

### III-135 – AVALIAÇÃO DE PAVERS COM ADIÇÃO DE CINZA DE CARVÃO MINERAL ORIUNDA DE TERMELÉTRICA DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA

**Paulo Rubens Melo Camelo<sup>(1)</sup>**

Tecnólogo em Estradas pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará.

**Perboyre Barbosa Alcântara<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba, Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Montevidéu, 318, Casa B – Serrinha – Fortaleza – CE – CEP: 60741-560 – Brasil – Tel.: +55 (85) 98747-8690 – E-mail: paulo.rubensmelo@hotmail.com

#### RESUMO

Este trabalho teve como objetivo comparar cinco traços de concretos dosados para o tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha, com resistência de 35 MPa, com substituição parcial do cimento pela cinza de carvão mineral em teores de 7,5%; 10,0%; 12,5% e 15,0%, como traço referência utilizou-se o seguinte (1:2,28:2,36:0,49). Realizando ensaios para avaliação tecnológica dos *Pavers* produzidos, sendo estes após o período de cura das peças de 28 dias, visando a comparação dos resultados entre o traço referência e os traços com substituição do cimento pela cinza. No ensaio de inspeção visual da dimensão, as peças analisadas de todos os traços mantiveram as dimensões com variações dentro do limite estabelecido pela norma. A absorção dos blocos variou de modo que se pode observar elevação, assim como a coloração, na medida em que se aumentava o teor de cinza. Todas as peças, independente da quantidade de cinza substituída apresentaram permeabilidade semelhante, se mostrando resistente a infiltrações e percolação de água. A densidade média das peças obteve pouca variação em relação ao traço referência. Os resultados obtidos tanto para resistência característica à compressão como resistência à flexão demonstraram queda de ambas as resistências para o concreto dosado neste trabalho. Na análise dos resultados sugere-se que a substituição parcial do cimento por um teor de cinza poderia ocorrer, porém em baixos teores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Adição de cinzas, Pavers, Cinza de carvão mineral, Reciclagem de resíduos, Concreto.

#### INTRODUÇÃO

Grandes volumes de cinza de carvão, volante ou pesada, resultam da produção de energia elétrica em usinas termelétricas, a exemplo da Termelétrica Pecém, localizada no município de São Gonçalo do Amarante (CE), Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Atualmente, no Brasil, as cinzas volantes têm como destino principal, a fabricação de cimento *Portland* pozolânico (CP IV) ou cimento composto com pozolana (CP II Z), porém o consumo é insuficiente para a utilização de todo o resíduo gerado. Nesse contexto, o estudo para a incorporação de cinzas de carvão mineral para produção de *Pavers* pode ser considerado relevante nos aspectos técnico, econômico e ambiental, para o tratamento e a destinação final de parte desses resíduos. Atualmente, tem crescido consideravelmente o uso de pavimento intertravado de peças de concreto (*Pavers*) e, assim, possibilitaria a incorporação de grandes quantidades de cinzas. Neste trabalho, portanto, se propõe analisar a substituição parcial do Cimento *Portland* por cinza volante, produzida em uma das termelétricas da RMF, na produção de *Pavers* de concreto, comparando as características físicas e mecânicas das peças.

#### METODOLOGIA

Inicialmente, com os dados da caracterização dos materiais (areia, brita e cimento) chegou-se a um traço referência (TR) por meio do método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento *Portland* (ABCP). A resistência característica ( $f_{ck}$ ) adotada foi de 35 MPa, exigida pela NBR 9781:2013. Tomou-se para o desvio padrão (Sd) um valor de 4,0 MPa e a resistência de dosagem aos 28 dias de idade ( $fc_{28} = 41,6$  MPa) foi obtida por meio da aplicação da seguinte equação:

$$f_{c28} = f_{ck} + 1,65 \times s_d$$

equação (1)

Estabelecida a dosagem inicial, foram feitos os ajustes para adequar a consistência ao processo de produção das peças de concreto. Para o traço calculado, acrescentou-se 1 % de aditivo superplastificante em relação à massa de aglomerante. Os *Pavers* podem ser fabricados de diferentes formas, neste trabalho se utilizou o processo denominado de peças dormidas, porque são fabricadas de forma manual, com poucos equipamentos e podem ser produzidas mesmo em pequenas fábricas de pré-moldados como se observam em muitos municípios da Região Metropolitana de Fortaleza (CE). O traço unitário final de referência (TR), dosado para este estudo foi o descrito na Tabela 1. O teor de argamassa para a mistura ficou com o valor aproximado de 49%, enquanto a pasta ficou em 33%, bem próximo à referência citada por Fernandes (2016).

**Tabela 1 - Traços de concreto utilizados para a moldagem dos *Pavers* (kg)**

Traço	AGLOMERANTES		AGREGADOS			
	Cimento	Cinza	Areia	Brita	Água/Cimento	Aditivo
TR	1	0	2,28	2,36	0,49	1%
TC1	0,925	0,075	2,28	2,36	0,49	1%
TC2	0,900	0,100	2,28	2,36	0,49	1%
TC3	0,875	0,125	2,28	2,36	0,49	1%
TC4	0,850	0,150	2,28	2,36	0,49	1%

Os traços de comparação foram obtidos a partir do traço referência, com a substituição parcial do Cimento *Portland* pela cinza de carvão mineral em teores de 7,5% (TC1); 10,0% (TC2); 12,5% (TC3); 15,0% (TC4), como apresentado na Tabela 1.

No preparo do concreto foi utilizado uma haste de mistura de argamassa acoplada numa furadeira e um recipiente plástico, previamente umedecido para que a água do traço dosado não fosse “absorvida” pelo recipiente e influenciasse indiretamente na resistência e consistência do concreto. Para evitar que o procedimento de preparo interferisse nos resultados, adotou o mesmo procedimento de mistura em todos os traços. Primeiramente verteu-se a água no recipiente e adicionou-se o cimento, misturando os dois materiais por um tempo de 60 s. Em seguida acrescentou-se o agregado miúdo e repetiu-se o processo de mistura por 90 s até que se formasse uma argamassa homogênea. Acrescentou-se o aditivo superplastificante (1%) e misturou-se por mais 30 s. Por fim, foi incluso o agregado graúdo e todo o material foi misturado por mais 3 minutos. A Figura 1 exemplifica uma das etapas do processo.



**Figura 1 - Processo de preparo do concreto**

Para os concretos produzidos com a adição de cinza, as quantidades de cimento e cinza, foram misturadas previamente a seco, a fim de deixar os materiais uniformemente misturados.

Na moldagem dos corpos de prova, foram utilizadas fôrmas plásticas como ilustrado na Figura 2. Este processo é denominado, segundo Fernandes (2016), *Paver* dormido. Neste trabalho, foi utilizado um formato comercial, denominado 16 faces, que se enquadra nas peças do Tipo I. Conforme a NBR 9781 (ABNT, 2013), as peças

desse tipo apresentam formato próximo ao retangular, se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentadas em fileiras ou em espinha de peixe. Convém ressaltar, que as faces desse formato resultam em uma maior área de contato o que contribui para aumentar o atrito com as peças adjacentes responsáveis pelo intertravamento e garante um excelente travamento no sentido horizontal. Foram moldados um total de oito (08) corpos de provas para cada um dos traços indicados na Tabela 1.



**Figura 2 - Molde utilizado na moldagem dos Pavers**

O procedimento para o enchimento dos corpos de provas foi padronizado visando um adensamento satisfatório que viesse a reduzir os vazios dos Pavers e garantisse uma uniformização das peças. Em cada fôrma foi passado um desmoldante (óleo mineral), nas superfícies que estariam diretamente em contato com o concreto para facilitar o processo de desmolde. O adensamento foi realizado uma mesa vibratória em duas camadas, por um tempo de por 60s, como ilustrado na Figura 3.



**Figura 3 – Adensamento dos corpos de prova em mesa vibratória**

Após o processo de moldagem dos corpos de prova, deixou-se em repouso para o endurecimento inicial do concreto por 24h, sendo desmoldado posteriormente. Para o processo de cura foi utilizado um método sugerido por Fernandes (2016) que consiste em cobrir o Paver com uma lona, deixando um pano úmido por cima dos blocos para conservar a umidade por baixo da lona.

A resistência à compressão foi determinada segundo a Norma NBR 9781 (ABNT, 2013). Para isso são utilizados discos auxiliares de aço para a ruptura dos corpos de prova (Figura 4). Os corpos de provas submetidos ao ensaio foram previamente saturados por imersão em água durante 24 h. Para a retificação das superfícies foi usado uma pedra de esmeril, deixando as superfícies de aplicação de cargas mais planas, para melhor distribuição das forças aplicadas. A máquina de realização do ensaio (Figura 4) atende às especificações da norma e possui velocidade de aplicação de carga controlável através de software.



**Figura 4 – Ensaio de resistência à compressão.**

## RESULTADOS E ANÁLISES

### Avaliação dimensional

Os dados obtidos na avaliação dimensional das peças, baseado na norma NBR 9781 ABNT (2013), estão dispostos na Tabela 2, onde se observam os valores de largura (l), comprimento (c) e espessura (e). Nota-se que os blocos ensaiados apresentaram uma boa uniformidade dimensional. A maior parte apresentou a medida padrão em torno de 245 mm (c) por 108 mm (l) e 60 mm (e), para os pontos medidos. A máxima variação observada foi de 2 mm, sendo que a norma (NBR 9781- ABNT, 2013) permite uma variação de até  $\pm 3$  mm para cada uma das dimensões das peças de um mesmo lote. Os resultados sugerem que a adição de cinza em substituição ao cimento não interfere na retração ou expansão durante o processo de cura e que as formas plásticas utilizadas são rígidas o suficiente para manter a uniformidade das dimensões. Convém ressaltar que a uniformidade nas dimensões na fabricação das peças é importante para a paginação do piso para o intertravamento, ou seja, a capacidade que os blocos têm de resistir a movimentos de deslocamento individual, na vertical, horizontal ou de rotação em relação às peças adjacentes.

**Tabela 2 - Avaliação dimensional NBR 9781.**

		Comprimento (c)	Largura (l)	Espessura (e)
TR	Média (mm)	245,06	108,67	60,36
	Desvio padrão	0,26	0,68	0,33
TC1	Média (mm)	245,02	108,62	59,85
	Desvio padrão	0,27	0,56	0,59
TC2	Média (mm)	245,00	108,44	59,60
	Desvio padrão	0,48	1,09	1,05
TC3	Média (mm)	245,07	108,75	60,40
	Desvio padrão	0,49	0,77	0,59
TC4	Média (mm)	245,36	107,89	59,86
	Desvio padrão	0,66	1,02	0,82

### Absorção de água

Para o ensaio de absorção de água, encontraram-se os resultados expressos no gráfico da Figura 4. Pode-se observar que na substituição do cimento pela cinza no teor de 7,5 % (TC1) a absorção apresentou o menor valor. Os demais valores também ficaram abaixo do traço de referência, mas não tão distante em comparação ao traço referência. Todos os traços foram atendidos quanto à absorção média máxima de 6 %, estabelecida pela norma NBR 9781.

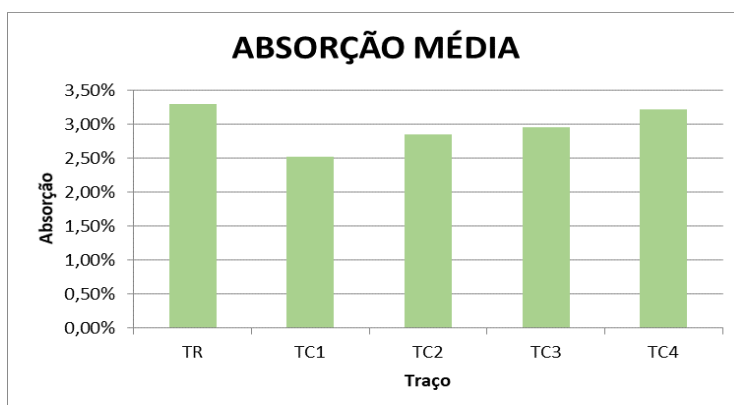


Figura 4- Resultado absorção de água dos *Pavers* conforme NBR 9781.

### Resistências à tração e à compressão.

O resultado para a resistência característica à compressão ( $f_{pk}$ ) foi determinado segundo a norma NBR 9781 ABNT (2013), e seus resultados encontram-se na Tabela 3, bem como a variação dos valores médios em relação ao traço referência (Var. TR %). As reduções na resistência média foram mais significativas para os traços TC2, TC3 e TC4. Porém, para o traço TC1, ou seja, com 7,5 % de cinza, a redução foi relativamente baixa. Convém ressaltar que todos os valores médios ou de resistência característica ( $f_{pk}$ ) atendem ao mínimo (35 MPa) estabelecido na norma NBR 9781.

Tabela 3 - Resultado de resistência à compressão conforme NBR 9781.

	Média (MPa)	Desvio (MPa)	$f_{pk}$ (MPa)	Var. TR %
<b>TR</b>	51,49	4,25	47,59	0,00%
<b>TC1</b>	44,85	1,82	43,18	-12,89%
<b>TC2</b>	41,65	2,88	39,00	-19,11%
<b>TC3</b>	40,88	1,01	39,95	-20,61%
<b>TC4</b>	38,85	4,19	35,00	-24,55%

O ensaio de resistência à flexão, embora previsto em algumas normas estrangeiras, não é exigido pela norma brasileira. Assim, para a obtenção desse parâmetro, fez-se uma adaptação da norma NBR 13279 ABNT (2005) utilizada para tração na flexão de argamassas. Os resultados obtidos de resistência à tração na flexão estão indicados na Tabela 4. A exemplo do observado na compressão, nota-se uma redução da resistência à compressão dos *Pavers* com o acréscimo do teor de cinza incorporado. Os valores na tração aumentaram em relação aos valores medidos na compressão, porém, até o TC10,0%, que passou a regredir.

**Tabela 4 - Resistência à flexão.**

Traço	Res. à flexão (MPa)
<b>TR</b>	6,47
<b>TC 7,5%</b>	6,11
<b>TC 10,0%</b>	6,32
<b>TC 12,5%</b>	5,25
<b>TC 15,0%</b>	5,53

### CONCLUSÕES

Em relação à dimensão das peças, houveram poucas variações, com maior valor observado de 2 mm, mantendo sua uniformidade, ficando dentro do estabelecido na norma NBR 9781 ABNT (2013) de  $\pm 3$  mm para cada uma das dimensões das peças de um mesmo lote. A absorção média das peças variou em taxa inferior a 1,0 % em relação ao traço referência, ficando todos os traços de comparação dentro da absorção determinado na norma,

6,0 % para o valor médio e nenhuma peça do mesmo lote com absorção maior que 7,0 %. Quanto à coloração, nota-se que com o aumento do teor de cinza as peças tendem para uma tonalidade mais escura próxima a um cinza grafite, mantendo a uniformidade de coloração para peças do mesmo lote. Para a densidade dos *Pavers*, os teores de cinza não influenciaram de modo muito significativo observando-se uma redução máxima de 3,36%.

A resistência à compressão média determinada para cada traço variou de 38,8 MPa (TC 15,0%) a 51,5 MPa (TR) ou seja, todos os *Pavers* apresentaram valores bem superiores ao mínimo estabelecido em norma (NBR 9781: 2013) que é de 35 MPa para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais. Mesmo considerando a resistência característica (*f<sub>pk</sub>*) todos os valores atendem à norma. O traço TC 7,5% foi o que mais se aproximou do valor obtido para o TR, com uma redução da ordem de 13% na resistência à compressão. Quanto à resistência à flexão, os valores seguiram, de modo geral, a tendência observada na compressão, porém a redução da resistência com o acréscimo de cinzas, em relação ao traço de referência, foi consideravelmente menor.

Os resultados sugerem a viabilidade técnica de substituição parcial do cimento por cinza de carvão na formulação de *Pavers* para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais. Finalmente, convém ressaltar que o traço utilizado ainda envolve um elevado consumo de cimento e aditivo, porém considerando os resultados obtidos, especialmente em relação aos valores da resistência à compressão, seria viável a análise de outras dosagens visando a redução do consumo desses materiais para reduzir o custo do produto final.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: 2005.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: 2013.
3. FERNANDES, Idário D. Blocos e pavers produção e controle de qualidade. 7.ed. Ribeirão Preto, Treino assessoria e treinamentos empresariais Ltda, 2016.