



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

CLEOMAR SILVA DE SOUSA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DO
RESÍDUO DE POLIPROPILENO COMO AGREGADO MIÚDO
RECICLADO PARA PRODUÇÃO DE PAVERS**

TUCURUÍ
2020

CLEOMAR SILVA DE SOUSA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE
POLIPROPILENO COMO AGREGADO MIÚDO RECICLADO PARA PRODUÇÃO
DE PAVERS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil, pela Universidade Federal do Pará.
Orientadora: Prof.^a Me. Grazielle Tigre de Souza.

TUCURUÍ
2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

S725a Sousa, Cleomar Silva de
Análise da viabilidade técnica da utilização do resíduo de polipropileno como agregado miúdo reciclado para produção de pavers / Cleomar Silva de Sousa. — 2020.
xix, 146 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. MSc. Grazielle Tigre de Souza
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Engenharia Civil, Campus Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2020.

1. Resíduo. 2. Substituição. 3. Polipropileno. 4. Pavimento intertravado. 5. Sustentabilidade. I. Título.

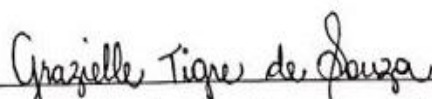
CLEOMAR SILVA DE SOUSA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE
POLIPROPILENO COMO AGREGADO MIÚDO RECICLADO PARA PRODUÇÃO
DE PAVERS**

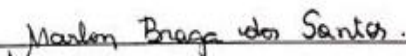
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil, pela Universidade Federal do Pará.
Orientadora: Prof.^a Me. Grazielle Tigre de Souza.

Tucuruí, 14 de fevereiro de 2020.

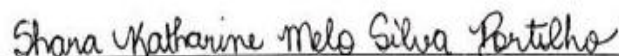
Aprovado por:



Grazielle Tigre de Souza, Me. em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental (UFPA)
(Orientadora)



Marlon Braga dos Santos, Me. em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental (UFPA)
(Examinador Interno)



Shara Katharine Melo Silva Portilho, Engenheira Civil (UFPA)
(Examinadora Externa)

Dedico este trabalho à minha avó, Alderina Maria (*in memoriam*), que não pôde estar ao meu lado nesse momento tão importante, mas sempre foi a pedra angular de toda minha família. Vó, sinto muito sua falta! Obrigado por tudo, Dera!

AGRADECIMENTOS

Ao Criador, sempre ao Criador.

À Prof.^a Grazielle Tigre, pela orientação, confiança, dedicação e colaboração no desenvolvimento deste projeto. Suas exigências fizeram a diferença no resultado final deste filho, hahaha. Sou muito grato.

Às mulheres da minha vida: minha mãe Antonia (Preta), minha tia/madrinha Maria Zilma (Dindinha), minha irmã Leonice (Leo), minha prima Rafaella (Raffa), minha sobrinha Danielly (Dani) e minha sempre querida avó, Alderina Maria (dona Derina) (*in memoriam*). Sei que de onde cada uma estiver sempre estaremos em sintonia, porque fomos criados numa família em que a distância só é motivo para saudades, mas nunca para despedidas definitivas...

Aos demais parentes, todo meu carinho e gratidão: meu pai João Batista, meus tios, primos, sobrinhos. Sempre me convidem para os almoços e jantares, como bem se sabe eu não desperdiço nem brinco em serviço (nesse quesito, lógico), hahaha.

À minha nova avó do coração, dona Lourdes, um ser iluminado e muito importante na minha vida. Prometo honrar sua dedicação para comigo e retribuir todo o amor e atenção que me fora dado, um jovem estudante avulso, que em sua família só recebeu lições valiosas do quanto a vida pode colocar pessoas excepcionais em nosso caminho. Minha eterna gratidão à senhora, vó Lourdes.

Ao meu amigo Matheus Didien que há tempos não o vejo (vacilão kkj), e aos amigos que me ajudaram durante esta jornada acadêmica e/ou em meus ensaios infundáveis no laboratório kkj: Mikael, Mikaele, Elizeu (Sousa), Leonel (Leo), Lucas, Izabella, Brenda e Isabelle. E às melhores/piiores “frenons” da faculdade toda: Dalyla (a pinscherzinha) e Naralice (Nara, a gótica trevosona) que mais alegraram meus dias enquanto buscava conhecimento acadêmico (o fracasso kkj), obrigado pelo apoio emocional, beberes.

À Francirene (Fran), Vinícius, seu Lúcio e seu Jaques (o cara que dividia a marmita dele comigo!) que me auxiliavam quase todo dia no Laboratório de Materiais, isso incluía alguns finais de semana kkj, muito obrigado, gente; e ao Fellype que também me ajudou muito em alguns ensaios, obrigado.

Aos colaboradores desta pesquisa nas pessoas do Sr. Alexandre e Sr. Olavo; sobretudo este último, que foi um amigão durante a pesquisa e execução das peças de concreto. Vou levar para a vida sua bondade e entusiasmo em fomentar a pesquisa.

A todos, sem exceção, meus sinceros agradecimentos. *That's all folks!*

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Com o aumento da qualidade de vida da população a demanda por consumo de produtos também aumenta, e com ela, o descarte e a geração desenfreada de resíduos que tanto poluem o meio ambiente. Desses resíduos, tem-se destacado os plásticos industriais e pós-consumo, na forma de embalagens, brinquedos, tampas, entre outros, dos quais grande parte é constituído de polipropileno (PP), atualmente o segundo polímero sintético mais comercializado no mundo e o de maior demanda de mercado no Brasil. Com isso, este trabalho buscou analisar a viabilidade da utilização do resíduo de polipropileno reciclado (RPP) como substituto parcial do agregado miúdo natural para a produção de peças de pavimento intertravado (pavers) utilizados na construção civil. Para tanto, foram avaliadas propriedades físicas e mecânica das peças, como resistência à compressão, avaliação dimensional, absorção de água, índice de vazios e massa específica. Isso consoante a execução de quatro traços, sendo um de referência, dosado apenas com agregados naturais, e outros três, com substituições de 3%, 6% e 9%, em massa, de RPP, nomeados, respectivamente, de RPP0, RPP3, RPP6 e RPP9. Os resultados mostraram que a inserção de RPP no concreto influenciou na resistência à compressão dos pavers, de modo que à medida que se aumentou o teor de substituição, reduzia-se os ganhos de resistência; nenhum dos traços atendeu à resistência mínima exigida pela NBR 9781 (ABNT, 2013), que preconiza um mínimo de 35 MPa. Em relação à avaliação dimensional, a maior variação se deu na espessura. As absorções das peças dos quatro traços ficaram dentro do limite exigido por norma, na qual os teores de substituição influenciaram de forma não linear, tal como ocorreu para o índice de vazios. Estes ficaram entre 9,35% (RPP0) e 20,16% (RPP6), sendo considerados valores adequados pela literatura. Já no ensaio de massa específica, houve melhora nesse parâmetro, visto que a massa específica diminuiu e, conseqüentemente, as peças ficaram mais leves. A utilização de RPP como substituto parcial do agregado miúdo natural para a produção de pavers pode ser considerada tecnicamente viável para ambientes com tráfego limitado como passeios públicos, praças, calçadas e ciclovias representando uma alternativa que contribui para a sustentabilidade na construção civil.

Palavras-chave: Resíduo. Substituição. Polipropileno. Pavimento intertravado. Sustentabilidade.

ABSTRACT

With the increase in the quality of life of the population, the demand for consumption of products also increases, and with it, the disposal and the rampant generation of waste that pollute the environment so much. Of these residues, industrial and post-consumer plastics have stood out, in the form of packaging, toys, lids, among others, of which a large part is made of polypropylene (PP), currently the second most commercialized synthetic polymer in the world and the with the greatest market demand in Brazil. Thus, this work sought to analyze the feasibility of using recycled polypropylene waste (RPP) as a partial substitute for the natural fine aggregate for the production of interlocking pavement pieces (pavers) used in civil construction. For this, physical and mechanical properties of the parts were evaluated, such as compressive strength, dimensional evaluation, water absorption, voids index and specific mass. This depends on the execution of four traces, one of which is a reference, dosed only with natural aggregates, and the other three, with substitutions of 3%, 6% and 9%, by mass, of RPP, named, respectively, RPP0, RPP3, RPP6 and RPP9. The results showed that the insertion of RPP in the concrete influenced the compressive strength of the pavers, so that as the substitution content was increased, the strength gains were reduced; none of the lines met the minimum resistance required by NBR 9781 (ABNT, 2013), which recommends a minimum of 35 MPa. Regarding the dimensional evaluation, the greatest variation was in thickness. The absorptions of the pieces of the four traces were within the limit required by the standard, in which the substitution levels influenced non-linearly, as occurred for the voids index. These were between 9.35% (RPP0) and 20.16% (RPP6), being considered adequate values by the literature. In the specific mass test, there was an improvement in this parameter, since the specific mass decreased and, consequently, the parts became lighter. The use of RPP as a partial substitute for the natural fine aggregate for the production of pavers can be considered technically feasible for environments with limited traffic such as public sidewalks, squares, sidewalks and cycle paths, representing an alternative that contributes to sustainability in civil construction.

Keywords: Residue. Substitution. Polypropylene. Interlocking pavement. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura química dos cinco homopolímeros mais produzidos no Brasil.	29
Figura 2 – Esquema da refinação do petróleo.	33
Figura 3 – Obtenção do PP.	34
Figura 4 – Taticidade do polipropileno.	36
Figura 5 – Simbologia de reciclabilidade e identificação das embalagens plásticas: 1) PET – Poli(tereftalato de etileno); 2) PEAD – Polietileno de alta densidade; 3) PVC – Poli(cloreto de vinila); 4) PEBD – Polietileno de baixa densidade; 5) PP – Polipropileno; 6) PS – Poliestireno; e 7) Outros – Outras resinas.	37
Figura 6 – Via Appia Antica.	42
Figura 7 – Rua em Pompeia.	42
Figura 8 – Rua de pavimento de pé-de-moleque na cidade de Paraty – RJ.	44
Figura 9 – Exemplos de paver.	45
Figura 10 – Perfil da solução pronta do piso intertravado.	46
Figura 11 – Exemplos de diferentes tipos de contenções empregadas em pavimentos com pavers.	47
Figura 12 – Tipos básicos de formatos de blocos de concreto para pavimentação.	48
Figura 13 – Exemplos de peças de concreto do Tipo I.	49
Figura 14 – Exemplos de peças de concreto do Tipo II.	49
Figura 15 – Exemplos de peças de concreto do Tipo III.	50
Figura 16 – Exemplos de peças de concreto do Tipo IV.	50
Figura 17 – Padrões de assentamento dos pavers recomendado para o tráfego de pedestres: a) trama e b) fileiras (ou “de corredor”).	51
Figura 18 – Padrões de assentamento dos pavers recomendado para o tráfego de veículos: a) espinha de peixe a 45° e b) espinha de peixe a 90°.	51
Figura 19 – Efeito do arranjo de assentamento das peças de concreto no desempenho do pavimento sob solicitação do tráfego.	52
Figura 20 – Intertravamento horizontal.	53

Figura 21 – Intertravamento vertical.	54
Figura 22 – Intertravamento rotacional.	55
Figura 23 – Exemplo de misturador biplanetário.	60
Figura 24 – Vibroprensa hidráulica.	62
Figura 25 – Fluxograma do programa experimental.	73
Figura 26 – Local de onde fora coletado o resíduo de reciclagem do polipropileno.	75
Figura 27 – Equipamento de lavagem do material e separador do RPP.	75
Figura 28 – Resíduo de reciclagem de polipropileno separado em sacos.	76
Figura 29 – Agitador mecânico de peneiras.	77
Figura 30 – Massa das amostras do ensaio de granulometria: a) agregado miúdo natural; b) agregado miúdo artificial; e c) agregado graúdo.	78
Figura 31 – Preparação das amostras do ensaio: a) AMN em estufa e b) AMN submerso em água.	79
Figura 32 – Execução do ensaio: a) tronco-cônico de AMN e b) AMN na condição saturado superfície seca.	79
Figura 33 – Preparação das amostras do ensaio: a) massa do AG para o ensaio e b) AG sem água visível e com superfície úmida.	80
Figura 34 – Execução do ensaio: a) balão volumétrico com as amostras secas e b) balão volumétrico contendo amostra e água.	82
Figura 35 – Execução do ensaio: a) procedimento conforme a norma e b) frasco Chapman preenchido com RPP.	83
Figura 36 – Determinação da massa unitária: a) AMN; b) RPP; e c) AG.	85
Figura 37 – Procedimento de ensaio do Método do Menor Volume de Vazios: a) mistura dos agregados nas diferentes proporções (homogeneização); b) compactação das três camadas (25 golpes em cada camada); c) nivelamento do excedente; e d) pesagem do recipiente cheio de agregados.	87
Figura 38 – Ponto de Pelota.	89
Figura 39 – Ponto de Pelota: a) traço RPP0 e b) traço RPP9.	90
Figura 40 – <i>Slump</i> do concreto seco.	91
Figura 41 – Ponto de Pelota do traço RPP0 corrigido.	92

Figura 42 – Vibroprensa pneumática.....	94
Figura 43 – Componentes da vibroprensa: a) misturador e b) esteira.	94
Figura 44 – Paver moldado: a) prensa e paleta e b) paletes com as peças de concreto separadas para cura.	95
Figura 45 – Prensa universal utilizada no ensaio de resistência à compressão.	96
Figura 46 – Capeamento das peças: a) CPs capeados em uma superfície e a outra em cura; e b) CPs com as superfícies inferior e superior capeadas e marcados os centros geométricos para execução do ensaio.	97
Figura 47 – Dimensões dos pavers: a) comprimento de peça do RPP0; b) espessura de peça do RPP3; c) comprimento de peça do RPP6; e d) largura de peça do RPP9.....	99
Figura 48 – Procedimento inicial do ensaio: a) limpeza dos CPs e b) CPs submersos em água.	100
Figura 49 – Procedimento final do ensaio: a) CPs em estufa e b) pesagem individual de CPs secos.	101
Figura 50 – Procedimento do ensaio: a) secagem superficial do CP com pano úmido e b) pesagem do CP após imersão.	102
Figura 51 – Pesagem hidrostática da amostra.	103
Figura 52 – Ponto de Pelota dos traços: a) RPP0; b) RPP3; c) RPP6; e d) RPP9.....	113
Figura 53 – Imperfeição do paver devido ao excesso de água, utilizando a vibroprensa pneumática disponível.	114
Figura 54 – Vista superior das peças de concreto endurecidas dos traços: a) RPP0; b) RPP3; c) RPP6; e d) RPP9.....	115
Figura 55 – Vista lateral das peças de concreto endurecidas dos traços: a) RPP0; b) RPP3; c) RPP6; e d) RPP9.....	116

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural.	106
Gráfico 2 – Curva granulométrica do agregado graúdo.	108
Gráfico 3 – Curva granulométrica do agregado miúdo artificial.	111
Gráfico 4 – Resistências à compressão estimadas de cada traço ao longo do tempo.	120
Gráfico 5 – Média das dimensões avaliadas (mm).	126
Gráfico 6 – Média dos índices de vazios (%).	127
Gráfico 7 – Média das absorções de água (%).	129
Gráfico 8 – Média das massas específicas (g/cm ³).	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de revestimentos.	40
Quadro 2 – Tipos e constituições dos cimentos Portland.	57
Quadro 3 – Especificações segundo a norma de peças de concreto para pavimentação.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Primeira ocorrência e primeira produtividade industrial de alguns polímeros comerciais.....	32
Tabela 2 – Caracterização do cimento Portland CP I-40.....	70
Tabela 3 – Traços de referência.....	86
Tabela 4 – Resultado do ensaio do Método do Menor Volume de Vazios.	88
Tabela 5 – Traço piloto, obtido em laboratório.	89
Tabela 6 – Resistência à compressão aos 28 dias dos corpos de prova cilíndricos.....	91
Tabela 7 – Resistência característica à compressão aos 28 dias (MPa), com vibroprensa pneumática.....	93
Tabela 8 – Fator multiplicativo p.	97
Tabela 9 – Coeficiente de Student.....	98
Tabela 10 – Tolerâncias dimensionais das peças de concreto (mm).....	100
Tabela 11 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural.	105
Tabela 12 – Características físicas do agregado miúdo natural.....	106
Tabela 13 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	107
Tabela 14 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.	109
Tabela 15 – Características físicas do agregado graúdo.....	110
Tabela 16 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo reciclado.....	111
Tabela 17 – Características físicas do agregado miúdo reciclado.	112
Tabela 18 – Resistência característica à compressão, aos 3 dias (MPa).	117
Tabela 19 – Resistência característica à compressão, aos 7 dias (MPa).	118
Tabela 20 – Resistência característica à compressão, aos 28 dias (MPa).	119
Tabela 21 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP0.	121
Tabela 22 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP3.	122

Tabela 23 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP6.	123
Tabela 24 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP9.	124
Tabela 25 – Índice de vazios dos pavers (%).	127
Tabela 26 – Absorção de água dos pavers (%).	128
Tabela 27 – Massa específica dos pavers (%).	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Grau Celsius
a/c	Relação água/cimento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AG	Agregado graúdo
AMN	Agregado miúdo natural
ANEPAC	Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para a Construção
ARI	Alta resistência inicial
BC	Baixo calor de hidratação
CAMTUC	Campus Universitário de Tucuruí
CEMPRE	Compromisso Empresarial para a Reciclagem
CP	Corpo de prova
DMC	Dimensão Máxima Característica
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
f_{cm}	Resistência média do concreto à compressão
f_p	Resistência média das peças de concreto
$f_{pk, est}$	Resistência característica estimada à compressão
g	Grama
ICPI	Interlocking Concrete Pavement Institute
IF	Índice de Forma
I_v	Índice de vazios

kg	Quilograma
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
m	Metro
M _e	Massa específica (paver)
MF	Módulo de Finura
mm	Milímetro
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MPa	Megapascal
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
pág.	Página
PC	Policarbonato
PE	Poliétileno
PEAD	Poliétileno de alta densidade
PEBD	Poliétileno de baixa densidade
PET	Poliétileno tereftalato ou Poli(tereftalato de etileno)
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de vinila
RCC	Resíduos da construção civil
RPP	Resíduo de reciclagem de polipropileno
RS	Resistência a sulfatos
RSU	Resíduo sólido urbano
s	Desvio padrão
t	Coefficiente de Student

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 OBJETIVOS	22
1.1.2 Objetivo geral	22
1.1.3 Objetivos específicos	22
1.2 JUSTIFICATIVA	23
2 REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	26
2.2 POLÍMEROS	27
2.3 HISTÓRICO DOS POLÍMEROS	30
2.4 POLIPROPILENO	32
2.4.1 Propriedades do polipropileno	35
2.4.2 Reciclagem do polipropileno	36
2.5 O PAVIMENTO	38
2.5.1 Tipos de pavimento	39
2.6 HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO	40
2.6.1 Pavimentação intertravada no exterior	41
2.6.2 Pavimentação intertravada no Brasil	43
2.7 PAVIMENTO INTERTRAVADO COM BLOCO DE CONCRETO	44
2.7.1 Definições	44
2.7.2 Formato e arranjo das peças	47
2.7.3 Intertravamento	52
2.7.3.1 <i>Intertravamento horizontal</i>	53
2.7.3.2 <i>Intertravamento vertical</i>	53
2.8 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS DE CONCRETO	55
2.8.1 Materiais	56
2.8.1.1 <i>Cimento</i>	56
2.8.1.2 <i>Agregados</i>	58
2.8.1.3 <i>Aditivos químicos</i>	58
2.8.2 Equipamentos	60

2.8.3 Dosagem e cura	62
2.9 ESPECIFICAÇÕES	66
2.10 ESTUDOS DE PEÇAS DE CONCRETO COM MATERIAIS RECICLADOS	67
3 MATERIAIS E MÉTODOS	70
3.1 MATERIAIS	70
3.1.1 Cimento	70
3.1.2 Agregado miúdo natural	71
3.1.3 Agregado graúdo	71
3.1.4 Água	71
3.1.5 Agregado miúdo artificial.....	71
3.1.6 Aditivo químico.....	72
3.2 MÉTODOS.....	72
3.2.1 Variáveis de estudo.....	72
3.2.2 Procedimento experimental	73
3.2.3 Coleta do RPP.....	74
3.2.4 Caracterização dos agregados.....	76
3.2.4.1 <i>Determinação da composição granulométrica</i>	77
3.2.4.2 <i>Determinação da absorção de água</i>	78
3.2.4.3 <i>Determinação da massa específica</i>	81
3.2.4.4 <i>Determinação da massa unitária</i>	84
3.2.5 Dosagem das misturas	85
3.2.5.1 <i>Método do Menor Volume de Vazios</i>	86
3.2.5.2 <i>Ajuste em laboratório do traço de referência</i>	88
3.2.5.3 <i>Ajuste do traço de referência em fábrica</i>	92
3.2.6 Execução dos pavers.....	93
3.2.7 Ensaio das propriedades físicas e resistência mecânica das peças de concreto	95
3.2.7.1 <i>Resistência à compressão</i>	96
3.2.7.2 <i>Avaliação dimensional</i>	99
3.2.7.3 <i>Absorção de água</i>	100
3.2.7.4 <i>Índice de vazios</i>	102
3.2.7.5 <i>Massa específica</i>	104
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	105

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	105
4.1.1 Agregado miúdo natural	105
4.1.2 Agregado graúdo	107
4.1.3 Agregado miúdo artificial.....	110
4.2 DOSAGEM DO CONCRETO: PONTO DE PELOTA	113
4.3 INSPEÇÃO VISUAL DAS PEÇAS DE CONCRETO ENDURECIDAS	114
4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	116
4.5 AVALIAÇÃO DIMENSIONAL.....	121
4.6 ÍNDICE DE VAZIOS.....	126
4.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	128
4.8 MASSA ESPECÍFICA.....	130
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	132
5.1 CONCLUSÕES	132
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	134
REFERÊNCIAS	136

1 INTRODUÇÃO

Uma perceptível explosão demográfica, acompanhada da melhoria da qualidade de vida da população, provocaram um crescimento exponencial na demanda por consumo de produtos, levando assim, à produção de bens e, finalmente, ao descarte de resíduos, gerando poluição e desperdícios (GEHIN; ZWOLINSKI; BRISSAUD, 2007). Sabe-se que o planeta Terra possui uma quantidade limitada de recursos e que as atividades humanas são provocadoras de sérios impactos ambientais, causados, sobretudo, pelo descarte desordenado de resíduos, o qual remete à prática de um pensamento e um estilo de vida cada vez mais sustentável (FONSECA JUNIOR, 2013).

No início do século XX foi desenvolvido um novo tipo de material que fora denominado plástico (um polímero sintético), cujas principais características eram a impermeabilidade e a maleabilidade, que veio a contribuir para o desenvolvimento científico, econômico e social. Gradualmente foi sendo cada vez mais utilizado na fabricação dos mais variados objetos graças à sua grande versatilidade. Sua viabilidade econômica tornou possível a produção de diferentes produtos tendo-se o custo reduzido, o que o tornou bastante acessível à população (PIATTI; RODRIGUES, 2005).

Segundo apontam Wiebeck e Harada (2005), a produção de plásticos superou os números da produção de aços em 1973, uma vez que a facilidade de manuseio da matéria-prima e os baixos custos de sua produção foram reconhecidos por diversos setores. Desde então, esse famoso polímero já se encontra inserido abundantemente no mercado consumidor, na qual é notório os passivos ambientais de grandes proporções que o descarte inadequado do mesmo vem causando à natureza, segundo Neta (2012), constituindo expressiva parte do total de resíduos sólidos produzidos pelo homem (PIATTI; RODRIGUES, 2005).

Conforme Cho (2012), apesar de a maioria dos materiais plásticos serem recicláveis, grande parte deles acaba tendo como destino final os aterros sanitários. Ainda, de acordo com informações do Ministério do Meio Ambiente (MMA), esses materiais demoram cerca de 400 anos para se decompor, logo, se tornam potenciais poluentes do solo e da água (BRASIL, 2017).

A reciclagem reintroduz um material no ciclo de produção, portanto, é uma das maneiras de prolongar a vida dos plásticos, tornando-se útil para as empresas e saudável para a sociedade e o meio ambiente (CARASCHI; LEÃO, 2008; LOMASSO *et al.*, 2015). Conforme

Mano, Pacheco e Bonelli (2005), a reciclagem é uma solução ideal para preservação da qualidade do meio ambiente, uma vez que essa atividade visa imunizar matérias-primas, economizar energia no processo produtivo e reduzir áreas de aterro. Desta forma, os resíduos podem ser utilizados mais uma vez como bens de consumo, constituindo-se um importante conceito de desenvolvimento sustentável.

No estado do Pará, a lei nº 7.731, de 20 de setembro de 2013, em seu artigo 2º, inciso I, alínea c, trata da limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos, onde trata da triagem para fins de reuso ou reciclagem; e o artigo 4º, inciso IV, sobre a adoção de métodos que promovam o uso racional da energia e o reaproveitamento de resíduos (PARÁ, 2013).

Dos materiais poliméricos, o polipropileno (usualmente denominado pela sigla PP) é o segundo plástico mais comercializado no mundo, por ser um material compatível com muitas tecnologias de processamento e por sua utilização ser diversa nas indústrias de embalagens, eletrodomésticos, entre outras (CERESANA, 2019a, 2019b). No Brasil, o polipropileno foi o polímero que apresentou maior demanda de mercado (20,3%), segundo a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2018).

Nesse contexto, a reciclagem do polipropileno deve ser encarada como uma necessidade, visto que é um plástico muito utilizado em diferentes setores industriais. Por sua propriedade termoplástica, a reciclagem desse material torna-se viável, dado que, quando submetido a elevadas temperaturas, torna-se maleável, o que permite sua transformação em novos subprodutos (ROSÁRIO *et al.*, 2011).

Conforme Gaio (2018), o processo de reciclagem desse material gera resíduos, em sua maior parte compostos por água, fibras e pequenas frações de PP, que, na maioria das vezes, são destinados em aterros sanitários, ocasionando custos para a empresa recicladora, e prejuízos ao meio ambiente, já que esse resíduo é composto por diferentes materiais notadamente não biodegradáveis.

Para Verissimo (2014) é indissociável a questão dos resíduos com o crescimento das cidades, às quais passam por um processo contínuo de urbanização. Sharuddin *et al.* (2016) também concordam que a demanda por produtos plásticos aumentou devido ao rápido crescimento da população mundial, ocasionando o inchaço das cidades e, conseqüentemente, aos maiores índices de descartes indevidos de embalagens e produtos plásticos pós-consumo.

Desse modo, o sistema urbano requer uma infraestrutura adequada que vise à comodidade dos seus habitantes, onde além das estruturas prediais, tornaram-se imprescindíveis também as obras de pavimentação que contribuíssem para uma maior comodidade aos que delas se beneficiam, não deixando de se considerarem os preceitos de sustentabilidade (VERISSIMO, 2014).

Com isso exposto, análogo ao impasse ambiental causado pelos resíduos, a utilização de pavimentos intertravados com blocos pré-moldados de concreto vem crescendo em todo o mundo, especialmente no Brasil, como afirma Fioriti (2007). Os blocos pré-fabricados de concreto, chamados de pavers, possuem algumas vantagens como facilidade de assentamento e, com isso, liberando o tráfego rapidamente; fácil acessibilidade às redes subterrâneas; praticidade na manutenção; e a permeabilidade que essa pavimentação proporciona, fato que auxilia na drenagem urbana (GODINHO, 2009; AMADEI, 2011; VERISSIMO, 2014).

À vista disso, este trabalho buscou analisar o resíduo do processo de reciclagem do PP, doravante denominado RPP, como matéria-prima para a produção de pavers como alternativa para diminuir os prejuízos causados ao meio ambiente, agregando valor ao resíduo e reduzindo o consumo de recursos naturais.

1.1 OBJETIVOS

1.1.2 Objetivo geral

Analisar a viabilidade técnica da utilização do resíduo de polipropileno reciclado (RPP) como substituto parcial do agregado miúdo natural para a produção de pavers utilizados na construção civil.

1.1.3 Objetivos específicos

- realizar o estudo de dosagem experimental de concreto seco para produção de pavers com substituição parcial do agregado miúdo natural por RPP nos teores de 0%, 3%, 6% e 9%;

- avaliar a influência da inserção do RPP nas propriedades físicas do concreto dosado para peças de pavimento intertravado;
- avaliar a influência da inserção do RPP nas propriedades mecânicas e durabilidade dos pavers;
- avaliar se os pavers produzidos atendem às exigências da norma de peças de concreto para pavimentação quanto às dimensões padronizadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em 2010 foi promulgada a Lei nº 12.305, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), tendo como principal objetivo difundir uma visão moderna que contribua para o desenvolvimento de soluções viáveis e eficientes para o problema dos resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2010).

A Política Nacional defende a ideia de uma responsabilidade compartilhada entre governo, empresas e população, incentiva a reinserção dos resíduos no ciclo produtivo e regulamenta os planos de gerenciamento do lixo (LOMASSO *et al.*, 2015). A gestão e a disposição inadequada dos resíduos sólidos causam impactos socioambientais, muitas vezes irreversíveis. A exemplo de alguns dos impactos pode-se citar a degradação do solo, poluição atmosférica, comprometimento de corpos d'água e mananciais, intensificação de enchentes, proliferação de vetores de importância sanitária nos grandes centros urbanos, entre outros intervenientes (BESEN *et al.*, 2010).

Logo, tendo em vista a problemática referente aos resíduos sólidos, a reciclagem destes vem se fortalecendo como uma prática de valor e importância, apoiada a uma sociedade sustentável (EUROPEAN NETWORK OF BUILDING RESEARCH INSTITUTES – ENBRI, 1994). Para John (2001), é uma boa alternativa a utilização destes resíduos como matéria-prima, sendo uma forma de não prejudicar a capacidade de sobrevivência das gerações futuras, diminuindo o impacto ambiental causado pelo seu descarte.

Savastano Junior e Warden (2003) afirmam que a maioria dos resíduos gerados nos diversos setores da economia podem ser reciclados, reutilizados, transformados e incorporados para a produção de novos materiais de construção e, ainda, atender à crescente demanda por

tecnologia alternativa de construção mais eficiente, econômica e sustentável. Wang (2009) discorre que o segmento de construção civil vem estudando extensivamente a viabilidade de utilizar materiais reciclados e a utilização de resíduos descartados, com o objetivo de reduzir o consumo de recursos naturais.

Segundo Silva (2007), o Brasil é um dos países mais ricos em recursos naturais do mundo; desta forma, há um elevado índice de extração dos minerais nacionais. Porém, tais recursos não são inesgotáveis, nem renováveis, e tendem à escassez à medida que se desenvolve a sua exploração; ainda, pelo fato de terem emprego direto na construção civil, são considerados como bens minerais de uso social.

John (2000) apontou que no Brasil havia uma demanda de cerca de 210 milhões de toneladas de agregados somente para o uso na construção civil na produção de concretos e argamassas. Por conseguinte, sabe-se que essa demanda chegou a mais que triplicar no ano de 2014 (740 milhões toneladas de toneladas), e a tendência mundial é que o índice de consumo dos agregados continue a crescer (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO – ANEPAC, 2016).

De acordo com a pesquisa Ciclossoft, realizada pelo Compromisso Empresarial para a Reciclagem (CEMPRE, 2018), aproximadamente 17% de todos os resíduos gerados nas residências brasileiras são plásticos, na qual o polipropileno corresponde a cerca de 16% desses resíduos. A incorporação de resíduos em matrizes industriais de cerâmicas e cimentícias tendo como objetivo produzir artefatos para a construção civil permitem dar um destino ambientalmente correto para os resíduos, os quais deixam de ser fontes de poluição (LUCAS; BENATTI, 2008).

Lintz *et al.* (2010) afirmam que a pavimentação de vias consome um volume elevado de materiais, portanto é uma fonte racional de aplicação de resíduos e rejeitos de forma a preservar o meio ambiente da exploração inadequada de matéria-prima. Além de que o uso de resíduos sólidos na fabricação de artefatos para a construção civil, a exemplo dos pavers, proporciona enriquecimento nas propriedades dos materiais de cimento Portland (PAGNUSSAT, 2004; FIORITI, 2007; AMADEI, 2011). Outrossim, com o processo de fabricação dos pavers, pode-se contribuir com o meio ambiente, ao se adicionar os resíduos gerados pela população em sua composição (FERRARI, 2017).

O pavimento de concreto intertravado pode constituir-se em uma alternativa atraente para vias das cidades, onde se deseja reduzir os efeitos da urbanização e resolver problemas associados com escoamentos de águas superficiais (ZOLLINGER *et al.*, 1999; VERISSIMO, 2014); e, segundo Fioriti (2007), a facilidade na colocação e manutenção dos blocos faz com que os mesmos se adaptem aos diferentes desníveis das vias. Uma das vantagens da utilização de pavers na pavimentação é a facilidade na sua remoção em casos de necessidade de reparo e/ou manutenção de redes subterrâneas, tanto de água quanto de esgoto (FIORITI; INO; AKASAKI, 2007).

Por fim, a escolha do uso de polipropileno nesta pesquisa se deu por ser um plástico amplamente utilizado no Brasil, como já elucidado, sem reciclagem em níveis adequados e pelo número insuficiente de pesquisas do uso de polipropileno reciclado em concretos (grânulos de PP). Na verdade, há uma linha de pesquisa quanto à utilização de fibras sintéticas de PP ou nanocargas adicionadas ao polímero (HAMADA; FUJIHARA; HARADA, 2000; DÍEZ-PASCUAL; NAFFAKH, 2013; WU *et al.*, 2013; LIMA, L., 2015), mas não propriamente à utilização do resíduo em si. Ademais, tem-se o fato de o PP possuir características interessantes como: baixa densidade, resistências elétrica e mecânica a altas temperaturas e isolamento térmico.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Atualmente é comum deparar-se com notícias de desastres naturais e com comportamentos inadequados, onde resíduos são direcionados para aterros e lixões sem qualquer tratamento (FONSECA JUNIOR, 2013). Ainda assim, Pialot, Millet e Tchertchian (2012) acreditam que a sociedade está cada vez mais preocupada com as questões ambientais, onde o termo sustentabilidade é apresentado de forma a modificar o pensamento humano para um meio ambiente favorável para as gerações futuras.

Segundo Ortega (2014), a sustentabilidade está relacionada ao processo de construção da dinâmica social, em que envolve quatro dimensões: a) dimensão ética, onde o equilíbrio ecológico é mais almejado que a organização da sociedade; b) dimensão temporal, em que o planejamento de longo prazo rompe a lógica imediatista; c) dimensão social, onde o consenso de pluralismo político (sem desigualdade) pode produzir o desenvolvimento com sustentabilidade; e d) dimensão prática, em que se reconhece necessária a mudança de hábitos de produção, consumo e de comportamentos.

Conforme Lima, S. (2006) e Dias (2010), a sustentabilidade está voltada para determinadas características, que tornam possíveis estarem em harmonia questões importantes para a continuidade da vida no planeta, como as ambientais, sociais e econômicas, as quais constituem dimensões que se inter-relacionam.

O setor da construção civil é um dos principais geradores de desenvolvimento do país; porém, dentro do contexto da sustentabilidade, vem gerando importantes discussões com relação às questões ambientais. Isto porque além de ser um grande consumidor de recursos naturais, a construção civil é também uma grande geradora de resíduos (ORTEGA, 2014).

Segundo a ANEPAC (2016), em 2014, o Brasil apresentou uma demanda da ordem de 740 milhões de toneladas de areia e brita, tendo-se um consumo per capita de 3,7 toneladas/habitante/ano. Enquanto para o ano de 2019, fora projetado um consumo da ordem de 543 milhões de toneladas, em virtude de problemas de infraestrutura e desenvolvimento urbanos a serem resolvidos, seguindo o processo da recuperação da economia (ANEPAC, 2016).

Nesse cenário, o aproveitamento de resíduos industriais como matéria prima no setor da construção civil vem sendo discutido de forma exaustiva pelas mais diversas linhas de pesquisa em tecnologia e inovação. Uma vez que o setor demonstra ter grande potencial para absorver os mais diferentes tipos de resíduos dos mais variados processos produtivos, principalmente como agregados para a produção de concretos sustentáveis (LOPES; RUDNICK; MARTINS, 2018).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019), foram gerados no país 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), dos quais 11,31 milhões de toneladas corresponderam ao lixo plástico. A geração média per capita de RSU foi de 380 kg/ano (ABRELPE, 2019).

Os resíduos poliméricos (plásticos) representam um dos maiores problemas ambientais no mundo todo; seu descarte vem provocando desequilíbrio ambiental e impactos que perduram por longo prazo. Isto faz com que a discussão sobre a valorização desses resíduos seja trazida à tona, enfatizando a necessidade de protocolos de gestão de resíduos mais sustentáveis e rentáveis (ABDEL-SHAFY; MANSUR, 2018).

A gestão de resíduos, tanto urbanos quanto industriais, apresenta muitos desafios para as empresas garantirem a eficiência de custos, a proteção ambiental e, ainda, a aceitação social (VADENBO; HELLWEG; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, 2014). Deste modo, a redução, a reutilização e a reciclagem dos resíduos são vistas como melhor qualidade de vida nas aglomerações urbanas, já que também significa menos danos ambientais e menos custos para o poder público (NEVES; MENDONÇA, 2016).

2.2 POLÍMEROS

O termo polímero origina-se do grego *poli* que significa muitos e *mero* que é unidade de repetição. Assim, um polímero é uma macromolécula (grande molécula) composta por dezenas de milhares de unidades básicas repetidas denominadas meros, os quais são ligados por ligação covalente. A matéria-prima de constituição de um polímero é um monômero, isto é, uma molécula com uma unidade de repetição (mono) (CANEVAROLO JÚNIOR, 2010).

Dependendo da sua estrutura química (ou tipo de monômero), da quantidade média de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, os polímeros podem ser divididos em: plásticos, borrachas (ou elastômeros) e fibras (CANEVAROLO JÚNIOR, 2010). Uma classificação mais abrangente cita ainda os revestimentos, os adesivos, as espumas e as películas (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016). As características químicas dos polímeros determinam suas propriedades e aplicações, sobretudo em função da estrutura dos monômeros (grupos funcionais, cadeia carbônica, estado físico etc.) (CORREA, 2015).

Segundo Andrade (2010) existe uma diferença entre polímeros e plásticos. Plástico é o nome popular, mais empregado devido à propriedade de plasticidade que grande parte dos polímeros apresenta, ou ainda devido ao fato de os polímeros terem de passar por esse estado físico para a sua conformação.

A nomenclatura dos polímeros advém basicamente três sistemas: a) com base no nome do monômero usado na síntese adicionado do prefixo poli, por exemplo, polimetacrilato de metila (acrílico) cujo monômero da síntese é o metacrilato de metila; b) em polímeros de condensação (dois materiais iniciais) o nome é dado com base na estrutura do mero, por exemplo, etileno + ácido tereftálico combinam-se para formar o polietileno tereftalato (PET); c) nomes adotados com bases empíricas (por exemplo, o náilon) ou de abreviação adotada comercialmente (ABS, EVA, LDPE, PP etc.) (CANEVAROLO JÚNIOR, 2010).

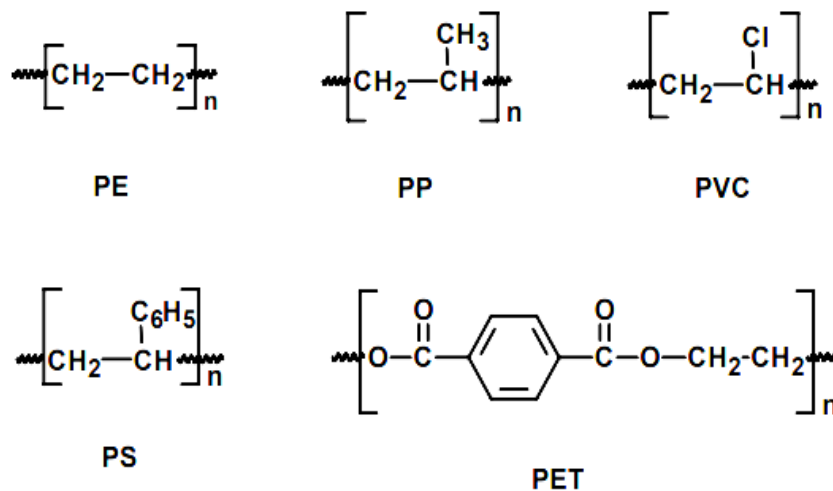
Os polímeros podem ser naturalmente ocorrentes, os quais são derivados de plantas e animais, tendo-se como exemplos a madeira, a celulose, a borracha natural, as proteínas, as enzimas e os amidos. Com as modernas ferramentas científicas é possível desenvolver numerosos polímeros que são sintetizados a partir de pequenas moléculas orgânicas, dando origem aos polímeros sintéticos como o náilon, o polipropileno, o vidro acrílico, entre outros (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016). A produção de polímeros sintéticos está sujeita à sua principal matéria-prima: o petróleo (CORREA, 2015).

Uma vez que grande parte dos polímeros são variações e/ou desenvolvimentos sobre moléculas já conhecidas, eles podem ser divididos em quatro diferentes classificações: quanto à estrutura química; quanto ao método de preparação; quanto ao comportamento mecânico; e quanto ao desempenho mecânico (CANEVAROLO JÚNIOR, 2010). Também podem ser classificados em homopolímeros e copolímeros, sendo os primeiros quando todas as unidades repetitivas ao longo de uma cadeia são do mesmo tipo, enquanto os segundos podem ser

compostos de duas ou mais diferentes unidades de meros (borracha nítrica, borracha sint tica de estireno etc.) (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016).

A Figura 1 mostra a unidade repetitiva da estrutura química (monomérica) dos cinco homopolímeros mais produzidos no Brasil, sendo eles (DE PAOLI, 2008): polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET).

Figura 1 – Estrutura química dos cinco homopolímeros mais produzidos no Brasil.



Fonte: De Paoli (2008).

Outra classifica o muito importante e a mais comumente utilizada diz respeito ao comportamento térmico dos polímeros. Desta forma, os polímeros podem ser classificados em: termoplásticos, termofixos e elast meros.

Os termoplásticos são moldáveis a quente, possuem baixa densidade, são bons isolantes térmicos e elétricos, tenazes e de baixo custo (CORREA, 2015). Fundem por aquecimento e solidificam por resfriamento, em geral são fabricados pela aplica o simultânea de calor e pressão. O processo   reversível e podem também ser dissolvidos em solventes adequados (MANO; MENDES, 2004). Deste modo, tornam-se materiais fáceis de serem reciclados. Estes são os popularmente conhecidos como plásticos, os quais são muito utilizados no dia a dia da popula o (GORNI, 2013). Pode-se citar como exemplos de polímeros termoplásticos o polietileno (PE), o policarbonato (PC), o polipropileno (PP), o polietileno de alta densidade (PEAD) e o polietileno de baixa densidade (PEBD) (COELHO, 2005).

No entanto, segundo De Paoli (2008), os polímeros termoplásticos têm durabilidade limitada, que são definidas pelos seus processos de degradação. O autor explica que a degradação de um polímero é resultante de reações químicas, sejam elas intra ou intermoleculares, como por exemplo um processo de despolimerização, de oxidação ou de reticulação de ligações químicas.

Os termofixos, ou ainda termorrígidos, são moldáveis por aquecimento ou outra forma de tratamento, sendo infusíveis, isto é, tornam-se permanentemente rígidos sem que amoleçam após um novo aquecimento. Tal propriedade os torna difíceis de serem reciclados (MANO; MENDES, 2004). Esses polímeros são geralmente mais duros, mais fortes e mais frágeis do que os termoplásticos, e têm melhor estabilidade dimensional (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016). Resinas fenólicas, epóxi e poliuretano (PU) são exemplos de polímeros termofixos (COELHO, 2005). Mano e Mendes (2004) ressaltam que o poliuretano é um material versátil, na qual dependendo dos monômeros e catalisador, pode ser termoplástico ou termorrígido.

Por último, os elastômeros, também conhecidos como borrachas, são materiais macromoleculares com alta elasticidade, o que lhes permitem sofrer grandes deformações seguidas instantaneamente de retração, sem perda significativa de forma e dimensões. Pode-se citar como exemplos de elastômeros as borrachas naturais, o Neoprene e o silicone (MANO; MENDES, 2004). De um modo geral, os elastômeros necessitam passar por um processo químico de reticulação para serem usados. Seu processo de reciclagem é complexo em virtude de sua incapacidade de fusão (DE PAOLI, 2008).

2.3 HISTÓRICO DOS POLÍMEROS

O primeiro contato do homem com materiais viscosos e graxas extraídas e/ou refinadas aconteceu na Antiguidade através dos egípcios e romanos, os quais eram usados para carimbar, colar documentos e vedar vasilhames. No século XVI, com o advento dos descobrimentos, espanhóis e portugueses tiveram o primeiro contato com o produto extraído da seringueira, árvore natural das Américas (*Havea brasiliensis*). Este extrato, produto da coagulação e secagem do látex, apresentava características de elasticidade e viscosidade altas, desconhecidos

até então. Levado para a Europa, adquiriu o nome de borracha pela sua capacidade de apagar marcas de lápis (CANEVAROLO JÚNIOR, 2010).

A borracha tinha seu uso restrito até que, em 1839, Charles Goodyear descobriu a vulcanização, processo que consiste na adição de enxofre à borracha natural, tornando-a mais forte e resiliente (WIEBECK; HARADA, 2005). Em 1846, o químico alemão Christian Schönbien tratou o algodão com ácido nítrico, dando origem à nitrocelulose, que se tornou o primeiro material polimérico semissintético (CANEVAROLO JÚNIOR, 2010). Em 1862, o inglês Alexander Parkes dominou completamente essa técnica, patenteando a nitrocelulose como parkesina, em referência ao seu descobridor, que quando aquecida podia ser moldado e permanecia desta forma quando esfriava (JACQUES, 2011).

O tipógrafo americano John Wesley Hyatt, vence, em 1869, uma competição para fabricar uma bola de bilhar melhor, em substituição ao marfim que já ameaçava a população de elefantes. Hyatt descobriu acidentalmente o celuloide, uma versão comercial do nitrato de celulose (material altamente volátil) com adição de cânfora para redução de fragilidade (JACQUES, 2011). No dia 12 de julho de 1870 os irmãos Hyatt (John e Isiah) patenteiam o uso do nitrato de celulose e cânfora, obtendo-se um material semelhante ao chifre, que é o celuloide (WIEBECK; HARADA, 2005).

Os irmãos Hyatt foram homens inovadores e descobridores de vários inventos totalizando mais de 200 patentes. Em 1914, Hyatt ganhou a Medalha de Perkin, mas seu nome ficou registrado na história como o primeiro fabricante de material plástico (JACQUES, 2011).

Por fim, não se pode deixar de citar o homem mais importante que participou na descoberta e consolidação dos plásticos: Leo Hendrik Baekeland, químico americano de origem belga criador da baquelite, em 1909. Baekeland dedicou-se a desenvolver um aparato que permitia o controle para variar o calor e a pressão da combinação de ácido carbólico (fenol) com formaldeído, que era o grande desafio da época para se fabricar uma resina plástica. Com este feito ele criou a primeira resina totalmente sintética, a baquelite (JACQUES, 2011).

Esse material a princípio era particularmente adequado para as indústrias elétricas e automobilísticas emergentes, devido às suas altas resistências elétricas, caloríficas e às ações químicas (AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 2019). Mas logo foi empregado para substituir inúmeros materiais naturais provenientes de animais (marfim, cascos de tartarugas,

madeira etc.), fabricando-se pentes, manivelas de facas, botões, bolas de bilhar, joias e em produtos fabricados até hoje com ela (JACQUES, 2011).

Vários plásticos, borrachas e materiais fibrosos que são usados atualmente são provenientes de polímeros sintéticos. Após a Segunda Guerra Mundial a produção de polímeros vem crescendo, uma vez que o custo de produção é inferior aos demais materiais (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2016).

A Tabela 1 mostra, de forma bastante resumida, quando que foi a primeira produção industrial de alguns polímeros comerciais muito utilizados nos dias atuais.

Tabela 1 – Primeira ocorrência e primeira produtividade industrial de alguns polímeros comerciais.

Polímero	Primeira ocorrência	Primeira produção industrial
PVC	1915	1933
PS	1900	1936/1937
PEBD	1933	1939
Nylon	1930	1940
PEAD	1953	1955
PC	1953	1958
PP	1954	1959

Fonte: Adaptado de Canevarolo Júnior (2010).

2.4 POLIPROPILENO

O PP ainda é considerado um plástico novo, tendo sua descoberta creditada ao químico italiano Giulio Natta que, em 1954, utilizando catalisadores halogenados à base de titânio e alquilalumínio ($TiCl_4$ ou $Al(C_2H_5)_3$) desenvolvidos por Karl Ziegler, sintetizou o polipropileno cristalino (HESS; HERRMANN, 2005). A descoberta impulsionou a investigação dos sistemas catalíticos estereoespecíficos na polimerização de olefinas. Em 1963, Ziegler e Natta dividiram o Prêmio Nobel de química por suas invenções. O sistema catalítico desenvolvido é utilizado atualmente com algumas modificações, sendo conhecido como catálise de Ziegler-Natta (PETRY, 2011).

Entretanto, em 1951, os químicos americanos Paul Hogan e Robert Banks, que trabalhavam na Phillips Petroleum, já haviam conseguido converter eteno e propeno, que seriam

usados em componentes para a gasolina, em material sólido. Logo, reclamaram para si a patente de descoberta do polipropileno (PETRY, 2011). O processo judicial levou três décadas até a justiça americana julgar que a patente da descoberta do PP seria concedida à Phillips Petroleum, mesmo que Natta tenha sido o primeiro a publicar sua descoberta (PORRI, 2009).

Segundo Petry (2011), desde que se deu início à produção comercial de polipropileno, surgiram quatro processos de polimerização, na qual os catalisadores atualmente se encontram em sua quinta geração.

O PP pertence ao grupo das poliolefinas, ou seja, é um polímero derivado de hidrocarbonetos alifáticos (cadeias abertas ou cíclicas) que apresentam dupla ligação. As poliolefinas são uma das mais importantes famílias de plásticos, devido ao seu alto consumo mundial, isso porque representam os plásticos mais baratos e mais populares (PIATTI; RODRIGUES, 2005). O polipropileno é obtido através da polimerização do propileno (propeno), um subproduto gasoso da refinação do petróleo (LIMER-CART, 2015).

O esquema apresentado na Figura 2 mostra o processo de refinação do petróleo e a forma de obtenção do propeno.

Figura 2 – Esquema da refinação do petróleo.

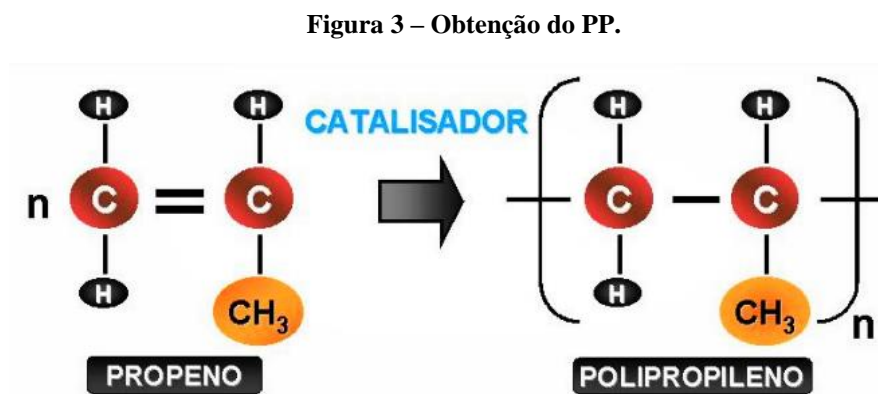


Fonte: Limer-Cart (2015).

O polipropileno é obtido através de reações de polimerização, aquelas em que o

produto simples (monômeros) reagem entre si, combinando suas moléculas e formando moléculas maiores (macromoléculas), caracterizadas pela repetição de uma unidade básica (mero), como já explicado anteriormente. O monômero para a produção de PP é o propeno, também chamado de propileno, um hidrocarboneto insaturado de fórmula C_3H_6 , obtido principalmente através do craqueamento da nafta, um derivado do petróleo (Figura 2) (PETRY, 2011). Segundo Correa (2015), as cadeias sem ramificações (cadeias lineares) com os arranjos moleculares ordenados justificam a baixa densidade desse polímero.

A reação simplificada que ocorre na produção do polipropileno é apresentada na Figura 3.



Fonte: Langhanz (2012).

O PP é o segundo plástico mais comercializado no mundo, perdendo posição apenas para o polietileno de alta densidade (PEAD). É um material compatível com muitas tecnologias de processamento, e é utilizado nas mais diversas aplicações, desde embalagens até eletrodomésticos, roupas e veículos (CERESANA, 2019a, 2019b). O último relatório da empresa de pesquisa de mercado prevê que as receitas desse tipo de plástico cresçam, em média, 4,9% ao ano, até 2026 (CERESANA, 2019a). O mercado global de polipropileno é estimado em mais de US\$ 80 bilhões, de acordo com pesquisa da Transparency Market, e deve alcançar US\$ 133 bilhões em 2023 (BLOG DO PLÁSTICO, 2019).

De acordo com a Braskem (2018), a demanda de resinas que incluem PE, PP e PVC totalizou 5,2 milhões de toneladas, correspondente a uma expansão de 2,4% em relação ao ano de 2017. Isto se explica pela melhora no nível de atividade econômica e impulsionada pela demanda dos setores agrícola, cosméticos, farmacêutico e de embalagens para alimentos.

2.4.1 Propriedades do polipropileno

O PP é um termoplástico com ampla utilização nos mais variados segmentos da indústria por causa de sua boa processabilidade combinadas às diversas propriedades, tais como, propriedades térmicas, mecânicas, resistência química, entre outras. Como exemplo de aplicações, pode-se evidenciar algumas relacionadas à boa resistência química, sendo utilizado pela indústria na fabricação de cordas navais, de tubulações para a vasta gama de produtos químicos, de embalagem de tintas e de solventes, de fios e de cabos, entre outros (DÍEZ-PASCUAL; NAFFAKH, 2013; WU *et al.*, 2013).

As propriedades térmicas e mecânicas do PP permitem sua utilização em condições de temperatura elevada (100 °C), como utensílios domésticos para forno micro-ondas, e sua atoxidade garante contato direto com alimentos sem alterar as condições do mesmo ou afetar a saúde humana (DÍEZ-PASCUAL; NAFFAKH, 2013). Além disso, o PP é um polímero de baixo custo, baixa massa específica (0,905 g/cm³) e fácil reciclagem, fato que aumenta a competitividade dos produtos que o tem como base (WU *et al.*, 2013; HUAN *et al.*, 2013).

O polipropileno se destaca, nas suas características ópticas, por ser um polímero branco e opaco naturalmente, podendo ser adicionados pigmentos no seu processamento (CORREA, 2015). Ele não é atacado pela maioria dos agentes químicos de natureza orgânica, contudo, sofre ataques de compostos halogenados e por agentes oxidantes, por exemplo, o ácido nítrico fumegante (HNO₃) (PETRY, 2011).

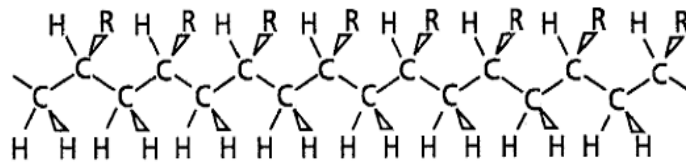
É um dos polímeros termoplásticos mais versáteis encontrados no mercado, cumprindo duas funções, como plástico e como fibra (PETROCUYO, 2019). A razão disto é a sua versatilidade de projeto em nível molecular, atrelado ao seu grande volume de consumo a um custo atrativo (HAMADA; FUJIHARA; HARADA, 2000).

A indústria petroquímica disponibiliza vários tipos de polipropilenos, tais como: PP homopolímero, PP copolímero heterofásico e PP copolímero randômico. O PP homopolímero contém apenas o monômero propeno em sua cadeia molecular e, sendo predominantemente de configuração isotática, pode atingir um grau de cristalinidade de até 70% (NASCIMENTO; TIMÓTEO; RABELLO, 2013).

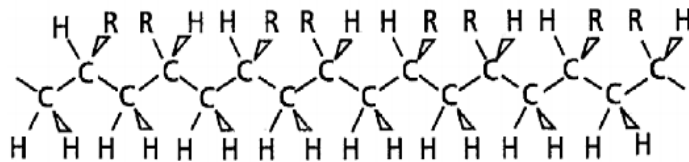
Lima, L. (2015) explica que a taticidade dos polímeros é dividida em três tipos (isotático, sindiotático e atático), conforme a Figura 4, de acordo com a ordem e posicionamento do grupo lateral, e que o polipropileno isotático é o de maior aplicação na indústria por apresentar maior grau de cristalinidade e melhores propriedades mecânicas e térmicas.

Figura 4 – Taticidade do polipropileno.

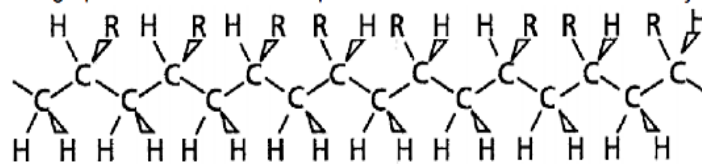
Isotático: Quando os grupos substituintes aparecem sempre sob o mesmo lado da cadeia principal



Sindiotático: Quando os grupos substituintes estão localizados sobre lados alternados da cadeia principal.



Atático: Quando os grupos substituintes estão posicionados aleatoriamente em relação a cadeia principal.



Fonte: Langhanz (2012).

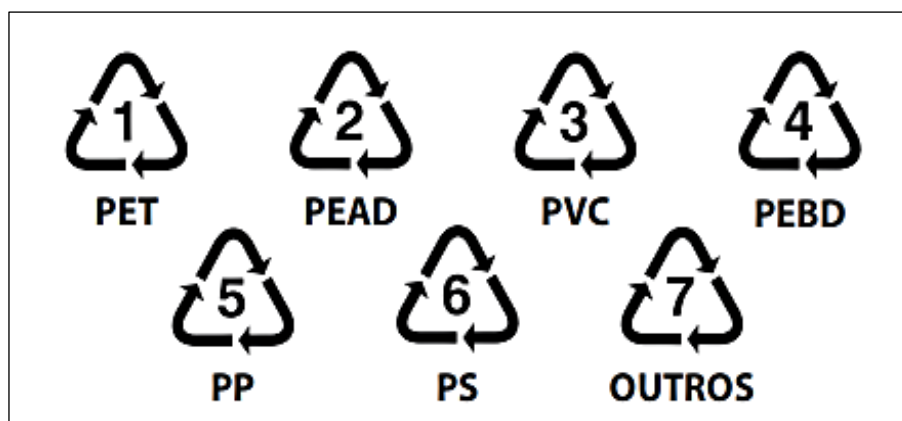
O polipropileno possui excelente inércia química e resistência à umidade, assim como boa resistência ao tensofissuramento ambiental (LANGHANZ, 2012). No entanto, é intrinsecamente menos estável do que o polietileno em relação à degradação térmica e à degradação oxidativa. Portanto, para o processamento satisfatório, o PP deve ser estabilizado pela incorporação de estabilizantes térmicos, absorventes de luz ultravioleta e antioxidantes (EBEWELE, 2000; DE PAOLI, 2008).

2.4.2 Reciclagem do polipropileno

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, em 2010, impôs que todos os municípios brasileiros deveriam operar um programa de coleta seletiva até o ano de 2014. No entanto, em 2018, apenas 22% dos municípios formalizaram essa exigência (CEMPRE, 2018).

A Norma Brasileira (NBR) que apresenta a simbologia indicativa para identificação das embalagens e acondicionamentos plásticos e que também auxilia na separação dos mesmos para fins de reciclagem segundo sua composição, é a NBR 13230 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2008). A Figura 5 mostra as simbologias utilizadas por essa norma, na qual o polipropileno é identificado pelo número 5.

Figura 5 – Simbologia de reciclabilidade e identificação das embalagens plásticas: 1) PET – Poli(tereftalato de etileno); 2) PEAD – Polietileno de alta densidade; 3) PVC – Poli(cloreto de vinila); 4) PEBD – Polietileno de baixa densidade; 5) PP – Polipropileno; 6) PS – Poliestireno; e 7) Outros – Outras resinas.



Fonte: NBR 13230 (ABNT, 2008).

De acordo com a pesquisa Ciclossoft 2018, mais de um décimo da composição gravimétrica¹ da coleta seletiva municipal de todo o Brasil é constituído por resíduos poliméricos, sendo que praticamente a metade desses materiais são compostos por polietilenos (PEAD e PEBD) e polipropileno (PP) (CEMPRE, 2018). Ainda, segundo a ABIPLAST (2018), o PP foi a resina mais demandada no Brasil (20,3%), seguida do PEAD (13,5%) e do PEBD (11,4%). Logo, destaca-se o grande potencial na reciclagem desses polímeros.

Conforme Caraschi e Leão (2008), a forma mais tradicional de reciclagem é a mecânica, em que se converte o resíduo plástico em grânulos que podem ser reutilizados na produção de outros produtos. Nesse processo, são seguidas as etapas de separação do resíduo polimérico, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento (extrusão); ao final, é possível transformar o resíduo em produto acabado (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

¹ Composição gravimétrica é um parâmetro que expressa a característica dos resíduos, possibilitando conhecer o percentual de cada componente presente em uma massa de resíduo. Desse modo é possível avaliar o potencial de reciclagem dos componentes e o melhor gerenciamento.

Segundo Spinacé e De Paoli (2005) e também Zanin e Mancini (2015), a reciclagem de plásticos pode ser classificada em: a) primária, onde os resíduos poliméricos são convertidos em produtos com características semelhantes às resinas virgens; b) secundário, os resíduos são convertidos em produtos com propriedades inferiores à resina virgem; c) terciária, em que há a produção de insumos químicos ou combustíveis a partir dos resíduos poliméricos; e d) quaternário, na qual ocorre a incineração controlada dos resíduos tendo-se em vista o aproveitamento de seu conteúdo energético.

A reciclagem primária e a secundária são conhecidas como reciclagem mecânica, diferenciando-se uma da outra pelo resíduo polimérico utilizado (pós-industrial e pós-consumo, respectivamente); a reciclagem terciária é também chamada de reciclagem química, enquanto a reciclagem quaternária é conhecida como reciclagem energética (SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

Por maiores que sejam as possibilidades para a reciclagem do material plástico, o potencial de sua reciclagem não é totalmente aproveitado. No Brasil, tem-se que o índice de reciclagem mecânica, que é o método de reciclagem usual dos termoplásticos, é de 25,8% (ABIPLAST, 2018).

Diante desse contexto, obter novas utilizações para um material que seria descartado em ambientes inadequados, principalmente como substituição de um recurso natural limitado na natureza, como é o caso da areia, vem se tornando essencial e de grande importância na construção civil.

2.5 O PAVIMENTO

Segundo Bernucci *et al.* (2010), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, a qual é destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços resultantes do tráfego de veículos e do clima. Além de também propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento (durabilidade da superfície), com conforto, economia e segurança (SENÇO, 2001).

2.5.1 Tipos de pavimento

Partindo da definição de pavimento como uma estrutura composta de camadas em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são colocados em contato, o que lhe confere elevado grau de complexidade quanto às tensões e deformações atuantes, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006) classifica os pavimentos em três tipos:

- flexíveis: aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado, de tal forma que a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas, tendo como exemplo típico o pavimento constituído por uma base de brita graduada, revestida por uma camada asfáltica;
- semirrígidos: caracterizados por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como, por exemplo, uma camada de solo cimento revestida por uma camada asfáltica;
- rígidos: aqueles em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores, de modo que este absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado, tendo como exemplo típico o pavimento constituído por lajes de concreto de cimento Portland.

Para o DNIT, a pavimentação por blocos de concreto é considerada uma estrutura flexível mais indicada para calçamentos. Sendo implantada de modo geral em pátios de estacionamentos, vias urbanas e acessos viários. Tem como vantagens a utilização em projetos que apresentam trechos de rampas mais íngremes, onde os *pavers* promovem uma maior aderência entre os pneus e a faixa de rodagem; trechos urbanos que são previstas instalações subterrâneas e posteriores reparos; em aterros recém-construídos e terrenos sujeitos a recalques acentuados (DNIT, 2006).

Quanto aos revestimentos (capa do pavimento), segundo Senço (2001), os mesmos podem ser divididos em rígidos e flexíveis. O Quadro 1 apresenta alguns dos exemplos mais executados de revestimento.

Quadro 1 – Tipos de revestimentos.

Terminologia dos revestimentos					
Revestimentos	Rígidos	Concreto de cimento			
		Macadame de cimento			
		Paralelepípedos rejuntados com cimento			
	Flexíveis	Betuminosos	Concreto betuminoso		Usinados
			Pré-misturado a quente		
			Pré-misturado a frio		
		Tratamento Superficial	Penetração direta		Simples Duplo Triplo Quádruplo
			Penetração invertida		
		Calçamentos articulados	Alvenaria poliédrica		
			Paralelepípedos		
Blocos de concreto pré-moldado					

Fonte: Adaptado de Senço (2001).

2.6 HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO

Leite, A. (2015) expressa que a humanidade desde seus primórdios sempre buscou meios de facilitar e melhorar sua vida, na qual a pavimentação de vias está inserida nesse contexto. Dessa forma:

Percorrer a história da pavimentação nos remete à própria história da humanidade, passando pelo povoamento dos continentes, conquistas territoriais, intercâmbio comercial, cultural e religioso, urbanização e desenvolvimento. Como os pavimentos, a história também é construída em camadas e, frequentemente, as estradas formam um caminho para examinar o passado, daí serem uma das primeiras buscas dos arqueólogos nas explorações de civilizações antigas. (BERNUCCI *et al.*, 2010, p. 13).

Mascarenhas Neto foi um magistrado e desembargador da Casa de Suplicação em Portugal, onde exerceu funções de superintendente geral de calçadas e estradas no final do século XXIII e início do século XIX. Com as experiências adquiridas na prática em projetos na Inglaterra, Escócia e França, pôde escrever um *Tratado para construção de estradas*, assim construindo estradas em Portugal com menores despesas por conhecer cada província do reino sabendo do relevo e terrenos (BERNUCCI *et al.*, 2010; LEITE, A., 2015).

Conforme Bernucci *et al.* (2010), àquela época já se havia uma grande preocupação com diversos aspectos que hoje são sabidamente importantes de se considerar para uma boa pavimentação, tais como:

- drenagem e abaulamento²;
- erosão;
- distância de transporte;
- compactação;
- sobrecarga;
- marcação.

2.6.1 Pavimentação intertravada no exterior

A utilização de peças segmentadas para a execução de pavimentos é uma técnica resultante de uma evolução de procedimentos dos quais encontram-se relatos de 25 séculos passados (MÜLLER, 2005). O tipo de peça dependia do material encontrado no local que se pretendia abrir a via, sendo os exemplos mais comuns os blocos de tijolo de argila, as pedras talhadas e aparelhadas manualmente, os blocos de tijolo de madeira e as peças pré-moldadas de concreto (BITTENCOURT, 2012).

De acordo com Müller (2005), durante o período entre 400 a.C. e 200 a.C., os romanos intensificaram a construção de um vasto sistema de caminhos compreendendo uma extensão de mais de 120.700 km, donde vinte e nove estradas irradiavam de Roma e se conectavam a numerosas outras. Grande parte do conhecimento romano sobre a construção de caminhos fora herdada dos etruscos (antigo povo da Península Itálica). As estradas romanas foram construídas de diversas formas, de acordo com a importância, expectativa de utilização, disponibilidade de material, clima e topografia.

Os caminhos em geral eram constituídos por solos arenosos misturados a pedras naturais do tipo seixo rolado; já os caminhos mais utilizados eram revestidos por pedras talhadas manualmente em forma retangular, sendo estes os preferidos pelos romanos, quando era exigida grande resistência ao desgaste (MÜLLER, 2005).

² Abaulamento é uma convexidade que se dá a diversas superfícies (ruas, estradas, coberturas etc.) para facilitar o escoamento de águas pluviais.

Das vias romanas, a mais conhecida de todas é a Via Ápia (Appia Antica), sendo a primeira a ser nomeada em homenagem ao seu construtor, Appius Claudius, que a criou em 312 a.C., durante a segunda Guerra Samnita. O objetivo era ligar Roma a Cápua (cerca de 195 km), permitindo ao exército romano chegar rapidamente, durante o período não invernos, às áreas de Campania e Samnium, retornando à Roma no inverno. Após o sucesso da Via Ápia, foi realizada uma série de outros projetos viários (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A Figura 6 apresenta a Via Ápia nos dias atuais e a Figura 7, uma via urbana em Pompeia, no sul da Itália, onde entrou em erupção o vulcão Vesúvio, em 79 d.C. Observa-se nas figuras que as vias eram pavimentadas com pedras devidamente intervaladas para permitir a circulação dos veículos rodantes; as calçadas para pedestres utilizavam a mesma técnica (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Figura 6 – Via Appia Antica.



Fonte: Meika (2015).

Figura 7 – Rua em Pompeia.



Fonte: Leite, A. (2015).

Segundo Cruz (2003), por volta do final do século XIX foi fabricada a primeira peça pré-moldada de concreto e algumas patentes foram registradas antes da Primeira Guerra Mundial. Marchioni (2012) complementa que o pavimento intertravado teve origem com a pavimentação com pedras talhadas, com o objetivo de melhoria do rolamento que antes era feito com pedras em estado natural. Porém, contava-se com uma produção artesanal, além do aspecto irregular das pedras, o qual desfavorecia o conforto e dificultava a passagem de pessoas e veículos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP, 2010).

Desta forma, rapidamente as peças pré-moldadas de concreto foram reconhecidas, uma vez que apresentavam melhor uniformidade que as peças aparelhadas e pela obviedade de não serem necessários reaparelhamentos antes do assentamento, como acontecia com as pedras naturais (CRUZ, 2003).

2.6.2 Pavimentação intertravada no Brasil

Santos e Borja (2007) indicam que as peças pré-moldadas de concreto eram utilizadas somente em obras paisagísticas ou em áreas que necessitavam de efeitos arquitetônicos ou visuais, vindo a ser utilizado posteriormente para pavimentação por apresentar-se como um material versátil e de manutenção facilitada quando comparado a outros tipos de pavimentos. Por este motivo, a partir da década de 1980, a produção e utilização de tais peças para pavimentação demonstraram rápido crescimento no mundo, incluindo-se o Brasil neste cenário (VERISSIMO, 2014).

Segundo Bittencourt (2012), o paralelepípedo é uma pedra talhada e aparelhada manualmente que é utilizada para revestimentos de pavimento até os dias atuais, o qual teve como origem o chamado pé-de-moleque, técnica trazida por portugueses no tempo da colonização. Estes contam com dimensões de até 50 cm e formatos irregulares que são agrupadas sobre o terreno natural. Cidades históricas como Paraty, no Rio de Janeiro, Mariana, em Minas Gerais e São Sebastião, em São Paulo, têm tanto o paralelepípedo quanto o pé-de-moleque em muitos locais como revestimento para o pavimento (LEITE, A., 2015). A Figura 8 apresenta um calçamento com a técnica pé-de-moleque.

Figura 8 – Rua de pavimento de pé-de-moleque na cidade de Paraty – RJ.



Fonte: Müller (2005).

O pavimento intertravado com peças de concreto é uma versão aperfeiçoada dos antigos paralelepípedos, com melhoria da forma e notando-se evolução destacada na estrutura e na fabricação (BAULÉ, 2018). Sua execução é semelhante à dos paralelepípedos, contudo requer cuidados apropriados a cada caso, de maneira a assegurar o devido intertravamento e a decorrente distribuição de tensões entre blocos adjacentes (DNIT, 2006).

Com o passar dos anos, o processo de urbanização intensificou-se de forma progressiva nas grandes cidades (ONO; BALBO; CARGNIN, 2017). Desse modo, iniciou-se uma intensa utilização de pavimentos com blocos pré-moldados de concreto de cimento Portland em todo mundo e particularmente no Brasil (FIORITI; INO; AKASAKI, 2007).

2.7 PAVIMENTO INTERTRAVADO COM BLOCO DE CONCRETO

2.7.1 Definições

A Norma Brasileira de peças de concreto para pavimentação é a NBR 9781 (ABNT, 2013), que define pavimento intertravado como um pavimento flexível, composto por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por uma de revestimento constituído por peças de concreto justapostas em uma camada de assentamento tendo-se as juntas preenchidas por material de rejuntamento; e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção.

Segundo Alcantara (2015), os blocos de concreto para pavimentação intertravada, que também são conhecidos por “pavers”, são peças pré-moldadas, cuja função é servir de superfície de rolamento e acabamento para pavimentação ou calçamento. Estes passam por verificações de qualidade e aceitação, de modo que o pavimento se apresenta com um revestimento uniforme, sem eventuais diferenças nas faixas de rolagem. Também por meio de blocos com superfícies diferenciadas, como pisos táteis, auxiliam no deslocamento de pessoas com deficiência visual e blocos com cores distintas facilitam a sinalização (LEITE, A., 2015).

Fernandes (2019) argumenta que, assim como nos demais tipos de pavimentos, no pavimento intertravado, a camada superficial apresenta características que propiciam conforto ao trânsito de pessoas, enquanto sua estrutura permite o trânsito de veículos leves ou pesados, dependendo da categoria e da aplicação dos pavers. Aliado a isso, a pavimentação intertravada se caracteriza pela sua simplicidade de assentamento, visto que as peças são simplesmente colocadas sobre uma camada de areia que serve de regularização da base e também atua na distribuição das cargas (FERNANDES, 2019).

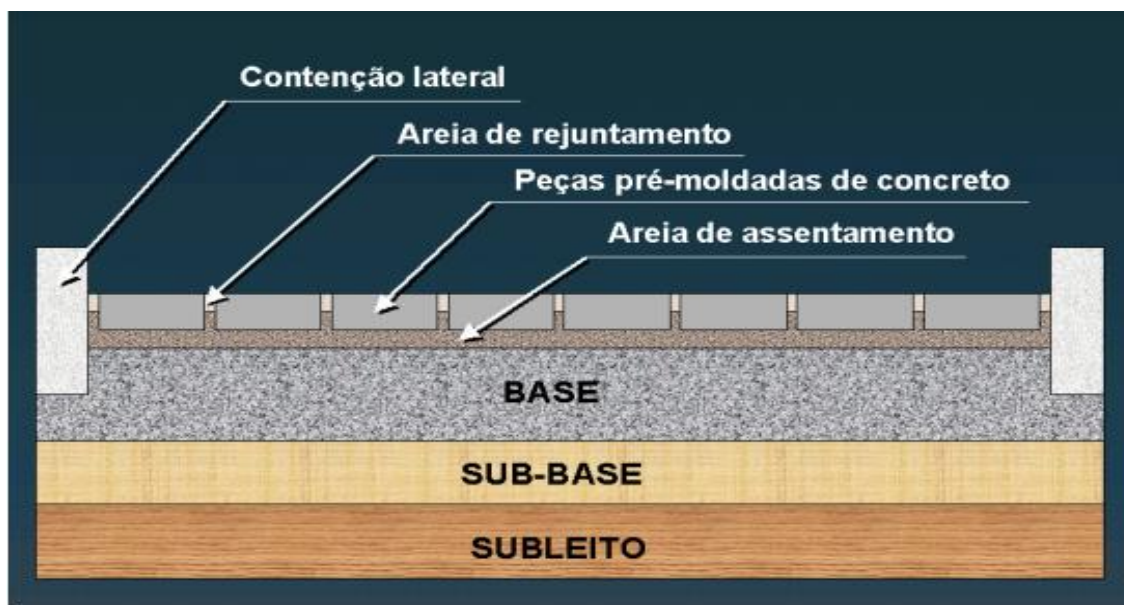
O autor supracitado esclarece a diferença entre piso intertravado e paver, onde o primeiro se refere ao conjunto do pavimento como um todo, com base compactada, confinamento e rejuntamento das peças; o segundo, por sua vez, corresponde à peça pré-moldada em si (FERNANDES, 2019). As Figuras 9 e 10 mostram exemplos de peças de paver e de perfil da solução pronta do piso intertravado (estrutura tipo), respectivamente.

Figura 9 – Exemplos de paver.



Fonte: Pagnussat (2004).

Figura 10 – Perfil da solução pronta do piso intertravado.



Fonte: Hallack (1998 apud MÜLLER, 2005).

Tal como apresentado na Figura 10, o pavimento intertravado é formado por subleito, sub-base, base, contenção lateral, areia de assentamento, peças pré-moldadas de concreto e areia de rejuntamento (selagem das juntas) (BITTENCOURT, 2012).

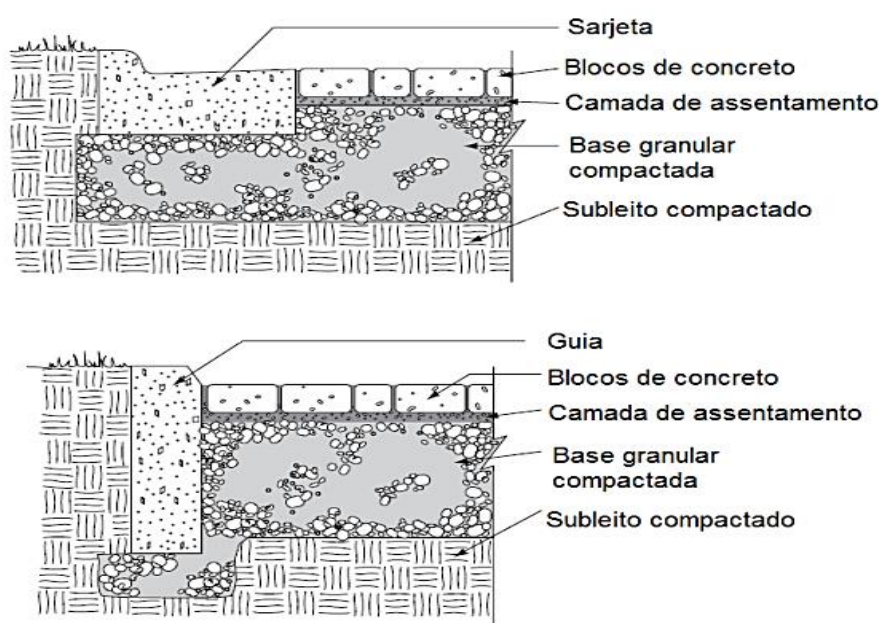
A base, que tanto pode ser composta de material puramente granular ou estabilizado, é normalmente a principal componente estrutural do pavimento, a qual recebe e distribui as tensões provenientes das solicitações externas e transmite-as em intensidade significativamente menor às camadas subjacentes. A sub-base, cujas funções são semelhantes às da camada de base, geralmente é constituída de material puramente granular, a qual proporciona aumentos de resistência global da estrutura a custos menores. Em alguns casos, o dimensionamento requer uma camada de reforço do subleito, executada entre a sub-base e o subleito, que é o terreno de fundação do pavimento que suporta a estrutura do pavimento e a solicitação do tráfego (CRUZ, 2003; GODINHO, 2009; LEITE, A., 2015).

A camada de assentamento é uma superfície de areia onde são posicionados os pavers, a qual muitos autores referem como “colchão de areia”. Deve proporcionar uma superfície regular, com uma camada entre 3 e 4 cm após compactação, para acomodar as peças. Para a selagem das peças pré-moldadas de concreto, uma camada de areia fina é espalhada sobre o pavimento, de maneira que penetre nas juntas, preenchendo os vazios e garantindo o intertravamento das peças. Tal preenchimento das juntas promove diminuição das deflexões e

aumento da capacidade de suporte do revestimento do pavimento (ABCP, 2010; BITTENCOURT, 2012; LEITE, A., 2015).

Por fim, as contenções laterais precisam ser executadas antes do assentamento da camada de revestimento para garantir a estabilidade lateral do sistema. São constituídas por estruturas rígidas que impossibilitam o deslocamento lateral dos blocos, podendo ser fixados na camada de base. Em caso de caixas de inspeção, jardim ou postes, deve ser feita uma base de contenção lateral circundando seu perímetro para não perder o travamento das peças, impedindo o deslocamento lateral dos pavers (HALLACK, 1998; BITTENCOURT, 2012; LEITE, A., 2015). A Figura 11 exemplifica a disposição de diferentes tipos de contenções em seções transversais de pavimento com peças de concreto.

Figura 11 – Exemplos de diferentes tipos de contenções empregadas em pavimentos com pavers.



Fonte: ICPI (2014 apud SILVA, 2016).

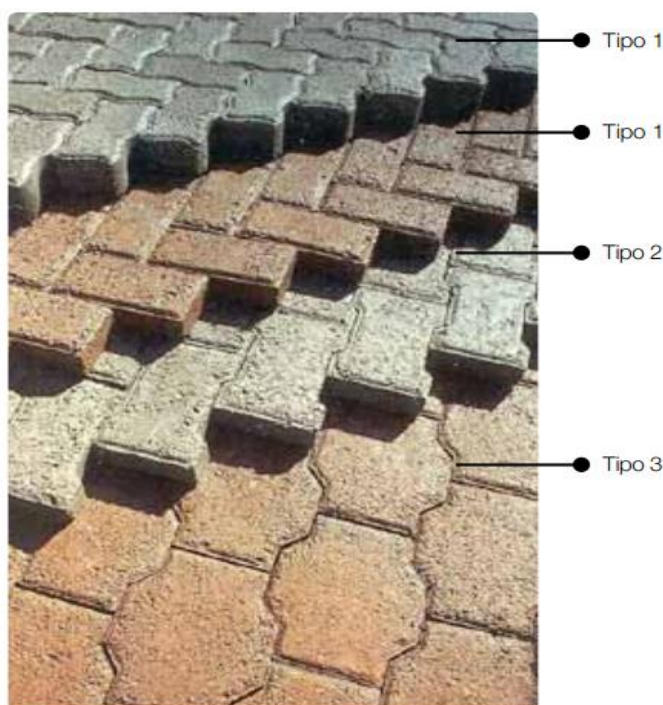
2.7.2 Formato e arranjo das peças

Na literatura das peças de pré-moldados de concreto para pavimentação depara-se com uma variedade de formatos dos blocos. De acordo com o Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI, 2012), o formato das peças de concreto determina a gama de padrões de arranjo. Não obstante, o ICPI considera-se conservador a não reconhecer diferenças entre as formas dos pavers com relação ao seu desempenho estrutural e funcional (ICPI, 2012).

Conforme o Manual de Pavimento Intertravado da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2010), são definidos três tipos básicos de formatos de blocos, os quais são descritos a seguir e ilustrados na Figura 12:

- Tipo 1: constituído por formas retangulares, apresenta facilidade de produção e colocação em obra, além de facilitar a construção de detalhes nos pavimentos. As suas dimensões são, usualmente, 20 cm de comprimento por 10 cm de largura e as suas faces laterais podem ser retas, curvilíneas ou poliédricas;
- Tipo 2: genericamente, apresenta o formato “I” e somente pode ser montado em fileiras travadas. As suas dimensões são, usualmente, 20 cm de comprimento por 10 cm de largura;
- Tipo 3: é o bloco que, pelo seu peso e tamanho, não pode ser apanhado com uma mão só (suas dimensões são de, pelo menos, 20 x 20 cm).

Figura 12 – Tipos básicos de formatos de blocos de concreto para pavimentação.

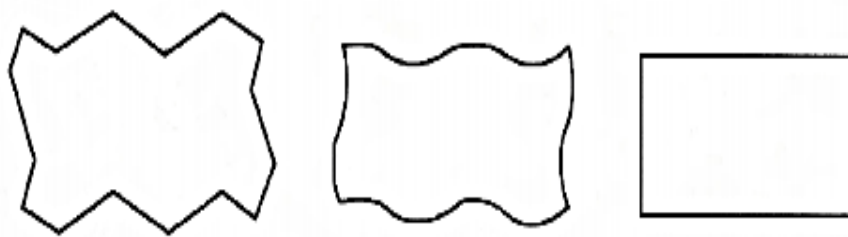


Fonte: ABCP (2010).

Já de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013), no Brasil, os formatos das peças de concreto para pavimentação são agrupados em quatro categorias, como segue:

- Tipo I: peças de concreto com o formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranjam entre si nos quatro lados e podem ser assentados em fileiras ou em espinha de peixe, como ilustrado na Figura 13;

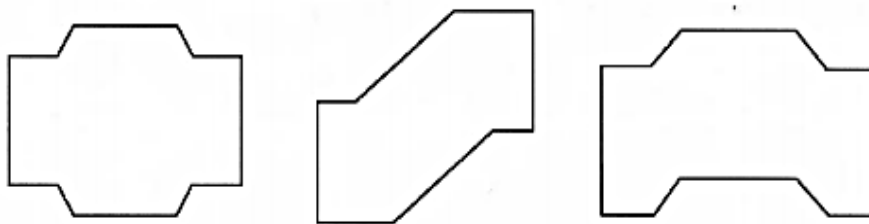
Figura 13 – Exemplos de peças de concreto do Tipo I.



Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

- Tipo II: peças de concreto com formato único, diferente do retangular, e que só podem ser assentadas em fileiras, conforme a Figura 14;

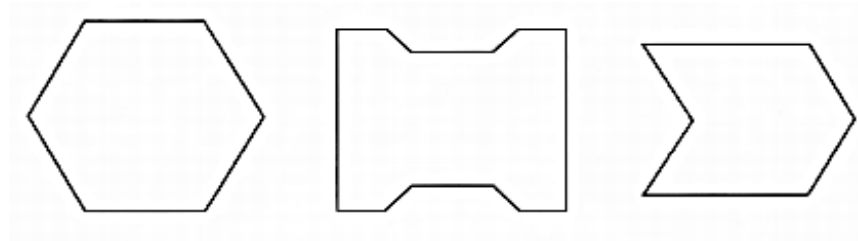
Figura 14 – Exemplos de peças de concreto do Tipo II.



Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

- Tipo III: peças de concreto com formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos, triedros etc., com pesos superiores a 4 kg (Figura 15);

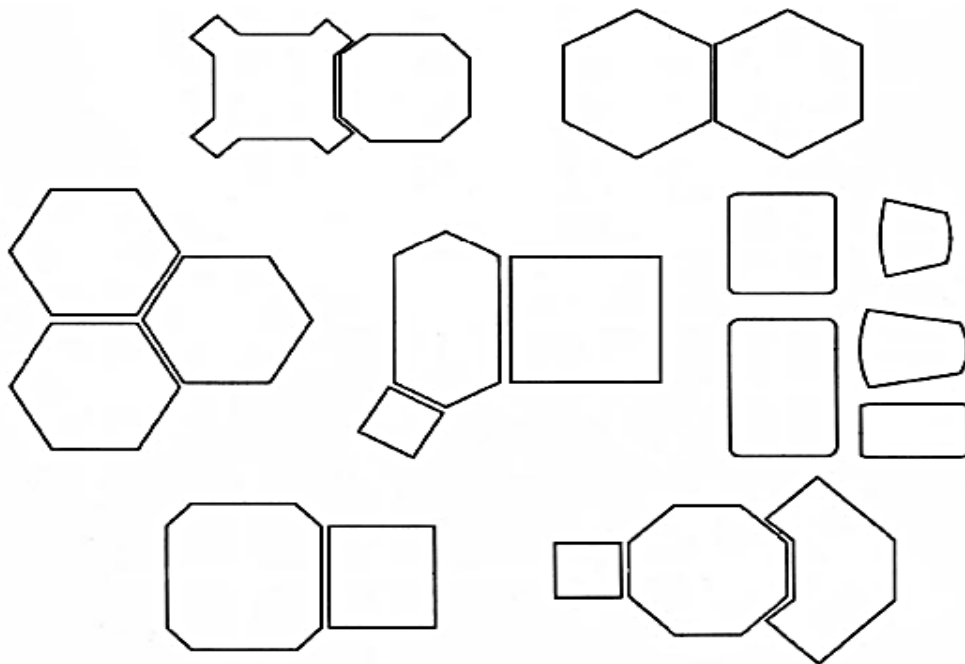
Figura 15 – Exemplos de peças de concreto do Tipo III.



Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

- Tipo IV: conjunto de peças de concreto de diferentes tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser utilizadas com um ou mais padrões de assentamento, como mostrado na Figura 16.

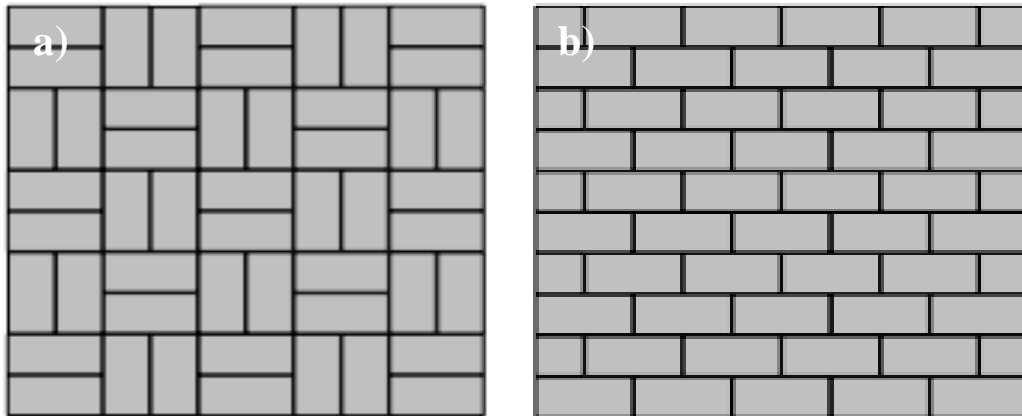
Figura 16 – Exemplos de peças de concreto do Tipo IV.



Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

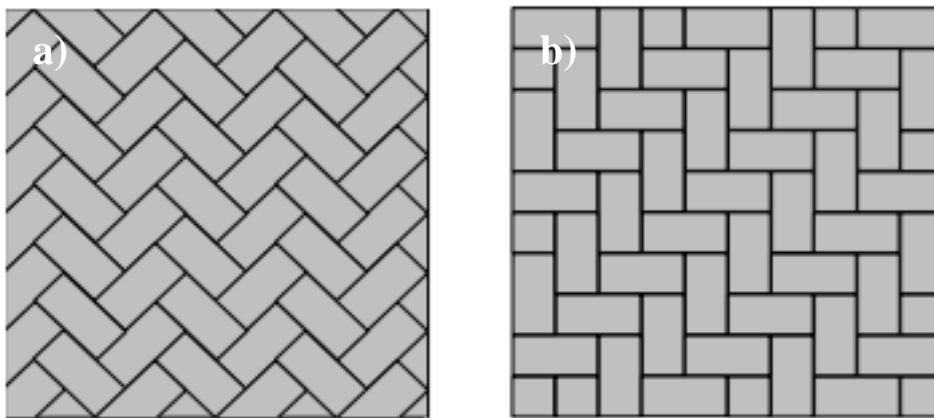
Desta forma, há uma variedade de padrões de arranjo que podem ser obtidos com base nos tipos de blocos a serem utilizados e suas possíveis combinações (SILVA, 2016). O tipo de arranjo de assentamento interfere na aparência e no desempenho do pavimento. Os arranjos podem ser divididos em espinha de peixe, fileiras ou trama (ABCP, 2010). As Figuras 17 e 18 ilustram os padrões de arranjo mais comuns em função de sua aplicabilidade em relação ao tipo de tráfego esperado.

Figura 17 – Padrões de assentamento dos pavers recomendado para o tráfego de pedestres: a) trama e b) fileiras (ou “de corredor”).



Fonte: Hallack (1998 apud GODINHO, 2009).

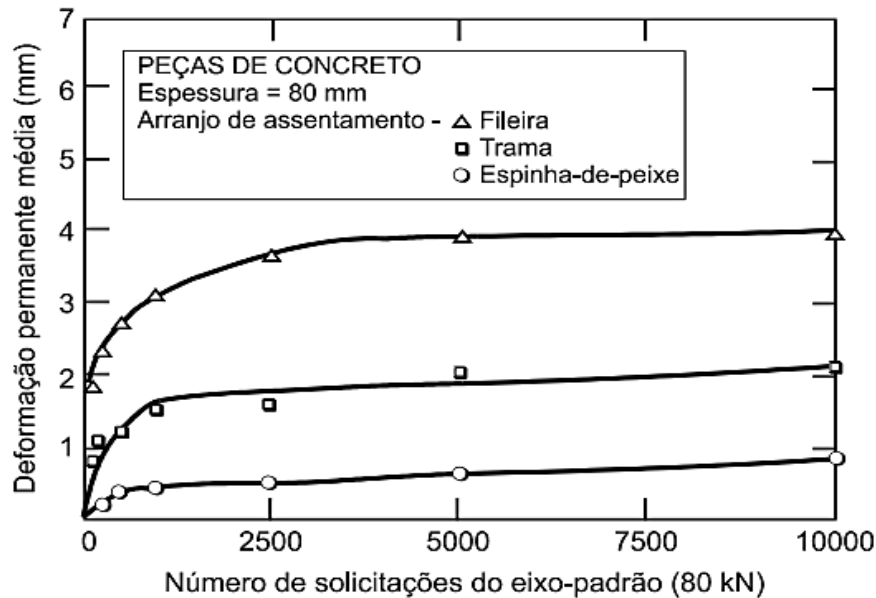
Figura 18 – Padrões de assentamento dos pavers recomendado para o tráfego de veículos: a) espinha de peixe a 45° e b) espinha de peixe a 90°.



Fonte: Hallack (1998 apud GODINHO, 2009).

Há consenso entre os pesquisadores quanto à hierarquia dos melhores arranjos. Em condições de tráfego intenso, o arranjo “espinha de peixe” é considerado o mais adequado devido à sua boa resposta frente ao fenômeno de “escorregamento” analisado em relação ao travamento horizontal, pois os atritos entre as arestas das peças colaboram para este travamento (BITTENCOURT, 2012; ICPI, 2012; SILVA, 2016). Shackel (1990 apud GODINHO, 2009) relata que o referido arranjo possui melhor nível de desempenho, apresentando menores valores de deformação permanente associados ao tráfego; ao passo que, o assentamento do tipo “fileira” apresenta os piores resultados, principalmente quando disposto paralelamente ao sentido do tráfego. A Figura 19 ilustra o desempenho das peças de concreto em função do seu arranjo.

Figura 19 – Efeito do arranjo de assentamento das peças de concreto no desempenho do pavimento sob solicitação do tráfego.



Fonte: Shackel (1990 apud GODINHO, 2009).

2.7.3 Intertravamento

Hallack (1998) afirma que o intertravamento é a característica principal dos pavimentos com pavers, e recebe este nome pelo seu método construtivo onde as peças estão intertravadas resistindo a movimentos de deslocamento individual, em relação às peças vizinhas. Para se obter o correto intertravamento é indispensável que sejam seguidos o projeto das contenções laterais e o preenchimento das juntas com areia, que permite que as cargas aplicadas sejam distribuídas de modo semelhante ao asfalto, reduzindo as tensões na base e no subleito (HALLACK, 1998; ICPI, 2012).

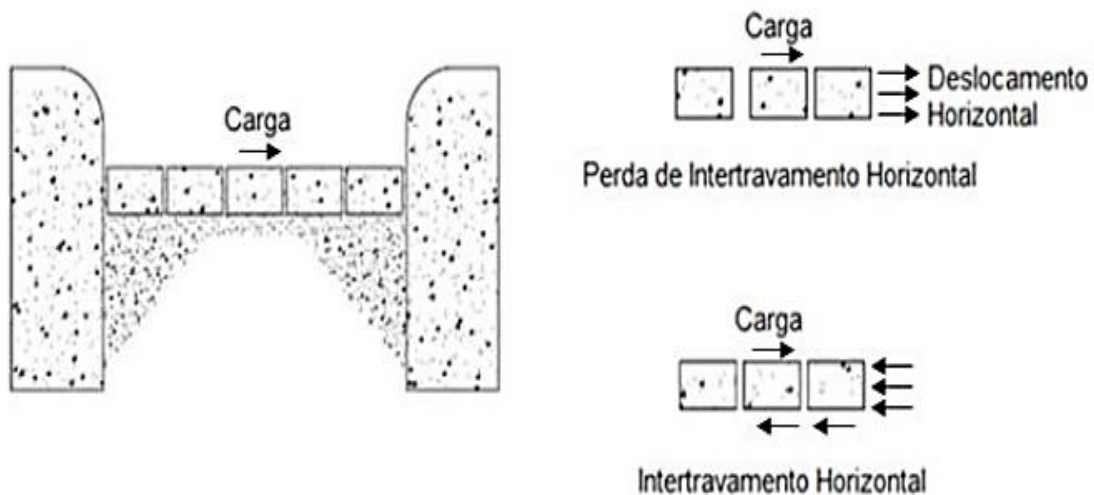
Quando há transferência de carga entre os blocos de concreto eles são classificados como intertravados, e, quando dispostos de forma independente, sem que haja a transferência de carga entre eles, classificam-se como não intertravados (SILVA, 2016). O pavimento intertravado possui três tipos de intertravamento: horizontal, vertical e rotacional. Os mesmos atuam simultaneamente ao longo de sua vida de serviço (HALLACK, 1998).

2.7.3.1 Intertravamento horizontal

Conforme a NBR 15953 (ABNT, 2011, p. 3): “intertravamento horizontal é a capacidade do pavimento intertravado de resistir a esforços causados por forças de aceleração e frenagem das cargas.”

O intertravamento horizontal, como mostrado na Figura 20, está relacionado diretamente com o formato e arranjo de assentamento das peças de concreto sobre a camada de areia. Neste sentido, contribui na distribuição dos esforços de cisalhamento horizontal sob a atuação do tráfego, sobretudo em áreas de aceleração e frenagem, como já definido. As juntas entre as peças, quando convenientemente cheias de areia e bem compactada, são, na verdade, as responsáveis pelo nível deste tipo de intertravamento (CRUZ, 2003; GODINHO, 2009).

Figura 20 – Intertravamento horizontal.



Fonte: ICPI (2010 apud SILVA, 2016).

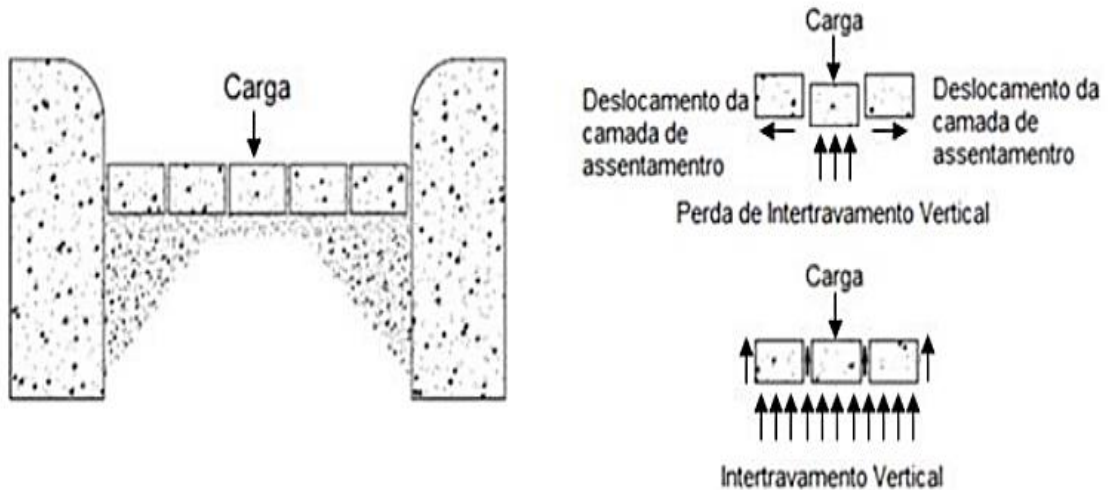
2.7.3.2 Intertravamento vertical

A NBR 15953 (ABNT, 2011, p. 3) define: “intertravamento vertical é a capacidade do pavimento intertravado de resistir a esforços de cisalhamento entre as peças.”

O intertravamento vertical, ilustrado na Figura 21, pode ser obtido utilizando peças de concreto especiais com formatos e encaixes reentrantes uma a uma. Assim, quando é aplicada uma carga vertical sobre os pavers existe um contato do tipo macho-fêmea distribuindo os

esforços para as peças vizinhas. Outro tipo de intertravamento vertical independe do formato das peças, onde o mesmo é alcançado através da malha de juntas formada pelos grãos de areia bem compactados lateralmente e a estabilidade estrutural do colchão de areia compactado e confinado (CRUZ, 2003; GODINHO, 2009).

Figura 21 – Intertravamento vertical.



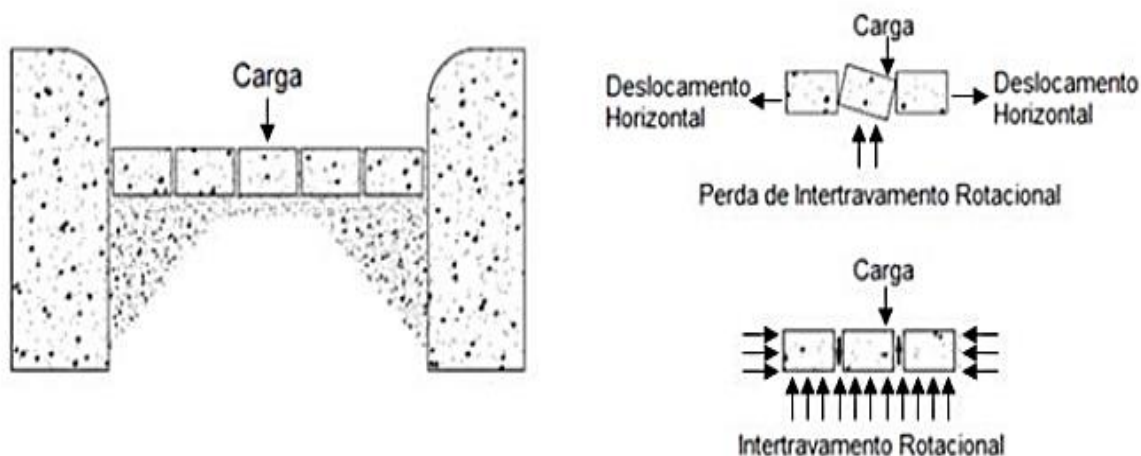
Fonte: ICPI (2010 apud SILVA, 2016).

2.7.3.3 Intertravamento rotacional

Conforme a NBR 15953 (ABNT, 2011, p. 3): “intertravamento rotacional é a capacidade do pavimento intertravado de resistir a esforços perpendiculares excêntricos das peças.”

A aplicação de uma carga vertical assimétrica sobre um bloco tende a rotacioná-lo. Com isso, para que um bloco individual rode, ele deve deslocar o seu vizinho lateralmente sobre uma contenção lateral, tal como ilustrado na Figura 22. O intertravamento rotacional é alcançado quando cada bloco se torna impedido de rodar (SILVA, 2016). Tal ocorrência depende principalmente da natureza das juntas entre as peças de concreto, isto é, da sua largura, do tipo de areia utilizada e rejuntamento (CRUZ, 2003; GODINHO, 2009).

Figura 22 – Intertravamento rotacional.



Fonte: ICPI (2010 apud SILVA, 2016).

2.8 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS DE CONCRETO

A produção de pavers com boa qualidade aliado à economia requer equipamentos apurados, bem como um controle rigoroso do processo produtivo. Deste modo, é garantido que as peças apresentem homogeneidade, com uniformidade na cor, na textura e nas suas dimensões (ABCP, 2010; PIROLA, 2011). Ainda, de acordo com Scott Hood (2006), conhecer as propriedades requeridas, os materiais que compõem e a execução da dosagem são fundamentais para obter sucesso na fabricação dessas peças.

Segundo Bittencourt (2012), a fabricação dos pavers é classificada em três tipos:

- paver vibroprensado – produção mecânica: para sua fabricação é usado o concreto seco com a utilização de vibroprensas hidráulicas ou mecânicas, o que lhe confere elevada compactação, aumentando sua resistência mecânica e durabilidade;
- paver virado – produção manual: em sua confecção é usado o concreto plástico em fôrmas conjuntas ou individuais, adensadas em mesa vibratória e desmoldada logo após a moldagem em uma base plana e impermeável. Isto faz com que as peças tenham a superfície lisa, dando a aparência estética mais agradável;

- paver dormido – produção manual: para seu fabrico usa-se o concreto, mas não o concreto plástico, apesar do preenchimento dos moldes serem iguais, com o auxílio de uma mesa vibratória, deixando o concreto endurecer, procede-se a desmoldagem no dia seguinte da moldagem.

Ainda conforme a autora, os pavers vibroprensadas são os mais utilizados devido sua alta produção e alto controle tecnológico. Esses equipamentos são vibroprensas multifuncionais que podem ser utilizadas na produção de uma grande família de produtos de artefatos de cimento Portland, como por exemplo blocos de concreto, tijolos, meios-fios, grelhas, peças pré-moldadas de concreto e placas (BITTENCOURT, 2012).

2.8.1 Materiais

De acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013, p. 3): “o concreto utilizado nas peças deve ser constituído de cimento Portland, agregados e água, sendo permitido o uso de aditivos e pigmentos.”

Os pavers são produzidos com concreto seco, material que possui peculiaridades tecnológicas, e a qualidade final das peças, bem como do sistema de pavimentação como um todo, depende diretamente da utilização de matérias-primas escolhidas corretamente (ALCANTARA, 2015; BAULÉ, 2018). Além de influenciar na qualidade das peças, a escolha de materiais com características desfavoráveis resulta em maiores consumos de cimento, menor produtividade e ainda um maior custo de produção (FERNANDES, 2019).

2.8.1.1 Cimento

A produção de argamassas e concretos na construção civil só é possível graças à utilização do cimento Portland, um aglomerante hidráulico cujo endurecimento ocorre por meio de reações químicas entre esse material e a água (hidratação), havendo assim a formação de um produto final estável em meio aquoso (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), o cimento utilizado para a fabricação dos pavers pode ser de qualquer tipo e classe, devendo atender à norma atualizada NBR 16697 (ABNT,

2018) que especifica os requisitos acerca dos cimentos Portland. Cada cimento apresenta diferentes proporções de clínquer e sulfatos de cálcio, material carbonático e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário (ABCP, 2016), como apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Tipos e constituições dos cimentos Portland.

Tipo de cimento Portland (designação normalizada)		Sigla	Classe de resistência (MPa)	Clínquer + sulfatos de cálcio (%)	Escória granulada de alto-forno (%)	Material pozolânico (%)	Material carbonático (%)
Comum		CP I	25, 32 ou 40	95 – 100	0 – 5		
		CP I-S		90 – 94	0	6 – 10	
Composto com escória granulada de alto-forno		CP II-E		51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Composto com material pozolânico		CP II-Z		71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Composto com material carbonático		CP II-F		75 – 89	0		11 – 25
Alto-forno		CP III		25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Pozolânico		CP IV		45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Alta resistência inicial		CP V		ARI	90 – 100	0	
Branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	75 – 100	–	–	0 – 25
	Não estrutural		–	50 – 74	–	–	26 – 50

Fonte: Adaptado de NBR 16697 (ABNT, 2018).

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), os cimentos Portland são identificados por suas siglas, seguidos de sua classe de resistência (aos 28 dias) e ainda acrescidos dos sufixos RS (Resistência a Sulfatos) e BC (Baixo Calor de Hidratação), quando aplicáveis. Como exemplo dessa designação, denomina-se CP II-E-32 o cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno com resistência mínima à compressão de 32 MPa aos 28 dias de idade.

Segundo Fernandes (2019), os tipos de cimento recomendados para fabricação das peças intertravadas são o CP V-ARI e os cimentos de classe 40 MPa, devido eles conferirem aos blocos de concreto uma alta resistência inicial, a qual é necessária para uma desforma e aplicação rápidas que os pavers necessitam (FERRARI, 2017; FERNANDES, 2019).

2.8.1.2 Agregados

Para a NBR 9781 (ABNT, 2013), os agregados utilizados na produção dos pavers podem ser naturais, industriais ou reciclados, desde que obedçam à NBR 7211 (ABNT, 2019) ou demais NBRs pertinentes em vigor. Onde, para a norma atualizada de 2019, de modo geral, agregado miúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira (#) com abertura de malha de 4,75 mm; e agregado graúdo, com os grãos passantes na # de 75 mm e retidos na de 4,75 mm.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que os agregados influenciam grandemente na trabalhabilidade das misturas, na resistência, estabilidade e durabilidade do concreto. Desta forma, a qualidade do agregado utilizado para a confecção de concretos é de extrema importância, sendo que, em algumas situações, o agregado é limitante para a resistência do concreto no estado endurecido (NEVILLE, 1997).

A escolha dos agregados deve considerar uma boa distribuição granulométrica, permitindo um menor consumo de cimento e uma maior resistência, pois os grãos mais finos preenchem os espaços vazios entre os mais grossos, deixando o material mais compacto (ALCANTARA, 2015). Recomenda-se um diâmetro máximo de agregado não superior a 9,5 mm, a fim de se manter um bom acabamento dos pavers (BITTENCOURT, 2012).

Na literatura também é comum constatar a utilização de pó de brita como agregado na fabricação dos pavers, uma vez que ele possui um alto teor de finos, o qual garante coesão ao concreto; grãos médios, que conferem volume à argamassa; e grãos maiores, que garantem resistência à peça de concreto (BITTENCOURT, 2012; FERNANDES, 2019).

2.8.1.3 Aditivos químicos

Segundo a NBR 11768-1 (ABNT, 2019, p. 3), aditivo químico para concreto é um: “produto adicionado e misturado no concreto, em quantidade geralmente não superior a 5% da massa de ligante total contida no concreto, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido.”

Existem diversos tipos de aditivos, os quais possuem composições químicas diferenciadas que, conseqüentemente, produzem efeitos individualizados sobre o concreto

(MEHTA; MONTEIRO, 2008). A norma NBR 11768-1 (ABNT, 2019) especifica os aditivos segundo a designação normalizada a seguir:

- redutor de água tipo 1 – RA1; RA1-R; RA1-A;
- redutor de água tipo 2 – RA2; RA2-R; RA2-A;
- controlador de hidratação – CH;
- acelerador de pega – AP;
- acelerador de resistência – AR;
- acelerador de pega para concreto projetado – APP;
- compensador de retração – CR;
- redutor de retração – RR;
- incorporador de ar – IA;
- incorporador de ar para concreto leve – IA-L;
- redutor de corrosão – RC;
- modificador de viscosidade retentor de água – MV-RT;
- modificador de viscosidade antissegregante – MV-AS;
- redutor de absorção capilar – RAC;
- redutor de permeabilidade – RP;
- aditivos para concreto vibroprensado – CVP.

De acordo com a norma, os aditivos redutores de água tipo 1 (RA1) são conhecidos comercialmente por aditivos plastificantes, polifuncionais, multifuncionais, entre outros; e os aditivos redutores de água tipo 2 (RA2), por superplastificantes, hiperplastificantes, entre outros. Ainda segundo a NBR 11768-1 (ABNT, 2019), os aditivos RA1 são aqueles que, sem modificar a consistência do concreto, permite reduzir seu conteúdo de água, ou, sem alterar a quantidade de água, modifica a consistência do concreto, aumentando a fluidez, ou, ainda, produzindo esse efeito simultaneamente. Enquanto os aditivos RA2 permitem ainda maior redução de água quando comparados aos aditivos RA1.

Por fim, Hartmann *et al.* (2010) complementam ao afirmar que os aditivos químicos são utilizados para se reduzir a quantidade de cimento, mantendo a consistência e resistência à compressão com o objetivo de reduzir custos, retração e tensões térmicas.

2.8.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados na fabricação de blocos intertravados de concreto para pavimentação são os misturadores de concreto e as vibroprensas. O primeiro dispõe de energia necessária para homogeneização da massa, enquanto a segunda é responsável pela execução da moldagem e da extrusão das peças de concreto (ALCANTARA, 2015).

Sendo os pavers confeccionados com concreto seco, necessita-se que se utilize uma máquina com alta eficiência para se realizar a mistura dos insumos de forma a obter uma completa homogeneidade da massa (MARCHIONI, 2012). Por isso, é recomendada a utilização dos misturadores de concreto para tal finalidade (BAULÉ, 2018). Sendo os mais indicados os misturadores biplanetários do tipo bateadeira de bolo (Figura 23), os de eixo horizontal helicoidal que proporcionam uma mistura forçada, os de eixo vertical fixo e os de eixo horizontal de pás (FERNANDES, 2019).

Figura 23 – Exemplo de misturador biplanetário.



Fonte: Leite, A. (2015).

As tradicionais betoneiras podem ser utilizadas, entretanto seu uso não é muito recomendado, haja vista que, pela mistura se dar por gravidade, há uma maior probabilidade de “empelotar” a massa no seu interior (ALCANTARA, 2015). Quanto à capacidade do misturador e o tempo de homogeneização, é variável de acordo com o tipo empregado e deve ser executado conforme a recomendação do fabricante da máquina (PIROLA, 2011).

Industrialmente, os pavers são moldados por máquinas chamadas vibroprensas, que proporcionam elevada compactação às peças, resultando em blocos mais resistentes mecanicamente e duráveis (ABCP, 2010). Essas máquinas recebem essa denominação devido ao mecanismo de funcionamento: vibração associada à prensagem. Aquela é responsável pelo preenchimento e adensamento da mistura nos moldes; enquanto a segunda, compressiva, adensa e controla as dimensões dos pavers (SCOTT HOOD, 2006).

Há vários tipos de vibroprensas empregados na produção de peças intertravadas, as quais variam quanto ao modelo, natureza das unidades de vibrocompressão, qualidade, eficiência e preços (ALCANTARA, 2015). Segundo Fernandes (2019), em relação aos sistemas de vibrocompressão, tem-se que as vibroprensas são divididas em manuais, pneumáticas e hidráulicas.

Os sistemas manuais são os mais simples, onde as máquinas, em geral, possuem um motor elétrico e a prensagem das peças se dá de forma manual. São indicadas para pequenos construtores ou iniciantes no ramo dos blocos pré-moldados. Porém, demandam um maior consumo de cimento devido à falta de energia de prensagem, logo, torna-se praticamente inviável a obtenção de blocos de categoria estrutural (FERNANDES, 2019).

Segundo Fernandes (2019), as vibroprensas de funcionamento pneumático utilizam pistões movidos a ar comprimido, o que propicia ao sistema uma maior produtividade. Contudo, elas geram menos energia de compactação quando comparadas às vibroprensas hidráulicas, resultando em maiores consumos de cimento para se obter a mesma resistência.

Por fim, os sistemas hidráulicos são os mais eficientes e econômicos, sendo possível produzir peças de maior qualidade a um consumo inferior de cimento (FERNANDES, 2019). Essas vibroprensas empregam bomba e pistões a óleo, onde prensagem e vibração são sincronizadas para se obter peças com uma ótima compactação. Também possuem uma central programável que permite ao operador um maior controle dos tempos de alimentação, prensagem, acomodação e extrusão das peças, garantindo maior uniformidade e, conseqüentemente, uma maior qualidade ao processo (FERNANDES, 2019).

A Figura 24 mostra um exemplo de vibroprensa hidráulica utilizada na fabricação de pavers.

Figura 24 – Vibroprensa hidráulica.



Fonte: Alcantara (2015).

2.8.3 Dosagem e cura

Diferentemente do que ocorre com o concreto plástico, que possui diversos métodos de dosagem e, quando se tem uma plasticidade fixa, possui uma perfeita correlação da resistência com a relação água/cimento (a/c), o concreto seco dispõe de poucos métodos de dosagem (PINHEIRO, 2015). Isto deve-se à grande variação de densidade da mistura, provocada pela diferença entre os diversos tipos de equipamentos disponíveis no mercado, e suas respectivas capacidades de compactação (PAGNUSSAT, 2004; FERNANDES, 2019).

De acordo com Fernandes (2019), essa variação dos equipamentos anula a possibilidade de um método que generalize a dosagem, sendo necessário um estudo e adequação do método escolhido ao equipamento utilizado. Desta forma, o autor recomenda que cada indústria tenha seu próprio traço, de modo que atenda aos requisitos exigidos pela norma de peças para pavimentação intertravada, a NBR 9781 (ABNT, 2013).

O método IPT/EPUSP de Helene e Terzian (1992), consagrado para dosagens de concretos plásticos convencionais, não é adequado para os blocos de concreto para pavimentação, uma vez que, via de regra, os concretos secos não seguem a Lei de Abrams, a qual determina que a resistência à compressão cai quando se aumenta a relação a/c (FRASSON JÚNIOR, 2000). Segundo Amadei (2011) o concreto seco caracteriza-se por ter uma baixa

relação água/materiais secos, grande consistência (*Slump* zero), alta coesão e o modo como o ar aprisionado é retirado, através dos equipamentos de compactação.

No concreto seco quanto mais água, maior é a sua resistência mecânica (FRASSON JÚNIOR, 2000). Contudo, Fernandes (2019) ressalta que se a umidade ótima do sistema for ultrapassada, o concreto perde a consistência seca e sua consequente capacidade de moldagem, deformando as peças e/ou grudando suas partes nos moldes e na prensa. A quantidade de água ideal a ser utilizada na mistura é aquela que assegura uma maior compacidade às peças (PIROLA, 2011).

Abreu (2002 apud AMADEI, 2011) expõe que a dosagem dos concretos secos é geralmente executada segundo o Método do Menor Volume de Vazios, o qual consiste em encontrar a melhor proporção entre os agregados de forma que seja exequível proporcionar o menor volume de vazios possíveis entre os agregados e os demais componentes do concreto. Há uma melhor acomodação das partículas e redução no volume da peça.

O Método do Menor Volume de Vazios se baseia no ensaio de massa unitária do agregado, comparando as massas de misturas de areia e pedrisco em um recipiente de volume conhecido. Os equipamentos necessários para a realização do método são uma balança com capacidade mínima de 5 kg, um recipiente cilíndrico com capacidade de 3 L e uma haste metálica. A dosagem, então é efetuada nas seguintes etapas (FIORITI, 2007):

- a) determinação da melhor mistura pedrisco-areia: misturam-se esses dois componentes em proporções variadas, como 20%, 40%, 60% e 80% de areia em massa, deixando bem homogênea. No fim, colocam-se as misturas no recipiente cilíndrico em três camadas recebendo cada qual 25 golpes da haste. O recipiente, já cheio e nivelado, é pesado. Os dados obtidos são anotados para se determinar o ponto ótimo da mistura;
- b) determinação da relação agregado/cimento: essa relação depende do equipamento de moldagem, sendo baixa se a energia de adensamento também o for, levando ao maior consumo de cimento Portland. A maneira mais eficiente de se estabelecer a relação agregado/cimento é com testes de produção, nos quais os resultados dos ensaios possibilitam determinar a melhor relação, que será função de parâmetros técnicos e econômicos;

- c) determinação do teor de umidade da mistura: esta determinação deve ser feita com o próprio equipamento de moldagem, com a fabricação de blocos em teores de umidade crescente, pois quanto maior for esta, mais compactado e resistente será o paver.

Também há o Método da Mistura Experimental, que deve ser abordado quando não houver recursos laboratoriais disponíveis, por se tratar de um modo simplificado de dosagem, em que, conseqüentemente, haverá menor precisão. O método consiste em determinar a relação agregado/cimento, que deve ser inferior a 4,5, onde o consumo de cimento Portland deve ser superior a 400 kg/m³ de concreto. Posteriormente, deve-se determinar a proporção da mistura pedrisco-areia, realizada por misturas experimentais (FIORITI, 2007).

Como não há uma especificação quanto à trabalhabilidade para o concreto seco, um teste que vem sendo muito utilizado pela literatura é o Método do Ponto da Pelota, difundido por Scott Hood (2006), onde, nas palavras do autor:

Este método é utilizado para verificar a umidade ótima, que corresponde à máxima quantidade de água possível presente na mistura, de modo a permitir moldar uma pelota de concreto nas palmas das mãos sem que esta desmanche (falta de água) ou suje excessivamente as mãos (excesso de água). (SCOTT HOOD, 2006, p. 53).

Na verificação do Ponto de Pelota as mãos devem estar limpas e secas, sendo a limpeza realizada após cada pelota executada. O método é executado conforme os seguintes procedimentos (SCOTT HOOD, 2006):

- a) colocar água até uma relação a/c inicial, em geral de 0,30;
- b) verificar o Ponto de Pelota;
- c) adicionar água conforme o observado na análise anterior;
- d) aguardar 30 segundos, em função da necessidade de homogeneização da mistura, para a nova verificação do Ponto de Pelota;
- e) verificar o Ponto de Pelota novamente;
- f) se não for atendido o Ponto de Pelota, repetir o procedimento até atendê-lo.

A última etapa do processo corresponde à cura, um conjunto de medidas na qual a finalidade é evitar a evaporação precoce da água de amassamento, necessária para as reações de hidratação do cimento (PIROLA, 2011). Existem vários métodos de cura, e a escolha do melhor método está ligada ao tipo e condições da obra, ao tipo de estrutura ou peça a ser curada, bem como aos requisitos de propriedades a que essas estão submetidas. Podem-se citar os exemplos de métodos de cura (ALCANTARA, 2015):

- por irrigação: caracterizada pela contínua aspensão da superfície exposta do concreto em intervalos regulares;
- por submersão: as peças de concreto são mantidas submersas em água, sendo ideal a saturação com cal para simular o ambiente alcalino do concreto, geralmente em um tanque de cura. Contudo, sua aplicação não é muito prática se a produção for a nível industrial;
- por recobrimento: mais utilizado em obras, na qual caracteriza-se pela proteção do concreto com recobrimento para evitar a ação direta do Sol e do vento, mantendo a umidade do próprio sistema. Em geral, o recobrimento é feito com plásticos, lonas pretas ou membranas de cura.

Mota (2014) comparou três diferentes métodos de cura para produção de concreto seco moldado sob pressão analisando qual a mais eficiente em relação à resistência das peças. Os tipos de cura avaliados foram: a cura por imersão em solução a cal, a cura úmida por aspensão, e a cura ao ar em ambiente coberto. Os melhores resultados foram encontrados nos processos de cura por imersão; vindo em seguida os métodos de aspensão e cura ao ar, respectivamente. Segundo Fernandes (2019), o ideal seria a utilização de compartimentos com umidade acima de 80% e temperaturas de 20 °C a 65 °C; mas isto demandaria muitos custos.

Em relação ao tempo de cura, deve-se levar em conta e balancear dois critérios: o critério técnico, visto que, quanto maior o tempo do processo de cura, melhor serão as características do concreto; e o critério econômico, que restringe esse tempo. Geralmente recomenda-se um período de cura mínimo de 7 a 10 dias (ALCANTARA, 2015).

2.9 ESPECIFICAÇÕES

Como já mencionado, a Norma Brasileira que regulamenta e prevê as especificações, bem como o método de ensaio das peças de concreto para pavimentação, é a NBR 9781 (ABNT, 2013). Esta estabelece aspectos gerais e específicos quanto às dimensões, formatos, resistências à compressão, absorção de água, resistência à abrasão, métodos de inspeção, critérios de aceitação das peças, os métodos de ensaio, dentre outras definições pertinentes às peças empregadas na pavimentação intertravada.

De maneira resumida, o Quadro 3 apresenta os requisitos exigidos pela NBR 9781 (ABNT, 2013).

Quadro 3 – Especificações segundo a norma de peças de concreto para pavimentação.

Requisitos exigidos pela norma	Descrição
Formato	As peças podem ser produzidas em diversos formatos.
Espessura	As peças são padronizadas quanto à espessura em 60, 80 e 100 mm.
Dimensões	Comprimento máximo de 250 mm e largura mínima de 97 mm, cujas tolerâncias dimensionais não podem variar além de 3 mm.
Resistência à compressão	A resistência à compressão deve ser maior ou igual a 35 MPa para tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha e maior ou igual a 50 MPa para tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados defeitos de abrasão.
Absorção de água	Quanto à absorção de água as peças devem apresentar valor menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior do que 7%.

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

Há ainda a determinação da resistência à abrasão, que é facultativa. Contudo, quando especificada, a cavidade máxima formada no corpo de prova durante o ensaio deve ser de 23 mm para o uso em tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha e de 20 mm para o uso em tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados.

Segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), as peças de concreto de um mesmo lote devem passar por uma inspeção visual, na qual o objetivo é identificar possíveis defeitos que prejudiquem o pavimento. Os pavers devem ter aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos, estando livres de rebarbas, descamações entre outras imperfeições. São admitidas

pequenas variações de coloração, sendo estas em virtude do processo de fabricação e da variação das matérias-primas utilizadas, e o lote deve ser rejeitado se forem constatados mais de 5% de peças defeituosas.

Comparadas às normas internacionais de países como Austrália e África do Sul, que se encontram em regiões de condições climáticas similares ao Brasil, se comparados aos países de clima temperado, e levando-se em conta também a experiência desses países com a pavimentação intertravada, Bittencourt (2012) afirma ser interessante aceitar recomendações semelhantes às utilizadas por eles. Isto por que nas normas da Austrália e da África do Sul, a resistência característica à compressão exigida é de 25 MPa para situações de tráfego leve e 35 MPa para os demais tipos de tráfego (BITTENCOURT, 2012). Já para calçadas, praças e ciclovias, os valores de 15 MPa são considerados valores suficientes para suportar a sobrecarga que será exercida (FIORITI, 2007; BITTENCOURT, 2012).

Fioriti (2007) argumenta que, se reduzisse os valores de resistência exigidos na Norma Brasileira, levando-se em conta a aplicação das peças, se tornaria interessante também pelo aspecto ambiental, onde contribuiria para a redução do alto consumo de cimento Portland, além ainda da possível redução do custo das peças.

2.10 ESTUDOS DE PEÇAS DE CONCRETO COM MATERIAIS RECICLADOS

Sustentando-se na justificativa deste trabalho, muitos autores vêm realizando pesquisas cujo foco está no reaproveitamento de resíduos oriundos das atividades humanas e industriais, tendo-se destaque as peças de concreto com a inserção de resíduos.

Vieira (2014) desenvolveu peças com a adição de fibras de pneu no traço. O concreto com as fibras apresentou menor quantidade de fissuras após sua ruptura em comparação a um concreto de referência e obteve resistências de até 20 MPa, abaixo da exigência da norma brasileira de peças de concreto para pavimentação intertravada NBR 9781 (ABNT, 2013) que preconiza um mínimo de 35 MPa; porém, ainda sim foi considerado viável para praças, calçadas, passeios etc.

Amaral *et al.* (2013) avaliaram o desempenho de peças intertravadas de concreto utilizando areia de fundição em substituição parcial à areia fina. Os resultados foram significativos não só quanto à absorção de água, mas principalmente quanto à resistência à compressão, possuindo uma absorção menor e uma resistência superior que o bloco intertravado de referência. Bittencourt (2012) também utilizou areia de fundição mais resíduos de construção em substituição aos agregados miúdo e graúdo, destacando que até 20% da substituição por areia reciclada não alterou significativamente as propriedades mecânicas dos pavers.

Santos (2014) estudou resíduos da construção civil (RCC) em concretos com fibras de aço produzidos com agregados reciclados moídos para peças de pisos intertravados. A autora observou o concreto com substituição de até 25% do agregado natural, onde houve uma melhora na resistência à compressão, destacando a viabilidade no uso desses resíduos. Pires e Santos (2015) utilizaram resíduos de telhas de argamassa provenientes das obras do residencial Vivacidade, em Tucuruí – PA, como substituição em 50% e 100% do agregado graúdo natural com e sem etapa de pré-molhagem. Apesar de não atenderem ao limite de absorção de água segundo a norma, devido à alta porosidade dos agregados reciclados, a resistência à compressão dos traços com 100% de substituição com a etapa de pré-molhagem foi superior aos valores obtidos para o traço de referência.

Ismail e Al-Hashmi (2008) substituíram a areia do concreto em várias porcentagens por resíduos de plástico. Esses resíduos eram compostos em 80% por polietileno e 20% por poliestireno. A resistência à compressão diminuiu, bem como a densidade do concreto endurecido, sendo este o ponto positivo do estudo. Os autores consideraram os resultados viáveis e sustentável a destinação dos resíduos.

Izquierdo e Ramalho (2014) realizaram um levantamento bibliográfico sobre resíduos e concreto, onde concluíram as tendências de pesquisa sobre materiais alternativos como um novo caminho para a sustentabilidade a nível mundial. Porém, ainda é irrisória a integração do setor industrial com o setor acadêmico, principal problemática brasileira. Os autores destacam a necessidade de disposição de ambas as partes, logo, as empresas e indústrias devem procurar as universidades para desenvolver novas tecnologias, enquanto o setor acadêmico deve buscar mecanismos para garantir sua integração à sociedade.

Ferrari (2017) salienta que a utilização de pavimentos intertravados pode trazer grandes vantagens, uma vez que o pavimento não requer equipamentos sofisticados e mão-de-obra especializada na execução. Em geral, os pavimentos intertravados são de coloração clara, o que é positivo, pois pode reduzir a absorção de calor na superfície do pavimento, diminuindo as ilhas de calor formadas nos centros urbanos. A autora argumenta também que o tráfego local pode ser liberado logo após a instalação, não havendo necessidade de cura das peças já prontas para receber solicitações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho foi o Obras Especiais – Industrial (VOTORANTIM CIMENTOS, 2019), que atende à NBR 16697 (ABNT, 2018). Trata-se do cimento CP I-40, que é o tipo de cimento empregado na produção de muitos artefatos de concreto da região. As suas características são semelhantes às do cimento CP V-ARI, que é o tipo mais utilizado na produção de pré-fabricados.

A Tabela 2 mostra as características do cimento CP I-40, segundo informações do fabricante.

Tabela 2 – Caracterização do cimento Portland CP I-40.

Ensaio	Valores médios obtidos	Limites de Norma
Químicos		
Resíduo Insolúvel (RI) (%)	0,4	≤ 5,0
Perda ao Fogo (PF) (%)	0,8	≤ 4,5
Óxido de Magnésio (MgO) (%)	4,7	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre (SO ₃) (%)	2,3	≤ 4,5
Físicos		
Finura #200 (% retida)	1,5	≤ 10
Finura #325 (% retida)	8,0	
Superfície específica Blaine (cm ² /g)	3430	≥ 2800
Água de consistência (%)	27,0	-
Início de pega (min)	175	≥ 60
Fim de pega (min)	235	≤ 600
Expansibilidade a quente (mm)	0,0	≤ 50
Mecânicos		
Resistência à compressão aos 3 dias (MPa)	30,4	≥ 15,0
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	38,7	≥ 25,0
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	49,7	≥ 40,0

Fonte: Adaptado de Votorantim Cimentos (2019).

A massa específica do cimento CP I-40 é igual a 3,18 g/cm³, segundo o Boletim de Ensaios de Cimento (VOTORANTIM CIMENTOS, 2019).

3.1.2 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural extraída do leito do rio Tocantins, que apresenta uma coloração amarelada com característica de origem quartzosa, sendo esta areia utilizada na construção da segunda etapa da UHE Tucuruí.

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo consiste em pedrisco, oriundo de rochas basálticas proveniente das escavações para implantação das estruturas de concreto e processado no sistema de britagem das obras da UHE Tucuruí.

3.1.4 Água

A água utilizada para a realização dos ensaios foi obtida pela concessionária local de abastecimento, em temperatura ambiente. Para a dosagem da mistura, a quantidade foi estipulada de acordo com a proporção definida no traço do concreto.

3.1.5 Agregado miúdo artificial

O resíduo de reciclagem de polipropileno (RPP) foi proveniente de uma empresa de reciclagem de plástico, localizada na cidade de Tucuruí – PA. Nessa empresa, o resíduo passou por todo o processo de beneficiamento dos flocos de polipropileno reciclado (lavagem, trituração, separação e secagem), na qual o resíduo final de descarte, o RPP, é separado da matéria-prima utilizável para comercialização.

3.1.6 Aditivo químico

O aditivo plastificante utilizado foi o LIQUIPLAST – 1400 da empresa TecnoMor. É um aditivo líquido, compatível com a maioria dos cimentos disponíveis no mercado e que tem recomendação para uso na fabricação de pisos, blocos e tubos de concreto, uma vez que melhora o acabamento das peças de concreto, melhora a desforma e diminui a quebra dos blocos durante a fabricação. O aditivo LIQUIPLAST – 1400 foi dosado atendendo as indicações do fabricante.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Variáveis de estudo

No estudo de viabilidade de um produto deve-se analisar, entre outras coisas, quais características este produto deve ter para satisfazer as necessidades dos clientes. Estas características são as variáveis de resposta, que podem ser medidas e quantificadas em relação às qualidades exigidas (LEITE, M., 2001).

A definição das variáveis estudadas no programa experimental foi realizada por meio da análise das características necessárias e exigências pelas Normas Brasileiras para o emprego de peças de concreto em pavimentos intertravados (pavers). Desta forma, tendo como premissa a avaliação de desempenho do concreto, definiram-se as seguintes características a serem avaliadas, que serão as variáveis respostas da pesquisa:

- resistência à compressão;
- absorção de água;
- índice de vazios;
- massa específica;
- porcentagens de substituição parcial do agregado miúdo por RPP de 0%, 3%, 6% e 9%, nomeados como RPP0, RPP3, RPP6 e RPP9, respectivamente.

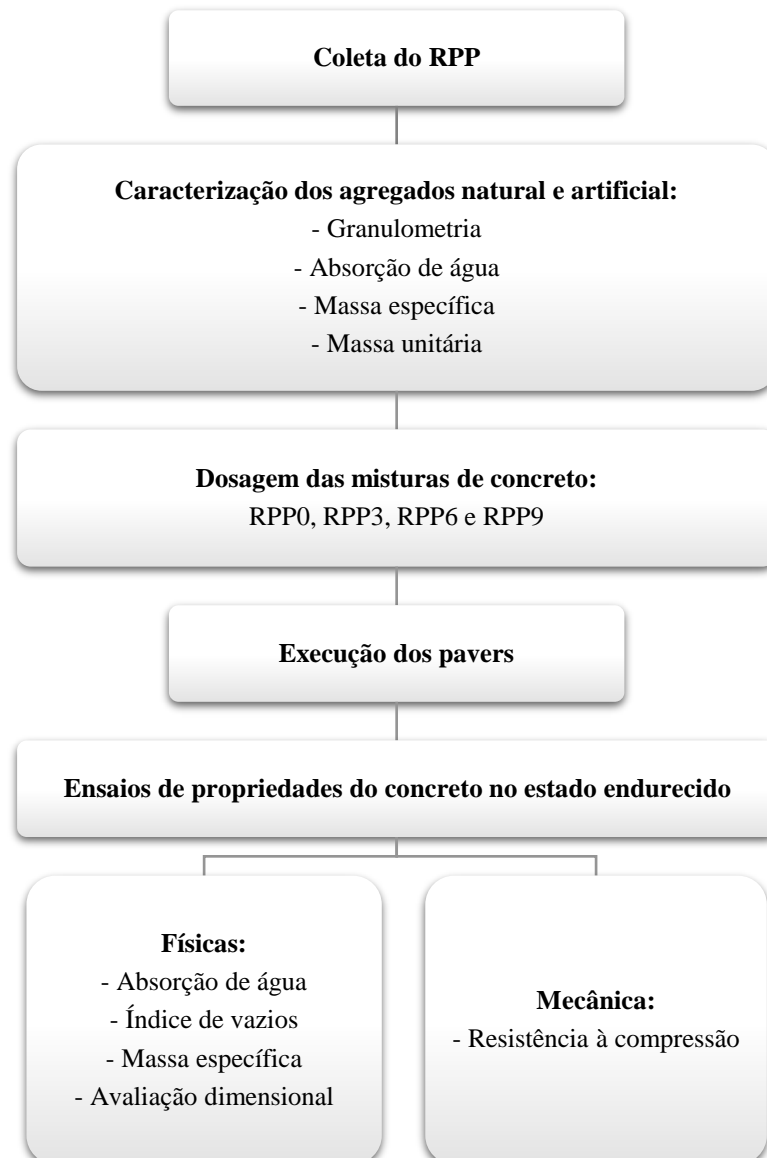
A idade dos corpos de prova (CPs) dos ensaios foi escolhida de acordo com exigências normativas. Para o ensaio de resistência à compressão, foram escolhidas idades intermediárias de 3 e 7 dias, respaldando-se no fato de que peças de concreto para pavimento exigem uma

desforma e aplicação rápida no mercado (FERRARI, 2017). Por isso, decidiu-se avaliar em idades menores que 28 dias, que é a indicada na norma NBR 9781 (ABNT, 2013).

3.2.2 Procedimento experimental

Esta pesquisa foi subdividida em cinco macroetapas, sendo elas: a) coleta do resíduo polimérico; b) caracterização dos agregados utilizados; c) dosagem das misturas de concreto; d) execução das peças de concreto; e e) ensaios de propriedades do concreto endurecido. O fluxograma do planejamento experimental deste trabalho é apresentado na Figura 25, abaixo.

Figura 25 – Fluxograma do programa experimental.



Fonte: Próprio autor (2019).

Desta maneira, a descrição do programa experimental é apresentada a seguir:

- a) coleta do RPP: diz respeito à aquisição do resíduo polimérico desta pesquisa, o qual fora obtido após beneficiamento da matéria-prima utilizável para comercialização;
- b) caracterização dos agregados natural e artificial: engloba os ensaios de propriedades físicas dos agregados utilizados, tais como: determinação da composição granulométrica, absorção de água, massa específica e massa unitária;
- c) dosagem das misturas de concreto: compreende o estudo de adequação do traço de concreto seco por meio de métodos comumente empregados na literatura dos blocos de concreto, bem como da definição dos traços RPP0, RPP3, RPP6 e RPP9;
- d) execução dos pavers: é a etapa seguinte à dosagem do concreto, em que os traços RPP0, RPP3, RPP6 e RPP9 foram executados para a confecção das peças de concreto;
- e) ensaios de propriedades do concreto no estado endurecido: compreende a fase de aceitação das peças de concreto segundo suas características físicas (absorção de água, índice de vazios, massa específica e análise dimensional) e mecânica (resistência à compressão), conforme normativas brasileiras.

O período de desenvolvimento deste estudo, desde a sua concepção temática até o encerramento dos ensaios, decorreu de março a novembro de 2019. O programa experimental da pesquisa foi desenvolvido em sua maior parte no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) do Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC/UFPA) e outra, no ambiente de fábrica de artefatos de concreto, localizado na cidade de Tucuruí – PA.

3.2.3 Coleta do RPP

O resíduo foi fornecido por uma empresa de reciclagem de plástico localizado na cidade de Tucuruí-PA, a mesma não será identificada a pedido do proprietário responsável.

Contudo, foi permitido acompanhar e fotografar algumas etapas no local.

Desta forma, sabe-se que o processo produtivo dessa empresa consiste na reciclagem de plásticos, na qual boa parte se constitui de resíduos pós-consumo de polipropileno (brinquedos, embalagens, tampas, tanquinhos etc.), que são separados e posteriormente são vendidos para indústrias produtoras de novos componentes plásticos. A Figura 26 mostra parte do ambiente onde são armazenados os plásticos de reciclagem da empresa.

Figura 26 – Local de onde fora coletado o resíduo de reciclagem do polipropileno.



Fonte: Próprio autor (2019).

Durante a reciclagem do material (polipropileno), um resíduo é produzido na fase de moagem. Esse material moído é lavado e separado do produto principal, que possui valor agregado para comercialização. A Figura 27 mostra um dos equipamentos responsáveis pelo processamento do polipropileno.

Figura 27 – Equipamento de lavagem do material e separador do RPP.



Fonte: Próprio autor (2019).

Depois de retirado, o resíduo de reciclagem de polipropileno (RPP) é armazenado separadamente em sacos, os quais apresentam mínima ou nenhuma demanda de mercado. Com isso, sua destinação mais provável é em lixões ou aterros sanitários, o que contribui para a poluição do meio ambiente.

O RPP foi levado para o Laboratório de Engenharia Civil onde foi separado em sacos plásticos menores, tal como é apresentado na Figura 28. Este resíduo especificamente é chamado pelos colaboradores de “PP branco”, visto que o resultado final é um resíduo de tom claro, próximo à cor branca. O RPP também tem um aspecto pulverulento.

Figura 28 – Resíduo de reciclagem de polipropileno separado em sacos.



Fonte: Próprio autor (2019).

3.2.4 Caracterização dos agregados

Os ensaios de caracterização física dos agregados empregados para a produção dos concretos baseiam-se nas normas vigentes. Assim, as amostras separadas para os ensaios foram coletadas obedecendo aos critérios da NBR NM 26 (ABNT, 2009), a qual descreve este processo. Posteriormente, essas amostras foram misturadas e quarteadas visando atender as especificações da NBR NM 27 (ABNT, 2001), que prescreve a redução de amostra de campo de agregados para ensaios de laboratório.

Para tanto, foram realizados os ensaios quanto à distribuição granulométrica dos agregados e as determinações da massa específica, absorção de água e massa unitária dos

mesmos. Todos esses ensaios foram executados segundo suas respectivas normativas brasileiras vigentes.

3.2.4.1 Determinação da composição granulométrica

Para a determinação da composição granulométrica dos agregados, utilizou-se a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Seguindo a metodologia de ensaio dessa norma, realizou-se o peneiramento das amostras utilizando um agitador mecânico de peneiras, o qual promove a separação do material de acordo com o tamanho das partículas. Esse equipamento é mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Agitador mecânico de peneiras.



Fonte: Próprio autor (2019).

Pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) é possível determinar a Dimensão Máxima Característica (DMC), que é uma grandeza associada à distribuição granulométrica dos agregados. O DMC corresponde à abertura nominal da malha da peneira da série, em que a porcentagem do agregado retido acumulado é igual ou imediatamente inferior a 5% da massa.

A NBR NM 248 (ABNT, 2003) também define o Módulo de Finura (MF) como sendo a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

Para os agregados miúdo natural e miúdo artificial pesaram-se 1 kg e 300 g (apresenta

maior volume), respectivamente; enquanto para o agregado graúdo fora pesado 2 kg, como é apresentado na Figura 30. O conjunto de peneiras (#) utilizadas para os agregados miúdos foi 4,75; 2,36; 1,18; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075 mm. E para o agregado graúdo, o conjunto das peneiras foi 12,5; 9,5; 6,3 e 4,75 mm.

Figura 30 – Massa das amostras do ensaio de granulometria: a) agregado miúdo natural; b) agregado miúdo artificial; e c) agregado graúdo.



Fonte: Próprio autor (2019).

Ao final, o material retido em cada peneira e fundo foram separados e pesados, donde pôde-se determinar a Dimensão Máxima Característica (DMC) e o Módulo de Finura (MF) dos agregados.

3.2.4.2 Determinação da absorção de água

O ensaio de absorção de água do agregado miúdo natural foi realizado de acordo com a norma NBR NM 30 (ABNT, 2001) que define absorção como um processo de condução de um líquido com tendência a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido (poroso).

Deste modo, inicialmente foi feita a preparação da amostra, contando com uma massa de 1 kg de agregado miúdo natural (AMN) que fora colocado em um recipiente e secado a uma temperatura de 105 ± 5 °C, em estufa, até a obtenção de massa constante (Figura 31a). Após isso, cobriu-se essa amostra com água deixando-a descansar por 24 horas, como mostra a Figura 31b. Ao término desse período, retirou-se a amostra da água e prosseguiu-se com a secagem de maneira uniforme da mesma.

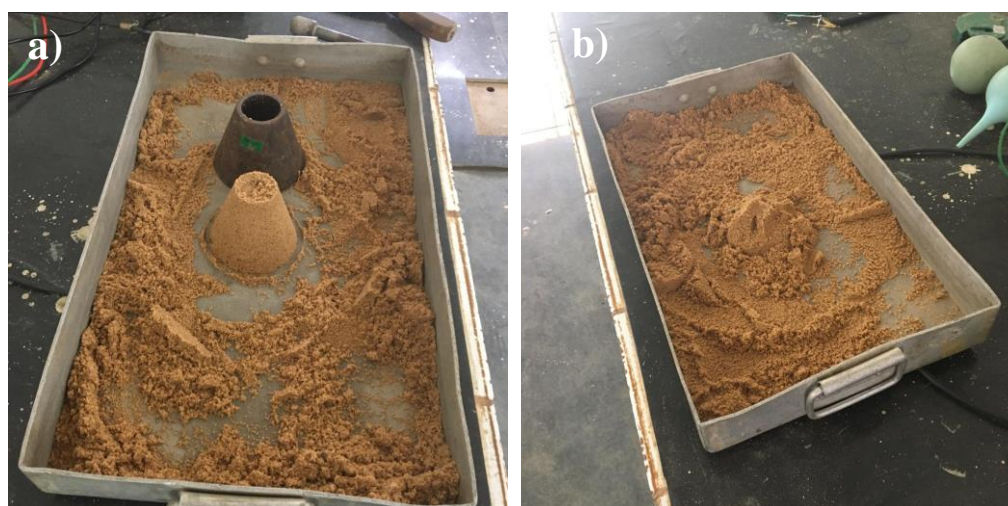
Figura 31 – Preparação das amostras do ensaio: a) AMN em estufa e b) AMN submerso em água.



Fonte: Próprio autor (2019).

Depois de seco, colocou-se o agregado em um molde tronco-cônico metálico, onde aplicou-se 25 golpes suaves em sua superfície com uma haste de compactação e levantava-se verticalmente o molde (Figura 32a), repetindo-se esse procedimento em intervalos frequentes até que o tronco-cônico de agregado miúdo natural desmoronasse ao ser retirado o molde (Figura 32b). Tal ocorrência caracteriza a condição de superfície saturada seca, isto é, as partículas do agregado absorveram o máximo de água apresentando ainda a superfície seca.

Figura 32 – Execução do ensaio: a) tronco-cônico de AMN e b) AMN na condição saturado superfície seca.



Fonte: Próprio autor (2019).

A absorção de água do agregado miúdo natural foi calculada conforme a Equação 1, prescrita na NBR NM 30 (ABNT, 2001):

$$\# L \frac{a_{p?à}}{à} H s r r \quad (1)$$

Onde:

é a absorção de água, em porcentagem;

$l_{aé}$ é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

l é a massa da amostra seca em estufa, em gramas.

Para o agregado graúdo, seguiu-se os procedimentos da norma NBR NM 53 (ABNT, 2009), que trata da determinação da massa específica e da absorção de água dos agregados graúdos.

Na preparação da amostra, separou-se todo o material passante na #4 (4,75 mm), o qual ensaiou-se segundo a NBR NM 30 (ABNT, 2001). O agregado graúdo (AG) foi lavado em água corrente e em seguida secado a uma temperatura de 105 ± 5 °C, em estufa, até a obtenção de massa constante. Esperou-se que a amostra fosse esfriada à temperatura ambiente para então escolher-se uma massa de 2,5 kg do agregado (Figura 33a), a qual fora submersa em água por um período de 24 horas. Ao término desse período, retirou-se a amostra da água e envolveu-a em um pano para que toda a água visível fosse eliminada, mesmo que a superfície dos grãos se apresentasse úmida, como mostra a Figura 33b.

Figura

Com isso, pôde-se observar que em todos os traços do concreto seco houve boa consistência e coesão – a Figura 52d apresenta um pouco de resíduo na luva devido ao ressecamento do concreto proveniente dos testes anteriores.

A Figura 53 mostra o caso de um paver recém-moldado na fábrica de artefatos de concreto onde, em virtude do excesso de água no traço, acarretou em defeito da peça. Durante a visita no local, observou-se o empirismo na dosagem do concreto dessas peças, não sendo incomum a situação apresentada na figura.

Figura 53 – Imperfeição do paver devido ao excesso de água, utilizando a vibroprensa pneumática disponível.



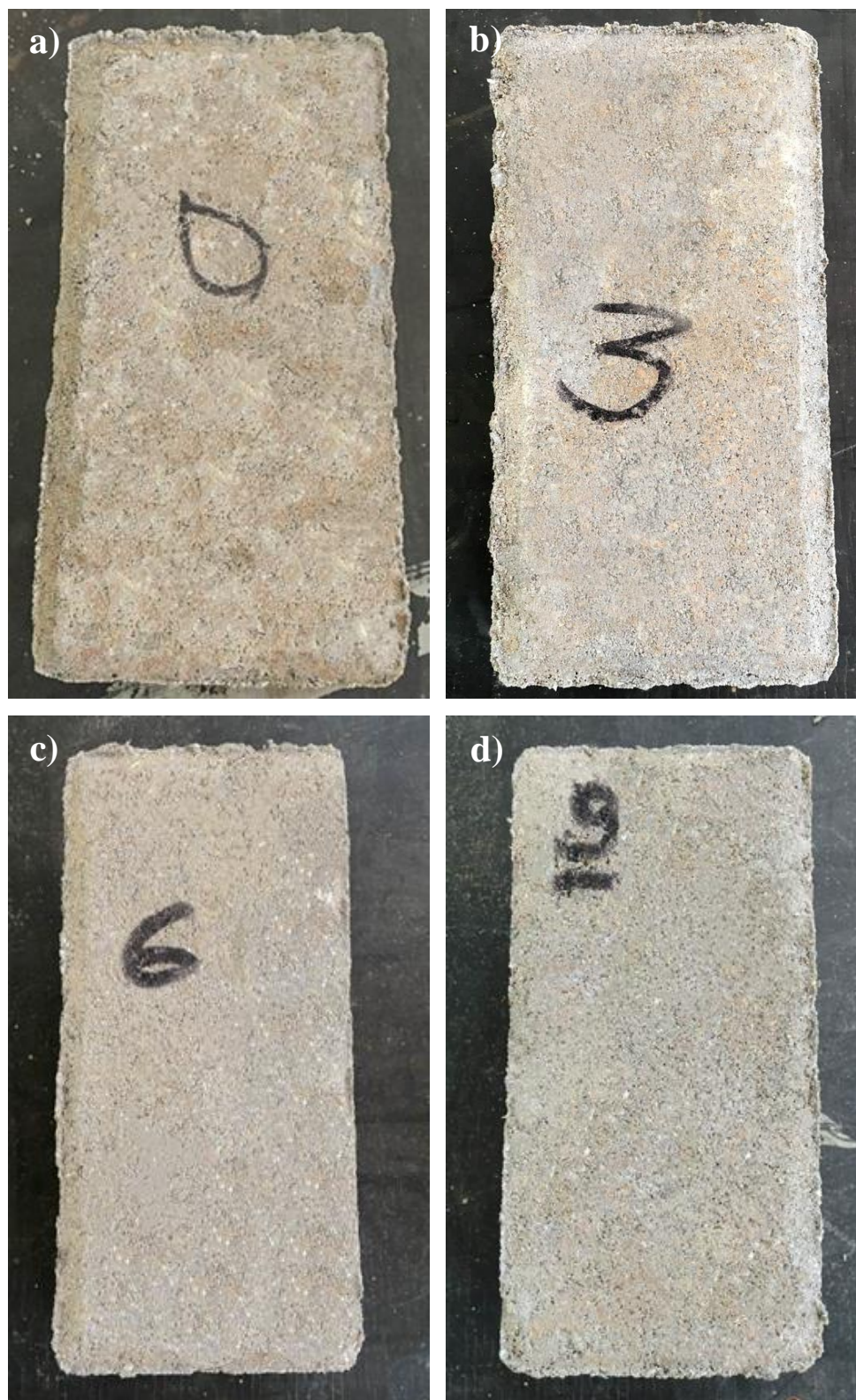
Fonte: Próprio autor (2019).

Deste modo, a dosagem da água de amassamento dos traços atendeu às limitações da vibroprensa e manteve-se após a realização do Método do Ponto de Pelota.

4.3 INSPEÇÃO VISUAL DAS PEÇAS DE CONCRETO ENDURECIDAS

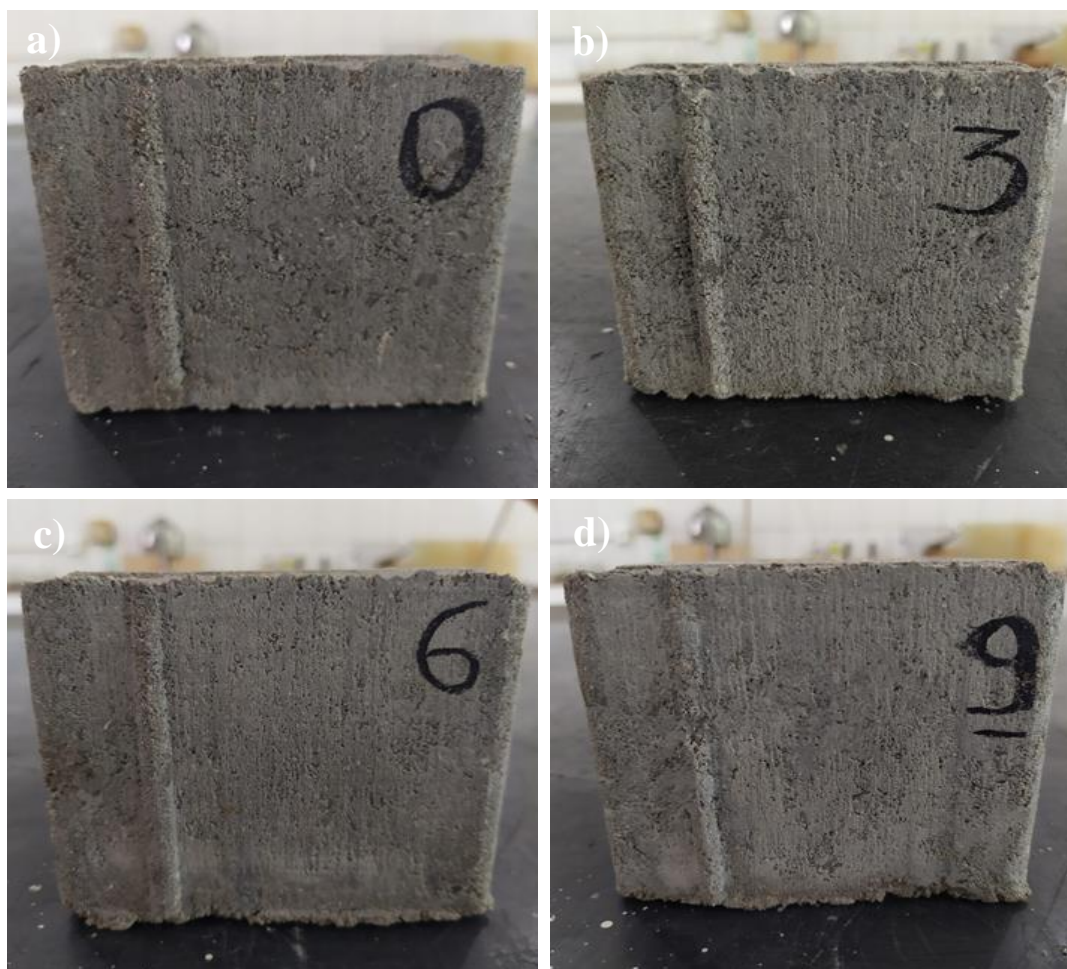
Aleatoriamente foram escolhidas algumas peças de concreto após cura de 28 dias para serem avaliadas quanto à inspeção visual prescrita na norma NBR 9781 (ABNT, 2013). As Figuras 54 e 55 mostram o aspecto dos pavers.

Figura 54 – Vista superior das peças de concreto endurecidas dos traços: a) RPP0; b) RPP3; c) RPP6; e d) RPP9.



Fonte: Próprio autor (2019).

Figura 55 – Vista lateral das peças de concreto endurecidas dos traços: a) RPP0; b) RPP3; c) RPP6; e d) RPP9.



Fonte: Próprio autor (2019).

As peças de concreto endurecidas apresentaram bom acabamento, bem como arestas relativamente regulares e livres de rebarbas ou defeitos que pudessem vir a prejudicar o assentamento ou o desempenho do pavimento.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio normativo de resistência à compressão foi efetuado conforme as diretrizes da NBR 9781 (ABNT, 2013). As idades escolhidas de rompimento foram 3, 7 e 28 dias.

Para a primeira idade, de 3 dias, os resultados da resistência característica estimada à compressão ($f_{pk, est}$) foram calculados obedecendo às Equações 6 e 7 prescritas na norma de peças de concreto para pavimentação (vide item 3.2.7.1, pág. 98).

Desta forma, a Tabela 18 apresenta os resultados obtidos do ensaio.

Tabela 18 – Resistência característica à compressão, aos 3 dias (MPa).

CP	RPP0	RPP3	RPP6	RPP9
1	24,5	16,8	12,4	10,5
2	19,3	17,5	11,5	9,7
3	20,5	17,3	10,7	11,7
4	22,8	16,5	14,2	11,1
5	17,2	21,8	11,4	14,8
6	18,2	20,5	11,9	12,0
7	16,6	16,3	13,0	11,3
Média (f_p)	19,9	18,1	12,2	11,6
Desvio Padrão (s)	2,93	2,16	1,16	1,61
Coef. Student(t)	0,906	0,906	0,906	0,906
$f_{pk, est}$	17,22	16,14	11,10	10,13

Fonte: Próprio autor (2019).

Conforme Amadei (2011), aos 3 dias de idade o ideal é que as peças de concreto já apresentem resistências suficientes que viabilizem o seu transporte até o local definitivo. Essa resistência a que a autora se refere é uma média de 15 MPa ou mais, como valor satisfatório. Deste modo, segundo os resultados mostrados na Tabela 18, os pavers do traço RPP0 e RPP3 foram os únicos a apresentarem médias superiores a 15 MPa.

Vale ressaltar que a idade de cura de somente 3 dias é restrita ao critério econômico, quando se busca a aplicação rápida do paver em obras de engenharia; enquanto o critério técnico preconiza maiores idades para melhores características do concreto. Logo, em relação aos traços RPP6 e RPP9, eles também podem ser destinados a canteiros de obra; todavia, seu desempenho inicial é bastante afetado.

Da mesma forma, para a idade de 7 dias, os resultados da resistência característica estimada à compressão foram calculados obedecendo às Equações 6 e 7; e a Tabela 19 expõe os resultados obtidos do ensaio.

Tabela 19 – Resistência característica à compressão, aos 7 dias (MPa).

CP	RPP0	RPP3	RPP6	RPP9
1	20,9	17,3	14,5	15,6
2	19,3	18,7	13,2	12,5
3	26,8	17,9	15,4	14,5
4	20,0	18,1	18,7	10,9
5	19,3	20,7	13,4	12,1
6	18,3	16,9	13,9	11,4
7	22,2	20,2	13,3	11,1
Média (f_p)	21,0	18,5	14,6	12,6
Desvio Padrão (s)	2,86	1,43	1,96	1,80
Coef. Student(t)	0,906	0,906	0,906	0,906
$f_{pk, est}$	18,38	17,25	12,85	10,95

Fonte: Próprio autor (2019).

Pode-se observar a partir Tabela 19 que, entre as duas primeiras idades, a amostra do traço RPP6 foi a que obteve maior ganho de resistência, enquanto a de menor ganho foi a do traço RPP9. Todos os traços estiveram compreendidos num intervalo $0,5 \text{ MPa} < x < 2,0 \text{ MPa}$ de aumento de resistência (considerando a influência dos desvios padrão das amostras de cada traço). Destaca-se a influência do cimento CP I-40 nessas idades iniciais, uma vez que o mesmo é da classe 40 MPa, segundo tipo mais utilizado na produção de peças pré-fabricadas de concreto, perdendo apenas para o CP V-ARI que confere maiores resistências ainda em idades iniciais.

Conforme as recomendações de Amadei (2011), os resultados dos traços RPP6 e RPP9 desta idade indicam que os mesmos podem sofrer avariações ainda no transporte até o depósito ou canteiro de obras. Nenhum dos resultados de $f_{pk, est}$ atenderam ao requisito da norma de que para idades inferiores a 28 dias devem apresentar no mínimo 80% do f_{pk} especificado (35 MPa).

Por fim, a última idade, a qual é prescrita na norma NBR 9781 (ABNT, 2013), corresponde aos 28 dias de cura das peças de concreto. Os resultados da resistência característica estimada à compressão foram calculados obedecendo às Equações 6 e 7.

Desta forma, a Tabela 20 apresenta os resultados obtidos do ensaio.

Tabela 20 – Resistência característica à compressão, aos 28 dias (MPa).

CP	RPP0	RPP3	RPP6	RPP9
1	27,5	20,4	16,6	12,5
2	34,2	21,8	18,1	13,3
3	26,2	26,1	22,6	13,0
4	28,9	23,0	17,7	12,8
5	28,4	21,1	17,5	14,5
6	29,3	19,9	16,2	13,4
7	32,1	22,7	18,9	13,8
Média (f_p)	29,5	22,1	18,2	13,3
Desvio Padrão (s)	2,75	2,08	2,13	0,67
Coef. Student(t)	0,906	0,906	0,906	0,906
$f_{pk, est}$	27,02	20,26	16,30	12,72

Fonte: Próprio autor (2019).

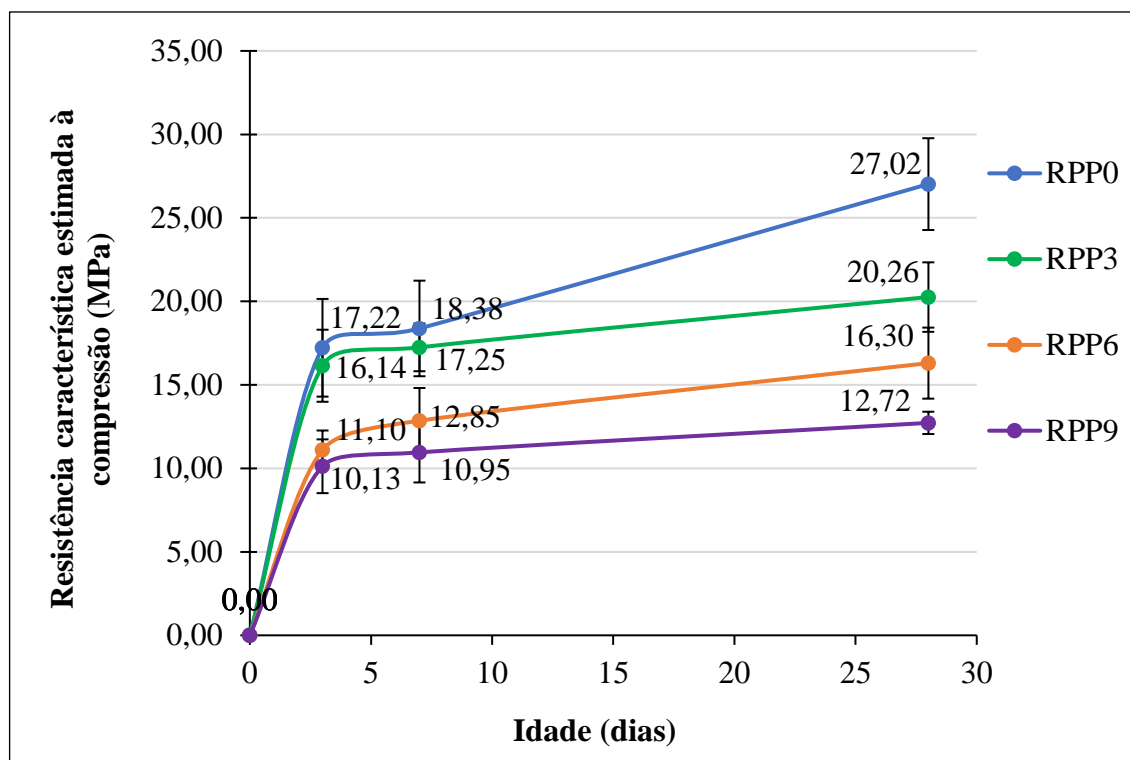
Observa-se pelos valores obtidos na Tabela 20 que nenhuma amostra de traço atendeu à exigência normativa de no mínimo 35 MPa, após decorridos os 28 dias de cura, para as situações de tráfego de pedestres ou veículos leves. O traço RPP0 foi o que mais adquiriu resistência em relação à ruptura de 7 dias, seguido do RPP6. O traço RPP9 não se mostrou vantajoso em nenhuma idade, mesmo tendo o menor desvio padrão nesta última análise.

Segundo Fioriti (2007), à medida que o tempo passa e o sistema tende a ficar mais denso, as dosagens com relação a/c baixas, que é o caso dos pavers (produzidos com concreto seco atendendo às limitações do maquinário utilizado), terão menor quantidade de água e menor espaço para hidratar os grãos de cimento Portland que permaneceram anidros (sem água) até esta idade, diferente das dosagens com maiores relações a/c que ainda possuem espaço para hidratar os grãos de cimento Portland e aumentar a taxa de crescimento das resistências.

Neville (1997) recomenda um fator a/c de pelo menos cerca de 0,36 a 0,38 para que possa ocorrer a hidratação completa do cimento Portland; contudo, não somente pela incorporação do RPP, mas também a energia de compactação do modelo de vibroprensa disponível (pneumático) influencia no desempenho mecânico dos pavers. As limitações da vibroprensa constituíram um fator limitante da relação a/c desta pesquisa, de 0,315.

O Gráfico 4 apresenta de maneira resumida o ganho de resistência ao longo das idades estudadas considerando a resistência característica à compressão estimada e seus respectivos desvios padrão, o qual indica o quanto os resultados afastaram-se da média.

Gráfico 4 – Resistências à compressão estimadas de cada traço ao longo do tempo.



Fonte: Próprio autor (2019).

Observa-se a partir do Gráfico 4 que para todos os traços o crescimento da resistência ocorreu de forma rápida logo nas primeiras idades, sobretudo para os traços de referência e o RPP3. Isto pode ser explicado basicamente pelo uso do cimento CP I-40, que confere melhores resultados nos primeiros dias de cura.

De acordo com Pagnussat (2004), o processo de cura também influencia bastante nas primeiras idades (3 e 7 dias) quando comparadas à idade mais alta (28 dias). Segundo o autor, o melhor processo de cura que colabora para o aumento de resistência é a cura a vapor, a qual reflete na aceleração das reações de hidratação. Ademais, Fioriti (2007) argumenta que a incorporação de resíduo polimérico (no seu caso, resíduo de pneu) aumenta a porosidade do concreto enquanto contribui para que haja um efeito de cura interna tardia, o que de certa forma explica a baixa evolução das resistências após as idades iniciais de cura para os traços contendo RPP, associado ainda às limitações do maquinário quanto à relação a/c.

Desta forma, justifica-se que para tanto maior seja o teor de substituição de RPP, menores serão os ganhos de resistência, uma vez que a porosidade do sistema é aumentada e, conseqüentemente, influi nos resultados mecânicos das peças de concreto.

Em virtude dos trabalhos já realizados e da dificuldade de se atingir a resistência à compressão mínima exigida por norma (35 MPa), alguns autores como Scott Hood (2006), Fioriti (2007) e Bittencourt (2012) realizaram estudos na qual verificaram que é possível utilizar essas peças de concreto em locais com solicitação de tráfego limitada e trânsito de pedestres, com resistências características de 15 a 25 MPa sendo satisfatórias. No item 2.9 (pág. 67) também foram citadas normas de outros países que admitem peças para pavimento intertravado na faixa de resistência referida.

Diante disso, pode-se assumir que os traços RPP0 e RPP3 foram os que apresentaram melhores resultados: 27,02 MPa e 20,26 MPa, respectivamente; mas também o RPP6 se enquadra nessa faixa, com 16,30 MPa, sendo, portanto, tecnicamente viável. Já para o traço RPP9 não se verificou aplicabilidade, visto que seu valor de $f_{pk, est}$ resultou em 12,72 MPa, abaixo do limite inferior de 15 MPa definido pelos autores supracitados.

4.5 AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

Concomitantemente à inspeção visual das peças endurecidas após 28 dias, avaliou-se 24 pavers de cada traço quanto às suas variações dimensionais.

A dimensão nominal das peças foi de 200 mm × 100 mm × 80 mm (comprimento × largura × espessura). As Tabelas 21, 22, 23 e 24 apresentam os resultados da avaliação considerando-se a média das medidas.

Tabela 21 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP0.

(continua)

Amostra	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Índice de Forma
1	200,19	100,23	82,66	2,42
2	200,50	100,93	82,80	2,42
3	200,85	100,80	81,42	2,47

Tabela 21 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP0.

(conclusão)

Amostra	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Índice de Forma
4	200,09	99,31	81,38	2,46
5	200,14	99,47	80,93	2,47
6	200,05	99,38	82,31	2,43
7	199,91	99,60	82,26	2,43
8	200,24	100,33	81,43	2,46
9	200,12	100,16	82,79	2,42
10	200,26	100,11	82,73	2,42
11	200,33	99,78	81,92	2,45
12	200,33	100,06	80,65	2,48
13	200,09	100,14	82,94	2,41
14	200,50	99,61	82,75	2,42
15	200,21	99,76	81,38	2,46
16	200,30	100,42	80,81	2,48
17	200,22	99,73	81,50	2,46
18	199,90	99,98	82,26	2,43
19	199,92	99,54	82,73	2,42
20	199,99	99,87	80,80	2,48
21	199,96	99,77	81,93	2,44
22	200,25	99,68	82,36	2,43
23	200,43	101,03	81,36	2,46
24	200,90	100,60	82,91	2,42
Média	200,24	100,01	81,96	2,44
Desvio Padrão	0,262	0,482	0,760	0,023

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 22 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP3.

(continua)

Amostra	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Índice de Forma
1	200,33	99,43	82,26	2,44
2	200,35	99,62	82,93	2,42
3	200,70	99,20	82,16	2,44

Tabela 22 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP3.

(conclusão)

Amostra	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Índice de Forma
4	200,21	99,67	82,83	2,42
5	200,38	99,63	80,84	2,48
6	199,88	99,60	81,77	2,44
7	200,10	99,25	81,87	2,44
8	200,16	99,78	80,86	2,48
9	199,99	99,56	82,40	2,43
10	200,46	99,34	82,95	2,42
11	200,08	100,05	82,51	2,42
12	200,31	99,86	82,71	2,42
13	200,42	99,46	82,86	2,42
14	200,44	99,99	82,75	2,42
15	200,36	99,46	81,98	2,44
16	200,10	99,96	82,32	2,43
17	200,09	99,56	81,78	2,45
18	200,26	99,83	82,87	2,42
19	199,99	99,78	82,26	2,43
20	200,34	99,93	81,85	2,45
21	200,54	100,02	81,93	2,45
22	200,05	99,47	82,66	2,42
23	200,33	99,89	82,36	2,43
24	200,31	99,67	82,18	2,44
Média	200,26	99,67	82,25	2,43
Desvio Padrão	0,196	0,245	0,577	0,017

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 23 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP6.

(continua)

Amostra	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Índice de Forma
1	200,08	99,37	81,83	2,45
2	200,34	99,38	82,71	2,42
3	200,42	99,96	80,68	2,48

Tabela 23 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP6.

(conclusão)

Amostra	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Índice de Forma
4	200,69	100,28	82,55	2,43
5	200,05	99,61	82,42	2,43
6	200,34	99,87	82,46	2,43
7	200,70	99,99	82,89	2,42
8	200,18	99,52	82,80	2,42
9	200,13	99,93	82,69	2,42
10	200,84	100,08	81,72	2,46
11	200,17	99,10	80,80	2,48
12	199,99	99,86	82,57	2,42
13	200,29	99,47	82,69	2,42
14	199,99	99,88	82,64	2,42
15	200,07	99,69	82,53	2,42
16	200,99	100,88	82,98	2,42
17	199,93	100,00	82,75	2,42
18	199,89	99,72	82,57	2,42
19	200,20	99,65	82,73	2,42
20	200,41	99,83	82,18	2,44
21	200,32	100,01	82,34	2,43
22	199,96	99,77	81,69	2,45
23	200,27	99,99	82,38	2,43
24	200,35	99,77	82,45	2,43
Média	200,28	99,82	82,34	2,43
Desvio Padrão	0,291	0,349	0,595	0,018

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 24 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP9.

(continua)

Amostra	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Índice de Forma
1	200,27	100,07	81,97	2,44
2	200,03	99,44	82,62	2,42
3	200,47	100,35	81,90	2,45

Tabela 24 – Avaliação dimensional dos pavers do traço RPP9.

(conclusão)				
Amostra	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Índice de Forma
4	200,08	99,77	82,33	2,43
5	200,30	99,65	82,64	2,42
6	200,54	100,25	81,95	2,45
7	200,54	100,33	81,89	2,45
8	200,79	100,23	82,00	2,45
9	200,40	99,51	82,52	2,43
10	200,61	100,36	82,98	2,42
11	200,30	100,20	82,87	2,42
12	200,01	100,17	82,77	2,42
13	200,06	99,31	80,95	2,47
14	200,05	99,63	81,76	2,45
15	199,95	99,63	82,33	2,43
16	200,32	100,24	82,88	2,42
17	200,18	99,35	82,87	2,42
18	200,09	99,96	82,90	2,41
19	199,90	99,65	81,79	2,44
20	200,57	99,87	82,04	2,44
21	199,99	99,68	81,93	2,44
22	199,86	99,75	81,80	2,44
23	200,19	99,91	81,02	2,47
24	200,30	99,37	82,84	2,42
Média	200,24	99,86	82,23	2,44
Desvio Padrão	0,251	0,346	0,575	0,017

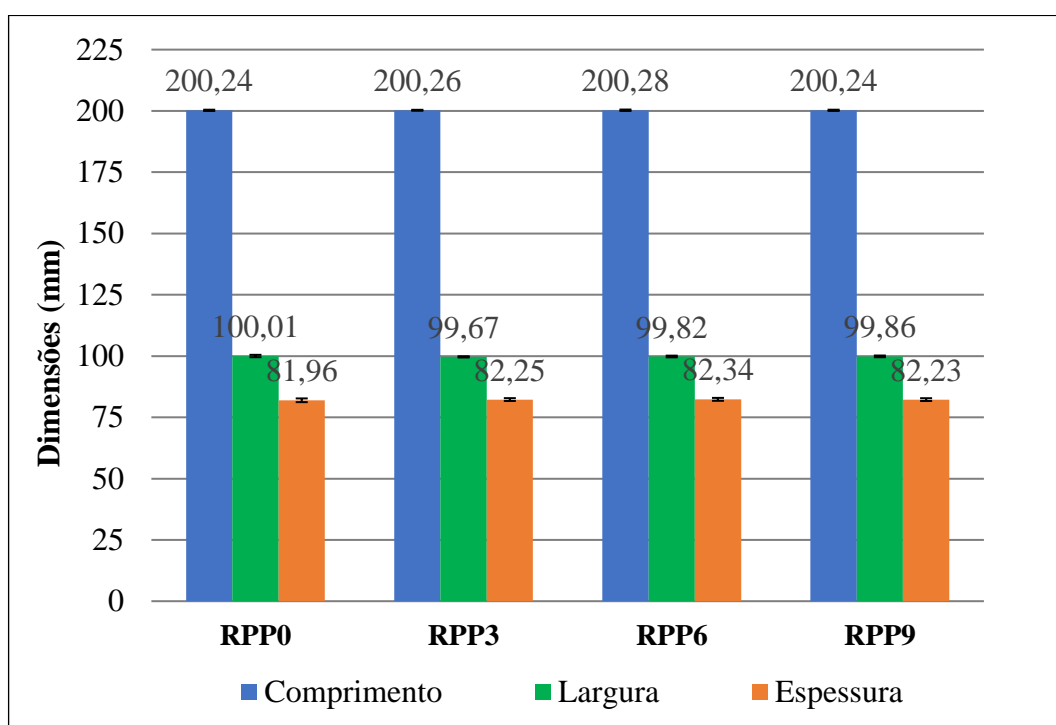
Fonte: Próprio autor (2019).

Conforme as Tabelas 21, 22, 23 e 24, nota-se que todas as peças avaliadas estiveram dentro da tolerância admitida pela norma de peças de concreto para pavimentação (variação de até 3 mm). Pode-se observar que de todos os traços a altura foi a que apresentou maior variação, isso porque provavelmente na etapa de moldagem as fôrmas e/ou a prensa pneumática poderiam estar desajustadas. Deve-se atentar também ao estado de conservação dos paletes, que podem influenciar na imperfeição da superfície inferior dos pavers.

O Índice de Forma (IF), segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), é a relação entre o comprimento e a espessura da peça de concreto, o qual deve ser menor ou igual a 4 quando as peças forem utilizadas em vias com tráfego de veículos ou áreas de armazenamento. Em todo caso, o valor máximo registrado foi de 2,48, sendo, portanto, um resultado aceitável.

Por fim, o Gráfico 5 mostra de maneira resumida os valores médios aferidos de cada traço com seus respectivos desvios padrão.

Gráfico 5 – Médias das dimensões avaliadas (mm).



Fonte: Próprio autor (2019).

4.6 ÍNDICE DE VAZIOS

O ensaio de índice de vazios (ρ) foi realizado com 3 peças de concreto aleatórias com idades de 28 dias seguindo as diretrizes da norma NBR 9778 (ABNT, 2009).

Desta forma, a Tabela 25 mostra os resultados obtidos, os quais foram calculados segundo a Equação 9 (vide item 3.2.7.4, pág. 103).

Tabela 25 – Índice de vazios dos pavers (%).

Amostra	RPP0	RPP3	RPP6	RPP9
1	9,68	8,80	18,40	11,78
2	8,22	12,28	18,55	20,42
3	10,16	10,50	23,53	24,87
Média	9,35	10,53	20,16	19,02
Desvio Padrão	1,010	1,740	2,919	6,656

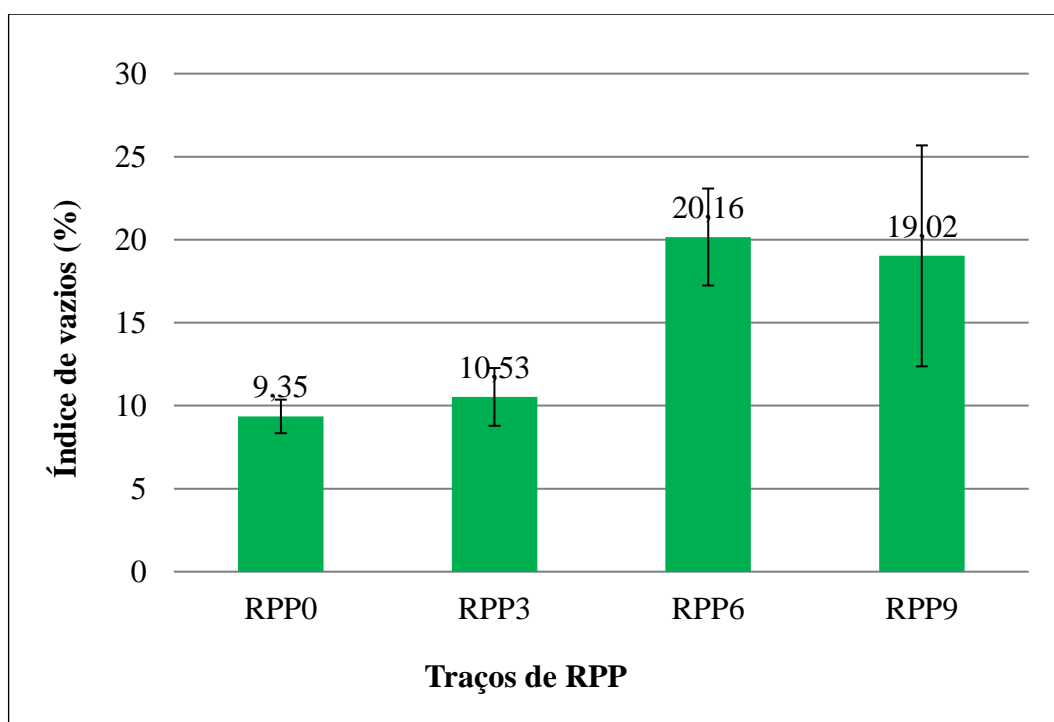
Fonte: Próprio autor (2019).

Em relação ao índice de vazios, segundo Tennis, Leming e Akers (2004), o concreto é dito com baixa porosidade quando possui um ∇ inferior a 15%, enquanto um índice superior a 30% é considerado um material altamente poroso. Os autores ponderam ideal que se utilize ∇ na ordem de 20% para garantir boa resistência à compressão e também permeabilidade do material.

Com isso, os resultados da Tabela 25 mostram que as amostras dos traços RPP0 e RPP3 apresentaram baixas porosidades, com valores de ∇ iguais a 9,35% e 10,53%, respectivamente; enquanto que para as amostras dos traços RPP6 e RPP9 os resultados se mostraram ideais, 20,16% e 19,02%, respectivamente. Pode-se constatar também que a presença do resíduo polimérico contribuiu para o aumento do índice de vazios das peças. Porém, de forma não linear.

Por fim, o Gráfico 6 mostra de maneira resumida os valores médios encontrados do índice de vazios da amostra de cada traço com seus respectivos desvios padrão.

Gráfico 6 – Médias dos índices de vazios (%).



Fonte: Próprio autor (2019).

4.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA

O ensaio de absorção de água foi realizado com 3 peças de concreto aleatórias na idade de 28 dias seguindo as recomendações da norma NBR 9781 (ABNT, 2013).

Desta forma, a Tabela 26 mostra os resultados obtidos, os quais foram calculados segundo a Equação 8 (vide item 3.2.7.3, pág. 101).

Tabela 26 – Absorção de água dos pavers (%).

Amostra	RPP0	RPP3	RPP6	RPP9
1	3,38	3,61	5,89	4,60
2	3,03	5,41	5,17	4,27
3	4,35	4,14	4,93	4,84
Média	3,59	4,39	5,33	4,57
Desvio Padrão	0,684	0,925	0,500	0,286

Fonte: Próprio autor (2019).

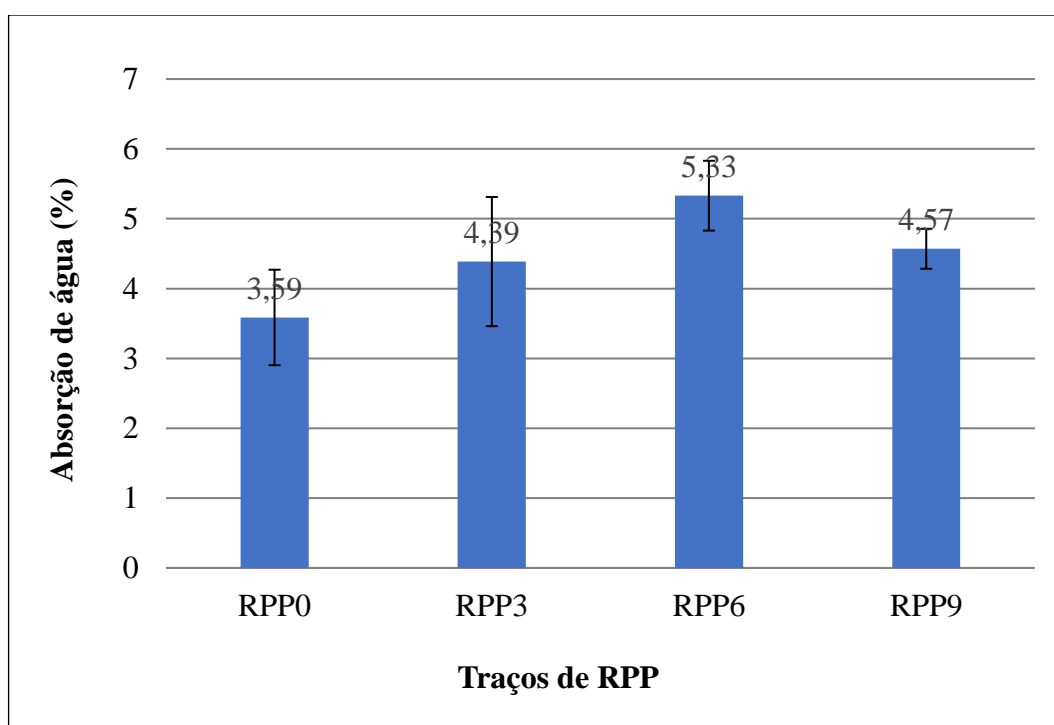
De acordo com a norma, os pavers devem apresentar absorção de água com valor médio menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor individual maior que 7%. Com isso, os resultados da Tabela 26 indicam que as amostras de cada traço satisfizeram a condição da norma de peças de concreto para pavimentação, os quais ficaram entre 3,59% e 5,33%.

De modo geral, o RPP contribuiu para o aumento da absorção de água. Porém, pode-se observar uma não linearidade do aumento da taxa de absorção com relação aos maiores teores de RPP presentes no concreto, isso porque o índice de vazios das peças também não se mostrou linear com o aumento da substituição de RPP, mas condizente com os resultados da absorção de água. Deste modo, o RPP6 foi o traço que apresentou maior taxa de absorção, igual a 5,33%.

Conforme Scott Hood (2006), a absorção de água das peças de concreto é uma propriedade de grande relevância para a qualidade do concreto, pois está associada à durabilidade das peças. Para altos percentuais de absorção a durabilidade é afetada e maior é a suscetibilidade de ataque químico.

Ainda, o Gráfico 7 mostra de maneira resumida os valores médios encontrados da absorção de água da amostra de cada traço com seus respectivos desvios padrão.

Gráfico 7 – Médias das absorções de água (%).



Fonte: Próprio autor (2019).

4.8 MASSA ESPECÍFICA

Simultâneo ao ensaio de índice de vazios foi realizado o ensaio de massa específica com as mesmas amostras na idade de 28 dias; ainda conforme as diretrizes da norma NBR 9778 (ABNT, 2009).

Desta forma, a Tabela 27 mostra os resultados obtidos, os quais foram calculados segundo a Equação 10 (vide item 3.2.7.5, pág. 104).

Tabela 27 – Massa específica dos pavers (%).

Amostra	RPP0	RPP3	RPP6	RPP9
1	2,39	2,34	2,21	2,22
2	2,41	2,29	2,20	2,15
3	2,36	2,32	2,33	2,13
Média	2,39	2,32	2,25	2,17
Desvio Padrão	0,025	0,025	0,072	0,047

Fonte: Próprio autor (2019).

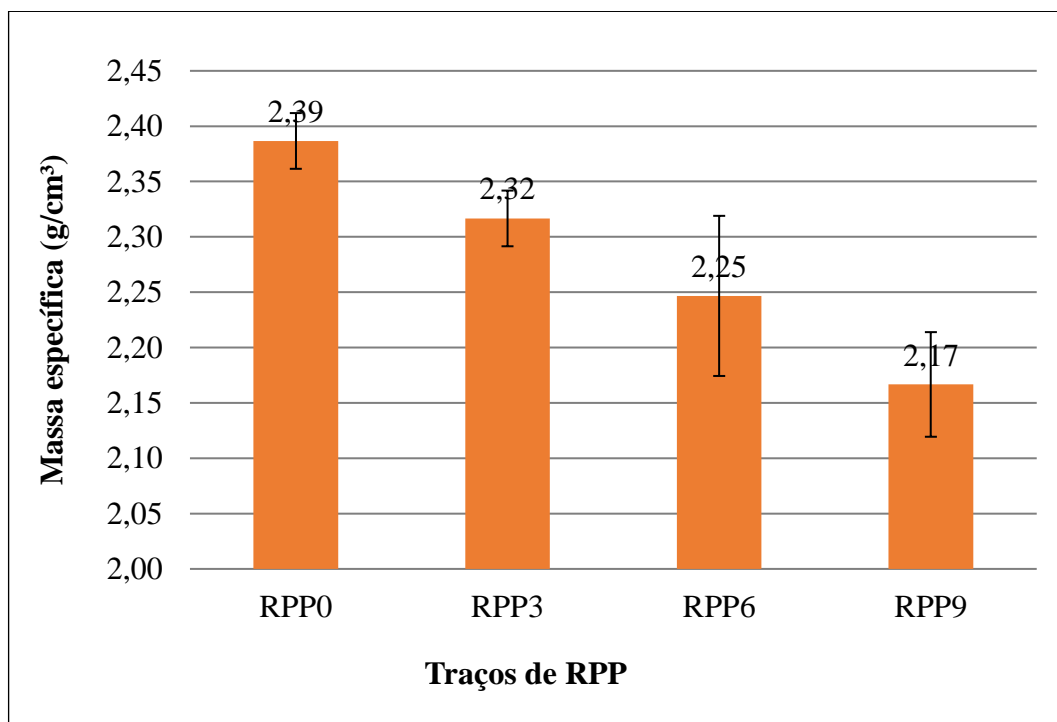
Os resultados da Tabela 27 demonstram a influência dos teores de resíduo de reciclagem de polipropileno (RPP) para a diminuição da massa específica dos pavers. Isso já era esperado, uma vez que o valor da massa específica do RPP apresentou-se menor que os valores obtidos para os agregados naturais, como pode ser observado nos resultados da caracterização dos agregados desta seção.

Percebe-se também que para os menores valores de massa específica tanto menores foram as resistências à compressão observados. Logo, conclui-se que o resíduo de reciclagem de polipropileno contribui na redução da massa específica dos pavers e consequente resistência da peça. No entanto, as peças de concreto tornam-se mais leves, o que é considerado um parâmetro vantajoso ao admitir-se as resistências da faixa de 15 a 25 MPa, os quais foram alcançados pelos traços RPP3 e RPP6.

Vale ressaltar que para menores massas específicas das peças de concreto tem-se um ganho quanto ao trabalho de aplicação das mesmas, uma vez que reduz o esforço por parte do operador (quando manual) e ainda quanto à estocagem, pois com a redução do peso alivia-se nos equipamentos de paletização empregados.

Finalmente, o Gráfico 8 mostra de maneira resumida os valores médios encontrados das massas específicas da amostra de cada traço com seus respectivos desvios padrão.

Gráfico 8 – Médias das massas específicas (g/cm³).



Fonte: Próprio autor (2019).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O objetivo geral da pesquisa foi analisar a viabilidade técnica da utilização do resíduo de polipropileno reciclado (RPP) como substituto parcial do agregado miúdo natural para a produção de pavers utilizados na construção civil, assim como avaliar a influência dos teores de RPP adotados nas propriedades físicas e mecânica das peças de concreto.

Os resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados miúdo, graúdo e miúdo artificial (RPP) apresentaram-se dentro das especificações recorrentes apontadas na literatura. A areia natural foi classificada como fina e o pedrisco como brita 0. O RPP apresentou DMC igual a 4,75 (porcentagem retida acumulada na peneira inferior a 5%) e MF de 3,06; com isso, o RPP pode ser classificado como agregado miúdo reciclado médio. As massas específica e unitária do resíduo substituto parcial apresentaram-se menores que as dos agregados naturais, o que já era esperado; e, por sua condição hidrofóbica, a absorção de água não ocorre no polipropileno, sendo, portanto, igual a zero.

Através do estudo de dosagem do traço de concreto seco consoante o Método do Menor Volume de Vazios e o Método do Ponto de Pelota, foram produzidos quatro traços: um de referência, com agregados naturais (RPP0), e outros três com substituições de 3%, 6% e 9% do agregado miúdo natural por RPP, em massa, os quais foram nomeados de RPP3, RPP6 e RPP9, respectivamente. Os testes preliminares do traço de referência realizados em laboratório e em ambiente de fábrica apresentaram bons resultados quanto à trabalhabilidade da mistura, e a resistência à compressão avaliada nesta etapa mostrou-se aceitável segundo a literatura; desta forma, partiu-se então para a execução definitiva das peças de concreto para pavimentação.

Após os períodos de cura dos pavers, sob recobrimento com lona plástica, de 3, 7 e 28 dias, procedeu-se com os ensaios relativos à determinação da resistência à compressão nessas idades. Observou-se que aos 3 dias, os traços RPP0 e RPP3 foram os que apresentaram melhores ganhos de resistência. Entre 3 e 7 dias, o traço RPP6 foi o que mais evoluiu no ganho de resistência, porém, com resultado ainda inferior a 15 MPa. Com 28 dias, pôde-se observar que o traço RPP9 não se mostrou interessante em nenhuma idade, diferentemente dos demais traços, onde o RPP0 foi o que mais se destacou, com $f_{pk, est}$ igual a 27,02 MPa, aos 28 dias. O traço RPP3 também apresentou bom resultado, de 20,26 MPa nessa idade.

Desta forma, pode-se concluir que a presença do resíduo de polipropileno reciclado influencia na resistência dos pavers, sendo esta tanto menor quando do aumento daquela. Observou-se também que as resistências à compressão alcançadas não se enquadram na norma brasileira de peças de concreto para pavimentação, possivelmente decorrente de irregularidades na vibroprensa e também associada à limitação da relação a/c das misturas. O tipo de cura (usual de fábrica) também pode ter influenciado nos resultados.

Cabe a consideração de que a NBR 9781 (ABNT, 2013), a norma de especificações dos pavers, é bastante rígida quanto à adoção de resistência à compressão mínima de 35 MPa (o $f_{pk, est}$ ainda é calculado sob parâmetros estatísticos que reduzem a média dos resultados), uma vez que não dá margens ou especificações para passeios públicos, calçadas ou ciclovias, os quais segundo estudos realizados por alguns autores da temática (abordados nesta pesquisa), valores entre 15 e 25 MPa são suficientes para a solicitação que será recebida.

As peças também foram avaliadas quanto às suas dimensões, onde pôde-se observar que, de todos os traços, a maior variação se deu na altura (espessura) dos pavers, podendo ter sido influenciado por falha na prensagem da vibroprensa pneumática. O maior valor do IF foi de 2,48, resultado abaixo do máximo permitido (igual a 4), logo, as peças poderiam ser utilizadas em vias com tráfego de veículos ou áreas de armazenamento, consoante o atendimento do $f_{pk, est}$.

O ensaio de absorção de água revelou que as amostras atenderam às prescrições da norma, em que nenhuma peça individual resultou em mais de 7% de taxa de absorção e o maior valor de média foi para a amostra do traço RPP6 (5,33%), inferior aos 6% normativo. Deste modo, pode-se inferir em um bom resultado quanto à durabilidade dos pavers contendo o resíduo polimérico. De modo geral, o RPP contribuiu para o aumento da absorção de água, mas de forma não linear. Tal como aconteceu com o índice de vazios das peças, cujos resultados médios ficaram entre 9,35% (RPP0) e 20,16% (RPP6), valores aceitáveis na literatura. Assim, também ficou evidente que o resíduo de polipropileno contribuiu para o aumento deste parâmetro, ainda de forma não linear.

Quanto ao ensaio de massa específica, pode-se admitir que houve uma melhora nesse parâmetro com a inserção de RPP. Isso porque a presença do resíduo de polipropileno tornou os pavers mais leves. Para esta situação, o RPP9 foi o que apresentou menor média da massa

específica (2,17 g/cm³), enquanto que para a amostra do traço de referência a média dos resultados foi de 2,39 g/cm³.

Por fim, pode-se inferir que a utilização do RPP como substituto parcial do agregado miúdo para a fabricação de pavers é considerada viável tecnicamente, segundo os teores de 3% e mesmo 6% de substituição, quando destinados para ambientes de tráfego menos solicitado como passeios públicos, praças e ciclovias, por exemplo. Contudo, o teor substitutivo de 9% apesar de ter representado o maior ganho em leveza das peças, não se mostrou muito viável para estas aplicações, isso porque a resistência não se enquadrou na faixa de emprego considerada.

Desse modo, a utilização do RPP também pode ser considerada ambientalmente viável, pois contribui para a preservação do meio ambiente e de seus recursos naturais, bem como no aumento da reciclagem de resíduos industriais e pós-consumo, neste caso de polipropileno.

Conclui-se ainda que muitos resíduos são descartados sem que todo o seu potencial seja aproveitado. Logo, a reinserção dos materiais no ciclo da construção civil tem grande importância para o desenvolvimento sustentável. Desta forma, estudos complementares da utilização de resíduos de polipropileno devem ser realizados, para que o aprofundamento do tema contribua para a sociedade e se torne exequível. Além ainda de este ser um resíduo proveniente do processo de reciclagem, o que significa afirmar que quase 100% do plástico pode ser reaproveitado.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a importância dos estudos envolvendo a reciclagem dos resíduos industriais e pós-consumo, aliado com o objetivo de contribuir para o prosseguimento e intensificação sobre este assunto, pode-se fazer algumas sugestões para trabalhos futuros, sendo elas:

- realizar estudos de dosagem do concreto seco variando em porcentagens intermediárias a substituição do resíduo de polipropileno reciclado (RPP);
- avaliar o ciclo de vida do polipropileno (PP);

- realizar o ensaio de abrasão sugerido pela norma de peças de concreto para pavimentação;
- avaliar a durabilidade dos pavers através do ensaio de molhagem e secagem;
- analisar a viabilidade econômica da utilização do resíduo de polipropileno como agregado miúdo;
- utilizar o RPP em concretos plásticos e/ou especiais como o concreto leve, por exemplo, a fim de se avaliar a influência dos teores de substituição;
- estender a utilização do RPP para argamassas e verificar sua viabilidade técnica;
- realizar a análise microestrutural dos compósitos utilizando o RPP.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-SHAFY, Hussein I.; MANSUR, Mona S. M. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 27, p. 1275-1290, Dec. 2018.
- ALCANTARA, Paloma Santos Xavier de. **Blocos intertravados coloridos para pavimentação com incorporação de resíduos de cerâmica vermelha em prol da redução de pigmentos**. 2015. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2015.
- AMADEI, Daysa Ione Braga. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do município de Juranda/PR**. 2011. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação da Universidade de Maringá, Maringá, 2011.
- AMARAL, Frank Cabral de Freitas. **Materiais e Processos Construtivos: Agregados**. EDI-33. Notas de Aula. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2005. Disponível em: http://www.civil.ita.br/graduacao/disciplinas/extras/edi-33_2006_aula03.pdf. Acesso em: 26 jul. 2019.
- AMARAL, Mariana Bamberg *et al.* Estudo para utilização de areia de fundição em blocos de pavimentos intertravados. *In: XXV CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLOGIA EM ENGENHARIA*, 2013, Passo Fundo. **Anais [...]**. Passo Fundo: CRICTE, 2013.
- AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. **Leo Hendrick Baekeland and the Invention of Bakelite**: National Historic Chemical Landmark, Washington D.C., USA, 2019. Disponível em: <https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/bakelite.html#top>. Acesso em: 23 nov. 2019.
- ANDRADE, Jairo José de Oliveira. Propriedade dos polímeros. *In: ISAIA, Geraldo Cechella. (org.) (ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 2, cap. 41, p. 1323-1354.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. Perfil 2018. São Paulo: ABIPLAST, 2018. Disponível em: http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/10/perfil2018-web_VC.pdf. Acesso em: 12 jan. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **A versatilidade do cimento brasileiro**. São Paulo: ABCP, 2016. Disponível em: <https://abcp.org.br/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro/?politica=sim>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- _____. **Manual de pavimento intertravado: passeio público**. São Paulo: ABCP, 2010. 36 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo: Abrelpe,

2019. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>. Acesso em: 13 jan. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9781**: peças de concreto para pavimentação: especificação e método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **ABNT NBR 11768-1**: aditivos químicos para concreto de cimento Portland: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **ABNT NBR 13230**: embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis: identificação e simbologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **ABNT NBR 1593**: pavimento intertravado com peças de concreto: execução. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **ABNT NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **ABNT NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **ABNT NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **ABNT NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **ABNT NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **ABNT NBR NM 26**: agregados: amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **ABNT NBR NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **ABNT NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **ABNT NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. **Mercado**: perspectivas para o setor de agregados. São Paulo: ANEPAC, 2016. Disponível em: <http://www.anepac.org.br/agregados/mercado>. Acesso em: 12 jan. 2020.

BAULÉ, Sofia de Souza. **Avaliação do uso de blocos de concreto para emprego em pavimentação intertravada**: análise da fabricação, execução e dimensionamento. 2018. 114 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 4. reimp. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010. 504 p.

BESEN, Gina Rizpah *et al.* Resíduos sólidos: vulnerabilidades e perspectivas. *In*: SALDIVA, Paulo *et al.* (coord.). **Meio ambiente e saúde**: o desafio das metrópoles. São Paulo: Ex Libris, 2010.

BITTENCOURT, Sarah Ferreira. **Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2012.

BLOG DO PLÁSTICO. **Milliken firma parceria com PureCycle para nova tecnologia de reciclagem de Polipropileno**, [s. l.], maio 2019. Disponível em: <https://blogdoplastico.wordpress.com/2019/05/06/milliken-firma-parceria-com-purecycle-para-nova-tecnologia-de-reciclagem-de-polipropileno/>. Acesso em: 21 nov. 2019.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Saco é um saco**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2017. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/producao-e-consumo-sustentavel/saco-e-um-saco>. Acesso em: 02 jun. 2019.

BRASKEM. **Relatório Anual 2018**. São Paulo: Braskem, 2018. Disponível em: https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/arquivos/relatorio-anual/2018/2019_06_18_Braskem_RAS_2018_portugues_interativo_v6.pdf. Acesso em: 19 out. 2019.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 906 p. ISBN 978-8-216-3103-3.

CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião Vicente. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 3. ed. rev. e ampl. São Paulo: Artliber Editora, 2010. 282 p.

CARASCHI, José Cláudio; LEÃO, Alcides Lopes. Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos. **Acta Scientiarum: Technology**, Maringá, v. 24, n. 6, p. 1599-1602, abr. 2008.

CERESANA. **Polyethylene: HDPE Market Report**, Mainaustrasse, Germany, 2019b. Disponível em: <https://www.ceresana.com/en/market-studies/plastics/polyethylene-hdpe/polyethylene-hdpe-market-share-capacity-demand-supply-forecast-innovation-application-growth-production-size-industry.html>. Acesso em: 23 nov. 2019.

_____. **Polypropylene Market Report**, Mainaustrasse, Germany, 2019a. Disponível em: <https://www.ceresana.com/en/market-studies/plastics/polypropylene/>. Acesso em: 23 nov. 2019.

CHO, Renee. State of the Planet. Earth Institute. **What Happens to All That Plastic?**. Columbia University, New York, Jan. 2012. Disponível em: <https://blogs.ei.columbia.edu/2012/01/31/what-happens-to-all-that-plastic/>. Acesso em: 30 mai. 2019.

COELHO, Rivaldo Teodoro. **Contribuição ao estudo da aplicação de materiais alternativos nos compósitos à base de cimento Portland: uso de grão de polipropileno reciclado em substituição aos agregados do concreto**. 2005. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. **Ciclosoft 2018**. São Paulo: Cempre, 2018. Disponível em: <http://cempre.org.br/ciclosoft/id/9>. Acesso em: 13 jun. 2019.

CORREA, Priscila Marques. **Estudo comparativo da influência da adição de PET e PP pós-consumo na produção do concreto estrutural**. 2015. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

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

DE PAOLI, Marco-Aurélio. **Degradação e Estabilidade de Polímeros**. Editada por João Carlos de Andrade. 2ª. versão on-line (revisada). [s. l.], 2008. 228 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 194/98: agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. Publicação IPR – 179. 274 p.

DIAS, Marcos de Carvalho. Sustentabilidade e autogestão: uma proposta de esquema de análise da sustentabilidade em empreendimentos autogestionários. *In: VI CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO*, 2010, Niterói. **Anais [...]**. Tema: Energia, Inovação, Tecnologia e Complexidade para a Gestão Sustentável, p. 1-19, Brasil, 5, 6 e 7 de ago. 2010.

DÍEZ-PASCUAL, Ana M.; NAFFAKH, Mohammed. Mechanical and thermal behaviour of isotactic polypropylene reinforced with inorganic fullerene-like WS₂ nanoparticles: Effect of filler loading and temperature. **Materials Chemistry and Physics**, v. 141, p. 979-989, Sept. 2013.

EBEWELLE, Robert Oboigbaotor. **Polymer Science and Technology**. 1st. edition. New York: CRC Press, 2000. 504 p. ISBN 978-08-49-38939-9.

EUROPEAN NETWORK OF BUILDING RESEARCH INSTITUTES. Development of a framework for environmental assessment of building materials and componentes. **ENBRI Proposal to European Community BRITE EURAM Program**. [s. l.]: ENBRI, 1994.

FERNANDES, Idário. **Blocos e pavers: produção e controle de qualidade**. 8. ed. Ribeirão Preto: Editora Treino Assessoria e Treinamento Empresarias, 2019. 200 p. ISBN 978-85-62290-03-9.

FERREIRA, Pedro Augusto Silva Costa; MARQUES, Ricardo Mendonça; DIAS, João Fernando. Estudo comparativo de procedimentos de determinação da absorção de água de agregados. **Horizonte Científico**, Uberlândia, v. 9, n. 2, p. 87–106, dez. 2015. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/view/24317>. Acesso em: 26 nov. 2019.

FIORITI, Cesar Fabiano. **Pavimentos intertravados de concreto utilizando resíduos de pneus como material alternativo**. 2007. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

_____; INO, Akemi; AKASAKI, Jorge Luís. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 43–54, out./dez. 2007.

FONSECA JUNIOR, Paulo. **Desenvolvimento de produto sustentável: bloco de alvenaria com adição de poliestireno expandido**. 2013. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

FRASSON JÚNIOR, Artêmio. **Proposta de metodologia de dosagem e controle no processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2000. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FUSCO, Péricles Brasiliense. **Tecnologia do concreto estrutural: tópicos aplicados**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2012. 200 p.

GAIÓ, Giovana Simonetti. **Potencialidade da aplicação do resíduo do processo de reciclagem de polipropileno para desenvolvimento de cobogó**. 2018. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018.

GEHIN, Alexis; ZWOLINSKI, Peggy; BRISSAUD, Daniel. A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, p. 566-576, Apr. 2007.

GODINHO, Dalter Pacheco. **Pavimento intertravado**: uma reflexão sob a ótica da durabilidade e sustentabilidade. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

GORNI, Antonio Augusto. **Recursos Básicos sobre Plásticos e Polímeros**. [São Paulo], 2013. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/textpol.html>. Acesso em: 13 out. 2019.

HALLACK, Abdo. **Dimensionamento de pavimentos com revestimento de peças pré-moldadas de concreto para áreas portuárias e industriais**. 1998. 116 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

HAMADA, Hiroyuki; FUJIHARA, K.; HARADA, A. The influence of sizing conditions on bending properties of continuous glass fiber reinforced polypropylene composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 31, p. 979-990, Sept. 2000.

HARTMANN, Carine Toso *et al.* Aditivos químicos para concretos e cimentos. *In*: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010.

HELENE, Paulo Roberto do Lago; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 335 p. ISBN 85-7266-007-0.

HESS, Reiner; HERRMANN, Hans. Ceras de grife: Ceras/Polímeros feitos sob medida por catálise metalocênica. **Plástico Moderno**, São Paulo, n. 368, jun. 2005. Disponível em: <http://www.plasticomoderno.com.br/revista/pm368/ceras1.htm>. Acesso em: 25 out. 2019.

HUAN, Qian *et al.* Markedly improving mechanical properties for isotactic polypropylene with large-size spherulites by pressure-induced flow processing. **Polymer**, v. 54, p. 1177-1183, Feb. 2013.

INTELORCKING CONCRETE PAVEMENT INSITUTE. **Applicaion guide for inerlocking concrete pavements**. Chantilly: ICPI Tech Spec n° 10, 2012.

ISMAIL, Zainab Z.; AL-HASHMI, Enas A. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Waste Management**, v. 28, p. 2041-2047, Nov. 2018.

IZQUIERDO, Indara Soto; RAMALHO, Marcio Antonio. Aplicação de cinzas residuais e de fibra de sisal na produção de argamassas e concretos: Revisão. **Ingeniería y Desarrollo: Universidad del Norte**, Barranquilla, v. 32, n. 2, p. 153-169, jul./dic. del 2014.

JACQUES, Luiz. História do Plástico. **Nosso Futuro Roubado**, [s. l.], out. 2011. Disponível em: <https://nossofuturoroubado.com.br/historia-do-plastico/>. Acesso em: 20 nov. 2019.

JOHN, Vanderley Moacyr. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: CARNEIRO, Alex Pires et al. (org.). **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA, 2001. cap. 1, p. 27-45.

_____. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 113 f. Tese (Doutorado em Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

LANGHANZ, Jorge Emílio. **Efeito das condições de injeção do polipropileno nas suas propriedades**. 2012. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LEITE, Abner Augusto dos Santos. **Blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de sílica ativa**. 2015. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campos Mourão, 2015.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIMA, Leandro Soares de. **A influência das variáveis de processamento e de diferentes tipos de nanocargas nas propriedades dos compósitos de polipropileno**. 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.

LIMA, Sérgio Ferraz de. Introdução ao conceito de sustentabilidade, aplicabilidade e limites. **Cadernos da Escola de Negócios**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 112-137, jan./dez. 2006.

LIMER-CART. **Como é produzido o BOPP?**. Limeira: Limer-Cart, 2015. Disponível em: <http://limer-cart.blogspot.com/2015/08/como-e-produzido-o-bopp.html>. Acesso em: 20 out. 2019.

LINTZ, Rosa Cristina Cecche *et al.* Avaliação do comportamento de concreto contendo borracha de pneus inservíveis para utilização em pisos intertravados. **Engenharia Civil**, v.1, n. 37, p. 17-26, 2010.

LOMASSO, Alexandre Lourenço *et al.* Benefícios e desafios na implementação da reciclagem: um estudo de caso no Centro Mineiro de Referência em Resíduos (CMRR). **Revista Pensar Gestão e Administração**, v. 6, n. 2, p. 1-20, jan. 2015.

LOPES, João Pedro; RUDNICK, Thainá; MARTINS, Carlos Humberto. Utilização de resíduos industriais para produção de concreto sustentável. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2, p. 216-228, jul. 2018.

LUCAS, Denis; BENATTI, Cláudia Telles. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 1, n. 3, p. 405-418, set./dez. 2008.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a Polímeros**. 2. ed. rev. e ampl. [São Paulo]: Blucher, 2004. 208 p.

MANO, Eloisa Biasotto; PACHECO, Élen Beatriz Acordi Vasques; BONELLI, Cláudia Maria Chagas. Meio ambiente, poluição e reciclagem. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2005. 200 p.

MARCHIONI, Mariana Lobo. **Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MEIKA, Ingrid. Appia Antica. **Em Roma.com**, [s. l.], fev. 2015, il. color. Disponível em: <https://emroma.com/appia-antica/>. Acesso em: 20 dez. 2019.

MOTA, Marcos Henrique Almeida. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de Algaroba (prosopis juliflora) moldado sob pressão**. 2014. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru, 2014.

MÜLLER, Rodrigo Menegaz. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. 2005. 256 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

NASCIMENTO, Uédson Alexandre do; TIMÓTEO, Gustavo Arante V.; RABELLO, Marcelo S. Efeito de plastificantes à base de poliisobutenos nas propriedades físicas e mecânicas do polipropileno. **Polímeros**, v. 23, n. 2, p. 257-261, abr. 2013.

NETA, Antonia Sousa de Jesus. Meio ambiente e gestão dos resíduos sólidos: estudo sobre o consumo sustentável a partir da lei 12.305/2010. *In: Âmbito Jurídico*, São Paulo, XV, n. 98, mar. 2012. Disponível em: <https://ambitojuridico.com.br/cadernos/direito-ambiental/meio-ambiente-e-gestao-dos-residuos-solidos-estudo-sobre-o-consumo-sustentavel-a-partir-da-lei-12-305-2010/>. Acesso em: 17 jun. 2019.

NEVES, Fábio de Oliveira; MENDONÇA, Francisco. Por uma leitura geográfico-cultural dos resíduos sólidos: reflexões para o debate na Geografia. **Revista Colombiana de Geografia: Cuadernos de Geografía**, Bogotá, v. 25, n. 1, p. 153-169, ene./jun. del 2016.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do concreto**. Tradução de Salvador Eugênio Giammusso. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

ONO, Bruno Watanabe; BALBO, José Tadeu; CARGNIN, Andréia. Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado. **Transportes**, v. 25, p. 1–12, 2017.

ORTEGA, Sebastião Gerson. Sustentabilidade na construção civil: significados, práticas e ideologia. **Organizações e Sustentabilidade**, Londrina, v. 2, n. 1, p. 112-137, jan./jun. 2014.

PAGNUSSAT, Daniel Tregnago. **Utilização de Escória Granulada de Fundição (EGF) em blocos de concreto para pavimentação**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia na modalidade Acadêmico) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PARÁ. **Lei nº 7.731, de 20 de setembro de 2013**. Dispõe sobre a Política Estadual de Saneamento Básico e dá outras providências. Diário Oficial do Estado do Pará, Pará, 2013.

PETROCUYO. **Tecnologia**: Polipropileno, [Buenos Aires], 2019. Disponível em: <http://www.petrocuyo.com/br/tecnologia/polipropileno>. Acesso em: 16 nov. 2019.

PETRY, André. **Mercado brasileiro de polipropileno com ênfase no setor automobilístico**. 2011. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PIALOT, Olivier; MILLET, Dominique; TCHERTCHIAN, Nicolas. How to explore scenarios of multiple upgrade cycles for sustainable product innovation: the “Upgrade Cycle Explorer” tool. **Journal of Cleaner Production**, v. 22, n. 1, p. 19-31, 2012.

PIATTI, Tania Maria; RODRIGUES, Reinaldo Augusto Ferreira. **Plásticos**: características, usos, produção e impactos ambientais. Maceió: EDUFAL, 2005. 51 p.

PINHEIRO, Rafael Severo. **Influência da dosagem racional do concreto seco na produção de peças de concreto para pavimentação intertravada**. 2015. 122 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Coordenação de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

PIRES, Alessandro do Rego; SANTOS, Jefferson Tavares Cruz. **Aplicação de agregados graúdos reciclados obtidos dos resíduos de telhas em pavimento intertravado**: um estudo de caso das obras do residencial Vivacidade – Tucuruí-PA. 2015. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2015.

PIROLA, Fernanda Carvalho. **Contribuição para o estudo de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação de 50 MPa**. 2011. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PORRI, Lido. Os Anos 1954-1963 no Politécnico de Milão. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 19, n. 3, p. 4-11, 2009. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282009000300003&script=sci_arttext. Acesso em: 29 out. 2019.

ROSÁRIO, Francisco *et al.* Resíduos de Sisal como Reforço em Compósitos de Polipropileno Virgem e Reciclado. **Polímeros**, v. 21, n. 2, São Carlos, p. 90-97, abr. 2011.

SANTOS, Anaaiara Varela dos; BORJA, Edilberto Vitorino de. Avaliação das propriedades mecânicas de blocos intertravados com resíduo de pneu reciclado. **Holos**: publicação online do Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Natal, ano 23, v. 3, 2007, p. 52-60. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/128>. Acesso em: 12 jun. 2019.

SANTOS, Vânia Regina Ferreira dos. **Análise do desempenho de pisos táteis, intertravados produzidos com agregados de resíduos de construção civil – RCC e fibras de aço**. 2014. 117 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

SAVASTANO JUNIOR, Holmer; WARDEN, Peter G. Special theme issue: Natural fibre reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p. 517-624, May 2005.

SCHVAICKARDT, Charles Miguel.; MATTOS, João Rodrigo Guerreiro. Estudo de traço para peças pré-moldadas de concreto para pavimentos intertravados. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 6, n. 39, p. 1-20, 2018.

SCOTT HOOD, Rogério da Silva. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia na modalidade Acadêmico) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2001. Vol. 1, 779 p. ISBN 85-7266-125-5.

SHARUDDIN, Shafferina Dayana Anuar *et al.* A review on pyrolysis of plastic wastes. **Energy Conversion and Management**, v. 115, p. 308-32, May 2016.

SILVA, Eric Ribeiro. **Análise do comportamento estrutural e funcional de um pavimento experimental com blocos pré-moldados de concreto**. 2016. 235 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SILVA, João Paulo Souza. Impactos ambientais causados por mineração. **Revista Espaço da Sophia**, n. 8, ano 1, p. 1-13, nov. 2007.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; DE PAOLI, Marco Aurelio. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 67–72, jan./fev. 2005.

TECNOMOR ADITIVOS E DESMOLDANTES. **Aditivos plastificantes: LIQUIPLAST-1400**. Palhoça, 2003-. Disponível em: <https://tecnomor.com.br/linha-de-produtos/liquiplast-1400/>. Acesso em: 13 set. 2019.

TENNIS, Paul D.; LEMING, Michael L.; AKERS, David J. Pervious Concrete Pavements. **Portland Cement Association**, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 36 p., 2004.

VADENBO, Carl; HELLWEG, Stefanie; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo. Multi-objective optimization of waste and resource management in industrial networks – Part I: Model description. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 89, p. 2-63, Aug. 2014.

VERISSIMO, Rafael. **Utilização de resíduo de plásticos para a produção de blocos intertravados - pavers**. 2014. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2014.

VIEIRA, Ana Paula Nascimento Batista. **Viabilidade técnica da fabricação de compósito utilizando fibra de pneu na fabricação de blocos intertravados**. 2014. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Boletim de ensaios de cimento**. [São Paulo], 2019. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/>. Acesso em: 20 out. 2019.

WANG, Her-Yung. A study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete. **Waste Management**, v. 29, p. 335-341, Jan. 2009.

WANKE, César Henrique *et al.* Recuperação Hidrofóbica de Polipropileno Tratado por VUV ou Plasma. **Polímeros**, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 56–62, maio/jul. 2011.

WIEBECK, Hélio; HARADA, Júlio. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Artliber Editora, 2005. 352 p.

WU, Haiyan *et al.* Reinforcement and toughening of polypropylene/organic montmorillonite nanocomposite using β -nucleating agent and annealing. **Composites Part B: Engineering**, v. 44, p. 439–445, Jan. 2013.

ZANIN, Maria; MANCINI, Sandro Donnini. **Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia**. 2. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2015. 138 p. ISBN 978-85-7600-413-4.

ZOLLINGER, Dan G. *et al.* **Performance of Continuously Reinforced Concret Pavements**: volume VI: CRC pavement design, construction, and performance. FHWA-RD-94-180, FHWA, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., Feb. 1999.