

INCORPORAÇÃO DE ELEVADOS PERCENTUAIS DE CINZAS LEVES EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO PARA USO EM INTERTRAVADOS

Fernanda Leite Soares¹
Amanda Lyz Nogueira Rodrigues¹
Jorge Barbosa Soares²
Juceline Batista dos Santos Bastos¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

²Universidade federal do Ceará

RESUMO

A pavimentação é um dos setores que possui potencial para incorporação de resíduos. Assim, esta pesquisa investiga a incorporação das cinzas leves oriundas da queima de carvão para geração de energia em substituição ao cimento na produção de blocos intertravados. Para isso, os materiais tiveram realizadas sua caracterização física, química e ambiental. Ademais, foram dosados concretos com adição de cinzas leves nas porcentagens de 25% (+75% de cimento), 50% (+50% de cimento) e 75% (+25% de cimento), além da dosagem de referência com 100% de cimento. As cinzas leves apresentaram propriedades pozolânicas. Foram moldados corpos de prova (CPs) cilíndricos e blocos para análise de resistência à compressão. Os CPs apresentaram resistência reduzida à medida que as cinzas foram sendo adicionadas, independentemente da idade do concreto. Quando se analisam os blocos, têm-se resultados de resistência à compressão (cerca de 20MPa) bem semelhantes para os diferentes traços aos 28 dias.

Palavras-chave: Cinzas leves, intertravados, resistência mecânica, resíduos.

ABSTRACT

The pavement industry is one of the sectors that has potential for incorporation of industrial residues. Thus, this research investigates the incorporation of fly ash from coal burning for power generation in substitution of cement in the production of interlocking blocks. For this, the materials had their physical, chemical and environmental characterization. In addition, concrete with light ash was dosed in the percentages of 25% (+75% cement), 50% (+50% cement) and 75% (+25% cement), besides the reference dosage with 100% of cement. Fly ash had pozzolanic properties. Cylindrical specimens and blocks were molded for compressive strength analysis. The cylinders showed reduced resistance as the ash were added, regardless of the concrete age. When analyzing the blocks, we have very similar compressive strength results (about 20MPa) for the different strokes at 28 days.

Keywords: Fly ash, interlocked blocks, mechanical strength, residues.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A lei nº 12.305 (2010) da Política Nacional de Resíduos Sólidos explicita a relação entre o poder público e os fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes, de forma que estes têm a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto. Um desses produtos é a cinzas resultante da queima do carvão em termoelétricas.

Nesse contexto, usinas termoelétricas podem gerar grandes montantes energéticos, porém com a correspondente produção massiva de resíduos. Os altos custos de estocagem e a limitação de área para armazenagem desses resíduos tem sido uma problemática que motiva buscas por alternativas que sejam técnicas, ambientais e economicamente viáveis para o descarte das cinzas (Barros, 2015). Ademais, a construção de módulos para armazenar os resíduos possui um alto custo, da ordem de 12 milhões de reais.

Davis *et al.* (1937) investigaram o concreto contendo cinzas leves e esse trabalho fundamentou especificações, métodos de ensaio quanto à utilização das cinzas, como aglomerante no concreto. Os últimos 50 anos têm visto o uso de cinzas leves crescer e atingir 15 milhões de

toneladas usadas nos concretos e rejuntas nos Estados Unidos (*American Coal Ash Association, ACAA, 2006*).

Segundo a ACAA (2003), a implementação das cinzas leves no concreto melhora a trabalhabilidade, reduz a demanda de água e o calor de hidratação, além de apresentar benefícios ao concreto endurecido, como: aumento de resistência, permeabilidade reduzida e durabilidade melhorada. A Tabela 1 exibe as classes para as cinzas leves e a Figura 1 relaciona o teor de óxido cálcio (CaO) *versus* $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ e subdivide em tipos.

Tabela 1: ASTM C618 (2018) para as cinzas leves

Classe	Descrição da ASTM C618 (2018)	$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$
F	Cinzas leves produzidas a partir de queima de antracite ou carvão betuminoso. Classe de cinzas leves com propriedades pozolânicas.	$\geq 70\%$
C	Cinzas leves produzidas a partir de lignite ou carvão sub-betuminoso. Esta classe de cinzas leves, além de ter propriedades pozolânicas, também tem algumas propriedades cimentícias.	$\geq 50\%$

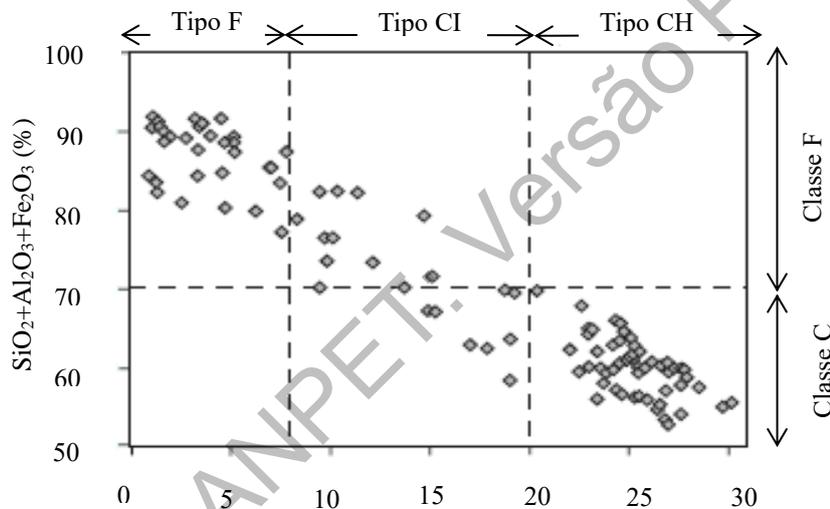


Figura 1: Relação entre o teor de CaO nas cinzas leves (%) e o teor de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ para 110 cinzas leves norte-americanas (Fonte: adaptada de Andrabi, 2018)

O teor de óxido de cálcio *versus* $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ classifica as cinzas leves nos tipos F, CI ou CH, além da classificação em classes, sendo F ou C pela ASTM C 618 (2019). No Tipo F, as cinzas apresentam menos de 8% de CaO. No Tipo CI, esse teor de CaO está entre 8% e 20%, e no Tipo CH os teores de CaO são maiores do que 20%. Para as classes, tem-se que para porcentagem maior ou igual a 50% e menor ou igual a 70% de $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ trata-se da Classe C, e para esse somatório maior ou igual a 70%, Classe F.

O CaO (óxido de cálcio) interfere na resistência à compressão dos concretos. Yip *et al.* (2005) investigaram que a resistência ótima é atingida com 8,6% de CaO. Assim, a adição de baixas quantidades de CaO forma geopolímeros e silicatos de cálcio hidratado, funcionando este último como microagregado (Torgal *et al.*, 2007).

O piso intertravado mostra-se vantajoso, sendo de fácil manutenção, quando comparado a outros pisos que necessitam de equipamentos dispendiosos e de um grande número de pessoas

para sua execução. Este necessita de uma equipe menor e equipamentos manuais, além de poder ser moldado em diferentes formatos e cores (Santos e Borja, 2007). Considerando os benefícios da pavimentação intertravada aliados à necessidade de dar destinação às cinzas leves, surge a necessidade de avaliar a viabilidade técnica e ambiental da utilização de altos percentuais das cinzas oriundas das termoelétricas para substituir o aglomerante na composição do piso intertravado dormido.

2. METODOLOGIA

O volume de material coletado foi de 1m³ para cada agregado, brita e areia, 3 sacos de cimento CPIV e aproximadamente 85kg de cinzas oriundas de uma termoelétrica no Ceará. Após a coleta dos materiais que compõem a mistura (cimento, areia, brita e cinzas), foram realizadas as caracterizações químicas das cinzas por meio da fluorescência de raio X para análise dos óxidos que constituem esses materiais (Figura 2); e as caracterizações ambientais a partir dos ensaios de lixiviado e solubilizado, visando a classificação do resíduo quanto à sua periculosidade. Foram ainda realizados ensaios de caracterização física dos constituintes do concreto (Tabela 2).

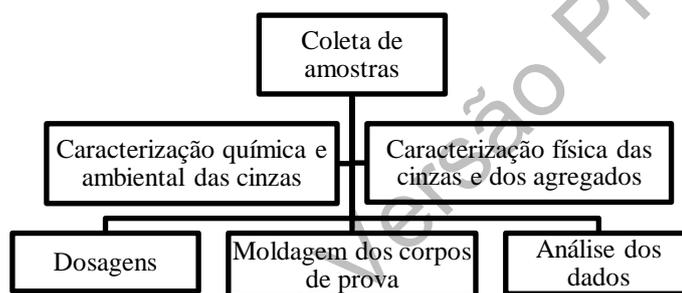


Figura 2: Etapas metodológicas

Tabela 2: Ensaios para avaliação dos constituintes do concreto

Materiais	Ensaio	Normas
Areia	Densidade real	DNER-ME 093, 1994
	Equivalente de areia	DNER-ME 054, 1997
	Limite de liquidez	DNER-ME 122, 1994
	Limite de plasticidade	DNER-ME 082, 1994
	Análise granulométrica por peneiramento	DNER-ME 080, 1994
Brita	Absorção e densidade do agregado graúdo	DNER-ME 081, 1998
	Análise granulométrica por peneiramento	DNER-ME 080, 1994
Cinza	Densidade real	DNER-ME 093, 1994
	Massa específica	NBR NM 52 ABNT, 2003
	Determinação da umidade hidroscópica	DNER-ME 213, 1994
	Limite de liquidez	DNER-ME 122, 1994
	Limite de plasticidade	DNER-ME 082, 1994
	Extrato lixiviado	NBR 10005 ABNT, 2004
	Extrato solubilizado	NBR 10006 ABNT, 2004
	FRx (fluorescência de raio X)	NBR 14656 ABNT, 2001
<i>Aggregate Image Measurement System (AIMS)</i>	Al Rousan, 2004	
Cimento	Informações fornecidas pelo fabricante	-

Após a realização dos ensaios supracitados, foi definido o traço de referência, fornecido por uma empresa local que produz blocos de concreto intertravado, sendo este 1:2,5:2:1 respectivamente, cimento, areia, brita e água/cimento. No entanto, como este traço não atendeu ao *Slump test* devido a quantidade excessiva de água, foi adotado o traço 1:2,5:2:0,5. A partir

do traço de referência, ocorreram substituições do aglomerante por cinzas [passante da peneira 1,18mm (16”), a fim de obter um material mais fino] seguindo a Equação 1.

$$M_{as} = \frac{\gamma_{cp}}{\gamma_{ag}} \times P_{ag/TR} \times \%Sub \quad (1)$$

Sendo: M_{as} – Massa a ser substituída [g]; γ_{cp} – Massa específica das cinzas [g/cm^3]; γ_{ag} – Massa específica do cimento [g/cm^3]; $P_{ag/TR}$ – Peso do aglomerante - referência [g]; e $\%Sub$ – Porcentagem a ser substituída [%].

Dessa forma, têm-se os traços 0% (T0 ou TR) sem a adição da cinza, com 25% (T25), com 50% (T50) e com 75% de cinzas (T75). A partir das definições da massa a ser substituída, foram moldados os Corpos de Prova (CPs) cilíndricos e em blocos (*pavers*), sendo os CPs cilíndricos para avaliação mecânica moldados com 10 x 20cm. Os blocos prismáticos foram produzidos nas dimensões de 6 x 10 x 20cm em formas de plástico. A Figura 3 apresenta os experimentos realizados com estes, sendo 2 CPs para cada análise. A Tabela 3 traz as normas correspondentes.

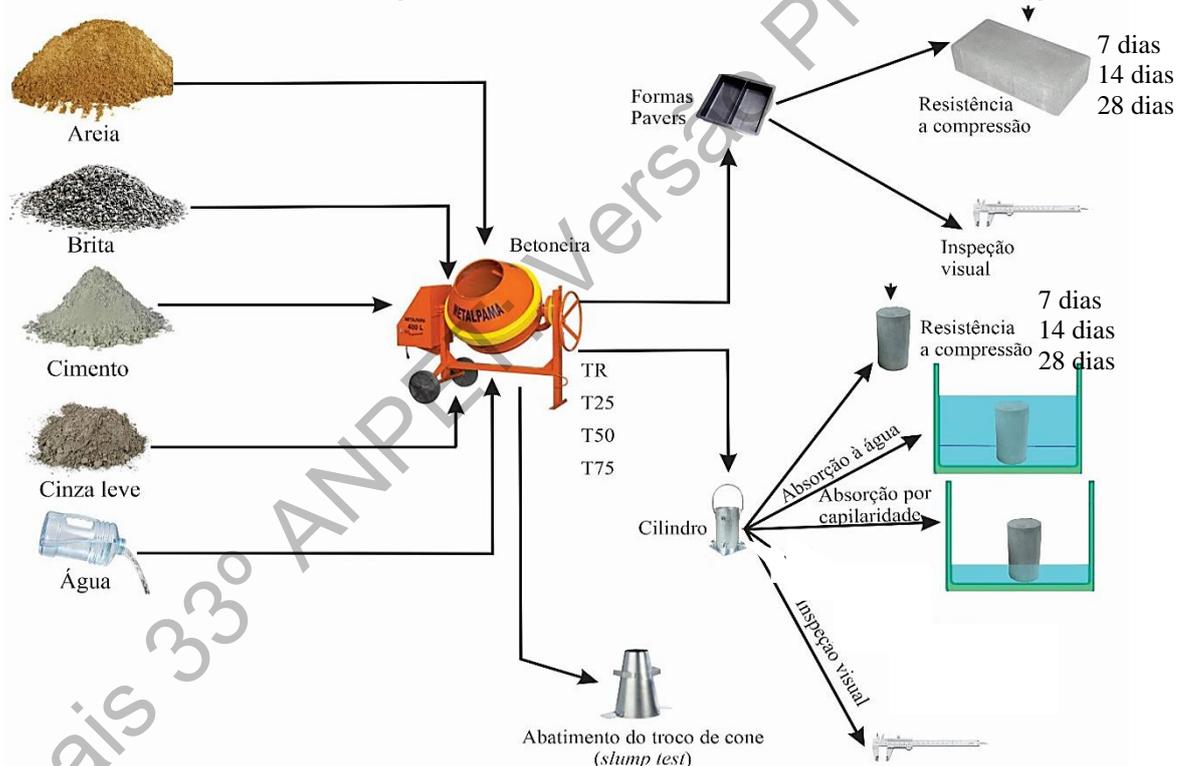


Figura 3: Processo de produção e caracterização dos CPs

Tabela 3: Ensaios realizados nos concretos e respectivas normas adotadas

Ensaios	NBR
Resistência à compressão para CP cilíndrico	5739, 2007
Resistência à compressão para bloco	9781, 2013
Inspeção visual – CP cilíndrico e bloco	9781, 2013
Abatimento do tronco de cone (<i>slump test</i>) no concreto fresco	NM 67, 1998
Absorção de água por imersão e massa específica	9778, 2005
Absorção de água por capilaridade	9779, 2012

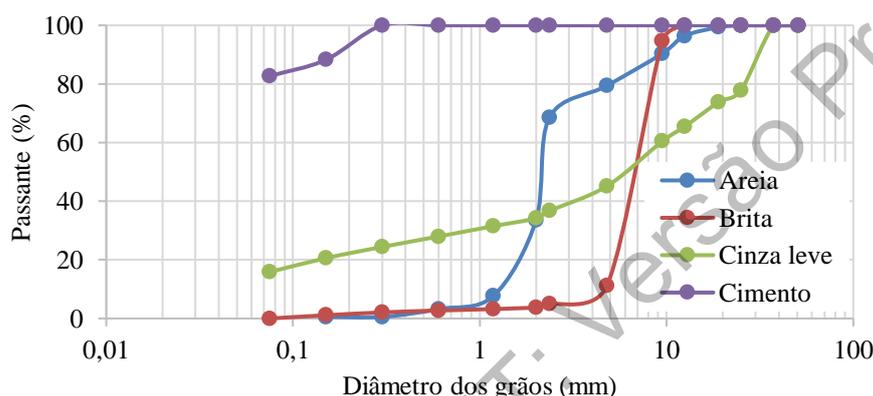
O ensaio de absorção por imersão, expresso em porcentagem, indica o quanto o conjunto completamente submerso absorve de água em 72h e após fervura. Já o ensaio de absorção por

capilaridade, expresso em g/cm^3 , indica o quanto a água vai percolar pelos vazios contidos na peça. Essa informação é obtida por meio de pesagens em 3, 6, 24, 48 e 72h.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização das cinzas leves, dos agregados e do cimento

A Figura 4a exibe as curvas granulométricas das cinzas, areia, brita e cimento. Na curva granulométrica das cinzas, com aspecto visual mostrado na Figura 4b, observa-se que o passante da peneira 0,075mm foi de 16%, além de apresentar densidade real de 2,063. Dada essa granulometria e a ausência de plasticidade indicada nos Limites de Plasticidade e de Liquidez, as cinzas foi classificada como não plástica, sendo sua umidade hidrocópica de 3,96%. A massa específica das cinzas foi determinada pelo Frasco de Chapman, resultando em $2,000\text{g}/\text{cm}^3$. Essa é a massa específica utilizada na Equação 1, além da massa específica do cimento, que foi $3,060\text{g}/\text{cm}^3$ (indicada pelo fabricante).



a) Constituintes do concreto

b) Cinzas leves

Figura 4: Constituintes do concreto e cinzas leves.

A finura das cinzas leves afeta a taxa de atividade pozolânica e a trabalhabilidade. As especificações exigem um mínimo de 66% que passa na peneira 0,044mm (ACAA, 2003). Para esta pesquisa, a cinza apresentou 16% passante na 0,075mm. Assim, as cinzas leves não apresentaram a finura necessária para atender esse requisito. Por esse motivo, optou-se por fracionar as cinzas e utilizar apenas o passante na peneira 16" (1,18mm).

A forma e a textura das partículas dos agregados influenciam mais as propriedades do concreto no estado fresco do que endurecido. Comparadas às partículas lisas e arredondadas, as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis e, portanto, aumentam o custo do concreto. A forma diz respeito às características geométricas, tais como: arredondada, angulosa, alongada ou achatada. Partículas formadas por atrito tendem a ser arredondadas, pela perda de vértices e arestas. Desta forma, a Tabela 4 apresenta os resultados referentes ao AIMS realizado com as cinzas leves.

Como classificação, tem-se a textura com rugosidade moderada e a forma 2D como semialongado, ou seja, este tipo de grão irá necessitar de uma maior quantidade de pasta de cimento para recobrir a sua superfície, para que então tenha uma boa trabalhabilidade. Quanto à angularidade, as cinzas mostraram-se arredondadas, ou seja, com poucas arestas ou vértices.

Tabela 4: Classificação Al Rousan (2004) quanto à forma das cinzas leves

Parâmetros	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	Classificação Al Rousan (2004)
Esfericidade	0,73	0,05	14,15	Esfericidade moderada
Textura	430,92	199,13	46,21	Rugosidade moderada
Forma 2D	8,03	2,28	28,34	Semialongado
Angularidade graúdo	1561,58	570,18	36,51	Arredondado
Angularidade miúdo	3775,11	1446,80	38,32	Arredondado

A Fluorescência de raio X mostra as porcentagens dos óxidos existentes nas cinzas leves (Figura 5). Com base nesses, o $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 70\%$. Dessa forma, as cinzas desta pesquisa são classificadas na Classe F, ou seja, apresentam algumas propriedades pozolânicas, e de acordo com o CaO sabe-se que as cinzas leves são do Tipo CI. De acordo com Santos (2017), a quantificação dos óxidos obtidos pelo FRX não é parâmetro de cristalinidade, ou seja, nem todo conteúdo de SiO_2 e Al_2O_3 está de fato disponível para reagir no sistema.

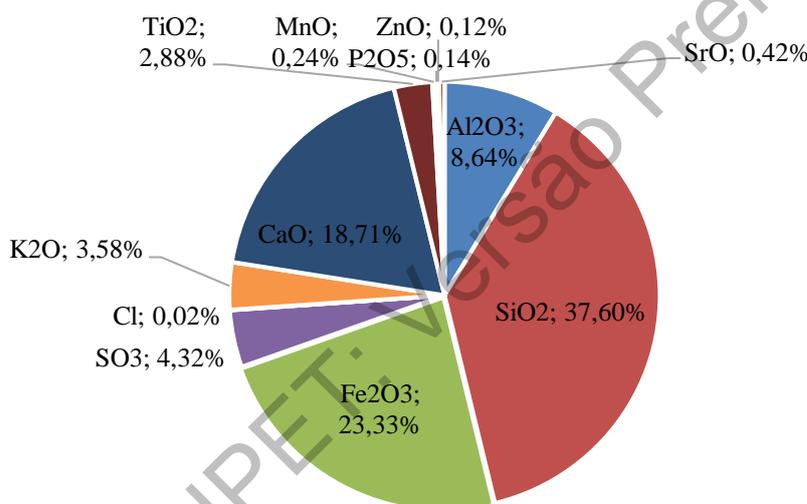


Figura 5: Fluorescência de raio X

Para avaliação da areia, têm-se a densidade real e o equivalente de areia respectivamente de 2,626 e 97,5%. Dada a granulometria e a ausência de plasticidade indicadas nos ensaios de Plasticidade e Liquidez, a areia foi classificada como não plástica. A brita, classificada por meio da granulometria como 9,5mm (3/8”), apresentou densidade de 2,613 e a absorção de 0,58%, sendo originária de rocha granítica.

De acordo com a Tabela 5 e com base na NBR 10004 (ABNT, 2004), levando em conta apenas o solubilizado as cinzas leves seriam classificadas como Classe II A. No entanto, dos seis compostos identificados no ensaio de lixiviado, apenas o fluoreto apresenta-se acima do Valor Máximo Permitido (VMP). Dessa forma, as cinzas foram classificadas como Classe I (perigosa). Segundo Barros (2015), o excesso de fluoreto pode causar vários danos ao organismo humano, como fluorose dentária, queda de cabelos crônica, varizes, catarata, dentre outros problemas de saúde.

Observam-se, da Tabela 6, algumas semelhanças quanto à caracterização das cinzas, como os limites de plasticidade e liquidez, além da densidade real desta pesquisa e em Lopes (2011).

Quanto à classificação ambiental das cinzas investigadas, estas não apresentaram um padrão de, variando de Classe I (perigosa) à II A (não inerte), de acordo NBR 10004 (ABNT, 2004).

Tabela 5: Extratos lixiviado e solubilizado com seus respectivos valores máximos permitidos

Concentração	Extrato			
	Lixiviado	VMP (lixiviado)	Solubilizado	VMP (solubilizado)
Fluoreto	687,030	150	13,316	1,500
Cloreto	3,546	-	33,980	250
Nitrato	1,457	-	1,520	10
Fosfato	5,679	-	0,480	-
Sulfato	1023,457	-	3462,24	250
Nitrito	3,604	-	3,790	-

Tabela 6: Investigações de cinzas para uso na pavimentação

Avaliações	Rhode (2006)	Lopes (2011)	Barros (2015)	Silva (2017)	Vasconcelos (2018)	Alcântara (2018)	Soares (2019)
Origem das cinzas	Charqueadas/RS	Capivari de Baixo/SC	Energia Pecém/CE				
Cinzas	Pesadas	Pesadas (CP) e leves (CL)	Leves	Pesadas	Homogeneizada	Pesadas	Leves
Liquidez			Não Plástico				
Plasticidade			Não Plástico				
Densidade real	2,210	1,988 (CP), 2,105 (CL)	2,317	2,350	2,440	-	2,063
Classificação Ambiental	Classe II A	Classes II B (CP) e A (CL)	Classe II A	Classe I	Classe II A, Classe I	Classe II A	Classe I

3.2 Produção do concreto e moldagem dos corpos de prova

Os valores de massa específica das cinzas leves ($2,000\text{g/cm}^3$) e do cimento ($3,060\text{g/cm}^3$), além das porcentagens de 25, 50 e 75 foram aplicados à Equação 1 para definir a massa de cimento a ser substituída pelas cinzas.

A partir dessas substituições foram produzidos concretos para serem avaliados aos 7, 14 e 28 dias. Dessa produção, foi possível constatar que o aumento das cinzas leves exigia um menor volume de água para atender ao *Slump test*. Assim, a coesão entre os grãos foi reduzida com adição das cinzas. ACAA (2003) já apontava menor consumo de água em concretos com cinzas leves. Dessa forma, com a diminuição da água, foram obtidos os seguintes traços: T25 com 1:2,5:2:0,3 (exemplificado na Figura 6); o T50 com 1:2,5:2:0,26; e o T75 com 1:2,5:2:0,24. Os abatimentos do tronco de cone de todos os traços foram classificados quanto à consistência (Tabela 7). A ACI 211.R9 (2018) indica que o concreto destinado a pavimentação deve ter um abatimento entre 25 e 75mm.

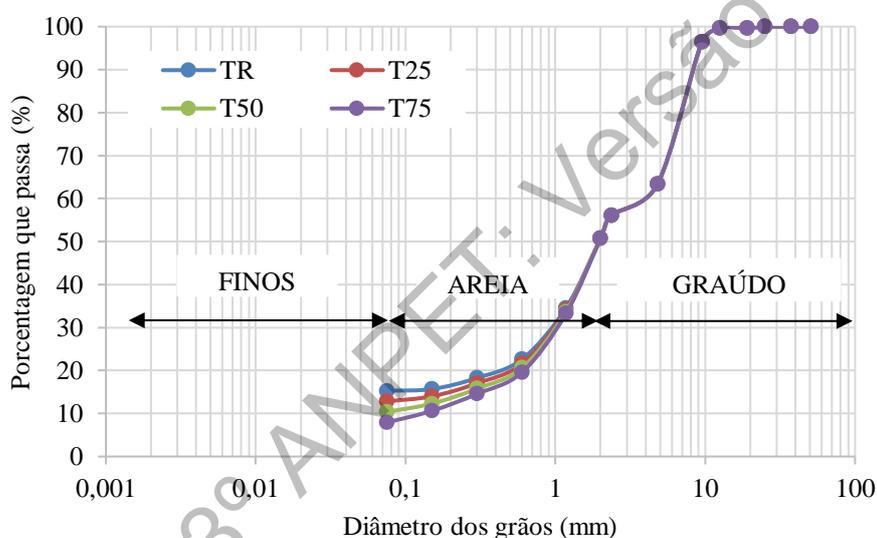
Tabela 7: *Slump test* de cada traço e descrição da consistência (Fonte: ACI 211.R9, 2018).

Traços	Abatimento (cm)	Descrição da Consistência
T0	7	Fluido
TR25	3	Seco para plástico
TR50	3	Seco para plástico
TR75	3	Seco para plástico



Figura 6: Slump test do T25

A Figura 7a apresenta a granulometria das misturas T0, T25, T50 e T75. Observa-se que a porção arenosa da mistura foi se alterando com a adição das cinzas leves, em decorrência da granulometria da mesma apresentar grãos maiores em relação ao do cimento, ou seja, o cimento é mais fino que as cinzas. A Figura 7b mostra a diferença na coloração em decorrência da adição das cinzas leves, de forma que quanto maior essa adição, mais escuro fica o intertravado.



a) Granulometria das misturas.

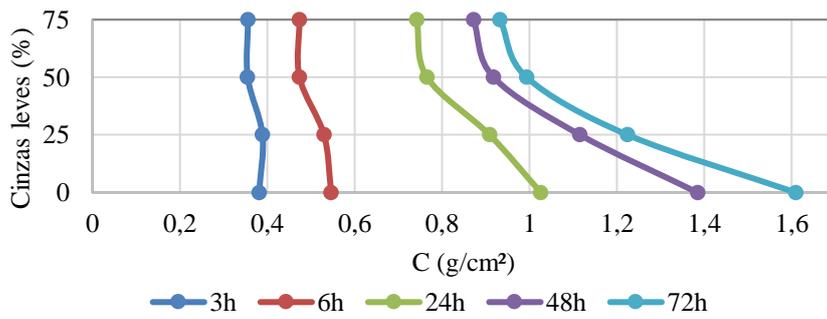
b) Intertravados

Figura 7: Granulometria dos traços (a) e os intertravados desses traços (b)

3.3 Caracterização dos CPs cilíndricos e blocos

Quanto aos resultados de absorção por imersão em água, obteve-se cerca 7% para T0 e um pouco mais de 8% para os demais traços. Assim, a adição de cinzas leves aumenta a absorção do concreto. Silva (2017) observou absorção nos CPs cilíndricos de concreto com adição de cinza pesada com valor médio inferior a 6%.

As Figuras 8a e b exibem os resultados do ensaio de absorção por capilaridade, onde C é a absorção de água, expressa em g/cm². Observa-se que quanto maior a adição de cinzas, menor é a absorção por capilaridade, de forma que o T0 apresenta após 72h uma absorção de 1,609g/cm², enquanto T75 exibe absorção de 0,933g/cm².

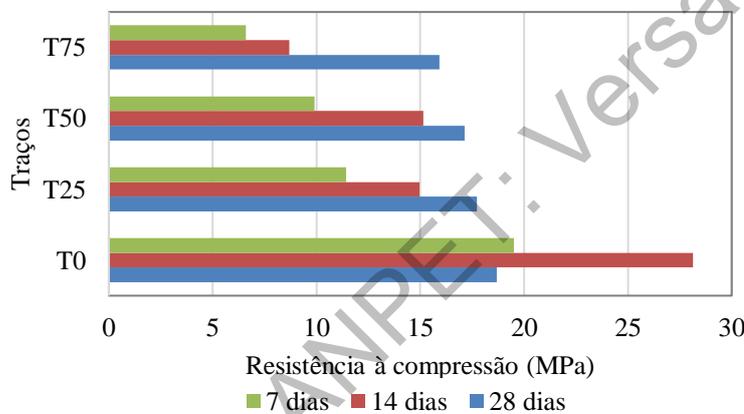


a) Absorção por capilaridade

b) Ensaio

Figura 8: Resultados de absorção por capilaridade

As Figuras 9a e 9b apresentam os resultados referentes ao ensaio de resistência à compressão dos CPs cilíndricos e a Figura 10 os resultados referentes ao mesmo ensaio, contudo para os blocos. É possível observar que os CPs cilíndricos com adição de cinzas leves apresentaram resistência inferior ao T0. Essa resistência foi reduzida à medida que as cinzas foram sendo adicionadas, independentemente da idade do concreto. Quando se analisam os blocos, têm-se resultados de resistência à compressão (cerca de 20MPa) bem semelhantes para os diferentes traços aos 28 dias.



a) Resistência à compressão - cilindros

b) Ensaio

Figura 9: Resistência à compressão - CPs cilíndricos (a) e execução do ensaio (b)

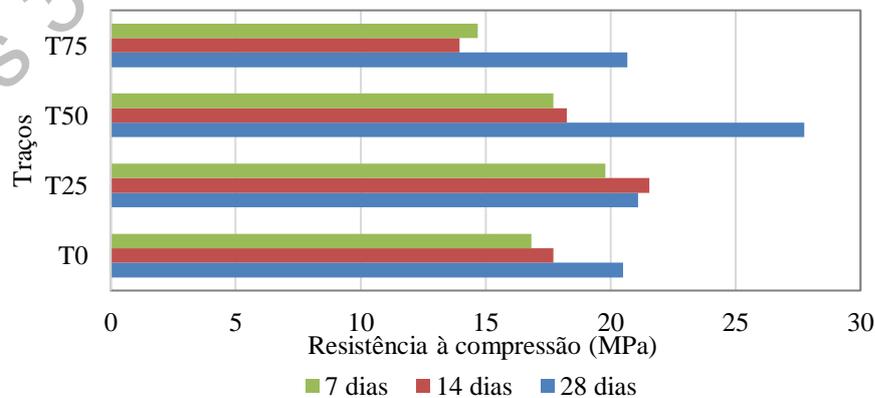


Figura 10: Resistência à compressão – blocos

Os resultados dos blocos com 50% de cinzas leves mostraram-se promissores (28MPa), com resultados superiores ao encontrado para o traço de referência. Destaca-se que os traços não

apresentaram a resistência exigida (35MPa) pela NBR 9781 (ABNT, 2013). Contudo, estas dosagens podem ser utilizadas em vias com menor solicitação de tráfego, como calçadas e ciclovias, por exemplo.

Destaca-se ainda que outros autores (Alcântara, 2018) já citavam a obtenção de resultados inferiores aos exigidos pela norma, com os blocos investigados apresentando resistência à compressão de 21MPa, sendo a resistência máxima com a adição de cinzas. Silva (2017) indicou que os CPs cilíndricos alcançaram a resistência de 25MPa, com adição de cinza pesada em substituição a areia, de forma que esta resistência foi superior a dosagem de referência.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo avaliou a viabilidade técnica e ambiental da utilização de altos percentuais das cinzas, rejeito das termoelétricas, para substituir o aglomerante na composição de blocos para pavimentos intertravados. As cinzas leves foram classificadas como Classe F e Tipo CI, ou seja, apresenta propriedades pozolânicas e a concentração de CaO pode interferir na resistência à compressão. Além disso, foram classificadas como Classe I (perigosas) e apresentaram forma que necessita de mais pasta de cimento, para que suas partículas sejam recobertas. O ensaio de absorção por capilaridade indicou que com a adição das cinzas leves ao concreto, foi menor a ascensão da água, o que seria benéfico, pois com a percolação da água as peças de concreto se tornam mais propensas ao rompimento. Essa menor ascensão pode aumentar a vida útil do intertravado. Quanto à absorção por imersão, a adição de cinzas leves aumenta essa absorção. As resistências à compressão dos blocos com cinzas foram superiores ao do traço de referência, em especial o T50 que aos 28 dias apresentou resistência de 28MPa, portanto, 40% superior. Os traços não apresentaram resistência superior a exigida de 35MPa pela NBR 9781 (ABNT, 2013), contudo estas dosagens podem ser utilizadas em vias com menor solicitação de tráfego, como calçadas e ciclovias, por exemplo. Os resultados obtidos se assemelham aos encontrados na literatura, portanto conclui-se que o T50 apresentou resultados promissores na absorção por capilaridade e imersão, assim como nas propriedades mecânicas. Em vista disso o resíduo investigado pode ser utilizado na fabricação de intertravados, contudo, incentiva-se a continuidade da pesquisa além da necessidade da análise ambiental após a moldagem dos CPs, uma vez que as cinzas leves foram classificadas com Classe I.

Agradecimentos

Agradecemos, ao IFCE – Campus Morada Nova por disponibilizar o Laboratório de Mecânica dos Solos e pela disposição em contribuir de diferentes formas para a realização desta pesquisa e a UFC por disponibilizar equipamentos para os diversos ensaios. Os autores agradecem também ao IFCE - edital PROINFRA, a Usina Termoelétrica Pecém pelo apoio financeiro e ao CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1998) NBR NM 67 - Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2001) NBR 14656 - Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X – Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2003) NBR NM 52 - Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) NBR 10004 - Resíduos sólidos – Classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) NBR 10005 - Lixiviação de Resíduos – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2004) NBR 10006 - Solubilização de Resíduos - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

- ABNT (2007) NBR 5739 - Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2012) NBR 12653 - Materiais pozolânicos – Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2013) NBR 9781 - Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT (2015) NBR 5738 - Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ACI 211.R9 (2018) - Prática recomendada para a seleção e proporções de concreto – Slump. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan.
- ACI 232.R2 (2018) - Uso de cinzas volantes no concreto. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan.
- Al Rousan, T. M. (2004) Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system. Dissertation. Texas A&M University.
- American Coal Ash Association (2003) Fly Ash Facts for Highway Engineers. Washington.
- American Coal Ash Association (2006) - 2005 Coal Combustion Product (CCP) Production and Use Survey. Washington.
- Andrabi, S. B. Q. (2019) Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete. *International Journal of Science and Research*, v. 8, n. 1, p. 1744-1763.
- ASTM C 618 (2019) Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA.
- Barros, K.S. (2015) Estudo de Cinzas Volantes de uma Termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza-CE para Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Brasil, Lei nº 12.305 (2010). Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 18 março 2019.
- Davis, R. E.; Carlson, R. W.; Kelly, J. W.; Davis, H. E. (1937) Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash, *ACI Journal*, v. 33, n. 5, p. 577-612.
- DNER-ME 080 (1994) Solos - análise granulométrica por peneiramento. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER-ME 081(1998) Agregado – determinação da absorção e da densidade de agregado gráudo. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER-ME 082 (1994) Solos - determinação do limite de plasticidade. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER-ME 093 (1994) Solos - determinação da densidade real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER-ME 122 (1994) Solos - determinação do limite de liquidez - método de referência e método expedito. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- DNER-ME 213 (1994) Solos – determinação do teor de umidade. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- Lopes, L. S. E. (2011) Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de bases de pavimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Santos, A. V.; Borja, A. V. (2007) Avaliação de Propriedades Mecânica de Blocos Intertravados com Resíduo de Pneus Reciclado. *Revista Holos*, Rio Grande do Norte, v. 3, ano 23.
- Santos, F. A. (2017) Estudo da variação da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ na produção de geopolímeros para imobilizar contaminantes. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, Pernambuco.
- Silva, W. B. C. (2017) Avaliação da aplicação de cinzas de termelétrica em blocos intertravados de pavimentos Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Torgal, F. P., Gomes, J. P. C., e Jalali, S. (2007) Estudos sobre a composição de argamassas obtidas através da ativação alcalinidade lamas residuais de minas, Portugal, Lisboa.
- Vasconcelos, S. D. (2018) Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidos em usina termoeletrica para construção de camadas de pavimentos. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Yip, C. K.; Lukey, G. C.; Deventer, S. J. S. (2005) The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate gel at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 9, p. 1688-1697.