

CARACTERIZAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA POZOLANICIDADE DE CINZAS DE LODO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

PRISCILLA BASTO^{1*}, ANTÔNIO DE MELO NETO¹, PAULO DE ARAUJO REGIS¹

1: Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Rua Acadêmico Hélio Ramos, S/N, Cidade Universitária, 50740-530, Recife-PE
priscilla.basto@ufpe.br

Palavras-chave: Cinzas de lodo de esgoto, Caracterização, Pozolanicidade, Determinação da atividade pozolânica com cal.

Resumo *A urbanização e o constante crescimento populacional e industrial ocasionou um problema no gerenciamento dos resíduos provenientes do tratamento de esgoto. No Brasil, as baixas taxas de coleta e tratamento de esgoto indicam que ainda existe um grande potencial de crescimento na quantidade de material a ser produzido, sendo disposto, principalmente, em aterros sanitários. Visando a redução do armazenamento deste resíduo e das emissões de dióxido de carbono resultantes da produção do cimento Portland, foi conduzido o estudo das cinzas de lodo de esgoto (CLE) para a utilização como material pozolânico em substituição parcial do cimento Portland em argamassas e concreto. Neste trabalho foi realizada a caracterização e verificação da atividade pozolânica das CLE obtidas através da calcinação do lodo seco em mufla elétrica, proveniente de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da cidade de Recife-PE, nas temperaturas de 600, 700, 800 e 900°C. As amostras submetidas as caracterizações química, física e mineralógica e a avaliação da pozolanicidade foi realizada através da determinação atividade pozolânica com cal aos sete dias. Os resultados da análise química por fluorescência de raios-X (FRX) e análise mineralógica por difração de raios-X (DRX), demonstraram que este material é composto basicamente por óxido de silício (SiO_2) na forma de quartzo, o que é um indicativo da pozolanicidade das CLE. Já a presença considerável de óxido de alumínio, óxido de ferro e óxido de cálcio pode ser derivado dos produtos utilizados no tratamento de esgoto. A superfície específica foi reduzindo progressivamente com o aumento da temperatura de calcinação do lodo. A massa específica acompanhou o mesmo comportamento até os 800°C, a partir do qual pode ter ocorrido o processo de vitrificação. A partir da curva granulométrica, obtida por difração a laser, foi observado que o diâmetro médio das partículas aumentou com a temperatura de queima. Por fim, foi evidenciado o potencial pozolânico nas cinzas produzidas a 600 e 700°C, pois atingiram a resistência à compressão mínima aos sete dias. Estas cinzas possuíam distribuição das partículas muito próxima e possuíam maior finura. Em estudos futuros pode ser realizada a moagem das CLE para avaliar a influência da finura na atividade pozolânica.*

1. INTRODUÇÃO

Na primeira metade do século XIX, o tratamento dos efluentes antes do seu lançamento em cursos d'água tornou-se uma prioridade na Inglaterra, após a descoberta de que a epidemia de cólera foi disseminada por águas contaminadas pela descarga de esgoto [1]. Essa preocupação foi tomada por outros países e se tornou crescente com a redução dos recursos hídricos disponíveis devido à degradação dos corpos de água. Apesar desses sistemas de tratamento de efluentes retornarem à água aos mananciais com um grau de pureza adequado, um resíduo é formado, o lodo de esgoto [2].

Segundo Pedroza et al. [2], o lodo de esgoto também deve ser tratado antes de sua disposição final, de forma a gerar um produto mais estável e com menor volume, facilitando o seu manuseio e reduzindo custos nos processos subsequentes. O gerenciamento do lodo produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) é complexo e de alto custo, devido as grandes quantidades de lodo que podem ser produzidas, a disponibilidade de locais adequados ao descarte, a distância de transporte, os impactos ambientais e as características de operação e processo [2, 3, 4]. Andreoli e Pinto [5] afirmaram que, embora a gestão dos resíduos represente de 20 a 60% dos custos operacionais de uma estação de tratamento, nos países em desenvolvimento, inclusive o Brasil, o planejamento e execução do destino final têm sido constantemente negligenciados.

No Brasil a produção de lodo está estimada entre 150 e 220 mil toneladas de matéria seca por ano, no entanto segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) estima-se que para o ano de 2015 a média do tratamento de esgoto do país foi de 42,7% dos esgotos gerados e 74% dos esgotos coletados [5-6]. Demonstrando o potencial de aumento da quantidade de lodo a ser disposto. Em geral, o lodo de esgoto é descartado em aterros sanitários, agravando o problema de resíduos urbanos e indo de encontro com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que propõe um aumento da reciclagem e reutilização dos resíduos sólidos, e um destino ambientalmente adequado dos rejeitos [7-8]. Assim, devem ser incentivadas alternativas que promovam a reciclagem e o reuso desses resíduos.

Um dos métodos de disposição do lodo utilizado por muitos países é a incineração. Esta alternativa reduz aproximadamente 90% do volume do lodo, e destrói substâncias orgânicas e organismos patogênicos [9]. A incineração produz como resíduo as cinzas de lodo de esgoto (CLE), que também devem ser descartadas em locais adequados. Apesar da variabilidade do lodo de esgoto, o material resultante da incineração possui granulometria comparável a um silte ou areia fina, e quimicamente se assemelha a materiais cimentícios ou cerâmicos [10]. Dessa forma, as CLE possuem o potencial para vários usos na construção civil, como em produtos cerâmicos (placas, telhas e tijolos), pavimentos de estradas e agregado leve na produção de concreto. Além disso, devido a presença de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 em quantidades significativas, este material pode ser utilizado como substituição parcial do cimento Portland na produção de argamassa e concreto [6, 10-14].

A indústria da construção é uma das maiores consumidoras de recursos naturais não renováveis e de energia. Em paralelo, a expansão da construção civil aumenta as emissões de dióxido de carbono (CO_2), afetando o meio ambiente através das mudanças no clima e elevando a temperatura da superfície da Terra [10]. De acordo com o presidente da FAPESP, José Goldemberg, no Brasil, para cada tonelada de cimento produzida é gerado aproximadamente 600 kg de CO_2 . Mesmo esta quantidade sendo menor que a produção mundial, de 900 kg de CO_2 por tonelada de cimento, ainda representa um desafio para a sociedade [15]. Dhir et al. [10] afirmam que, as desvantagens associadas a produção do cimento têm influenciado o crescimento de materiais secundários e reciclados como materiais de construção sustentáveis, levando a uma redução significativa nas emissões de dióxido de carbono, enquanto retira esses materiais do meio ambiente.

Como a variabilidade da composição dos resíduos do tratamento de esgoto é significativa e depende do local em que o material foi coletado, pode haver variações da influência das CLE nas propriedades do produto que ele é inserido [16]. Assim, torna-se necessária uma caracterização e verificação das propriedades das cinzas de lodo de esgoto de determinada região antes de sua utilização.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar através da determinação de atividade pozolânica com cal aos sete dias as cinzas produzidas a partir da queima do lodo proveniente

de uma estação de tratamento da cidade do Recife, como forma de verificar a possibilidade utilização como material pozolânico em argamassas e concretos de cimento Portland, provendo destinos alternativos para o crescente volume de esgoto produzido. Ademais, será verificada a influência da temperatura de calcinação nas características físicas, químicas e mineralógicas das cinzas e em seu potencial pozolânico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo o programa experimental buscou verificar a pozolanicidade das cinzas de lodo de esgoto através da determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias e avaliar a influência da temperatura de calcinação do lodo de esgoto em suas propriedades pozolânicas. Além disso, foi realizada a caracterização dos materiais com o objetivo de fornecer dados necessários à pesquisa.

Inicialmente, realizaram-se, no Laboratório de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco (DECIV/UFPE), as análises físicas da massa específica real por meio do frasco de Le Chatelier, massa específica por meio do frasco de Chapman e finura pelo método de Blaine. Após os ensaios prévios prosseguiu-se com a análise química por fluorescência de raios-X (FRX), a análise mineralógica por difração de raios-X (DRX), e a análise granulométrica a laser. Por fim, procedeu-se com o ensaio da análise de pozolanicidade através da determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.

A determinação da massa específica de todos os materiais em pó seguiu o procedimento apresentado na norma NBR 16605 [17]. Esta é obtida por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, no qual a leitura da variação de volume de querosene provocado por uma massa determinada da amostra permite determinar sua massa específica.

A determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar foi realizada conforme o procedimento da NBR 16372 [18]. Neste ensaio a finura dos materiais em pó é apresentada como superfície específica através da determinação do tempo necessário para que uma quantidade de ar passe por uma camada compactada do material com porosidade e massa específica conhecida.

A granulometria dos materiais em pó foi obtida utilizando o granulômetro a laser Mastersizer 2000, da Malvern Instruments, com a unidade de dispersão Hydro 2000MU. Este ensaio foi realizado no Laboratório de materiais (Lmat) do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP). Dentre os parâmetros variáveis foi estabelecida uma velocidade de bombeamento/agitação de 1500rpm e que o ultrassom seria mantido ligado durante todo o ensaio, permitindo uma melhor dispersão da amostra. Como dispersante foi utilizado 600 ml de álcool etílico absoluto e o intervalo de dimensão das partículas das amostras foi de 0.02 a 2000 μm .

A composição química em porcentagem de óxidos foi obtida por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), utilizando um espectrômetro Rigaku ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e sete cristais analisadores. Para realização do ensaio as amostras foram peneiradas e aproximadamente 10 gramas da fração passante da peneira com abertura de malha de 75 μm (nº 200) de cada uma foi reservada em container plástico. A FRX foi realizada no Núcleo de Estudos Geoquímicos do Laboratório de Isótopos Estáveis (NEG-LABISE) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), e os resultados foram obtidos por uma análise semi-quantitativa numa amostra prensada em cápsulas de alumínio, sendo recalculados para 100% após a incorporação da perda ao fogo.

As composições mineralógicas das amostras estudadas foram obtidas por difração de raios-X utilizando o difratômetro Rigaku D/max-2200 com radiação Cu K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), operando a 40kV e 20 mA. Os ensaios foram realizados no Laboratório de materiais (Lmat) do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP), em uma faixa de varredura de 2 a 70°2 θ com um incremento de passo do goniômetro de 0,02°2 θ , velocidade 2°2 θ /passo e tempo de contagem de 1min/passos. A preparação das amostras seguiu o mesmo procedimento utilizado na análise química. Em seguida estas foram colocadas no porta amostras adequado ao equipamento e prensadas com lâmina de vidro, onde seguiram para o ensaio. A identificação das fases cristalinas resultantes do DRX foi realizada por comparação do difratograma obtido pela amostra com aqueles dos minerais disponíveis no banco de dados PDF-2 do

International Center for Diffraction Data (ICDD).

2.1. Lodo de esgoto

O lodo de esgoto utilizado nesta pesquisa foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Mangueira, localizada na Zona Oeste da cidade do Recife. O material foi coletado do reator UASB – do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* ou reatores anaeróbios de manta de lodo – na forma líquida e armazenado em recipientes fechados, bombonas plásticas, somando aproximadamente 70 litros de lodo *in natura*. Após a aquisição do lodo, este foi encaminhado ao Laboratório de Construção Civil do DEC/UFPE. No local, foi retirado máximo de água presente no lodo *in natura*, com o auxílio da peneira com abertura de malha de 45 μm . O material retido foi disposto em bandejas e seco ao sol durante um período de seis dias.

Como forma de eliminar o excesso de umidade ainda presente no lodo, o material foi levado à estufa, a uma temperatura de 100°C por 24 horas, sendo resfriado naturalmente em temperatura ambiente após a retirada. O lodo seco (LS) foi destorroado num moinho de bolas por 20 minutos, levando a consequente redução da granulometria do material para a sua queima. Ao fim, a sua massa específica foi de 2,73 g/cm³, a superfície específica de 676,96 m²/kg, e que é constituído basicamente por óxido de silício (SiO₂), com a presença considerável de óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃) e óxido de cálcio (CaO) que podem ser derivados dos produtos utilizados no tratamento de esgoto. Sua composição química detalhada pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química em quantidade de óxidos (%) do lodo seco.

Óxido	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CuO	MnO	NiO	PF*	Total
Teor em massa (%)	39,02	16,02	9,68	6,62	5,42	2,21	1,67	0,80	0,12	0,06	0,06	18,33	100,01

*PF é Perda ao fogo

2.2. Cinzas de lodo de esgoto

As cinzas de lodo de esgoto foram obtidas pela calcinação da amostra de lodo de esgoto no Laboratório de materiais (Lmat-ITEP), sendo realizada em uma mufla elétrica da marca EDG. A determinação da faixa de temperatura para a queima do lodo de esgoto baseou-se em resultados obtidos na literatura, no qual a temperatura mínima para o desaparecimento da matéria orgânica indesejável é de 500°C e a temperatura máxima para que não haja perda das propriedades pozolânicas é de 900°C [12]. Dessa forma, foram definidas as quatro temperaturas de queima para obtenção das cinzas de lodo de esgoto (CLE), sendo estas: 600°C, 700°C, 800°C e 900°C.

Para a queima foi adotada uma taxa de aquecimento de 10°C/min e um tempo de permanência 180 minutos na temperatura de queima definida. Para cada temperatura de calcinação foi realizado o mesmo processo, sendo reservadas amostras de 1250 gramas do material. Ao fim de cada processo, as cinzas foram resfriadas naturalmente (processo lento) até atingir a temperatura ambiente (aproximadamente 28°C), retiradas e armazenados em embalagens plásticas vedadas. As quatro cinzas foram nomeadas de acordo com a sua respectiva temperatura de calcinação, sendo estas: CLE600, CLE700, CLE800 e CLE900.

2.3. Metacaulim

O metacaulim, que pode ser classificado como uma pozolana de alto desempenho, foi utilizado como parâmetro de referência a ser alcançada pelo material em estudo. Nesse trabalho o metacaulim utilizado foi produzido pela Caulim do Nordeste S.A., cujas características químicas são apresentadas na Tabela 2. Sua cor é alaranjada, possui massa específica de 2,56 g/cm³ e superfície específica de 2348,97 m²/kg. Pode-se observar na Tabela 2 que este material é constituído majoritariamente por óxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃).

Tabela 2. Composição química em quantidade de óxidos (%) do metacaulim.

Óxido	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	PF*	Total
Teor em massa (%)	50,27	42,80	3,61	0,08	0,37	0,22	0,22	0,02	2,40	99,99

*PF é Perda ao fogo

2.4. Hidróxido de cálcio

Para o ensaio de determinação da atividade pozolânica foi utilizado o hidróxido de cálcio P.A. (Ca(OH)₂) da marca Vetec Química Fina da Sigma-Aldrich, com teor mínimo de pureza de 95%, conforme indicado pela norma NBR 5751 [19]. Através dos ensaios foram definidas a sua massa específica de 2,33 g/cm³, superfície específica de 1187,55 m²/kg e que este material é constituído basicamente por óxido de cálcio (CaO), como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Composição química em quantidade de óxidos (%) do metacaulim.

Óxido	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	PF*	Total
Teor em massa (%)	72,47	0,58	0,49	0,32	0,24	0,09	0,05	25,76	100,00

*PF é Perda ao fogo

2.5. Procedimento experimental

A determinação da atividade pozolânica com cal foi baseada nos procedimentos da norma NBR 5751 [19]. Neste ensaio são moldados três corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, produzidos com uma argamassa que contém uma parte de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e uma parte do material pozolânico avaliado correspondendo ao dobro do volume de hidróxido de cálcio.

A cura dos corpos-de-prova é realizada nos próprios moldes durante sete dias, sendo que no primeiro dia os corpos-de-prova devem permanecer à temperatura ambiente e nos dias posteriores à temperatura de 55°C. Após a cura, os corpos-de-prova são retirados dos moldes e é determinada a carga de ruptura à compressão. Por fim, a resistência à compressão do material será determinada pela média dos resultados de resistência dos três corpos-de-prova moldados. A prensa hidráulica para argamassa utilizada no ensaio de resistência à compressão dos corpos-de-prova é da marca Soloteste, com capacidade para 20 toneladas (196kN), bomba manual, e mostrador digital que indica a carga em tf com resolução de 10 kgf.

Conforme estabelecido na norma NBR 12653 [20] serão materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concretos, argamassas e pastas, aqueles que obtiverem uma resistência a compressão média mínima de 6 MPa obtida no ensaio de determinação da atividade pozolânica. Assim, foram analisados os resultados obtidos pelos corpos-de-prova moldados com argamassas produzidas com cinzas calcinadas nas quatro temperaturas e do metacaulim.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização das cinzas de lodo de esgoto

Na Tabela 4 apresenta-se a quantidade de óxidos nas cinzas de lodo de esgoto por análise de fluorescência de raios-X. Assim como o metacaulim, as CLE em análise são compostas principalmente por óxido de silício (SiO₂). Como este é um dos componentes responsáveis pela pozolanicidade em adições minerais, pode ser interpretado como um indicativo de atividade pozolânica nas cinzas. Também pode ser destacada a presença de óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃) e óxido de cálcio (CaO), assim como havia sido constatado pela análise química de outros autores resumidos por [10]. O teor de alumínio é de aproximadamente 17%, levantando a possibilidade de sua utilização em concretos aerados, que normalmente fazem uso de pó de alumínio como agente espumante.

Tabela 4. Composição química em quantidade de óxidos (%) nas cinzas de lodo de esgoto incineradas a 600,700, 800 e 900°C por análise de FRX

Amostra	Teor de óxidos em massa (%)												Total
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CuO	MnO	NiO	PF*	
CLE600	43,64	16,85	11,78	7,88	6,62	2,63	1,96	1,52	0,14	0,07	0,06	6,87	100,02
CLE700	44,99	17,20	11,91	8,03	7,07	2,25	2,06	-	0,14	0,07	0,06	6,23	100,01
CLE800	46,83	18,92	10,25	7,15	6,24	2,61	1,94	1,06	0,11	0,06	0,05	4,77	99,99
CLE900	49,02	16,34	11,21	8,37	6,86	2,30	2,27	1,31	0,12	0,08	0,06	2,06	100,00

*PF é Perda ao fogo

A massa específica das CLE variou entre 2,58 e 2,63 g/cm³, como apresentado na Figura 1. Assim, foi identificado que esses materiais possuem densidade comparável à de um agregado miúdo, sendo também similar àquela obtida pelo metacaulim utilizado nesta pesquisa. A partir desses resultados, foi observado ainda que a calcinação do lodo de esgoto promoveu uma redução em sua massa específica até a temperatura de queima de 800°C, aumentado aos 900°C. Possivelmente, o aumento da densidade aos 900°C está relacionado a uma redução no espaço dos poros causada pelo processo de vitrificação [10].

A superfície específica obtida pelo método Blaine, também foi reduzida após a incineração do lodo, sendo inversamente proporcional a temperatura de queima, como ilustrado na Figura 1. Além disso, quando comparado ao metacaulim, a finura Blaine das cinzas é muito menor. Assim, em estudos futuros pode ser avaliado o comportamento da atividade pozolânica para uma maior superfície específica obtida através da moagem do material, sendo possível determinar a finura ótima para a utilização das CLE.

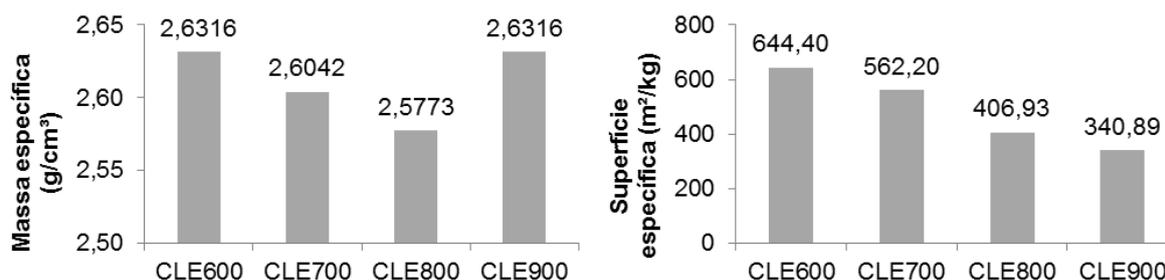


Figura 1. Massa e superfícies específicas das cinzas de lodo de esgoto incineradas a 600, 700, 800 e 900°C.

A Figura 2 apresenta a distribuição discreta da granulometria das partículas, obtidas por difração a laser. Os diâmetros médios do material são apresentados na Tabela 5. Os resultados evidenciaram que o diâmetro médio das partículas aumentou diretamente com a temperatura de queima.

Tabela 5. Diâmetro médio e D₅₀ das partículas das cinzas de lodo de esgoto incineradas a 600,700, 800 e 900°C.

Amostra	CLE600	CLE700	CLE800	CLE900
Diâmetro médio (D _{4,3}) (μm)	34,84	35,17	47,73	48,38
D ₅₀ (μm)*	26,89	26,85	33,63	35,69

*D₅₀ é o diâmetro da partícula correspondente a 50% do material passante

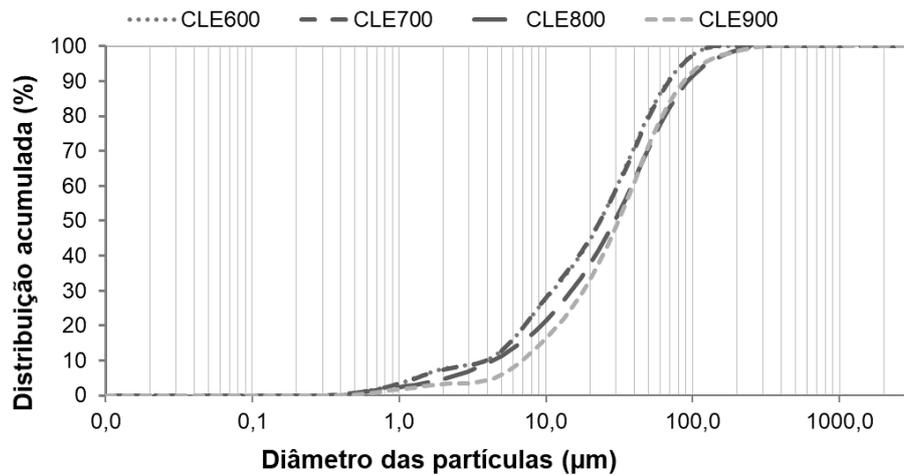


Figura 2. Distribuição granulométrica discreta das cinzas de lodo de esgoto incineradas a 600, 700, 800 e 900°C.

Para identificar a composição mineralógica dos materiais estudados foi realizada uma difração de raios-X, os difratogramas podem ser observados na Figura 3. Os resultados apresentaram composição heterogênea, consistindo principalmente de quartzo (SiO_2), magnetita (Fe_3O_4) ou hematita (Fe_2O_3), albita alta ($\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$) e microclínio intermediário (KAiSi_3O_8). Também foi observado que a calcita (CaCO_3) está presente apenas nas cinzas calcinadas a 600°C, isso se deve ao fato que a decomposição térmica desse composto se inicia em temperaturas de aproximadamente 700°C. Outros minerais presentes nas amostras são a muscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e whitlockita ($\text{Ca}_{2,86}\text{Mg}_{0,14}(\text{PO}_4)_2$), que foram identificadas na temperatura de calcinação de 900°C.

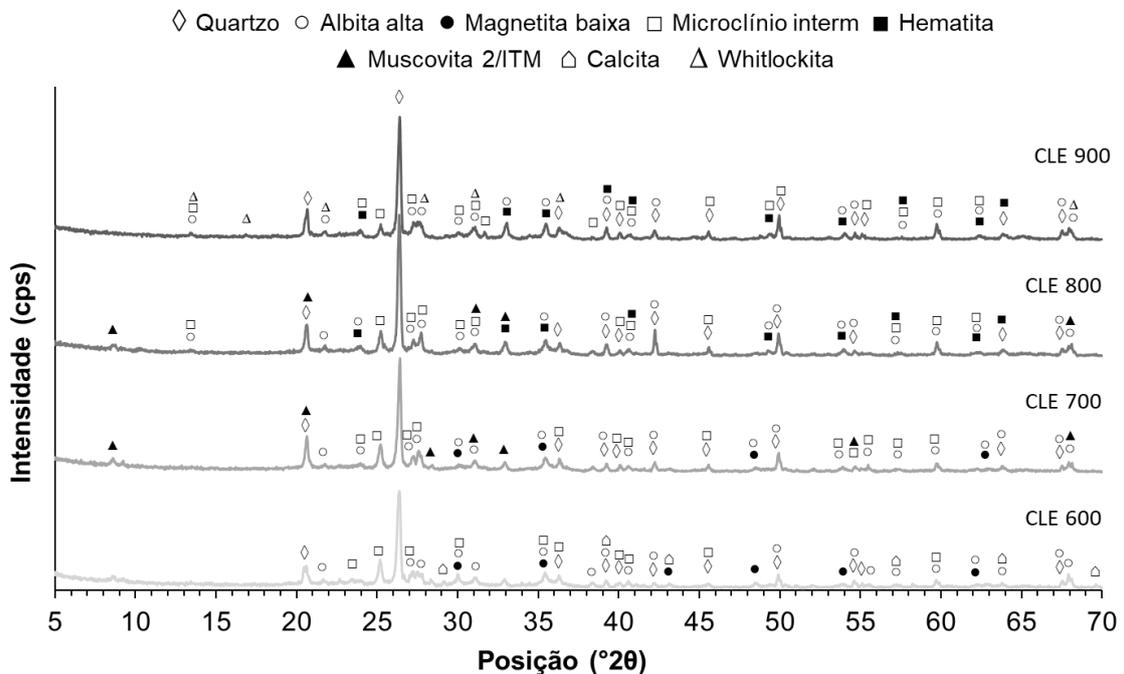


Figura 3. Traços de difração de raios-X das cinzas de lodo de esgoto incineradas a 600, 700, 800 e 900°C.

3.2. Atividade pozolânica das cinzas de lodo de esgoto

Na Figura 4 estão apresentados os resultados da resistência à compressão média aos sete dias obtida pelos corpos-de-prova moldados com as argamassas contendo as cinzas de lodo de esgoto e o metacaulim, conforme determinado pelo ensaio de determinação da atividade pozolânica com cal. Os resultados mostram que apenas as CLE600 e CLE700 obtiveram um resultado positivo, já que suas resistências de 7,54 e 7,52 MPa, respectivamente, ultrapassam o mínimo de 6 MPa exigido por norma. Como uma pozolana de alto desempenho era esperado que a argamassa produzida com metacaulim obtivesse uma maior resistência à compressão, validando o ensaio executado.

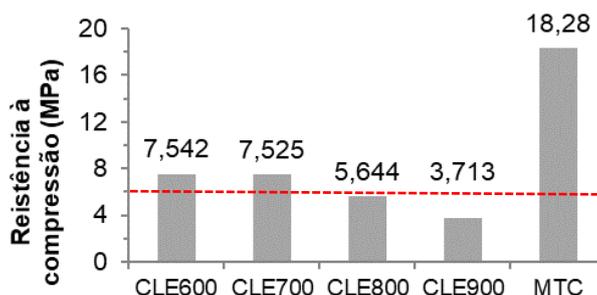


Figura 4. Resistência à compressão das cinzas de lodo de esgoto incineradas a 600, 700, 800 e 900°C e metacaulim.

Pode ser observado que a distribuição das partículas das amostras CLE600 e CLE700 são muito semelhantes, assim como os diâmetros médios, e estas são as cinzas com maior finura, indicando a possibilidade do desenvolvimento de atividade pozolânica estar associado a superfície específica das partículas das cinzas de lodo de esgoto. Assim, um aumento da finura das demais cinzas pode contribuir para a intensificação de atividade pozolânica, atingindo a resistência mínima necessária. Do ponto de vista econômico, o fato das menores temperaturas alcançarem os melhores resultados, mesmo sem um beneficiamento por moagem, é uma grande vantagem, uma vez que seria necessário um menor gasto energético para a produção de um material satisfatório.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos foi possível observar a influência da temperatura de queima nas características química, física e mineralógica das cinzas obtidas a partir da calcinação de uma amostra de lodo de uma estação de tratamento de esgoto localizada no Recife. Apesar da grande variabilidade do lodo de esgoto, os principais componentes químicos das cinzas estudadas seguiram a linha daqueles encontrados em outras pesquisas, estando os óxidos de sílica, alumínio, ferro e cálcio presentes em maiores porcentagens. Através da análise mineralógica foi possível observar ainda que o óxido de silício se encontra na forma de quartzo.

A finura demonstrou possuir um grande impacto sobre o potencial pozolânico das CLE, uma vez que as CLE600 e CLE700, que possuíam maior superfície específica e menor diâmetro médio das partículas, foram aquelas que as resistências à compressão ultrapassaram a mínima, podendo ser classificadas como pozolanas segundo o ensaio de determinação da atividade pozolânica com cal. Esta tendência foi confirmada pelos resultados do metacaulim, que possuindo uma superfície específica bem maior em relação as das cinzas de lodo de esgoto, obteve uma resistência à compressão significativamente mais alta.

Com isso pode se dizer que, a queima do lodo de esgoto em uma temperatura de 600°C já seria suficiente para obter uma adição mineral a ser utilizada em argamassas e concreto de cimento Portland, promovendo a reciclagem de um resíduo de descarte complexo e contribuindo para a redução da quantidade de cimento utilizada nas construções.

Nos próximos trabalhos pode ser analisada a influência da moagem das cinzas em sua atividade pozolânica, a fim de verificar a finura que obteria o melhor desempenho como material pozolânico. Além disso, poderiam ser utilizadas amostras provenientes de outras estações de tratamento de esgoto da cidade para comparação dos resultados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa de Mestrado concedida ao primeiro autor e ao Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) pela disponibilidade de equipamentos e a bolsa concedida ao segundo autor.

REFERÊNCIAS

- [1] Costa, F. M., 2014. “Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.
- [2] Pedroza, M. M.; Vieira, G. E.; Souza, J. F.; Pickler, A. C.; Leal, E. R.; Milhomen, C. C., 2010. “Produção e tratamento de esgoto – Uma revisão”, Revista Liberato 11, n. 16, 149 – 160.
- [3] Geyer, A. L., 2001. “Contribuição ao estudo da disposição final e aproveitamento da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários como adição ao concreto”, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- [4] Jordão, E. P.; Pessoa, C. A., 2011. “Tratamento de esgotos domésticos”, ABES, Rio de Janeiro, RJ.
- [5] Andreoli, C. V.; Pinto, M. A., 2001. “Introdução”. In: Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final, RiMa, ABES, Rio de Janeiro, RJ. ISBN: 85-86552-19-4.
- [6] Brasil, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 2017. “Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2015”, SNSA/MCIDADES, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2015>>. Acesso em: 10 ago. 2017.
- [7] Ministério do Meio Ambiente, 2017. “Política Nacional dos Resíduos Sólidos”, MMA, Brasil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>>. Acesso em: 02 set. 2017.
- [8] Godoy, L. C., 2013. “A logística na destinação do lodo de esgoto”, Revista Científica On-line - Tecnologia, Gestão e Humanismo, Revista da Faculdade de Tecnologia de Guaratinguetá 2, n. 1, 79 – 90. ISSN 2238-5819.
- [9] Luduvic, M.; Fernandes, F., 2007. “Sludge transformation and disposal methods”. In: Sludge Treatment and Disposal 6, 207 – 225, IWA Publishing, London. ISBN 1-84339-166-X.
- [10] Dhir, R. K.; Ghataora, G. S.; Lynn, C. J., 2016. “Sustainable Construction Materials: Sewage Sludge Ash”, Woodhead Publishing. ISBN: 978-0-08-100989-5.
- [11] Cheeseman, C. R.; Viridi, G. S., 2005. “Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash”, Resources, Conservation and Recycling 45, n.1, 18 – 30.
- [12] Fontes, C. M., 2003. “Potencialidades da cinza de lodo de estações de tratamento de esgotos como material suplementar para a produção de concretos com cimento Portland”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- [13] Castro, A. L.; Silva, R. O.; Scalize, P. S., 2015. “Cenário da disposição do lodo de esgoto: uma

- revisão das publicações ocorridas no Brasil de 2004 a 2014”, Multi-Science Journal 1, n. 2, 66 – 73.
- [14] Smol, M.; Kulczycka, J.; Henclik, A.; Gorazda, K.; Wzorek, Z., 2015. “The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy”, Journal of Cleaner Production 95, 45 – 54.
- [15] Freire, D., 2016. “Especialistas discutem papel da indústria do cimento nas emissões de CO₂”, Agência FAPESP, São Paulo, SP. Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br/especialistas-discutem-papel-da-industria-do-cimento-nas-emissoes-de-co2?locale=pt-br>>. Acesso em: 18 ago. 2017.
- [16] Dyer, T. D.; Halliday, J. E.; Dhir, R. K., 2011. “Hydration chemistry of sewage sludge ash used as a cement component”, Journal of Materials in Civil Engineering 23, n. 5, 648 – 655.
- [17] Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017. “NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica”, ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015. “NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)”, ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- [19] Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015. “NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias”, ABNT, Rio de Janeiro, RJ.
- [20] Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. “NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos”, ABNT, Rio de Janeiro, RJ.