

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FILIFE DERKACZ LAZZERIS
HUGO ALIONÇO
THIAGO ROBERTO SCHUERTEES DUARTE

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE
CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM UMA BLENDA DE PE+PET PARA
USO EM PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2019

FILIPPE DERKACZ LAZZERIS
HUGO ALIONÇO
THIAGO ROBERTO SCHUERTEES DUARTE

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE
CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM UMA BLENDA DE PE+PET PARA
USO EM PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso Superior de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba, sede Ecoville, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Matheus David Inocente Domingos

CURITIBA

2019



Ministério da Educação

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Campus Curitiba – Sede Ecoville

Departamento Acadêmico de Construção Civil

Curso de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA COM UMA BLENDA DE PE+PET PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO INTERTRAVADA

Por

**FILIPE DERKACZ LAZZERIS
HUGO ALIONÇO
THIAGO ROBERTO SCHUERTEZ DUARTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no primeiro semestre de 2019 e aprovado pela seguinte banca de avaliação presente:

Orientador – Prof. Matheus David Inocente Domingos, Dr.
UTFPR

Prof. Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Profa. Daniane Franciesca Vicentini, Dra.
UFPR

OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Às nossas famílias pelo amparo ao longo dessa caminhada.

Ao nosso Professor Orientador Matheus David Inocente Domingos que foi a base de tudo para fazermos um bom trabalho, sempre estando presente e nos ajudando nos momentos de dificuldade.

Ao Professor Wellington Mazer e à Professora Daniane Franciesca Vicentini da banca por avaliar nosso trabalho, ajudando nas correções, além de sanar várias dúvidas e nos nortear para o caminho correto.

À Profa. Juliana Regina Kloss pela obtenção da densidade do PE+PET, à Profa. Amanda Dalla Rosa Johann pelo auxílio na caracterização dos agregados e aos técnicos de laboratório Felipe Perretto e Paulo Sabino pelo auxílio na preparação dos *pavers* e na condução dos ensaios de resistência à compressão.

À empresa Plaskaper (Fazenda Rio Grande-PR) pela blenda de PE+PET fornecida para a realização da pesquisa.

À empresa Briforte (Curitiba-PR), pelos agregados de gnaisse utilizados na confecção dos corpos de prova.

Ao grupo de trabalho pelo esforço e dedicação ao longo de todo o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

LAZZERIS, F. D.; ALIONÇO, H; DUARTE, T. R. S. **Estudo de viabilidade técnica da produção de blocos de concreto de alta resistência com uma blenda de PE+PET para uso em pavimentação intertravada.** 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

Diferentemente de países estrangeiros como a África do Sul, a pavimentação de vias urbanas e rodovias com blocos de concreto (ou *pavers*) no Brasil ainda tem uma aplicação limitada, o que pode ser explicado por fatores como a falta de dados técnicos confiáveis sobre o desempenho destes pavimentos e questões culturais. Um dos principais problemas de pesquisa reside na identificação dos quantitativos e dos tipos de plásticos mais apropriados para uso em concretos de alta resistência, uma vez que os resíduos plásticos geralmente acarretam reduções na resistência do concreto à compressão (f_{pk}) e a presença destes materiais alternativos pode inviabilizar o emprego dos *pavers* em vias com tráfegos leve (f_{pk} mínimo de 35 MPa) e pesado (f_{pk} mínimo de 50 MPa). No intuito de sanar tais questões e fomentar a reciclagem de plásticos e a construção de pavimentos com blocos de concreto, o presente estudo avaliou a viabilidade técnica da adição de uma blenda de PE+PET processada industrialmente e em teores iguais a 1, 2, 3, 4, 5 e 10% em volume (traços $T1$, $T2$, $T3$, $T4$, $T5$ e $T6$, respectivamente) no traço de um concreto padrão $T0$, em substituição à parte da fração miúda dos agregados. A dosagem do traço $T0$ foi feita segundo protocolos de normas norte-americanas, e os ensaios básicos definidos pela norma brasileira NBR 9781 – resistência à compressão e absorção de água (Ab), ambos aos 28 dias de cura – foram conduzidos nos *pavers* de “16 faces” e categorizados como “Tipo I”. Agregados de gnaiss e com uma abrasão Los Angeles de 20,9% foram selecionados, e a blenda de PE+PET foi fornecida no formato de *pellets*. Apesar das reduções aproximadamente lineares de f_{pk} no concreto padrão com o aumento do teor de PE+PET, não houve impactos significativos nos resultados dos traços $T1$ e $T2$ (f_{pk} diminuiu de 44 para 39 MPa, em valores arredondados), o que viabilizaria a sua aplicação em pavimentos com tráfego leve ($f_{pk} \geq 35$ MPa segundo a NBR 9781). No caso da absorção de água, todos os resultados de Ab estão situados abaixo do limite máximo de 6% e sugerem que os traços seriam capazes de suportar ciclos de gelo-degelo sem causar danos à resistência do concreto. Ainda, a presença do PE+PET não causou incrementos ou reduções expressivas de Ab porque todos os valores oscilaram entre 2,1 e 3,2% para os traços considerados. Desta maneira, verifica-se que o uso de agregados plásticos em blocos de concreto para pavimentação é tecnicamente viável, desde que o tipo adequado de plástico seja escolhido e os teores sejam compatíveis com as resistências mínimas requeridas para o concreto.

Palavras-chave: Blocos de concreto, pavimentação intertravada, agregados plásticos, resistência à compressão, absorção de água.

ABSTRACT

LAZZERIS, F. D.; ALIONÇO, H; DUARTE, T. R. S. **Study of the technical feasibility of the production of highly-resistant concrete paving blocks with a PE+PET blend for application on interlocking concrete block pavements.** 69 p. Undergraduate Thesis (Bachelor Degree in Civil Engineering) – Academic Department of Civil Construction, Federal University of Technology-Paraná, Curitiba, 2019.

Differently from foreign countries such as South Africa, the applications of Concrete Paving Blocks (CBP's) on urban streets and rural roads are still fairly limited. This may be attributed to the lack of reliable technical data about the performance of such blocks as wearing surfaces of pavements, as well as cultural aspects. One of the most critical problems of research is the identification of the most appropriate amounts and types of plastics for use on highly-resistant concretes, since these plastics typically lead to reductions in the compressive strength of the concrete (f_{pk}) and their presence may avoid the application of CBP's on pavements subjected to light traffic (minimum f_{pk} of 35 MPa) and heavy traffic (minimum f_{pk} of 50 MPa). In an attempt to solve such issues and encourage the recycling of plastics and the construction of pavements with CBP's, the present investigation aimed at evaluating the technical feasibility of the addition of an industrially processed PE+PET blend on an ordinary Portland cement concrete trace $T0$ and at contents equal to 1, 2, 3, 4, 5 and 10% by volume ($T1$, $T2$, $T3$, $T4$, $T5$ and $T6$ traces, respectively). This replacement was made on the fine fraction of the aggregates, and the dosage of the trace $T0$ was made according to American standards. The basic laboratory tests performed on the CBP's and established by the Brazilian NBR 9781 standard included the compressive strength and the water absorption (Ab), both after 28 days of curing. The CBP's are classified as "Type I" and "16-faces" according to this same standard. Gnaiss aggregates and with a Los Angeles abrasion of 20.9% were selected, and the PE+PET blend was provided as *pellets*. Despite the approximately linear reductions in f_{pk} with increasing PE+PET content, there were no great impacts on the outcomes of the $T1$ and $T2$ traces (f_{pk} decreased from about 44 MPa to 39 MPa), and this could allow their use on pavements subjected to light traffic. With respect to the water absorption, all the results of Ab are placed below the maximum limit of 6%, and they suggest that the CBP's would be able to deal with freezing-thawing cycles without causing significant damage to the resistance of the concrete. In addition, the presence of PE+PET did not cause marked increases or decreases in Ab because the results varied from 2.1 to 3.2% for all the traces studied here. Therefore, it can be observed that the use of plastic aggregates on CBP's is technically feasible, provided that the correct type of plastic is selected and its contents be compatible with the minimum required resistances for the concrete.

Keywords: Concrete blocks, interlocking concrete pavements, plastic aggregates, compressive strength, water absorption.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Tipos de pavimentos em Curitiba no ano de 2012	11
Tabela 2 –	Faixas granulométricas recomendadas para a areia da camada de assentamento do pavimento intertravado	27
Tabela 3 –	Traços inicial (Traço 1) e corrigido (Traço 2) da pesquisa de Eich et al. (2016) e seus respectivos valores característicos de resistência à compressão ($f_{pk,est}$)	29
Tabela 4 –	Resistências à compressão obtidas segundo os métodos do “IPT/EPUSP Modificado” e o proposto por Mehta e Aitcin (1990) para três níveis de resistência e três tempos de cura ..	31
Tabela 5 –	Uma revisão de literatura sobre os teores de PET utilizados na modificação do concreto (% em volume) e as frações granulométricas correspondentes que foram substituídas pelo PET	37
Tabela 6 –	Dados técnicos dos agregados (frações graúda e miúda) e do cimento Portland utilizados na fabricação dos <i>pavers</i>	42
Tabela 7 –	Fatores de correção (p) da resistência dos blocos de concreto à compressão em função da sua espessura	43
Tabela 8 –	Valores do coeficiente t de Student em função do número de amostras no conjunto ensaiado (n)	44
Tabela 9 –	Matriz dos quantitativos de ensaios com os blocos de concreto do “Tipo I” e segundo as recomendações mínimas da norma NBR 9781	47
Tabela 10 –	Quantitativos detalhados de materiais para os traços com e sem PE+PET	52
Tabela 11 –	Intervalos de valores individuais (f_{pi}) e valores médios ($f_{pk,med}$) e característicos ($f_{pk,est}$) de resistências à compressão dos blocos segundo a norma NBR 9781	54
Tabela 12 –	Novos intervalos de resultados individuais (f_{pi}) e médios ($f_{pk,med}$) de resistências à compressão dos <i>pavers</i> após eliminação dos dados espúrios.....	57
Tabela 13 –	Intervalos de resultados individuais (Ab_i) e médios (Ab) para as taxas de absorção de água dos <i>pavers</i> estudados, em função do teor de PE+PET	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Esquema dos principais tipos de intertravamento em pavimentos com blocos de concreto: (a) vertical; (b) horizontal; e (c) giração	17
Figura 2 –	Exemplos de blocos dos Tipos 1, 2 e 3 e seus respectivos assentamentos	18
Figura 3 –	Formatos dos blocos utilizados no estudo de Panda e Ghosh (2002), localizações das suas dimensões de comprimento (L) e largura (W) e classificações sugeridas	19
Figura 4 –	Esquemas de assentamento dos blocos de concreto em pavimentos intertravados: (a) espinha-de-peixe a 45°; (b) espinha-de-peixe a 90°; (c) fileira; e (d) trama	20
Figura 5 –	Pavimentação intertravada na rodovia Visconde de Porto Seguro (SP-332), entre as cidades de Valinhos e Campinas (SP)	22
Figura 6 –	Rodovia em Qwa Qwa (África do Sul) dotada de revestimento intertravado	23
Figura 7 –	Exemplo de composição da estrutura de um pavimento intertravado	24
Figura 8 –	Detalhamentos das curvas granulométricas das frações graúda e miúda dos agregados estudados e seus respectivos limites superior e inferior para cada peneira	41
Figura 9 –	Exemplo de <i>paver</i> rompido e com superfície regularizada	43
Figura 10 –	Dimensões dos <i>pavers</i> de 16 faces preparados no estudo	44
Figura 11 –	Fator água/cimento inicial em função dos parâmetros de entrada	48
Figura 12 –	Estimativa do consumo de água por m^3 em função dos parâmetros de entrada	49
Figura 13 –	Teor de ar incorporado em função dos parâmetros de entrada	49
Figura 14 –	Obtenção do consumo de agregado graúdo por unidade volumétrica de concreto	50
Figura 15 –	Fator de correção do consumo de agregado graúdo por unidade volumétrica de concreto	51
Figura 16 –	Resistências dos corpos de prova cilíndricos de concreto à compressão aos sete dias de cura e preparados com o traço padrão $T0$	53
Figura 17 –	Correlações lineares entre as resistências médias ($f_{pk,med}$) e características ($f_{pk,est}$) à compressão dos blocos e o teor de PE+PET, com e sem a eliminação de dados espúrios	55
Figura 18 –	Amostra de <i>paver</i> e visualização da sua textura superficial	56

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	massa específica do cimento
a/c	fator ou relação água-cimento
Ab	taxa de absorção de água (valor médio)
Ab_i	taxa individual de absorção de água
C	consumo de cimento por m^3 de concreto
C_a	consumo de água por m^3 de concreto
CV	coeficiente de variação
CBR	Índice de Suporte Califórnia
D_m	diâmetro máximo nominal do agregado
f_p	resistência média à compressão para um conjunto de amostras de <i>pavers</i>
f_{pi}	resistência individual do <i>paver</i> à compressão
$f_{pk,est}$	resistência característica à compressão do concreto
$f_{pk,med}$	resistência média à compressão do concreto
L	comprimento do bloco (PANDA e GHOSH, 2002)
m_1	massa do <i>paver</i> na condição seca
m_2	massa do <i>paver</i> na condição saturada
M_F	módulo de finura da areia
M_R	módulo de resiliência
N	número de solicitações equivalentes de eixo-padrão simples
n	número de amostras no conjunto de <i>pavers</i> para um mesmo traço
ρ	fator da resistência à compressão em função da espessura do <i>paver</i>
R^2	coeficiente de correlação ou de determinação
s	desvio-padrão das resistências à compressão
t	coeficiente de Student
T_0	traço do concreto padrão (ou seja, sem PE+PET)
T_1	traço do concreto com 1% de PE+PET
T_2	traço do concreto com 2% de PE+PET
T_3	traço do concreto com 3% de PE+PET
T_4	traço do concreto com 4% de PE+PET
T_5	traço do concreto com 5% de PE+PET
T_6	traço do concreto com 10% de PE+PET
W	largura do bloco (PANDA e GHOSH, 2002)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	14
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.	BREVE HISTÓRICO E APLICAÇÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS	21
2.2.	ESTRUTURA E ESPECIFICAÇÕES DO PAVIMENTO INTERTRAVADO	24
2.3.	CRITÉRIOS DE DOSAGEM DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA	28
2.4.	USO DE PLÁSTICOS EM BLOCOS DE CONCRETO	31
2.4.1.	<i>Conceituações Básicas e Formas de Utilização</i>	31
2.4.2.	<i>Adição de Plásticos ao Concreto nos Estados Fresco e Endurecido</i>	34
2.4.3.	<i>Comentários Finais</i>	37
3.	METODOLOGIA	39
3.1.	AGREGADOS E RESPECTIVOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	39
3.1.1.	<i>Granulometria</i>	40
3.1.2.	<i>Massas Específicas e Taxas de Absorção de Água</i>	41
3.2.	BLOCOS DE CONCRETO E SEUS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	42
3.2.1.	<i>Resistência Característica à Compressão</i>	42
3.2.2.	<i>Absorção de Água</i>	45
3.2.3.	<i>Quantitativos de Corpos de Prova e Especificações do PE+PET</i>	46
3.3.	DOSAGENS DOS CONCRETOS COM E SEM PE+PET	47
4.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
4.1.	RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO	54
4.2.	TAXAS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	58
5.	PRINCIPAIS CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS	60
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

A pavimentação é um componente primordial da infraestrutura viária urbana, sendo o pavimento uma estrutura em camadas construída sobre a plataforma final de terraplenagem e destinada a resistir aos esforços oriundos das cargas dos veículos, melhorar as condições de segurança e conforto ao rolamento e reduzir os custos do transporte por meio da diminuição das operações de manutenção dos veículos, dentre outros benefícios (BERNUCCI et al., 2006). Em termos numéricos, a operação de um veículo de transporte em uma via não pavimentada acarreta em custos globais aproximadamente 56% maiores se comparados ao mesmo veículo trafegando em uma via pavimentada, conforme mostrado em uma revisão feita por Reis (2014). Desta maneira, pode-se dizer que uma via pavimentada proporciona economias em todas as variáveis diretamente associadas aos custos do transporte, a saber: manutenção, tempo de viagem, combustível e operação.

Com a urbanização em processo contínuo de crescimento, surge a necessidade cada vez maior de fornecer aos cidadãos o conjunto básico de infraestrutura, o que inclui a pavimentação de ruas e avenidas. Os pavimentos asfálticos e de concreto de cimento Portland são os mais comumente encontrados nas cidades brasileiras, ainda que algumas destas cidades também possuam vias com formas mais antigas de pavimentação como os paralelepípedos e as pedras irregulares. Conforme mostrado na Tabela 1, a cidade de Curitiba (PR) não difere significativamente de outras cidades do Brasil em termos da predominância de pavimentos asfálticos (mais de 30% do total) sobre outros como concreto, paralelepípedos e pedras irregulares (de 1 a 2% do total).

Tabela 1 – Tipos de pavimentos em Curitiba no ano de 2012

tipo de pavimento	extensão (km)	porcentagem do total (%)
anti-pó (pavimento alternativo)	2.757.539	60,92
asfalto	1.381.314	30,51
blocos de concreto	2.220	0,05
calçadão	3.314	0,07
concreto	32.911	0,73
paralelepípedo	27.434	0,61
pedra irregular	532	0,01
saibro	321.463	7,10

Fonte: Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (2012)

De modo particular, observa-se ainda na Tabela 1 que a grande maioria das vias de Curitiba (quase 61% do total) é revestida com “anti-pó”, um tipo de tratamento superficial que resulta em um revestimento asfáltico delgado – aproximadamente igual a 4,0 mm – aplicado sobre uma base imprimada, com o objetivo de evitar a propagação do pó (material fino). Neste aspecto, cidades paranaenses como Curitiba e São José dos Pinhais aplicaram a técnica do “anti-pó” em vias de baixo volume de tráfego, com o objetivo de reduzir os custos das obras. Estudos sobre este tipo de revestimento vêm sendo conduzidos desde 1995 pela Petrobras, e a técnica é aplicada nas vias de São José dos Pinhais desde 1996 (CASTRO, 2003). No caso de Curitiba, há relatos de que seu uso disseminado teve início a partir dos anos 1970, mas nos últimos anos deixou de ser adotado na pavimentação de novas ruas devido à necessidade de manutenção excessiva (SILVEIRA, 2007).

Uma alternativa ao “anti-pó” é a pavimentação das vias com blocos de concreto pré-moldados, também conhecidos como *pavers*. Estes blocos já tinham uso mais difundido em pavimentos europeus e norte-americanos no início do século XX e, em meados da década de 1950, passou a ter emprego no Brasil de forma experimental em trechos de ruas da cidade de São Paulo (SP), com utilização mais intensificada a partir de 1952 (SENÇO, 2001). Apesar de a sua execução ser simples e não demandar mão de obra qualificada em comparação ao revestimento asfáltico convencional, a aplicação dos *pavers* ainda é restrita a vias urbanas de baixo tráfego e enfrenta muita resistência cultural e de falta de informações técnicas corretas por parte de governantes e das populações locais, segundo um levantamento feito por Nabeshima et al. (2011) em 24 cidades de médio e grande porte em diversas regiões do Brasil.

De uma forma simplificada, os *pavers* podem ser definidos como peças pré-moldadas de concreto assentadas sobre uma camada de areia e “travadas” por contenção lateral. Esta contenção ou “intertravamento” dos blocos impedem os movimentos individuais de deslocamento, sejam eles horizontais, verticais ou de rotação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010). O uso dos *pavers* acarreta diversas vantagens como a menor necessidade de manutenção, maior reflexão da luz devido às suas cores claras em relação ao pavimento asfáltico convencional (o que acarreta menor consumo de iluminação pública), variedades de formatos para os blocos e um alto índice de reutilização, podendo atingir os 95% em alguns casos (CARVALHO, 1998). As principais aplicações dos *pavers* têm sido em calçadas e áreas de estacionamento e de lazer, ou seja, vias com solicitações baixas

de cargas do tráfego ou apenas de pessoas. No entanto, ruas de centros urbanos como Blumenau-SC (FOLHA IMOBILIÁRIA, 2002) e Itararé-SP (KUCHTA, 2017) também têm sido pavimentadas com *pavers*, o que demonstra a viabilidade do uso deste tipo de pavimento em locais com maior solicitação do tráfego.

1.1. JUSTIFICATIVA

Conforme destacado anteriormente, o uso dos *pavers* em pavimentação de ruas no Brasil aparentemente ainda enfrenta grande resistência por parte de gestores públicos, especialmente por conta de fatores como falta de informações técnicas específicas e questões culturais. Quando se define a sua utilização em vias urbanas, as aplicações são tipicamente feitas em vias com baixos volumes de tráfego, apesar da existência de normas técnicas como a ABNT NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) e a Instrução de Projeto N° 06 (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2004) que autorizam o uso em vias com tráfegos mais pesados, desde que critérios mínimos sejam atendidos. Portanto, vislumbra-se que ainda há grande resistência na aplicação dos *pavers* em larga escala para fins de pavimentação.

Por outro lado, um problema enfrentado por muitos gestores urbanos é a destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos, especialmente os plásticos como o Politereftalato de Etileno (PET). Segundo dados publicados pela Associação Brasileira da Indústria do PET (2013), o consumo deste tipo de plástico cresceu mais de 124% em 11 anos – de 255.000 tons em 2000 para 572.000 tons em 2011 – e apenas 57% do total de resíduos gerados em 2011 foram reciclados. As principais destinações do PET reciclado incluem a indústria têxtil, a produção de resinas e a fabricação de embalagens. Como se pode observar, ainda há um grande campo a ser explorado no que se refere à quantidade de material reciclado e às suas possibilidades de reaproveitamento.

O uso de plásticos reciclados na modificação do concreto tem sido considerado em pesquisas científicas como Batayneh et al. (2007), Cândido et al. (2014), Kuchta (2017), Pires (2015) e Tapkire et al. (2014), os quais buscaram investigar os efeitos desta adição na resistência à compressão – principal parâmetro mecânico a ser observado nas normas técnicas brasileiras – e no abatimento do concreto, dentre outros elementos. Em linhas gerais, tais pesquisas verificaram que a adição dos plásticos ao concreto acarreta reduções na resistência à compressão do material e na

trabalhabilidade do concreto, medida por meio do ensaio de tronco de cone (*slump test*), especialmente para teores de pelo menos 20% de plásticos.

Em um primeiro momento, pode-se pensar que os plásticos somente prejudicariam a resistência à compressão do concreto e inviabilizariam o seu uso em pavimentos. No entanto, dependendo do tipo de plástico e do seu teor no concreto, é possível observar incrementos da resistência à compressão em vez de reduções. Este é o caso de pesquisas como as de Cândido et al. (2014) e Kuchta (2017), os quais verificaram que, para teores de até 15% de plásticos, o concreto apresenta aumentos de até 2,3% (CÂNDIDO et al., 2014) e 20% (KUCHTA, 2017) nesta resistência. Também é possível que, em alguns casos, a adição do plástico resulte em reduções muito pequenas na resistência do concreto à compressão, por exemplo, 2,5% de redução para um teor de 10% de plásticos na pesquisa de Tapkire et al. (2014). Conclui-se, portanto, que há viabilidade para utilização de plásticos em blocos de concreto, desde que adequadamente selecionados e que haja a substituição correta da fração do agregado no concreto.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal desta pesquisa consiste na análise da viabilidade técnica da substituição de parte da fração miúda do agregado de um concreto de alta resistência característica à compressão ($f_{pk,est}$) – valores entre 40 e 50 MPa – por plástico reciclado, mais especificamente um tipo de plástico composto por uma mistura de polietileno (PE) e PET e designado como “PE+PET”. Além da resistência à compressão, os *pavers* também serão avaliados quanto à absorção de água (Ab) segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013), de modo a verificar o aumento percentual de massa e os riscos potenciais a que estariam submetidos a condições cíclicas de gelo-degelo. Dentre os objetivos secundários do presente estudo, podem-se destacar os seguintes:

- verificar os possíveis teores em que a resistência à compressão do concreto atinge o valor mínimo de 50 MPa, o que possibilitaria o seu uso em vias de tráfego pesado;
- estimar correlações entre as propriedades de resistência do concreto final (especialmente a resistência à compressão) e de absorção de água e o teor de PE+PET na composição deste concreto, comparando-as com outras obtidas na

literatura científica para identificação de eventuais tendências de comportamento do material; e

- avaliar os problemas associados à presença do PE+PET no *paver* (se houver), tanto no que se refere a reduções na resistência à compressão quanto a incrementos na absorção de água.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A norma brasileira ABNT NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) define o termo “pavimento intertravado” como sendo um pavimento flexível – do ponto de vista de resposta estrutural global às cargas aplicadas pelos veículos – cuja estrutura é dividida em uma camada de base (ou base e sub-base) e outra de revestimento. Esta última é composta por peças de concreto assentadas uma ao lado da outra e que têm suas juntas preenchidas por material de rejuntamento, em geral uma areia fina com propriedades granulométricas pré-definidas. Tais juntas tipicamente apresentam espessuras da ordem de 3,0 mm e, para que a transferência de cargas entre os blocos ocorra de forma apropriada – e, por consequência, o pavimento tenha um desempenho superior – estas devem ser totalmente preenchidas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010; CRUZ, 2003; KNAPTON, 1996; RADA et al., 1990).

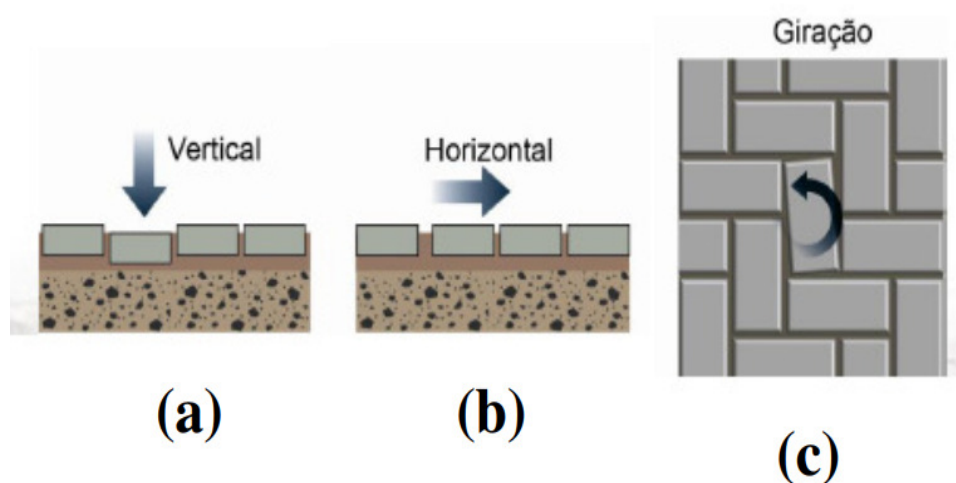
Para que o pavimento apresente boa qualidade e grande durabilidade, é indispensável que os movimentos de deslocamentos vertical, horizontal e de rotação dos *pavers* sejam impedidos, além de uma contenção lateral adequada e o preenchimento correto das juntas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010). O intertravamento vertical consiste na restrição ao deslocamento vertical por meio da resistência das camadas inferiores às cargas dos veículos, bem como a transferência de cargas de um bloco carregado para os seus circunvizinhos por meio das juntas (CRUZ, 2003; KNAPTON, 1996), vide Figura 1(a). Outra maneira de se obter este tipo de intertravamento consiste no uso de peças pré-moldadas com encaixes reentrantes e do tipo “macho-fêmea” (CRUZ, 2003).

O intertravamento horizontal consiste na impossibilidade de o *paver* deslocar-se horizontalmente em relação aos blocos vizinhos. Para que este tipo de travamento seja obtido de forma satisfatória, as juntas entre os blocos também desempenham um papel preponderante (CRUZ, 2003; KNAPTON, 1996). O formato e o arranjo do assentamento dos *pavers* contribuem igualmente para este tipo de intertravamento, sobretudo nas áreas de frenagem e aceleração devido à transmissão dos esforços horizontais. A Figura 1(b) ilustra o caso em questão aqui discutido.

O intertravamento rotacional ou de giração consiste na capacidade de um *paver* resistir à rotação em torno do seu próprio eixo e em qualquer direção, vide Figura 1(c). A aplicação de uma carga assimetricamente à peça de concreto – isto é,

em sua extremidade – tende a causar o seu giro em relação às demais. A espessura das juntas e o confinamento proporcionado pelos blocos vizinhos contribuem para a obtenção deste tipo de intertravamento. Em geral, o fenômeno de giração ocorre devido ao tráfego e aos tipos dos veículos, especialmente nas áreas de frenagem, aceleração e curvas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010; CRUZ, 2003; KNAPTON, 1996).

Figura 1 – Esquema dos principais tipos de intertravamento em pavimentos com blocos de concreto: (a) vertical; (b) horizontal; e (c) giração



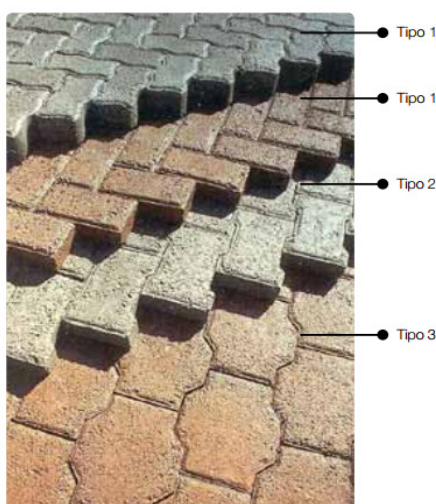
Fonte: Adaptado de SB Pavimentos (2018)

É importante destacar que as juntas entre os blocos, apesar de serem preenchidas com areia de rejuntamento nas fases finais de construção do pavimento, são devidamente seladas somente após um curto período de tempo em que a estrutura fica sujeita à ação das cargas do tráfego, assumindo a hipótese do não uso de selantes. Além da função de assentamento, a camada subjacente de areia também pode atuar no sentido de eliminar as águas que eventualmente podem ficar retidas entre os blocos e uma camada de estabilização do pavimento. Para tal, é necessária a presença de um dispositivo de saída d'água como, por exemplo, um bueiro. No entanto, deve-se tomar cuidado para evitar que esta camada de areia não seja levada juntamente com as águas e nem migre para a superfície do pavimento (RADA et al., 1990).

No que se refere aos tipos e tamanhos dos blocos, os seguintes grupos podem ser delimitados e descritos conforme abaixo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) e nos exemplos da Figura 2:

- **Tipo 1:** blocos com formatos retangulares ou próximos do retangular e com dimensões usuais de 20 cm de comprimento por 10 cm de largura, isto é, uma relação comprimento/largura igual a 2. Tais blocos podem ser arranjados entre si nos 4 lados e suas faces laterais podem ser retas, poliédricas ou curvilíneas;
- **Tipo 2:** blocos com formatos geralmente próximos aos da letra “I” e que somente podem ser assentados em fileiras travadas. Suas dimensões são, em geral, de 20 cm de comprimento por 10 cm de largura;
- **Tipo 3:** blocos com formatos característicos (por exemplo, trapézios e hexágonos) e com massas superiores a 4 kg. Suas dimensões são de no mínimo 20 × 20 cm; e
- **Tipo 4:** conjuntos de blocos com tamanhos diferentes, ou mesmo um único bloco com juntas falsas, que podem ser utilizados em vários padrões de assentamento.

Figura 2 – Exemplos de blocos dos Tipos 1, 2 e 3 e seus respectivos assentamentos

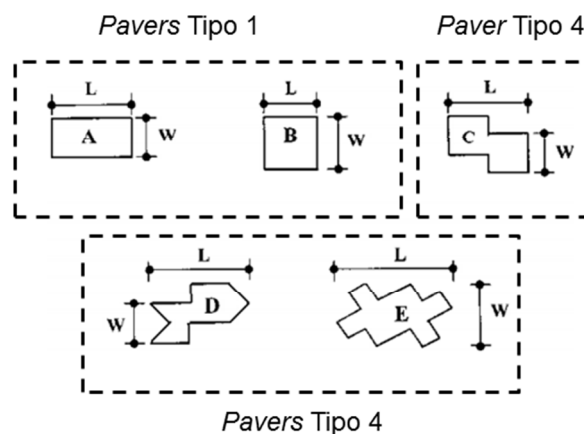


Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (2010)

Pesquisas sobre a influência dos formatos dos *pavers* no desempenho do pavimento têm sido relativamente escassas na literatura científica. Um dos trabalhos mais importantes a este respeito é o de Panda e Ghosh (2002), os quais estudaram cinco diferentes formatos de blocos (Figura 3) e os efeitos das variações em suas dimensões – comprimento L e largura W – e resistências à compressão nos dados de desempenho do pavimento intertravado. Em uma equivalência simples com a norma brasileira NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), poder-se-ia dizer que os blocos “A” e “B” correspondem ao “Tipo 1” e os blocos “C”, “D” e “E”, ao “Tipo 4”. Os blocos selecionados pelos autores foram submetidos a carregamentos estáticos com placas rígidas de 300 mm de diâmetro e cargas de 10, 20,

30, 40 e 51 kN. As deflexões (10^{-2} mm) foram obtidas após cada aplicação de carga e repetidas três vezes para cada magnitude de carregamento.

Figura 3 – Formatos dos blocos utilizados no estudo de Panda e Ghosh (2002), localizações das suas dimensões de comprimento (L) e largura (W) e classificações sugeridas



Fonte: Adaptado de Panda e Ghosh (2002)

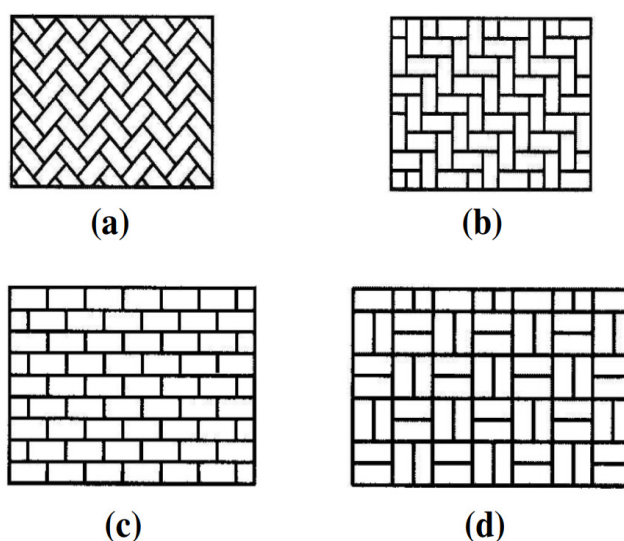
Em termos dos formatos dos blocos, Panda e Ghosh (2002) verificaram que blocos dentados (Tipo 4) tipicamente apresentaram menores deflexões em relação aos retangulares e quadrados (Tipo 1), considerando o mesmo padrão de assentamento para todos os blocos. Os autores atribuíram estes resultados às maiores áreas verticais superficiais para os blocos dentados, mesmo que as áreas planas das superfícies de contato sejam iguais às dos retangulares e quadrados. Em outras palavras, a principal hipótese levantada na pesquisa é a de que a área vertical superficial do bloco – ou seja, a área que efetivamente está em contato com os blocos vizinhos – influencia diretamente na eficiência da transferência de cargas entre os blocos do pavimento intertravado: quanto maior esta área, menor a deflexão da estrutura do pavimento. Conclusões similares são apontadas na pesquisa de Shackel (1980) envolvendo diversos formatos de blocos ensaiados em dispositivos de carregamento acelerado.

Em termos do desempenho dos *pavers* em pistas experimentais, Ling et al. (2009) submeteram seções de pavimentos com blocos retangulares a 10.000 ciclos de um pneu de caminhão inflado a 600 kPa. Cada seção tinha um comprimento total de 5,48 m e uma largura total de 1,00 m, e cerca de 150 ciclos/h foram considerados nos experimentos. De um modo geral, os autores verificaram que os *pavers* têm maior tolerância às deformações resilientes na estrutura do pavimento em relação aos

pavimentos asfálticos, e também que um intertravamento perfeito somente é alcançado após 500 ciclos de carregamento.

Os assentamentos dos blocos de concreto podem ser feitos de várias maneiras, dependendo do tipo e da necessidade do projeto. Os principais tipos de assentamento são a fileira ou *stretcher*, a espinha-de-peixe – ou *herringbone* – a 45° ou 90° e a trama ou *basketweave* (CRUZ, 2003; RADA et al., 1990). Tais exemplos são ilustrados na Figura 4. A norma brasileira NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) preconiza que tanto os blocos do Tipo 1 quanto os do Tipo 2 podem ser assentados em fileira, mas apenas os do Tipo 1 podem ser assentados no formato espinha-de-peixe. No caso dos blocos pertencentes aos Tipos 3 e 4, não há uma regulamentação específica na norma brasileira acerca do tipo mais recomendado de assentamento.

Figura 4 – Esquemas de assentamento dos blocos de concreto em pavimentos intertravados: (a) espinha-de-peixe a 45°; (b) espinha-de-peixe a 90°; (c) fileira; e (d) trama



Fonte: Adaptado de Cruz (2003)

O Instituto de Pavimentos Intertravados (ICPI), ou *Interlocking Concrete Pavement Institute* na sigla em inglês, recomenda o uso do padrão em espinha-de-peixe para vias sujeitas à ação do tráfego, tendo em vista a sua maior capacidade estrutural e a maior resistência aos deslocamentos laterais em relação aos demais padrões. Esta maior capacidade se deve à dispersão mais efetiva das forças causadas pela frenagem, giro e aceleração dos veículos. As declividades geralmente devem ser pelo menos de 1,5% e, para o caso de rodovias, as declividades

transversais e longitudinais não devem ser inferiores a 2% e 1%, respectivamente (INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014).

2.1. BREVE HISTÓRICO E APLICAÇÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS

Os blocos de concreto têm sido utilizados em pavimentos intertravados de países europeus há pelo menos 50 anos, e sua utilização nos Estados Unidos teve início em meados da década de 1970. Tais usos têm ocorrido até mesmo em vias de tráfego pesado como áreas industriais, portos e aeroportos (ABATE, 1993; EMERY, 1986; INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014; RADA et al., 1990). A literatura aponta que estes blocos tiveram origem nos Países Baixos nos anos 1940, como uma maneira de repor os tijolos de argila em vias urbanas. Suas resistências aos ciclos de gelo-degelo, facilidades de manutenção e reparo, aspectos culturais e baixos custos de manutenção – dentre outras vantagens – aumentaram rapidamente a sua popularidade na Europa Ocidental e na Alemanha, além de outros países (ABATE, 1993; INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014). Atualmente, existe uma meta convencional de pavimentação de ao menos 400 milhões de m² de vias por ano nos países europeus (INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014).

Além da Europa, o pavimento intertravado também já estava consolidado na África do Sul e em países das Américas Central e do Sul em meados dos anos 1960. Na década de 1970, países como Austrália e Nova Zelândia – além dos Estados Unidos – também registraram aumentos do uso deste tipo de pavimento. Para fins de comparação, o mercado brasileiro registrou um aumento de 35% no comércio de *pavers* entre os anos de 2002 e 2003, e este aumento foi superior a 66% entre os anos de 2003 e 2004 (CRUZ, 2003). A vida útil deste tipo de pavimento pode ser de até 25 anos, considerando condições adequadas para o projeto, a fabricação e o assentamento dos blocos (FIORITI, 2007).

A maioria das aplicações dos pavimentos intertravados no Brasil ocorre na pavimentação de calçadas, estacionamentos e praças, ou seja, vias com baixo volume de tráfego de veículos ou apenas movimentação de pedestres e veículos não motorizados. Uma das possíveis explicações para esta popularidade do pavimento intertravado está na preferência dos arquitetos e paisagistas pela variedade de cores e formatos que podem ser encontrados neste tipo de pavimento. Em tais casos,

majoritariamente os aspectos estéticos se sobrepõem aos técnicos porque o pavimento demandará pouca ou nenhuma manutenção durante a sua vida útil. Os projetos também costumam ser baratos devido ao seu alcance pequeno (CRUZ, 2003).

Apesar de a destinação principal do pavimento intertravado não ser as ruas e rodovias (ou seja, locais com relativa solicitação de veículos comerciais e mais pesados), há casos na literatura nacional e internacional em que este tipo de pavimento pode ser encontrado. Por exemplo, cidades do interior de estados brasileiros como Blumenau-SC e Itararé-SP adotaram os pavimentos intertravados em ruas de regiões centrais (FOLHA IMOBILIÁRIA, 2002; KUCHTA, 2017). Até mesmo trechos de rodovias como a Rodovia Visconde de Porto Seguro (SP-332), também conhecida como “estrada da Boiada”, recebeu a pavimentação intertravada em um trecho de aproximadamente 1,5 km de extensão. Os principais motivos pela escolha deste tipo de revestimento foram a melhor drenagem das águas pluviais, a menor impermeabilização do solo e a redução da liberação de produtos tóxicos na terra e nos cursos d’água (PREFEITURA DE VALINHOS, 2010). Esta obra utilizou blocos de concreto de 16 faces, pertencentes ao Tipo 1, e com uma espessura de 100 mm (RHINO PISOS, 2013). Como se pode observar na Figura 5, o arranjo escolhido para os *pavers* foi o formato espinha-de-peixe a 90°.

Figura 5 – Pavimentação intertravada na rodovia Visconde de Porto Seguro (SP-332), entre as cidades de Valinhos e Campinas (SP)



Fonte: Rhino Pisos (2013)

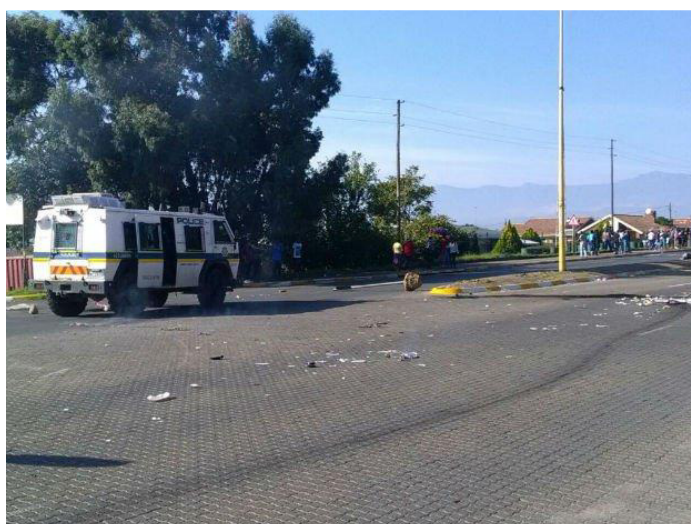
Embora no Brasil a técnica da pavimentação intertravada já tenha surgido em meados dos anos 1970, a impressão da população sobre tais pavimentos foi prejudicada devido à aplicação incorreta, ou seja, não obedecendo a critérios técnicos mínimos necessários. Posteriormente, esta impressão inicial ruim foi melhorada com

técnicas de controle de qualidade durante a produção e a execução em campo. Cruz (2003) afirma que, durante os anos de 1999 a 2003, foram assentados mais de 1 milhão de m² de pavimentos com *pavers* na cidade do Rio de Janeiro-RJ através de programas de urbanização como o “Rio Cidade” e o “Favela Bairro”.

Dentre as aplicações internacionais dos pavimentos intertravados, a África do Sul merece um destaque especial. Neste país, avenidas e corredores de tráfego urbano têm sido revestidas com blocos de concreto desde os anos 1980. Um dos possíveis motivos para esta popularidade pode ser a maior geração de empregos no mercado local, pois, dependendo do projeto, a pavimentação intertravada exige oito vezes mais mão de obra – cerca de 57.000 dias/homem – que um revestimento asfáltico convencional (FIORITI, 2007; MADRID, 2004). Mais recentemente, a partir dos anos 1990, rodovias importantes do país receberam a pavimentação intertravada como se pode observar nos exemplos a seguir (MADRID, 2004):

- **Rodovia Principal 127**, trecho entre Boston e Impedele (Kwazulu Natal), com extensão de 12 km;
- **Rodovia em Beñabela (Warmbaths)**, com 14 km de extensão; e
- **Estrada de ligação entre várias cidades e o centro industrial de Phuthditijhaba (Qwa Qwa)**, com 10,9 km de extensão e 8 m de largura, conforme Figura 6.

Figura 6 – Rodovia em Qwa Qwa (África do Sul) dotada de revestimento intertravado



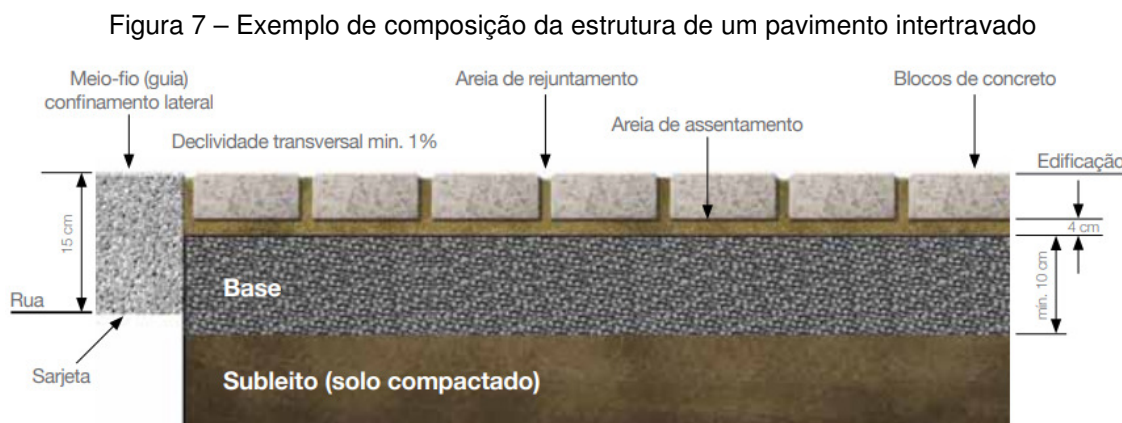
Fonte: Pijoos (2018)

Conforme citado acima, o uso de pavimentos intertravados vem crescendo no Brasil e em diversos outros países, o que demonstra a sua viabilidade até mesmo em

situações de carregamento pesado. Frente a tais aplicações, normas técnicas para dimensionamento destes pavimentos em situações específicas têm sido publicadas na literatura, vide McQueen et al. (2012) para o caso de pavimentos aeroportuários como um exemplo. Desta maneira, conclui-se que a aplicação e o monitoramento de *pavers* em pistas de pavimentos constituem uma forma viável e prática de avaliação do seu desempenho a longo prazo, dando ainda mais suporte ao uso em larga escala.

2.2. ESTRUTURA E ESPECIFICAÇÕES DO PAVIMENTO INTERTRAVADO

Em um aspecto geral, a estrutura de um pavimento intertravado é composta pelas seguintes camadas: (a) subleito; (b) base; (c) sub-base, se necessário; (d) areia de assentamento; e (e) camada de assentamento, ou seja, os blocos de concreto. Em alguns casos, é possível utilizar camadas tratadas com cimento em substituição às puramente granulares (RADA et al., 1990). A Figura 7 mostra um esquema representativo desta estrutura. Cada uma das camadas supracitadas será descrita detalhadamente, conforme parágrafos a seguir.



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (2010)

Em função das condições locais, o subleito deve ser compactado em camadas de até 15 cm de espessura. Este subleito é constituído de solo natural ou proveniente de troca de solo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010). É recomendado que, caso o material do subleito tenha um Índice de Suporte Califórnia (*CBR*) inferior a 2%, coloque-se uma camada de 30 cm de reforço e composta por um material que tenha *CBR* no mínimo 5% superior ao do subleito. Outra alternativa

consiste na remoção completa do solo de subleito até uma profundidade conveniente, colocando um material de maior resistência em seu lugar.

Além do valor do *CBR*, mais comumente encontrado em especificações brasileiras e sugestões locais de projetos para dimensionamento de pavimentos intertravados (BITTENCOURT e ARNS, 2014; PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2004), também é possível realizar o dimensionamento deste pavimento com base no módulo de resiliência (M_R) do material do subleito. Este segundo critério é mais frequente em normas norte-americanas e europeias. Equivalências entre o *CBR* e o M_R do subleito também podem ser encontradas na literatura, bem como as respectivas classificações do solo nos sistemas rodoviário e unificado. Dependendo destas classificações, é necessário realizar uma correção nos valores de *CBR* e M_R para considerar o efeito da permanência da água no solo, função da sua permeabilidade (CRUZ, 2003; INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014; RADA et al., 1990).

A camada de base deve ser compactada após a finalização do subleito. Ela é responsável por receber as tensões distribuídas pela camada de revestimento, além de possuir a função de evitar deformações permanentes e a deterioração do pavimento, protegendo o subleito de cargas externas (CRUZ, 2003). Também é tipicamente composta por material granular com espessura mínima de 10 cm (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010), mas pode ser composta por material tratado com cimento, dependendo do tráfego e das características locais (CRUZ, 2003; RADA et al., 1990). No caso de bases preparadas com agregados de granulometria densa, recomenda-se o uso de agregados triturados e com formatos angulares (INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014). Em linhas gerais e com base em estudos teóricos e práticos, recomendam-se materiais permeáveis e de resistências mecânicas consideráveis como solo-cimento e concreto rolado para uso em camadas de base.

Uma pesquisa feita por Cruz (2003) aponta que, dependendo das magnitudes das cargas geradas pelo tráfego e das características mecânicas da base e do subleito (por exemplo, resistência e módulo de elasticidade), pode ser necessária uma camada de sub-base na estrutura do pavimento intertravado. Também deve ser utilizada a sub-base quando o nível do lençol freático variar significativamente ao longo do tempo ou quando houver presença expressiva de material fino – diâmetro inferior a 0,075 mm – no subleito. O ICPI recomenda que os materiais mais

adequados para sub-bases são os agregados triturados e angulares, e as espessuras desta camada variam de 10 a 20 cm, independentemente do tipo de material (INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014). Em função do método utilizado no dimensionamento, a sub-base pode ser dispensada quando a resistência do subleito é suficientemente alta para o tráfego previsto para a via, por exemplo, número de solicitações de eixo-padrão (N) $< 5 \times 10^5$ e subleito com *CBR* de no mínimo 20% (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2004).

A camada de assentamento é composta por material granular, com distribuição granulométrica bem definida e que tem a função de acomodar as peças de concreto, proporcionando um correto nivelamento do pavimento e permitindo variações na espessura destas peças. A areia utilizada nesta camada nunca deve ser destinada à correção de falhas na superfície da camada de base (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010). A literatura pesquisada por Beaty (1982) destaca que as principais funções da areia de assentamento são:

- preencher a parte inferior das juntas entre os blocos de concreto, de modo a proporcionar o desenvolvimento do intertravamento;
- fornecer um suporte uniforme aos blocos e evitar a concentração de tensões em um ou outro ponto da camada, o que poderia acarretar danos aos mesmos;
- fornecer uma superfície uniforme para o assentamento dos blocos;
- lidar com as diferenças entre as espessuras dos blocos de concreto, em função das suas condições de fabricação; e
- lidar com as tolerâncias de irregularidade na superfície da sub-base.

A combinação dos blocos de concreto com a areia de assentamento resulta em um aumento da rigidez da estrutura do pavimento devido ao progresso do fenômeno de intertravamento, e isto costuma ocorrer tipicamente nos primeiros anos de vida útil da estrutura, antes da aplicação de 10.000 passagens equivalentes de eixo-padrão simples – ESAL's (INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014; RADA et al., 1990). No entanto, a camada de areia deve ser consistente ao longo de toda a estrutura e não exceder 25 mm após a compactação. Espessuras muito finas – inferiores a 20 mm depois da compactação – podem não produzir o intertravamento necessário ao bom desempenho do pavimento, o que ocorre pela migração desta areia para as juntas entre os blocos durante a compactação inicial (INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014).

A metodologia da execução da camada de assentamento e a especificação correta da areia selecionada são diretamente responsáveis pelo desempenho final do pavimento intertravado (CRUZ, 2003). Carvalho (1998) sugere que a areia da camada de assentamento contenha no máximo 5% de material passante na peneira #200 (0,075 mm), bem como um máximo de 10% de material retido na peneira #4 (4,8 mm). A Tabela 2 detalha a faixa granulométrica recomendada para este tipo de areia, considerando diversos diâmetros de peneiras. Tais valores diferem levemente dos recomendados em normas norte-americanas, especialmente nas peneiras de diâmetros menores como #50, #100 e #200 (INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014).

Tabela 2 – Faixas granulométricas recomendadas para a areia da camada de assentamento do pavimento intertravado

peneira (malha e diâmetro)	% passante (CARVALHO, 1998)	% passante (INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014)
3/8" (9,50 mm)	100	100
#4 (4,76 mm)	95 a 100	95 a 100
#16 (1,19 mm)	50 a 85	50 a 85
#30 (0,60 mm)	25 a 60	25 a 60
#50 (0,30 mm)	10 a 30	5 a 30
#100 (0,15 mm)	5 a 15	0 a 10
#200 (0,075 mm)	0 a 10	0 a 1

Fontes: Carvalho (1998) e Interlocking Concrete Pavement Institute (2014)

A camada de revestimento, também chamada de “camada de rolamento”, é composta pelos *pavers* e o material de rejuntamento, quando considerado no projeto. Esta camada recebe diretamente as cargas dos veículos e pedestres, conforme estudos específicos de tráfego feitos para a via (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010). A construção se dá em três etapas: colocação dos blocos segundo o padrão de assentamento definido em projeto, acabamento de meios-fios ou qualquer interrupção no pavimento junto às bordas e vibração sobre as peças na área já executada (CARVALHO, 1998). Em caso de necessidade de serragem dos blocos, os blocos cortados não deverão ter menos de 25% do tamanho original; do contrário, deve-se fazer o acabamento com argamassa seca – 1 parte de cimento e 4 partes de areia (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2010).

2.3. CRITÉRIOS DE DOSAGEM DE CONCRETOS DE ALTA RESISTÊNCIA

O preparo de concretos, especialmente aqueles com resistência mais elevada à compressão, não é algo simples de ser feito devido às peculiaridades deste tipo de material. O Instituto Norte-americano de Concreto – ACI (*American Concrete Institute*, na sigla em inglês) designa “concreto seco” como sendo aquele cujo valor de *slump* está entre 0 e 25 mm (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2002). Dentre os métodos existentes na literatura científica para preparo de concretos em laboratório e com resistências mais elevadas, os seguintes procedimentos podem ser mencionados:

- o método proposto pelo American Concrete Institute (2002), no qual ábacos e fatores de correção são utilizados para determinação de um traço inicial para o concreto;
- o método interativo proposto por Eich et al. (2016) a partir de traços previamente definidos por empresas da área de produção de *pavers*, no qual ajustes são feitos nos quantitativos de areia natural e agregados visando um aumento na resistência à compressão do concreto; e
- métodos desenvolvidos a partir de protocolos já existentes para concretos convencionais, mas considerando as peculiaridades dos concretos mais resistentes como a relação água-cimento (*a/c*) extremamente reduzida e a possibilidade de outras adições como sílica ativa e aditivo superplastificante para ajustes no traço (CREMONINI et al., 2001).

O protocolo descrito pelo American Concrete Institute (2002) se baseia em uma sequência de etapas para escolha dos quantitativos de cada material presente no concreto e em função de parâmetros e propriedades de referência. De modo simplificado, este protocolo pode ser subdividido nas seguintes etapas:

- **Parâmetros iniciais:** diâmetro máximo nominal do agregado (mm), tipo de concreto desejado (desde “extremamente seco” até “muito plástico”) e resistência à compressão aos 28 dias (psi ou MPa);
- **Controle da entrada de ar:** dependendo do tipo de concreto escolhido, a entrada ou não de ar durante a produção do corpo de prova afeta a sua resistência final; e
- **Seleção dos quantitativos necessários:** fator água/cimento *a/c*, massa de água por m³ de concreto (kg/m³), teor de vazios (%), volume de agregado graúdo por unidade de volume de concreto, em função do módulo de finura da areia (M_F).

Em função dos dados obtidos nos ábacos e das propriedades dos agregados graúdo e miúdo (especialmente as massas específicas aparentes e as taxas de absorção de água para ambos, bem como o valor de M_F), é possível calcular os quantitativos de cada fração granulométrica (areia e agregado graúdo), cimento e água para a produção de 1,0 m³ de concreto. É importante lembrar que as resistências à compressão mostradas nestes ábacos foram determinadas para corpos de prova cilíndricos e com dimensões de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Também é importante lembrar que os valores numéricos coletados fornecem apenas um ponto de partida para a obtenção das propriedades desejadas para o concreto, ou seja, os resultados devem ser ajustados com base nas dimensões reais do corpo de prova e no controle de qualidade da produção em laboratório, se necessário.

No caso do trabalho feito por Eich et al. (2016), o traço que apresentou os melhores resultados – resistências à compressão superiores a 40 MPa – foi desenvolvido a partir de um traço anterior fornecido por uma empresa especializada na fabricação e comercialização de *pavers*, aumentando-se a quantidade de areia natural em 10% e diminuindo a quantidade de granilha (agregado mais graúdo) na mesma proporção. Os resultados obtidos pelas autoras sugerem que, ao se efetuar tais mudanças nos traços dos blocos conforme Tabela 3, a resistência característica à compressão $f_{pk,est}$ registrou um aumento de 30,56 para 42,17 MPa (cerca de 38%). Ainda que a resistência desejada de 50 MPa não tenha sido atingida devido ao valor máximo ter sido de apenas 42 MPa para um dos traços, a viabilidade econômica dos blocos de concreto (apenas R\$ 35,80/m²) foi apontada pelas autoras como um argumento a favor do emprego deste tipo de revestimento.

Tabela 3 – Traços inicial (Traço 1) e corrigido (Traço 2) da pesquisa de Eich et al. (2016) e seus respectivos valores característicos de resistência à compressão ($f_{pk,est}$)

descrição do parâmetro	Traço 1	Traço 2
teor de granilha (%)	70,00	60,00
teor de areia natural (%)	5,00	15,00
teor de areia artificial (%)	10,00	10,00
teor de pedrisco (%)	15,00	15,00
água total (litros)	30,36	36,85
fator água-cimento (<i>a/c</i>)	0,31	0,37
aditivo (ml)	600	600
valores de $f_{pk,est}$ (MPa)	30,56	42,17
desvios-padrão <i>s</i> (MPa)	4,34	4,86

Fonte: Adaptado de Eich et al. (2016)

É importante destacar que os ajustes nos traços iniciais devem ser feitos a partir do desempenho dos corpos de prova em laboratório e da compreensão adequada dos parâmetros que levam a uma maior resistência no concreto. Neste aspecto, aumentos ou reduções dos quantitativos presentes nos traços iniciais podem ser feitos de forma experimental e interativa (ou seja, tentativas sucessivas) ou com o intuito de baratear os custos da produção dos blocos de concreto (isto é, reduzindo-se o teor de cimento). Desta maneira, é possível ajustar a resistência à compressão para que se obtenha o valor mínimo especificado em projeto (EICH et al., 2016). Ainda, os fatores a/c e os percentuais de areia selecionados por Eich et al. (2016) são inferiores aos recomendados por Barboza e Bastos (2008) para produção de concretos com resistências à compressão de 50 MPa (0,44 para a/c e 45% de areia).

Por sua vez, Cremonini et al. (2001) realizaram adaptações em um método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (IPT/EPUSP) aplicado originalmente em concretos convencionais, designado como “IPT/EPUSP Modificado”. De uma forma resumida, este método é especificado pelos parâmetros fundamentais a seguir: (a) uma relação entre as quantidades de água e materiais secos; (b) uma relação entre os quantitativos de água e materiais aglomerantes; (c) a definição de um teor de argamassa, determinado experimentalmente e objetivando a maior homogeneidade possível na mistura; (d) os quantitativos de materiais pozolânicos como a sílica ativa, em substituição a parte do material cimentante; e (e) o uso de aditivos superplastificantes.

Para fins comparativos, Cremonini et al. (2001) elaboraram seis dosagens de concretos para resistências de 50, 80 e 100 MPa, três delas para cada um dos os métodos “IPT/EPUSP Modificado” e de Mehta e Aitcin (1990), este muito prático e de fácil execução e com excelentes resultados para os materiais do estado do Rio Grande do Sul. Em linhas gerais, os autores observaram que o método do “IPT/EPUSP Modificado” proporcionou menores consumos de cimento que o de Mehta e Aitcin (1990) até resistências de cerca de 90 MPa, ainda que os custos por m^3 tenham sido semelhantes para ambos os métodos. Os concretos dosados segundo o critério do “IPT/EPUSP Modificado” também forneceram resistências maiores que os correspondentes do critério publicado por Mehta e Aitcin (1990) em praticamente todos os tempos de cura escolhidos na pesquisa (3, 7 e 28 dias), vide dados resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resistências à compressão obtidas segundo os métodos do “IPT/EPUSP Modificado” e o proposto por Mehta e Aitcin (1990) para três níveis de resistência e três tempos de cura

nível desejado de resistência (MPa)	a/c ^a	resistências (MPa) por tempo de cura ^a		
		3 dias	7 dias	28 dias
50,00	0,37 (0,32)	45,8 (55,2)	55,0 (64,5)	63,8 (72,6)
80,00	0,26 (0,26)	57,4 (71,6)	70,5 (75,6)	77,7 (87,1)
100,00	0,19 (0,18)	67,1 (77,7)	83,9 (83,2)	101,3 (98,8)

^a método de Mehta e Aitcin (1990) (método do “IPT/EPUSP Modificado”).

Fonte: Adaptado de Cremonini et al. (2001)

2.4. USO DE PLÁSTICOS EM BLOCOS DE CONCRETO

2.4.1. Conceituações Básicas e Formas de Utilização

O termo “plástico” provém do grego *plastikos*, que significa “capaz de ser moldado”. Os plásticos pertencem à família dos polímeros, ou seja, estruturas macromoleculares com as unidades de repetição (*meros*) presentes dezenas de milhares de vezes (*poli*) e unidas por ligação covalente. Os polímeros podem ser subdivididos em dois grupos (BARROS, 2011):

- **Termofixos:** também chamados de “termorrígidos”, assumem a forma de um molde quando submetidos à temperatura e à pressão. São geralmente mais duros, resistentes e frágeis que os termoplásticos e, uma vez polimerizados e moldados, não podem ser reaproveitados. Exemplos incluem o epóxi e algumas resinas de poliéster; e
- **Termoplásticos:** também assumem a forma de um molde quando submetidos aos efeitos da temperatura e da pressão. No entanto, diferentemente dos termofixos, podem ser reciclados com o aumento do movimento das moléculas sob temperaturas e pressões altas, o que se explica pela redução das forças secundárias de ligação entre as moléculas. São relativamente moles e dúcteis e incluem o polipropileno, o policloreto de vinila (PVC), o polietileno (PE) e o politereftalato de etileno (PET).

Por muitos anos, a reciclagem dos plásticos no Brasil – especialmente o PET, presente em várias embalagens de bebidas – não tem sido vista como um problema sério a ser resolvido. Uma das possíveis explicações pode ser o fato de que, apesar

de viável técnica e financeiramente, a reciclagem de termoplásticos só adquire viabilidade financeira quando feita em larga escala devido ao baixo preço por unidade e à baixa densidade (BARROS, 2011). Outros problemas residem em aspectos culturais e de infraestrutura, pois são necessários veículos com grandes capacidades de volume para o transporte dos locais de coleta para os centros de reciclagem, por exemplo (COELHO et al., 2011; FORMIGONI, 2006). Felizmente a reciclagem vem tipicamente crescendo no Brasil desde 1994 segundo censos periódicos publicados pela Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET), com um pico de 331.000 ton recicladas em 2012 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET, 2016; COELHO et al., 2011).

A incorporação de plásticos ao concreto tem sido o foco de diversas pesquisas científicas nacionais e internacionais, tendo em vista as suas variedades de formas e tipos originalmente destinados a lixões, aterros sanitários ou incineradores. Neste aspecto, revisões de literatura feitas por Gu e Ozbakkaloglu (2016), Pacheco-Torgal et al. (2012) e Sharma e Bansal (2016) dentre outros têm destacado esta forma alternativa de reaproveitamento de resíduos, avaliando os principais resultados positivos e negativos de tal opção e de que maneira os plásticos podem ser incorporados à matriz do concreto. Segundo Sharma e Bansal (2016) e Thorneycroft et al. (2018), tais formas de utilização dos plásticos incluem as fibras, os *pellets* e as partículas e fibras trituradas.

Dependendo da origem, forma e dimensões das partículas de plástico, os efeitos nas propriedades do concreto final podem ser significativamente diferentes. Um exemplo característico destas particularidades pode ser encontrado no trabalho de Saikia e de Brito (2013), os quais avaliaram três tipos de PET incorporados ao concreto – partículas mais grossas (PC), partículas mais finas (PF) e *pellets* (PP) – e os efeitos destes tipos nas propriedades do concreto endurecido. Os traços foram ajustados para atingir faixas de *slump* entre 120 e 135 mm. Os teores de substituição dos agregados convencionais por plásticos foram iguais a 5%, 10% e 15% em volume.

Os autores concluíram que, apesar de os efeitos de PC, PF e PP nas resistências à compressão do concreto terem sido semelhantes (a saber, redução de resistência), os plásticos do tipo PC apresentaram maiores aumentos de dureza que os dos tipos PF e PP, para um mesmo teor de plástico. Isto pode ser explicado pela maior capacidade das partículas maiores de plásticos em colmatarem as trincas

decorrentes dos ensaios de resistência à tração e à compressão. Em outras palavras, plásticos de maiores dimensões são capazes de absorver as trincas na matriz de concreto com mais eficiência que os plásticos de menores dimensões, tendo em vista as maiores capacidades de transferência de carga para os primeiros em relação aos últimos.

A adição de plásticos ao concreto pode ser feita tanto em substituição à parte da fração graúda da granulometria do material (agregados) quanto à fração mais fina (areia), ou mesmo ambos, dependendo da necessidade e dos interesses da pesquisa. Neste caso, a substituição é chamada de “substituição volumétrica direta” e o plástico atua na matriz do concreto como um agregado. Também é possível acrescentar fibras de plástico ao concreto e, neste último caso, a fração granulométrica não é alterada (GU e OZBAKKALOGLU, 2016). O plástico utilizado como um agregado pode ser proveniente tanto de reciclagem e trituração direta das embalagens que lhe deram origem (KUCHTA, 2017; MODRO et al., 2009; PIRES, 2015; RAHMANI et al., 2013; SAIKIA e DE BRITO, 2013; TAPKIRE et al., 2014) quanto de um processo prévio de tratamento. Neste último caso, o tratamento pode ocorrer através de aquecimento a temperaturas de até 200-300°C e posterior resfriamento e trituração para obtenção das granulometrias desejadas (GU e OZBAKKALOGLU, 2016; ISLAM et al., 2016) ou mesmo através de produtos químicos como alvejantes e soda cáustica, por exemplo (NAIK et al., 1996).

No caso da aplicação direta do plástico como um agregado, a fração a ser substituída pelo plástico varia em função das necessidades e/ou dos interesses da pesquisa, conforme já mencionado. Neste aspecto, a literatura aponta que as substituições podem ser apenas na fração areia (CÂNDIDO et al., 2014; RAHMANI et al., 2013; REDDY et al., 2017; TAKPIRE et al., 2014; THORNEYCROFT et al., 2018), apenas na fração graúda (ISLAM et al., 2016) ou mesmo em ambas (KUCHTA, 2017; MODRO et al., 2009; PIRES, 2015). Uma das explicações apontadas por Pires (2015) para realizar a substituição das duas frações de agregados por plásticos está em evitar a falta de argamassa no caso de uma substituição apenas da fração areia, bem como um possível excesso de argamassa no caso da substituição apenas da fração graúda. No entanto, a presença de plásticos na fração areia tem proporcionado os maiores benefícios ao concreto endurecido, tanto no que se refere à resistência à tração (SAIKIA e DE BRITO, 2013) quanto à compressão (RAHMANI et al., 2013).

2.4.2. Adição de Plásticos ao Concreto nos Estados Fresco e Endurecido

Dentre as propriedades do concreto mais estudadas na literatura e envolvendo o uso de plásticos como agregados, as seguintes merecem um destaque especial: (a) abatimento do tronco de cone, ou *slump*, para o concreto no estado fresco; (b) resistência à compressão; e (c) resistência à tração, sendo as duas últimas avaliadas no concreto no estado endurecido. Destas, a norma brasileira NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) considera apenas a resistência à compressão como propriedade característica do concreto endurecido para uso em pavimentos intertravados, em função do nível de tráfego presente na via. Além desta resistência, a norma também avalia a taxa de absorção de água pelo bloco (*Ab*) após imersão por 24 h, considerando uma temperatura controlada de $23 \pm 5^\circ\text{C}$. De forma indireta, este valor de *Ab* pode estar associado à porosidade do concreto e à interligação entre os vazios internos (ROLLINGS, 1983) e geralmente varia de 5 a 8% em trabalhos internacionais (ABATE, 1993; ROLLINGS, 1983).

Tendo em vista o foco da norma NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) apenas na resistência do concreto endurecido à compressão, a revisão de literatura será baseada principalmente nesta resistência e na trabalhabilidade do concreto fresco (*slump*), considerando o fato de que, dependendo do tipo de plástico e dos teores utilizados na pesquisa, pode ser necessária ou não a adição de aditivos plastificantes para aumentar esta trabalhabilidade (KUCHTA, 2017; PIRES, 2015). No caso da taxa de absorção de água, acredita-se que a sua limitação é devida a preocupações com relação aos ciclos de gelo-degelo em países de clima frio, pois a repetição de tais ciclos em blocos com absorções elevadas de água pode afetar a resistência do concreto. Mais especificamente, *pavers* com uma distribuição inadequada de poros e sujeitos a estes ciclos podem desenvolver pressões internas de dilatação e osmóticas, levando a aumentos no teor de umidade do concreto e a uma conseqüente redução na sua resistência à compressão (ROLLINGS, 1983).

Pesquisadores têm discutido a respeito dos efeitos causados pela adição de plásticos na trabalhabilidade do concreto (GU e OZBAKKALOGLU, 2016; PACHECO-TORGAL et al., 2012; SHARMA e BANSAL, 2016). De um modo geral, os dados indicam que esta trabalhabilidade diminui com a incorporação dos agregados plásticos ao concreto, especialmente no caso daqueles com formatos irregulares. Em outras

palavras, o contato e a fricção entre tais partículas – bem como a presença de maiores áreas superficiais – causariam uma redução da capacidade do concreto em fluir durante o ensaio de *slump*. Todavia, aumentos ou manutenções desta trabalhabilidade podem ser observados para agregados plásticos que possuem formatos cúbicos ou arredondados, ou seja, aqueles com superfícies mais lisas e níveis mais baixos de fricção entre as partículas. A incapacidade do plástico em absorver água também pode ser mencionada como uma possível causa destes resultados. Fenômeno parecido pode ser encontrado em plásticos reciclados com superfícies oleosas, tal como constatado no trabalho de Kuchta (2017).

No que se refere às resistências à compressão, as revisões indicam que a tendência geral é a de redução desta resistência com o aumento do teor de plásticos (GU e OZBAKKALOGU, 2016; PACHECO-TORGAL et al., 2012; SAIKIA e DE BRITO, 2013; SHARMA e BANSAL, 2016), especialmente quando as partículas são mais irregulares e as granulometrias são mais grossas. Dentre as possíveis causas para estas reduções, é possível mencionar as seguintes: (a) baixo módulo de elasticidade do agregado plástico em relação ao convencional; (b) a presença de ligações fracas entre as partículas de plásticos e a matriz cimentícia; (c) as limitações da hidratação do cimento em áreas próximas às destas partículas; e (d) a alta porosidade do concreto com agregados plásticos. Temperaturas de ensaio maiores também podem comprometer a resistência do concreto à compressão, tendo em vista a suscetibilidade elevada do plástico à temperatura.

Apesar das limitações do uso de plásticos em concretos que demandam altas resistências à compressão, é possível selecionar os tipos e teores de plásticos mais indicados para, ao menos, evitar reduções bruscas desta resistência. Neste aspecto, trabalhos como o de Cândido et al. (2014) e Rahmani et al. (2013) sugerem que é possível obter incrementos de até 12% na resistência à compressão quando o PET substitui parte da fração areia no concreto. No caso da pesquisa de Rahmani et al. (2013), tais incrementos se devem à maior probabilidade de intertravamento entre as partículas de PET nas áreas fraturadas do corpo de prova e às suas maiores flexibilidades. Naik et al. (1996) também reportaram aumentos ou inalterações da resistência à compressão para concretos com até 0,5% de adição de polietileno de alta densidade (HDPE) em granulometrias correspondentes à fração areia. Tratamentos químicos nos plásticos – por exemplo, com produtos alcalinos – podem aumentar ainda mais esta resistência.

Ainda que a redução de resistência seja observada no concreto com agregados plásticos, tal redução pode não ser tão significativa dependendo do teor e do tipo de plástico. Este foi o caso da pesquisa de Modro et al. (2009), os quais verificaram reduções muito pequenas nesta resistência para teores de 10% de PET adicionados ao concreto na forma de *flakes*. O mesmo foi observado nos experimentos de Thorneycroft et al. (2018) para teores de PET iguais a 10% e cujas partículas não superaram os 4,0 mm de diâmetro – as reduções de resistência foram sempre inferiores a 5% em tais situações, podendo inclusive superar em 1% a resistência do concreto padrão quando a granulometria do PET é exatamente igual à da areia. Frigione (2010) também obteve resultados similares para partículas de PET com diâmetros de até 4,0 mm e teores de até 5% em substituição à fração areia, a saber, resistências à compressão levemente inferiores para o concreto com PET em relação ao concreto padrão.

O uso de agregados plásticos pode ser igualmente vantajoso quando se desejam resistências elevadas para o concreto nos primeiros dias de cura. Este fenômeno foi observado por Saikia e De Brito (2013), os quais constataram que vários dos concretos preparados com PC, PF e PP apresentaram resistências à compressão maiores que o concreto convencional antes dos 91 dias de cura escolhidos pelos autores. Uma possível explicação para estes resultados está na menor condutividade térmica do plástico, o que reduz a perda de calor durante a cura e, por consequência, aumenta a temperatura durante a hidratação do cimento. Desta maneira, a resistência registra aumentos em relação aos valores iniciais.

Em termos dos teores de plásticos, a Tabela 5 mostra que a literatura sugere percentuais que variam desde 0,5 a 5% (NAIK et al., 1996) até valores de 60% (PIRES, 2015), todos em volume. Os valores mais utilizados se situam entre 5 e 50% (CÂNDIDO et al., 2014; FRIGIONE, 2010; ISLAM et al., 2016; KUCHTA, 2017; MODRO et al., 2009; RAHMANI et al., 2013; REDDY et al., 2017; SAIKIA e DE BRITO, 2013; TAPKIRE et al., 2014; THORNEYCROFT et al., 2018). Teores muito elevados fazem com que o plástico atue como uma barreira, impedindo a adesão da matriz de cimento aos agregados naturais e, conseqüentemente, diminuindo a resistência à compressão (RAHMANI et al., 2013). Em outras palavras, recomenda-se a manutenção dos teores de plásticos em valores não superiores a 10% para evitar uma perda excessiva de resistência à compressão devido às propriedades intrínsecas destes materiais, ao mesmo tempo em que se busca um maior

intertravamento das partículas de plásticos na matriz do concreto (FRIGIONE, 2010; RAHMANI et al., 2013; SAIKIA e DE BRITO, 2013; THORNEYCROFT et al., 2018).

Tabela 5 – Uma revisão de literatura sobre os teores de PET utilizados na modificação do concreto (% em volume) e as frações granulométricas correspondentes que foram substituídas pelo PET

referência bibliográfica	granulometria do (s) PET (s) e frações substituídas	teores (% em volume)
Cândido et al. (2014)	agregado miúdo (dimensão máxima igual a 4,75 mm)	15, 30 e 45
Frigione (2010)	0,1 a 5,0 mm	5,0
Islam et al. (2016)	agregado graúdo (2 a 40 mm)	20, 30, 40 e 50
Naik et al. (1996)	agregado graúdo (4,0 a 9,5 mm)	0,5, 1,5, 2,0 e 4,5
Kuchta (2017)	agregados graúdo e miúdo (3,0 a 9,0 mm)	15, 25 e 35
Modro et al. (2009)	agregado miúdo (areia, até 4,76 mm) e <i>flake</i> (até 5,0 mm)	10, 20, 30 e 40
Pires (2015)	agregados graúdo e miúdo (1,2 a 9,5 mm)	10, 20, 30, 40, 50 e 60
Rahmani et al. (2013)	agregado miúdo (0,015 a 7,00 mm)	5, 10 e 15
Reddy et al. (2017)	agregado miúdo (0,075 a 4,75 mm)	5 e 10
Saikia e De Brito (2013)	agregado miúdo (de 0,5 a 16,0 mm para <i>flakes</i> e de 0,25 a 5,6 mm para o material fino e os <i>pellets</i>)	5, 10 e 15
Tapkire et al. (2014)	agregado graúdo (até 10 mm)	10, 20 e 30
Thorneycroft et al. (2018)	agregado miúdo (grupo de fragmentos com diâmetros entre 0,5 e 2,0 mm, outros dois grupos com diâmetros entre 2,0 e 4,0 mm e um terceiro grupo com granulometria entre 0,04 e 9,5 mm)	10

Fonte: Os autores (2019)

2.4.3. Comentários Finais

Com base nos apontamentos e sugestões feitos na literatura científica a respeito das formas de substituição dos agregados convencionais por plásticos reciclados, é possível concluir que as seguintes recomendações devem ser priorizadas quando da busca por concretos mais resistentes à compressão e que, ao mesmo tempo, não prejudiquem em demasia a trabalhabilidade do material:

- uso de plásticos com módulos de elasticidade mais elevados como o PET e o PE;
- substituição da fração mais fina dos agregados (areia) por plásticos; e
- uso de teores baixos de plásticos, em geral não superiores a 10%.

Em caso de necessidade (especialmente nos concretos de alta resistência, em que o fator água/cimento a/c precisa ser menor), pode-se fazer uso de aditivos plastificantes para aumentar a trabalhabilidade do concreto, reduzir os teores de água e melhorar as resistências iniciais. Como um exemplo, Pires (2015) selecionou teores de 0,2 e 0,6% de aditivos em suas pesquisas com blocos de concreto com adição de PET, ainda que as resistências à compressão dos blocos não atingiram valores superiores a 50 MPa, nem mesmo para o traço sem adição de PET (máximo de 40,5 MPa). No caso do estudo de Cremonini et al. (2001), os aditivos foram adicionados aos traços em teores que variaram de 0,5 a 2,3% e as resistências à compressão se mostraram sempre superiores a 45 MPa, conforme já detalhado.

Tendo em vista que a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) define o valor mínimo de 50 MPa para que os blocos sejam utilizados em vias para tráfego pesado, pode-se inferir que o uso de aditivos nestes concretos é recomendado, desde que os níveis de trabalhabilidade sem eles não sejam satisfatórios. Neste aspecto, é importante buscar um equilíbrio entre os teores de materiais alternativos incorporados ao concreto e, ao mesmo tempo, a garantia dos níveis mínimos de trabalhabilidade do concreto para moldagem dos corpos de prova e homogeneização durante a fabricação dos *pavers*. Em alguns casos, é necessária uma mesa vibratória para obter a melhor homogeneização dos corpos de prova (KUCHTA, 2017).

Em síntese, pode-se observar que há ainda um grande campo de pesquisa a ser explorado na literatura científica no que se refere ao uso de plásticos em blocos de concreto para pavimentação, especialmente porque não há um consenso sobre os efeitos destes plásticos na resistência à compressão do concreto para teores baixos de modificador – tipicamente até 10%. Tal ausência de publicações conclusivas ganha ainda mais relevância no que tange aos concretos de alta resistência ($f_{pk,est}$ entre 40 e 50 MPa), especialmente porque os trabalhos científicos costumam partir de concretos com resistências muito variadas, desde 25 até 58 MPa (BATAYNEH et al., 2007; KUCHTA, 2017; PIRES, 2015; TAPKIRE et al., 2014). Desta maneira, a realização de pesquisas complementares para investigar os efeitos dos plásticos em concretos com alta resistência é de suma importância para observar tais efeitos de forma clara e sucinta, e assim saber a extensão e as possibilidades de aplicação deste modificador do concreto em *pavers*.

3. METODOLOGIA

Para a produção dos blocos de concreto no projeto em questão, será dada prioridade aos cimentos Portland comumente utilizados em obras e outras pesquisas da literatura brasileira. Tendo em vista as desformas e as produções mais rápidas dos blocos, a necessidade de se atingir resistências mínimas elevadas em poucos dias, a resistência aos agentes agressivos devido à exposição constante às intempéries e o procedimento para regularização das faces antes do ensaio de resistência à compressão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), será adotado um cimento do tipo CP-V ARI (Alta Resistência Inicial).

No que diz respeito aos teores e aos componentes do concreto que serão substituídos pelo plástico, serão dadas uma atenção e uma escolha especiais aos valores e substituições recomendados por outros pesquisadores. Mais especificamente, os teores de 0, 1, 2, 3, 4, 5 e 10% de plástico em volume e em substituição à fração miúda dos agregados convencionais foram adotados. O tipo de plástico adotado nesta pesquisa é uma blenda de PE com PET (PE+PET), produzido por uma empresa parceira e gentilmente cedido para realização dos ensaios laboratoriais com os *pavers*. Nada foi encontrado na literatura científica a respeito do uso deste tipo específico de resíduo manufaturado até o presente momento, de modo que a análise da sua viabilidade no trabalho em questão constituirá em uma das principais inovações para as comunidades acadêmica e científica em geral.

3.1. AGREGADOS E RESPECTIVOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

No que concerne aos ensaios específicos para os agregados, os seguintes protocolos mínimos foram selecionados: (a) granulometria (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003c); (b) abrasão Los Angeles (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1998); (c) massa específica e absorção de água do agregado graúdo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a); e (d) massa específica e absorção de água do agregado miúdo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a, 2003b). Ensaio como os reportados fazem parte das especificações técnicas dos agregados destinados à preparação de concretos, conforme Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). Cada um dos protocolos está resumidamente descrito a seguir.

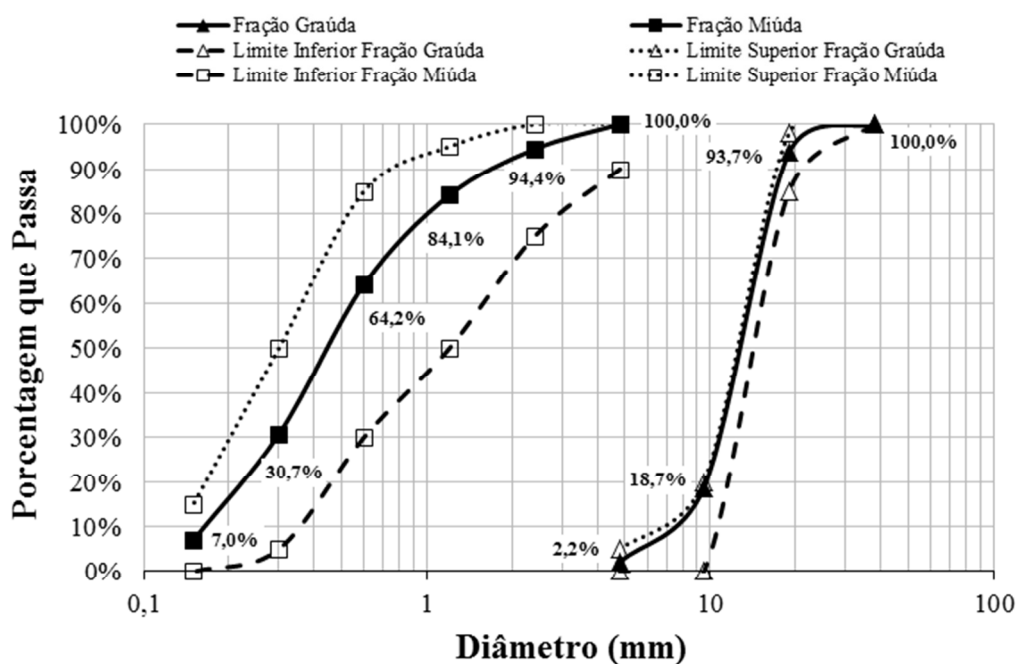
3.1.1. Granulometria

A determinação da classificação granulométrica de agregados miúdos e graúdos para serem utilizados em concretos é prescrita pela NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003c), conforme já citado. Segundo a referida norma, a grandeza dimensional que caracteriza a curva granulométrica – conhecida como “diâmetro máximo nominal” ou simplesmente “diâmetro máximo” (D_m) – é dada pela malha correspondente à peneira da série normal na qual a porcentagem retida acumulada é igual ou inferior a 5%, desde que tal porcentagem seja superior a 5% na peneira imediatamente inferior. Este parâmetro é de suma importância para a definição da composição da curva granulométrica do concreto, tendo em vista as restrições das dimensões dos corpos de prova cilíndricos e dos blocos de concreto.

Para fins deste estudo, agregados de gnaiss fornecidos por outra empresa parceira e com uma abrasão Los Angeles igual a 20,9% segundo o método de ensaio DNER-ME 035/98 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1998) foram escolhidos. Uma vez que a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) não estabelece como requisito obrigatório a verificação da resistência do *paver* à abrasão, acredita-se que o controle por parte dos agregados pode compensar – ao menos parcialmente – o nível de abrasão nos *pavers*.

A Figura 8 destaca as curvas granulométricas das frações graúda e miúda dos agregados empregados na pesquisa, bem como os seus respectivos limites superior e inferior segundo a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). Pode-se observar que ambas as curvas estão situadas dentro dos intervalos utilizáveis das frações granulométricas de cada peneira e, no caso da fração graúda, esta pode ser definida como “9,5/25” segundo a mesma norma. Esta definição estabelece que o valor de D_m é igual a 25,0 mm e que a menor dimensão do agregado graúdo é igual a 9,5 mm. No caso da fração miúda, sabe-se que os Módulos de Finura M_F variam de 1,55 a 3,50 quando estão situados entre as zonas utilizáveis superior e inferior, o que será verificado posteriormente. As peneiras selecionadas pertencem à série normal e compreendem os diâmetros 1 1/2” (38,0 mm), 3/4” (19,0 mm), 3/8” (9,5 mm), #4 (4,76 mm), #8 (2,4 mm), #16 (1,2 mm), #30 (0,6 mm), #50 (0,3 mm) e #100 (0,15 mm). O valor de M_F para a fração fina é igual a 2,20.

Figura 8 – Detalhamentos das curvas granulométricas das frações graúda e miúda dos agregados estudados e seus respectivos limites superior e inferior para cada peneira



Fonte: Os autores (2019)

3.1.2. Massas Específicas e Taxas de Absorção de Água

Conforme descrito anteriormente, as massas específicas e as taxas de absorção de água dos agregados graúdo e miúdo foram determinadas segundo as normas técnicas correspondentes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a, 2003a, 2003b). Da mesma maneira, a massa específica do cimento Portland CP V-ARI foi obtida segundo a norma NBR NM 23 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001b). Todas estas informações são de suma importância para aplicação do método de dosagem do traço do concreto padrão (T_0), ou seja, o concreto sem adição de PE+PET. Os dados resumidos podem ser visualizados na Tabela 6.

É importante salientar que todas as massas específicas são apresentadas na forma adimensional, ou seja, como “densidades relativas” (isto é, o resultado da divisão da massa específica do material por $1,0 \text{ g/cm}^3$ – a massa específica da água). No caso de M_F , o resultado se situa entre os valores de 1,55 e 3,50 conforme já citado acima. Tendo em vista que os percentuais passantes em cada peneira estão aproximadamente equidistantes dos limites superior e inferior das suas zonas utilizáveis (Figura 8), o valor de M_F está próximo da média entre os dois limites supracitados.

Tabela 6 – Dados técnicos dos agregados (frações graúda e miúda) e do cimento Portland utilizados na fabricação dos *pavers*

descrição da variável	NBR e referência	valor normalizado
densidade relativa do cimento Portland	NM 23 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001b)	3,12
densidade relativa do agregado miúdo	NM 52 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b)	2,24
densidade relativa do agregado graúdo	NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a)	2,75
taxa de absorção de água pelo agregado miúdo (%)	NM 30 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a)	0,68
taxa de absorção de água pelo agregado graúdo (%)	NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a)	0,52
diâmetro máximo nominal do agregado graúdo (mm)	-	25,00

Fonte: Os autores (2019)

3.2. BLOCOS DE CONCRETO E SEUS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Em termos dos *pavers*, os principais ensaios requisitados pela norma NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) são os seguintes: (a) resistência à compressão; e (b) absorção de água. O ensaio de resistência do corpo de prova à abrasão é facultativo, de modo que não foi incluído no presente estudo por questões de simplificação. Cada um dos ensaios obrigatórios para estes blocos estão descritos resumidamente a seguir.

3.2.1. Resistência Característica à Compressão

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão, os corpos de prova foram saturados em água à temperatura de $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ por um período mínimo de 24 h anterior ao ensaio. As superfícies de carregamento foram regularizadas para garantir uma homogeneização da transmissão das cargas aplicadas pela prensa. Tendo em vista que a norma NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) não especifica detalhes a respeito dos tipos de regularização das superfícies dos blocos, as técnicas para fazer isto são variadas na literatura. Enquanto

alguns autores como Fioriti (2007) utilizaram chapas de papelão superpostas nas duas faces do *paver*, outros como Kuchta (2017) utilizaram argamassa para realização desta regularização. Para fins deste estudo, foi utilizada uma serra para retirar todas as irregularidades visíveis em cada corpo de prova, conforme exemplo ilustrativo na Figura 9.

Figura 9 – Exemplo de *paver* rompido e com superfície regularizada



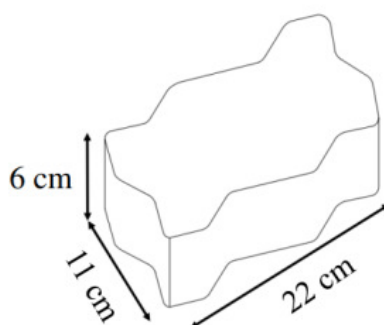
Fonte: Os autores (2019)

Os protocolos de ensaio de resistência à compressão foram executados em uma prensa da marca EmiC, modelo DL30000N, e capaz de aplicar cargas uniaxiais de até 300 kN. Tais cargas foram incrementadas continuamente a uma velocidade de 550 kPa/s, com variação máxima de 200 kPa/s. O processo foi seguido até a ruptura completa da amostra. Após esta etapa, a resistência à compressão (em MPa) foi multiplicada por um fator de correção p conforme Tabela 7, que é uma função da espessura do *paver*. Considerando as dimensões dos *pavers* designados como “16 faces” e do “Tipo I” fabricados na pesquisa (Figura 10), conclui-se que o valor adotado para o fator p foi igual a 0,95. Cálculos realizados no programa computacional *AutoCAD*[®] apontaram uma área superficial de 0,0230 m² para cada bloco.

Tabela 7 – Fatores de correção (p) da resistência dos blocos de concreto à compressão em função da sua espessura

espessura nominal da peça (mm)	p
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013)

Figura 10 – Dimensões dos *pavers* de 16 faces preparados no estudo

Fonte: Os autores (2019)

Admite-se estatisticamente que as resistências de várias amostras à compressão segue uma distribuição normal, ou seja, suas resistências individuais à compressão (f_{pi}) devem ser avaliadas em termos de um valor médio (f_p), um desvio-padrão amostral (s) conforme Equação (1) e um coeficiente t de Student, sendo este último uma função do tamanho do conjunto de amostras (n , vide Tabela 8). Segundo a norma NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), são necessárias ao menos seis amostras ($n = 6$) para a realização dos experimentos de resistências à compressão, valor este escolhido para a pesquisa. Portanto, a resistência característica estimada à compressão ($f_{pk, est}$) pôde ser calculada conforme Equação (2).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_p - f_{pi})^2}{n - 1}} \quad (1)$$

Tabela 8 – Valores do coeficiente t de Student em função do número de amostras no conjunto ensaiado (n)

n	t
6	0,920
7	0,906
8	0,896
9	0,889
10	0,883
12	0,876
14	0,870
16	0,866

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013)

$$f_{pk,est} = f_p - t \times s \quad (2)$$

O valor mínimo de $f_{pk,est}$ para os *pavers* aos 28 dias deve ser de 35 MPa para que tráfegos leves sejam suportados, e de pelo menos 50 MPa para adequação a tráfegos pesados. Caso os ensaios de resistência à compressão sejam feitos antes dos 28 dias de cura (por exemplo, aos sete dias), tais resistências devem ser pelo menos 80% dos valores máximos definidos aos 28 dias no momento da instalação dos blocos no pavimento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). Esta possibilidade de adiantamento dos ensaios não foi considerada no presente estudo, diferentemente de outros como o de Kuchta (2017), o qual ensaiou *pavers* preparados com cimento Portland do tipo CPV-ARI aos 21 dias. Desta maneira, para fins de padronização, todos os blocos desta pesquisa foram ensaiados no período regular de 28 dias.

Além do protocolo padrão definido pela norma brasileira NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), também foi feita uma avaliação das resistências dos *pavers* à compressão segundo um procedimento de eliminação de dados espúrios. Neste caso, os intervalos de valores de f_{pi} foram tratados estatisticamente para verificação dos valores individuais mais representativos de cada traço, considerando um limite de erro de \pm uma vez o desvio-padrão amostral s em relação ao valor médio $f_{pk,med}$ (VUOLO, 1996). Para os casos em que quatro ou mais amostras por teor de PE+PET (66,77% dos dados) estão situadas dentro do referido intervalo, o cálculo de $f_{pk,med}$ não foi refeito. Em caso contrário, os dados espúrios foram retirados até que se obtivesse ao menos 66% dos valores de f_{pi} dentro do intervalo $f_{pk,med} \pm s$.

3.2.2. Absorção de Água

Neste ensaio, os corpos de prova foram primeiramente saturados em água por um período de 24 h à temperatura de $(23 \pm 5)^{\circ}\text{C}$, sendo depois submetidos a pesagens constantes e espaçadas de 2 h entre si. Em outras palavras, os blocos imersos em água foram retirados, drenados em uma tela metálica por 1 min e tiveram suas superfícies secadas com um pano antes da anotação da massa. Em seguida, cada *paver* retornou ao banho e depois de 2 h o processo foi repetido, com a nova

massa sendo anotada. Quando os valores individuais não diferiram de mais de 0,5% entre si, a massa saturada do bloco (m_2 , em g) foi então anotada.

Posteriormente, tais blocos foram colocados em uma estufa à temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ por 24 h, sendo então pesados individualmente e os seus respectivos valores de massa, anotados. Após um período de tempo de 2 h, a pesagem foi novamente feita para cada *paver*. Quando os valores individuais não diferiram de mais de 0,5% entre si, a massa seca do bloco (m_1 , em g) era então registrada. A taxa de absorção de água Ab foi determinada para cada traço de acordo com a Equação (3). Segundo a norma brasileira NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), ao menos três amostras são necessárias para condução dos ensaios de absorção de água em laboratório. Nenhum dos valores individuais das taxas de absorção pode superar os 7% e o valor de Ab não deve superar os 6% para que o *paver* seja considerado adequado em pavimentos.

$$Ab(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (3)$$

3.2.3. Quantitativos dos Corpos de Prova e Especificações do PE+PET

A Tabela 9 resume a matriz inicial de quantitativos mínimos desejados para os *pavers* submetidos aos ensaios de resistência à compressão e de absorção de água, considerando os valores referenciais da NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) e que foram seguidos integralmente nesta pesquisa. Cumpre ressaltar que o PE+PET substituiu a fração miúda dos agregados em todos os traços selecionados, tendo em vista as recomendações feitas por outros pesquisadores (vide Capítulo 2).

É importante lembrar que a escolha do tipo de bloco foi feita com base nos seus bons resultados em outras pesquisas (FIORITI, 2007; PIRES, 2015; KUCHTA, 2017), bem como nas recomendações feitas na literatura com relação ao seu padrão de assentamento e ao uso em vias de tráfego pesado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013; INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE, 2014; SHACKEL, 1980). Finalmente, os corpos de prova designados como “reserva” foram moldados para o caso de uma ou outra amostra ter apresentado

ruptura precoce no ensaio de resistência à compressão, isto é, se a sua resistência individual f_{pi} tiver apresentado valores de até 20 MPa.

Tabela 9 – Matriz dos quantitativos de ensaios com os blocos de concreto do “Tipo I” e segundo as recomendações mínimas da norma NBR 9781

teor de PE+PET (%)	designação	números de réplicas		
		resistência à compressão	absorção	reserva técnica
0,0	<i>T0</i> (referência)	6	3	1
1,0	<i>T1</i>	6	3	1
2,0	<i>T2</i>	6	3	1
3,0	<i>T3</i>	6	3	1
4,0	<i>T4</i>	6	3	1
5,0	<i>T5</i>	6	3	1
10,0	<i>T6</i>	6	3	1
TOTAIS DE ENSAIOS		42	21	7

Fontes: Os autores (2019) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013)

O modificador caracterizado como uma blenda de PE+PET foi fornecido na forma de *pellets* e por uma empresa parceira. Seus dados técnicos incluem uma temperatura de fusão igual a 190°C, cor verde-claro a escuro e uma densidade aproximadamente igual a 0,60 g/mL a partir de três réplicas determinadas em proveta. A granulometria é dada por 41,95% das partículas passantes na #4 (4,76 mm), 0,13% passantes na #8 (2,40 mm) e o restante sendo integralmente retido na #16 (1,20 mm). Tais dados posicionam a blenda de PE+PET como uma mistura aproximadamente semelhante entre partículas graúdas e miúdas de agregados. No entanto, apenas a fração miúda dos agregados convencionais foi substituída pelo PE+PET, conforme já explicado acima.

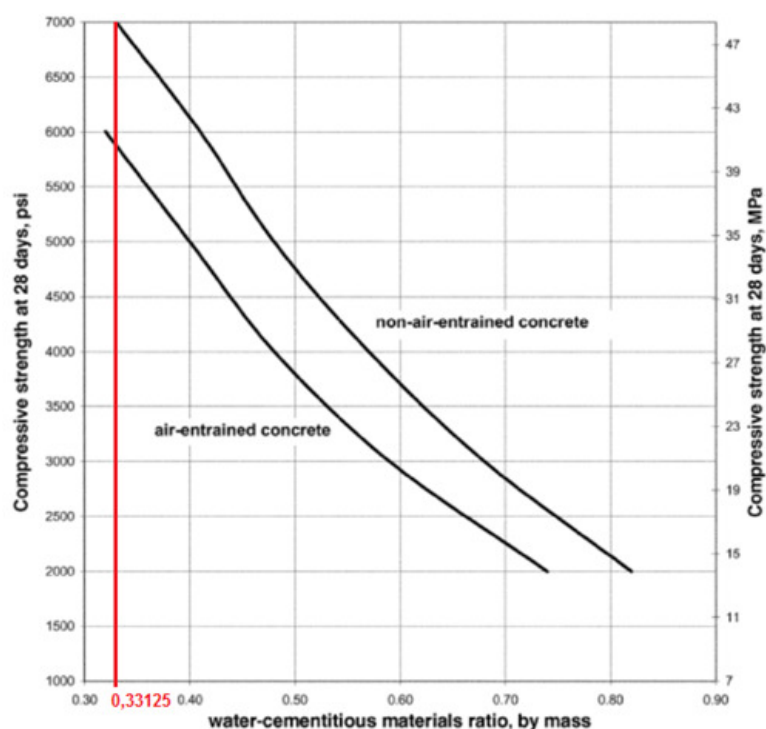
3.3. DOSAGENS DOS CONCRETOS COM E SEM PE+PET

Para a definição do traço inicial do concreto *T0* e a busca pela resistência inicial desejada, foi utilizada a metodologia proposta no manual do American Concrete Institute (2002). Esta escolha foi fundamentada na possibilidade de se obter concretos de alta resistência (acima de 40 MPa), além de o referido método ser simples e

intuitivo. Foram assumidas as variáveis iniciais dadas pela resistência à compressão desejada após 28 dias de cura (7.000 psi ou aproximadamente 48,3 MPa) e pelo tipo de concreto como sendo “seco” (*stiff*) e “sem ar incorporado” (*non-air-entrained concrete*). Desta maneira, os demais elementos foram selecionados conforme explicado nos itens subsequentes.

- **Fator água/cimento:** Inicialmente, foi definida a relação a/c em função da resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias e do tipo de concreto preparado no estudo. Como mostrado na Figura 11, o valor inicial de a/c foi determinado como sendo aproximadamente igual a 0,33 para as variáveis de entrada supracitadas. É importante ressaltar que este valor de a/c não considera o efeito da água incorporada pelos agregados, a qual foi acrescentada posteriormente.

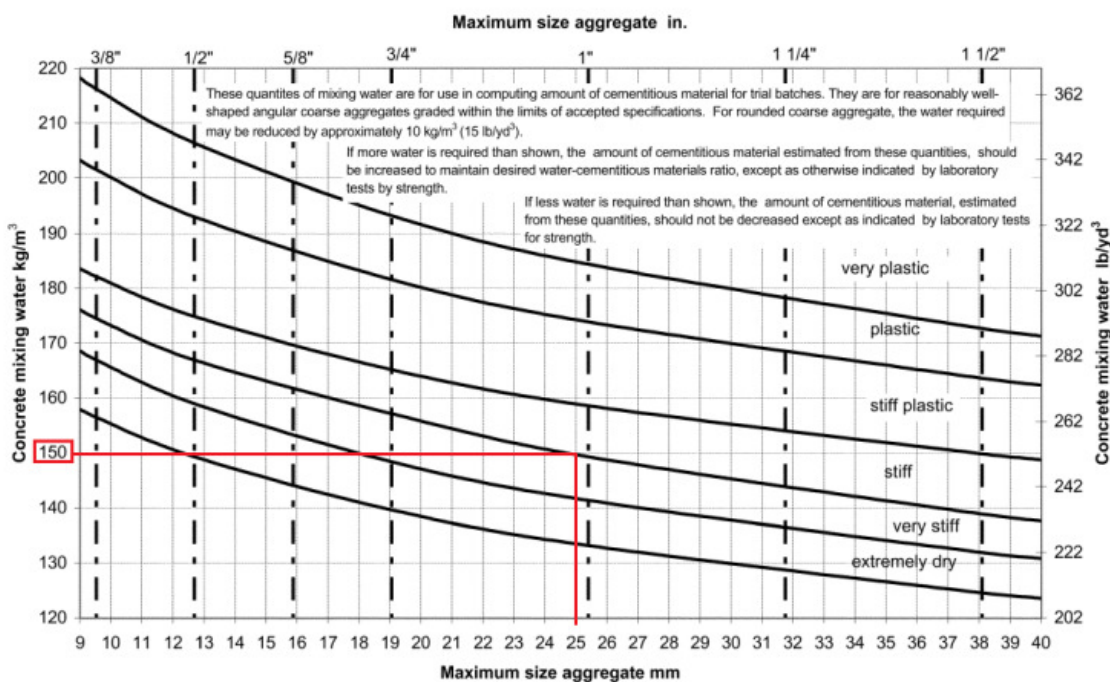
Figura 11 – Fator água/cimento inicial em função dos parâmetros de entrada



Fontes: Os autores (2019) e American Concrete Institute (2002)

- **Cálculo do consumo de água do concreto por m^3 :** A Figura 12 mostra o valor do consumo aproximado de água por m^3 de concreto a partir das considerações sobre o tipo de concreto (*stiff*) e o valor do diâmetro máximo nominal D_m (25 mm). Desta maneira, concluiu-se que haveria um consumo estimado de 150 kg de água para $1,0 m^3$ de concreto produzido.

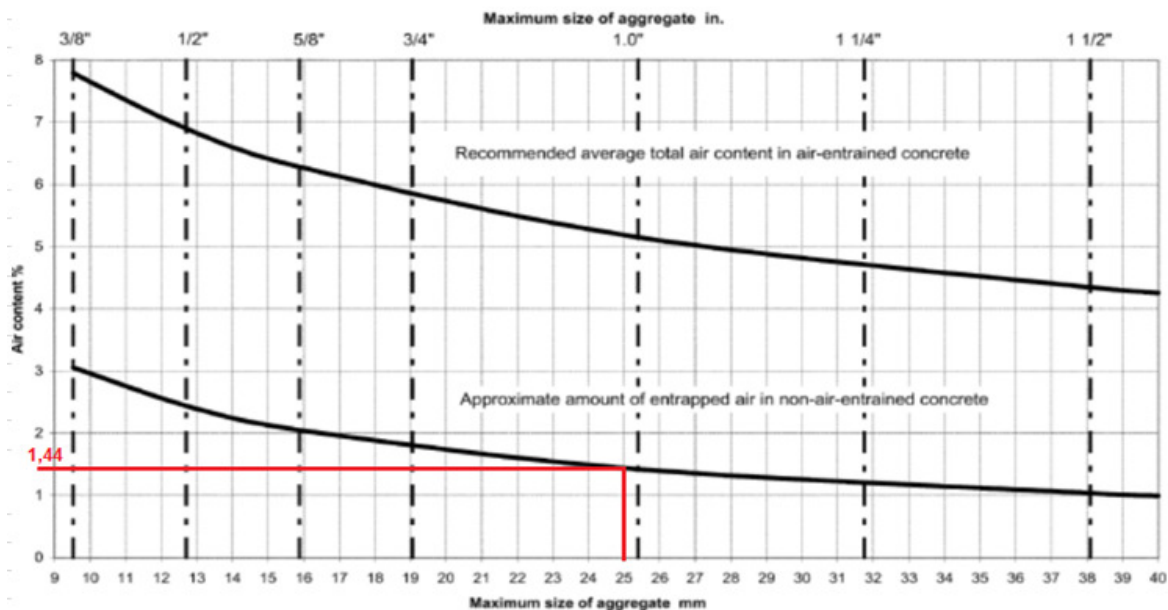
Figura 12 – Estimativa do consumo de água por m^3 em função dos parâmetros de entrada



Fontes: Os autores (2019) e American Concrete Institute (2002)

- **Teor de ar incorporado:** O teor de ar incorporado (1,44%) foi estimado pelo ábaco da Figura 13 em função do diâmetro máximo nominal do agregado ($D_m = 25$ mm) e do tipo do concreto (*non-air-entrained concrete*).

Figura 13 – Teor de ar incorporado em função dos parâmetros de entrada



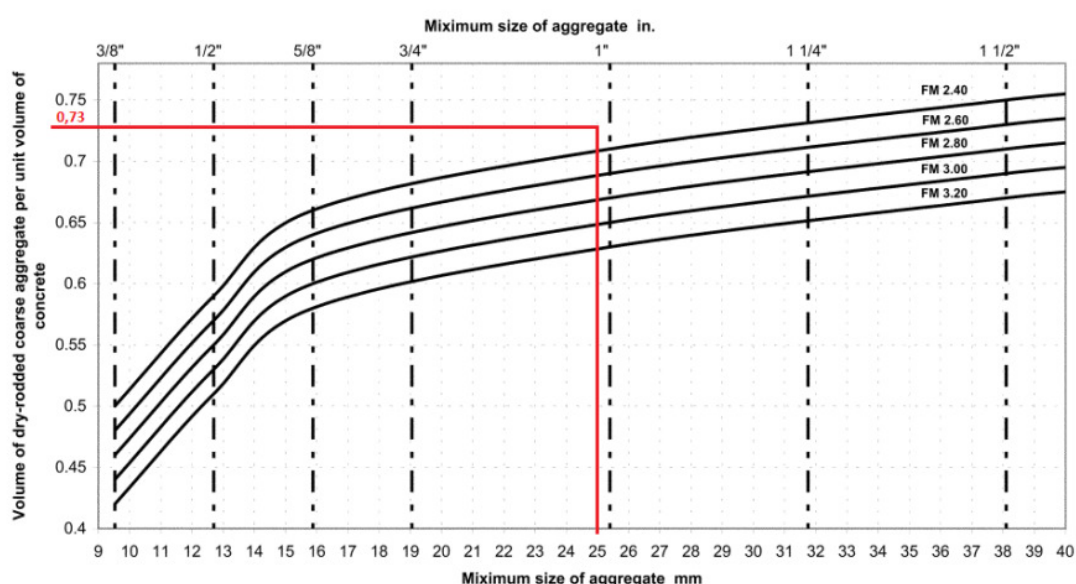
Fontes: Os autores (2019) e American Concrete Institute (2002)

- Cálculo do consumo de cimento:** De posse do fator água/cimento (a/c) definido na Figura 11 e da quantidade necessária de água para o concreto (Figura 12), foi possível calcular diretamente a quantidade de cimento para a produção de $1,0 \text{ m}^3$ de concreto. Os cálculos foram feitos conforme Equação (4), em que C é o consumo de cimento por m^3 , ρ é a massa específica do cimento (Tabela 6) e C_a é o consumo de água por m^3 (Figura 12). Destes cálculos, verificou-se que o consumo estimado de cimento para $1,0 \text{ m}^3$ de concreto é aproximadamente $0,1457 \text{ m}^3$ (ou $454,58 \text{ kg/m}^3$).

$$C = \frac{C_a}{(a/c)} \times \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

- Cálculo do consumo de agregado graúdo:** A quantidade de consumo de agregado graúdo por unidade de volume de concreto é definida em função do diâmetro máximo nominal deste agregado ($25,0 \text{ mm}$) e do módulo de finura do material miúdo (M_F), conforme ábaco da Figura 14. Considerando que as linhas de M_F possuem um valor mínimo superior ao obtido nos agregados estudados ($2,40$), foi aproximada uma curva para $M_F = 2,20$ e o resultado foi de aproximadamente $0,73$.

Figura 14 – Obtenção do consumo de agregado graúdo por unidade volumétrica de concreto

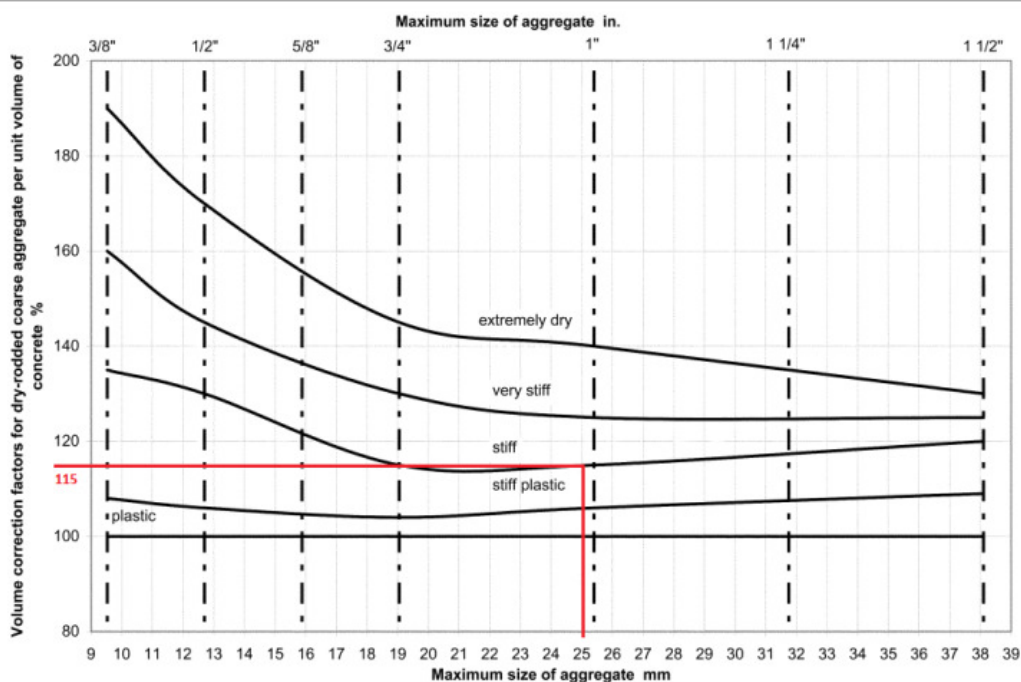


Fontes: Os autores (2019) e American Concrete Institute (2002)

Para o caso de concretos que não sejam do tipo plásticos, há a necessidade de se corrigir o consumo de agregado graúdo por um fator de correção fornecido pelo

ábaco da Figura 15, que é uma função exclusiva do tipo de concreto (neste caso, *stiff*) e do diâmetro máximo nominal ($D_m = 25,0$ mm). Para as variáveis selecionadas na pesquisa, verificou-se que este fator é igual a 115%.

Figura 15 – Fator de correção do consumo de agregado graúdo por unidade volumétrica de concreto



Fontes: Os autores (2019) e American Concrete Institute (2002)

- Determinação dos volumes:** Prosseguiu-se então para os cálculos dos volumes de cimento, água, agregados graúdos e ar. Para o volume de cimento e agregado graúdo, basta fazer o quociente do consumo encontrado nas etapas anteriores pela densidade relativa do material multiplicada pela massa específica da água em kg/m^3 . No caso do volume de água, basta dividir a quantidade de água encontrada pela massa específica da água em kg/m^3 . O volume de ar corresponde ao percentual encontrado no ábaco multiplicado por $1,0 \text{ m}^3$. E, finalmente, determinou-se o volume de agregado miúdo a partir dos volumes de cimento, água, agregado graúdo e ar. Sabe-se que o volume complementar será composto pelo agregado miúdo, ou seja, basta subtrair a soma do volume dos outros materiais de $1,0 \text{ m}^3$ que se obtém o volume de agregado miúdo.
- Água absorvida:** É necessário calcular quanto de água foi absorvida pelo agregado graúdo e miúdo para, assim, somá-la à quantidade previamente

calculada. Neste caso, foi feita a soma dos produtos das massas de cada agregado pela sua respectiva absorção (total de 10,09 kg para 1,0 m³ de concreto).

A Tabela 10 fornece os quantitativos detalhados de materiais para todos os traços avaliados, levando-se também em consideração um quantitativo de 20% de perda por questões de segurança. Como se pode inferir destes dados, foram necessários aproximadamente 273,81 kg de material (incluindo agregado graúdo, agregado miúdo, água e PE+PET) para produzir os 70 corpos de prova considerados na pesquisa, vide Tabela 9. É importante enfatizar também que, dependendo da resistência à compressão obtida para o *paver*, publicações internacionais como Rollings (1983) destacam que os ensaios de absorção de água podem ser desconsiderados das avaliações de desempenho se tais resistências forem iguais ou superiores a 60 MPa. Em termos do aditivo superplastificante selecionado para a pesquisa (tipo MC-POWERFLOW 1095 e fornecido pela MC-Bauchemie Brasil Ltda.), foi definido um teor fixo de 0,25% em massa em relação à quantidade de cimento Portland para todos os traços avaliados.

Tabela 10 – Quantitativos detalhados de materiais para os traços com e sem PE+PET

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

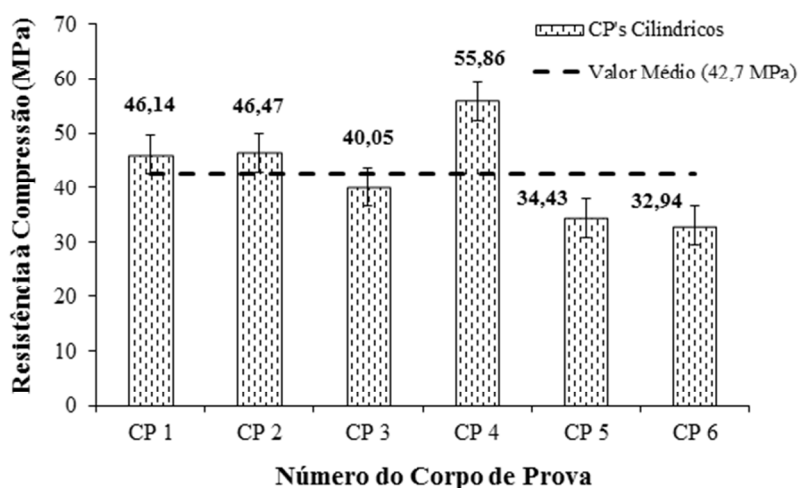
Fonte: Os autores (2019)

De posse dos dados iniciais fornecidos pelos ábacos do método do American Concrete Institute (2002), foi selecionado o traço inicial de 1:1,16:2,73:0,3522 (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, respectivamente) em massa para a dosagem padrão T0. Em seguida, foram preparados seis corpos de prova

cilíndricos de acordo com a norma NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) e ensaiados segundo a norma NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 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 na mesma prensa hidráulica EmiC modelo DL30000N, já previamente selecionada para os experimentos com os *pavers*. Cabe destacar que este tempo mais curto de cura foi escolhido para agilizar o processo de confecção dos *pavers*, bem como efetuar eventuais ajustes no traço caso houvesse necessidade.

Os resultados ilustrados na Figura 16 mostram que, ao se considerar uma distribuição normal e 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 confecção dos blocos, verificou-se que o traço em questão atendia razoavelmente aos requisitos necessários para aplicação dos *pavers* em vias de tráfego pesado, isto é, uma resistência mínima à compressão de 50 MPa aos 28 dias de cura. Isto se deve ao fato de que a NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) preconiza que as resistências à compressão obtidas antes dos 28 dias devem ser pelo menos 80% dos seus valores correspondentes aos 28 dias – ou seja, 40 MPa no caso da presente pesquisa. Em outras palavras, não houve a necessidade de readequações no traço original definido para o concreto.

Figura 16 – Resistências dos corpos de prova cilíndricos de concreto à compressão aos sete dias de cura e preparados com o traço padrão T0



Fonte: Os autores (2019)

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO

A Tabela 11 destaca os resultados de $f_{pk,est}$ e $f_{pk,med}$ para todos os *pavers* ensaiados neste estudo, bem como os seus respectivos intervalos de valores individuais de resistência f_{pi} e as principais variáveis estatísticas – desvio-padrão s e coeficiente de variação CV – segundo a norma brasileira NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013). A tendência geral de decréscimo nesta resistência com o aumento do teor de PE+PET pode ser observada tanto para os valores médios ($f_{pk,med}$) quanto os característicos ($f_{pk,est}$). Além de estar em sintonia com outros experimentos publicados na literatura (BATAYNEH et al., 2007; ISLAM et al., 2016; MODRO et al., 2009; PIRES, 2015; SAIKIA e DE BRITO, 2013), os resultados também sugerem um cenário aproximadamente linear nesta redução da resistência, especialmente para $f_{pk, med}$, conforme equações e respectivos valores de R^2 mostrados na Figura 17. Ressalta-se que regressões lineares têm sido empregadas com sucesso não apenas em blocos com plásticos reciclados (PIRES, 2015), mas também em outros tipos de modificação do concreto como a borracha moída de pneus inservíveis (OHEMENG e YALLEY, 2013).

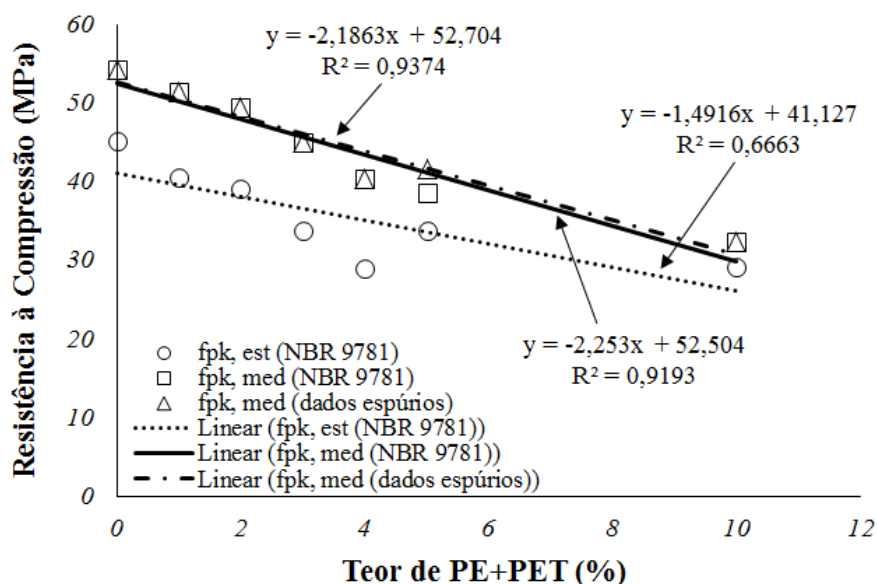
Tabela 11 – Intervalos de valores individuais (f_{pi}) e valores médios ($f_{pk,med}$) e característicos ($f_{pk,est}$) de resistências à compressão dos blocos segundo a norma NBR 9781

traço	teor de PE+PET (%)	f_{pi} (MPa)	$f_{pk,med}$ (MPa)	$f_{pk,est}$ (MPa)	s (MPa) ^a	CV (%) ^a
T0	0,0	38,79 a 66,21	54,55	44,48	10,94	20,05
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.

Fonte: Os autores (2019)

Figura 17 – Correlações lineares entre as resistências médias ($f_{pk,med}$) e características ($f_{pk,est}$) à compressão dos blocos e o teor de PE+PET, com e sem a eliminação de dados espúrios



Fonte: Os autores (2019)

Os menores valores de resistência à compressão com o aumento do teor de PE+PET no bloco podem ser atribuídos a fatores granulométricos e à atuação dos *pellets* na matriz do concreto, dentre outros motivos. No caso da granulometria, os melhores resultados são observados na literatura quando as partículas de plásticos têm diâmetros de até 4,0 mm, vide Frigione (2010), Saikia e De Brito (2013) e Thorneycroft et al. (2018) como alguns exemplos. Em termos da atuação do PE+PET na matriz do concreto, a flexibilidade das partículas de plásticos atuando como agregado miúdo – aliado a um bom intertravamento dependendo do formato das mesmas – podem acarretar a manutenção ou até mesmo incrementos nesta resistência, o que tem sido verificado para teores de até 5% em volume (RAHMANI et al., 2013). Em outras palavras, a granulometria mais grossa do modificador nesta pesquisa possivelmente afetou a interação entre as partículas de agregados convencionais, evitando um intertravamento apropriado dos *pellets* e dos agregados no concreto mesmo com a substituição apenas da fração miúda pelo PE+PET.

Outra questão vinculada diretamente ao uso de agregados plásticos no concreto – e que costuma ser mais visível para teores altos destes agregados e partículas mais grossas – consiste na perda de adesão da argamassa ao agregado convencional, o que dificulta a homogeneização e prejudica a resistência final do concreto (ALBANO et al., 2009; PACHECO-TORGAL et al., 2012; RAHMANI et al., 2013; SAIKIA e DE BRITO,

2013; SHARMA e BANSAL, 2016). Em casos mais extremos, cavidades se tornam visíveis nos corpos de prova por conta da trabalhabilidade baixa do concreto com plásticos e afetam ainda mais esta resistência (ALBANO et al., 2009). Em termos do presente estudo, pode-se atribuir ao menos parte da perda da resistência à compressão à falta de aderência entre a argamassa e o agregado convencional, especialmente para teores mais elevados (5 e 10% de PE+PET). Todavia, nenhum dos corpos de prova com PE+PET mostrou cavidades na sua textura superficial devido à seleção de métodos apropriados de homogeneização para os concretos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), conforme exemplo de textura superficial mostrado na amostra da Figura 18.

Figura 18 – Amostra de *paver* e visualização da sua textura superficial



Fonte: Os autores (2019)

Apesar das perdas da resistência à compressão, outros autores apontam que a utilização de plásticos com módulo de elasticidade elevado como o PET (GU e OZBAKKALOGLU, 2016) pode contribuir para decréscimos relativamente menores nesta resistência, sobretudo quando os teores são de no máximo 2%. Isto se verificou empiricamente na pesquisa, pois tanto $f_{pk,est}$ quanto $f_{pk,med}$ mostraram diminuições entre 5,0 e 6,0 MPa – em média – para o traço $T2$ em relação ao traço padrão $T0$. Neste aspecto, Saikia e De Brito (2013) sugerem que tais reduções na resistência à compressão do concreto tendem a ser menores quando os plásticos são utilizados como agregados finos ou *pellets*, especialmente para teores de até 10% em volume.

A Tabela 12 mostra os resultados corrigidos de $f_{pk,med}$ segundo o protocolo estatístico para eliminação dos dados espúrios definido no Capítulo 3 (VUOLO,

1996), bem como os novos valores de s e CV . É possível visualizar que, à exceção do traço $T5$, todos os demais traços não tiveram alterações em seus valores de $f_{pk,med}$ e, por consequência, nos desvios-padrão amostrais (s). 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 17. Os traços $T0$ e $T1$ continuam apresentando os melhores resultados para os *pavers* modificados com a blenda de PE+PET, sendo $f_{pk,med}$ superior a 50 MPa para ambos.

Tabela 12 – Novos intervalos de resultados individuais (f_{pi}) e médios ($f_{pk,med}$) de resistências à compressão dos *pavers* após eliminação dos dados espúrios

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

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

Fonte: Os autores (2019)

Pode-se também inferir dos dados presentes nas Tabelas 11 e 12 que, caso o protocolo definido pela NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) contemplasse o parâmetro $f_{pk,med}$ em vez do parâmetro $f_{pk,est}$, tanto os *pavers* fabricados com o concreto padrão ($T0$) quanto os fabricados com 1% de PE+PET ($T1$) poderiam ser utilizados em vias com tráfego pesado – resistência mínima à compressão igual a 50 MPa. Em termos do protocolo atualmente em vigor nesta mesma norma, tanto o traço padrão quanto os traços com 1 e 2% de PE+PET ($T0$, $T1$ e $T2$) apresentam resultados compatíveis com a aplicação dos *pavers* em vias sujeitas a tráfego leve – resistência mínima à compressão igual a 35 MPa. Isto sinaliza uma compatibilidade técnica entre a modificação do concreto com plásticos reciclados e a sua aplicação em revestimentos de pavimentos, viabilizando uma destinação adicional e correta a tais materiais.

4.2. TAXAS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

A Tabela 13 resume os resultados de absorção de água (Ab) dos blocos com e sem PE+PET e segundo a norma NBR 9781 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 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 avaliados, não havendo um padrão específico de comportamento de Ab com o aumento da quantidade de PE+PET. Sob um ponto de vista normativo, nenhum traço é considerado inadequado para uso em pavimentos porque $Ab \leq 6\%$ e $Ab_i \leq 7\%$.

Tabela 13 – Intervalos de resultados individuais (Ab_i) e médios (Ab) para as taxas de absorção de água dos *pavers* estudados, em função do teor de PE+PET

traço	teor de PE+PET (%)	Ab_i (%)	Ab (%)	s (%) ^a	CV (%) ^a
T0	0,0	2,48 a 2,55	2,52	0,05	1,86
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.

Fonte: Os autores (2019)

Cabe destacar que valores baixos de absorção sinalizam a presença de poucos vazios no concreto e, de uma forma indireta, uma porosidade baixa para o material. De acordo com 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. Ainda segundo os mesmos autores, o uso de plásticos com granulometrias diferentes das do agregado miúdo convencional – caso do presente estudo – tendem a estabelecer uma porosidade própria e diferenciada do concreto sem plásticos. Esta constatação pode explicar a falta de correlação entre Ab e os teores de PE+PET, diferentemente do observado para $f_{pk,med}$ e $f_{pk,est}$.

Outro destaque importante diz respeito à pequena variação de Ab com o aumento do teor de PE+PET nos blocos, o que também se confirmou em outras pesquisas com agregados plásticos na forma de *pellets* como Saikia e De Brito (2013). Neste aspecto, não é possível atribuir as reduções 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 na matriz do concreto – e outras justificativas merecem ser investigadas. Como enfatizado anteriormente, tais justificativas incluem a falta de intertravamento entre os *pellets* de PE+PET e os agregados, a baixa resistência do plástico em relação ao agregado convencional e a perda da adesão da argamassa aos agregados.

5. PRINCIPAIS CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS

O presente trabalho investigou a viabilidade técnica do emprego de uma blenda (ou mistura) de PE+PET processada industrialmente em um concreto de alta resistência – valores mínimos de 40 MPa – e destinado à fabricação de blocos de concreto para pavimentos intertravados (*pavers*). Tal viabilidade foi verificada em termos de duas propriedades obrigatórias para os blocos na norma brasileira NBR 9781 após 28 dias de cura, sendo elas a resistência característica à compressão ($f_{pk,est}$) e a taxa de absorção de água (Ab). Uma dosagem inicial do concreto foi feita segundo protocolos de normas norte-americanas, e um valor médio de aproximadamente 42,7 MPa foi obtido para o traço padrão $T0$. Teores de 1, 2, 3, 4, 5 e 10% de PE+PET em volume em substituição à fração miúda dos agregados foram escolhidos com base em sugestões da literatura, e os traços correspondentes $T1$, $T2$, $T3$, $T4$, $T5$ e $T6$ foram preparados. Neste aspecto, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- o uso da blenda de PE+PET nos *pavers* acarretou reduções nos valores de $f_{pk,est}$ e nas resistências médias à compressão $f_{pk,med}$, mesmo para teores baixos deste tipo de plástico (até 10% em volume); tais reduções seguiram uma tendência aproximadamente linear com o aumento do teor de PE+PET conforme tendências da literatura científica, especialmente no caso de $f_{pk,med}$ (correlações melhores);
- apesar destas reduções na resistência à compressão, os teores mais baixos de PE+PET (1 e 2%, traços $T1$ e $T2$) não mostraram impactos expressivos nos resultados de $f_{pk,est}$ e $f_{pk,med}$: tais reduções foram de 54,55 para 49,36 MPa no caso de $f_{pk,med}$ (9,51% em termos percentuais) e de 44,48 para 39,08 MPa no caso de $f_{pk,est}$ (12,14% em termos percentuais), o que indica a viabilidade técnica do uso de ambos os teores de plásticos em *pavers* sujeitos a cargas de tráfego leve segundo a mesma norma NBR 9781;
- caso a resistência média à compressão $f_{pk,med}$ fosse contemplada como um parâmetro oficial de verificação da viabilidade da aplicação dos *pavers* em vias sujeitas aos carregamentos do tráfego, tanto o traço padrão $T0$ quanto o traço com 1% de PE+PET ($T1$) seriam considerados como tecnicamente viáveis para vias sujeitas a tráfego pesado, para as quais a resistência mínima à compressão deve ser de 50 MPa;

- em termos das taxas de absorção de água, nenhum dos traços avaliados neste trabalho superou os limites máximos de 6 e 7% para os valores médios (Ab) e individuais (Ab_i), respectivamente; isto indica que todos os *pavers* seriam capazes de suportar eventuais ciclos de gelo-degelo sem registrar danos à resistência do concreto; e
- a presença do PE+PET no concreto não acarretou impactos expressivos nas taxas de absorção de água, pois os resultados de Ab oscilaram entre 2,1 e 3,2% e os de Ab_i , entre 1,9 e 4,8% para todos os traços estudados.

Em um aspecto geral, percebe-se que o uso de plásticos reciclados em blocos de concreto para pavimentação e com os agregados selecionados é tecnicamente viável, desde que o modificador seja escolhido corretamente e os teores sejam compatíveis com a resistência esperada para o bloco. Em termos da possibilidade do uso destes *pavers* em vias de tráfego pesado, acredita-se que ajustes no traço original, na produção das amostras e no tipo de agregado a ser substituído pelos plásticos poderiam permitir tal utilização segundo os critérios da NBR 9781. No entanto, devido à limitação do escopo do presente trabalho, faz-se a sugestão dos ajustes supracitados como um tema de pesquisa futura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALBANO, C.; CAMACHO, N.; HERNÁNDEZ, M.; MATHEUS, A.; GUTIÉRREZ, A. 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, 2009. doi: 10.1016/j.wasman.2009.05.007.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for selecting proportions for no-slump concrete**. 26 p. Report No. ACI 21.3R-02. Farmington Hills: ACI, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **Censo da reciclagem do PET no Brasil**. 10. ed. São Paulo: ABIPET, 2016. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>>. Acesso em: 26 out. 2018.

_____. **Indústria do PET no Brasil: mercado, perspectivas, reciclagem**. São Paulo: ABIPET, 2013. Disponível em: <www.abipet.org.br/indexAjax.html?method=baixarArquivo&id=392>. Acesso em: 11 set. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de pavimento intertravado: passeio público**. 36 p. São Paulo: ABCP, 2010. Disponível em: <<http://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2012/08/ManualPavimentoIntertravado.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. 8 p. **NBR NM 53**, Rio de Janeiro, 2003a.

_____. Agregado miúdo – determinação da absorção de água. 3 p. **NBR NM 30**, Rio de Janeiro, 2001a.

_____. Agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. 6 p. **NBR NM 52**, Rio de Janeiro, 2003b.

_____. Agregados – determinação da composição granulométrica. 6 p. **NBR NM 248**, Rio de Janeiro, 2003c.

_____. Agregados para concreto – especificação. 11 p. **NBR 7211**, Rio de Janeiro, 2005.

_____. Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. 5 p. **NBR NM 23**, Rio de Janeiro, 2001b.

_____. Concreto – ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. 4 p. **NBR 5739**, Rio de Janeiro, 1994.

_____. Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 9 p. **NBR 5738**, Rio de Janeiro, 2015.

_____. Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio. 21 p. **ABNT NBR 9781**, Rio de Janeiro, 2013. ISBN 978-85-07-03929-7.

BARBOZA, M. R.; BASTOS, P. S. Traços de concreto para obras de pequeno porte. **Concreto e Construção**, v. 36, p. 32-36, 2008.

BARROS, C. **Apostila de polímeros**. 15 p. Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense, 2011. Disponível em: <<https://edificacoes.files.wordpress.com/2011/04/apo-polimeros-completa-publicac3a7c3a3o.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2018.

BATAYNEH, M.; MARIE, I.; ASI, I. Use of selected waste materials in concrete mixes. **Waste Management**, v. 27, n. 12, p. 1870-1876, 2007. doi: 10.1016/j.wasman.2006.07.026.

BEATY, A. N. S. Predicting the performance of bedding sands. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVEMENTS, 4, Auckland, 1992. **Proceedings...** Auckland: ICPI, p. 273-284, 1992. Disponível em: <https://www.icpi.org/sites/default/files/resources/technical-papers/59_0.pdf>. Acesso em: 25 out. 2018.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 504 f. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2006.

BITTENCOURT, R. G. S.; ARNS, P. **Dimensionamento de pavimento flexível intertravado para tráfego muito pesado**. 21 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014.

CÂNDIDO, L. F.; BARRETO, J. M. L.; CABRAL, A. E. B. Avaliação de blocos de concreto produzidos com PET reciclado. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15, Maceió, 2014. **Anais...** Maceió: ANTAC/UFAL, p. 2423-2432, 2014. doi: 10.17012/entac2014.57.

CARVALHO, M. D. **Estudo técnico – pavimentação com peças pré-moldadas de concreto**. São Paulo: ABCP, 1998.

CASTRO, C. A. A. **Estudo da técnica de anti-pó com emulsão de xisto em pavimentos para baixo volume de tráfego**. 188 p. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

COELHO, T. M.; CASTRO, R.; GOBBO JR, J. A. 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, 2011. doi: 10.1016/j.resconrec.2010.10.010.

CREMONINI, R. A.; DAL MOLIN, D. C. C.; CECCATTO, D. M.; MANCIO, M.; GOULART, J. Desenvolvimento de um método de dosagem de concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43, Foz do Iguaçu, 2001. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. Disponível em: <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e5/Heloisa_Campos_Material_Complementar_Dosagem_CAR.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2019.

CRUZ, L. O. M. **Pavimento intertravado de concreto: estudo dos elementos e métodos de dimensionamento**. 281 p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. 6 p. **DNER-ME 035/98**, Rio de Janeiro, 1998.

EICH, J. K.; SILVA, J. C.; LEITE, L. G. **Estudo de traço de pavimento intertravado de concreto permeável**. 103 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

EMERY, J. A. Concrete pavers for aircraft pavement surfaces. **Journal of Transportation Engineering**, v. 112, n. 6, p. 609-623, 1986. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1986)112:6(609).

FIORITI, C. F. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduo de pneus como material alternativo**. 202 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. doi: 10.11606/T.18.2007.tde-27092007-184727.

FOLHA IMOBILIÁRIA. **Centro de Blumenau virou referência**. Folha de Londrina, Londrina, Imobiliária & CIA, 24 fev. 2002. Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20190705192335/https://www.folhadelondrina.com.br/imobiliaria-e-cia/centro-de-blumenau-virou-referencia-383934.html>>. Acesso em: 05 jul. 2019.

FORMIGONI, A. **Reciclagem de PET no Brasil**. 70 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Paulista, 2006.

FRIGIONE, M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 6, p. 1101-1106, 2010. doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.030

GU, L.; OZBAKKALOGLU, T. Use of recycled plastics in concrete: a critical review. **Waste Management**, v. 51, p. 19-42, 2016. doi: 10.1016/j.wasman.2016.03.005.

INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA. **Malha viária – por tipo de pavimento**. IPPUC, Curitiba, 2012. Disponível em: <<http://infocuritiba.ippuc.org.br/imp/imp.php?page=consulta>>. Acesso em: 11 set. 2018.

INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE. **Structural design of interlocking concrete pavement for roads and parking lots**. Technical Specification No. 4. Chantilly: ICPI, 2014.

ISLAM, M. J.; MEHERIER, M. S.; ISLAM, A. K. M. R. Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 946-951, 2016. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.128.

KNAPTON, J. The civil aviation authority recommendations for the use of pavers on aircraft pavements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVEMENTS, 5, Tel Aviv, 1996. **Proceedings...** Tel Aviv: ICPI, p. 493-500, 1996. Disponível em: <https://www.icpi.org/sites/default/files/resources/technical-papers/702_0.pdf>. Acesso em: 23 out. 2018.

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.

LING, T.-C.; NOR, H. M.; HAININ, M. R.; CHICK, A. A. Laboratory performance of crumb rubber concrete block pavement. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 10, n. 5, p. 361-374, 2009. doi: 10.1080/10298430802342740.

MADRID, G. G. Acredite: rodovias com intertravados já são realidade. **Revista Prisma**, São Paulo, Edição No. 10, 2004. Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20190524182741/http://www.revistaprisma.com.br/teste2/prisma/Textos.asp?i452d=59&cor=>>>. Acesso em: 24 mai. 2019.

McQUEEN, R. D.; KNAPTON, J.; EMERY, J.; SMITH, D. R. **Airfield pavement design with concrete pavers: a comprehensive guide.** 4. ed. US Version. Chantilly: Interlocking Concrete Pavement Institute, 2012.

MEHTA, P. K.; AITCIN, P. C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 12, n. 2, p. 70-78, 1990. doi: 10.1520/CCA10274J.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Perfil de brita para a construção civil.** 30 p. Relatório Técnico No. 30. Brasília: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2009.

MODRO, N. L. R.; MODRO, N. R.; MODRO, N. R.; OLIVEIRA, A. P. N. Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET. **Revista Matéria**, v. 14, n. 1, p. 725-736, 2009.

NABESHIMA, C. K. Y., ORSOLIN, K., SANTOS, R. K. X. **Análise comparativa entre sistemas de pavimentação urbana baseados em concreto asfáltico e blocos de concreto intertravados (pavers).** 122 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação

em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

NAIK, T. R.; SINGH, S. S.; HUBER, C. O.; BRODERSEN, B. S. Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 10, p. 1489-1492, 1996. doi: S0008-8846(96)00135-4.

OHEMENG, E. A.; YALLEY, P. P.-K. Models for predicting the density and compressive strength of rubberized concrete pavement blocks. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 656-661, 2013. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.080.

PACHECO-TORGAL, F.; DING, Y.; JALALI, S. 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.; GHOSH, A. K. Structural behavior of concrete block paving. II: concrete blocks. **Journal of Transportation Engineering**, v. 128, n. 2, p. 130-135, 2002. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:2(130).

PIJOOS, L. **Protesters barricade roads in QwaQwa with burning tyres and rocks**. News24, South Africa, 02 jun. 2018. Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20180211071534/https://www.news24.com/SouthAfrica/News/protesters-barricade-roads-in-qwaqwa-with-burning-tyres-and-rocks-20180206>>. Acesso em: 11 fev. 2018.

PIRES, G. W. M. O. **Avaliação de blocos intertravados manufaturados com concreto dosado com resíduos de PET como alternativa sustentável na construção civil**. 113 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Sustentabilidade) – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2015.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. Dimensionamento de pavimentos com blocos intertravados de concreto. **IP-06/2004**, Instrução de Projeto. São Paulo, 2004.

PREFEITURA DE VALINHOS. **Estrada da Boiada fica interdita para obras até 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.; 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. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1990)116:5(615).

RAHMANI, E.; DEHESTANI, M.; BEYGI, M. H. A.; ALLAYARI, H.; NIKBIN, I. M. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1302-1308, 2013. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041.

REDDY, M. S.; REDDY, Y. R.; TAKHELMAYUM, G. Experimental investigation on the properties of cement concrete pavement using waste plastic. **International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering**, v. 3, special issue 1, p. 419-431, 2017.

REIS, N. G. **Deficiências de rodovias, filas e restrições urbanas elevam custos**. Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística, São Paulo, 2014. Disponível em:

<<http://web.archive.org/web/20190705191001/http://www.ntctec.org.br/media/files/artigos/rodovias-restricoes-estadia.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2019.

RHINO PISOS. **Piso intertravado pavimenta rodovia**. Notícias, 27 jun. 2013. Rhino Pisos, Campinas. Disponível em: <http://web.archive.org/web/20190707162146/http://www.rhinopisos.com.br/site/noticias/66/2013/06/piso_intertravado_pavimentacao_concreto>. Acesso em: 05 jul. 2019.

ROLLINGS, R. S. **Concrete block pavements**. 134 p. Technical Report No. GL-83-3. Vicksburg: US Army Engineer Waterways Experiment Station Geotechnical Laboratory, 1983.

SAIKIA, N.; DE BRITO, J. Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete. **Materials Research**, v. 16, n. 2, p. 341-350, 2013. doi: 10.1590/S1516-14392013005000017.

SB PAVIMENTOS. **Piso intertravado de concreto**: assentamento de piso intertravado de concreto. São Paulo. Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20190705220001/http://www.pisoacabado.com.br/piso-intertravado-de-concreto.html>>. Acesso em: 05 jul. 2019.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 452 p. São Paulo: PINI, 2001.

SHACKEL, B. The performance of interlocking block pavements under accelerated trafficking. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING, 1, 1980, London. **Proceedings...** London: Conc Publishing Co, p. 113-120.

SHARMA, R.; BANSAL, P. P. Use of different forms of waste plastic in concrete – a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, n. 1, p. 473-482, 2016. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.042.

SILVEIRA, A. **Frágil, anti-pó cobre metade da capital**. Gazeta do Povo, Curitiba, Vida e Cidadania, Infra-estrutura, 25 nov. 2007. Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20190705192846/https://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/fragil-antipo-cobre-metade-da-capital-aqo1uk59hjs9fxvp4o3eooov2m/>>. Acesso em: 05 jul. 2019.

TAPKIRE, G.; PARIHAR, S.; PATIL, P.; KUMAVAT, H. R. Recycled plastic used in concrete paver block. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 3, special issue 9., p. 33-35, 2014. doi: 10.15623/ijret.2014.0321009.

THORNEYCROFT, J.; ORR, J.; SAVOIKAR, P.; BALL, R. J. Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 63-69, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996.