

VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA PREPARADOS COM PLÁSTICOS RECICLADOS PARA APLICAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA

Filipe Derkacz Lazzeris

Hugo Alionço

Thiago Roberto S. Duarte

Matheus David I. Domingos

Wellington Mazer

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Construção Civil

Daniane Franciesca Vicentini

Universidade Federal do Paraná
Departamento de Transportes

RESUMO

Este trabalho investigou a viabilidade técnica do uso de uma blenda de polietileno com polietileno tereftalato (PE+PET) em substituição à parte da fração miúda do concreto na fabricação de *pavers*. Foram selecionados teores entre 1 e 10% de PE+PET em volume para incorporação em um concreto de alta resistência e dosado segundo normas norte-americanas. *Pavers* do Tipo I e designados como 16 faces foram empregados, cujas propriedades incluíram a resistência característica à compressão aos 28 dias e a taxa média de absorção de água. Com o aumento do teor de PE+PET, torna-se viável o uso de *pavers* com 1% e 2% desta blenda (resistências características entre 39 e 41 MPa), apesar das reduções em relação ao traço padrão. No caso da absorção média, os valores oscilaram entre 2,1 e 3,2% para todos os traços. Os resultados indicam um possível uso de PE+PET em *pavers* para vias com tráfego leve.

ABSTRACT

This study investigated the technical feasibility of the use of a blend comprised by polyethylene and polyethylene terephthalate (PE+PET) in replacement to part of the fine aggregates in the fabrication of Concrete Paving Blocks (CBPs). Plastic contents between 1 and 10% by volume were incorporated into a highly-resistant concrete prepared in accordance with American standards. CBPs designated as Type I and 16-faces were used, and their evaluated properties included the characteristic compressive strength after 28 curing days and the average water absorption. With increasing PE+PET content, the preparation of CBPs with 1% and 2% of this blend (characteristic compressive strengths between 39 and 41 MPa) becomes technically feasible, despite the reductions when compared to the standard trace. With respect to the average water absorption, its results ranged from 2.1 to 3.2% for all dosages. The data suggest a possible use of CBPs with PE+PET on pavements subjected to light traffic.

1. INTRODUÇÃO

Em termos da resposta estrutural global à aplicação das cargas do tráfego, o pavimento intertravado pode ser entendido como um pavimento do tipo flexível, cuja estrutura é composta por uma camada de base – podendo ou não haver sub-base – e outra de revestimento, além de uma camada de areia de assentamento. Este revestimento é descrito como peças de concreto assentadas uma ao lado da outra e que têm suas juntas de até 3,0 mm preenchidas com areia, ainda que a selagem definitiva venha a ocorrer apenas após um curto período de tempo de passagem das cargas do tráfego. O intertravamento das peças deve ocorrer em todas as direções possíveis para que a transferência de cargas entre os blocos seja feita de forma apropriada, além de evitar o descolamento das peças durante a vida útil da estrutura. Este intertravamento deve impedir os deslocamentos horizontais e verticais de um bloco em relação aos blocos vizinhos, bem como o giro ao redor do seu próprio eixo (ABNT, 2013; Cruz, 2003; Knapton, 1996; Rada *et al.*, 1990).

Os blocos de concreto para pavimentação – ou *pavers* – tiveram origem nos Países Baixos nos anos 1940, como uma maneira de repor tijolos de argila em vias urbanas. Vantagens como a resistência aos ciclos de gelo-degelo, baixos custos de manutenção e facilidade de reparos

levaram ao aumento da sua popularidade na Europa Ocidental, além de outros países (Abate, 1993). No caso dos Estados Unidos, sua utilização teve início em meados da década de 1970 e, desde então, os *pavers* têm sido utilizados até mesmo em vias de tráfego pesado como em pátios de aeroportos, portos e indústrias (Abate, 1993; Rada *et al.*, 1990). A vida útil do pavimento intertravado pode ser de até 25 anos, considerando condições adequadas de projeto, fabricação e assentamento dos blocos (Fioriti, 2007). No caso do Brasil, a maioria das aplicações dos *pavers* ainda se restringe a áreas urbanas de fluxo leve como estacionamentos e praças, motivadas possivelmente por questões arquitetônicas e paisagísticas (Cruz, 2003). Outros exemplos nacionais de aplicação de *pavers* incluem áreas portuárias e industriais e pequenos trechos de rodovias, mas o seu uso ainda é muito restrito quando comparado a outros países como a África do Sul, por exemplo (Madrid, 2004; Prefeitura de Valinhos, 2010).

A incorporação de plásticos ao concreto tem sido vista como uma opção de destinação correta deste resíduo, fomentando a sua reciclagem e lidando com as dificuldades culturais e de infraestrutura para viabilizar o acúmulo de grandes volumes nas áreas urbanas (Coelho *et al.*, 2011). Esta incorporação costuma ser feita em substituição ao agregado, tanto na fração graúda quanto na fração mais fina, ou mesmo ambos. A substituição nestes casos é designada como volumétrica direta. Em geral, a tendência observada na literatura é de redução na resistência do concreto à compressão após a incorporação de plásticos, especialmente no caso de partículas mais irregulares e com granulometrias mais grossas (Gu e Ozbakkaloglu, 2016; Pacheco-Torgal *et al.*, 2012; Sharma e Bansal, 2016). No entanto, variações muito pequenas nesta resistência (Frigione, 2010; Modro *et al.*, 2009; Saikia e De Brito, 2013; Thorneycroft *et al.*, 2018) ou mesmo incrementos de até 12% (Cândido *et al.*, 2014; Rahmani *et al.*, 2013) podem ser encontrados, especialmente quando os teores de plásticos são baixos – até 10% em volume – e a fração mais fina é parcialmente substituída pelo agregado plástico.

Como destacado acima, é possível produzir concretos modificados com plásticos e que não apresentem perdas expressivas de resistência à compressão em relação aos concretos convencionais. Ajustes no traço permitem a obtenção de resistências elevadas – cerca de 40 MPa – para o concreto convencional, conforme exemplo demonstrado por Eich *et al.* (2016). No caso dos agregados plásticos, o teor escolhido deve ser suficiente para permitir um maior intertravamento e homogeneização das partículas na matriz do concreto, de modo a compensar a perda de adesão da argamassa aos agregados convencionais (Cândido *et al.*, 2014; Rahmani *et al.*, 2013; Saikia e De Brito, 2013). Ainda que de maior custo para fabricação dos *pavers*, outra opção consiste no tratamento prévio dos plásticos para minimizar as perdas de resistência – por exemplo, com alvejantes e soda cáustica (Naik *et al.*, 1996) ou mesmo aquecimentos e resfriamentos para transformar o plástico em um formato similar ao agregado convencional (Islam *et al.*, 2016).

Além da resistência à compressão, outro parâmetro de referência citado na norma brasileira para *pavers* (ABNT, 2013) é a absorção de água, que estaria indiretamente associada à porosidade do concreto. De um ponto de vista prático, esta absorção é limitada em um máximo de 6% com base em estudos e normas nacionais (ABNT, 2013; Pires, 2015), podendo variar entre 5 a 8% a partir de trabalhos internacionais (Abate, 1993; Rollings, 1983). Tal limitação visa principalmente à proteção da integridade dos blocos a ciclos de gelo-degelo, pois blocos com uma distribuição inadequada de poros e sujeitos a estes ciclos podem desenvolver pressões osmóticas e de dilatação, acarretando um aumento da umidade no concreto e reduzindo a sua resistência à compressão (Rollings, 1983). Em casos específicos, ensaios de durabilidade do *paver* sob ciclos sucessivos de gelo-degelo (Beaty, 1992) podem ser necessários.

1.1. Especificação do problema e objetivos da pesquisa

Em linhas gerais, é possível visualizar que a preparação de concretos com plásticos reciclados e com resistências à compressão compatíveis com seu uso em vias de tráfego leve ou pesado – valores mínimos de 35 e 50 MPa segundo a ABNT (2013), respectivamente – ainda permanece um desafio na literatura científica. Entretanto, a viabilidade técnica do uso de *pavers* em pavimentos reais e dispositivos de carregamento acelerado tem sido verificada em diversos trabalhos como Emery (1986), Panda e Ghosh (2002) e Shackel (1980). Isto sinaliza que *pavers* apropriados para uso em pavimentação e modificados com plásticos podem ser produzidos em laboratório, desde que as variáveis de entrada do processo de dosagem (tipo, teor, resistência e granulometria dos plásticos) sejam compatíveis com o desempenho esperado dos blocos e as partículas de plásticos e de agregados convencionais tenham um bom intertravamento na matriz do concreto.

Em face do exposto, o objetivo principal do presente estudo consiste na análise da viabilidade técnica da produção de *pavers* de alta resistência (valores mínimos de 40 MPa) e modificados com um tipo de plástico processado industrialmente e composto por uma blenda de polietileno (PE) e politereftalato de etileno (PET), doravante designado como “PE+PET”. Esta viabilidade foi verificada por meio dos ensaios básicos preconizados na NBR 9781 (ABNT, 2013), a saber, resistência à compressão e absorção de água. Os objetivos secundários podem ser listados a seguir:

- buscar um possível teor ótimo de PE+PET que produza uma resistência à compressão máxima e de acordo com os requisitos para uso preferencial dos *pavers* em vias de tráfego pesado, de modo similar ao destacado nos experimentos de Rahmani *et al.* (2013);
- avaliar os eventuais problemas decorrentes da presença do PE+PET na matriz do concreto, tanto em termos de redução da resistência à compressão quanto do aumento expressivo da absorção de água; e
- desenvolver modelos matemáticos que possam explicar as tendências de variação das resistências dos *pavers* à compressão com o aumento do teor de PE+PET, tal como feito na pesquisa de Pires (2015).

2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Insumos, dosagem e traço do concreto padrão

Para fins de comparação, foi realizada a dosagem do concreto padrão *T0* (ou seja, sem PE+PET), feita em consonância com os protocolos e ábacos definidos pelo Instituto do Concreto dos Estados Unidos – ACI (American Concrete Institute, 2002). Tais procedimentos fornecem quantitativos estimados para o cimento Portland, água e as frações graúda e miúda dos agregados para produção de 1,0 m³ de concreto, em função da resistência mínima desejada e do tipo deste concreto (com ou sem ar incorporado). Foram escolhidos um cimento Portland de alta resistência inicial, tipo CP V-ARI, e agregados de gnaíse com uma abrasão Los Angeles igual a 20,9% segundo o método de ensaio DNER-ME 035 (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1998). Cumpre destacar que a NBR 9781 (ABNT, 2013) não estabelece como requisito obrigatório a análise da resistência do *paver* à abrasão, de modo que o controle da abrasão Los Angeles dos agregados pode compensar – ao menos parcialmente – a não obrigatoriedade deste ensaio.

As variáveis de entrada listadas na Tabela 1 foram aplicadas no método da ACI para os agregados e cimento Portland selecionados na pesquisa, considerando uma resistência inicial desejada de

7.000 psi (aproximadamente 48,3 MPa) após 28 dias de cura. A Figura 1 mostra as curvas granulométricas dos agregados graúdo e miúdo segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005). Verificou-se também que o agregado miúdo atende aos intervalos utilizáveis para os percentuais retidos em cada peneira, e o agregado graúdo se situa na classificação 9,5/25. Assumiu-se na pesquisa que o concreto é do tipo rígido (*stiff*). Assim como outros estudos nacionais (Pires, 2015), foi considerado um percentual de aditivo superplastificante em relação à massa total de cimento Portland – neste caso, 0,25% em massa e um aditivo do tipo MC-POWERFLOW 1095 fornecido pela empresa MC-Bauchemie Brasil Ltda. Apesar de os aspectos financeiros estarem fora do escopo deste estudo, outros autores destacaram que os custos de produção de blocos com plásticos podem variar significativamente em relação àqueles sem plásticos, desde menos de 10% (Cândido *et al.*, 2014) até mais de 60% (Pires, 2015) dependendo das características locais.

Tabela 1: Variáveis de entrada para preparação do concreto padrão (T_0)

Descrição da variável	Norma ^b	Valor numérico ou tipo
tipo de concreto	-	sem ar incorporado
massa específica do cimento Portland (g/cm ³)	NM 23	3,12
massa específica do agregado miúdo (g/cm ³)	NM 52	2,24
massa específica do agregado graúdo (g/cm ³)	NM 53	2,75
taxa de absorção de água pelo agregado miúdo (%)	NM 30	0,68
taxa de absorção de água pelo agregado graúdo (%)	NM 53	0,52
diâmetro máximo nominal do agregado graúdo (mm)	-	25,00
módulo de finura do agregado miúdo	-	2,20
fator água-cimento (a/c) ^a	-	0,33125

^a valor obtido graficamente, não considerando a água absorvida pelos agregados.

^b referências: NM 23 (ABNT, 2001a), NM 30 (ABNT, 2001b), NM 52 (ABNT, 2003a) e NM 53 (ABNT, 2003b).

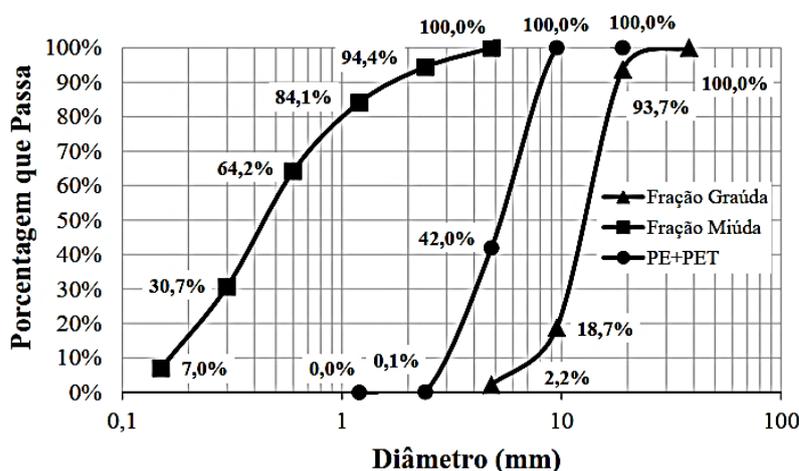


Figura 1: Distribuições granulométricas dos materiais segundo as peneiras da série normal

De posse dos dados iniciais fornecidos pela American Concrete Institute (2002), foi definido o traço inicial de 1:1,16:2,73:0,35 (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, respectivamente) em massa para a dosagem T_0 . Posteriormente, foram preparados seis corpos de prova cilíndricos de concreto segundo a norma NBR 5738 (ABNT, 2015) e ensaiados de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 1994) para verificação da resistência inicial à

compressão desejada aos sete dias de cura. Estes corpos de prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura foram posicionados em uma prensa hidráulica da marca EmiC, modelo DL30000N, e capaz de aplicar cargas uniaxiais de até 300 kN. Os resultados reportados na Figura 2 mostram que, ao se assumir uma distribuição normal e considerar uma probabilidade de 95%, a resistência do concreto à compressão estará situada aproximadamente entre 25,4 e 59,8 MPa (valor médio de 42,7 MPa e erro padrão de 3,51 MPa). Para fins de fabricação dos *pavers*, verificou-se que o traço em questão atendia aos requisitos para aplicação dos mesmos em vias de tráfego pesado, isto é, uma resistência à compressão mínima de 50 MPa aos 28 dias de cura. Isto ocorre porque a NBR 9781 (ABNT, 2013) estabelece que ao menos 80% desta resistência à compressão mínima – ou seja, 40 MPa – deve ser atingida antes dos 28 dias.

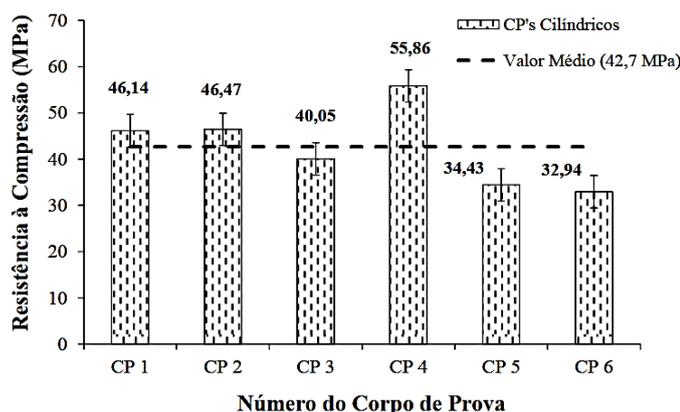


Figura 2: Resistências à compressão dos corpos de prova cilíndricos aos sete dias de cura e preparados com o concreto padrão *T0*

2.2. Dados técnicos dos traços dos *pavers*, ensaios e especificações do PE+PET

A categoria escolhida para o *paver* é a designada como Tipo I segundo a ABNT (2013), ou seja, formato retangular ou próximo ao retangular e com uma relação comprimento/largura igual a 2,0. Dentre os tipos presentes nesta categoria, pode-se destacar o formato conhecido como 16 faces conforme esquema e dimensões mostradas na Figura 3. O formato peculiar das laterais de *pavers* não retangulares – o que inclui o designado como 16 faces – permite um aumento da área vertical de contato entre blocos sucessivos, possibilitando uma maior transferência de cargas entre os mesmos na estrutura do pavimento e aumentando a sua durabilidade. Isto tem sido verificado em experimentos com dispositivos de carregamento acelerado e ensaios de placa feitos por outros autores, o que inclui Panda e Ghosh (2002) e Shackel (1980). Cálculos realizados com o programa computacional *AutoCAD*[®] indicaram uma área superficial de 0,0230 m² e um volume de 0,00138 m³ para cada *paver*.

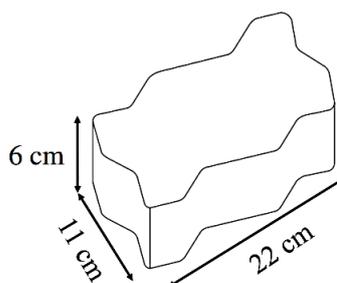


Figura 3: Dimensões dos *pavers* de 16 faces preparados neste estudo

A blenda de PE+PET foi fornecida por uma empresa parceira na forma de *pellets*, cujos dados técnicos podem ser resumidos da seguinte maneira: temperatura de fusão de 190°C, cor verde-claro a escuro e densidade aproximada de 0,6 g/mL a partir de três réplicas determinadas em proveta. Quanto à granulometria, 41,95% de suas partículas são passantes na peneira #4 (4,76 mm), outros 0,13% são passantes na peneira #8 (2,40 mm) e o restante é integralmente retido na peneira #16 (1,20 mm), todas da série normal – vide Figura 1. Isto posiciona o modificador em uma mistura aproximadamente equivalente de frações graúda e miúda de partículas. Com base em recomendações específicas da literatura (Cândido *et al.*, 2014; Rahmani *et al.*, 2013; Thorneycroft *et al.*, 2018), foram adotados teores de PE+PET de até 10% em volume nos *pavers*, em substituição à fração miúda dos agregados convencionais.

Os traços detalhados na Tabela 2 se referem à produção de 10 corpos de prova para cada um dos teores de PE+PET iguais a 1, 2, 3, 4, 5 e 10% em volume (designações *T1*, *T2*, *T3*, *T4*, *T5* e *T6*, respectivamente) além do traço *T0*, assumindo um quantitativo de 20% de perda por questões de segurança. Destes 10 blocos, seis foram submetidos aos protocolos de resistência à compressão e outros três foram submetidos aos ensaios de absorção de água, conforme especificações normativas a seguir. O último bloco de cada conjunto foi armazenado para fins de necessidades emergenciais, caso algum corpo de prova apresentasse ruptura em tensões muito baixas (até 20 MPa).

Tabela 2: Quantitativos de materiais para os traços com e sem PE+PET

traço e teor de PE+PET	quantitativos em massa (kg)						
	água	cimento Portland	agregado miúdo	agregado graúdo	PE+PET	aditivo	TOTAL
<i>T0</i> (0%)	2,651	7,527	8,793	20,624	-	0,0188	39,614
<i>T1</i> (1%)	2,651	7,527	8,705	20,624	0,0589	0,0188	39,585
<i>T2</i> (2%)	2,651	7,527	8,531	20,624	0,1178	0,0188	39,470
<i>T3</i> (3%)	2,651	7,527	8,275	20,624	0,1766	0,0188	39,272
<i>T4</i> (4%)	2,651	7,527	7,944	20,624	0,2355	0,0188	39,000
<i>T5</i> (5%)	2,651	7,527	7,547	20,624	0,2944	0,0188	38,662
<i>T6</i> (10%)	2,651	7,527	6,792	20,624	0,5888	0,0188	38,202

Conforme citado anteriormente, os ensaios básicos realizados nos *pavers* e preconizados pela ABNT (2013) incluíram a resistência à compressão e a absorção de água. Os protocolos do ensaio de resistência definem a aplicação da carga uniaxial a uma taxa de crescimento de 550 ± 200 kPa/s até a ruptura da amostra, e foi considerada a mesma prensa EmiC modelo DL30000N. Cada corpo de prova teve a sua superfície regularizada de modo a garantir a uniformidade da aplicação da carga, além de ter sido imerso em água por pelo menos 24 h antes do ensaio. Foi definida a quantidade mínima de seis corpos de prova por traço de PE+PET e incluindo o concreto padrão *T0*, totalizando 42 corpos de prova. Os valores das respectivas resistências características à compressão ($f_{pk, est}$) e médias ($f_{pk, med}$) foram obtidos estatisticamente segundo os protocolos da ABNT (2013). Para fins comparativos, um procedimento estatístico alternativo também foi considerado nas análises.

No caso dos ensaios de absorção de água, foi selecionado o número mínimo de três corpos de prova por traço conforme recomendações e protocolos estabelecidos pela mesma norma NBR

9781 (ABNT, 2013). Para que o *paver* seja considerado adequado para uso em pavimentação, o valor médio da absorção de água (Ab) não deve ser superior a 6% e nenhum dos resultados individuais de absorção pode superar o valor máximo de 7%. Em linhas gerais, a taxa de absorção avalia o incremento percentual de massa do *paver* na condição saturada (m_2) em relação à condição seca (m_1), vide Equação 1. Como explicado anteriormente, o objetivo do controle da absorção de água pelo *paver* reside na proteção do concreto aos danos causados pelos ciclos de gelo-degelo. No entanto, publicações como Rollings (1983) destacaram que os limites de absorção podem ser desconsiderados em determinadas normas europeias quando a resistência do *paver* é suficientemente alta, pelo menos 60 MPa.

$$Ab(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

em que Ab : taxa de absorção de água pelo *paver*, expressa em porcentagem;
 m_2 : massa do *paver* na condição saturada [g]; e
 m_1 : massa do *paver* na condição seca [g].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resistência à compressão e análises estatísticas

A Tabela 3 apresenta os resultados de $f_{pk, est}$ para todos os blocos ensaiados nesta pesquisa, bem como os seus respectivos intervalos de valores individuais de resistência à compressão $f_{pk, i}$ e as principais variáveis estatísticas – desvio padrão amostral s e coeficiente de variação CV – segundo a norma NBR 9781 (ABNT, 2013). A tendência geral de redução da resistência à compressão com o aumento do teor de PE+PET pode ser visualizada tanto para os valores médios desta resistência ($f_{pk, med}$) quanto os característicos $f_{pk, est}$. Além de estar em concordância com outros experimentos laboratoriais publicados na literatura (Batayneh *et al.*, 2007; Islam *et al.*, 2016; Modro *et al.*, 2009; Pires, 2015; Saikia e De Brito, 2013), os dados também apontam um cenário aproximadamente linear nesta redução da resistência, especialmente para $f_{pk, med}$ ($R^2 \approx 0,92$) conforme equações de regressão e respectivos valores de R^2 mostrados na Figura 4. Regressões lineares têm sido utilizadas com sucesso não apenas em *pavers* com plásticos reciclados (Pires, 2015), mas também em outros tipos de modificação do concreto no *paver* como a borracha moída de pneus inservíveis (Ohemeng e Yalley, 2013).

Tabela 3: Intervalos de resultados individuais ($f_{pk, i}$), valores médios ($f_{pk, med}$) e característicos ($f_{pk, est}$) de resistência à compressão segundo ABNT (2013)

Traço	Teor de PE+PET (%)	$f_{pk, i}$ (MPa)	$f_{pk, med}$ (MPa)	$f_{pk, est}$ (MPa)	s (MPa) ^a	CV (%) ^a
T0	0,0	38,79 a 66,21	54,18	45,14	9,82	18,13
T1	1,0	35,62 a 62,02	51,35	40,57	11,72	22,82
T2	2,0	35,40 a 60,27	49,36	39,08	11,17	22,63
T3	3,0	26,74 a 56,72	44,36	33,85	12,07	26,85
T4	4,0	28,13 a 60,30	40,33	28,94	12,38	30,69
T5	5,0	31,83 a 44,81	38,62	33,83	5,20	13,48
T6	10,0	27,44 a 35,94	32,40	29,18	3,51	10,82

^a s = desvio padrão amostral; CV = coeficiente de variação.

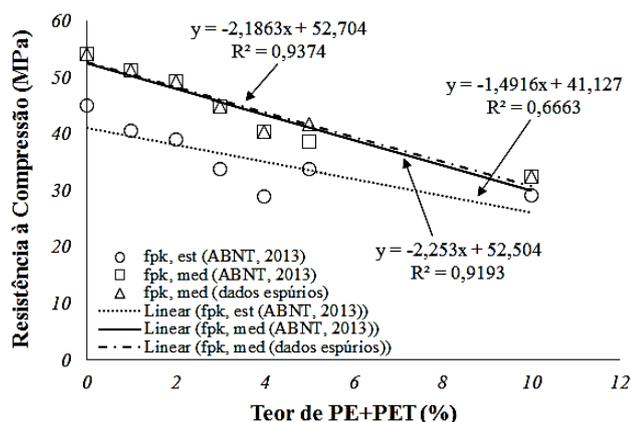


Figura 4: Correlações entre as resistências médias ($f_{pk, med}$) e características ($f_{pk, est}$) dos *pavers* à compressão e o teor de PE+PET (ABNT, 2013; Vuolo, 1996)

Os decréscimos de resistência à compressão com o aumento do teor de PE+PET no *paver* podem ser atribuídos a fatores granulométricos e à atuação dos *pellets* de PE+PET na matriz do concreto, dentre outras razões. No caso da granulometria, os melhores resultados são observados quando as partículas de plásticos têm diâmetros de até 4,0 mm conforme Frigione (2010), Saikia e De Brito (2013) e Thorneycroft *et al.* (2018). Em termos da atuação do modificador na matriz do concreto, a flexibilidade das partículas de plásticos atuando como agregados miúdos – aliado a um bom intertravamento das mesmas dependendo do seu teor e formato – podem proporcionar a manutenção ou até mesmo incrementos nesta resistência, o que tem sido verificado para teores de até 5% em volume (Rahmani *et al.*, 2013) e permitem justificar os “picos” de $f_{pk, est}$ e $f_{pk, med}$ no traço T5 (5% de PE+PET) em relação aos traços T4 e T6. Em outras palavras, a granulometria mais graúda do modificador possivelmente afetou a interação entre as partículas de agregados convencionais, evitando um intertravamento apropriado dos *pellets* e dos agregados no concreto final em alguns traços, mesmo com a substituição apenas da fração miúda pelo PE+PET.

Outra questão associada ao uso de agregados plásticos no concreto – e que costuma ser mais evidente para teores altos destes agregados e partículas mais grossas – é a perda de adesão da argamassa ao agregado convencional, o que dificulta a homogeneização do concreto e prejudica a sua resistência final (Albano *et al.*, 2009; Pacheco-Torgal *et al.*, 2012; Rahmani *et al.*, 2013; Saikia e De Brito, 2013; Sharma e Bansal, 2016). Em alguns casos, cavidades se tornam visíveis nos corpos de prova por conta da trabalhabilidade baixa do concreto com plásticos e prejudicam ainda mais esta resistência (Albano *et al.*, 2009). Em termos deste estudo, é possível atribuir ao menos parte da perda da resistência à compressão à falta de aderência entre a argamassa e o agregado convencional, especialmente no caso dos teores mais elevados (5 e 10% de PE+PET). No entanto, nenhum dos corpos de prova com PE+PET apresentou cavidades na sua textura superficial por conta da seleção de métodos apropriados de homogeneização para concretos secos (ABNT, 2015).

Apesar das reduções da resistência à compressão, pesquisas sugerem que o uso de plásticos com módulo de elasticidade elevado como o PET (Gu e Ozbakkaloglu, 2016) pode contribuir para decréscimos relativamente menores nesta resistência, especialmente quando os teores são de até 2%. Isto se verificou empiricamente na pesquisa, pois tanto $f_{pk, est}$ quanto $f_{pk, med}$ registraram diminuições entre 5,0 e 6,0 MPa – em média – para o traço T2 em relação ao traço padrão T0. Outros autores também apontam que tais reduções na resistência do concreto à

compressão tendem a ser menores quando os plásticos são utilizados como agregados finos ou *pellets*, sobretudo para teores de até 10% em volume (Saikia e De Brito, 2013).

Além dos protocolos de análise estabelecidos pela norma NBR 9781 (ABNT, 2013) para as resistências à compressão, há também os definidos por um procedimento estatístico, conforme já citado. Segundo este procedimento, não há um processo específico para cálculo da resistência característica do *paver* à compressão, apenas a correção da resistência obtida diretamente na prensa por um fator p , função da espessura do *paver*. Neste aspecto, os intervalos de $f_{pk, i}$ para cada traço do concreto foram tratados estatisticamente para determinação dos valores individuais mais representativos e eliminação dos dados espúrios, considerando um limite de erro estatístico de \pm uma vez o valor do desvio padrão amostral s em relação a $f_{pk, med}$ e para estes mesmos conjuntos de valores (Vuolo, 1996). Nos casos em que ao menos quatro das seis amostras por teor de PE+PET (66,77% dos dados) estão situadas dentro do referido intervalo, o cálculo de $f_{pk, med}$ não precisa ser feito; do contrário, os dados espúrios são retirados até que se tenha ao menos 66% dos valores de $f_{pk, i}$ dentro do intervalo $f_{pk, med} \pm s$.

A Tabela 4 destaca os resultados corrigidos de $f_{pk, med}$ segundo a metodologia supracitada. Pode-se visualizar que, à exceção do traço *T5*, todos os demais traços mantiveram seus valores de $f_{pk, med}$ e desvio padrão amostral s inalterados. As novas reduções de $f_{pk, med}$ com o incremento de PE+PET também podem ser bem representadas por meio de uma regressão linear ($R^2 \approx 0,94$), conforme Figura 4. Neste aspecto, os traços *T0* e *T1* continuam apresentando os melhores resultados para os *pavers* com PE+PET, sendo $f_{pk, med}$ superior a 50 MPa em todos eles e havendo a possibilidade de uso dos mesmos em vias de tráfego pesado. Há também a manutenção de um pico de resistência em *T5* em relação a *T4* e *T6*, ainda que em um aumento proporcional de resistência menor em relação ao protocolo da NBR 9781 (ABNT, 2013).

Tabela 4: Novos intervalos de resultados individuais ($f_{pk, i}$) e médios ($f_{pk, med}$) de resistência à compressão (Vuolo, 1996)

Traço	Teor de PE+PET (%)	$f_{pk, i}$ (MPa)	$f_{pk, med}$ (MPa)	s (MPa) ^a	CV (%) ^a
<i>T0</i>	0,0	49,47 a 66,21	54,18	9,82	18,13
<i>T1</i>	1,0	55,10 a 62,02	51,35	11,72	22,82
<i>T2</i>	2,0	49,36 a 60,27	49,36	11,17	22,63
<i>T3</i>	3,0	45,83 a 56,72	44,96	12,07	26,85
<i>T4</i>	4,0	28,13 a 60,30	40,33	12,38	30,69
<i>T5</i>	5,0	39,13 a 44,81	41,68	2,70	6,48
<i>T6</i>	10,0	32,41 a 35,94	32,40	3,51	10,82

^a s = desvio padrão amostral; CV = coeficiente de variação.

3.2. Taxas de absorção de água

A Tabela 5 mostra os resultados de absorção de água dos *pavers* com e sem PE+PET e de acordo com a norma NBR 9781 (ABNT, 2013), bem como as principais variáveis estatísticas s e CV. As taxas de absorção Ab e os valores individuais Ab_i estão situados entre 1,9 e 4,8% para todos os traços, não havendo uma tendência específica de comportamento de Ab com o aumento do teor de PE+PET. Do ponto de vista normativo, nenhum traço é considerado inadequado para uso em pavimentação porque $Ab \leq 6\%$ e $Ab_i \leq 7\%$. Valores baixos de absorção sinalizam a presença de poucos vazios na matriz do concreto e, de forma indireta, uma porosidade baixa para o material. Segundo Albano *et al.* (2009), o uso de partículas de

plásticos com diâmetros menores tendem a reduzir os valores de Ab em comparação aos plásticos com diâmetros maiores, e o uso de plásticos com granulometrias diferentes das do agregado miúdo convencional – caso desta pesquisa – tendem a estabelecer uma porosidade própria e diferenciada do concreto sem plásticos.

Tabela 5: Intervalos de valores individuais (Ab_i) e valores finais para as taxas de absorção de água (Ab) dos *pavers* com e sem PE+PET segundo ABNT (2013)

traço	teor de PE+PET (%)	Ab_i (%)	Ab (%)	s (%) ^a	CV (%) ^a
T0	0,0	2,31 a 2,55	2,45	0,12	5,08
T1	1,0	2,40 a 3,38	2,74	0,56	20,35
T2	2,0	2,29 a 2,40	2,36	0,06	2,53
T3	3,0	2,09 a 2,57	2,34	0,24	10,30
T4	4,0	2,28 a 4,79	3,14	1,43	45,50
T5	5,0	1,93 a 2,45	2,17	0,27	12,27
T6	10,0	2,26 a 2,42	2,35	0,08	3,53

^a s = desvio padrão amostral; CV = coeficiente de variação.

Outra constatação interessante se refere à pequena variação de Ab com o aumento do teor de PE+PET nos *pavers*, o que também se confirmou em outras investigações com agregados plásticos na forma de *pellets* como Saikia e De Brito (2013). Desta maneira, não é possível atribuir os decréscimos de $f_{pk, est}$ e $f_{pk, med}$ dos *pavers* às variações das taxas de absorção de água – e, por consequência, a um possível aumento da porosidade do concreto – e outros fatores merecem ser destacados. Como apontado anteriormente, tais fatores incluem a baixa resistência do plástico em relação ao agregado convencional, a falta de intertravamento entre os *pellets* de PE+PET e os agregados e a perda da adesão da argamassa a estes agregados.

4. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O uso de agregados plásticos do tipo PE+PET em blocos de concreto para pavimentação intertravada (*pavers*) acarretou reduções nas resistências características ($f_{pk, est}$) e médias ($f_{pk, med}$) à compressão, mesmo para quantidades baixas de PE+PET – até 10% em volume – e tais diminuições seguiram uma tendência aproximadamente linear com o aumento do teor de PE+PET. No entanto, os teores de 1 e 2% não causaram impactos expressivos em $f_{pk, est}$ e $f_{pk, med}$, o que pode indicar a viabilidade do seu uso em *pavers* sujeitos às cargas do tráfego. Tanto os blocos preparados sem PE+PET quanto os dosados com 1 e 2% de PE+PET podem ser utilizados ao menos em vias com tráfego leve, para as quais $f_{pk, est} \geq 35$ MPa. Acredita-se que ajustes no traço, na produção e nos quantitativos de PE+PET e de agregado a ser substituído pelo plástico resultem em *pavers* capazes de suportar tráfegos pesados ($f_{pk, est} \geq 50$ MPa). Isto já seria possível para os blocos com o concreto padrão e os dosados com 1% de PE+PET, para o caso de utilização de $f_{pk, med}$ como um parâmetro de especificação em vez de $f_{pk, est}$.

No que se refere à taxa de absorção de água, nenhuma das dosagens estudadas nesta pesquisa superou os valores máximos de 6% e 7% para as taxas médias (Ab) e individuais (Ab_i) dos corpos de prova, respectivamente. Isto sinaliza que todos os *pavers* seriam capazes de suportar eventuais ciclos de gelo-degelo sem causar danos à resistência do concreto. Cabe destacar que a presença do PE+PET na matriz do concreto não acarretou impactos expressivos nestas taxas de absorção de água dos *pavers*, uma vez que os valores de Ab oscilaram entre 2,1 e 3,2% e os de Ab_i variaram entre 1,9 e 4,8% para todos os traços considerados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Plaskaper (Fazenda Rio Grande-PR) pela blenda de PE+PET fornecida para a realização da pesquisa, bem como aos técnicos de laboratório Felipe Perretto e Paulo Sabino pelo auxílio na preparação dos *pavers* e na condução dos ensaios de resistência à compressão. Os autores são gratos à empresa Briforte (Curitiba-PR) pelo fornecimento dos agregados, à Prof^{ta}. Juliana Regina Kloss pelo auxílio na obtenção da densidade do PE+PET e à Prof^{ta}. Amanda Dalla Rosa Johann pelo auxílio na caracterização dos agregados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abate, M. K. (1993) *Concrete Paving Blocks – an Overview*. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – University of Washington, Washington (DC).
- ABNT (1994) *NBR 5739 – Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2001a) *NBR NM 23 – Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Massa Específica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2001b) *NBR NM 30 – Agregado Miúdo – Determinação da Absorção de Água*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2003a) *NBR NM 52 – Agregado Miúdo – Determinação da Massa Específica e Massa Específica Aparente*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2003b) *NBR NM 53 – Agregado Graúdo – Determinação de Massa Específica, Massa Específica Aparente e Absorção de Água*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2005) *NBR 7211 – Agregados para Concreto – Especificação*. 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.
- Albano, C.; N. Camacho, M. Hernández; A. Matheus e A. Gutiérrez (2009) Influence of Content and Particle Size of Waste Pet Bottles on Concrete Behavior at Different w/c Ratios. *Waste Management*, v. 29, n. 10, p. 2707-2716. doi: 10.1016/j.wasman.2009.05.007.
- American Concrete Institute (2002) *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*. Report No. ACI 21.3R-02. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- Batayneh, M.; I. Marie e I. Asi (2007) Use of Selected Waste Materials in Concrete Mixes. *Waste Management*, v. 27, n. 12, p. 1870-1876. doi: 10.1016/j.wasman.2006.07.026.
- Beatty, A. N. S. (1992) Concrete Block Paving in Canada. *Proceedings of the 4th International Conference on Concrete Block Paving*, Cement and Concrete Association of New Zealand, Auckland.
- Cândido, L. F.; J. M. L. Barreto e A. E. B. Cabral (2014) Avaliação de Blocos de Concreto Produzidos com PET Reciclado. *Anais do XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, ENTAC, Maceió, p. 2423-2432.
- Coelho, T. M.; R. Castro e J. A. Gobbo Jr (2011) PET Containers in Brazil: Opportunities and Challenges of a Logistics Model for Post-Consumer Waste Recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 55, n. 3, p. 291-299. doi: 10.1016/j.resconrec.2010.10.010.
- Cruz, L. O. M. (2003) *Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento*. 281 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- DNER (1998) *DNER-ME 035 – Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles”*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- Eich, J. K.; J. C. Silva e L. G. Leite (2016) *Estudo de Traço de Pavimento Intertravado de Concreto Permeável*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Emery, J. A. (1986) Concrete Pavers for Aircraft Pavement Surfaces. *Journal of Transportation Engineering*, v. 112, n. 6, p. 609-623. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1986)112:6(609).
- Fioriti, C. F. (2007) *Pavimentos Intertravados de Concreto Utilizando Resíduo de Pneu como Material Alternativo*. 202 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. doi: 10.11606/T.18.2007.tde-27092007-184727.
- Frigione, M. (2010) Recycling of PET Bottles as Fine Aggregate in Concrete. *Waste Management*, v. 30, n. 6, p. 1101-1106. doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.030.
- Gu, L. e T. Ozbakkaloglu (2016) Use of Recycled Plastics in Concrete: a Critical Review. *Waste Management*, v. 51, p. 19-42. doi: 10.1016/j.wasman.2016.03.005.

- Islam, M. J.; M. S. Meherier e A. K. M. R. Islam (2016) Effects of Waste PET as Coarse Aggregate on the Fresh and Harden Properties of Concrete. *Construction and Building Materials*, v. 125, p. 946-951. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.128.
- Knapton, J. (1996) The Civil Aviation Authority Recommendations for the Use of Pavers on Aircraft Pavements. *Proceedings of the 5th International Conference on Concrete Block Pavements*, ICPI, Tel Aviv, p. 493-500.
- Madrid, G. G. (2004) Acredite: Rodovias com Intertravados já são Realidade. *Revista Prisma*, São Paulo, n. 10. Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20190524182741/http://www.revistaprisma.com.br/teste2/prisma/Textos.asp?id=59&cor=>>>. Acesso em: 24 mai. 2019.
- Modro, N. L. R.; N. R. Modro; N. R. Modro e A. P. N. Oliveira (2009) Avaliação de Concreto de Cimento Portland Contendo Resíduos de PET. *Revista Matéria*, v. 14, n. 1, p. 725-736.
- Naik, T. R.; S. S. Singh; C. O. Huber e B. S. Brodersen (1996) Use of Post-Consumer Waste Plastics in Cement-Based Composites. *Cement and Concrete Research*, v. 26, n. 10, p. 1489-1492. doi: 10.1016/0008-8846(96)00135-4.
- Ohemeng, E. A. e P. P.-K. Yalley (2013) Models for Predicting the Density and Compressive Strength of Rubberized Concrete Pavement Blocks. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 656-661. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.080.
- Pacheco-Torgal, F.; Y. Ding e S. Jalali (2012) Properties and Durability of Concrete Containing Polymeric Wastes (Tyre Rubber and Polyethylene Terephthalate Bottles): an Overview. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 714-724. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047.
- Panda, B. C. e A. K. Ghosh (2002) Structural Behavior of Concrete Block Paving. II: Concrete Blocks. *Journal of Transportation Engineering*, v. 128, n. 2, p. 130-135. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:2(130).
- Pires, G. W. M. O. (2015) *Avaliação de Blocos Intertravados Manufaturados com Concreto Dosado com Resíduos de PET como Alternativa Sustentável na Construção Civil*. 113 p. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Sustentabilidade) – Universidade Nove de Julho, São Paulo.
- Prefeitura de Valinhos (2010) *Estrada da Boiada fica Interditada para Obras até o Dia 25*. Notícias, 06 dez. 2010. Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20190223211715/http://www.valinhos.sp.gov.br/noticias/estrada-da-boiada-fica-interditada-para-obras-ate-dia-25>>. Acesso em: 23 fev. 2019.
- Rada, G. R.; D. R. Smith; J. S. Miller e M. W. Witczak (1990) Structural Design of Concrete Block Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, v. 116, n. 5, p. 615-635. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1990)116:5(615).
- Rahmani, E.; M. Dehestani; M. H. A. Beygi; H. Allayari e I. M. Nikbin (2013) On the Mechanical Properties of Concrete Containing Waste PET Particles. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 1302-1308. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041.
- Rollings, R. S. (1983) *Concrete Block Pavements*. Technical Report No. GL-83-3. US Army Engineering Waterways Experiment Station Geotechnical Laboratory, Vicksburg.
- Saikia, N. e J. De Brito (2013) Waste Polyethylene Terephthalate as an Aggregate in Concrete. *Materials Research*, v. 16, n. 2, p. 341-350. doi: 10.1590/S1516-14392013005000017.
- Shackel, B. (1980) The Performance of Interlocking Block Pavements under Accelerated Trafficking. *Proceedings of the 1st International Conference on Concrete Block Paving*, Conc Publishing Co., London, p. 113-120.
- Sharma, R. e P. P. Bansal (2016) Use of Different Forms of Waste Plastic in Concrete – a Review. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, n. 1, p. 473-482. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.042.
- Thorneycroft, J.; J. Orr; P. Savoikar e R. J. Ball (2018) Performance of Structural Concrete with Recycled Plastic Waste as a Partial Replacement for Sand. *Construction and Building Materials*, v. 161, p. 63-69. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127.
- Vuolo, J. H. (1996) *Fundamentos da Teoria de Erros* (2ª ed.). Ed. Edgard Blücher, São Paulo.

Filipe Derkacz Lazzeris (filipe.lazzeris@gmail.com)

Hugo Alionço (hugoalionco@gmail.com)

Thiago Roberto S. Duarte (thiagoroberto95@gmail.com)

Matheus David I. Domingos (matheusdomingos@utfpr.edu.br)

Wellington Mazer (wmazer@utfpr.edu.br)

Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000, Ecoville – Curitiba, PR, Brasil.

Daniane Franciesca Vicentini (vicentini@ufpr.br)

Departamento de Transportes, Universidade Federal do Paraná.

Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100, Jardim das Américas – Curitiba, PR, Brasil.