a redução do potencial de difusão de cloretos e processo de corrosão [18]. Promoveu a redução do calor de hidratação do cimento *Portland*. Aumento da resistência a ambiente ácidos e sulfatados [19]. Reduziu as expansões associadas as reações álcali-sílica em concretos [20].

Nesse sentido, este artigo na parte (I) visa a valoração da cinza de biomassa de óleo de palma por meio da caracterização microestrutural, mineralógica e atividade pozolânica a partir da potencialidade de uso em produtos à base de cimento, concretos e argamassas.

2 MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Cimento e Agregado Miúdo

Utilizou cimento Portland do tipo CP II F-32 e areia normal nas quatro frações padronizadas pelo IPT para a avaliação da atividade pozolânica ou índice de desempenho, conforme NBR 5752 [21] e NBR 7214 [22].

2.1.2 Cinza

Os cachos esterilizados representam 89,27% dos cachos de frutos frescos e 10,73% corresponde ao condensado do esterilizador. Os cachos esterilizados subdividem-se em: 24,63% de cachos vazios e 64,64% de frutos. Após a prensagem do fruto tem-se 21,0% de óleo de palma bruto e 12,60% de resíduo, com 1,1% de resíduo sólido. Ainda na fase de prensagem ocorre a separação de fibra úmida (31,04%) e caroço com amêndoa (19,83%), segundo os dados da empresa. Os cachos vazios ou engaços e as fibras do mesocarpo (biomassa) são utilizadas como combustível na fornalha da caldeira para a extração do óleo de palma (dendê). Neste processo de queima numa temperatura de aproximadamente 500

°C surge a cinza de biomassa cedidas pela empresa localizada no Município de Santo Antônio do Tauá, no Estado do Pará.

2.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

As amostras de cinzas retiradas da fornalha da caldeira foram separadas em dois grupos distintos, um com cinza de biomassa de óleo de palma resfriadas lentamente a temperatura ambiente (CBOP-RA), e outro com cinza de biomassa de óleo de palma resfriadas com água logo após sair da fornalha para sofrer choque térmico (CBOP-RCT). Portanto, avaliar (CBOP-RCT) como uma pozolana artificial, com a finalidade de evitar a recristalização das fases amorfas (reativas) ocorrida no resfriamento ao ambiente (lento) [23]. Ambas (CBOP-RA) e (CBOP-RCT) apresentam coloração cinza escuro em decorrência de matéria orgânica não incinerada, principalmente de fibras do mesocarpo. Não foram submetidas a processo de moagem e nem calcinação.

2.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de Dispersão de Energia (EDS)

Análise de micrografias para avaliar a morfologia ou microestruturas de alterações superficiais, geometria, rompimento ou degradação (CBOP-RA) e (CBOP-RCT). Ainda para a caracterização elementar dos elementos químicos presentes. O aparelho utilizado para ensaio foi um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), acoplado à um Sistema de Espectroscopia de raios X de Energia Dispersiva (EDS), modelo VEJA 3 SBU com voltagem de 20 Kv.

2.2.2 Difração de Raios-X (DRX)

As medições e identificação de fases mineralógicas ocorreu por Difração de raios X (DRX) somente para a (CBOP-RCT) em função de haver mais potencialidade de atividade pozolânica. A análise ocorreu em equipamento modelo Shimadzu XRD-6000, com parâmetros de análise de 30 kV e 30 mA, com faixas de varreduras (2θ) entre 5° a 75°. A identificação de fases ocorreu a partir de fichas de banco de dados para estruturas cristalinas, coletado e mantido pelo *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS).

2.2.3 Atividade Pozolânica

A análise de pozolanicidade ocorreu, conforme NBR 5752 [21], e somente para a (CBOP-RCT), pois ao promover um contato com a água logo após sair da fornalha da caldeira em alta temperatura propicia um choque térmico (tratamento de resfriamento brusco), que acarreta estabilização das reações e fases com estruturas amorfas e vítreas desenvolvidas por não ter tempo suficiente para formação de cristais. A Figura 1 mostram os corpos de prova moldados. É possível observar que a (CBOP-RCT) proporcionou a coloração cinza escuro aos corpos de prova em relação a referência, que apresentam a cor característica de cinza claro.

Figura 1 – Corpos de prova de referência e CBOP-RCT



3 RESULTADOS E DISCURSÕES

3.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Nas amostras (CBOP-RA) e (CBOP-RCT) é possível observar fibras não incineradas. As amostras (CBOP-RA) apresentam-se a superfície mais externa com rugosidade acentuada e a exposição das fibrilas. Ainda se verifica uma leve desagregação das fibras em microfibrilas de celulose, que pode ocorrer em função da retirada parcial da lignina e da hemicelulose, que estão presentes na estrutura da fibra, e possuem a função de matriz para unir as fibrilas da celulose. Nota-se que a superfície da fibra se apresenta revestida por partículas com morfologia globulares fixadas em cavidades ou microcavidades, conforme mostra a Figura 2. Enquanto as amostras (CBOP-RCT) apresentam fibras com a superfície mais externa com menos rugosidade, exposição das fibrilas e desagregação das fibras em microfibrilas, entretanto muito mais significativa a presença das partículas globulares, que contribuem para a irregularidade da superfície, conforme mostra a Figura 3.

Silva *et. al.* [24], estudou a fibra de coco imersa em solução na proporção de 15 g Cimento Portland CP V ARI e 55 g de água deionizada (Cimento-15). Observou que grande parte das cavidades superficiais da fibra não continha mais as partículas globulares em decorrência das reações de hidratação do cimento que formou hidróxido de cálcio e promoveu um aumento do pH da solução para 13. Em ambas as micrografias mostradas nas Figuras 2 e 3 constatam-se que não intensa degradação da superfície da fibra e da lignina por meio da reação de hidrólise básica e nem deslocamento pronunciado entre as microfibrilas celulósicas ou mesmo processo de desfibrilação ou ruptura.

Figura 2 – Amostras (CBOP-RA) com ampliação de 500x (A) e 1000x (B).

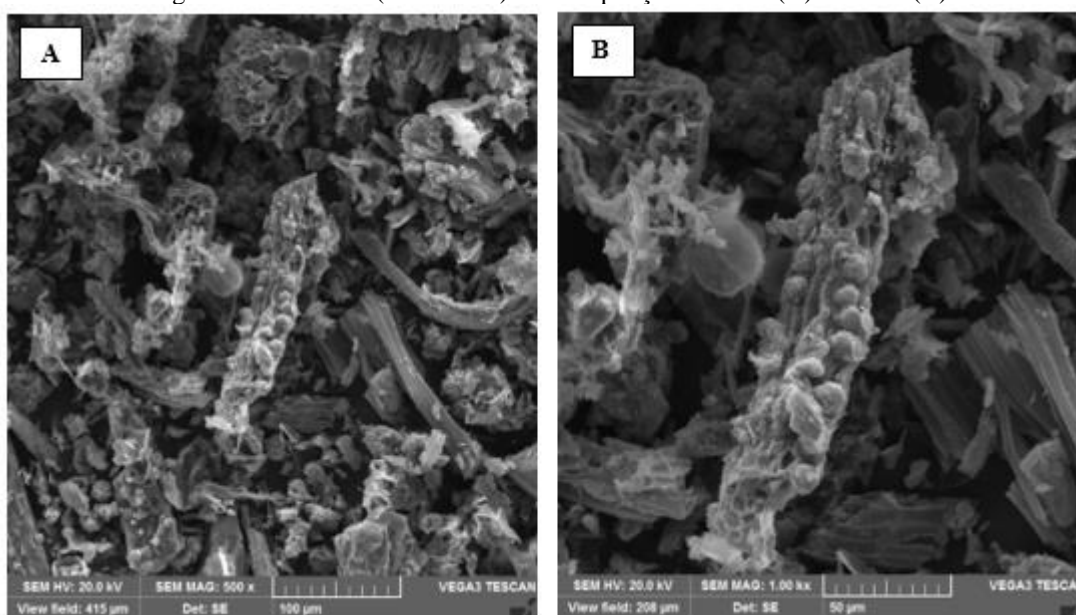
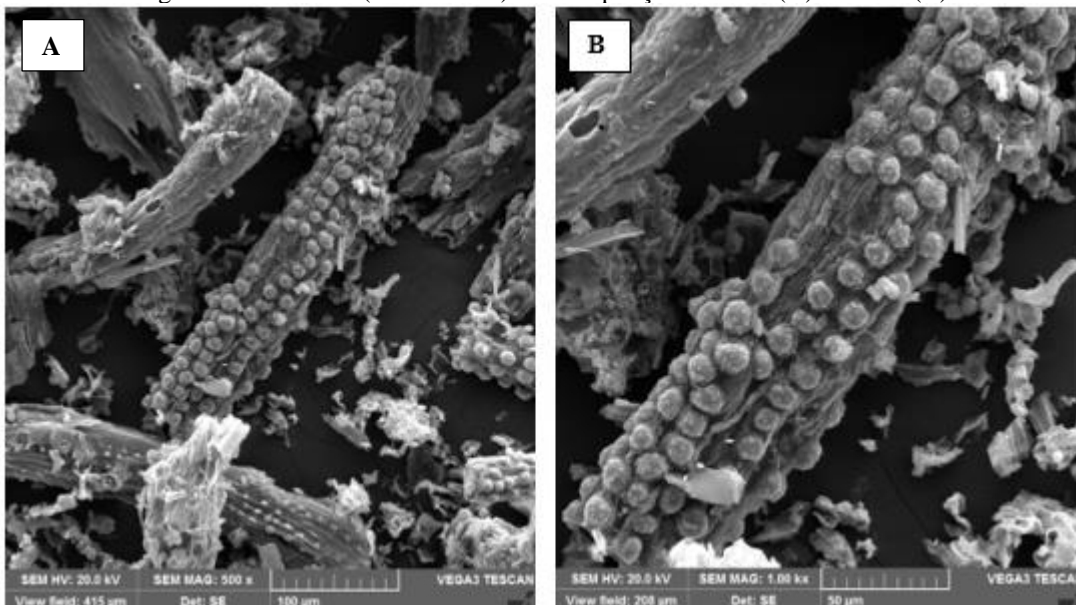


Figura 3 – Amostras (CBOP-RCT) com ampliação de 500x (A) e 1000x (B).



3.2 ESPECTROMETRIA DE DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS)

As análises pontuais de EDS das amostras (CBOP-RA) e (CBOP-RCT) estão mostradas nas Figuras 4 e 5. Nas amostras (CBOP-RCT), que apresentam mais partículas globulares verifica-se a predominância de concentração e % mássica do elemento silício. Outras pesquisas com cinzas de biomassa identificaram também as partículas globulares com presença de silício [7, 25, 26, 27].

Figura 4 – EDS (CBOP-RA).

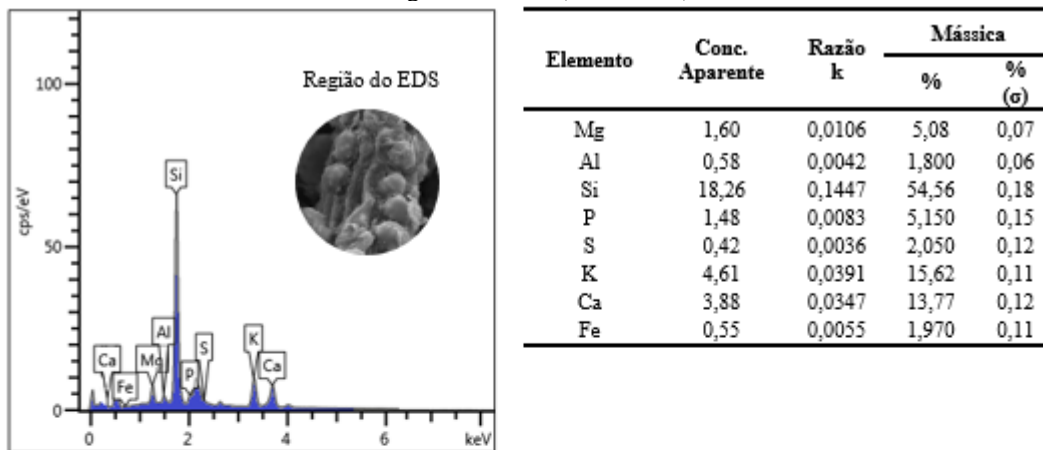
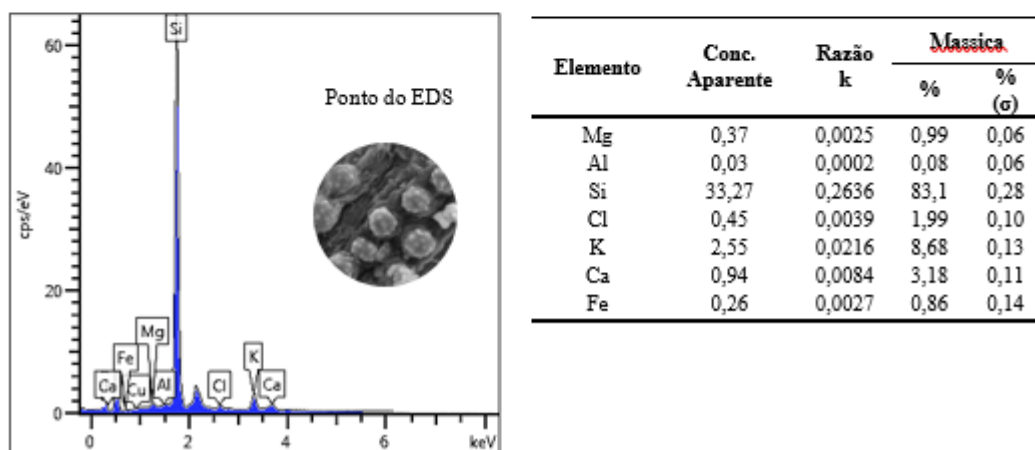


Figura 5 – EDS (CBOP-CT).



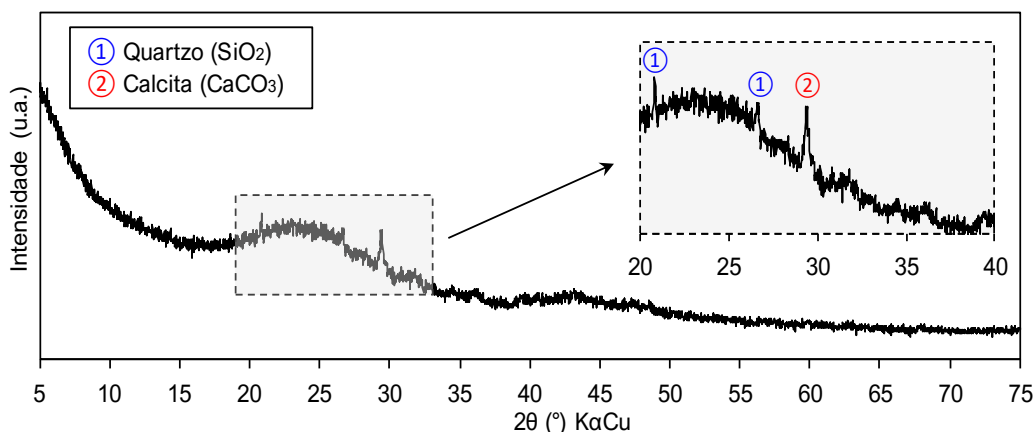
3.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A Figura 6 mostra a análise de difração de raios X da amostra (CBOP-RCT), em que é possível constatar a banda ou halo amorfo, característico da estrutura amorfa, reativa e contribui para a atividade pozolânica. As fases identificadas no halo amorfo tratam-se da SiO₂ (sílica) na forma polimórfica de quartzo-α e da Calcita (CaCO₃), entre 20° e 30° (2θ). Coelho *et al.* [28], Lim *et al.* [26], Kroehong *et al.* [29] e Hoppe Filho *et al.* [30],

identificaram halo amorfo entre 20° e 35° (2θ) com picos da fase SiO_2 na forma de quartzo, e obteve a atividade pozolânica. Chea *et al.* [31], Hoppe Filho *et al.* [30] e Coelho *et al.* [28], identificaram a fase (SiO_2) na forma de quartzo- α e cristobalita no halo amorfo entre 20° e 35° (2θ).

Os planos cristalinos característicos dos materiais lignocelulósicos localizam-se em 15° , 23° e 34° (2θ). Os picos cristalinos mais importantes em $16,6^\circ$ e $22,5^\circ$ (2θ), atribuídos aos (200) e (110) planos cristalográficos da celulose [32]. As moléculas de celulose distribuem-se de modo aleatório, com tendência para a formação de ligações de hidrogénio intra e intermoleculares, enquanto a lignina e a hemicelulose representam macromoléculas amorfas [33].

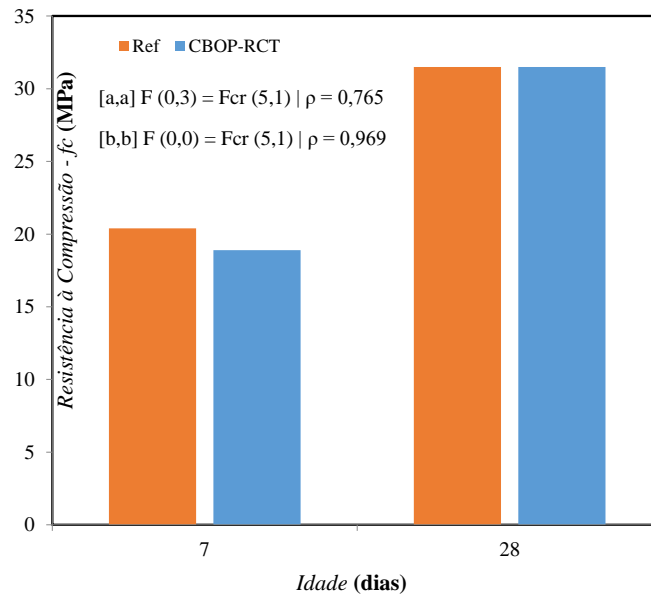
Figura 6 – Medição e identificação de fases mineralógicas da amostra (CBOP-RCT).



3.4 ATIVIDADE POZOLÂNICA

A cinza de óleo de palma (pozolana artificial) apresenta significativos teores da fase polimórficas de SiO_2 na forma de quartzo, tridimita, cristobalita [20]. A sílica reativa desta pozolana artificial ao reagir com a CaOH (portlandita) e a cal livre (CaO), produz silicato de cálcio adicional. Esta atividade pozolânica influencia na resistência dos compósitos cimentícios [34]. Neste ensaio utilizou (CBOP-RCT), obtendo-se resultados médios aos 7 e 28 dias de idade, conforme mostra a Figura 7. As rupturas das amostras ocorreram dos tipos A (cônica e cônica) e D (cônica e cisalhada), segundo a NBR 5739 [39].

Figura 7 – Atividade pozolânica de referência e (CBOP-RCT).



Verifica-se que não houve diferença estaticamente significativa entre as resistências à compressão das amostras com (CBOP-RCT) e de referência. As amostras com (CBOP-RCT) atingiram os requisitos de índice de desempenho com cimento *Portland* aos 28 dias de idade com 100%, conforme a NBR 12653 [36]. Coelho *et al.* [28] obteve 68,1% para cinza de biomassa de óleo de palma aos 28 dias. Cordeiro *et al.* [27], avaliou a atividade pozolânica de cinzas de caroço de açaí, que alcançou 32% aos 28 dias. Silva *et al.* [37], avaliou cinzas da agroindústria do cacau obteve 94% aos 28 dias.

4 CONCLUSÕES

As micrografias por MEV mostraram a presença de fibras e a superfície com cavidades preenchidas por partículas globulares, que apontam uma incineração deficiente da biomassa e acarretam matéria orgânica na cinza. Isto pode ser demonstrado pela a coloração cinza escuro das amostras moldados com substituição do cimento Portland por cinza para a avaliação da atividade pozolânica. Na caracterização elementar de EDS verificou-se a predominância do elemento silício, principalmente para a cinza resfriada por choque térmico, que apresentou a presença de partículas globulares muito mais significativa na região de análise.

A difração de raios X identificou picos de fases de quartzo e calcita numa região de halo amorfo entre 20° e 30° (2 Θ). A lignina e hemicelulose possuem uma estrutura amorfa e a celulose cristalina, que estão presentes nas fibras observadas nas micrografias de MEV, desta maneira contribuem para a formação de halo amorfo e picos característicos dos

constituintes da fibra natural lignocelulósica. Houve a atividade pozolânica com resultados iguais de resistências entre as amostras de controle (referência) e com substituição de cimento Portland por cinza.

É claro da necessidade de mais análises para verificar a pozolanicidade, que apontem a cinza como uma pozolana artificial alternativa, ou mesmo de caracterização de granulometria e área superficial específica para avaliar quanto a contribuição da cinza como fíller por meio de efeito físico de colmatação de poros. No entanto a cinza de biomassa de óleo de dendê já se indicou como variante tecnológica para uso em materiais à base de cimento.

REFERÊNCIAS

- [1] Silva, C. R. R. da. Obtenção, caracterização e viabilidade de um compósito com matriz de resina poliéster e resíduos originados da extração do óleo de dendê. Tese de Doutorado. UFRN, Natal, 2016.
- [2] USDA. Oilseeds: World Markets and Trade. United States Department of Agriculture, 2017.
- [3] Malaysia, A.I. *National Biomass Strategy 2020: New Wealth Creation for Malaysia's Palm Oil Industry*. Agensi Inovasi, Kuala Lumpur, Malaysia, 2011.
- [4] Secretaria de Estudo de Desenvolvimento Agropecuário e de Pesca (SEDAP). Panorama agrícola do Pará 2019/2020, (dendê). SEDAP-PA, 2020.
- [5] Furlan Júnior, J. Oliveira R.F., Teixeira L.B. Dendê: Manejo e uso dos subprodutos e dos resíduos. Belém-PA: Embrapa Amazônia Oriental, n. 156, 2006.
- [7] Thomas B.S., Kumar S., Arel H.S. *Sustainable concrete containing palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material – A review*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, v. 80, 2017.
- [8] Mesa, J. Critérios para a otimização e “scale-up” da pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado 2004 Tese (Doutorado) - Unicamp, 2004
- [9] Martini, P. R R. Conversão pirolítica de bagaço residual da indústria de suco de laranja e caracterização química dos produtos Tese de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 2009
- [10] Harmsen, P. F.H.; Huijgen, W.J.J.; Bermúdez, L. M.; Bakker, R.R.C. Literature Review of Physical and Chemical Pretreatment Processes for Lignocellulosic. Biosynergy, Energy ReseaRCT Centre of the Netherlands, 2010
- [11] Gobbi, A. Atividade Pozolânica de Adições Mineraias pela NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- [12] Tonnayopas, D.; Nilrat, F.; Putto, K.; Tantiwitayawanich, J. *Effect of oil palm fiber fuel ash on compressive strength of hardening concrete*. in Proceedings of the 4th Thailand Materials Science and Technology Conference, Pathumthani, Thailand, 2006.
- [13] Nagaratnam, B.H., Rahman, M.E., Mirasa, A.K., Mannan, M.A., Lame, S.O. *Workability and heat of hydration of self-compacting concrete incorporating agroindustrial waste*. J. Clean. Prod., 2015.
- [14] Lima, S. A. Análise da viabilidade do uso de cinzas agroindustriais em matrizes cimentícias: estudo de caso da cinza da casca de castanha de caju. USP, São Paulo, SP, 2008.

- [15] Chindaprasirt, P., Rukzon, S., Sirivivatnanon, V. *Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash.* Constr. Build. Mater. issue 22, 2008.
- [16] Tay, J.H., 1990. *Ash from oil-palm waste as a concrete material.* J. Mater. Civ. Eng. issue 2, 1990.
- [17] Cacuro, T. A.; Waldman, W. R. Cinzas da Queima de Biomassa: Aplicações e Potencialidades. Revista Virtual de Química, v. 7, n. 2154, UFSCar, Sorocaba, SP., 2015.
- [18] Muthusamy, K., Azzimah, N. *Exploratory study of palm oil fuel ash as partial cement replacement in oil palm shell lightweight aggregate concrete.* ReseaRCT Journal of Applied Sciences. Eng. Technol. issue 8, 2015
- [19] Kroehong, W., Damrongwiriyanupap, N., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C. *The effect of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material on chloride penetration and microstructure of blended cement paste.* Arabian J. Sci. Eng. 2016.
- [20] Sata V., Jaturapitakkul C., Rattanashotinunt C. *Compressive strength and heat Evolution of concretes containing palm oil fuel ash.* J. Mat. Civ. Eng., issue 22, 2010.
- [21] Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5752: materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica com cimento Portland: índice de atividade pozolânica com cimento: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.
- [22] Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7215: cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2015.
- [23] Aziz, F.N.A.A.; Bida, S.M.; Nasir, N.A.M.; Jaafar, M.S. *Mechanical properties of lightweight mortar modified with oil palm fruit fibre and tire crumb.* Construction and Building Materials v. 73, 2014.
- [24] Silva, E. J.; Marques, M. L.; Velasco, F. G.; Fornari Júnior, C. C. M.; Luzardo, F. H. M. Degradação da fibra de coco imersa em soluções alcalinas de cimento e NaOH. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 10. Campina Grande, 2015.
- [25] Hoppe Filho J., Gobbi A., Pereira E., Quarcioni V. A., Medeiros M. H. F. Pozzolanic activity of mineral additions to Portland cement (Part I): Pozzolanic activity index with lime (PAI), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry (TG/DTG) and modified Chapelle. Revista Matéria v. 22, n. 3, 2017.
- [26] Lim N.H.A.S., Ismail M.A., Lee H.S., Hussin M.W., Sam A.R.M., Samadi M.. The effects of high volume nano palm oil fuel ash on microstructure properties and ydration temperature of mortar. Construction and Building Materials 93, 2015.
- [27] Cordeiro L. N. P., Paes I. N. L., Souza P. S. L., Azavedo C. M. Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 19, n. 1, 2019.

- [28] Coelho V. A., Guimarães C. C., Doutto G. G., Pedra P. P. Evaluation of mortar properties obtained through partial substitution of Portland cement by ashes of oil palm empty fruit bunch. *Cerâmica* 65, 2019.
- [29] Kroehong, W.; Sinsiri, T.; Jaturapitakkul, C.; Chindapasirt, P. *Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste*. *Construction and Building Materials*, v. 25, Issue 11, 2011.
- [30] Hoppe Filho J.; Gobbi A.; Pereira E.; Quarcioni V.A.; Medeiros, M.H.F. *Pozzolanic activity of mineral additions to Portland cement (Part II): Pozzolanic activity index with Portland cement (PAI), X-ray diffraction (XRD) and thermogravimetry (TG/DTG)*. *Revista Matéria*, v. 22, n. 3, 2017.
- [31] Chea Chandara, Etsuo Sakai, Khairun Azizi Mohd Azizli, Zainal Arifin Ahmad, Syed Fuad Saiyid Hashim. The effect of unburned carbon in palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer. *Construction and Building Materials* 24, 2010.
- [32] Mulinari, d.; baptista, c. A. P. R.; souza, j. V. C.; voorwald, h. J. C. Mechanical Properties of Coconut Fibers Reinforced Polyester Composites. *Procedia Engineering*, v. 10, 2011.
- [33] Santos, R. D. Estudo da influência de tratamentos na promoção da durabilidade e aderência de fibras de curauá e sisal em matrizes à base de cimento Portland. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, UFRJ: 2016.
- [34] Khankhaje E., Hussin M.W., Mirza J., Rafieizonooz M., Salim M.R., Siong H.C., Mohd Warid M.N. *On blended cement and geopolymer concretes containing palm oil fuel ash*. *Materials and Design*, issue 89, Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi, Malaysia, 2016.
- [35] Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5739: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [36] Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 12653: materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- [37] Silva, R. B.; Fontes, C. M. A.; Lima, P. R. L.; Gomes, O. Da F. M.; Lima, L. G. L. M.; Moura, R. C. A., Toledo Filho, R. D. Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 15, n. 4, 2015.