

ANÁLISE DE BLOCOS INTERTRAVADOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS COM O USO DE CINZAS PESADAS DE TERMELÉTRICA

Webert Brasil Cirilo da Silva

Suely Helena de Araújo Barroso

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)
Universidade Federal do Ceará

Antônio Eduardo Bezerra Cabral

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil (PEC)
Universidade Federal do Ceará

RESUMO

Na Usina Termelétrica do Pecém (UTP), no estado do Ceará, ocorre uma considerável produção de cinzas pesadas, as quais não recebem uma destinação adequada. Com o avanço da utilização de Pavimentos Intertravados (PIs) no Ceará, o uso destas cinzas no concreto utilizado na fabricação dos Blocos Intertravados de Pavimentos (BIPs) é uma possibilidade de destinação adequada às mesmas. Os objetivos deste artigo são apresentar uma análise da fabricação de BIPs com cinzas pesadas de termelétrica e avaliar metodologias de dimensionamento para PI. Foram realizados ensaios de caracterização nos materiais convencionais e alternativos, além de ensaios mecânicos em BIPs. Foram comparadas as seções de PI resultantes de métodos de dimensionamento empírico e mecanístico-empírico. Concluiu-se que os BIPs com 20% de cinza pesada (porção fina) forneceram os maiores valores de resistência à compressão. Também foi constatado que o dimensionamento mecanístico-empírico foi vantajoso, do ponto de vista financeiro, na construção do PI.

ABSTRACT

At the Pecém Thermolectric Plant (PTP), in the state of Ceará, there is a considerable bottom ashes production, which do not receive an adequate destination. With the advancement of the use of Interlocking Pavements (IPs) in Ceará, the use of these ashes in the concrete used in the Interlocking Pavement Blocks (IPBs) manufacture is a proper destination possibility for them. This article objectives are to present an analysis of the IPBs manufacturing with thermolectric bottom ash and to evaluate design methodologies for IP. Characterization tests were carried out on conventional and alternative materials, in addition to mechanical tests on IPBs. The IP sections resulting from empirical and mechanistic-empirical design methods were compared. It was concluded that IPBs with 20% bottom ash (fine portion) provided the highest compressive strength values. It was also found that the mechanistic-empirical design was advantageous, from a financial point of view, in the IP construction.

1. INTRODUÇÃO

Na concepção do projeto de um Pavimento Intertravado (PI), devem ser selecionados os materiais a serem utilizados na estrutura. Com relação a isso, um tema importante de pesquisa é o aproveitamento de resíduos, advindos de usina termelétrica, para o uso nas camadas dos pavimentos. No caso do PI, além das camadas granulares, os resíduos podem ser utilizados na dosagem do concreto para a produção de Blocos Intertravados de Pavimentos (BIPs). Com isso, pode-se reciclar tais resíduos nos BIPs, atribuindo uma finalidade útil para os mesmos.

A presente pesquisa foi realizada no estado do Ceará, onde está localizado o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), o qual contém as Usinas Termelétricas Pecém I e Pecém II (UTP I e UTP II) que juntas geraram, nos anos de 2015, 2017 e 2018, respectivamente, quantidades de 1.300, 447 e 381 toneladas de cinzas diariamente (Araújo, 2016; Vasconcelos, 2018; Alcantara, 2018). Nas UTPs I e II, existem três módulos de armazenagem para as cinzas, os quais apresentaram custos de construção em torno de 12 milhões de reais. Devido à considerável produção desses resíduos, o espaço disponível para o armazenamento desses materiais está cada vez menor. Sobre a destinação das cinzas pesadas, por essas possuírem uma granulometria mais graúda, o depósito desses resíduos continua sendo feito a céu aberto, o que agride o ecossistema local (Kniess, 2005).

Contextualizando a produção de BIPs para a realidade do estado do Ceará, de acordo com Silva (2017), foi demandada em apenas uma fábrica especializada na fabricação de BIPs, em 2017, uma quantidade mensal de aproximadamente 12.500m² de piso intertravado. Isso equivale a cerca de 1.625 toneladas de concreto. Entre as obras mais recentes, nas quais a empresa esteve inserida, que exigiu o uso de BIPs, destaca-se o estacionamento do shopping Rio Mar Kennedy no município de Fortaleza e a área de calçada da Cidade Alpha Ceará na cidade de Eusébio. Além disso, em Fortaleza, destacam-se as requalificações, em andamento, nas Avenidas Beira Mar e Desembargador Moreira com o uso de cerca de 66.705m² e 6.500m² de piso intertravado, respectivamente, conforme os projetos apresentados pela Prefeitura de Fortaleza.

Com relação às vantagens de aplicação de PIs, Shackel (1988) comenta que, com uma dosagem apropriada, os BIPs podem ser mais duráveis em um ambiente industrial se comparados com os pavimentos asfálticos. No âmbito internacional, com relação ao uso de cinzas pesadas em BIPs, podem ser citados os trabalhos de Erandi *et al.* (2013), Senaratna *et al.* (2013) e Antoni *et al.* (2017). Já, no âmbito nacional, podem ser destacadas as pesquisas de Silva (2017) e Alcantara (2018), nas quais foram utilizadas cinzas da UTP.

Com relação ao uso do empirismo no dimensionamento de PIs, segundo Cruz (2003), a maioria dos métodos de dimensionamento de PIs vem de adaptações da metodologia de cálculo para pavimentos flexíveis. O problema é que essas adaptações podem resultar em gastos superestimados na construção do PI. Além disso, a disposição das camadas do PI com as suas respectivas espessuras pode provocar deficiências no aspecto funcional da estrutura. Dessa forma, a investigação de métodos mais sofisticados para dimensionamento de PIs pode tornar a construção dessa estrutura mais racional.

Assim, neste artigo, avaliou-se BIPs produzidos com concreto contendo cinzas pesadas, advindas da UTP, bem como qual das metodologias empregadas para dimensionamento de PI permitiu uma construção mais vantajosa da estrutura do ponto de vista financeiro.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram usados os seguintes materiais: cinzas pesadas da combustão de carvão mineral, oriundas da UTP, britas fonolíticas de dimensões 19,0mm e 12,5mm, e areia artificial, resultante do processo de britagem das rochas para a produção dos agregados graúdos. Também foi utilizado cimento CP V – Alta Resistência Inicial (ARI) e água da rede pública de distribuição. Sobre o aditivo adotado, o mesmo consiste em um densificador de concreto, isento de cloretos.

2.1. Primeira etapa metodológica – Ensaios de caracterização dos agregados convencionais e cinzas pesadas

Na primeira etapa, foram contemplados os ensaios de caracterização realizados nas cinzas pesadas e nos agregados naturais, conforme metodologia estabelecida em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os ensaios realizados nos materiais incluíram análise granulométrica, massa específica (ME) e massa unitária (MU). Nas cinzas pesadas realizou-se ainda ensaios ambientais do extrato lixiviado e solubilizado.

Dessa forma, os resultados dos extratos lixiviado e solubilizado estão inseridos na Tabela 1. As concentrações limites dos compostos foram retiradas dos Anexos F e G da norma ABNT NBR 10004 (2004).

Tabela 1: Resultados dos extratos lixiviado e solubilizado para as cinzas pesadas

Ensaio	Pesquisas	Fluoreto F ⁻ (mg/L)	Cloreto Cl ⁻ (mg/L)	Brometo Br ⁻ (mg/L)	Nitrato NO ₃ ⁻ (mg/L)	Nitrito NO ₂ ⁻ (mg/L)	Fosfato PO ₄ ³⁻ (mg/L)	Sulfato SO ₄ ²⁻ (mg/L)
Extrato lixiviado	Amostra	339,15	72,34	13,28	0,42	9,75	0,50	79,28
	Limite	150,00	–	–	–	–	–	–
Extrato solubilizado	Amostra	0,92	5,14	3,52	0,08	0,95	0,50	59,39
	Limite	1,50	250,00	–	10,00	–	–	250,00

Referente ao extrato lixiviado, percebe-se que somente um composto (ânion fluoreto) possui valor limite presente na norma ABNT NBR 10004 (2004). No caso, a cinza pesada apresenta uma concentração de fluoreto acima do permitido, o que classifica o resíduo como classe I (perigoso). No entanto, para que o uso do resíduo não seja inviabilizado do ponto de vista ambiental, precisam ser analisados os resultados do outro ensaio ambiental. No extrato solubilizado, percebe-se que nenhum dos compostos detectáveis apresentou valores maiores do que o permitido. Para diminuir a concentração de compostos perigosos, de acordo com Baird (2002), o cimento Portland pode ser utilizado como estabilizante, em que o mesmo diminui a solubilidade dos contaminantes. Além disso, a compactação feita pela máquina de vibro-prensa no concreto pode ser usada para encapsular os resíduos na produção de BIPs, por exemplo.

Os resultados de ME e MU dos materiais estão apresentados na Figura 1. É necessário destacar que, com relação à ME, essa propriedade foi determinada em três condições: agregado seco; material Saturado Superfície Seca (SSS) e valor aparente (inclusão dos poros permeáveis no volume). No que se refere à MU, essa foi determinada nos agregados em condição seca e SSS.

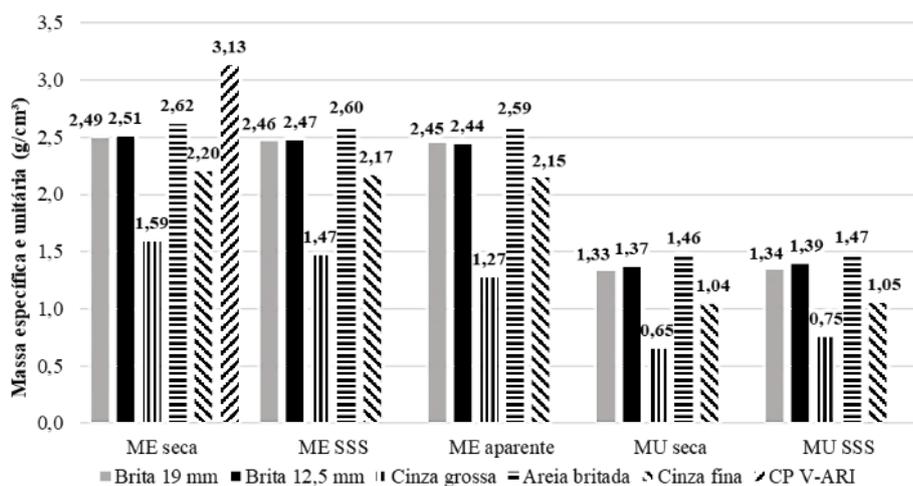


Figura 1: Resultados de ME e MU dos materiais

De acordo com a Figura 1, a areia artificial possui valores maiores de ME do que os apresentados pelas britas. Isso indica uma maior densidade por parte das substâncias componentes do agregado miúdo. No que se refere à MU, a areia também possui valores maiores do que os agregados graúdos, o que significa uma proximidade maior entre os grãos na estrutura do material. Com relação às cinzas, as porções grossa e fina possuem valores de ME e MU menores do que os agregados convencionais. Isso implica em uma leveza maior por parte dos materiais componentes desses resíduos ao se comparar com os outros agregados.

Os resultados referentes à granulometria estão presentes na Figura 2. É importante destacar que,

além das porções grossa e fina, foi inserida a curva da cinza pesada completa.

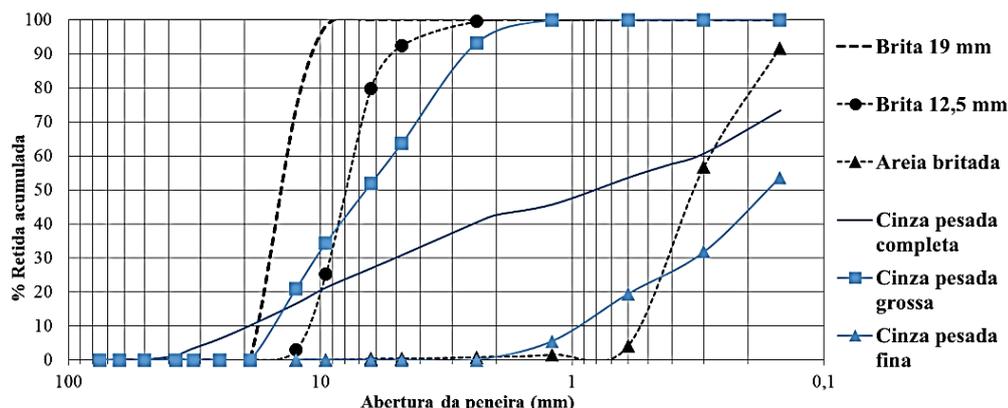


Figura 2: Composição granulométrica dos materiais

De acordo com a Figura 2, pode-se analisar que a cinza pesada completa possui parcelas significativas de pedregulho (dimensão acima de 4,8mm) e de areia fina, silte e argila (dimensão abaixo de 0,42mm) em sua composição. Dessa maneira, isso é uma evidência de que esse resíduo, ao ser incorporado na composição dos BIPs, pode vir a substituir a brita 19,0mm ou a areia artificial, por exemplo.

2.2. Segunda etapa metodológica – Ensaios realizados no concreto fresco e endurecido com e sem cinzas

Na segunda etapa, foram realizadas as misturas dos materiais, por meio da adaptação do traço de referência (REF) utilizado por uma empresa que fabrica BIPs. Na composição dos traços alternativos (20B19, 20A e 20A20B19), a cinza pesada foi separada em cinza grossa (passante na peneira de 19,0mm e retida na 2,0mm) e cinza fina (passante na peneira de 2,0mm).

Por meio de estabilizações granulométricas, o traço 20B19 consistiu na substituição de 20% da massa de brita 19,0mm por cinza grossa. No traço 20A, ocorreu a substituição de 20% da massa de areia artificial por cinza fina. No traço 20A20B19, as cinzas fina e grossa substituíram, ao mesmo tempo, 20% da massa de areia artificial e de brita 19,0mm. A Tabela 2 apresenta os consumos de cada um dos materiais componentes para se produzir 1m³ de concreto.

Tabela 2: Consumo dos materiais componentes do concreto

Traços	Cimento (kg/m ³)	Areia artificial (kg/m ³)	Brita 12,5mm (kg/m ³)	Brita 19,0mm (kg/m ³)	Cinza grossa (kg/m ³)	Cinza fina (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
REF	243,1	1132,9	478,9	109,4	-	-	153,2	0,85
20B19	241,0	1123,0	474,7	86,8	21,7	-	151,8	0,84
20A	234,8	875,5	462,6	105,7	-	218,9	147,9	0,82
20A20B19	235,3	877,3	463,6	84,7	21,2	219,3	148,3	0,82

Com relação à produção do concreto, o mesmo foi compactado em uma máquina de vibroprensa (modelo VP50 da marca Tprex), a qual produz BIPs e blocos estruturais. Em seguida, foram utilizadas fôrmas para BIPs tipo I (formato retangular) com dimensões de 20cm×10cm×8cm (comprimento×largura×espessura) (Figura 3a). Os ensaios realizados no concreto fresco e endurecido estão presentes na Tabela 3. No caso, foram seguidas metodologias estabelecidas em normas da ABNT, do Departamento Nacional de Infraestrutura

de Transportes (DNIT) e do *American Concrete Institute* (ACI).

Tabela 3: Ensaios no concreto com as suas normas vigentes

Tipos de concreto	Ensaios	Normas vigentes
Fresco	Consistência pelo método VeBe	DNIT ME 064 (2004); ACI 211.3R-02 (2009)
	Índice de vazios	ABNT NBR 9778 (2005)
Endurecido	Resistência à compressão	ABNT NBR 9781 (2013)
	Absorção de água	

A respeito do método VeBe, esse ensaio foi realizado uma vez para cada traço, e, como o abatimento do tronco de cone faz parte desse procedimento, o resultado foi zero em todas as misturas por se tratar do concreto tipo seco (Figuras 3b e 3c). É importante destacar que, para o ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS), os períodos de cura utilizados foram de 7 e 28 dias. Para cada período e traço, foram testados seis BIPs. Nos ensaios de índice de vazios e absorção de água, as amostras também foram retiradas depois de 7 e 28 dias de cura, em que, para cada traço, foram ensaiados três BIPs.

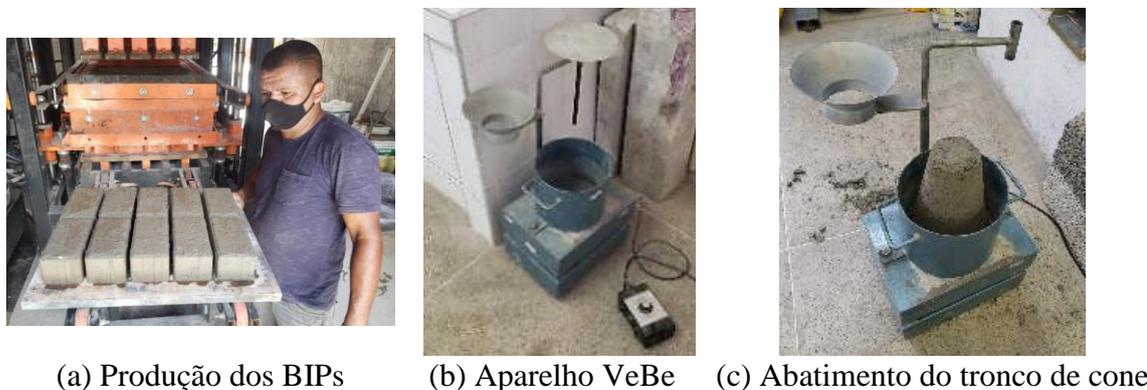


Figura 3: Aspecto visual dos BIPs e equipamentos na produção do concreto seco

2.3. Terceira etapa metodológica – Dimensionamento para Pavimento Intertravado

Na terceira etapa, para o dimensionamento do PI, recorreu-se a um método empírico e mecanístico-empírico. Dessa forma, foram comparadas as seções resultantes dos dois processos mencionados para a análise de qual método pode fornecer uma construção mais racional para o PI. Assim, é importante que seja inserida a Tabela 4, na qual as vias são classificadas de acordo com o número N. Para efeito de informação, os dados dessa tabela são necessários para as análises dos resultados a partir do uso dos métodos de dimensionamento empírico e mecanístico-empírico para PIs. Além disso, preferiu-se utilizar uma nomenclatura nacional para a classificação das vias de acordo com o número N. Dessa forma, pela disponibilidade, foram utilizadas as informações da Prefeitura do Município de São Paulo (2004).

Tabela 4: Classificação das vias e parâmetros de tráfego

Função predominante	Tráfego previsto	Vida de projeto (anos)	Volume inicial da faixa mais carregada		Número N
			Veículo leve	Caminhão/Ônibus	
Via Local	Leve	10	100 a 400	4 a 20	$2,70 \times 10^4$ a $1,40 \times 10^5$
Via Local e Coletora	Médio	10	401 a 1500	21 a 100	$1,40 \times 10^5$ a $6,80 \times 10^5$

Fonte: Prefeitura do Município de São Paulo (2004)

Para as análises de dimensionamento de PI, foram escolhidas duas intensidades de tráfego de acordo com a Tabela 4: $N=6 \times 10^4$ (tráfego leve) e $N=6 \times 10^5$ (tráfego médio). Isso foi feito para avaliar a estrutura do PI sob diferentes tensões. No que se refere ao subleito, foram utilizados dois valores de *California Bearing Ratio* (CBR): 5% e 10%. De acordo com Vasconcelos (2016), usualmente o CBR de 10% é mais encontrado em solos presentes no município de Caucaia da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), onde a UTP está instalada. No entanto, é interessante verificar o funcionamento da estrutura do PI em solos com piores condições de resistência, o que pode acontecer em uma obra rodoviária real. Tendo em vista os valores escolhidos de N, foram adotadas as seguintes camadas para o PI: BIPs (espessura de 8cm), assentamento (espessura de 5cm no método empírico e de 4cm no mecanístico-empírico) e sub-base.

Com relação aos materiais presentes nas camadas granulares e de assentamento do PI, foram utilizados os resultados obtidos por Vasconcelos (2018) que estudou o uso de cinza volante do Módulo I da UTP na estrutura do pavimento. No caso, as propriedades físicas, como massa específica e composição granulométrica, e ambientais, como extrato lixiviado e solubilizado, desse resíduo também foram mensuradas por Vasconcelos (2018). As composições, em massa, das misturas escolhidas estão presentes na Tabela 5. Essas misturas foram escolhidas, tendo em vista as suas propriedades que facilitam o uso do método empírico, para dimensionamento de PI, da ABCP ET 27 (1998).

Tabela 5: Misturas escolhidas para o PI com as composições em massa

Camadas do PI	Misturas	Solo (%)	Cinza volante (%)	Cal (%)
Assentamento	M1	100,0	0,0	0,0
Sub-base	M7	48,5	48,5	3,0

Fonte: Vasconcelos (2018)

Na camada de assentamento do PI, pelo fato da norma ABNT NBR 15953 (2011) não especificar os valores quanto ao CBR ou expansão, decidiu-se utilizar o material M1. Esse é composto por 100% de solo regional coletado em uma jazida na RMF. Esse material, conforme Vasconcelos (2018), é A-2-4, segundo a classificação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Trata-se de um solo granular, do tipo areia-siltosa, com 17% de material passante na peneira 0,075mm. Já a cal utilizada para estabilização química da mistura M7 (3%) é do tipo hidratada calcítica comercial, obtida de uma empresa localizada no Ceará. Sobre a cinza volante utilizada (48,5%), a mesma possui 69% das partículas passantes na peneira 0,075mm, sendo classificada pela AASHTO como um material siltoso, do tipo A-4. Além disso, esse resíduo foi aprovado nos ensaios ambientais de extrato lixiviado e solubilizado.

Para um maior esclarecimento, a Tabela 6 apresenta as principais características de cada uma das misturas citadas. Com base nos dados dessa tabela, a mistura M7 atende aos requisitos da norma DNIT ES 139 (2010) para a camada de sub-base. Além disso, pelo uso da cal em sua composição (3%), devido ao processo de estabilização química, foram colocadas as propriedades da M7 com 28 dias de cura. Com relação ao Módulo de Resiliência (MR), por essa propriedade ser uma alusão ao Módulo de Elasticidade (MDE), foi utilizado o valor médio para aplicação do método mecanístico-empírico para PI (programa *DesignPave*).

Tabela 6: Propriedades das misturas

Misturas	CBR (%)	Expansão (%)	Umidade Ótima (%)	Massa Específica Seca Máxima (g/cm ³)	Parâmetros de MR (MR = k1 × σ ₃ ^{k2} × σ _d ^{k3})				MR Médio (MPa)
					k1	k2	k3	R ²	
M1	20,00	0,00	15,10	1,97	139,3	-0,269	-0,538	0,78	161,00
M7	205,00	0,00	20,70	1,56	2649,0	0,282	-0,199	0,50	735,00

OBS₁: No modelo composto para MR, o termo σ₃ significa tensão confinante (MPa) e o termo σ_d se refere à tensão desvio (MPa).
OBS₂: Apesar do baixo valor de correlação observado para algumas misturas, o modelo composto ainda foi o que melhor representou os materiais.

Fonte: Vasconcelos (2018)

Com relação ao método empírico de dimensionamento para PI, foi utilizado o procedimento da ABCP ET 27 (1998). O mesmo é recomendado à aplicação de PIs em áreas sujeitas ao tráfego de veículos comerciais, podendo o número N variar entre 2,70×10⁴ e 3,30×10⁷. Referente aos dados necessários para o uso desse método, foram requeridos os valores de CBR do subleito e da sub-base, além do número N. Para a camada de assentamento, é padronizada uma espessura de 5cm. Além disso, não é solicitada uma propriedade acerca dos BIPs. Assim, todas as seções de PI (BIPs+Assentamento+Sub-base) resultantes foram iguais para os quatro traços de concreto utilizados na fabricação dos BIP como revestimento do pavimento.

No que diz respeito ao método mecanístico-empírico, foi usado o programa *DesignPave*. Esse *software* foi lançado em 2018 pela *Concrete Masonry Association of Australia* (CMAA) em colaboração com a *University of South Australia* (UniSA). O *Design Pave* foi adotado, pois o mesmo permite uma otimização da estrutura do PI ao considerar critérios de falhas por fadiga e deformação permanente nas camadas granulares do pavimento. Para o uso desse programa, os dados de entrada foram o coeficiente de Poisson (μ) e o MDE estático para as camadas do PI, além do número N e CBR do subleito. Com relação ao μ, através de recomendações do próprio *software*, foram adotados os seguintes valores neste trabalho: μ=0,20 para os BIPs; μ=0,35 para as camadas granulares e de assentamento, e μ=0,40 para o subleito. A camada de assentamento foi padronizada com uma espessura de 4cm, que é o valor máximo permitido pelo programa. Referente ao MDE estático, por meio da Equação 1, presente na norma ABNT NBR 15630 (2008), e da Equação 2, proveniente de Lee *et al.* (2017), essa propriedade pôde ser calculada para os BIPs (Tabela 7). No caso, foram ensaiados três blocos por traço aos 28 dias de cura.

$$E_d = v^2 \times \rho \times \frac{(1 + \mu) \times (1 - 2 \times \mu)}{(1 - \mu)} \quad (1)$$

$$E_c = 0,16 \times E_d^{1,36} \quad (2)$$

Em que: *E_d*: MDE dinâmico do BIP [MPa na Equação 1 e GPa na Equação 2];
E_c: MDE estático do BIP [GPa];
v: velocidade de propagação da onda ultrassônica [mm/μs];
ρ: massa específica aparente do BIP [kg/m³]; e
μ: coeficiente de Poisson [valor adotado de 0,2].

Tabela 7: MDE estático para os BIPs de concreto analisados

Traços	Massa específica aparente média (kg/m ³)	Velocidade média de propagação da onda (mm/μs)	MDE Dinâmico Médio (GPa)	MDE Estático Médio (GPa)
REF	2151,33	4,55	40,14	24,27
20B19	2100,79	3,82	27,54	14,54
20A	2028,95	4,04	29,77	16,16
20A20B19	2035,68	4,20	32,32	18,08

No uso do *DesignPave*, o MDE estático máximo permitido pelo programa é de 7,5GPa. Dessa forma, pelo fato dos resultados na Tabela 7 ultrapassarem esse máximo, foi considerado o valor de 7,5GPa para os traços estudados. Assim, como no método empírico, todas as seções resultantes das simulações (BIPs+Assentamento+Sub-base) foram iguais para os quatro traços utilizados na produção dos blocos como revestimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resultados dos testes realizados no concreto fresco e endurecido

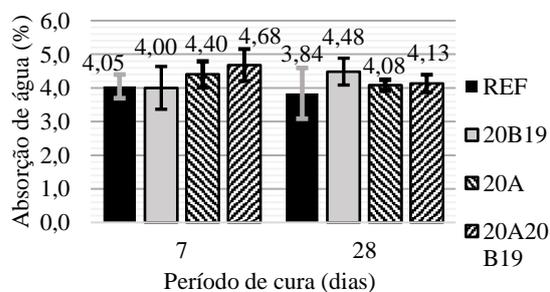
No que se refere à consistência do concreto fresco, os resultados estão expostos na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados do consistômetro VeBe para os traços de concreto

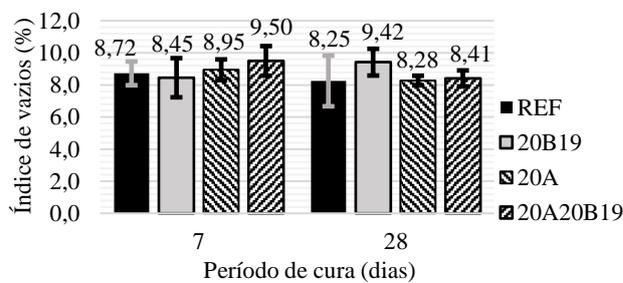
Norma ACI 211.3R-02 (2009)		Traços	Tempo VeBe (s)	Tipo de consistência
Descrição da consistência	Tempo VeBe (s)			
Extremamente seco	$32 \geq T > 18$	REF	19,9	Extremamente seco
Muito seco	$18 \geq T > 10$	20B19	19,3	
Seco	$10 \geq T > 5$	20A	17,4	
Seco para plástico	$5 \geq T > 3$	20A20B19	17,8	Muito seco
Plástico	$3 \geq T \geq 0$			

Nesse ensaio, as misturas foram classificadas como extremamente e muito secas, com isso, são recomendados métodos de compactação por vibração forte e compressão para concretos com essas características. Esse ensaio está relacionado com a trabalhabilidade, a qual está ligada ao tempo e à energia necessários para a conformação dos BIPs. Uma vez adequada a trabalhabilidade do concreto, os gastos, as máquinas de vibro-prensa podem elevar sua produção e vida útil consequentemente (Silveira, 2015).

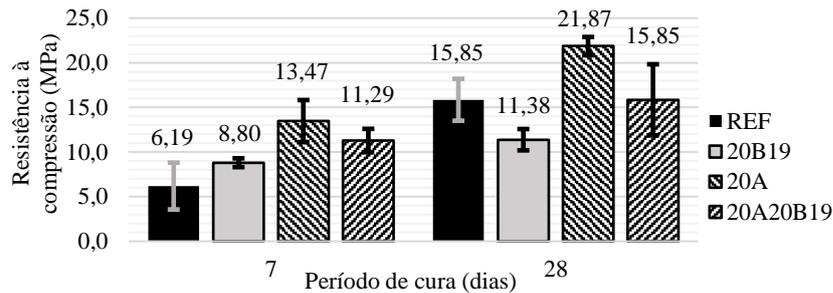
Com relação aos ensaios de absorção de água e índice de vazios para os BIPs, os resultados estão inseridos nas Figuras 4a e 4b, respectivamente, nas quais estão presentes os valores médios. Os resultados de RCS estão apresentados na Figura 4c, sendo que estão inseridas as resistências características. Nos gráficos da Figura 4, estão inseridas as barras de desvio padrão.



(a) Absorção de água média dos BIPs



(b) Índice de vazios médio dos BIPs



(c) Resistência característica à compressão dos BIPs

Figura 4: Aspecto visual dos BIPs e equipamentos na produção do concreto seco

Com relação à absorção de água e índice de vazios, pode-se observar que os valores médios estão abaixo de 6%, o que está de acordo o limite da norma ABNT NBR 9781 (2013). Pode-se destacar, por exemplo, que os BIPs do traço alternativo 20B19 apresentaram a maior absorção de água aos 28 dias (4,48%). A questão é que, devido ao fato desses BIPs possuírem o maior resultado de índice de vazios aos 28 dias (9,42%), era esperado que esses blocos apresentassem uma absorção de água mais elevada. Isso demonstra que provavelmente a inserção isolada de cinza grossa na mistura não foi benéfica do ponto de vista granulométrico. Também é válido mencionar que, das misturas alternativas, os BIPs do traço alternativo 20A apresentaram o menor índice de vazios aos 28 dias (8,28%). Dessa forma, existe um indício de que esses blocos podem apresentar um desempenho favorável, no que se refere à RCS.

Com relação à RCS, os valores estão abaixo de 35MPa, sendo esse o requisito mínimo exigido pela norma ABNT NBR 9781 (2013) aos 28 dias de cura. Com relação a isso, pode-se colocar que a combinação das granulometrias dos agregados componentes não gerou uma curva contínua que contribuisse para um maior intertravamento entre os materiais. Isso leva à questão das proporções dos materiais presentes nos traços, o que pode trazer uma redefinição desses teores. Verifica-se que o concreto do traço alternativo 20A supera a resistência característica do traço de referência REF. No caso, aos 7 e 28 dias, os resultados desse traço alternativo (13,47MPa e 21,87MPa) foram maiores do que as amostras de referência (6,19MPa e 15,85MPa). Também é importante mencionar que o traço 20A foi a mistura que apresentou o menor desvio padrão (1,02MPa) referente à RCS aos 28 dias. Isso pode indicar que os dados foram obtidos sem uma significativa dispersão. Além disso, os dois trabalhos nacionais citados na Introdução, Silva (2017) e Alcantara (2018), não conseguiram atingir o requisito de 35MPa. Isso fornece embasamento aos resultados obtidos nesse ensaio. Com relação às empresas especializadas na produção de BIPs, as mesmas podem estar utilizando, para atingir os 35MPa, aditivos plastificantes, os quais proporcionam um aumento na resistência das peças de concreto.

Segundo Shackel (1990), uma alta resistência dos *pavers* não é necessária para garantir um bom desempenho dos pavimentos. Essa afirmação foi feita após serem realizadas uma série de testes em pistas experimentais com BIPs de resistência variando entre 25MPa e 55MPa. Na Austrália, por exemplo, a norma SA AS/NZS 4456.4 (2003) informa que os valores mínimos para a RCS característica de BIPs são 15MPa para ciclovias e estacionamentos. Assim, poderia haver uma revisão nos critérios da norma brasileira e ser criada, por exemplo, uma categoria de BIPs para ciclovia ou estacionamento com especificações mais brandas.

3.2. Resultados do dimensionamento para Pavimento Intertravado

Os resultados referentes ao dimensionamento empírico e mecanístico-empírico de PI estão

presentes na Figura 5. No caso, todas as seções resultantes estão representadas sem escala.

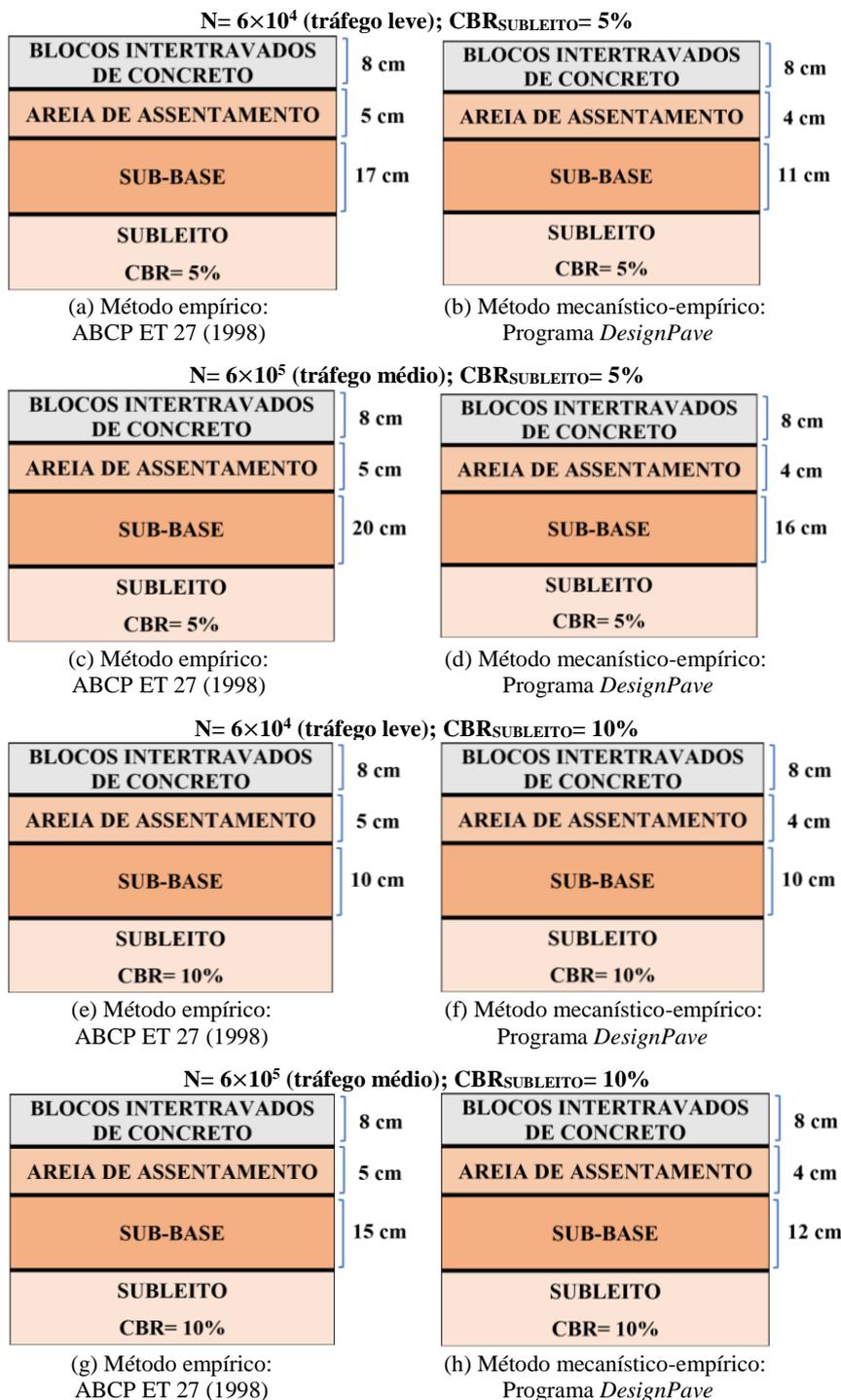


Figura 5: Seções de PI de acordo com o método de dimensionamento

Percebe-se que as seções de PI resultantes a partir do uso do *software* exigem uma quantidade menor de materiais para as camadas em comparação com o processo empírico. Nota-se que, à medida que o CBR do subleito aumenta, são requeridas espessuras cada vez menores para as camadas granulares, o que é coerente. Essa pode ser uma alternativa interessante do ponto de vista financeiro, uma vez que são necessários menos materiais. No caso do método empírico,

os resultados podem levar ao superdimensionamento das seções de PI, o que levaria ao gasto desnecessário de material. Além disso, pelo tráfego adotado ser do tipo leve ou médio (Tabela 4), o processo de degradação sofrido pelos BIPs ocorre com menor intensidade. Isso contribui para uma maior vida útil de serviço dos blocos, mesmo não ter sido atingida a resistência de 35MPa. Dessa forma, com o uso do *DesignPave*, são requeridos dados de todas as camadas do PI, o que leva a um dimensionamento mais preciso. Através das simulações do *software*, o PI pode ser mais bem projetado, o que leva a uma maior vida útil da estrutura.

4. CONCLUSÕES

A principal contribuição deste trabalho foi verificar a possibilidade do aproveitamento das cinzas de carvão mineral, por meio de amostras obtidas na UTP, para a fabricação de BIPs. Além disso, o uso do programa *Design Pave* permitiu uma construção mais econômica da estrutura do PI. Assim, a partir dos resultados obtidos, pode ser feita uma análise mais detalhada das contribuições científicas desta pesquisa.

Com relação à viabilidade ambiental, a cinza pesada apresentou uma concentração significativa do ânion fluoreto (F^-) no extrato lixiviado, mas podem ser feitas algumas observações. Primeiramente, a energia de compactação, proveniente da máquina de vibro-prensa, pode funcionar como um método de encapsulamento dos contaminantes. Além disso, pelo fato das taxas de substituição de cinzas no concreto serem de 20%, a velocidade de lixiviação de componentes perigosos pode diminuir. Também se pode comentar que os ensaios ambientais realizados são feitos com o resíduo solto e não se aproximam da situação real de campo.

Sobre a viabilidade técnica, a utilização do traço alternativo 20A apresenta-se como uma potencial alternativa à produção de BIPs. Isso ocorre, devido aos valores de RCS do mesmo serem os mais elevados dentre as misturas testadas. Com relação ao requisito de 35MPa, que é o valor mínimo de resistência característica a ser apresentado pelos BIPs aos 28 dias de cura, esse limite precisa ser melhor investigado.

A respeito do dimensionamento do PI, os métodos empíricos podem superestimar as espessuras das camadas granulares necessárias para o funcionamento adequado do pavimento. Através da aplicação de métodos mais sofisticados de dimensionamento para PIs, como o uso do programa *DesignPave*, por exemplo, pode-se otimizar a espessura das camadas granulares. Dessa forma, além do fator econômico, também está sendo feita uma análise de dimensionamento mais confiável com o *DesignPave*, o que torna mais atrativo o investimento em PIs.

Agradecimentos

Os autores agradecem às empresas OCS, Cimento Apodi e EDP pela disponibilização dos agregados, cimento e cinzas para a pesquisa, bem como ao CNPq pelo fornecimento da bolsa de mestrado ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP (1998) *ET 27 – Pavimentação com peças pré-moldadas de concreto*. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo.
- ABNT (2004) *NBR 10004 – Resíduos sólidos - Classificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2005) *NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2008) *NBR 15630 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.

- ABNT (2011) *NBR 15953 – Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução*. 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.
- ACI (2009) *211.3R-02 – Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*. American Concrete Institute, United States.
- Alcantara, M. R. G. (2018) *Estudo da utilização de cinzas pesadas de termelétricas para produção de blocos de concreto para pavimentos intertravados*. 99 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Antoni, A.; Klarens, K.; Indranata, M.; Jamali, L. A. e Hardjito, D. A. (2017) The use of bottom ash for replacing fine aggregate in concrete paving blocks. *Proceedings of the 138th Matec Web of Conferences*, Indonesia, p. 1-7.
- Araújo, T. G. (2016) *Viabilidade de Aplicação das Cinzas da Bacia de Resíduos da Termelétrica do Pecém no Concreto*. 58 f. Monografia em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Baird, C. (2002) *Química Ambiental*. Editora Bookman, Porto Alegre.
- Cruz, L. O. M. (2003) *Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento*. 281 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- DNIT (2004) *ME 064 – Pavimento rígido – Determinação da consistência do concreto pelo consistômetro VeBe – Método de ensaio*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) *ES 139 – Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Erandi, N. G. N.; Sakunthala, W. C. e Udamulla, K. M. L. A. (2013) Use of bottom ash as fine aggregate in manufacturing concrete paving blocks. *Proceedings of the II Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development*, Nawala, p. 69-74.
- Kniess, C. T. (2005) *Desenvolvimento e caracterização de materiais cerâmicos com adição de cinzas pesadas de carvão mineral*. 279 f. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Lee, B. J.; Kee, S. H.; Oh, T.; Kim, Y. Y. (2017) Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements. *Advances in Material Science and Engineering*, v. 2017, p. 1-13.
- Prefeitura do Município de São Paulo (2004) *IP 06 – Dimensionamento de Pavimentos com Blocos Intertravados de Concreto*. São Paulo.
- SA (2003) *AS/NZS 4456.4 – Masonry units and segmental pavers and flags – Methods of test – Determining compressive strength of masonry units*. Standards Australia, Australia.
- Senaratna, A. U.; Weerasinghe, W. P. N.; Silva, S. e Silva, S. (2013) Utilization of bottom ash as a construction material. *Proceedings of the IV International Conference on Structural Engineering and Construction Management*, Kandy, p. 82-93.
- Shackel, B. (1988) The evolution and application of mechanistic design procedures for concrete block pavements. *Proceedings of the III International Conference on Concrete Block*, Rome, p. 114-120.
- Shackel, B. (1990) *Design and Construction of Interlocking Concrete Block Pavements*. Editora Elsevier, Londres.
- Silva, W. B. C. (2017) *Avaliação da aplicação de cinzas de termelétrica em blocos intertravados de pavimentos*. 165 f. Monografia em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Silveira, W. H. (2015) *Estudo da trabalhabilidade de concreto para blocos de vedação com consistômetro de Vebe*. 79 f. Monografia em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão.
- Vasconcelos, S. D. (2016) *Avaliação da heterogeneidade de cinzas de carvão mineral advindas da termelétrica Energia Pecém e sua aplicação em camadas granulares de pavimentos*. 122 f. Monografia em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Vasconcelos, S. D. (2018) *Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos*. 135 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Webert Brasil Cirilo da Silva (webertcirilo@hotmail.com)

Suelyly Helena de Araújo Barros (suelyly@det.ufc.br)

Antônio Eduardo Bezerra Cabral (eduardo.cabral@ufc.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará

Campus do Pici – Bloco 703 – 60455-760 Tel: +55 (85) 3366-9488 (Ramal 209)

Fortaleza, Ceará