

## Dosagem de concreto de alta resistência e análise microestrutural de blocos para pavimentação intertravada

### Dosage of high-strength concrete and imaging analysis of interlocking concrete paving blocks

Allan de Oliveira Gomes<sup>1</sup>, Matheus David Inocente Domingos<sup>2</sup>

#### RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo principal uma análise de viabilidade técnica da produção de *pavers* destinados a vias com tráfego pesado e contendo Resíduos de Construção e Demolição (RCD). A dosagem do concreto sem RCD (*T0*) observou os protocolos gerais da *American Concrete Institute* para concretos secos. No caso do concreto com 10% de RCD (*T1*), este resíduo substituiu parte da areia média no traço original. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e, posteriormente, estes resultados foram comparados com análises de imagens feitas nas seções transversais centrais dos *pavers*. Um algoritmo em linguagem Python foi desenvolvido para quantificar as partículas de agregados com intertravamento e calcular o parâmetro de intertravamento correspondente ( $P_{INT}$ ). Observou-se uma excelente correlação entre as resistências características à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ) e  $P_{INT}$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise microestrutural, blocos intertravados de concreto, resíduos de construção e demolição, resistência à compressão.

#### ABSTRACT

The present study mainly discusses the technical feasibility of the production of Concrete Paving Blocks (CBPs) with Construction and Demolition Waste (CDW) and subjected to heavy traffic volumes. The dosage of the concrete without CDW (*T1*) typically followed the procedures set by the American Concrete Institute for no-slump concrete. In terms of the concrete with 10% of CDW (*T1*), this residue replaced part of the medium sand in the original proportion. Compressive strength tests were performed and, later, these results were compared with imaging analysis of the central cross sections of the CBPs. A Python algorithm was developed to quantify the interlocked particles and calculate the corresponding interlocking parameter ( $P_{INT}$ ). A strong correlation between  $P_{INT}$  and the characteristic compressive strength of the concrete ( $f_{ck}$ ) was found.

**KEYWORDS:** Microstructural analysis, interlocking concrete blocks, construction and demolition waste, compressive strength.

## INTRODUÇÃO

Vias pavimentadas têm sido cada vez mais presentes no mundo moderno e em franco processo de urbanização. As frotas de veículos nas cidades tendem a crescer cada vez mais, o que sobrecarrega as estruturas dos pavimentos destas vias. Além disso, a pavimentação tem por objetivos o fornecimento de conforto e comodidade aos seus usuários e redução dos custos e do tempo total de viagem, dentre outros (Senço, 2001).

Como uma alternativa sustentável ao uso de um produto não renovável (asfalto) na pavimentação urbana e rodoviária, é possível revestir as vias com uma camada de Blocos

<sup>1</sup> Bolsista do(a) UTFPR. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: [allanoliveiragomes@alunos.utfpr.edu.br](mailto:allanoliveiragomes@alunos.utfpr.edu.br). ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1306059324183737>.

<sup>2</sup> Docente no Curso de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: [matheusdomingos@utfpr.edu.br](mailto:matheusdomingos@utfpr.edu.br). ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2548362208678719>.

Intertravados de Concreto (BICs), também chamados de *pavers*. Os *pavers* têm origem na Mesopotâmia, há mais de 7.000 anos atrás. Todavia, a tecnologia atualmente utilizada e mais conhecida no mundo tem seu pioneirismo na Alemanha (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2016). Esta tecnologia espalhou-se pela Europa e chegou aos Estados Unidos em meados da década de 1970, e seu uso no continente europeu perdura por mais de 50 anos (Abate, 1993; Rada et al., 1990).

Marchioni e Silva (2011) apontam que a pavimentação intertravada tem vantagens em relação à pavimentação asfáltica convencional, sobretudo no que se refere à maior capacidade de drenagem, à retirada de resíduos da água e à viabilidade técnica para vias com baixo ou médio volume de tráfego. Apesar destas vantagens, registros do uso de BICs em vias urbanas brasileiras ainda são restritas a poucos casos (Kuchta, 2017). Portanto, é possível que exista uma demanda reprimida no mercado nacional quanto ao uso de BICs, ainda muito limitado à pavimentação de locais sem tráfego de veículos, como é o caso das ciclovias (Moreira et al., 2014).

Além destas vantagens, os *pavers* também podem contribuir quanto ao uso de Resíduos de Construção e Demolição (RCDs). A presença dos RCDs na dosagem do concreto reduz a quantidade de material descartado indevidamente, fornecendo condições sustentáveis para o futuro da construção civil (Silva et al., 2020). Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo principal a avaliação da viabilidade técnica da produção de BICs com alta resistência à compressão – valores característicos de resistência ( $f_{ck}$ ) iguais ou superiores a 50 MPa – e um percentual fixo de 10% de RCD na dosagem do concreto.

## METODOLOGIA

Inicialmente, foram feitos ensaios para caracterização dos materiais constituintes do concreto. Os agregados foram avaliados quanto aos seguintes ensaios: massas específicas do agregado miúdo e do agregado graúdo (ABNT, 2009a, 2009b), massas unitárias do agregado miúdo e do agregado graúdo (ABNT, 2006) e abrasão Los Angeles (ABNT, 2001). A dosagem foi feita de modo a obter o maior grau possível de intertravamento das partículas, além de minimizar os vazios e reduzir o consumo de cimento. O modelo de empacotamento Alfred, destacado na Equação (1), é capaz de atender melhor a tais requisitos em comparação a outros modelos (Sotomaior, 2017), tendo sido utilizado neste trabalho em conjunto com os limites da faixa granulométrica “C” do DNIT (2006). Considerando que a resistência característica à compressão desejada após 28 dias de cura ( $f_{ck}$ ) é de 50 MPa, foram selecionados métodos de dosagem prescritos pela *American Concrete Institute* (ACI, 2002) para concretos secos, com ajustes provenientes da Associação Brasileira de Cimento Portland.

$$CPTF = 100 \times \left( \frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (1)$$

Onde:

$CPTF$  = Porcentagem passante;

$D$  = Diâmetro da partícula;

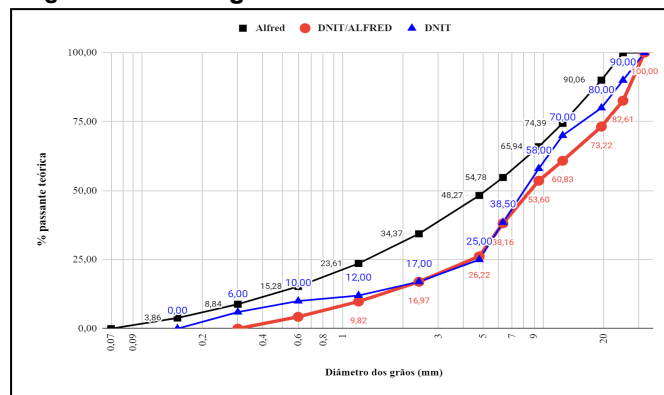
$q$  = módulo de distribuição, sendo utilizado o valor de 0,37;  
 $D_s$  = Diâmetro da menor partícula do sistema; e  
 $D_L$  = Diâmetro da maior partícula do sistema.

Após imersão em banho-maria, os corpos de prova sem RCD ( $T_0$ ) e com 10% de RCD ( $T_1$ ) foram ensaiados em uma prensa da marca EmiC, modelo DN30000N, e após 28 dias de cura. Os cálculos dos valores das resistências características à compressão ( $f_{ck}$ ) seguiram os protocolos da ABNT (2013). Para fins comparativos, foi feita uma análise microestrutural das seções transversais dos BICs referentes a cada um dos traços  $T_0$  e  $T_1$ , valendo-se de um *software* em linguagem Python. O processo de cálculo do parâmetro de intertravamento ( $P_{INT}$ ) seguiu a lógica estabelecida por Polaczyk et al. (2022).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 a seguir mostra a curva granulométrica final e calculada segundo o método de empacotamento Alfred, observando também os limites estipulados pelo DNIT (2006) para a faixa granulométrica “C”. Isto foi feito porque, quando analisados de forma isolada, nem a curva do agregado graúdo e tampouco as curvas do agregado miúdo e do RCD atenderam aos requisitos normativos para uso em concretos de cimento Portland.

Figura 1 – Curva granulométrica do concreto final



Fonte: Os autores (2023)

Os cálculos sugeriram o traço 1 : 2,37 : 2,10 : 0,45 para obtenção de uma resistência característica à compressão de 50 MPa após 28 dias de cura. Neste sentido, foram definidos os quantitativos de materiais elencados na Tabela 1 para produção de aproximadamente 60 kg de concreto, por traço (com e sem 10% de RCD).

Tabela 1 – Quantitativos de materiais para produção de 60 kg de concreto e por traço

traço e teor de RCD (%)	quantitativos em massa (kg)								RCD	aditivo	TOTAL
	água	CP-V ARI	agregado miúdo fino	agregado miúdo médio	brita 9,5 mm	brita 6,3 mm	brita 4,8 mm				
$T_0$ (0,0)	4,55	10	7,55	16,03	6,78	8,96	5,21	-	-	59,08	
$T_1$ (10%)	4,55	10	7,55	14,47	6,78	8,96	5,21	1,603	0,025	59,148	

Fonte: Os autores (2023).

A Tabela 2 mostra os resultados individuais de resistência à compressão ( $f_{ci}$ ) dos corpos de prova, bem como as resistências características à compressão ( $f_{ck}$ ) correspondentes. Apesar das baixas variabilidades nos resultados, nenhum dos traços atingiu o valor desejado de  $f_{ck} = 50$  MPa. Isto pode ser atribuído à produção manual dos corpos de prova, dificultando assim um controle mais aprimorado do processo de produção. Outras possíveis causas incluem as limitações de resistência da areia de britagem e os quantitativos de agregado graúdo no traço (Pirola, 2011).

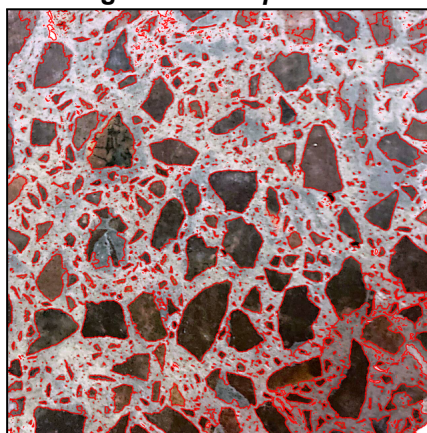
**Tabela 2 – Resistências individuais ( $f_{ci}$ ) e características à compressão ( $f_{ck}$ ) aos 28 dias de cura**

traço	$f_{ci}$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)	desvio padrão (MPa)	coeficiente de variação (%)
<b>T0</b>	39,2 a 48,9	44,03	3,49	7,93
<b>T1</b>	20,9 a 43,9	28,20	8,38	29,72

Fonte: Os autores (2023).

Para fins de comparação com os dados de  $f_{ck}$ , os CPs preparados com os traços T0 e T1 tiveram suas seções transversais serradas e escaneadas em computador. Um *software* em linguagem Python foi utilizado para identificar todas as partículas de agregados e quantificar aquelas que possuem intertravamento entre si – ou seja, contato físico com outras partículas vizinhas. A Figura 2 exemplifica a aplicação do *software* em uma seção transversal de um *paver* moldado com o concreto padrão (T0). A razão entre este quantitativo e o total de partículas é designada como parâmetro de intertravamento ( $P_{INT}$ ). Os valores de  $P_{INT}$  são reportados na Tabela 3, por traço.

**Figura 2 – Análise de imagens em um *paver* moldado com o traço T0**



Fonte: Os autores (2023).

**Tabela 3 – Quantitativos de partículas na matriz do concreto e por traço**

traço	teor de RCD (%)	partículas livres	partículas intertravadas (PI)	partículas totais (PT)	parâmetro de intertravamento $P_{INT}$ (PI/PT)
<b>T0</b>	0,0	337	201	538	0,37
<b>T1</b>	10,0	225	67	292	0,22

Fonte: Os autores (2023).

É possível observar que, além de um maior quantitativo de vazios, o traço  $T1$  também possui menos partículas com intertravamento em relação ao traço original  $T0$ . Isto se reflete no resultado mais baixo de  $f_{ck}$  para o material com 10% de RCD (28,2 MPa) em relação ao concreto padrão (44,03 MPa). Tal redução de 35,95% para  $f_{ck}$  é praticamente similar à redução observada em  $P_{INT}$  ao se passar do traço  $T0$  para o traço  $T1$  (40,5%). A literatura corrobora estas constatações ao afirmar que o intertravamento permite uma transferência de cargas entre as partículas e, conseqüentemente, uma maior resistência ao carregamento (Sefidmazgi et al., 2012).

## CONCLUSÃO

O concreto sem adição de RCD atingiu  $f_{ck} \approx 44$  MPa, portanto pouco inferior ao valor mínimo desejado de 50 MPa. Isto pode ser atribuído a fatores como a produção manual do concreto e as limitações de resistência da areia de britagem. Além disso, a incorporação de 10% de RCD reduziu a resistência mecânica do concreto após 28 dias de cura. Tal redução pode ser explicada pelo aumento do teor de vazios na matriz do concreto e à redução expressiva no número de partículas com intertravamento entre si.

A técnica de análise de imagens adotada no estudo mostrou-se promissora, uma vez que houve forte correlação entre o parâmetro de intertravamento  $P_{INT}$  e  $f_{ck}$ . Enquanto que a redução em  $f_{ck}$  foi de aproximadamente 36% após a adição do RCD, o parâmetro  $P_{INT}$  reduziu em aproximadamente 41%. Em termos práticos, sugere-se o uso do *paver* com RCD em vias com tráfego leve ( $f_{ck} \geq 35$  MPa) após adequações no traço ou reduções no teor de RCD, ou mesmo ambas as medidas.

## Agradecimentos

A Deus por ter dado discernimento para a realização deste trabalho, à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela oportunidade de desenvolver conhecimento nessa área e por oferecer a bolsa para a pesquisa, e à Pedreira Guaricana pelo fornecimento dos agregados analisados no estudo.

## Disponibilidade de código

O *software* desenvolvido para a análise microestrutural se encontra disponível no GitHub do autor, cujo link é <https://github.com/allanogomes/Analise-Microestrutural>.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

ABATE, M. K. **Concrete paving blocks: an overview**. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – University of Washington, Washington (DC), 1993.

ABNT. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação: especificação e métodos de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. **NBR NM 45**: Agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – ensaio de abrasão Los Angeles. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2001.

ABNT. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – determinação de massa específica e massa específica aparente. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2009a.

ABNT. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2009b.

ACI. **Guide for selecting proportions for no-slump concrete**. Report No. ACI 21.3R-02. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de pavimento intertravado**. São Paulo, 2016.

DNIT. **DNIT 031**: Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2006.

KUCHTA, W. C. S. **Análise comparativa da influência de resíduos de PET refrigerante e PET óleo na resistência à compressão de blocos alternativos de concreto para pavimentação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva, Itapeva, 2017.

MARCHIONI, M; SILVA, C. O. **Pavimento intertravado permeável: melhores práticas**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2011.

MOREIRA, J. F.; FIDELIS, V. R. P.; DIAS, J. F. Concreto com borracha de pneus aplicado em ciclovias. **Holos Environment**, v. 14, n. 2, p. 185-197, 2014.

PIROLA, F. C. **Contribuição para o estudo de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação de 50MPa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

POLACZYK, P; MA, Y; JARRAR, Z; JIANG, X; XIAO, R; HUANG, B. Quantification of asphalt mixture interlocking utilizing 2D and 3D image processing. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 35, n. 1, p. 1-10, 2022.

RADA, G. R.; SMITH, D. R.; MILLER, J. S.; WITCZAK, M. W. Structural design of concrete block pavements. **Journal of Transportation Engineering**, v. 116, n. 5, p. 615-635, 1990.

SEFIDMAZGI, N. R.; TASHMAN, L.; BAHIA, H. U. Internal structure characterization of asphalt mixtures for rutting performance using imaging analysis. **Road Materials and Pavement Design**, v. 13, n. S1, p. 21-37, 2012.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2001. v. 1.

SILVA, G; RIBEIRO, C; RIBEIRO, S; OLIVEIRA, D; OLIVEIRA, W; ALMEIDA, M. Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, vol. 6, n. 7, p. 46883-46896, 2020.

SOTOMAIOR, M. J. **Estudo de modelos de empacotamento de agregados para concretos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.