

Reutilização das cinzas volantes de carvão mineral na fabricação de cimento de Portland

A indústria do cimento tem um papel importante no desenvolvimento global, tendo em vista que o cimento é o material fundamental para produção de argamassas e concretos. A busca pela inserção de materiais considerados rejeitos de outros processos produtivos, tais como as cinzas volantes provenientes da queima do carvão mineral, à fabricação do cimento, tem se tornado uma alternativa viável tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. O objetivo da pesquisa foi avaliar a possibilidade de reaproveitamento dos resíduos de cinzas volantes no processo de fabricação de cimento provenientes da queima de carvão mineral nas caldeiras de uma termelétrica localizada em São Luís - MA. Foi necessário desenvolver um estudo com cinzas volantes por meio de caracterização físico-química, utilizando os métodos de ensaio especificados. Foram preparadas misturas de cimento com adição de cinzas volantes em 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Os resultados físicos, químicos e mecânicos obtidos atenderam a todos os requisitos da norma ABNT NBR 16697: 2018, classificando a cinza como um material cimentício, permitindo sua utilização como matéria-prima na produção de cimento, possibilitando uma destinação mais nobre para os resíduos sólidos do carvão, redução do custo da matéria-prima no processo de produção do cimento e redução da quantidade de CO₂ emitida por tonelada de cimento produzida.

Palavras-chave: Pozzolana; Reuso; Sustentabilidade; Meio Ambiente.

Reuse of coal fly ash in the manufacture of Portland cement

The cement industry has an important role in global development, considering that cement is the fundamental material for the production of mortar and concrete. The search for the inclusion of materials considered to be waste from other production processes, as fly ash from burning coal for cement manufacturing, it has become a viable alternative both from an environmental and an economic point of view. The objective of the research was to evaluate the possibility of reusing the fly ash residues in the cement manufacturing process from the burning of mineral coal in the boilers of a thermoelectric plant located in São Luís - MA. It was necessary to develop a study with fly ash through physical-chemical characterization, using test methods specified. Cement mixtures with the addition of ash in 5%, 10%, 15%, 20% and 25%, were prepared. Physical, chemical and mechanical results obtained met all the requirements of the standard ABNT NBR 16697:2018, classifying the ash as a cementitious material, allowing its use as a raw material in the production of cement, enabling a more noble destination for the solid residues from coal, reduction of raw material costs in the cement production process and reduction in the amount of CO₂ emitted per ton of cement produced.

Keywords: Pozzolan; Reuse; Sustainability; Environment.

Topic: **Desenvolvimento, Sustentabilidade e Meio Ambiente**

Received: **04/08/2021**

Approved: **27/08/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Edvander Prudente de Almeida 

Universidade Ceuma, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/6034626733102553>

<http://orcid.org/0000-0002-8342-2166>

edvanderprudente@yahoo.com.br

Wolia Costa Gomes 

Universidade Ceuma, Brasil

<http://lattes.cnpq.br/0762325070620983>

<https://orcid.org/0000-0002-9382-3959>

woliacg@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0032

Referencing this:

ALMEIDA, E. P.; GOMES, W. C.. Reutilização das cinzas volantes de carvão mineral na fabricação de cimento de Portland. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.8, p.375-386, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0032>

INTRODUÇÃO

O cimento é um produto fundamental para a indústria da construção. Ele é um componente básico para a produção de argamassas e concretos, sendo estes os materiais mais utilizados na construção civil no mundo. O concreto é composto por cimento, água, agregado miúdo, agregado graúdo e aditivos químicos (SNIC, 2019; WATTS, 2018).

A geração de subprodutos é uma das implicações de qualquer processo industrial. No Brasil, com o crescimento do setor industrial, a utilização desses subprodutos proporciona o lançamento de grandes quantidades de resíduos, aumentando a preocupação com a destinação inadequada (SIQUEIRA, 2011). Atualmente, o principal uso do carvão mineral no mundo é na geração de eletricidade em termelétricas (ANEEL, 2009) e de acordo com a Agência Internacional de Energia (2018), o carvão mineral fornece mais de um terço da geração de eletricidade mundial, o que equivale a 38,5% da produção global de energia.

A cinza volante é um subproduto resultante da combustão do carvão em caldeiras. Para as empresas geradoras, esse resíduo torna-se um problema em relação à destinação final, além de produzir um grande volume de resíduos, a destinação desse material torna-se onerosa no processo produtivo. A utilização de cinzas volantes da queima do carvão surge como alternativa para minimizar o impacto ambiental causado pela geração deste material em larga escala. A utilização de cinzas volantes como base em cimentos se deve ao fato de apresentar atividades pozolânicas, capazes de formar compostos com propriedades ligantes (ABNT, 2014). O uso de cinzas volantes na produção de cimento permite reduzir o percentual de consumo de clínquer Portland no cimento (ABNT, 2018). Dados da produção de clínquer no Brasil até o ano de 2016 mostram que cada tonelada de clínquer produzida no país emite 536 kg de CO₂ na atmosfera (BRASIL, 2020).

No Estado do Maranhão, a Usina Termelétrica Porto Itaqui, localizada na Ilha de São Luís/MA, utiliza carvão mineral para a produção de energia elétrica. As cinzas volantes utilizadas neste estudo foram obtidas em processo controlado a partir da queima de carvão em caldeiras. A destinação comum dessas cinzas volantes é o envio para aterro controlado localizado no município de Rosário/MA (ENEVA, 2019).

O município de São Luís, capital do estado do Maranhão, está localizado na Amazônia Legal e está localizado na região nordeste do Brasil, possui as coordenadas geográficas 2 ° 31 '48' 'de Latitude Sul e 44 ° 18' 10 " de Longitude Oeste, altitude de 4 m e área de 834.785 km² (IBGE, 2020). Localiza-se em relativa proximidade de importantes fontes de matérias-primas minerais e possui algumas características geográficas, tais como: áreas para instalação de extensos estabelecimentos portuários, que é uma cidade favorável para receber grandes projetos, proporcionando logística comercial para atender o mercado externo. O objetivo do governo, em conjunto com capitais nacionais e internacionais, de buscar novos investimentos no município, como a termelétrica de grande proximidade ao Porto do Itaqui, suscitou reações sociais de intenso caráter ambiental (CORRÊA et al., 2017).

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a viabilidade de utilização do resíduo da queima do carvão mineral de uma termelétrica, como matéria-prima para a produção de cimento Portland.

METODOLOGIA

Procedimentos experimentais

Coleta e Preparação de Amostras

Foram analisados os resíduos de cinzas volantes da queima de carvão realizada na Usina Termelétrica Eneva - Itaqui Power Generation S/A, localizada no município de São Luís-MA. A amostra coletada foi composta por 30 kg de cinzas volantes, devidamente homogeneizadas e esquadrejadas para realização da caracterização físico-química e misturas com cimento e permaneceu durante todo o período de preparo, transporte e armazenamento, protegida de qualquer risco de contaminação.

Quarteamento

O quarteamento (Figura 1) é um processo de divisão de uma amostra homogeneizada em quatro partes, separando duas partes opostas uma da outra para formar uma nova amostra e descartando as partes restantes. As peças não descartadas são misturadas e o processo de fracionamento é repetido até que o volume desejado para os testes seja obtido (ABNT, 2004).

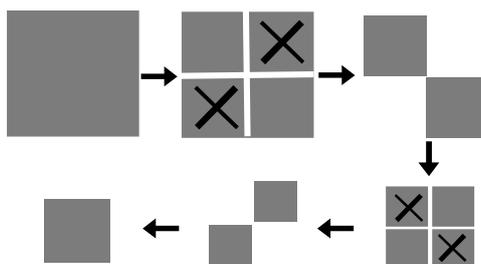


Figura1: Esquema do processo de quartamento. **Fonte:** Adaptado de ABNT 10007 (2004).

Caracterização Física e Mecânica

Os requisitos físicos das cinzas volantes devem estar em conformidade com a norma ABNT 12653: 2014 (ABNT, 2014), descrita na Tabela 1.

Tabela 1: Requisitos físicos para cinzas volantes.

Propriedades	Requisitos
Material retido na peneira 45 μ m	$\leq 20 \%$
Índice de desempenho de cimento Portland em 28 dias	$\geq 90 \%$
Atividade pozolânica com cal após 7 dias	≥ 6 MPa

Material Retido na Peneira de 45 μ m

O ensaio granulométrico do material retido na peneira com abertura de 45 μ m foi realizado de acordo com a ABNT 15894-3:2010 (ABNT, 2010). 20 gramas da amostra de cinzas volantes foram pesadas e, em seguida, o material pesado foi transferido para uma peneira com uma abertura de malha de 45 μ m. A peneiração foi realizada úmida em torneira com vazão de 5 litros por min, com movimentos circulares em plano horizontal na peneira por um período de 10 min. Ao final, o material retido na peneira foi transferido para um vidro de relógio e seco em estufa a 100 ± 5 ° C por 1 hora.

Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28 Dias.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT 5752:2014 (ABNT, 2014), onde foram preparadas duas argamassas A e B, com duas dosagens distintas conforme descrito a seguir: a) A argamassa A foi confeccionada com cimento CP II-F-32, areia normal brasileira e água destilada; b) A argamassa B foi feita com 25% em massa de cinza volante, em substituição à porcentagem de cimento CP II-F-32, areia brasileira normal e água destilada. A Tabela 2 mostra a quantidade de material, em massa, usado para moldar seis corpos de prova cilíndricos. A mistura dos materiais, moldagem dos corpos de prova, condições de cura e determinação da carga de ruptura na compressão foram realizadas de acordo com a norma da ABNT NBR 7215: 2019 (ABNT, 2019).

Tabela 2: Quantidade de material usado para as argamassas A e B.

Material	Massa (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento CP II-F-32	624 g	468 g
Cinzas Volantes	-	156 g
Fração grossa de areia normal Nº 16 (1,19 mm)	468 g	468 g
Fração média grossa de areia normal Nº 30 (0,59 mm)	468 g	468 g
Fração média fina de areia normal Nº 50 (0,297 mm)	468 g	468 g
Fração fina de areia normal Nº 100 (0,149 mm)	468 g	468 g
Água destilada	300 g	300 g

Atividade Pozolânica com Calcário aos Sete Dias

A argamassa de ensaio foi feita com uma parte, em massa, de hidróxido de cálcio e uma quantidade de cinza volante correspondente ao dobro do volume de hidróxido de cálcio, de acordo com as diretrizes da ABNT 5752: 2014 (ABNT, 2014) e ABNT 7215: 2019 (ABNT, 2019). Os materiais utilizados são descritos na Tabela 3.

Tabela 3: Quantidade de material usado para o teste de cal aos sete dias.

Material	Massa (g)
Hidróxido de Cálcio	104.00 g ($\rho = 2.28 \text{ g/cm}^3$)
Cinzas Volantes	218.95 g ($\rho = 2.40 \text{ g/cm}^3$)
Fração grossa de areia normal Nº 16 (1,19 mm)	234 g
Fração média grossa de areia normal Nº 30 (0,59 mm)	234 g
Fração média fina de areia normal Nº 50 (0,297 mm)	234 g
Fração fina de areia normal Nº 100 (0,149 mm)	234 g
Água destilada	200 g (225 mm)

Três corpos-de-prova cilíndricos medindo 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura foram moldados e durante as primeiras 24 horas os corpos-de-prova permaneceram a uma temperatura de $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, depois foram levados a uma estufa e mantidos a uma temperatura de $55 \pm \text{ }^\circ\text{C}$ por nos próximos 6 dias. Ao final, os moldes foram retirados da estufa e colocados à temperatura de $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ por aproximadamente 2 horas. As amostras foram desenformadas e quebradas em prensa mecânica conforme ABNT 7215: 2019 (ABNT, 2019).

Caracterização Química

De acordo com a ABNT 12653: 2014 (ABNT, 2014), a cinza volante é classificada como material pozolânico Classe C e deve atender aos requisitos químicos descritos na Tabela 4. Para análise, foi utilizada a

técnica de espectrometria de raios-X. Ele correlaciona a intensidade dos raios X característica de um determinado elemento químico com o seu conteúdo na amostra, quantificando a intensidade de radiação selecionada para cada elemento químico por meio de detectores (ABNT, 2001).

Tabela 4: Requisitos químicos para as cinzas volantes.

Propriedades	Requisitos
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70 %
SO ₃	≤ 5 %
Umidade	≤ 3 %
Perda do Fodo	≤ 6 %
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5 %

Preparação das Pastilhas

O preparo das amostras para leitura no espectrômetro de raios X foi realizado pelo método de pellet prensado, utilizando um ligante (Amido PA), que tem por objetivo causar uma melhor coesão entre as partículas da amostra, proporcionando um aspecto mais resistente e tablet durável. Os comprimidos foram obtidos por prensagem da amostra misturada ao ligante, nas proporções de 14 gramas (87,5%) de amostra e 2 gramas (12,5%) de ligante, conforme ABNT 14656: 2001 (ABNT, 2001).

Análises Químicas

A análise consistiu em quantificar em porcentagem a concentração de dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), trióxido de enxofre (SO₃), óxido de sódio (Na₂O) e óxido de potássio (K₂O), foram analisados conforme ABNT NBR 14656:2001 (ABNT, 2015).

Teor de Umidade

A determinação do teor de umidade nos materiais pozzolânicos foi realizada de acordo com a norma ABNT NM 24:2002 (ABNT, 2002). Foi utilizado 1g da amostra e o material colocado em uma estufa à temperatura de 105 ± 5 ° C por 1 hora.

Perda ao Fogo

A perda ao fogo é uma análise que determina a porcentagem da massa da amostra perdida após um ciclo de aquecimento térmico. O procedimento foi realizado de acordo com a norma ABNT NM 18: 2012 (ABNT, 2012), 1.000 ± 0,001 g da amostra foram pesados em um cadinho de porcelana, que então foi colocado em uma mufla a uma temperatura de 950 ± 50 ° C por 50 minutos.

Preparação de Misturas de Cimento com Cinzas Volantes

As matérias-primas utilizadas para a produção das misturas de cimento foram o clínquer Portland, o gesso natural, a pozolana, previamente secas, pulverizadas e peneiradas separadamente para posterior pesagem e homogeneização com cinzas volantes. A mistura 1 foi preparada com clínquer, gesso e pozolana

e as misturas 2, 3, 4, 5 e 6 com cinza volante, além das matérias-primas anteriores. A Tabela 5 apresenta as 6 misturas de cimento produzidas para o estudo, as quais foram feitas seguindo a norma ABNT 16697: 2018 (ABNT, 2018).

Tabela 5: Misturas de Cimento.

Material	Misturas					
	Cimento 1	Cimento 2	Cimento 3	Cimento 4	Cimento 5	Cimento 6
Clínquer	2100 g	1950 g	1800 g	1650	1500	1350
	70%	65%	60%	55%	50%	45%
Gesso	150 g					
	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Pozolana	750 g					
	25%	25%	25%	25%	25%	25%
Cinzas Volantes	-	150 g	300 g	450 g	600 g	750 g
	-	5%	10%	15%	20%	25%

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Material Retido na Peneira de 45 µm

As cinzas volantes apresentaram um percentual de 14,89% de material retido na peneira de 45 µm, sendo esse percentual inferior a 20%, atendendo ao requisito físico especificado na norma brasileira ABNT 12653:2014, para ser considerado material pozolânico. Mehta et al. (2014) demonstraram que o tamanho das partículas é uma característica muito importante a ser observada nas adições minerais, pois determina o efeito pozolânico no concreto e na argamassa e não suas propriedades químicas ou origem do material. Portanto, o presente estudo está dentro das normas e padrões considerados ideais para material pozolânico.

Índice de Desempenho do Cimento Portland em 28 Dias

Os resultados da resistência à compressão em MPa dos 6 corpos de prova aos 28 dias de cura em câmara úmida de argamassa A e argamassa B produzida com o cimento são apresentados na Tabela 6. Os resultados mostraram que houve diferença na média de resistência à compressão entre as argamassas A e B (Tabela 6), com média de 40,85 MPa e 37,79 MPa, respectivamente, devido à composição das argamassas. A adição de cinzas volantes na amostra B tornou esta amostra menos resistente do que a amostra A. De acordo com Rivas et al. (2020) que também verificaram em seu estudo, valores de resistência à compressão menores na argamassa B (25 MPa) do que os resultados obtidos na argamassa A (26 MPa), corroborando os resultados obtidos no presente trabalho.

Tabela 6: Determinação da resistência a compressão das argamassas A e B em 28 dias.

Argamassa	Índice de Consistência (mm)	Resistência à Compressão (MPa)						Média (MPa)	DRM (%)
		Corpos de Prova nº							
		1	2	3	4	5	6		
A	179	41.70	40.37	40.75	40.90	40.73	40.64	40.85	2.1
B	187	37.51	38.35	38.42	37.34	37.52	37.60	37.79	1.7

O resultado do índice de atividade pozolânica obtido após análise das amostras de cinzas volantes foi de 92,51% aos 28 dias de cura (Tabela 7), atendendo ao requisito físico de material pozolânico

especificado na norma brasileira ABNT 12653: 2014 (ABNT, 2014). Os resultados estão de acordo com os obtidos por Altheman et al. (2017) em relação à atividade pozolânica apresentada pelas cinzas volantes em suas pesquisas, que foi de 87,9%, aos 28 dias de cura. Portanto, o material utilizado no presente estudo obteve uma resposta satisfatória e pode ser utilizado para a produção de cimento Portland.

Tabela 7: Resultado do índice de atividade pozolânica do cimento em 28 dias.

Resistência à Compressão (MPa)		Atividade Pozolânica (%)	Especificação ABNT 12653:2014
Argamassa A	Argamassa B		
40.85	37.79	92.51 %	≥ 90 %

Atividade Pozolânica com Calcário em Sete Dias

Os corpos-de-prova foram moldados com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e com a amostra de cinzas volantes. A adição de Ca(OH)_2 ao material pozolânico é importante para a formação de compostos com propriedades cimentícias. Após a análise do material, o resultado no teste de resistência foi de 6,86 Mpa (Tabela 8) de atividade pozolânica com calcário em sete dias.

Tabela 8: Determinação da Resistência à compressão em sete dias com Cal.

Índice de Consistência (mm)	Resistência à Compressão (MPa)			Média (MPa)	DRM (%)	Especificação ABNT 12653:2014
	Corpos de Prova nº					
	1	2	3			
225	6.75	7.05	6.57	6.79	3.8	≥ 6 Mpa

Os resultados estão de acordo com o requisito de resistência física e mecânica especificado na ABNT 12653:2014 que é ≥ 6 MPa. Como o Ca(OH)_2 é importante para proporcionar maior resistência ao material, os estudos de Mehta et al. (2014) demonstraram que a adição de outros elementos e cinzas volantes nas argamassas, conferem uma resistência ligeiramente mais lenta a este material, em relação à argamassa de referência, sem adição de outros elementos, tendendo a atingir uma resistência final superior ao cimento sem adições após mais dias de cura.

Caracterização Química

A caracterização química da cinza volante é apresentada na Tabela 9. De acordo com a norma ABNT 12653: 2014 (ABNT, 2014), para a cinza ser classificada como material pozolânico, a soma das quantidades de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 deve ser maior, maior ou igual a 70%, o teor de SO_3 deve ser menor ou igual a 5%, a umidade deve ser menor ou igual a 3%, a perda por incêndio deve ser menor ou igual a 6% e o percentual de álcalis disponível em Na_2O menor ou igual a 1,5%.

Tabela 9: Caracterização química das cinzas volantes de carvão mineral

Resultados (%)									
Umidade	P.F.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	SO_3	Na_2O	K_2O
0.31	3.92	57.43	21.25	8.05	1.38	1.57	3.43	0.78	1.46

Os resultados obtidos mostram que as cinzas volantes analisadas atendem aos requisitos químicos da norma. Estes resultados estão em linha com o esperado, em comparação com outros resultados da mesma

origem e qualidade da matéria-prima utilizada nesta investigação. Ahmaruzzaman (2010) demonstrou que as características químicas das cinzas volantes podem ser influenciadas por diversos fatores como técnicas escolhidas para armazenamento, manuseio, tipo de carvão, entre outros.

A Tabela 10 apresenta os resultados das análises químicas realizadas nas cinzas volantes de carvão recebidas dos navios Bunun Brave e Port Canton em janeiro de 2020, no controle de qualidade da Usina Termelétrica de Itaqui. Os resultados da análise química das cinzas volantes de carvão mostraram uma porcentagem de sílica de 60,10% e 59,72% respectivamente. Os resultados obtidos estão de acordo com os observados por Soares (2016), que após analisar a caracterização química das cinzas volantes, encontrou a presença majoritária de sílica (48,81%), alumínio (21,77%) e ferro (14,74%), além de outros elementos, encontrados em quantidades menores. Outro estudo que corrobora os achados do presente estudo foi demonstrado por Chousidis et al. (2016), que encontrou a presença em maiores quantidades de sílica (37,02%) e alumina (16,8%), além de outros componentes. Portanto, os resultados alcançados neste estudo estão de acordo com os observados na literatura.

Tabela 10: Análise química das cinzas volantes produzidos na ENEVA – controle de qualidade 2020.

Resultados (%)								
Navio	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Bunun Brave	60.10	22.16	8.46	0.90	1.54	2.51	0.97	1.47
Port Canton	59.72	22.10	8.34	1.43	1.63	2.53	0.81	1.52

A Tabela 11 mostra a comparação dos elementos majoritários presentes nas cinzas volantes.

Tabela 11: Comparação dos elementos majoritários das cinzas volantes.

Resultados (%)					
Cinzas Volantes	Origem	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃
UTI – Eneva	Colômbia	57.43	21.25	8.05	86.73
Figueroa et al. (2019)	Colômbia	53.21	26.74	9.15	89.10
Criado et al. (2016)	Colômbia	60.60	22,90	6.80	90.30

A composição química das cinzas volantes de certos produtores pode variar significativamente de acordo com o processo de produção, origem e qualidade da matéria-prima. A comparação da análise química das cinzas volantes no presente trabalho, com pesquisas realizadas por outros autores, está descrita na Tabela 11, onde os resultados obtidos revelaram maior proporção do elemento SiO₂ (57,43%) nas amostras de cinzas volantes, mostrando semelhança com os estudos de Figueroa et al. (2019) e Criado et al. (2016) que observaram a presença do mesmo elemento em maiores quantidades nas amostras analisadas, com um percentual de 53,21% e 60,60% respectivamente. Outro elemento encontrado na análise das cinzas volantes foi o Al₂O₃ (Tabela 11), que apresentou proporção de 26,74% no estudo de Figueroa et al. (2019) e 22,90% no estudo de Criado et al. (2016) corroborando os achados de nosso estudo, onde encontramos um percentual de 21,25%.

Em relação à proporção dos principais elementos encontrados nas cinzas volantes deste estudo, foi observada uma proporção de 86,73% (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃), resultados semelhantes aos obtidos nos estudos de Figueroa et al. (2019) e Criado et al. (2016), que apresentou um percentual de 89,10% e 90,30% respectivamente. Portanto, pode-se concluir que os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com as

normas da ABNT 12653: 2014 (ABNT, 2014), com percentual superior a 70%.

Os resultados da composição química das cinzas volantes apresentadas na Tabela 11, as concentrações de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 são equivalentes e confirmam os resultados obtidos no estudo com as cinzas volantes da ENEVA.

Resultados Físicos de Cimentos Produzidos com Cinzas Volantes

Nos resultados físicos listados na Tabela 12, é possível observar nas misturas 6 elevações de algumas características tais como: finura do resíduo na peneira de 45 μm , blaine, consistência normal, tempo de início de ajuste e tempo de término de ajuste conforme aumenta a porcentagem de cinzas volantes em misturas. Por outro lado, os resultados de finura do resíduo na peneira de 75 μm permaneceram os mesmos, os resultados de densidade reais diminuíram e os resultados de expansibilidade Le Chatelier aumentaram na mistura 3 e permaneceram os mesmos até a mistura 6.

Tabela 12: Resultados físicos dos cimentos produzidos com as cinzas volantes.

Ensaio	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Especificação NBR 16697:18
Finura – 75 μm (%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	$\leq 8,0$
Finura – 45 μm (%)	1.2	1.6	2.2	2.7	2.9	3.1	-
Massa Específica Real (g/cm^3)	2.98	2.98	2.96	2.94	2.94	2.93	-
Blaine (cm^2/g)	4.827	5.045	5.213	5.336	5.489	5.614	-
Consistência Normal (%)	30.4	30.6	31.6	32.0	32.1	32.5	-
Tempo de Início de Pega (min)	180	215	255	280	300	310	≥ 60
Tempo de Fim de Pega (min)	225	270	315	345	375	406	-
Expansibilidade quente (mm)	0.0	0.0	0.5	0.5	0.5	0.5	≤ 5

C1= Cimento 1; C2= Cimento 2; C3= Cimento 3; C4= Cimento 4; C5= Cimento 5; C6= Cimento 6

Resultados Químicos de Cimentos Produzidos com Cinzas Volantes

Na Tabela 13 exibe os resultados químicos dos cimentos produzidos neste trabalho.

Tabela 13: Resultados químicos dos cimentos produzidos com as cinzas volantes.

Ensaio	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Especificação NBR 16697:18
Perda ao Fogo (%)	332	2.88	2.75	2.61	2.48	2.45	$\leq 6,5$
SiO_2 (%)	33.29	34.33	34.77	35.00	35.39	35.75	-
Al_2O_3 (%)	5.54	6.26	6.68	7.24	7.67	8.11	-
Fe_2O_3 (%)	3.56	3.78	3.92	4.13	4.29	4.50	-
CaO (%)	48.98	46.01	43.97	42.44	41.57	39.91	-
MgO (%)	1.56	1.63	1.52	1.50	1.49	1,48	-
SO_3 (%)	2.92	3.00	3.03	3.08	3.20	3.26	≤ 4.5
Na_2O (%)	0.19	0.22	0.25	0.27	0,30	0,32	-
K_2O (%)	0.64	0.67	0.69	0.72	0,75	0,77	-

C1= Cimento 1; C2= Cimento 2; C3= Cimento 3; C4= Cimento 4; C5= Cimento 5; C6= Cimento 6

Por meio dos resultados químicos apresentados na Tabela 13, é possível observar que no cimento produzido, os resultados de dióxido de silício, óxido de alumínio, óxido de ferro, anidrido sulfúrico, óxido de sódio e óxido de potássio aumentam suas concentrações nas misturas conforme o percentual de adição de cinza no cimento aumentou. Os outros parâmetros químicos descritos na Tabela 13 não mudaram significativamente com a adição de mais cinzas volantes. É importante ressaltar que todos os resultados estão

de acordo com as especificações da NBR 16697:2018 (ABNT, 2016). Os resultados permitem concluir que o material pode ser utilizado como material cimentício complementar na obtenção de cimento com propriedades químicas adequadas para utilização como material na construção civil (WITZKE, 2018).

Resultados Mecânicos da Resistência à Compressão de Cimentos Produzidos com Cinzas Volantes

A Tabela 14 mostra os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa de cimento produzidos no estudo, feitos com vários níveis de adição de cinza volante.

Tabela 14: Resultados mecânicos de resistência à compressão dos cimentos produzidos com as cinzas volantes.

Amostras	Idades (dias)	Corpos de Prova (MPa)				Média (MPa)	DRM (%)	Especificação NBR 16697:18
		1	2	3	4			
Cimento 1	3	27.4	26.7	26.2	26.9	26.8	2.2	≥ 10.0 MPa
	7	32.8	33.4	33.8	32.9	33.2	1.8	≥ 20.0 MPa
	28	41.7	40.6	42.0	42.3	41.7	2.6	≥ 32.0 MPa
Cimento 2	3	26.1	25.4	25.1	24.6	25.3	3.2	≥ 10.0 MPa
	7	32.0	30.9	31.8	31.5	31.6	2.2	≥ 20.0 MPa
	28	40.1	41.2	41.0	40.9	40.8	1.7	≥ 32.0 MPa
Cimento 3	3	24.2	23.9	24.3	23.5	24.0	2.1	≥ 10.0 MPa
	7	29.0	29.9	29.3	30.7	29.7	3.4	≥ 20.0 MPa
	28	40.1	39.7	39.9	40.4	40.0	1.0	≥ 32.0 MPa
Cimento 4	3	22.9	22.4	23.0	22.0	22.6	2.7	≥ 10.0 MPa
	7	26.5	26.5	25.9	26.1	27.3	2.2	≥ 20.0 MPa
	28	39.5	39.0	39.8	39.3	39.4	1.3	≥ 32.0 MPa
Cimento 5	3	20.0	20.6	19.6	20.9	20.3	3.4	≥ 10.0 MPa
	7	24.7	25.1	25.3	25.5	25.2	2.0	≥ 20.0 MPa
	28	36.5	36.8	37.1	37.0	36.9	1.1	≥ 32.0 MPa
Cimento 6	3	18.5	19.0	19.2	18.7	18.9	2.1	≥ 10.0 MPa
	7	23.4	23.0	23.3	22.7	23.1	1.7	≥ 20.0 MPa
	28	34.0	33.7	34.4	34.3	34.1	1.2	≥ 32.0 MPa

Os resultados indicam que com o aumento da porcentagem de cinza volante adicionada aos corpos-de-prova e a diminuição da porcentagem de clínquer nas misturas, a resistência à compressão diminui em todas as idades. Comparando os extremos, as misturas C1 e C6, o decréscimo aos 3 e 7 dias foi significativo na ordem de 30%, mas aos 28 dias foi de 18%, notando, no entanto, que todas as misturas testadas atendem às especificações da norma NBR 16697: 2018 (ABNT, 2018).

CONCLUSÕES

O objetivo principal deste estudo foi investigar as cinzas volantes produzidas na Usina Termelétrica de Itaqui, verificando seu desempenho na produção de cimento Portland e avaliando a viabilidade de sua utilização como matéria-prima cimentícia.

O estudo realizado mostrou que a amostra de cinzas volantes atingiu o índice de atividade pozolânica e os parâmetros físicos, químicos e mecânicos propostos pela ABNT NBR 12653: 2014. Além disso, foi possível observar que a amostra de cinzas volantes apresentou os parâmetros necessários descritos na literatura pertinente, os quais caracterizam a utilização destas como material pozolânico na produção de cimento Portland, atendendo a todos os requisitos da ABNT NBR 16697: 2018 padrão.

As diferentes misturas de cimento apresentaram análises químicas com algumas tendências para os

elementos analisados, resultando também em diferentes resistências à compressão, mas todas atendendo aos requisitos da norma. O uso de cinzas volantes para substituir até 25% do clínquer pode reduzir as emissões em até 15.614 Toneladas de CO₂ por ano. A possibilidade de resgate de R\$ 730.735,20 por ano em créditos de carbono e a redução de custos de R\$ 311.244,34 por ano nas rotas de transporte mostram a viabilidade econômica do uso das cinzas volantes como matéria-prima. Outros custos, como o valor do armazenamento de resíduos sólidos e a diferença de preço entre o percentual de matéria-prima substituída, não existem mais.

Os resultados encontrados são positivos tanto para o reaproveitamento da cinza volante na produção de cimento quanto para a preservação do meio ambiente.

Conclui-se que a adição de até 25% de cinza volante na produção de cimento resultou em resultados físicos, mecânicos e químicos satisfatórios, tornando a cinza volante uma opção economicamente viável. Um material que era considerado resíduo sólido e causava elevados custos de transporte e armazenamento, ganhou valor econômico e passou a ser classificado como uma importante matéria-prima na produção de cimento.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 5752**: Materiais Pozolânicos: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **BATS. NBR 16697**: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10007**: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12653**: Materiais Pozolânicos: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15894-3**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação da finura por meio de peneira de 45 µm. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14656**: Cimento Portland e matérias-primas: Análise química por espectrometria de raios X: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 24**: Materiais pozolânicos: Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR NM 18**: Cimento Portland: Análise química: Determinação

das perdas por fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AHMARUZZAMAN, M.. A review on the utilization of fly ash. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.36, n.3, p. 327-363, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>

ALTHEMAN, D.; FERREIRA, G. C.; MONTINI, M.; GALLO, J. B.; ROCHA, A. I. B. C.. Avaliação de cinzas volantes de carvão em matrizes cimentícias. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, v.10, n.6, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1983-41952017000600009>

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**: Parte III, Fontes de energia não renováveis, carvão mineral. Brasília: ANEEL, 2009.

BRASIL. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 5 ed. Brasília: MCTI, 2020.

CHOUSIDIS, N.; IOANNOU, I.; RAKANTA, E.; KOUTSODONTIS, C.; BATIS, G.. Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes. **Construction and Building Materials**, v.126, n.11, p.86-97, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.024>

CORRÊA, M. C. C.; MARQUES, A. R.. O processo de implantação da Termelétrica do Itaqui, São Luís-MA e a sua influência na dinâmica territorial da Vila Nova Canaã, Paço do Lumiar-MA. **Revista Campo-Território**, v.12, n.28, p.203-233, 2017. DOI: <http://doi.org/10.14393/RCT122810>

CRIBADO, M.; APERADOR, W.; SOBRADOS, I.. Microstructural

and Mechanical Properties of Alkali Activated Colombian

Raw. Materials. **Materials**, v.9, n.3, 2019. DOI:

<http://doi.org/10.3390/ma9030158>

ENEVA. **Relatório de Sustentabilidade 2019**. Rio de Janeiro: ENEVA, 2019.

FIGUEROA, O. H.; VANEGAS, E. J. V.; GUTIÉRREZ, J. A.. Mechanical strength of experimental mortars for plastering with partial addition of fly ash and hydrated lime. **Journal of Physics: Conf. Ser.**, v.1386, p.28-31, 2019. DOI:

<http://doi.org/10.1088/1742-6596/1386/1/012071>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades São Luís-MA-Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

IEA. Agência Internacional de Energia. **Relatório de combustíveis**. IEA, 2018.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M.. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

RIVAS, J.; LETELIER, V.; PARODI, C.; MANOSALVA, M.. Evaluation of Industrial Ashes in Cement Replacement in Mortars. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Scienc**, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1088/1755->

[1315/503/1/012073](http://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012073)

SIQUEIRA, J. S.. **Reciclagem de Resíduos a partir de cinzas de carvão mineral: produção de argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento.

ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.

SOARES, E; SILVA, R. A.; MIRANDA, T.; OLIVEIRA, D. V.; LEITÃO, D.; CRISTELO, N.; OLIVEIRA, J.. Desempenho mecânico de Alvenaria de BTC estabilizados através de ativação alcalina de cinzas volantes In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA. **Anais**. Porto, 2016.

WATTS, A.. **Modern Construction Handbook**. 5 ed. Basel: Birkhäuser; 2018.

WITZKE, F. B.. **Propriedades de Concretos Estruturais contendo cinza volante em substituição parcial ao cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.