

ANO  
2017



**UDESC**

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA KAROLINY FERRARI | INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE PVC MOÍDO COMO  
SUBSTITUTO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO NO CONCRETO DOSADO PARA  
PEÇAS DE PAVIMENTO INTERTRAVADO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE PVC  
MOÍDO COMO SUBSTITUTO  
PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO  
NO CONCRETO DOSADO PARA  
PEÇAS DE PAVIMENTO  
INTERTRAVADO**

ANA KAROLINY FERRARI

JOINVILLE, 2017

Podem ser considerados um dos maiores desafios da sociedade moderna o equilíbrio entre o consumo e exploração de recursos naturais e também entre a geração excessiva e a disposição final dos resíduos sólidos. O setor da construção civil é um dos setores que mais geram tais resíduos. Entre os resíduos, pode-se citar o Policloreto de Vinila: PVC. O estudo visou avaliar a influência da utilização do resíduo de PVC reciclado moído como substituto parcial do agregado miúdo do concreto dosado para peças de pavimentos intertravados.

Orientador: Adriana Goulart dos Santos

Joinville, 2017

ANA KAROLINY FERRARI

INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE PVC MOÍDO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO  
AGREGADO MIÚDO NO CONCRETO DOSADO PARA PEÇAS DE PAVIMENTO  
INTERTRAVADO

Dissertação de Mestrado apresentada como  
requisito parcial para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Civil do Centro de  
Ciências Tecnológicas, da Universidade do  
Estado de Santa Catarina.

Orientadora: Professora Doutora Adriana  
Goulart dos Santos

JOINVILLE  
2017

Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com  
auxílio do programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC

Ferrari, Ana Karoliny  
Influência do resíduo de PVC moído como substituto  
parcial do agregado miúdo no concreto dosado para  
peças de pavimento intertravado / Ana Karoliny  
Ferrari. - Joinville , 2017.  
130 p.

Orientadora: Adriana Goulart dos Santos  
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de  
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,  
Joinville, 2017.

1. PVC. 2. Pavimento intertravado de concreto.  
3. Concreto. I. dos Santos, Adriana Goulart . II.  
Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa  
de Pós-Graduação. III. Título.

**Influência do Resíduo de PVC Moído como Substituto Parcial do Agregado  
Miúdo no Concreto Dosado para Peças de Pavimentos Intertravados**

por

**Ana Karoliny Ferrari**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

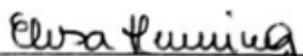
**MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL**

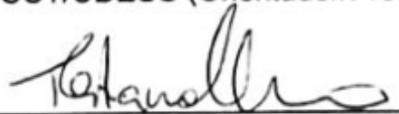
Área de concentração em "Engenharia Urbana e da Construção Civil"  
e aprovada em sua forma final pelo

**CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.**

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Adriana Goulart dos Santos  
CCT/UDESC (Orientador/Presidente)

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Elisa Henning  
CCT/UDESC

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Tatiana Cureau Cervo  
UFSM

**Joinville, SC, 24 de outubro de 2017.**



Ao meu marido, Rogério, pela paciência e amor e aos meus pais, pela dedicação e exemplo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por iluminar meu caminho.

Ao meu marido, Rogério Ferrari Maistro, que apareceu na minha vida e me transformou em uma pessoa melhor a cada dia. Obrigada por todo amor, carinho e paciência todos os dias. Obrigada também por ser meu maior incentivador.

Aos meus pais, pela força que me deram para que eu chegasse até aqui. A meu pai, Acacio, por todo amor, por toda a paciência, pelo empenho em me ajudar na execução desse trabalho e por todo incentivo nas fases mais críticas ao longo da dissertação.

A minha orientadora, Adriana Goulart dos Santos, por toda contribuição e paciência no desenvolvimento do trabalho durante todos os meses. Ao engenheiro Adilson Schackow pela paciência e por toda ajuda e à coordenadora Carmeane Effting do Laboratório de Materiais de Construção Civil, local de grande importância para realização dos ensaios experimentais da dissertação.

À amiga Ana Beatriz Rozza Bortot pela parceria e amizade de tantos anos e por sempre me ajudar em todas as fases do trabalho.

Agradeço ao demais amigos, aqueles que me conhecem há anos e aos que eu conquistei ao longo da vida acadêmica. Obrigada por cada momento de alegria e pela amizade que tornou minha jornada inesquecível.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e ao Departamento de Engenharia Civil da UDESC-CCT por ter aceito meu projeto de dissertação.

Enfim, obrigada a todos que me ajudaram de alguma forma nessa etapa.



## RESUMO

Os temas sustentabilidade e construção civil são claramente interdependentes na atualidade. Podem ser considerados um dos maiores desafios da sociedade moderna o equilíbrio entre o consumo e exploração de recursos naturais e também entre a geração excessiva e a disposição final dos resíduos sólidos. O setor da construção civil é um dos setores que mais geram tais resíduos. Entre os resíduos sólidos gerados, pode-se citar o Policloreto de Vinila: PVC. O estudo teve como objetivo avaliar a influência da utilização do resíduo de PVC reciclado moído como substituto parcial do agregado miúdo do concreto dosado para peças de pavimentos intertravados. Foram avaliadas propriedades físicas e mecânica das peças, como resistência à compressão, avaliação dimensional, absorção de água, índice de vazios, massa específica, durabilidade por molhagem e secagem e análise microscópica. Para isso, foram executados quatro traços, sendo um de referência apenas com agregados naturais e outros três com substituição de 5%, 10%, 15% de PVC moído, nomeados, respectivamente, de PVC0, PVC5, PVC10 e PVC15. Resultados mostraram que a presença do PVC influenciou na resistência à compressão das peças de concreto. No caso, houve queda da resistência à compressão, não atendendo à resistência mínima exigida pela norma brasileira. Em relação à avaliação dimensional, a maior variação foi na dimensão da altura. Na absorção de água, não houve influência da presença do PVC. As absorções das peças dos quatro traços ficaram dentro do limite exigido por norma. Em relação ao índice de vazios, também não houve influência significativa. Os índices ficaram entre 21,88% (PVC0) a 25,58% (PVC15). Já no ensaio de massa específica, houve melhora nesse parâmetro, ou seja, massa específica diminuiu, as peças ficaram mais leves. No ensaio de durabilidade, a presença do PVC fez com que peças tivessem maior perda de massa, em percentual, quando comparado ao traço sem PVC. Esses parâmetros se enquadraram dentro dos valores exigidos por norma. Pela análise microscópica, pode-se observar uma quantidade significativa de poros na matriz cimentícia das peças. A utilização de PVC moído como substituto parcial do agregado miúdo na fabricação de peças de pavimento intertravado pode ser considerado tecnicamente viável, a partir de mais estudos, e contribuindo para o desenvolvimento sustentável da sociedade.

**Palavras-chave:** PVC. Pavimento Intertravado de Concreto. Concreto.



## ABSTRACT

Sustainability and civil construction are interdependent today. The equilibrium between consumption and exploitation of natural resources and between overproduction and final disposal of solid waste can be considered one of the greatest challenges of modern society. The construction sector can be considered one of the sectors that generate more waste. Among the solid residues generated, can be mentioned PVC: Polyvinyl chloride. The objective of this study was to evaluate the influence of using milled recycled PVC as a partial substitute for the small aggregate in the manufacture of concrete pieces for interlocking pavements. Physical and mechanical properties of the pieces were evaluated, such as compressive strength, dimensional evaluation, water absorption, voids index, specific mass, wetting and drying durability, and microscopic analysis. To do this, four mixtures were executed, one of which is a reference only with natural aggregates and another three with 5%, 10%, 15% of milled PVC substitution, respectively named PVC0, PVC5, PVC10 and PVC15. Results showed that, statistically, the presence of PVC influenced the compressive strength of concrete pieces. In this case, the compressive strength fell, not meeting the minimum resistance required by the Brazilian Standard. Regarding dimensional evaluation, the greatest variation was in height dimension. In the water absorption, there was no influence of the presence of PVC, according to the statistical analysis. The absorptions of the parts of the four traces were within the limit required by norm. Regarding the void index, there was also no significant influence. The indices were between 21.88% (PVC0) and 25.58% (PVC15). In the specific mass test, there was an improvement in this parameter, that is, specific mass decreased, the parts became lighter. In the durability test, the presence of the PVC caused that pieces had greater mass loss, in percentage, when compared to the mixture without PVC. These parameters were within the required values. By microscopic analysis, a significant amount of pores can be observed in the cementitious matrix of the pieces. The use of milled PVC as a partial substitute for the small aggregate in the fabrication of interlocked pavements can be considered technically viable, contributing to the sustainable development of society.

**Keywords:** PVC. Interlocking pavement of concrete. Concrete.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pirâmide hierárquica invertida de gestão de resíduos.....	25
Figura 2 – Reação de formação do PVC.....	29
Figura 3 – Etapas de produção do PVC.....	30
Figura 4 – Principais aplicações do PVC .....	32
Figura 5 – Simbologia do PVC .....	33
Figura 6 – Exemplos de peça de concreto tipo I .....	35
Figura 7 – Exemplos de peça de concreto tipo II .....	35
Figura 8 – Exemplos de peça de concreto tipo III .....	35
Figura 9 – Exemplos de peças de concreto tipo IV .....	36
Figura 10 – Estrutura típica de um pavimento intertravado.....	39
Figura 11 – Diagrama de dosagem do concreto pelo método de Amadei.....	47
Figura 12 – Eletroduto de PVC.....	55
Figura 13 – Moinho de facas.....	55
Figura 14 – Eletroduto de PVC moído.....	56
Figura 15 – Fluxograma resumido do procedimento experimental.....	57
Figura 16 – Ponto de Pelota.....	60
Figura 17 – Vibroprensa manual com baixa energia de compactação.....	62
Figura 18 – Ponto de Pelota do traço de referência PVC0.....	62
Figura 19 – Ponto de Pelota do traço PVC10.....	63
Figura 20 - Vibroprensa hidráulica .....	64
Figura 21 – Misturador e esteira.....	65
Figura 22 – Prensa e paletes .....	65
Figura 23 – Máquina utilizada no ensaio de resistência à compressão .....	67
Figura 24 – Microscópio Eletrônico de Varredura .....	74
Figura 25 – Amostras para a análise microscópica.....	75
Figura 26 – Amostra de microscopia após o recobrimento .....	76
Figura 27 – Ponto da Pelota do traço PVC0 .....	81
Figura 28 – Ponto da Pelota do traço PVC5 .....	82
Figura 29 – Ponto da Pelota do traço PVC10.....	82
Figura 30 – Ponto da Pelota do traço PVC15.....	83
Figura 31 – Vistal lateral e superior das peças de concreto no estado endurecido do traço PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c) e PVC15 (d).....	84
Figura 32 – Vista superior das peças de concreto no estado endurecido do traço PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c) e PVC15 (d).....	85
Figura 33– Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c) e PVC15 (d).....	87
Figura 34 – Gráfico de resistência à compressão aos 3 dias .....	88
Figura 35 – Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c), PVC15 (d).....	89
Figura 36 – Gráfico de resistência à compressão aos 7 dias .....	90

Figura 37 – Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c), PVC15 (d).....	91
Figura 38 – Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias .....	92
Figura 39 – Média das dimensões em forma resumida .....	97
Figura 40 – Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c), PVC15 (d).....	98
Figura 41 – Média das absorções de água (em %) de forma resumida .....	99
Figura 42 – Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c), PVC15 (d).....	101
Figura 43 – Média dos índices de vazios (em %) de forma resumida .....	102
Figura 44 – Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c), PVC15 (d).....	104
Figura 45 – Média da massa específica (em g/cm <sup>3</sup> ) de forma resumida .....	105
Figura 46 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC0 – vibroprensa manual (150x).....	107
Figura 47 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC0 - vibroprensa manual (400x).....	108
Figura 48 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC0 (400x) .....	108
Figura 49 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC5 (150x) .....	109
Figura 50 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC5 (400x) .....	110
Figura 51 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC10 (400x) .....	110
Figura 52 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC10 (2000x) .....	111
Figura 53 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC15 (400X).....	111
Figura 54 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC15 (2000x) .....	112
Figura 55 – Difrátograma do concreto PVC15 na região 1 (a), 2 (b) e 3 (c) .....	113
Figura 56 - Curva granulométrica da areia tipo 1.....	129
Figura 57 - Curva granulométrica da areia tipo 2.....	129
Figura 58 - Curva granulométrica do PVC moído .....	130

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resistência à compressão aos 28 dias .....	36
Quadro 2 – Tipos e constituições dos cimentos Portland.....	40
Quadro 3 – Características do Cimento Portland CP V - ARI - RS .....	53
Quadro 4 – Traço de referência .....	59
Quadro 5 – Traço piloto (PVC0).....	61
Quadro 6 – Resistência à compressão estimada aos 28 dias – vibroprensa manual (em MPa).....	63
Quadro 7 – Fator multiplicativo p.....	68
Quadro 8 – Ensaio de granulometria da areia tipo 1 .....	77
Quadro 9 – Ensaio de granulometria da areia tipo 2 .....	78
Quadro 10 – Dimensão Máxima Característica das areias ensaiadas .....	78
Quadro 11 – Módulo de finura das areias ensaiadas .....	78
Quadro 12 – Massa específica teórica das areias ensaiadas .....	78
Quadro 13 – Ensaio de granulometria do agregado graúdo .....	79
Quadro 14 – Dimensão Máxima Característica do agregado graúdo.....	79
Quadro 15 – Módulo de finura do agregado graúdo.....	79
Quadro 16 – Massa específica teórica do agregado graúdo.....	80
Quadro 17 – Ensaio de granulometria do PVC moído .....	80
Quadro 18 – Dimensão Máxima Característica do PVC moído.....	80
Quadro 19 – Módulo de finura do PVC moído.....	80
Quadro 20 – Massa específica teórica do PVC moído.....	81
Quadro 21 – Resistência à compressão estimada aos 3 dias (em MPa) .....	86
Quadro 22 – Resistência à compressão estimada aos 7 dias (em MPa) .....	88
Quadro 23 – Resistência à compressão estimada aos 28 dias (em MPa) .....	90
Quadro 24 – Análise de variância da resistência à compressão aos 28 dias.....	93
Quadro 25 – Análise da normalidade dos resíduos da resistência à compressão aos 28 dias.....	93
Quadro 26 – Avaliação dimensional das peças do traço PVC0 (em mm) .....	94
Quadro 27 – Avaliação dimensional das peças do traço PVC5 (em mm) .....	94
Quadro 28 – Avaliação dimensional das peças do traço PVC10 (em mm) .....	95
Quadro 29 – Avaliação dimensional das peças do traço PVC15 (em mm) .....	96
Quadro 30 – Absorção de água (em %).....	98
Quadro 31 – Análise de variância da absorção de água .....	99
Quadro 32 – Análise da normalidade dos resíduos da absorção de água .....	100
Quadro 33 – Índice de vazios (em %) .....	100
Quadro 34 – Análise de variância do índice de vazios .....	102
Quadro 35 – Análise da normalidade dos resíduos do índice de vazios .....	103
Quadro 36 – Massa específica (em g/cm <sup>3</sup> ) .....	103
Quadro 37 – Análise de variância da massa específica.....	105
Quadro 38 – Análise da normalidade dos resíduos da massa específica .....	106

Quadro 39 – Variação de volume durante o ensaio (em%) .....	106
Quadro 40 – Variação de massa durante o ensaio (em %) .....	106
Quadro 41 – Composição química em % do peso do óxido Cloro.....	114

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS .....	19
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>19</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>19</b>
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>22</b>
2.1	DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E CONSTRUÇÃO CIVIL .....	22
2.2	POLÍMEROS .....	26
<b>2.2.1</b>	<b>História dos polímeros</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.2</b>	<b>PVC</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Propriedades do PVC</b> .....	<b>30</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Reciclagem do PVC</b> .....	<b>32</b>
2.3	PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO .....	34
<b>2.3.1</b>	<b>Definições e especificações</b> .....	<b>34</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Materiais constituintes das peças de concreto</b> .....	<b>39</b>
2.3.2.1	Cimento .....	39
2.3.2.2	Agregados .....	42
2.3.2.3	Aditivos químicos.....	43
<b>2.3.3</b>	<b>Dosagem e cura do concreto</b> .....	<b>44</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Vantagens e desvantagens do uso de peças de concreto para pavimento intertravado</b> .....	<b>47</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Estudos de peças de concreto com materiais reciclados</b> .....	<b>48</b>
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>52</b>
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	52
3.2	MATERIAIS .....	53
<b>3.2.1</b>	<b>Cimento</b> .....	<b>53</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Agregado miúdo</b> .....	<b>53</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Agregado graúdo</b> .....	<b>54</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Água</b> .....	<b>54</b>
<b>3.2.5</b>	<b>PVC</b> .....	<b>54</b>

<b>3.2.6</b>	<b>Aditivo químico</b> .....	<b>56</b>
<b>3.3</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>56</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Caracterização dos agregados</b> .....	<b>57</b>
3.3.1.1	Determinação da massa específica .....	58
3.3.1.2	Determinação da composição granulométrica .....	58
<b>3.3.2</b>	<b>Dosagem das misturas</b> .....	<b>59</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Execução das peças de concreto</b> .....	<b>64</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Ensaio das propriedades físicas e resistência mecânica das peças de concreto</b> .....	<b>66</b>
3.3.4.1	Resistência à compressão .....	66
3.3.4.2	Avaliação dimensional .....	68
3.3.4.3	Absorção de água .....	68
3.3.4.4	Índice de vazios .....	69
3.3.4.5	Massa específica .....	70
3.3.4.6	Durabilidade por molhagem e secagem .....	70
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>77</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS .....	77
4.2	DOSAGEM DO CONCRETO .....	81
4.3	PEÇAS DE CONCRETO ENDURECIDAS .....	83
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	86
4.5	AVALIAÇÃO DIMENSIONAL .....	93
4.6	ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	97
4.7	ÍNDICE DE VAZIOS .....	100
4.8	MASSA ESPECÍFICA .....	103
4.9	DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM .....	106
4.10	ANÁLISE MICROESTRUTURAL POR MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) E DRX .....	107
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>115</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>117</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>118</b>
	<b>APÊNDICE</b> .....	<b>129</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Os temas sustentabilidade e construção civil são claramente interdependentes na atualidade. A preocupação com o meio ambiente e com os resíduos gerados por todo tipo de indústria tem sido crescente. Podem ser considerados um dos maiores desafios da sociedade moderna, o equilíbrio entre o consumo e exploração de recursos naturais e, também, entre a geração excessiva e a disposição final dos resíduos sólidos. A sociedade deve procurar maneiras de se desenvolver de forma sustentável, a fim de garantir seu progresso sem prejudicar o meio ambiente e comprometer seu futuro, o desenvolvimento sustentável é o ápice do equilíbrio entre o homem, a natureza e a economia, em que a geração atual pode usufruir o meio ambiente sem comprometer futuras gerações (COSTA; IGNÁCIO, 2011).

Em 2010 foi promulgada a Política Nacional de Resíduos Sólidos, 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. 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 (LOMASO et al., 2015). A legislação brasileira determina que resíduos sólidos gerados pela indústria sejam dispostos em aterros controlados. Embora exista uma grande quantidade de aterros sanitários que foram projetados corretamente, o volume dos resíduos tem aumentado, muitos aterros já estão atingindo sua capacidade máxima. Por isso, há uma preocupação na reinserção de produtos no ciclo de produção de que saíram ou em ciclos de outros setores. A gestão e a disposição inadequada dos resíduos sólidos causam impactos socioambientais, muitas vezes irreversíveis. Entre os impactos pode-se citar a degradação do solo, poluição atmosférica, comprometimento de corpos d'água e mananciais, intensificação de enchentes e proliferação de vetores de importância sanitária nos grandes centros urbanos (BESEN; GUNTHER; RODRIGUES, 2010).

Segundo a Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016), a geração total de resíduos sólidos no Brasil em 2015 foi de 79,9 milhões de toneladas, o que representou um aumento de cerca de 1,7% na quantidade

de resíduos quando comparado ao ano anterior. Nesse mesmo período, a população brasileira cresceu 0,8% e o Produto Interno Bruto (PIB) retraiu 3,8%.

Com relação à construção civil, pode ser considerado um dos setores que mais geram tais resíduos, tendo grande influência no montante final produzido nos centros urbanos (SILVA; FERNANDES, 2012). Além disso, são muitas vezes dispostos em locais clandestinos, em terrenos baldios, aterros sanitários e outras áreas, sem que se possa aproveitar o seu potencial mesmo após o uso. Ainda avaliando a sustentabilidade e a construção civil, pode-se destacar outro impacto ambiental: a escassez dos recursos naturais. Um estudo realizado pelo Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de São Paulo (SindusCon – SP), a indústria da construção é uma das que mais utiliza recursos naturais, desde a extração, produção de insumos até a execução e operação das edificações. Até 75% do que é utilizado vem do meio natural (AGOPYAN; JOHN, 2011). O concreto, por exemplo, é o segundo material mais consumido do mundo, sendo superado apenas pela água (CHEN et al., 2010).

A areia é largamente utilizada no setor da construção civil, sendo retirada do solo através da operação de mineração, causando impactos ambientais. A melhor maneira de diminuir a utilização desses recursos e conservar o meio ambiente é o emprego de materiais reciclados ou alternativos (ALWAELI, 2013). Sendo assim, a reciclagem e recuperação dos recursos são de grande importância e podem ser incluídas como práticas comuns, uma alternativa visando a sustentabilidade, pois é a melhor maneira de solucionar os problemas dos resíduos e de eliminá-los, melhorando a reutilização, fundamental para preservação dos recursos naturais (DUTTA; DAS, 2010).

Entre os resíduos sólidos gerados na construção civil em geral, pode-se citar o Policloreto de Vinila: o PVC. O PVC é o mais versátil dentre os plásticos. Devido à necessidade de sua resina ser formulada mediante a incorporação de aditivos, o PVC pode ter suas características alteradas dentro de um amplo campo de funções, podendo ser algum produto rígido até algo extremamente flexível. O material pode ser moído, injetado, moldado, extrudado, entre outros (RODOLFO JUNIOR; NUNES; ORMANJI, 2006).

O PVC representa 4,7% do total de plásticos e cerca de 0,7% do resíduo total gerado no Brasil (INSTITUDO DO PVC, 2008). O segmento da construção civil é responsável pelo consumo de mais de 60% do PVC fabricado no Brasil (LIMA; ROCHA; KONAGNO, 2012), por isso a relevância desse material no setor. Para se ter

uma ideia, segundo um estudo encomendado pelo Instituto do PVC (2013), o índice de reciclagem de PVC pós-consumo do material foi de apenas 19% em 2011. Esse setor de reciclagem tem um grande potencial, ainda pode-se desenvolver muito.

O aperfeiçoamento dos métodos e a aplicação de medidas racionais podem contribuir para aumentar a eficácia de produção na construção civil, e é dentro desse contexto que, atualmente, a utilização de peças pré-moldadas de concreto vem ganhando muito espaço nos canteiros de nosso País. A utilização de pavimentos com peças pré-moldadas para pavimento intertravado (também denominado como pavers) também está crescendo. Seu uso proporciona um melhor planejamento ao longo de uma obra, trazendo vantagens indispensáveis para quem quer contar apenas com o melhor para construir (DA SILVA, 2011). Nesses materiais cimentícios já existem estudos que mostram a possibilidade de se utilizar materiais reciclados de forma prática, viável e ambientalmente sustentável.

Diante desse contexto, a utilização de PVC moído como agregado miúdo em peças de concreto pode ser uma nova destinação de descarte para esse material, reduzindo também o consumo de agregados naturais.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar a influência do resíduo de PVC moído como substituto parcial do agregado miúdo natural nas propriedades físicas e mecânica de concreto dosado para peças de pavimento intertravado.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, pode-se citar:

- Definir um traço piloto de concreto para moldagem das peças de pavimento intertravado;
- Avaliar a propriedade de resistência mecânica à compressão de todas as peças em diferentes idades de cura;

- Determinar a absorção de água, o índice de vazios e massa específica das peças;
- Avaliar a durabilidade das peças por molhagem e secagem;
- Avaliar microscopicamente a matriz cimentícia das peças moldados com e sem PVC;
- Aplicar técnicas estatísticas para análise dos resultados das propriedades físicas e mecânica ensaiadas a fim de analisar a influência da substituição do PVC moído.

### 1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho está estruturado de forma a abordar o tema a que se propõe em seis capítulos. Primeiramente, foi realizada a introdução ao tema da pesquisa, bem como elucidar os objetivos gerais e específicos.

A revisão da literatura se desenvolve ao longo do segundo capítulo dividido em subcapítulos, abordando assuntos considerados relevantes para a contextualização, desenvolvimento e execução da pesquisa. É apresentada uma abordagem sobre a questão de desenvolvimento sustentável, sobre a escassez dos recursos naturais e também a geração de resíduos da sociedade, principalmente da construção civil. Também apresentam-se os conceitos básicos dos polímeros, bem como seu histórico e principais propriedades para então, introduzir o assunto sobre PVC, propriedades e reciclagem desse material. No subcapítulo seguinte, inicia-se a conceituação de pavimento intertravado de concreto, bem como suas especificações exigidas pelas normas brasileiras, formas de produção, seus materiais constituintes, as vantagens e desvantagens, dosagem do concreto e também estudos já realizados nessa área.

No capítulo três é exposto todo o programa experimental, também dividido em subcapítulos. Nesses subcapítulos, apresentam-se o planejamento experimental e a definição de todas as variáveis do trabalho. Em seguida, são apresentados os materiais utilizados ao longo da pesquisa, seguido dos procedimentos experimentais detalhados, da dosagem dos traços de concreto, execução das peças e descrição da análise dos resultados a partir dos métodos estatísticos.

No quarto capítulo, apresenta-se os resultados e a decorrente discussão de toda a pesquisa, além das análises estatísticas dos dados obtidos.

No quinto capítulo são apresentadas considerações finais obtidas a partir da discussão de resultados e por fim, no sexto capítulo, sugestões para trabalhos relevantes para a continuidade da pesquisa.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E CONSTRUÇÃO CIVIL

Em 1982, foi criada a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento chefiada pela primeira-ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland durante Conferência de Nairobi, realizada pela *United Nations Environment Programme* (UNEP) – ONU. Em 1987, os resultados do trabalho da Comissão tornaram-se públicos, por meio do documento chamado de *Our Common Future* também conhecido como Relatório Brundtland (ROMEIRO, 2012). O documento traz um dos primeiros conceitos de desenvolvimento sustentável a nível mundial: “desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades”.

Ciegis, Ramanauskiene e Martinkus (2009) concluem ao analisar os conceitos de desenvolvimento sustentável que nenhuma definição da literatura inclui todos os aspectos para compreensão do mesmo. A dificuldade está associada ao complexo domínio da questão, que deve combinar a eficiência, igualdade, coesão econômica e ambiental na sociedade.

As indústrias tem sido responsabilizadas por grande parte dos problemas ambientais do mundo que podem vir a comprometer gerações futuras. Sendo assim, há a necessidade de uma postura empresarial e políticas ambientais, em que o desenvolvimento econômico esteja alinhado à responsabilidade ambiental. A sociedade acaba exigindo uma legislação mais rígida por parte do Governo para promover a sustentabilidade (CARNEIRO; LUCA; OLIVEIRA, 2008).

A sociedade humana, ao ocupar o espaço geográfico, promove a modificação da paisagem à medida que retira do meio físico os recursos necessários para seu desenvolvimento. Silva (2007) afirma que, das atividades exercidas pelo homem sobre o meio natural, pode-se destacar entre as economicamente mais expressivas, a mineração. No Brasil, a atividade extrativa ocorreu no início da colonização e continua até os dias atuais. De acordo com Tobias et al. (2010), entende-se por mineração o processo e/ou atividades industriais cujo objetivo é a extração de substâncias minerais possuindo uma importância significativa para a sociedade, pois nenhuma civilização pode se desenvolver sem uso dos bens minerais, principalmente quando se pensa em

qualidade de vida, uma vez que as necessidades básicas do ser humano são alimentação, moradia e vestuário, e são atendidas essencialmente por recursos naturais. É uma ocupação apenas temporária para o uso do subsolo, mas que muda drasticamente a paisagem gerando degradação visual, distúrbios nos cursos d'água, destruição de terras agrícolas e/ou florestas, erosão e sedimentação (CARDOZO, 2006).

Os problemas ambientais originados pela mineração de materiais de uso imediato na construção civil (agregados miúdos e graúdos naturais) e os conflitos com outras formas de uso e ocupação do solo vêm conduzindo a uma diminuição crescente de jazidas disponíveis para o atendimento da demanda desses materiais pelas principais regiões metropolitanas (VIANA, 2013). A areia, material natural não renovável, é utilizada amplamente na construção civil, sobretudo como agregado miúdo. O seu impacto ambiental está por conta da sua extração irregular, em vez de ser retirado do centro do curso da água, é obtido das margens, provocando o assoreamento, a remoção da cobertura vegetal, entre outros problemas (CAVALCANTE et al., 2012). A areia provinda das atividades de extração é considerada um bem mineral de uso social, pois é utilizada no setor de habitação, saneamento e transporte (SILVA, 2007). Sendo assim, devido à necessidade de elevada produção para suprir a alta demanda na indústria da construção civil, provoca diversos danos ao meio ambiente, que vão se acumulando. A construção civil absorve amplamente a produção de areia e quando comparado com os demais setores percebe-se a grande distância, já que sozinha é responsável por quase 70% da demanda (DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINEIRA - DNPM, 2011).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população total no país tem crescido nos últimos. Segundo estimativas, entre 2006 e 2016, esse crescimento chegou a 10% (IBGE, 2016). Essas elevadas taxas de crescimento populacional contribuem para uma exploração desenfreada dos recursos minerais, alto consumo e para a crescente preocupação com as questões ambientais (VIANA, 2007). À medida que os materiais da construção são movidos ao longo do seu ciclo de vida, geram-se resíduos (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Em 1992, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92) foi um evento realizado no Rio de Janeiro, envolvendo 172 países e 108 chefes de Estado e representantes de 1.400 ONGs. A Rio 92 representou uma discussão internacional do desenvolvimento sustentável. Vinte anos mais tarde,

ocorreu a Rio + 20. O objetivo foi renovar um compromisso político com o meio ambiente, aliar o consumo dos recursos naturais minerais e o desenvolvimento a um ambiente sustentável. Os resíduos sólidos, sua disposição e reciclagem foram alguns dos temas debatidos na Conferência (VOSS et al., 2013). De acordo com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) ou Lei 12.305/2010, pode-se definir resíduo sólido como material, substância, objeto ou bem descartado que resulta da atividade humana, em que a destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos, corpos d'água, ou que exijam soluções técnica ou economicamente inviáveis (BRASIL, 2010, art. 3º). Ainda, a NBR 10004 (ABNT, 2004) conceitua resíduos sólidos como descartáveis ou inúteis e classifica-os quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Segundo a ABRELPE (2016), o Brasil apresentou geração de 45 milhões de toneladas de resíduos sólidos da construção civil em 2015, ou seja, cerca de 1,2% de aumento em relação ao ano anterior. Para a ABRECON (2013), o resíduo da construção civil é todo resíduo gerado no processo construtivo, de reforma, escavação ou demolição. Conhecido como entulho, é o conjunto de fragmentos ou restos de tijolo, concreto, argamassa, aço, madeira, etc., provenientes do desperdício na construção, reforma e/ou demolição de estruturas, como prédios, residências e pontes.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, através da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, enquadrou os resíduos da construção civil em quatro categorias:

- Classe A - resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
- Classe B - resíduos recicláveis para outras destinações: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros;
- Classe C - resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação,

como os produtos oriundos do gesso;

- Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Vadenbo, Hellweg e Guillén Gosálbez (2014) afirmam que 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. Há o interesse de diversos agentes envolvidos na cadeia da construção civil (consumidores, investidores e governo) em alertar, estimular e pressionar o setor, para que as empresas mudem sua forma de gerir suas obras (BAPTISTA JUNIOR; ROMANEL, 2013). 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). Nesta categoria estão incluídas todas as tecnologias de valorização energética para o aproveitamento do potencial energético dos resíduos, através de processos energéticos (JARUNGTAMMACHOTE; DUTTA, 2007). Ilustrando a gestão de resíduos, pode-se observar a pirâmide hierárquica invertida apresentada na figura 1.

**Figura 1 – Pirâmide hierárquica invertida de gestão de resíduos**



Fonte: Jarungthammachote, e Dutta 2007.

A melhor maneira de solucionar os problemas dos resíduos é eliminá-los, melhorando a reutilização, fundamental para preservação dos recursos naturais (DUTTA; DAS, 2010).

Brasileiro e Matos (2015) publicaram um artigo no qual realizaram uma revisão bibliográfica de pesquisas que retratam a preocupação quanto à geração dos resíduos provenientes da indústria da construção no Brasil e em todo o mundo. De acordo com os autores, os estudos indicaram que os agregados reciclados, além de apresentarem menor custo de produção que os naturais, ainda promovem um ganho ambiental. Ressaltaram que o grande empecilho da reutilização é cultural devido à desconfiança do bom desempenho dos novos produtos, além da inexistência de normas que assegurem a sua aceitação. Também concluíram que são necessárias políticas a campanhas de conscientização para se inserir práticas sustentáveis na sociedade, a fim de existir uma efetiva redução de resíduo.

Nesta pesquisa, o resíduo utilizado será o polímero policloreto de vinila, conhecido como PVC.

## 2.2 POLÍMEROS

A palavra polímero é de origem grega, sendo que *poli* significa muitos e *mero* é uma unidade de repetição. Sendo assim, polímero é uma macromolécula (grande molécula) composta por dezenas de milhares de unidades, formadas por ligação covalente. A matéria prima de um polímero é um monômero, ou seja, uma única molécula com uma (mono) unidade de repetição (CANEVAROLO, 2006).

A nomenclatura dos polímeros é denominada usando-se o próprio nome do monômero que foi usado na sua síntese e não o nome químico da unidade repetitiva do mesmo. Por exemplo, quando fala-se em polietileno, o etileno é o monômero utilizado na síntese (MANRICH, 2005). Em relação à sua ocorrência, os polímeros podem ser naturais ou sintéticos. Os naturais são encontrados na natureza, como por exemplo, a celulose, a borracha natural, o amido e as proteínas. Já os sintéticos, em sua maioria, são orgânicos, produzidos pelo homem através da reação de polimerização de moléculas simples, como o Nylon, o vidro acrílico, o polietileno e o PVC (SALVADOR, 2000).

Os polímeros podem ser classificados também em homopolímeros e copolímeros. Os primeiros referem-se aos provenientes de uma única unidade de repetição monomérica, enquanto os segundos apresentam duas ou mais unidades. Como homopolímeros, pode-se citar o PE (Polietileno), o PP (Polipropileno), o PET

(poli tereftalato de etileno) e também o PVC (policloreto de vinila). Já os copolímeros, tem-se o SBR (poliestireno cobutadieno) e NBR (poliestireno co-acrilonitrila) (QUENTAL et al., 2005).

Uma das classificações mais importantes e conhecidas é em relação ao comportamento térmico dos polímeros. Eles podem ser classificados como termoplásticos, termofixos e elastômeros. Os termoplásticos são os polímeros que, sob efeito de temperatura e pressão, amolecem e assumem a forma do molde desejada. Um novo processo pode ser reiniciado e o material transformado, portanto são recicláveis. São popularmente conhecidos como plásticos e são muito utilizados. Pode-se citar o PP, o PE e o PVC (CANEVAROLO, 2006). Já os termofixos (ou termorrígidos) são moldados na forma de pré-polímero e depois são submetidos a um processo de “cura” e após assumirem a sua forma definitiva, não há como moldá-los novamente por aquecimento, ou seja, são não-recicláveis. Pode-se citar como termofixo o epóxi e resinas de poliéster. Por fim, os elastômeros, também conhecidos como gomas ou borrachas, são materiais com alta elasticidade, podendo sofrer grandes deformações sem se romperem. De um modo geral, os elastômeros necessitam passar por um processo químico para serem usados. Seu processo de reciclagem é complexo devido a sua incapacidade de fusão (PAOLI, 2008).

### **2.2.1 História dos polímeros**

A literatura apresenta que o primeiro uso de polímero surgiu a partir de um verniz da seiva da árvore “Rhus verniciflua”, na China, há cerca de 3.000 anos. Já o desenvolvimento de técnicas de moldagem e uso comum é datado a partir do século I d. C., em que surgiram os primeiros materiais considerados plásticos (nome popular para o polímero). Até essa época, objetos do cotidiano, como pentes, fivelas, botões, eram fabricados a partir de cascos e chifres de animais, como também o marfim. Isso fez com que houvesse extinção de muitos animais. Em busca de novos materiais que substituíssem os de origem natural, surgiu o plástico (PIATTI; RODRIGUES, 2005).

Em 1839, Charles Goodyear descobriu que a partir de um processo de reação de borracha bruta com enxofre, com aquecimento e resfriamento, a borracha torna-se elásticas, pois podia-se esticar, mas também era capaz de voltar a sua forma original. Goodyear havia descoberto o processo de vulcanização, muito utilizado na indústria de borracha. Anos mais tarde, em 1846, Charles Schonbein descobriu outro polímero

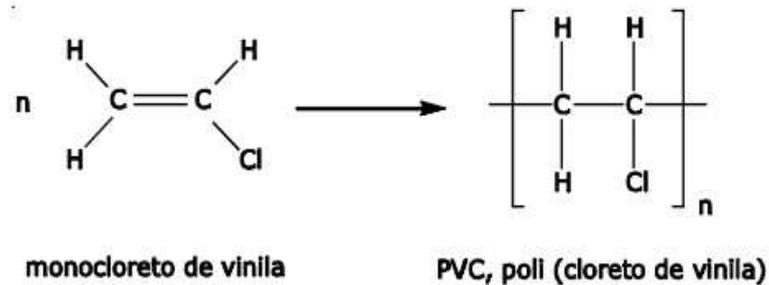
misturando ácido sulfúrico e nítrico ao algodão. Descobriu, então o nitrocelulose, utilizado muitas vezes como substitui da pólvora (WIEBECK; HARADA, 2005). No século seguinte, em 1909, Leo Barkeland formou o primeiro polímero sintético, a baquelite. Esse material quente pode ser moldado e solidificado, muito utilizado para fabricar peças de automóveis, maçanetas, entre outros. Já na década de 30, Wallace Carruthers condensou o ácido adípico e um monômero e foi capaz de criar o náilon, material leve e durável. A ciência de polímeros é bastante recente, principalmente se comparada com a dos materiais tradicionais como metais e cerâmicas. As indústrias automotivas, eletroeletrônicas e de embalagens continuam a substituição de materiais tradicionais por materiais poliméricos desenvolvidos com novas propriedades desejadas. Os profissionais que hoje atuam nos vários setores de polímeros certamente têm observado que o surgimento de polímeros sintéticos nas últimas décadas contribuiu em muito para a revolução tecnológica e ainda tem muito a contribuir (HAGE JUNIOR, 1998).

### 2.2.2 PVC

As resinas de PVC começaram a ser produzidas em 1835, quando Justus von Liebig descobriu o monômero cloreto de vinila (MVC), um gás à temperatura ambiente com ponto de ebulição igual a  $-13,8$  oC. A descoberta de Liebig aconteceu devido a reação do dicloroetileno com hidróxido de potássio em solução alcoólica, porém apenas em 1839, seu aluno, Victor Regnault, quem publicou um artigo relatando a observação da ocorrência de um pó branco após a exposição de ampolas seladas preenchidas com o MVC à luz solar. Victor Regnault concluiu ser o PVC, mas estudos provaram ser policloreto de vinilideno. Anos mais tarde, o primeiro relato da polimerização autêntica de um haleto de vinila foi feita por A. W. Hoffman em 1860. O primeiro registro da reação de polimerização ocorreu em 1872, quando Eugen Baumann detalhou a mudança de estado físico do cloreto de vinila, induzida pela luz solar, para um produto sólido branco, que imaginou ser um isômero do monômero. Sendo assim, define-se o policloreto de vinila - PVC é um termoplástico vinílico, obtido a partir da polimerização do monômero cloreto de vinila - MVC (BRASKEM, 2006).

A reação que ocorre na produção do PVC está na figura 2.

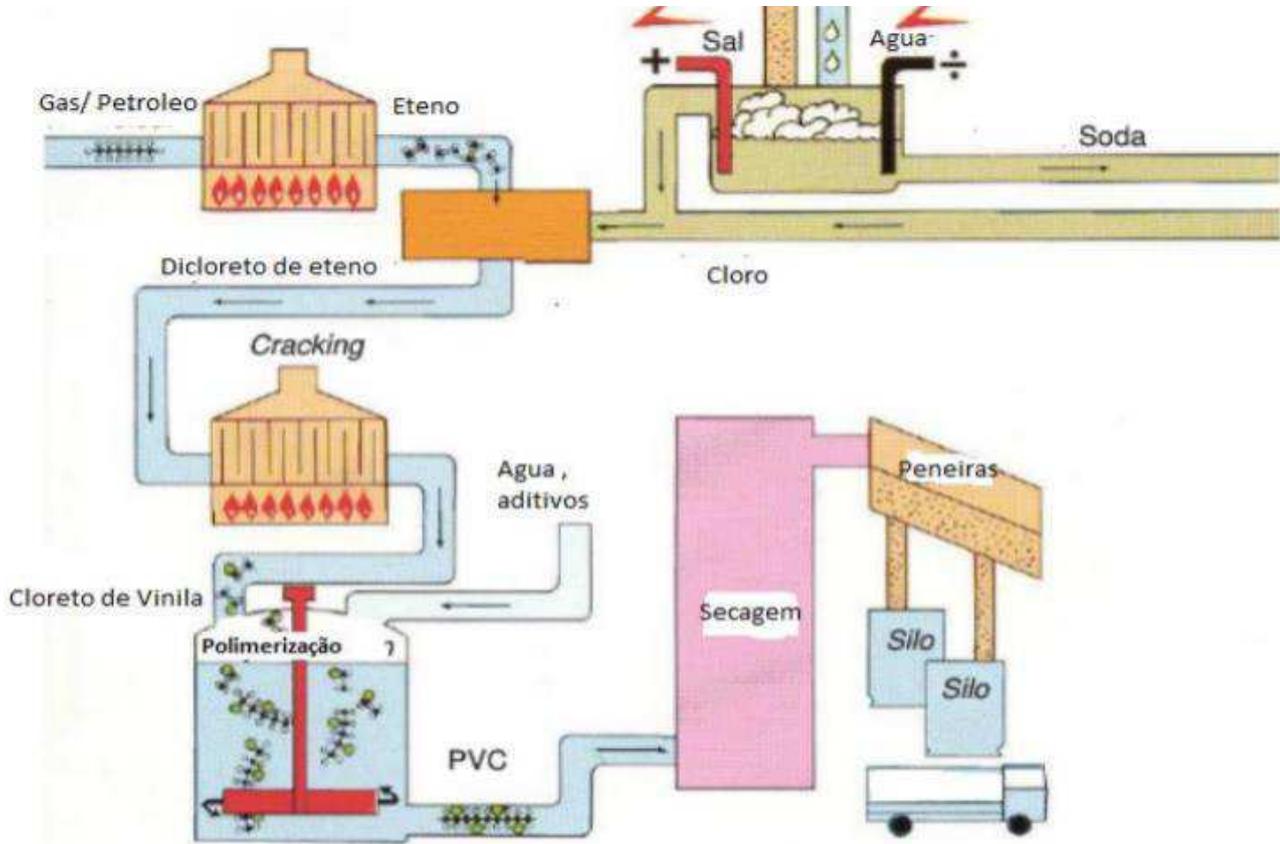
**Figura 2 – Reação de formação do PVC**



Fonte: Piatti, Rodrigues, 2005.

O PVC com fórmula química  $(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n$  é um polímero de origem petrolífera, com aproximadamente 57% de peso em cloro, obtido da eletrólise da água do mar e 38% em carbono e 5% de hidrogênio, que forma o eteno, proveniente de recursos petrolíferos (RODOLFO JUNIOR; MEI., 2007). O PVC é um material amorfo, reciclável, versátil e considerado o segundo termoplástico mais consumido no mundo (GRISA et al., 2011). Na produção do PVC, são utilizados dois processos fundamentais: a polimerização do MVC em suspensão e a polimerização em emulsão. A produção do MVC a partir do etileno e do cloro, ou do etileno e do HCl, respectivamente, é em grande parte realizada em processos industriais fechados. Podem verificar-se emissões de cloro, etileno, 1,2-dicloroetano, HCl, MVC e subprodutos clorados, incluindo dioxinas, para o ambiente de trabalho ou o ambiente exterior (ar, água e sal). Vários destes produtos químicos são substâncias tóxicas bem conhecidas, sendo, por conseguinte, necessárias medidas rigorosas de controle das emissões (ZARZAR JUNIOR; HOLANDA, 2011). A figura 3 mostra as tapas de produção do PVC.

**Figura 3 – Etapas de produção do PVC**



Fonte: Vargas, 2016.

Segundo a Braskem (2016), o volume de produção de PVC apenas em sua indústria em 2015, foi de 542 mil toneladas, uma diminuição de 15% em relação a 2014 em função da crise econômica brasileira de setores de grande impacto como o da infraestrutura e construção civil. Há relatos que era esperado para 2016 um consumo de 40 milhões de toneladas em nível mundial (Zhu et al., 2015).

### 2.2.3 Propriedades do PVC

O PVC é um termoplástico bastante utilizado também por causa de sua diversidade em propriedades apresentadas, tais como, propriedades mecânicas e físicas, resistência à abrasão, alta compatibilidade com aditivos, retardância de chamas e baixo custo, sendo largamente utilizado em aplicações de longo ciclo de vida. Entretanto, devido às suas inerentes limitações, tais como baixa estabilidade

térmica, baixa resistência à fratura e produção de fumaça escura durante sua combustão, o PVC e seus compósitos estão sujeitos a algumas limitações em certas aplicações (WANG et al., 2003).

Segundo Akovali (2012), existem dois tipos principais de resinas de PVC que são produzidas e processadas: as resinas de PVC rígido (PVC não modificado) e as resinas de PVC flexível. As primeiras possuem resistência e dureza considerável, alta resistência química e são processadas, principalmente, por extrusão ou moldagem, usadas na confecção de tubos e condutores, conexões, perfis de janelas, telhas, cercas e várias peças automotivas rígidas. Já as outras resinas contêm vários aditivos, principalmente, os do tipo plastificantes, para tornar o PVC macio, flexível e estável ao calor e a radiação. A IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*, ou União Internacional de Química Pura e Aplicada) define os plastificantes como “substâncias incorporadas a plásticos ou elastômeros com a finalidade de aumentar sua flexibilidade, processabilidade ou capacidade de alongamento”. Para fins práticos, pode-se definir os plastificantes como toda e qualquer substância que, incorporada ao PVC, reduz sua dureza e aumenta sua flexibilidade.

O PVC é o único plástico de uso geral que permite o ajuste amplo das propriedades físicas (IBEH, 2011). As propriedades do PVC podem ser modificadas de acordo com a sua aplicação final. O PVC pode ser opaco ou transparente, brilhante ou fosco, colorido ou não. Estas características são obtidas com a utilização de plastificantes, estabilizantes térmicos, pigmentos, entre outros aditivos, usados na formulação do PVC. Depois de formulado, obtêm-se os compostos de PVC que são utilizados na fabricação de uma série de produtos (INSTITUTO DO PVC, 2013).

Devido à presença de átomos de cloro, o PVC inicia seu processo de degradação em temperaturas próximas a 100 °C, sendo degradado na faixa de temperatura de processamento, entre 140 e 220 °C (RODOLFO JUNIOR; MEI, 2007). A exposição do PVC ao calor, dependendo do tempo e da temperatura, provoca o início do processo de desidrocloração que cria sequências de polienos conjugados. Essas estruturas conferem coloração indesejada ao polímero sempre que o número de duplas ligações conjugadas é suficientemente grande (PAOLI, 2008). De acordo com a análise termogravimétrica, presume-se que a degradação do PVC ocorre na faixa de temperatura 200 e 400 °C (ZEVENHOVEN et al., 2002). As ligações C-Cl na estrutura de PVC têm uma energia relativamente mais baixa do que as ligações C-C e C-H, o que justifica que as ligações de cloro são as primeiras a serem quebradas,

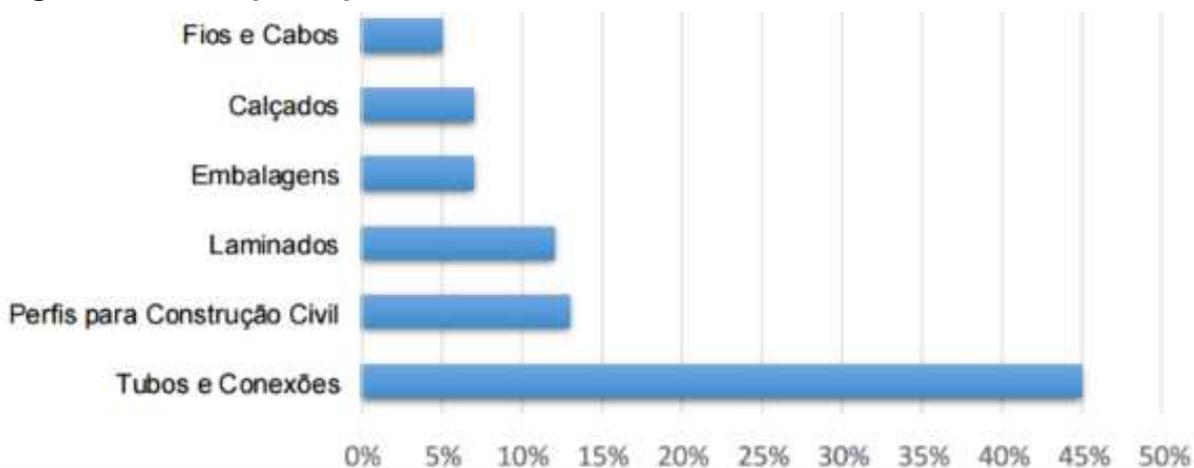
iniciando, assim, a degradação térmica de PVC (QING-LEI et al., 2007).

O PVC mostra excelente relação custo-benefício quando comparado com materiais como a madeira, metais e cerâmicas, além de apresentar vantagens em quesitos como comportamento anti-chama, resistência química e ao intemperismo, isolamento térmico, facilidade de instalação, baixa necessidade de manutenção e excelente acabamento. É quimicamente inerte: não é afetado por ácidos, bases, soluções aquosas e mesmo fortes agentes oxidantes têm fraca ação sobre o material (INSTITUTO DO PVC, 2013).

O policloreto de vinila é um material sólido, porém leve, apresentando uma densidade de  $1,4 \text{ g/cm}^3$ , além de ter alta resistência à ação de fungos, bactérias, insetos e roedores; também resiste a choques e quedas, não causando grandes deformações. Por ser um material leve, é aplicado em materiais de construção civil, utensílios domésticos, produtos médico-hospitalares. Por ser um bom isolante térmico, acústico e elétrico (propriedades dielétricas), é muitas vezes utilizado em caixas d'água, embalagens e eletrodutos (conduítes) (BEGALLI; GABRIELLA, 2012).

As principais aplicações do PVC estão indicadas na figura 4.

**Figura 4 – Principais aplicações do PVC**



Fonte: Rodolfo Junior; Nunes; Ormanji, 2006.

#### 2.2.4 Reciclagem do PVC

A NBR 13230 (ABNT, 2008) apresenta uma simbologia indicativa para identificação dos materiais plásticos para facilitar a seleção dos recipientes e embalagens plásticas em geral. O símbolo que identifica o PVC é apresentado na figura 5.

**Figura 5 – Simbologia do PVC**



Fonte: NBR 13230 (ABNT, 2008).

Embora os produtos de PVC tenham uma longa vida útil e um certo intervalo de tempo entre o consumo e sua acumulação, em determinado momento acabará se tornando um resíduo. Um caminho simples para a eliminação dos resíduos de PVC é a recuperação de energia ou do conteúdo material (KEANE, 2007).

Sadat-Shojai e Bakhshandeh (2010) apresentam os métodos de reciclagem existentes de pós-uso do PVC, em que pode-se citar: aterros, incineração, reciclagem química e mecânica.

Os aterros possuem alta produção de poluição, com alto custo de implantação e manutenção e nenhuma aceitação nos países, principalmente os desenvolvidos, embora esse método tenha grande disseminação (SADAT-SHOJAI; BAKHSHANDEH, 2010).

A incineração consiste na transformação do produto descartado reciclado em energia. Também segue a alta produção de poluição e não tem aceitação em diversos países (SADAT-SHOJAI; BAKHSHANDEH, 2010). Braun (2002) ainda afirma que há grande contestação dos ambientalistas quanto a esse método, devido às emissões tóxicas de uso inadequado de equipamento e condições inapropriadas. A incineração está associada a alguns problemas tecnológicos devido ao alto teor de cloro presente no polímero, o que faz com que grandes quantidades de cloreto de hidrogênio (HCl) seja libertado na atmosfera, além da possibilidade de formação de dioxinas tóxicas. Assim, a expansão desta solução implica um grande investimento nas instalações de incineração.

Em relação à reciclagem química, com pequena aceitação e alto custo, em que o material é convertido em matéria prima por processos químicos. Consiste na queda

molecular por aquecimento, transformando o material em óleos e gases. Esse processo tem baixa aceitação nos países, embora possui baixa produção de poluição (SADAT-SHOJAI; BAKHSHANDEH, 2010).

Por fim, tem-se a reciclagem mecânica, mais indicada quando há certa homogeneidade no material. Esse método consiste na conversão dos resíduos em grânulos, que podem ser reutilizados na fabricação de novos produtos. Consiste em cinco etapas: separação manual ou automatizada, moagem, lavagem, fusão e moldagem de novas peças. Esse processo possui baixa produção de poluição e tem grande aceitação a nível mundial. Essa pode ser considerada a reciclagem com mais pontos positivos devido a sua simplicidade, porém dependente de incentivo de programas de coleta seletiva na sociedade (SADAT-SHOJAI; BAKHSHANDEH, 2010).

## 2.3 PAVIMENTO INTERTRAVADO DE CONCRETO

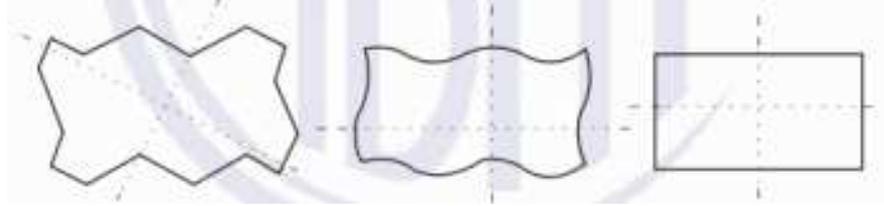
### 2.3.1 Definições e especificações

A NBR 9781 (ABNT, 2013) define pavimento intertravado como um pavimento flexível, composto por uma camada de base, seguida por uma de revestimento constituído de peças de concreto e uma de assentamento, cujas juntas entre as peças sejam preenchidas por material de rejuntamento. O intertravamento das peças é feito pela contenção.

De acordo com Moraes et al. (2013), o pavimento intertravado com peças pré-moldados de concreto (também chamados de pavers) é uma versão moderna e aperfeiçoada dos antigos calçamentos de paralelepípedos. Sua homogeneidade e formas bem definidas permitem o assentamento, de maneira que haja transferência de carga de um bloco aos outros, o que reduz as possibilidades de deformações.

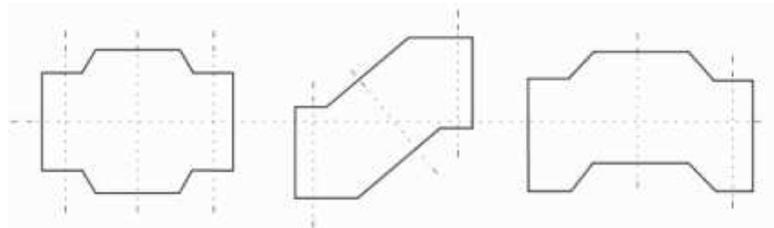
Ainda segundo a NBR 9781 (ABNT, 2013), as peças podem ser moldadas em diversas formas e são agrupadas em quatro grupos. O tipo I compreende formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois; tipo II, com formato único, diferente do retangular; tipo III, com formatos tipo trapézios, hexágonos, triédos, entre outros e tipo IV, de diferentes tamanhos ou com uma única peça com uma junta. Nas figuras 6, 7, 8 e 9, seguem as representações dos formatos descritos.

**Figura 6 – Exemplos de peça de concreto tipo I**



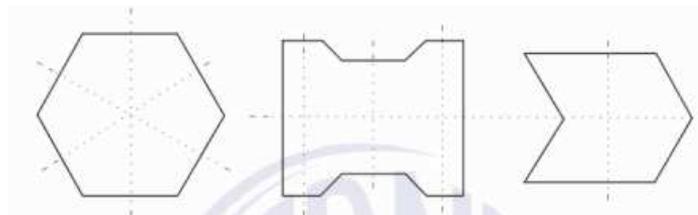
Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

**Figura 7 – Exemplos de peça de concreto tipo II**

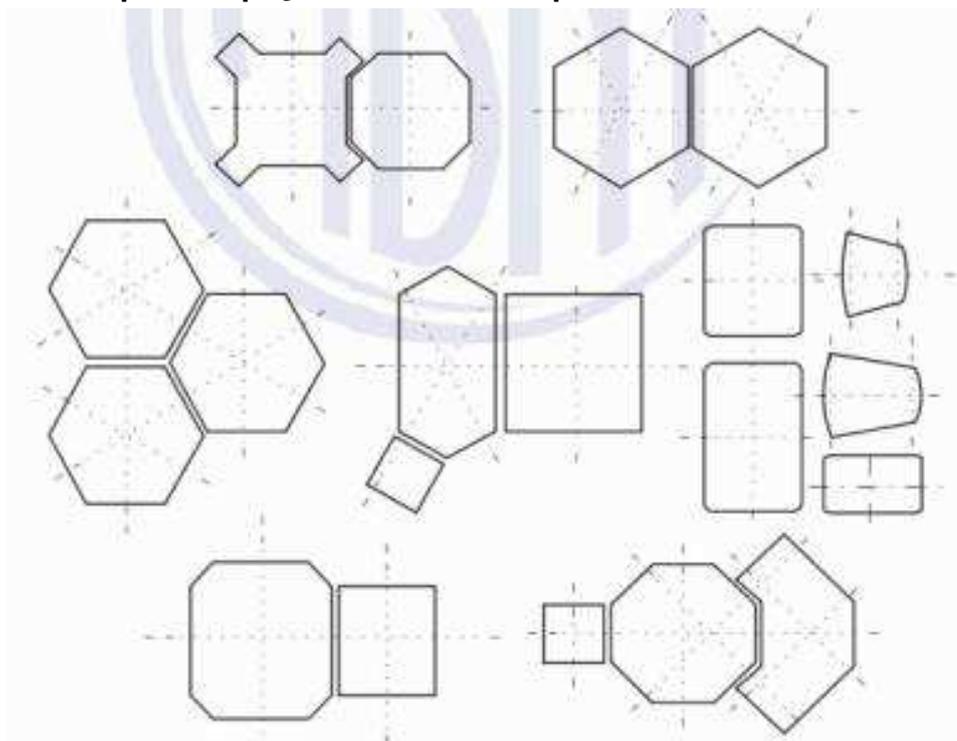


Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

**Figura 8 – Exemplos de peça de concreto tipo III**



Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

**Figura 9 – Exemplos de peças de concreto tipo IV**

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

A mesma norma regulamenta as características das peças e fixa as condições exigidas para aceitação e execução do pavimento. Em relação às dimensões, indica 250 mm para comprimento máximo (maior distância entre as duas faces paralelas e perpendiculares ao topo), 97 mm para a largura (menor distância entre as duas faces paralelas e perpendiculares ao topo) e por fim, espessura mínima de 60mm (distância entre os dois planos paralelos que contém o topo e base). Em relação à resistência característica à compressão, a norma divide em duas categorias, conforme apresentado no quadro 1.

**Quadro 1 – Resistência à compressão aos 28 dias**

<b>Utilização</b>	<b>Resistência característica à compressão aos 28 dias (MPa)</b>
<b>Tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha</b>	≥ 35
<b>Tráfego de veículos especiais e solicitações que produzem efeitos de abrasão</b>	≥ 50

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

O ensaio de resistência à compressão da norma brasileira exige que seja utilizada a peça no formato de paver. Já a norma americana utiliza corpo de prova cilíndrico e uma resistência mínima de 55 MPa. Comparadas as normas internacionais de países como Austrália e África do Sul, os quais se encontram em regiões de condições climáticas semelhantes ao Brasil, se comparado aos países de clima temperado e levando-se em conta a experiência desses países com a pavimentação intertravada, seria interessante aceitar recomendações semelhantes às utilizadas nesses países. Nas normas da Austrália e da África do Sul, a resistência característica à compressão exigida é de 25 MPa para tráfego leve e 35 MPa para os demais tipos de tráfego. Já para calçadas, praças e ciclovias os valores de 15 MPa já são considerados valores suficientes para a solicitação (BITTENCOURT, 2012).

Outra exigência da norma brasileira é quanto à absorção de água. A amostra das peças não deve ter valor médio de absorção de água superior a 6%, sendo que não é aceitável que algum valor ultrapassa os 7%.

Em relação ao transporte e recebimento das peças, segundo a NBR 15953 (ABNT, 2011), devem ser paletizadas ou cubadas e cintadas. A avaliação dimensional e visual devem seguir as especificações apresentadas na NBR 9781 (ABNT, 2013). O empilhamento das peças deve ser de, no máximo, 1,5 m de altura que garanta estabilidade na pilha.

Segundo Purificação (2009), a fabricação de peças intertravadas é feita por máquinas tipo vibroprensa que são comercializadas manuais, pneumáticas e hidráulicas; estas variam de tamanho, especificação do motor e o tipo de alimentação, quantidade de moldes por matriz, entre outros aspectos. A vibração é responsável pelo preenchimento e adensamento da mistura nos moldes, já a compressão influencia no adensamento e no controle da altura das peças (FERNANDES, 2013). Estes mesmos equipamentos também podem fabricar blocos de concreto de vedação, blocos de concreto estrutural, meio fio e outras peças menos convencionais. Na fabricação manual, o que vai resultar na capacidade produtiva é a quantidade de peças, a capacidade da mão de obra e qualidade da matéria prima. O concreto de consistência seca é lançado de forma manual e a prensa faz a acomodação do concreto nos moldes da matriz. São mais simples, geralmente as máquinas possuem um motor elétrico e o sistema de prensagem é manual. É indicada para pequenos construtores ou para iniciantes no ramo da fabricação de blocos e pavers. A falta de energia de prensagem demanda um maior consumo de cimento que praticamente

inviabilizaria a obtenção de blocos de categoria estrutural (FERNANDES, 2013). Já na fabricação, utilizando a prensa pneumática e principalmente na hidráulica, o abastecimento do concreto com consistência um pouco mais seca do que no processo manual, pode ser realizado por alimentadores ou manual, a prensagem e vibração é feita periodicamente para manter a qualidade e quantidade do produto produzido. As mais eficientes e econômicas, produzindo uma peça de maior qualidade com um consumo menor de cimento são as hidráulicas. Os sistemas hidráulicos empregam bomba e pistões a óleo com uma prensagem, com vibração sincronizada, que gera peças com uma ótima compactação. Essas máquinas permitem ao operador um maior controle dos tempos de alimentação, prensagem, acomodação e extrusão das peças, garantindo mais uniformidade e consequente qualidade ao processo (FERNANDES, 2013).

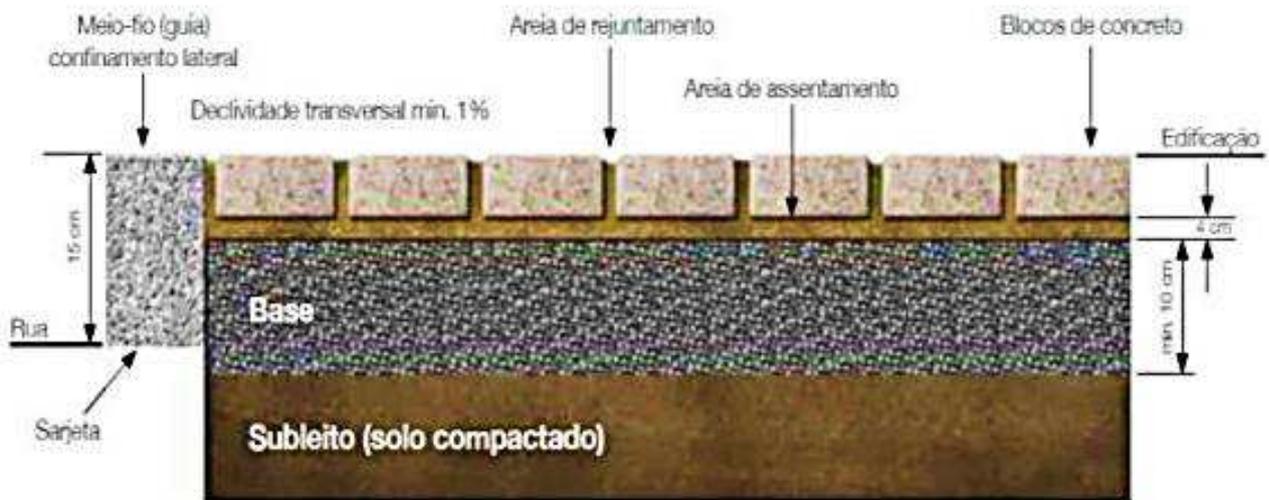
As peças também podem ser descritas conforme seu método de fabricação. Gregorio (2012) divide em três categorias:

- Paver prensado: fabricado através de um sistema de vibrocompressão, feito através de vibroprensas, que proporcionam elevada compactação às peças, aumentando sua resistência mecânica e durabilidade. É garantido uma melhor superfície, esteticamente, maior produtividade, além de grande precisão dimensional das peças, visto que as vibroprensas são dotadas de moldes metálicos; requer altos investimentos iniciais por causa do maquinário;
- Paver dormido ou em descanso: ficam nos moldes de um dia para o outro (daí o nome “dormido” ou “em descanso”). Este processo permite a produção de peças em duas camadas: uma camada fina com menor quantidade de agregado graúdo para obtenção de um melhor acabamento, seguida de uma camada grossa, com maior quantidade de agregado graúdo. As suas desvantagens são a baixa produtividade devido a grande necessidade de moldes e uma base bem executada;
- Paver batido ou virado: para sua produção é suficiente um jogo de quatro a oito formas metálicas, uma betoneira para misturar o concreto e uma mesa vibratória destinada a adensar a mistura (opcional). As formas são cheias, e as peças são imediatamente desformadas, virando o molde de cabeça para baixo sobre uma superfície nivelada e untada com óleo ou coberta com plástico ou ainda com areia a fim de evitar a aderência na base. O método também permite a confecção das peças em duas camadas, uma fina e outra mais grossa, fazendo com que o consumo de cimento seja reduzido nesta última. Outro ponto positivo do método é o fato de,

necessariamente, o sistema irá trabalhar na umidade ótima, visto que, se a mistura ficar seca, esfarela, e, se ficar mole, deforma. Um ponto fraco desse processo produtivo é a produtividade, muito pequena em relação ao processo prensado.

A Figura 10 apresenta a estrutura típica de um pavimento intertravado.

**Figura 10 – Estrutura típica de um pavimento intertravado**



Fonte: ABCP, 2010.

### 2.3.2 Materiais constituintes das peças de concreto

#### 2.3.2.1 Cimento

Um dos materiais mais utilizados do mundo, o cimento está presente em todo tipo de construção, desde a mais simples até uma complexa obra de infraestrutura. Por definição, é um aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea de clínquer Portland, gesso e adições normalizadas (LAUDONIO, 2013).

A origem do cimento Portland foi em 1824, por Joseph Aspdin e nomeada dessa forma por apresentar cor e propriedade de durabilidade e solidez semelhantes às rochas calcárias da ilha britânica de Portland (LAUDONIO, 2013).

O Brasil está muito avançado na parte de cimento e fabricação de concreto, devido o material já vir com as adições necessárias (TARTUCE, 2014). Segundo Carvalho (2016), o Brasil apresenta 97 fábricas associadas à produção de cimento, um dos países com maior concorrência nesse setor. A capacidade instalada em 2015

foi de 93 milhões de toneladas de cimento ao ano, com estimativa de se chegar a 129 milhões de toneladas em 2020.

Sua classificação está dividida em 5 grupos. Cada cimento apresenta diferentes proporções de clínquer e sulfatos de cálcio, material carbonático e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, segundo o quadro 2 (ABCP, 2002).

**Quadro 2 – Tipos e constituições dos cimentos Portland**

Tipo de cimento Portland	Sigla	Constituição				Norma ABNT – NBR
		Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Mat. Carbonáceo	
Comum	CP I	100%	-	0		5732
	CPI – S	95 a 100%	-	1 a 5%		
Composto	CP II – E	56 a 94%	3 a 4%	0%	0 a 10%	11578
	CP II – Z	76 a 94%	0%	6 a 14%	0 a 10%	
	CP II – F	90 a 94%	0%	0%	6 a 10%	
Alto forno	CP III	25 a 65%	35 a 70%	0%	0 a 5%	5735
Pozolânico	CP IV	50 A 85%	0%	15 a 50%	0 a 5%	5736
Alta resistência inicial	CP V – ARI	95 a 100%	0%	0%	0 a 5%	5733

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, 2002.

Laudonio (2013) ainda caracteriza cada tipo de cimento:

- CP I - Cimento Portland Comum: utilizando em construções quando não há substâncias químicas agressivas presente no solo ou águas subterrâneas. A única adição presente é o gesso, que atua como retardador evitando a reação imediata da hidratação;
- CP I S - Cimento Portland Comum com Adição: tem a mesma composição de CP I, porém com adição reduzida de material pozolânico (de 1 a 5% de massa), tem menor permeabilidade e é recomendado para construções em geral;
- CP II Z - Cimento Portland Composto com material pozolânico: utilizado em obras civis em geral, sejam elas subterrâneas, marítimas ou industriais. Pode ser utilizado para produção de argamassas, concreto simples, armando e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento;

- CP II E - Cimento Portland Composto por Escória Granulada de Alto Forno: possui composição intermediária entre cimento comum e cimento com adições (alto forno e pozolânico). A escória granulada evita que a estrutura de concreto fissure devido à alta temperatura de reação;
- CP II F - Cimento Portland Composto com Fíler: Utilizado para aplicações gerais, para argamassas, concretos, pisos, pavimentos de concreto, entre outros;
- CP III - Cimento Portland de Alto Forno com Escória: utilizado em obras de barragens, peças de grandes dimensões, fundações de máquinas, pilares, obras em ambientes agressivos, tubos, esgotos e efluentes industriais. Possui maior impermeabilidade e durabilidade e proporciona maior resistência química;
- CP IV - Cimento Portland Pozolânico: Recomendado em obras correntes, sob a forma de argamassa, concreto simples, armado e protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento. Indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. Possui baixo calor de hidratação;
- CP V - ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial: usado quando há necessidade de se adquirir resistência com rapidez. Utilizado em produção de artefatos de cimento, argamassa, fábricas de blocos para alvenaria, peças de pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, entre outros.

Laudonio (2013) ainda cita o Cimento Portland Resistência a Sulfatos (CP – RS), Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) e Cimento Portland Branco (CPB).

No geral, todos os tipos de cimento Portland são adequados, em sua maioria, a todos os tipos de estruturas. Entretanto, deve-se analisar qual tipo de cimento é mais vantajoso para determinada aplicação (BATAGIN; RODRIGUES, 2014).

Os pavers são peças produzidas com concreto seco e possuem uma demanda de rápida liberação no mercado para aplicação e que não exija um grande espaço para armazenamento. Sendo assim, a correta escolha dos insumos que irão compor as peças reflete diretamente na qualidade das mesmas e até mesmo na qualidade do sistema de pavimentação como um todo. Os cimentos mais utilizados no mercado para a produção dessas peças são os tipos II e V - ARI (Alta Resistência Inicial). Para Fernandes (2013), os cimentos mais indicados para fabricação de peças de pavimento intertravado são o CP V ARI e os cimentos de classe 40 MPa. Esses tipos de cimento proporcionam maiores resistências necessárias às peças logo nos primeiros dias de

idade do concreto, visto que as mesmas, normalmente, exigem desforma e aplicações rápidas.

### 2.3.2.2 Agregados

Os agregados são os insumos essenciais para a infraestrutura urbana e industrial. Isto é, sustentam obras de setores como saneamento, transporte, energia, segurança pública, educação e habitação. São recursos abundantes na natureza, produzidos e consumidos em grandes quantidades (VIEGAS; SAKAMOTO, 2014). A classificação mais comum é a conforme Petrucci (2005) que divide os agregados segundo seu tamanho, em agregados miúdos e agregados graúdos, devido ao seu comportamento diferenciado.

Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), agregado graúdo é o material que passa pela peneira com abertura de malha de 75mm e fica retido na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, sendo o material retido aquele com até 15% de grãos na peneira especificado. Já o agregado miúdo é o material que passa pela peneira com abertura de malha de 4,75mm e fica retido na peneira com abertura de malha 150mm. Entende-se como material passante aquele que contem até 15% de grãos retiros na peneira especificada (areias). Selmo (1989) classifica as areias quanto ao módulo de finura em três classes: fina, média e grossa. Areia fina é aquela que possui módulo de finura inferior a 2,0, areia média entre 2,0 e 3,0 e por fim, a areia grossa com módulo de finura superior a 3,0.

Gregorio (2012) aconselha um diâmetro máximo de agregado de 6,3 mm para pavers, de forma a garantir o bom acabamento superficial das peças. Quanto maior o teor de pedrisco, menor será o consumo de cimento para se obter uma mesma resistência. Sendo assim, pedriscos de diâmetro máximo superior a 9,5 mm estão limitados em percentual de uso na mistura para pisos intertravados em 20%; já os pedriscos mais finos permitem esse percentual aumentar para 30%. Gregorio (2012) ainda lembra que, normalmente, a proporção de agregados usados em blocos é de 25% a 50% de agregado graúdo e de 55% a 75% de miúdo. O teor de finos é importante, pois proporciona à mistura coesão, característica imprescindível às peças para resistir aos esforços da desforma imediata, do transporte até os locais de cura e aos de armazenamento final (FERNANDES, 2013). Além disso, quanto maior a quantidade de areia, melhor será o acabamento superficial das peças; entretanto,

paralelamente ao aumento do teor desse material, deve-se estar ciente que pode haver queda de resistência do sistema (GREGORIO, 2012).

### 2.3.2.3 Aditivos químicos

O emprego de aditivos é tão antigo quanto o próprio cimento. De acordo com Coutinho (1997), os romanos adicionavam clara de ovo, banha ou sangue a concretos para melhorar a trabalhabilidade das misturas das argamassas e concretos. Com a invenção do cimento Portland em 1824, os aditivos químicos foram aprimorados e tornaram-se mais específicos em sua funcionalidade.

A NBR 11768 (ABNT, 2011) afirma que aditivo químico é um produto que, adicionado durante a preparação do concreto, em pequena quantidade (até 5% da massa do material cimentício), modificam algumas propriedades. A norma classifica os aditivos em:

- aditivo plastificante (tipo P);
- aditivo retardador (tipo R);
- aditivo acelerador (tipo A);
- aditivo plastificante retardador (tipo PR);
- aditivo plastificante acelerador (tipo PA);
- aditivo incorporador de ar (tipo IA);
- aditivo superplastificante (tipo SP);
- aditivo superplastificante retardador (tipo SPR);
- aditivo superplastificante acelerador (tipo SPA).

Ainda segundo a norma, aditivo plastificante é aquele aditivo que, sem modificar a consistência do concreto no estado fresco, permite reduzir seu conteúdo de água ou aquele que, sem alterar a quantidade de água, modifica a consistência do concreto/argamassa, aumentando a fluidez ou ainda como aquele aditivo que produz esse efeito simultaneamente. Hartmann et al. (2010) ainda complementa afirmando que são utilizados para se reduzir a quantidade de cimento, mantendo a consistência e resistência a compressão com o objetivo de reduzir custos, retração e tensões térmicas. O aditivo plastificante é um elemento constituinte das peças de concreto dessa pesquisa.

### 2.3.3 Dosagem e cura do concreto

A dosagem do concreto é o processo que busca a melhor proporção entre cimento, agregados, água e aditivos para se atingir as prévias especificações exigidas por uma estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Existem diversos métodos de dosagem para o concreto, cuja utilização varia regionalmente, dependendo das condições técnicas, materiais, conhecimento das técnicas e norma vigentes. Dentre as principais, pode-se citar Método de Abrams, ABCP e IPT.

O método de Abrams surgiu a partir de estudo realizado por Abrams, em 1919, enquanto analisava a relação entre a quantidade de água da mistura, trabalhabilidade, granulometria e especificações dos agregados e outros aspectos (BOGGIO, 2000). A principal característica desse método foi estabelecer uma relação das propriedades dos agregados com o fator água/cimento e resistência do concreto (HELENE; TERZIAN, 1993). Além disso, contribuiu para a utilização de um ensaio: o de abatimento. Esse ensaio é utilizado para medir a trabalhabilidade do concreto fresco e é utilizado até hoje.

O método da ABCP foi publicado pelo Comitê 211 do *American Concrete Institute* (ACI), levando em consideração os fatores de trabalhabilidade e resistência (HELENE; TERZIAN, 1993). Depois foi adaptado ao Brasil pela Associação Brasileira de Cimento Portland e passou a ser chamado de ABCP. Esse método exige que ensaios preliminares sejam feitos, para que sejam definidos maiores detalhes do tamanho de agregado, quantidade de água e fator água/cimento.

Tem-se também o método do IPT/EPUSP, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e pela Escola Politécnica da USP. O método consiste na construção de um diagrama de dosagem, para um determinado conjunto de materiais, podendo definir o comportamento do concreto, sendo previamente definidos a resistência à compressão, fator água/cimento, relação agregados secos/cimento e consumo de cimento por metro cúbico (2000 apud OLIVEIRA, 2012).

Contudo, o concreto utilizado na produção das peças para pavimento intertravado possui várias particularidades que o difere, em muito, do concreto plástico de uso consagrado na construção civil (HOOD, 2006). A consistência do concreto utilizada para a produção de peças é seca e levemente umedecida, sendo assim existe a necessidade da utilização de máquinas que conferem compacidade à mistura

para a retirada do ar aprisionado. Pelo fato do concreto para pavers não estar de acordo com a premissa básica dos métodos de dosagem existentes, as características obtidas (consumo de cimento, consistência e resistência) diferem muito das características calculadas pelos mesmos. Ao contrário dos concretos plásticos, que seguem a Lei de Abrams em que a resistência do concreto é associada ao fator água/cimento, no concreto seco isto não se aplica. Quanto mais água for colocada, maior será a resistência alcançada, respeitando um limite máximo. Isto ocorre devido ao fato de quanto mais água é adicionada melhora consideravelmente a trabalhabilidade da mistura, diminuindo o atrito entre os grãos (OLIVEIRA, 2004). Segundo Buttler (2007), a umidade alcançada na produção das unidades deve ser a maior possível (6% a 8%). Husken e Brouwers (2008) em seus estudos caracteriza os concretos secos pelo alto consumo de cimento, na faixa de 350 a 400 Kg/m<sup>3</sup>.

Abreu (2002 apud OLIVEIRA, 2012) relata que a dosagem dos concretos secos é geralmente executada pelo método do Menor Volume de Vazios. Esse método consiste em encontrar a melhor proporção entre os agregados de forma que seja possível 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

A resistência do concreto também está associada à capacidade de compactação do equipamento e ao teor de umidade da mistura, e também da distribuição granulométrica dos agregados. Já a durabilidade está relacionada com a capacidade do concreto em resistir à ação da água e a ataques químicos.

Segundo Marchioni (2012), a água de amassamento tem importância fundamental na resistência do concreto seco, não deve conter matérias orgânicas e teores excessivos de substâncias inorgânicas, sendo recomendado basicamente a utilização de água potável.

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

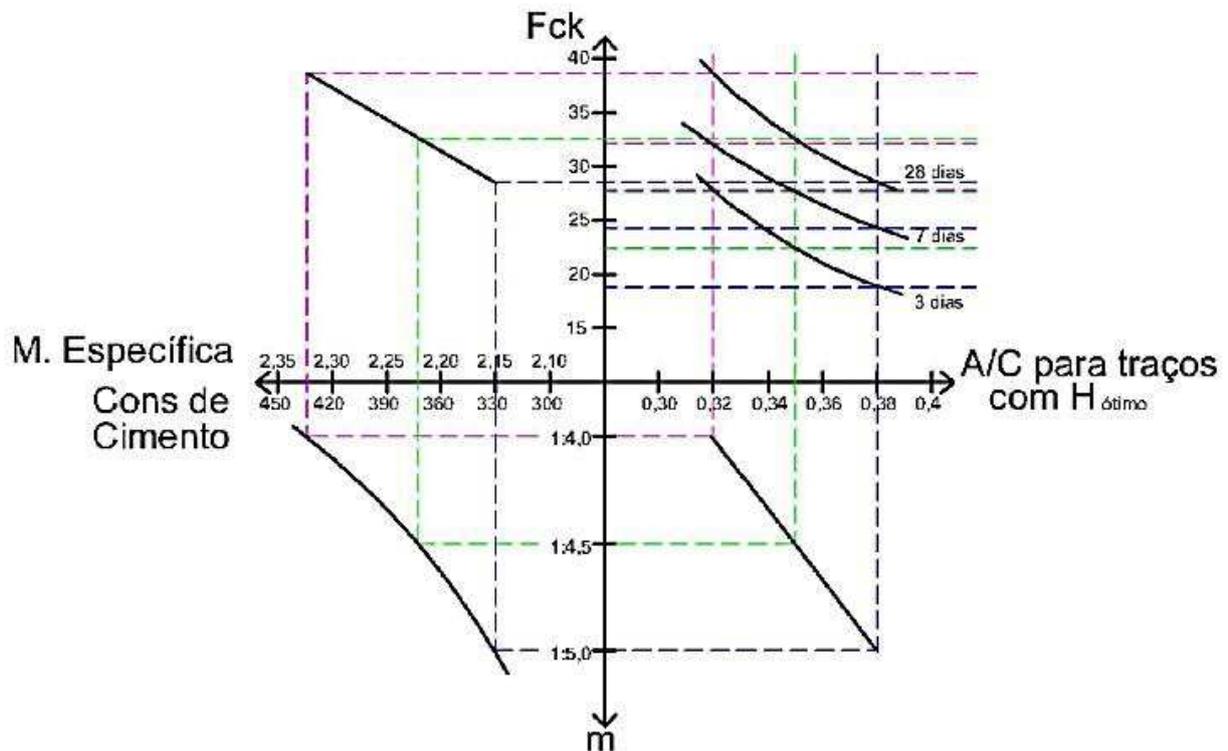
Em relação à trabalhabilidade, como não há especificação definida para

concreto seco, um teste muito utilizado é o Método do Ponto da Pelota, difundido Hood (2006). Esse método tem como objetivo definir o ponto ideal da mistura, verificando a quantidade ideal de água, já que o *Slump Test* (ou ensaio de abatimento de cone, que tem como objetivo medir a fluidez/trabalhabilidade) é igual a zero para esse tipo de concreto. O método consiste em se colocar uma quantidade da massa já misturada nas mãos secas. Se o material adquirir boa consistência, sem deixar resíduos na mão, pode-se considerar o ponto ideal. Se o concreto soltar nas mãos, é necessário corrigir o fator de água/cimento.

A cura de peças de concreto para pavimentos intertravados existe para proporcionar condições adequadas de umidade e temperatura para a perfeita hidratação do cimento e o desenvolvimento da resistência do concreto. 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 aspersão, e a cura ao ar em ambiente coberto. Fernandes (2013) explica que a cura por imersão mantém as peças de concreto submersas em água, idealmente saturada com cal para simular o ambiente alcalino do concreto, já úmida se caracteriza pela contínua aspersão da superfície exposta do concreto em intervalos frequentes e a ao ar por recobrimento é mais utilizado em obras, caracteriza-se pela proteção do concreto com recobrimento para evitar a ação direta do sol e do vento. Os melhores resultados do estudo de Mota (2014) foram os de cura por imersão; em seguida o método de aspersão e por fim, cura ao ar. Fernandes (2013) sugere que 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.

Um método de dosagem e traço muito citado atualmente pela literatura, em geral, é o traço de Amadei (2011). A autora estudou diferentes traços, variando o teor de agregado/cimento e fator de água/cimento, fixando a umidade e com objetivo de alcançar resistências superiores a 35 MPa, valor mínimo exigido por norma. A partir desse estudo, ela criou um diagrama semelhante ao método IPT, de onde é possível estimar outros traços para uma necessidade específica, como a resistência à compressão. O diagrama é apresentado na figura 11.

Figura 11 – Diagrama de dosagem do concreto pelo método de Amadei



Fonte: Amadei, 2011.

Pelo diagrama, verifica-se uma relação da resistência à compressão com a massa específica das peças de concreto. A massa específica é um parâmetro importante logo no início do processo de moldagem das peças, por auxiliar no controle da qualidade do concreto ainda fresco. Esse diagrama é considerado adaptado do IPT, pois fixa o fator água/cimento sem prever um abatimento variável, já que para esse tipo de concreto, o abatimento é sempre igual a zero, no teste de *Slump*.

#### 2.3.4 Vantagens e desvantagens do uso de peças de concreto para pavimento intertravado

A utilização de pavimentos intertravados pode trazer grandes vantagens. O pavimento não requer equipamentos sofisticados e mão-de-obra especializada na execução. Sua coloração clara também é positiva, pois pode reduzir a absorção de calor na superfície do pavimento, diminuindo as ilhas de calor formadas nos centros urbanos. O tráfego local pode ser liberado logo após a instalação, não há necessidade de cura das peças já prontas para receber solicitações.

Uma outra grande vantagem é a facilidade de manutenção. A peça defeituosa ou com desgaste pode ser retirada e uma nova relocada no mesmo momento (ABCP, n.d). A superfície do pavimento é ainda considerada antiderrapante, podendo diminuir a distância de frenagem de veículos em até 20% se comparada a um pavimento flexível comum, segundo estudos realizados na cidade de Ichihara, no Japão (ICPI, 2015).

Como desvantagem, pode-se citar a necessidade de ser bem dimensionado e exigir uma base bem feita, por isso pode sair mais caro. E se esses cuidados não forem tomados, o pavimento se deforma com mais facilidade que o asfáltico, principalmente se houver tráfego de caminhões pesados (RICCI, 201-).

Pode-se citar também que os pavers necessitam de uma resistência à compressão alta e ao mesmo tempo, uma boa taxa de permeabilidade. Para se elevar essa taxa, é necessário, muitas vezes, aumentar a espessura das juntas, aumentando assim o efeito de trepidação dos veículos. Segundo Nabeshima, Orsolin e dos Santos (2011), outro fator que impede a popularização do pavimento intertravado de concreto, e talvez o maior responsável, é a falta de padronização com relação à qualidade das peças encontradas no mercado. Apenas 44 indústrias de artefatos em concreto produzem pavers de acordo com as recomendações normativas, em pelo menos uma das resistências exigidas pelas normas, ou seja, possuem o Selo de Qualidade da ABCP, sendo 20 na região Sul. Os autores também observaram que muitas empresas ofertam e comercializam pavers com até 20 MPa para tráfego leve, muito abaixo do recomendado por norma.

### **2.3.5 Estudos de peças de concreto com materiais reciclados**

Muitos estudos tem sido desenvolvidos no Brasil e no exterior com o objetivo de estudar peças de concreto com materiais reciclados.

Vieira (2014) desenvolveu peças com a adição de um compósito de fibras de pneu no traço. O concreto com fibra 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, porém foi considerado viável para praças, calçadas, entre outros.

Guerra (2014) adicionou rejeito de minério de pellet feed, proveniente da indústria mineradora, na produção das peças. Com 5% do material, quando

comparado ao concreto de referência, houve acréscimo de 6,6% de resistência característica à compressão. Já Costa, Gumiere e Brandão (2014) empregaram o rejeito de sinter feed como agregado miúdo, proveniente do mesmo setor de indústria, e houve queda de até 80% no desgaste à abrasão quando comparado ao de referência, concluindo que o seu aproveitamento também é adequado.

Santos (2014) avaliou a influência de resíduos da construção civil nos 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% de agregado natural, houve uma melhora na resistência axial, concluindo, assim, uma viabilidade no uso desses resíduos.

Carvalho (2013) utilizou resíduo de retífica de placas cerâmicas de revestimento em peças para pavimento intertravado, substituindo a dosagem parcial da areia e do cimento nas porcentagens de 5% a 30% na massa. Os resultados atenderam aos requisitos da norma brasileira, além de ter um ganho de resistência à compressão a medida que aumentava a porcentagem de substituição.

Purificação (2009), diferente dos demais, além de agregados reciclados, substituiu cimento por resíduo de polimento de porcelanato. No valor de 20% de substituição, atingiu a resistência mínima exigida pela NBR 9781 (2013).

Amaral et al. (2013) avaliaram o desempenho de peças intertravados de concreto, utilizando areia de fundição em substituição parcial à areia fina. Essa pesquisa apresentou resultados 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 elaborado com agregados naturais.

Já Silva (2014) utilizou borracha de pneus em concreto para piso intertravado substituindo o agregado miúdo natural. Ele observou que embora as resistências à compressão e a tração na flexão tenderam a diminuição, todos os traços estudados atenderam a norma. A borracha melhorou significativamente a resistência à abrasão no concreto e diminuiu a densidade. De forma geral, a utilização do resíduo foi considerada satisfatória.

Ferreira et al. (2016) utilizaram resíduos do descarte de postes de concreto na confecção de peças de concreto também para pavimento. Pelos resultados experimentais, concluíram que na substituição parcial, em massa, de areia ou de pedrisco por resíduos as porcentagens ideais seriam de 30% e 20%, respectivamente, para que estivessem nos limites impostos pela norma.

Chidiac e Mihaljevic (2011) produziram peças de concreto com até 25% do cimento substituído com pó de vidro de resíduos (WGP) ou até 15% da areia substituído com polímeros: polietileno de alta densidade (HDPE), ou polietileno de baixa densidade (PEBD). Com base em análise estatística, as peças com 10% de substituição do cimento com o pó de vidro se comportaram de forma semelhante às peças padrão. As propriedades de blocos eram sensíveis ao uso de qualquer tipo de polietileno, o que resultou numa diminuição da força e um aumento na absorção de água.

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. Embora tenha havido diminuição da resistência à compressão, também houve diminuição na densidade do concreto endurecido, sendo um ponto positivo. Os autores consideraram o uso viável e como boa alternativa para resolver problemas de destinação dos resíduos. Pires e Paschoalini Filho (2015) também consideravam viável a utilização de resíduo plástico, no caso, o PET. Eles observaram aumento na resistência à compressão e concluíram que utilizando esse material, pode-se poupar da natureza um total de 608 kg de agregados naturais não renováveis por metro cúbico de concreto e reciclar até 72 kg de PET.

Outros autores também estudaram o concreto e resíduos plásticos e obtiveram resultados semelhantes. Kaci et al. (2012) estudou concreto leve na substituição de agregado natural por grânulos de PVC de tubos reciclados nas proporções de 30% e 50%. Os resultados mostraram que o concreto pode ser considerado leve com essa inclusão do PVC, porém a resistência teve uma grande queda. Shenhadji et al. (2015) também avaliaram PVC em concreto leve, mas nesse estudo, substituíram tanto agregado miúdo quanto graúdo. Observaram que o PVC reduziu a densidade do concreto, melhora na resistência à penetração de íons de cloreto e consideraram viável a utilização desse resíduo.

Kou et al. (2009) também investigaram propriedades de concreto no estado fresco e endurecido utilizando resíduos de plástico proveniente de tubos de PVC substituindo a areia em diversas porcentagens. Pode-se observar uma menor densidade, mais ductilidade do concreto, menor retração. Foram apresentados lados negativos, como menor trabalhabilidade, resistência à compressão. Os resultados recolhidos formariam uma parte de informações úteis para a reciclagem de resíduos de plástico PVC em misturas de concreto leve. Os autores consideraram grande

potencialidade na utilização de PVC em concreto não estrutural. Behl, Sharma e Kumar (2014) também utilizaram PVC, dessa vez voltado para concreto no asfaltamento de estradas e observaram melhora na resistência à deformação e à tração.

Soto e Ramalho (2014), após a realização do levantamento bibliográfico sobre resíduos e concreto, concluíram que são cada vez maiores as pesquisas que estudam materiais alternativos como um novo caminho para a sustentabilidade a nível mundial. Ainda assim, é escassa a integração do setor industrial com o setor acadêmico, constituindo o principal problema no Brasil. Para isso, é necessário a disposição por ambos, assim, as empresas e indústrias devem procurar as universidades para desenvolver novas tecnologias e por outra parte, a instituição universitária deve buscar mecanismos para garantir sua integração à sociedade.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, serão descritos o planejamento experimental, os materiais empregados, equipamentos e os procedimentos experimentais utilizados a fim de atingir os objetivos da pesquisa. Também será apresentada a dosagem do concreto, execução (moldagem) e ensaios efetuados das peças de concreto. Por fim, será apresentada a análise estatística dos dados que será utilizada com objetivo de validar os resultados obtidos.

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento da pesquisa é a primeira das três etapas da pesquisa: planejamento, execução e divulgação dos resultados. (CASTRO; CLARK, 2001).

A definição das variáveis estudadas no programa experimental foi realizada através da análise das características necessárias e exigências pelas Normas Brasileiras para o emprego de peças de concreto em pavimentos intertravados. Assim, 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;
- durabilidade por molhagem e secagem;
- análise da matriz cimentícia através de microscopia.

Após essas definições, foram escolhidos os fatores controláveis:

- porcentagens de substituição parcial do agregado miúdo por PVC de 0%, 5%, 10% e 15%, nomeados, respectivamente, como PVC0, PVC5, PVC10 e PVC15;
- idade de ensaio de resistência à compressão de 3, 7 e 28 dias;
- idade de ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica será de 28 dias;
- idade de ensaio durabilidade seguindo a norma específica.

As porcentagens de substituição do agregado miúdo foram escolhidas baseadas em trabalhos científicos que substituíram este agregado por agregado reciclado, como, por exemplo, o de Kou et al. (2009).

A idade dos corpos de prova dos ensaios foi escolhida de acordo com exigências das normas. Para o ensaio de resistência, foram escolhidas idades intermediárias, de 3 e 7 dias, baseado no fato de que peças de concreto para pavimento exigem uma desforma e aplicação rápida no mercado. Assim, decidiu-se avaliar em idades menores que 28 dias, que é a indicada em norma.

## 3.2 MATERIAIS

### 3.2.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Obras Especiais – Industrial, que atende a norma do CP V ARI, fabricado pela Votorantim Cimentos, ideal para pré-fabricados que exigem uma resistência elevada em idades iniciais para se diminuir o tempo de estocagem na fábrica. O quadro 3 mostra as características desse cimento.

**Quadro 3 – Características do Cimento Portland CP V - ARI - RS**

Finura		Tempo de pega (h)		Expansibilidade		Resistência a Compressão (MPa)			
Resíduo na peneira 75mm (%)	Área específica (m <sup>2</sup> /kg)	Início	Término	A frio (mm)	A quente (mm)	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
≤6	≥300	≥1	≤ 10	≤5	≤5	≥14	≥24	≥34	-

Fonte: Votorantim Cimentos, 2015.

O valor da massa específica do cimento CP V ARI é de 3,01 g/cm<sup>3</sup>, valor informado pelo fabricante.

### 3.2.2 Agregado miúdo

Inicialmente, foi realizada a caracterização de dois agregados miúdos que seriam viáveis para essa categoria de concreto. Foram feitos os ensaios para obter a composição granulométrica, módulo de finura, dimensão máxima característica e massa específica teórica. A finalidade da caracterização das areias é a comparação entre elas para se avaliar a sua proporção no concreto. Os agregados não tiveram nenhum tratamento prévio para utilização no concreto, apenas secagem em estufa.

Foram utilizados dois tipos de areia de cava. A areia 1 é proveniente de uma empresa de Guaramirim – SC e areia 2 de uma empresa de Araquari – SC.

### **3.2.3 Agregado graúdo**

O agregado graúdo consiste em pedrisco, obtido artificialmente por britagem, retirada de rochas da região nordeste do estado de Santa Catarina. O agregado não teve nenhum tratamento prévio para utilização no concreto.

### **3.2.4 Água**

A água utilizada foi obtida pela concessionária local de abastecimento, em temperatura ambiente. Sua quantidade foi estipulada de acordo com a quantidade definida no cálculo do traço do concreto.

### **3.2.5 PVC**

O PVC foi obtido a partir de eletroduto corrugado reforçado de uma empresa local (figura 12).

Esse material foi descartado de uma obra localizada em Guaramirim - SC. Esse material foi moído em um moinho de facas do Laboratório de Processamento de Polímeros da Universidade do Estado de Santa Catarina - Udesc em Joinville/SC.

**Figura 12 – Eletroduto de PVC**



Fonte: elaborada pela autora, 2015.

O moinho de facas é da marca SEIBT, conforme figura 13.

**Figura 13 – Moinho de facas**



Fonte: elaborada pela autora, 2015.

O aspecto visual do resíduo de PVC moído é apresentado na figura 14.

**Figura 14 – Eletroduto de PVC moído**

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

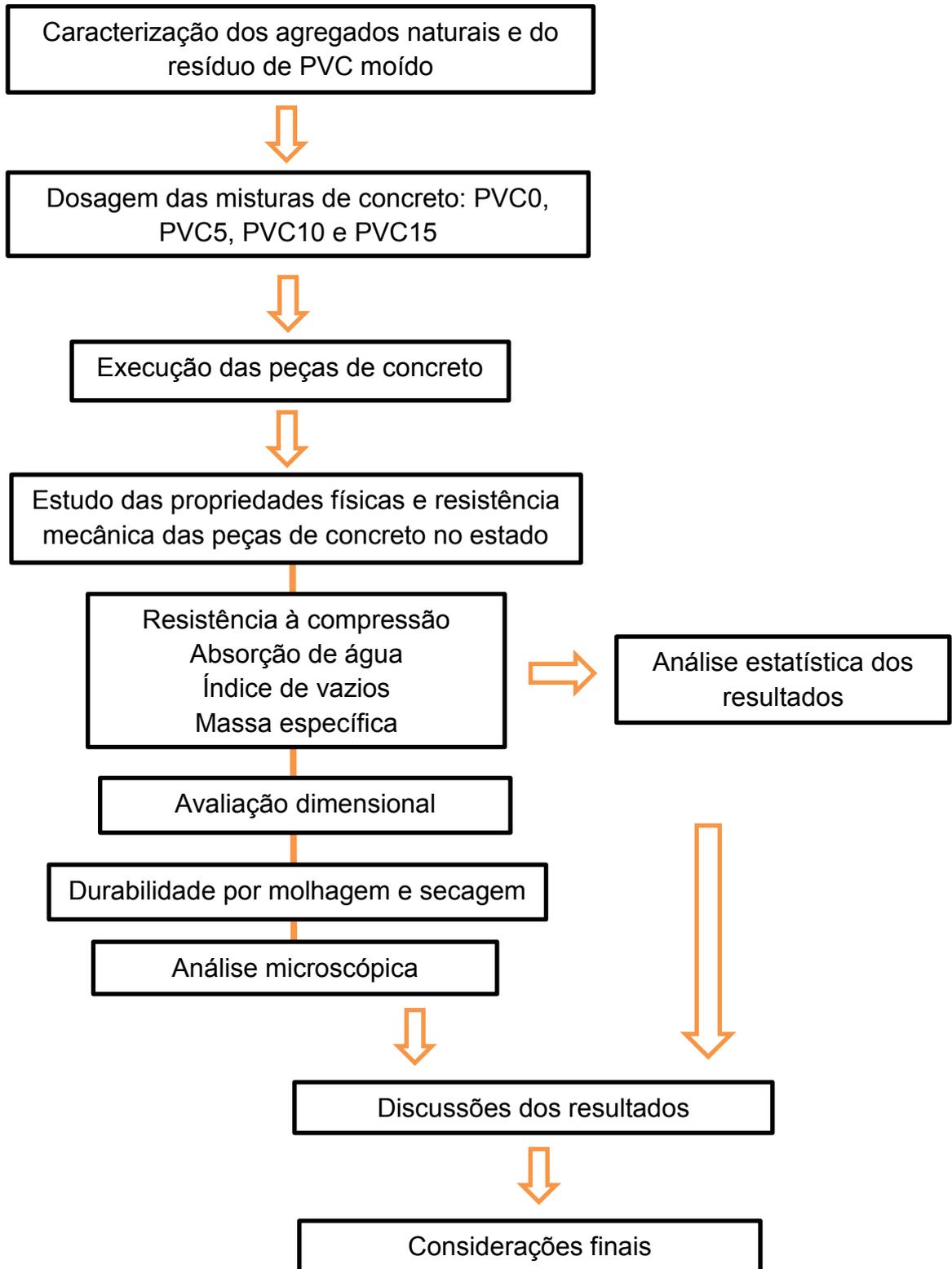
### **3.2.6 Aditivo químico**

O aditivo plastificante utilizado é o RheoCast da empresa RheoSet. É um aditivo líquido, compatível com a maioria dos cimentos encontrados no mercado e é recomendado seu uso para uma melhora no acabamento das peças, melhor desforma, facilitando o transporte das peças com menor número de quebras. O aditivo RheoCast foi dosado conforme indicações do fabricante.

## **3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Neste subcapítulo, serão descritos os ensaios realizados para caracterização dos agregados (miúdo, gráudo e resíduo de PVC moído), dosagem do concreto, execução e ensaios previstos das peças de concreto e por fim, como será realizada a análise estatística dos dados.

O fluxograma na figura 15 apresenta de forma sucinta o planejamento experimental da pesquisa.

**Figura 15 – Fluxograma resumido do procedimento experimental**

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

### 3.3.1 Caracterização dos agregados

### 3.3.1.1 Determinação da massa específica

Para caracterização da massa específica dos agregados, utilizou-se a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009) - Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Inicialmente, determinou-se a massa específica do agregado miúdo. Obteve-se 500g de agregado miúdo na condição saturada superfície seca. A amostra foi colocada em um frasco e anotou-se a massa do conjunto. O frasco, então, foi preenchido com água até próximo a marca de 500 ml. Eliminaram-se as bolhas de ar. Após 1h, completou-se com água novamente até a marca dos 500ml e anotou-se a massa final. Retirou-se o agregado do frasco e colocou-se em estufa em torno de  $105 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  por cerca de 24 horas. Após esfriar, a amostra foi pesada e calculou-se a massa específica.

Para a determinação da massa específica do agregado graúdo, utilizou-se a norma NBR NM 53 (ABNT, 2009). Obteve-se uma amostra de 2 kg de forma aleatória, conforme a norma. Foi lavada em água corrente e em seguida, permaneceu em estufa a  $105 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  por cerca de 24 horas. Após esfriar, a amostra foi imersa em água durante 24h. Após ter sido retirada da água, a amostra foi espalhada sobre um pano absorvente para retirada da água superficial. Foi realizada a pesagem da amostra na condição saturada de superfície seca e após, a pesagem hidrostática. A amostra novamente foi seca em estufa por mais 24 horas, anotou-se a massa do agregado e por fim, calculou-se a massa específica.

### 3.3.1.2 Determinação da composição granulométrica

Para determinação da composição granulométrica, utilizou-se a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) - Agregados – Determinação da composição granulométrica. Seguindo a norma, pode-se também determinar a Dimensão Máxima Característica (DMC) e o Módulo de Finura (MF).

Segundo a NBR 248 (ABNT, 2003), a Dimensão Máxima Característica (DMC) é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, que corresponde a abertura nominal da malha da peneira da série, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% da massa.

Ainda segundo a NBR 248 (ABNT, 2003), tem-se que módulo de finura é a

soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

Para os agregados miúdo e graúdo pesaram-se amostras de 1 kg. O conjunto de peneiras (#) utilizadas para o agregado miúdo foi 4,75; 2,36; 1,18; 0,6; 0,3 e 0,15 mm. Já para o agregado graúdo foram 19; 12,5; 9,5; 6,3 e 4,75 mm. O peneiramento de cada material foi realizado de forma manual, inicialmente com todo o conjunto e depois, cada peneira de forma individual. O material retido em cada peneira e fundo foi separado e pesado. Classifica-se o agregado como miúdo, se 5% a 15% do seu material for mais grosso que 4,8mm. Já para agregado graúdo, se até 15% de seu material passar pela peneira de 4,8mm.

### 3.3.2 Dosagem das misturas

O traço desenvolvido teve como base as recomendações de Amadei (2011), as quais foram feitas com condições e materiais semelhantes utilizados nessa pesquisa, como vibroprensa e materiais que compõem o concreto. A autora avaliou 15 diferentes traços, levando em consideração o diagrama de IPT adaptado para concretos secos e obedecendo a relação da resistência à compressão e massa específica, conforme apresentado anteriormente na figura 11. O traço é da ordem 1:4, com fator água/cimento 0,32 e teor de umidade de 6,4%. Sendo assim, o traço utilizado como ponto de partida neste estudo é apresentado no quadro 4.

#### Quadro 4 – Traço de referência

Traço	Cimento	Areia fina	Areia média	Pedrisco	a/c
<b>Proporção em volume</b>	1,00	0,66	1,99	1,35	0,32

Fonte: Amadei, 2011.

A partir desse traço, foram realizados ensaios preliminares a fim de ajustar as proporções dos materiais, o fator água/cimento e a consistência do concreto adaptando aos materiais utilizados nesta pesquisa. A proporção de areia fina e areia média foi definida a partir do Método Menor Volume de Vazios. Esse ajuste foi necessário para se obter um melhor acabamento superficial, conforme explicado no item 2.3.3. O ensaio consiste em encontrar a melhor proporção entre os agregados

de maneira a proporcionar o menor volume de vazios possíveis. Para esse método é preciso uma balança com capacidade mínima de 5kg, um recipiente cilíndrico com capacidade de 3 litros e uma haste metálica. A determinação da mistura pedrisco-areia foi feita da seguinte forma: misturam-se esses dois materiais em diversas proporções, como 20%, 40%, 60% e 80% de areia em massa, deixando bem homogênea; por fim, colocar as misturas no recipiente cilíndrico em três camadas recebendo cada vez 25 golpes da haste. O recipiente, já cheio e nivelado, é pesado. A partir de então, encontra-se o ponto ótimo da mistura, ou seja, a porcentagem com menor valor na balança. Para o traço em questão, encontrou-se a proporção de 43% de areia fina e 57% de areia média para agregado miúdo. Em seguida, encontrou-se 67% de areia e 33% de pedrisco. O aditivo foi dosado conforme indicação do fabricante na proporção de 100 a 500 ml para cada 100 kg de cimento. A determinação da umidade da mistura também foi testada. Como o traço definido é considerado concreto seco, ou seja, na realização do *Slump Test*, seu valor é zero. Sendo assim, para que o traço escolhido fosse considerado ideal quanto à consistência e trabalhabilidade, foi realizado um método sugerido por Hood (2006): o Método do Ponto de Pelota. O ensaio foi realizado, conforme indicação da literatura e exemplificado na figura 16.

**Figura 16 – Ponto de Pelota**



Fonte: Amadei, 2011.

Por fim, o traço piloto, tomado como referência das peças de concreto para pavimento intertravado, é apresentado no quadro 5. Esse traço será denominado PVC0.

#### Quadro 5 – Traço piloto (PVC0)

Traço	Cimento	Areia fina	Areia média	Pedrisco	a/c
Proporção em volume	1,00	1,05	1,39	1,18	0,35

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Para execução das peças, o traço apresentado em volume foi transformado em massa, a fim de se obter uma maior precisão, uma vez que o material será separado a partir de uma balança de precisão.

Para a definição dos traços com 5%, 10% e 15% de substituição, as proporções de cimento, areia fina e pedrisco foram mantidas. A substituição da areia por PVC foi feita em massa levando em consideração a massa específica dos materiais. Os traços com 5%, 10% e 15% de substituição foram denominados, respectivamente, como traços PVC5, PVC10 e PVC15. Todos os materiais foram utilizados na execução, inicialmente, secos. A massa de concreto após a execução ficou com umidade de 6,9%.

Para se avaliar o traço piloto (PVC0), foram realizados ensaios testes preliminares. Esses testes serviram para se avaliar uma das principais propriedades do concreto fresco: a trabalhabilidade. A execução dos ensaios testes foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Udesc. Os traços escolhidos foram o piloto (PVC0) e com 10% de substituição (PVC10). A moldagem inicial das peças foi realizada com uma vibro prensa manual com baixa energia de compactação, conforme figura 17. O ensaio de resistência à compressão aos 28 dias do traço piloto PVC0 também foi realizado.

**Figura 17 – Vibroprensa manual com baixa energia de compactação**



Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Pelo Ponto da Pelota, pode-se observar que o concreto apresentou boa consistência e coesão, como mostra as figuras 18 e 19.

**Figura 18 – Ponto de Pelota do traço de referência PVC0**



Fonte: elaborada pela autora, 2016.

**Figura 19 – Ponto de Pelota do traço PVC10**



Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Pode-se verificar que o concreto também teve boa consistência na pelota formada na mão, houve pouco desmembramento de grãos, muitos associados com os granulados de PVC.

Realizou-se também o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias do concreto do traço piloto PVC0 realizado em vibroprensa manual, apresentada no quadro 6.

**Quadro 6 – Resistência à compressão estimada aos 28 dias – vibroprensa manual (em MPa)**

<b>Peça</b>	<b>PVC0</b>
<b>1</b>	25,84
<b>2</b>	29,24
<b>3</b>	30,14
<b>4</b>	25,01
<b>5</b>	24,64
<b>6</b>	26,66
<b>Média</b>	26,92
<b>Desvio padrão</b>	2,39

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Os testes preliminares foram considerados satisfatórios. A trabalhabilidade conforme o Ponto de Pelota foi ideal e a resistência estimada alcançada em uma

vibroprensa com baixa energia de compactação foi considerada satisfatória. O traço piloto escolhido previamente foi mantido. A partir desses resultados, iniciou-se a execução das peças de concreto com uma vibroprensa automática.

### 3.3.3 Execução das peças de concreto

A moldagem das peças para pavimento intertravado foi realizada com uma vibroprensa automática por comando hidráulico (figura 20), com maior controle de qualidade e melhor controle de prensagem, cedida por uma empresa comercial.

A vibroprensa é composta de um compartimento para depósito do material que compõe o concreto. Esse material foi levado por uma esteira até o misturador, conforme figura 21. Esse misturador deposita o material, já misturado, em uma nova esteira até um silo. Esse silo deposita em duas camadas o concreto nas formas, que serão vibradas e prensadas. A estimativa do tempo de alimentação da forma foi de 5 segundos e do tempo de prensagem de 6 segundos. Em seguida, o concreto já moldado foi colocado em um paletes, conforme figura 22, e separado para armazenamento e cura. As peças foram produzidas no formato Tipo I, retangulares, na relação comprimento/largura de 2. As peças foram colocadas em paletes após a moldagem e mantidas na fábrica por cerca de 12 horas até o transporte. A cura foi realizada através da estocagem dos materiais em ambiente fechado, coberto com lona de plástico, protegido de intempéries.

**Figura 20 - Vibroprensa hidráulica**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

**Figura 21 – Misturador e esteira**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

**Figura 22 – Prensa e paletes**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

### **3.3.4 Ensaio das propriedades físicas e resistência mecânica das peças de concreto**

Os ensaios realizados foram para avaliar a resistência mecânica à compressão, avaliação dimensional, determinação de absorção de água, determinação de índice de vazios, massa específica e determinação da durabilidade por molhagem e secagem.

Foram utilizadas 27 peças de cada traço. Para o ensaio de resistência à compressão foram utilizadas 18 peças: 6 para idade de 3 dias, 6 para idade de 7 dias e 6 para 28 dias. A quantidade de 6 peças é a mínima permitida pela NBR 9781 (ABNT, 2013). Outras 3 peças das 27 totais foram utilizadas para o ensaio de absorção de água; 3 para determinação de índice de vazios e massa específica e por fim, mais 3 peças para o ensaio de durabilidade. A quantidade de 3 peças para esses ensaios é superior ao limite mínimo das normas, que costumam exigir apenas 1 ou 2 peças. Já para análise dimensional, foram utilizadas 20 peças. Para o ensaio de microscopia, devido o pequeno tamanho da amostra física, foi utilizado um pedaço de uma peça após ensaio de resistência à compressão. Todas as peças de cada de traço para realização dos ensaios foram escolhidas de forma aleatória.

#### **3.3.4.1 Resistência à compressão**

As peças foram avaliadas quanto ao ensaio de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias seguindo a NBR 9781 (ABNT, 2013), na máquina Emic PC2000, até sua ruptura completa, conforme a figura 23.

**Figura 23 – Máquina utilizada no ensaio de resistência à compressão**



Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Para se garantir que a superfície da peça ficasse plana e ocorresse uma melhor distribuição uniforme da carga aplicada, realizou-se o capeamento. Uma mistura composta de 70% cimento e 30% areia fina foi aplicada em uma das superfícies das peças. Depois da secagem do capeamento, as amostras ficaram por 24 horas saturadas em água a  $23 (\pm 5)^{\circ}\text{C}$ . Os resultados do ensaio de resistência, expressos em megapascals (MPa), foram obtidos dividindo-se a carga de ruptura, pela área de carregamento, expressa em milímetros quadrados ( $\text{mm}^2$ ), multiplicando-se o resultado pelo fator  $p$ , função da altura da peça. Admite-se que os resultados seguem

uma distribuição normal. Sendo assim, pode ser calculada a resistência à compressão estimada pela equação (1) e (2):

$$F_{pk, est} = f_p - t \times S \quad (1)$$

Sendo:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(f_p - f_{pi})^2}{n-1}} \quad (2)$$

em que:

$f_p$ : resistência média das peças [MPa];

$f_{pi}$ : resistência individual das peças [MPa];

$F_{pk, est}$ : resistência característica estimada à compressão [MPa];

$n$ : número de peças da amostra;

$S$ : desvio-padrão da amostra [MPa];

$t$ : coeficiente de Student, em função do número de amostra.

O fator  $p$ , em função da altura da peça, é apresentada no quadro 7.

#### Quadro 7 – Fator multiplicativo $p$

Espessura nominal da peça (mm)	$P$
60	0,95
80	1,00
100	1,05

Fonte: NBR 9781 (ABNT, 2013).

#### 3.3.4.2 Avaliação dimensional

Para o ensaio de avaliação dimensional, foi utilizado um paquímetro com resolução de 0,1mm, seguindo as dimensões e tolerâncias da NBR 9781 (ABNT, 2013).

#### 3.3.4.3 Absorção de água

Seguindo a mesma norma, a NBR 9781 (ABNT, 2013), foi realizada a

determinação da absorção de água das peças aos 28 dias.

As peças foram previamente preparadas, retirando-se as partículas soltas nos corpos de prova. As peças foram imersas em água na temperatura de  $23 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  pelo período de 24 horas. Em seguida, cada corpo de prova foi retirado da água e secou-se superficialmente com um pano e drenando cada peça em uma tela metálica por 1 minuto. Pesou-se cada peça e o valor foi anotado. O ensaio foi repetido a cada 2 horas para que não houvesse divergência superior a 0,5% da massa em relação à medida anterior. Essa medida foi chamada de  $m_2$ .

Iniciou-se a segunda parte do ensaio, levando-se os corpos de prova saturados em estufas com temperatura de  $110 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  por 24 horas. Retirou-se da estufa e pesou-se cada corpo de prova individualmente, repetindo o procedimento até que duas pesagens sucessivas não apresentassem diferença de massa superior à 0,5%. Essa medida foi chamada de  $m_1$ .

O valor da absorção de água foi calculado a partir da equação (3):

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

em que:

$A$ : absorção de cada corpo de prova expressa em porcentagem (%);

$m_1$ : massa do corpo de prova seco, expresso em gramas;

$m_2$ : massa do corpo de prova saturado, expresso em gramas.

#### 3.3.4.4 Índice de vazios

Já o índice de vazios e a massa específica foram determinados através de imersão em água, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009). Esta Norma prescreve o ensaio para determinação da absorção de água, do índice de vazios por imersão e fervura, e das massas específicas de argamassas e concretos endurecidos.

Foram necessários uma balança, recipientes adequados para imersão e fervura e uma estufa que mantenha a temperatura a  $105 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ . Após o tempo de cura das peças, foram submetidas a três etapas. A primeira consiste em colocar a amostra na estufa e mantê-la à temperatura de  $105 (\pm 5) ^\circ\text{C}$  por 72 horas. Em seguida, registra-se a massa da amostra, chamada de  $m_s$ . Esse procedimento se repete até que duas pesagens sucessivas, em intervalos de 24 horas, não difiram em 0,5% da

menor massa. A segunda parte do ensaio consiste em imergir a amostra em água, a temperatura de 23 ( $\pm 2$ ) °C por 72 horas. Após retirar a amostra da água, seca-se superficialmente e registra-se a sua massa, chamada de *msat*.

Por fim, coloca-se a amostra em um recipiente com água e levado progressivamente à ebulição. Essa ebulição foi mantida por 5 horas, mantendo um volume constante de água. Deixa-se esfriar e registrou-se sua massa, chamada de *mi*.

O índice de vazios (*Iv*) calcula-se a partir da equação (4):

$$Iv = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100 \quad (4)$$

em que

*Iv*: índice de vazios, expresso em porcentagem (%);

*msat*: é a massa saturada em água, expressa em gramas;

*ms*: massa seca da amostra, expressa em gramas;

*mi*: massa da amostra saturada após fervura, expressa em gramas.

O índice de vazios é apresentado em porcentagem.

#### 3.3.4.5 Massa específica

A massa específica foi determinada através de imersão em água, conforme a NBR 9778, o mesmo ensaio do índice de vazios, mudando o método de cálculo.

A massa específica das peças calcula-se a partir da equação (5):

$$Me = \frac{ms}{msat - mi} \times 100 \quad (5)$$

#### 3.3.4.6 Durabilidade por molhagem e secagem

A determinação da durabilidade das peças foi feita baseada no método de molhagem e secagem seguindo os seis ciclos descritos na NBR 13554 (ABNT, 2012).

Para esse ensaio, são necessários uma balança, uma estufa, um tanque destinado à imersão de corpos de prova, uma escova de tiras de aço conforme exigências da norma e um paquímetro. Foram utilizadas três peças de concreto (ou

seja, três corpos de prova), denominados como n1, n2 e n3. Determinou-se a umidade inicial do n1 ( $h_i$ ), que foi utilizado para obter a variação da umidade e volume durante o ensaio. Os corpos de prova n2 e n3 foram para se obter a perda de massa. Determinou-se o volume inicial ( $v_i$ ) do n1, logo após a moldagem. Curaram-se os corpos de prova por sete dias em câmara úmida. Pesou-se e determinou-se o volume do n1. Em seguida, os três corpos de prova foram imersos em água durante 5 horas. Após tirar a água superficial, o n1 foi pesado, determinando-se sua massa e volume. Os três corpos de prova foram, então, para estufa a temperatura de  $71 (\pm 2) ^\circ\text{C}$  por 42 horas. Em seguida, determinou-se a massa e o volume de n1. Escovou-se a superfície de n2 e n3, em todo o comprimento dos corpos de prova. Foram 18 a 20 escovações verticais, 4 para cada base. Em seguida, o procedimento que inicia na imersão de água até a escovação (molhagem a secagem) e dura 48 horas, foi repetido por cinco vezes. Após a execução dos seis ciclos, os corpos de prova foram levados à estufa a  $105^\circ\text{C}$  e  $110^\circ\text{C}$  até atingir massa constante.

Pode-se calcular as variações de volume do n1, entre a moldagem e o ensaio, pela equação (6):

$$V = \frac{v_i - v_n}{v_i} \times 100 \quad (6)$$

em que

$V$ : é a variação de volume do corpo de prova n1 em cada etapa, expressa em porcentagem (%);

$v_i$ : volume inicial de n1, expresso em centímetros cúbicos;

$v_n$ : volume de n1 em cada etapa, expresso em centímetros cúbicos.

Pode-se calcular a variação de umidade de n1, pela equação (7):

$$V_{hn} = \frac{h_i - h_n}{h_i} \times 100 \quad (7)$$

em que

$V_{hn}$ : é a variação de umidade do corpo de prova n1 em cada etapa, expressa em porcentagem (%);

$h_i$ : umidade inicial de n1, expressa em porcentagem;

$h_n$ : umidade de n1 em cada etapa, expressa em porcentagem.

Pode-se calcular a perda de massa de n2 e n3, pela equação (8).

$$A = \frac{mf1 - mj1}{mi1} \times 100 \quad (8)$$

em que

*A*: água retida em n1, expressa em porcentagem (%);

*mf1*: massa seca final de n1 após atingir massa constante, expressa em gramas;

*mi1*: massa seca inicial calculada, pela moldagem de n1, expressa em gramas.

Corrigiu-se as massas secas de n2 e n3, descontando a água que reagiu com o cimento, conforme a equação (9).

$$mfc23 = \frac{mf23}{A+1} \quad (9)$$

em que:

*mfc23*: massa seca final corrigida de n2 e n3;

*A*: água retida em n1, expressa em porcentagem (%);

*mf23*: massa seca final de n2 e n3 após atingir massa constante, expressa em gramas.

Por fim, calcula-se a perda de massa de n2 e n3 ao longo do ensaio pela equação (10).

$$Pm23 = \frac{mi23 - mfc23}{A+1mi23} \times 100 \quad (10)$$

em que:

*Pm23*: perda de massa de n2 e n3, expressa em porcentagem (%);

*mi23*: massa seca inicial calculada, expressa em gramas;

*mfc23*: massa seca final corrigida de n2 e n3, expressa em gramas.

### 3.3.5 Análise estatística

Dal Molin et al. (2005) afirmam que o emprego de um planejamento estatístico para execução de um programa experimental contribui para o enriquecimento dos resultados obtidos através dos ensaios realizados.

Os dados coletados nos ensaios foram tratados estatisticamente com o intuito de prever o comportamento das variáveis respostas, em função das variáveis controle,

definidas em 3.1. Para a análise estatística foi utilizado o software R Studio e o nível de confiança adotado de 95%. Com a ferramenta de teste de hipóteses e de Análise de Variância, também conhecida como ANOVA, é possível analisar a interferência do resíduo e verificar se há ou não significância estatística nos resultados de cada experimento. Essas análises tem por objetivo avaliar estatisticamente se existe alguma diferença significativa na variação de PVC no concreto nas variáveis de resposta. As variáveis de resposta analisadas que tiveram a ANOVA calculada foram: resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água, índice de vazios e massa específica das peças.

Em um teste de hipóteses existe a hipótese nula ( $H_0$ ), que será testada e a alternativa ( $H_1$ ), que afirma que  $H_0$  é falsa (DOWNING; CLARK, 2006). A partir do valor  $p$  (probabilidade de significância), pode-se verificar a aceitação das hipóteses. Segundo Barbetta, Reis e Bornia (2008), escolhe-se um nível de significância (chamado de  $\alpha$ ), que se refere à probabilidade de erro de rejeitar  $H_0$  sendo esta verdadeira. Como regra, tem-se que se valor  $p > \alpha$ , deve-se aceitar a hipótese  $H_0$ . Porém se o valor  $p \leq \alpha$ , deve-se rejeitar a hipótese  $H_0$ . Sendo assim, se o valor calculado for maior que o valor tabelado, a influência pode-se dizer que é significativa, ou seja, a presença do PVC no processo estudado influenciou na variável de resposta.

A observação dos resíduos deve ser feita em análises de variância. Também formulam-se hipóteses, sendo nula a hipótese de que a amostra provém de uma população normal e a alternativa que não provém. Pelo teste de Shapiro-Wilk, quando o valor  $p > \alpha$ , a amostra provém de uma população normal. O modelo está adequado quando os resíduos não contem padrões óbvios. Através da análise de resíduos, muitos tipos de deficiências e violações do modelo podem ser descobertos (MONTGOMERY, 2003). Uma observação é considerada discrepante quando a mesma se destaca do conjunto total de observações, pois o seu valor está muito afastado dos valores observados. Essa discrepância pode ter ocorrido, por exemplo, quando um valor não é real por erro de anotação/digitação ou mesmo por problema no funcionamento dos equipamentos utilizados.

Quando a análise de variância de um experimento mostra que as médias de tratamento não são estatisticamente iguais, é apenas lógico perguntar quais são as médias que diferem entre si. Para isso, realiza-se um teste *post hoc*, sendo muito comum teste de Tukey. Esse teste permite analisar quais médias apresentaram diferenças entre si. Recomenda-se utilizar o teste com 5% de nível de probabilidade

de erro.

### 3.3.6 Análise microestrutural por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e DRX

A análise microestrutural foi realizada no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas da Udesc – Joinville/ SC. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura (MEV), associado a um Espectrômetro de Energia Dispersiva (energy dispersive X-ray spectrometry, EDS), ilustrado na figura 24.

**Figura 24 – Microscópio Eletrônico de Varredura**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Essa análise possibilitou observar a forma dos grãos dos resíduos de PVC e sua interação com os demais materiais constituintes do concreto e também realizar a análise química-quantitativa da matriz cimentícia por meio da técnica do EDS. Foram observadas também a zona de transição da matriz cimentícia, ou seja, a interface entre a pasta de cimento e os agregados. Geralmente, essa zona de transição, por

sofrer acúmulo de água, é menos resistente que as demais fases do concreto. A presença de poros nessa região é mais comum que no restante da matriz cimentícia. A partir da análise dessa região, pode-se entender o comportamento do material analisado (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para análise no microscópio, foi necessária preparação das amostras. Cinco amostras foram preparadas. A primeira corresponde a uma peça do traço piloto realizado nos ensaios preliminares, ou seja, na vibroprensa manual. Optou-se em analisar essa amostra para se comparar às amostras da vibroprensa hidráulica e verificar se existem possíveis diferenças na matriz cimentícia. As outras quatro amostras correspondem aos traços executados e moldados na vibroprensa hidráulica: PVC0, PVC5, PVC10 e PVC15. Inicialmente, houve corte das peças de concreto, com auxílio de uma serra-fita. As amostras foram colocadas em estufa a 100° C por 24 horas. Iniciou-se o embutimento com resina epóxi para melhorar visualização no microscópio. Duas amostras são apresentadas na figura 25.

**Figura 25 – Amostras para a análise microscópica**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Cada amostra, então, recebeu deposição de uma fina camada de um material condutor, o ouro, para então encaminhá-las para a observação. Uma das amostras pronta é apresentada na figura 26.

**Figura 26 – Amostra de microscopia após o recobrimento**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Já a análise química- quantitativa foi realizada apenas para a amostra do traço PVC15 pelo fato de ser o traço com maior quantidade de massa de PVC.

A partir do planejamento e procedimento experimental, os resultados foram apresentados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos pelo programa experimental, como a caracterização dos agregados miúdos, graúdos e do resíduo de PVC moído. Também são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão, avaliação dimensional, absorção de água, índice de vazios, massa específica e durabilidade por molhagem e secagem. As análises estatísticas também foram expostas e analisadas nesse capítulo. E por fim, as micrografias da análise microscópica das amostras foram apresentadas.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

#### 4.1.1 Agregado miúdo

Os quadros 8 e 9 apresentam as massas retidas nas peneiras das areias ensaiadas, as porcentagens retidas e acumuladas, segundo a NBR 248 (ABNT, 2003). As curvas granulométricas foram apresentadas no apêndice .

**Quadro 8 – Ensaio de granulometria da areia tipo 1**

<b>Peneira #</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% retida</b>	<b>% retida acumulada</b>
<b>4,75mm</b>	0,00	0,00	0,00
<b>2,36mm</b>	0,10	0,03	0,03
<b>1,18mm</b>	2,07	0,69	0,72
<b>0,60mm</b>	24,95	8,31	9,04
<b>0,30mm</b>	83,68	27,89	36,93
<b>0,15mm</b>	141,86	47,28	84,21
<b>Fundo</b>	47,36	15,79	100,00

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

**Quadro 9 – Ensaio de granulometria da areia tipo 2**

<b>Peneira #</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% retida</b>	<b>% retida acumulada</b>
<b>4,75mm</b>	0,00	0,00	0,00
<b>2,36mm</b>	9,02	3,01	3,01
<b>1,18mm</b>	71,70	23,90	26,90
<b>0,60mm</b>	90,22	30,07	56,98
<b>0,30mm</b>	76,95	25,65	82,63
<b>0,15mm</b>	41,92	13,97	96,60
<b>Fundo</b>	10,2	3,40	100,00

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Assim, no quadro 10, tem-se o DMC.

**Quadro 10 – Dimensão Máxima Característica das areias ensaiadas**

	<b>Areia tipo 1</b>	<b>Areia tipo 2</b>
<b>DMC (mm)</b>	1,18	2,36

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

No quadro 11, tem-se o Módulo de Finura de cada areia.

**Quadro 11 – Módulo de finura das areias ensaiadas**

	<b>Areia tipo 1</b>	<b>Areia tipo 2</b>
<b>Módulo de Finura</b>	1,31	2,66

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

A areia tipo 1 é classificada como areia fina, enquanto a areia tipo 2 enquadra-se como areia média. Por fim, seguindo a NBR NM 52 (ABNT, 2009), calculou-se a massa específica das areias ensaiadas, apresentadas no quadro 12.

**Quadro 12 – Massa específica teórica das areias ensaiadas**

	<b>Areia tipo 1</b>	<b>Areia tipo 2</b>
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,67	2,60

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

#### 4.1.2 Agregado graúdo

O quadro 13 apresenta as massas retidas nas peneiras do agregado graúdo, as porcentagens retidas e acumuladas, segundo a NBR 248 (ABNT, 2003). A curva granulométrica foi apresentada no apêndice.

**Quadro 13 – Ensaio de granulometria do agregado graúdo**

<b>Peneira #</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% retida</b>	<b>% retida acumulada</b>
<b>9,50mm</b>	0,00	0,00	0,00
<b>6,30mm</b>	0,00	0,00	0,00
<b>4,75mm</b>	5,20	0,50	0,05
<b>2,36mm</b>	273,75	27,40	27,55
<b>1,18mm</b>	237,8	23,8	51,70
<b>0,60mm</b>	143,58	14,40	66,00
<b>0,30mm</b>	97,73	9,8	75,80
<b>0,15mm</b>	98,2	9,8	85,60
<b>Fundo</b>	143,97	14,4	100,00

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Assim, no quadro 14, tem-se o DMC.

**Quadro 14 – Dimensão Máxima Característica do agregado graúdo**

	<b>Agregado graúdo</b>
<b>DMC (mm)</b>	4,75

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

No quadro 15, tem-se o Módulo de Finura do agregado.

**Quadro 15 – Módulo de finura do agregado graúdo**

	<b>Agregado graúdo</b>
<b>Módulo de Finura</b>	3,07

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

O agregado graúdo é classificado como brita 0, também chamado de pedrisco. Por fim, seguindo a NBR NM 52 (ABNT, 2009), calculou-se a massa específica, apresentada no quadro 16.

**Quadro 16 – Massa específica teórica do agregado graúdo**

	<b>Agregado graúdo</b>
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,60

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

**4.1.3 PVC**

O quadro 17 apresenta as massas retidas nas peneiras do PVC moído, as porcentagens retidas e acumuladas, segundo a NBR 248 (ABNT, 2003).

**Quadro 17 – Ensaio de granulometria do PVC moído**

<b>Peneira #</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>% retida</b>	<b>% retida acumulada</b>
<b>4,75mm</b>	2,40	0,80	0,80
<b>2,36mm</b>	106,61	35,54	36,34
<b>1,18mm</b>	171,46	57,15	93,49
<b>0,60mm</b>	18,18	6,06	99,55
<b>0,30mm</b>	0,78	0,26	99,81
<b>0,15mm</b>	0,36	0,12	99,93
<b>Fundo</b>	0,20	0,07	100,00

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Assim, no quadro 18, tem-se o DMC.

**Quadro 18 – Dimensão Máxima Característica do PVC moído**

	<b>PVC</b>
<b>DMC (mm)</b>	2,36

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

No quadro 19, tem-se o Módulo de Finura do agregado.

**Quadro 19 – Módulo de finura do PVC moído**

	<b>PVC moído</b>
<b>Módulo de Finura</b>	4,27

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Por fim, calculou-se a massa específica, apresentada no quadro 20.

**Quadro 20 – Massa específica teórica do PVC moído**

	<b>PVC moído</b>
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,55

Fonte: elaborada pela autora, 2016.

**4.2 DOSAGEM DO CONCRETO****4.2.1 Ponto da Pelota**

Após a realização da mistura dos materiais que compõem o concreto, realizou-se o Método do Ponto da Pelota de cada traço. Nas figuras 27, 28, 29 e 30, observa-se o ponto da pelota de cada traço.

**Figura 27 – Ponto da Pelota do traço PVC0**

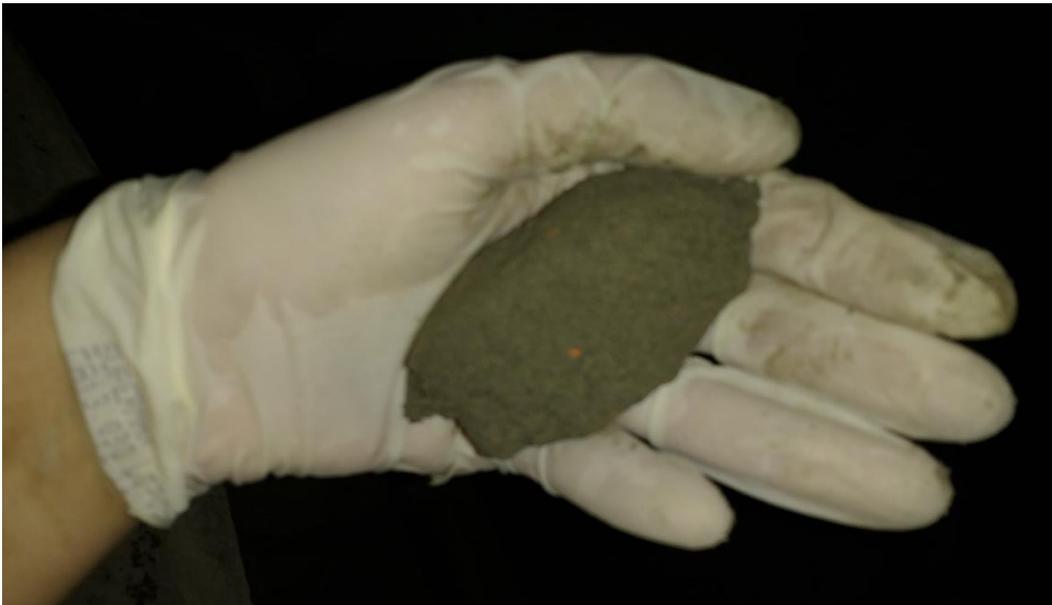
Fonte: elaborada pela autora, 2017.

**Figura 28 – Ponto da Pelota do traço PVC5**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

**Figura 29 – Ponto da Pelota do traço PVC10**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

**Figura 30 – Ponto da Pelota do traço PVC15**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Pode-se observar que em todos os traços de concreto houve boa consistência e coesão e não restaram resíduos na mão. Sendo assim, a dosagem da água de amassamento foi mantida.

#### 4.3 PEÇAS DE CONCRETO ENDURECIDAS

Algumas peças de concreto após 28 dias de cura, escolhidas aleatoriamente, podem ser visualizadas nas figuras 31 e 32.

**Figura 31 – Vistal lateral e superior das peças de concreto no estado endurecido do traço PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c) e PVC15 (d)**

(a)



(b)



(c)

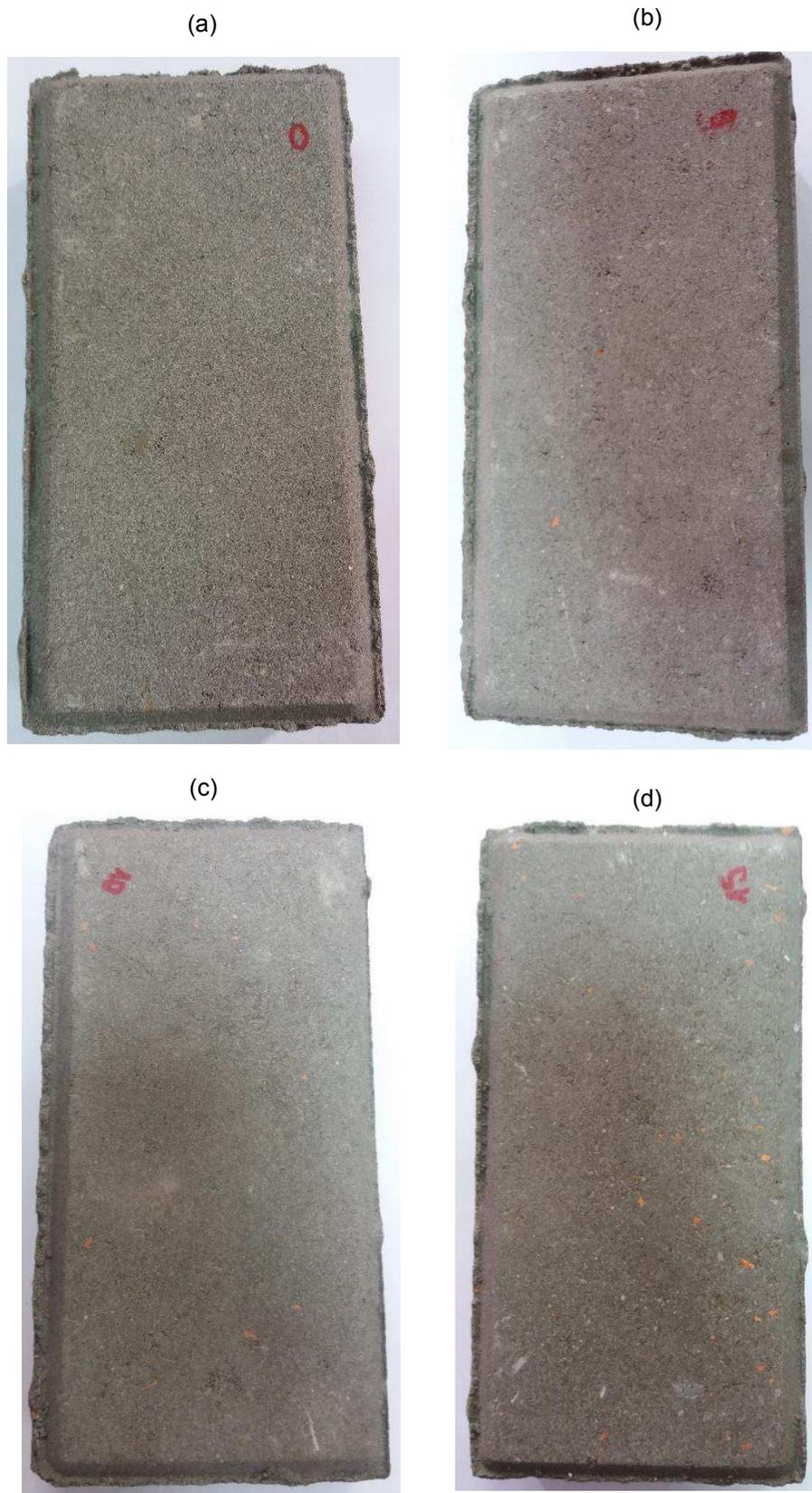


(d)



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

**Figura 32 – Vista superior das peças de concreto no estado endurecido do traço PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c) e PVC15 (d)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

#### 4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Foi realizado o ensaio de resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias, seguindo as diretrizes da NBR 9781 (ABNT, 2013).

Os resultados da resistência à compressão estimada aos 3 dias podem ser observados no quadro 21. Os valores apresentados já foram calculados conforme a equação da NBR 9781 (ABNT, 2013).

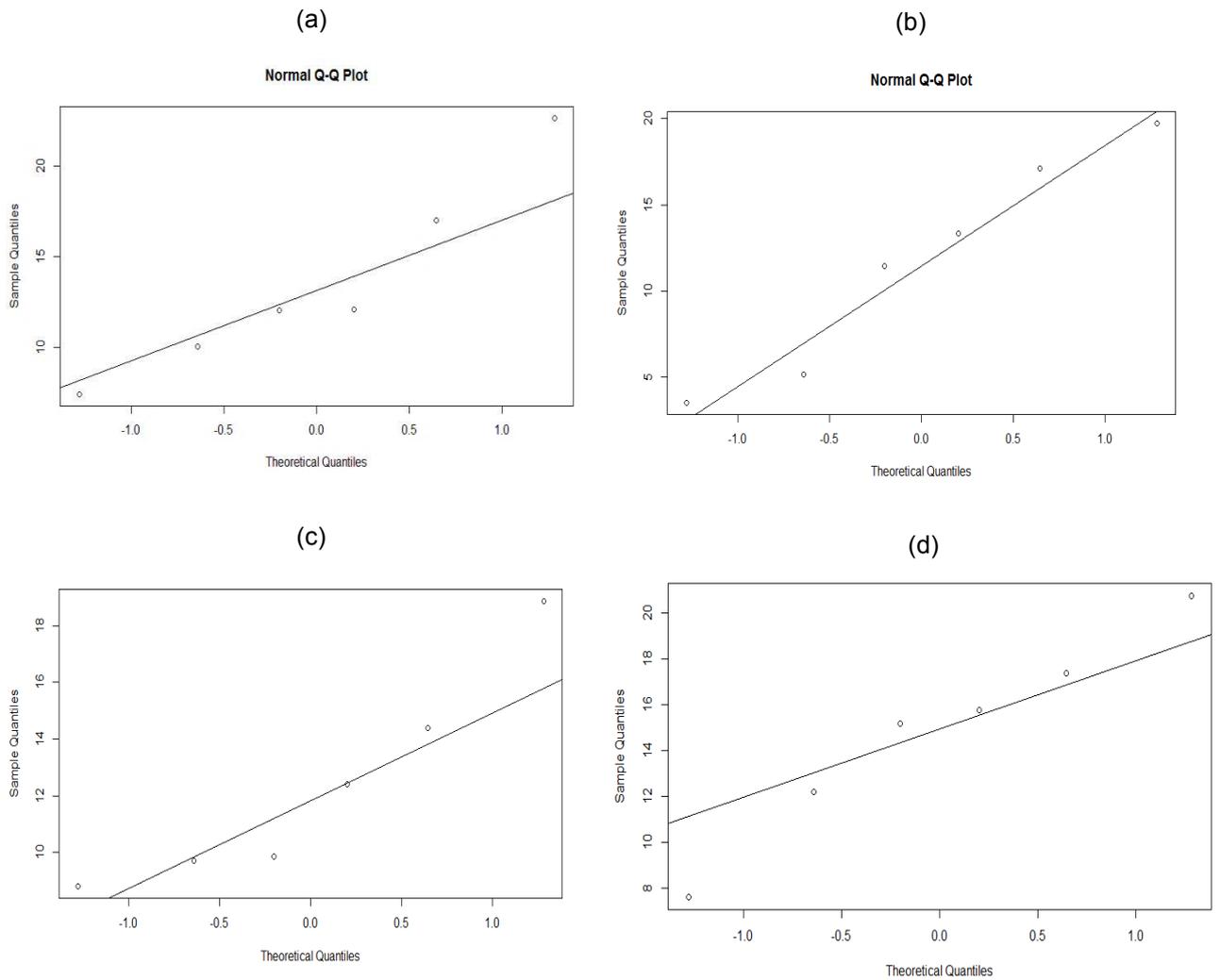
**Quadro 21 – Resistência à compressão estimada aos 3 dias (em MPa)**

<b>Peça</b>	<b>PVC0</b>	<b>PVC5</b>	<b>PVC10</b>	<b>PVC15</b>
<b>1</b>	16,99	11,47	18,87	7,59
<b>2</b>	10,04	17,10	9,87	15,18
<b>3</b>	12,04	3,51	12,42	12,20
<b>4</b>	12,09	13,36	9,70	15,75
<b>5</b>	7,41	19,75	14,40	17,36
<b>6</b>	22,66	5,17	8,81	20,76
<b>Média</b>	13,54	11,72	12,35	14,81
<b>Desvio padrão</b>	5,46	6,42	3,81	4,51

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

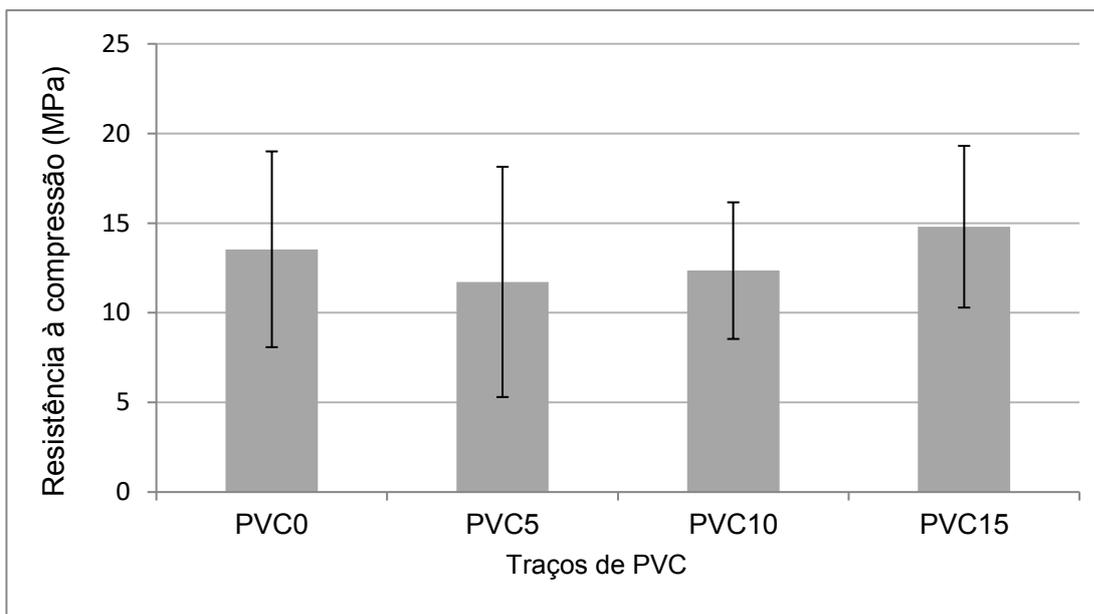
Segundo análise estatística, as resistências encontradas apresentam distribuição normal e são apresentadas na figura 33, sendo (a) o traço PVC0, (b) traço PVC5, (c) traço PVC10 e (d) traço PVC 15.

**Figura 33– Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c) e PVC15 (d)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

De forma simplificada, os resultados de resistência à compressão aos 3 dias e o desvio padrão de cada traço são apresentados na figura 34.

**Figura 34 – Gráfico de resistência à compressão aos 3 dias**

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Os resultados da resistência à compressão estimada aos 7 dias podem ser observados no quadro 22.

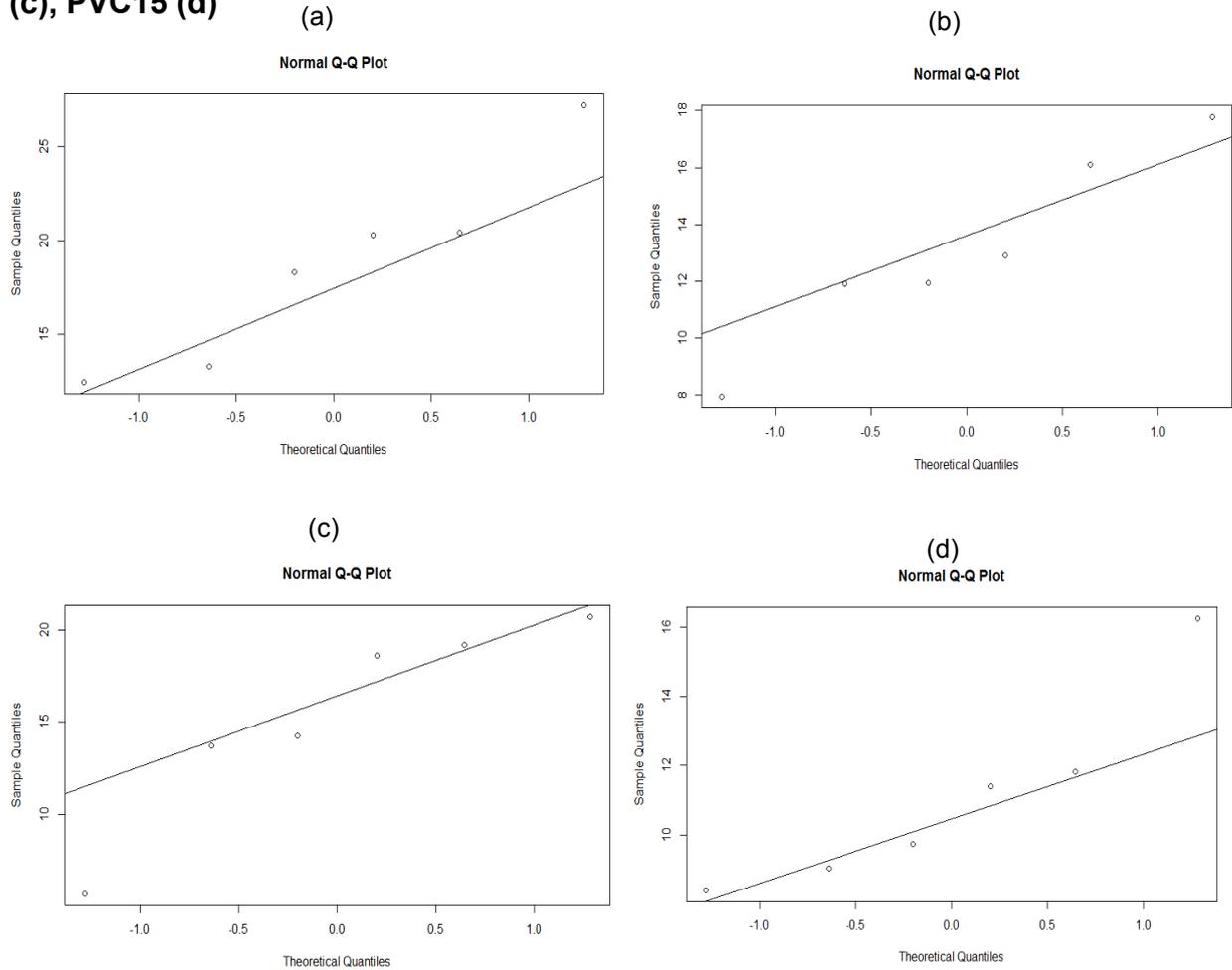
**Quadro 22 – Resistência à compressão estimada aos 7 dias (em MPa)**

Peça	PVC0	PVC5	PVC10	PVC15
1	20,42	7,94	19,18	11,40
2	13,32	17,79	18,60	16,27
3	27,24	16,10	5,71	9,74
4	12,46	12,90	13,73	11,83
5	18,33	11,92	20,72	9,02
6	20,31	11,95	14,27	8,39
<b>Média</b>	18,68	13,10	15,27	11,11
<b>Desvio padrão</b>	5,40	3,47	5,48	2,86

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

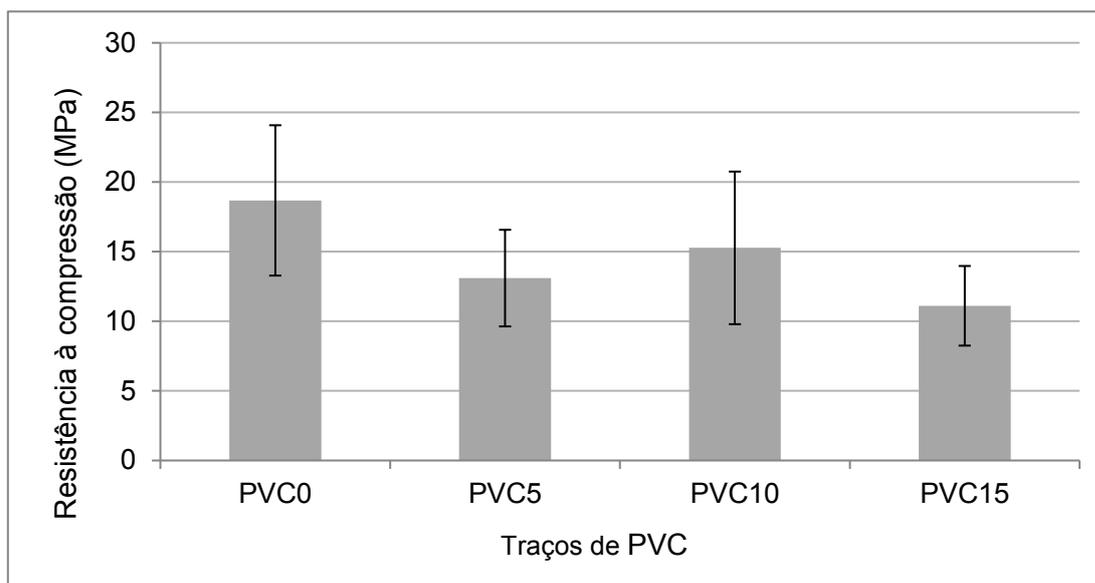
Segundo análise estatística, as resistências encontradas tem distribuição normal e são apresentadas na figura 35, sendo (a) o traço PVC0, (b) traço PVC5, (c) traço PVC10 e (d) traço PVC 15.

**Figura 35 – Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c), PVC15 (d)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

De forma simplificada, os resultados de resistência à compressão aos 7 dias e o desvio padrão de cada traço são apresentados na figura 36.

**Figura 36 – Gráfico de resistência à compressão aos 7 dias**

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Pode-se observar que entre 3 e 7 dias, a amostra do traço PVC0 que obteve maior ganho de resistência. Já o traço PVC15 não houve ganho.

Os resultados da resistência à compressão estimada aos 28 dias podem ser observados no quadro 23.

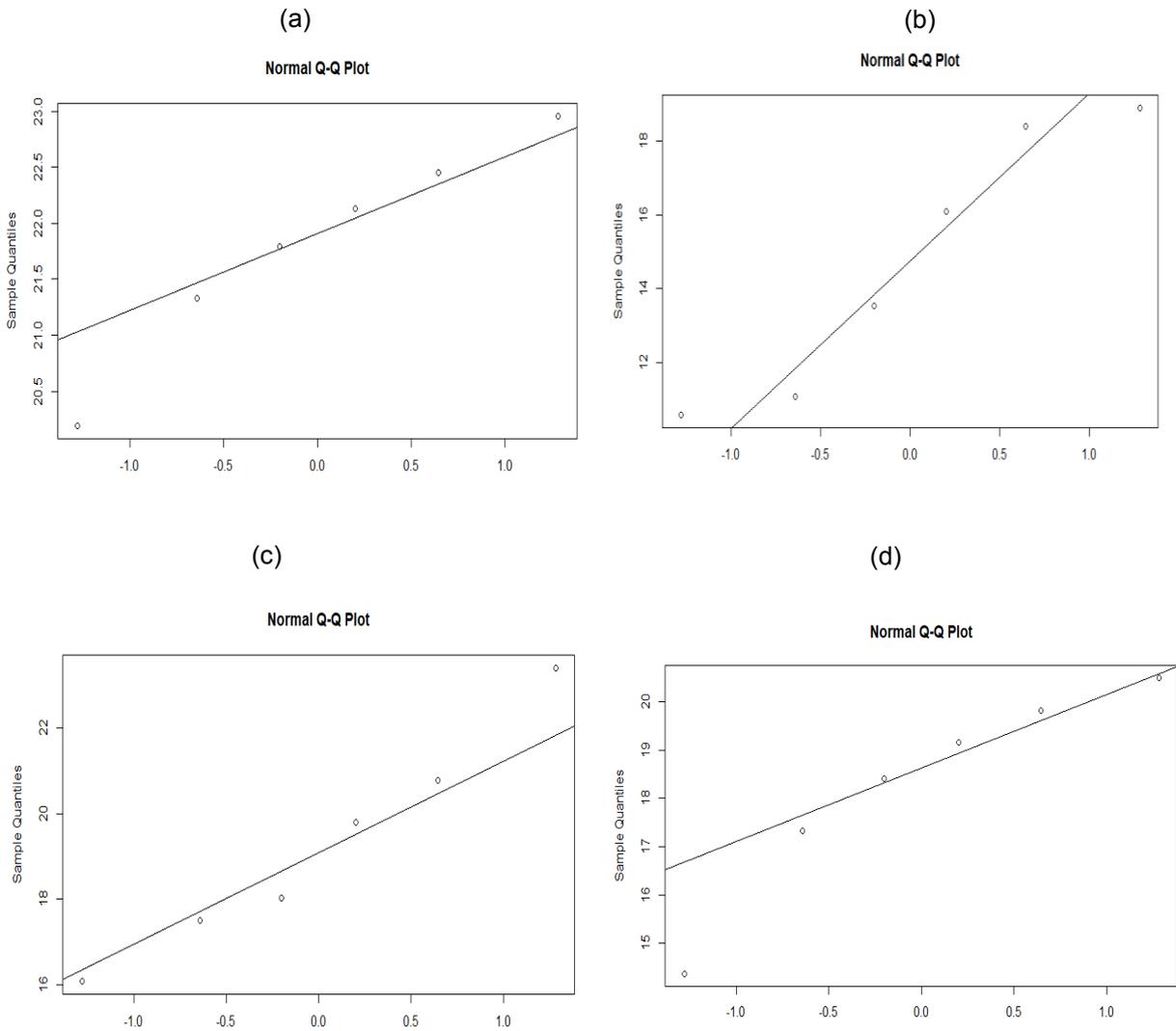
**Quadro 23 – Resistência à compressão estimada aos 28 dias (em MPa)**

Peça	PVC0	PVC5	PVC10	PVC15
1	22,13	10,58	17,51	17,33
2	20,19	18,40	18,03	19,82
3	22,96	18,91	23,41	14,36
4	21,33	11,09	20,77	20,50
5	22,45	13,53	19,80	18,41
6	21,79	16,10	16,08	19,16
<b>Média</b>	21,81	14,77	19,27	18,24
<b>Desvio padrão</b>	0,96	3,39	2,63	2,42

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

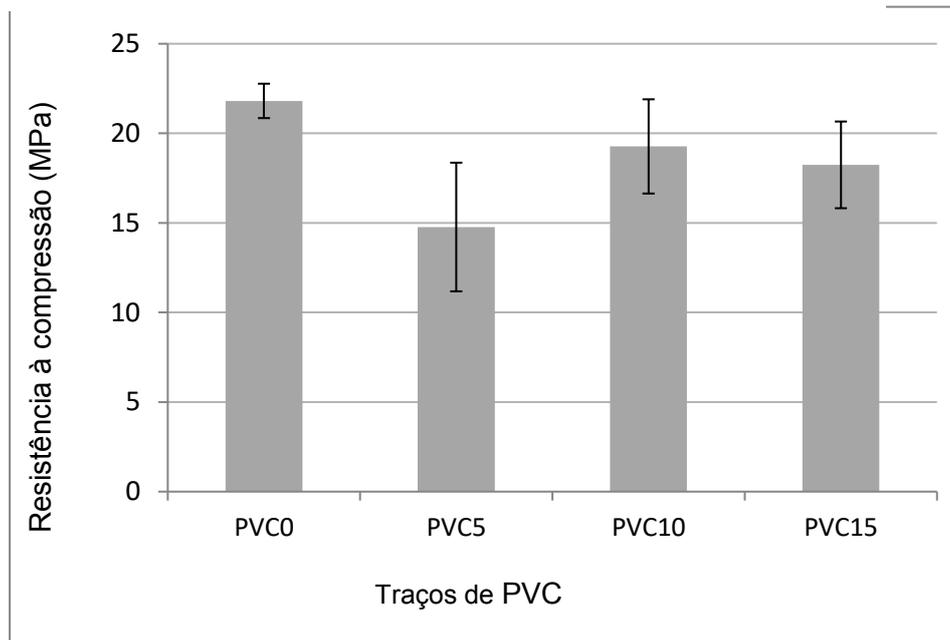
Segundo análise estatística, as resistências encontradas de cada traço tem distribuição normal e são apresentadas na figura 37.

**Figura 37 – Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c), PVC15 (d)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

De forma simplificada, os resultados de resistência à compressão aos 28 dias e o desvio padrão de cada traço são apresentados na figura 38.

**Figura 38 – Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias**

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

A partir do gráfico da figura 38, pode-se observar que a resistência à compressão estimada de cada traço ficou abaixo do limite mínimo exigido por norma, ou seja, 35MPa. Como a resistência estimada é calculada a partir da resistência à compressão e subtraído o desvio padrão, esse parâmetro influenciou no cálculo. As baixas e desuniformes resistências podem ter sido causadas pelo desajuste na vibroprensa durante a moldagem. Hood (2006) afirma ser comum no mercado peças de concreto para pavimento intertravado na faixa de 25 MPa, podendo ser utilizado em locais com solicitação de tráfego limitada e trânsito de pedestres. No item 2.3.1 também foram citadas normas de outros países que aceitam peças para pavimento intertravado entre 15 MPa e 25 MPa. Pode-se observar também que o traço PVC10 que obteve maior ganho de resistência quando comparando-se as diferentes idades de cura.

Para essa idade de cura (28 dias), devido a sua relevância e obrigatoriedade exigida por norma, a Análise de Variância (ANOVA) foi realizada para as peças dessa idade, apresentada no quadro 24. As hipóteses foram definidas: tem-se a hipótese nula ( $H_0$ ) que será testada e compreende em dizer que as médias das resistências são iguais; já a hipótese alternativa compreende em dizer que as médias não são iguais, ou seja, a presença do PVC influenciou nos resultados.

#### Quadro 24 – Análise de variância da resistência à compressão aos 28 dias

F	Valor-P	F crítico
7,957	0,0011	3,09

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Através da análise estatística, tem-se que o valor p (probabilidade de significância) foi de 0,0011, ou seja, inferior ao nível de significância ( $\alpha$ ) a 0,05 definido previamente. Isso significa que a hipótese nula foi rejeitada. Sendo assim, pode-se observar que houve diferença significativa, ou seja, a presença do PVC influenciou na diminuição de resistência à compressão. Comparando os três traços com presença de resíduo, o PVC10 obteve a maior resistência à compressão. As peças da amostra desse traço obtiveram queda de cerca de 15% quando comparado ao traço com apenas agregados naturais. Realizou também o teste de Tukey para se observar quais médias realmente se diferenciam entre si. Pode-se observar que as médias que se diferenciam entre si, significativamente (p-valor menor que 0,05), foram os traços PVC0 e PVC5 e também entre os traços PVC5 e PVC10. Sendo assim, a presença de PVC influenciou na média entre esses traços.

Foi também realizado o teste de normalidade dos resíduos pelo método de Shapiro-Wilk, conforme mostra o quadro 25.

#### Quadro 25 – Análise da normalidade dos resíduos da resistência à compressão aos 28 dias

P-valor
0,5325

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Isso significa que pode-se afirmar, com nível de significância de 5% que a amostra provém de uma população normal, pois o p valor  $> \alpha$ .

#### 4.5 AVALIAÇÃO DIMENSIONAL

Após a execução das peças, mediu-se 20 peças de todos os traços após 28 dias de cura. A dimensão adotada foi 200x100x60mm, respectivamente, comprimento, largura e espessura. Nos quadros 26, 27, 28 e 29, apresentou-se a média das dimensões de cada traço.

**Quadro 26 – Avaliação dimensional das peças do traço PVC0 (em mm)**

Peça	Comprimento	Largura	Altura	Ângulo
1	200,16	101,73	59,55	91°
2	200,78	100,97	60,58	90°
3	202,48	102,36	60,12	90°
4	201,02	102,59	59,78	90°
5	201,11	101,69	57,71	90°
6	201,97	101,98	58,22	90°
7	201,13	101,07	61,4	91°
8	200,74	101,37	60,64	90°
9	201,68	102,68	58,81	90°
10	200,47	101,2	57,5	90°
11	201,44	101,53	59,74	90°
12	202,53	101,95	60,25	88°
13	201,6	100,49	61,41	90°
14	199,64	100,1	57,9	90°
15	201,5	100,28	61,56	90°
16	201,08	101,21	61,14	90°
17	202,02	100,28	61,13	90°
18	200,78	101,75	61,4	90°
19	202,43	100,96	60,38	90°
20	201,00	101,93	58,11	90°
<b>Média</b>	201,28	101,41	59,87	90°
<b>Desvio padrão</b>	0,772	0,754	1,37	0,562

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

**Quadro 27 – Avaliação dimensional das peças do traço PVC5 (em mm)**

Peça	Comprimento	Largura	Altura	Ângulo
1	200,1	100,21	58,53	91°
2	202,42	102,4	61,28	90°
3	201,08	101,9	59,16	90°
4	200,61	100,91	61,9	90°
5	201,94	101,33	61,33	90°

6	200,41	100,71	60,03	89°
7	201,6	101,48	64,24	90°
8	201,55	100,13	64,3	90°
9	201,68	102,16	61,54	90°
10	200,86	101,85	59,88	91°
11	201,25	101,53	60,77	90°
12	201,85	102,08	62,7	91°
13	201,69	100,74	61,45	90°
14	201,75	101,01	60,72	90°
15	201,75	102,52	62,59	91°
16	200,05	100,3	62,61	90°
17	200,97	101,56	62,44	90°
18	201,3	101,47	63,78	91°
19	200,74	101,74	60,31	90°
20	201,39	101,6	63,96	90°
<b>Média</b>	201,25	101,38	61,68	90,2
<b>Desvio padrão</b>	0,637	0,707	1,664	0,523

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

**Quadro 28 – Avaliação dimensional das peças do traço PVC10 (em mm)**

<b>Peça</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Largura</b>	<b>Altura</b>	<b>Ângulo</b>
1	201,24	101,63	63,81	90°
2	200,35	100,39	62,67	90°
3	201,89	100,63	61,43	90°
4	201,19	102,43	58,81	90°
5	201,95	101,2	62,88	90°
6	201,8	100,12	60,62	90°
7	200,65	101,67	60,8	90°
8	200,06	100,41	61,89	90°
9	200,08	100,3	58,46	91°
10	201,93	102,33	59,35	90°
11	201,69	102,33	62,69	91°
12	200,85	101,49	59,5	89°

<b>13</b>	201,76	102,06	62,2	91°
<b>14</b>	202,13	101,02	63,84	90°
<b>15</b>	200,57	101,34	60,24	91°
<b>16</b>	200,81	101,92	60,91	90°
<b>17</b>	201,11	102,23	62,61	89°
<b>18</b>	200,11	100,6	62,14	90°
<b>19</b>	200,93	101,63	60,91	90°
<b>20</b>	201,06	101,68	63,61	90°
<b>Média</b>	201,11	101,37	61,47	90,1
<b>Desvio padrão</b>	0,677	0,750	1,636	0,55

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

#### Quadro 29 – Avaliação dimensional das peças do traço PVC15 (em mm)

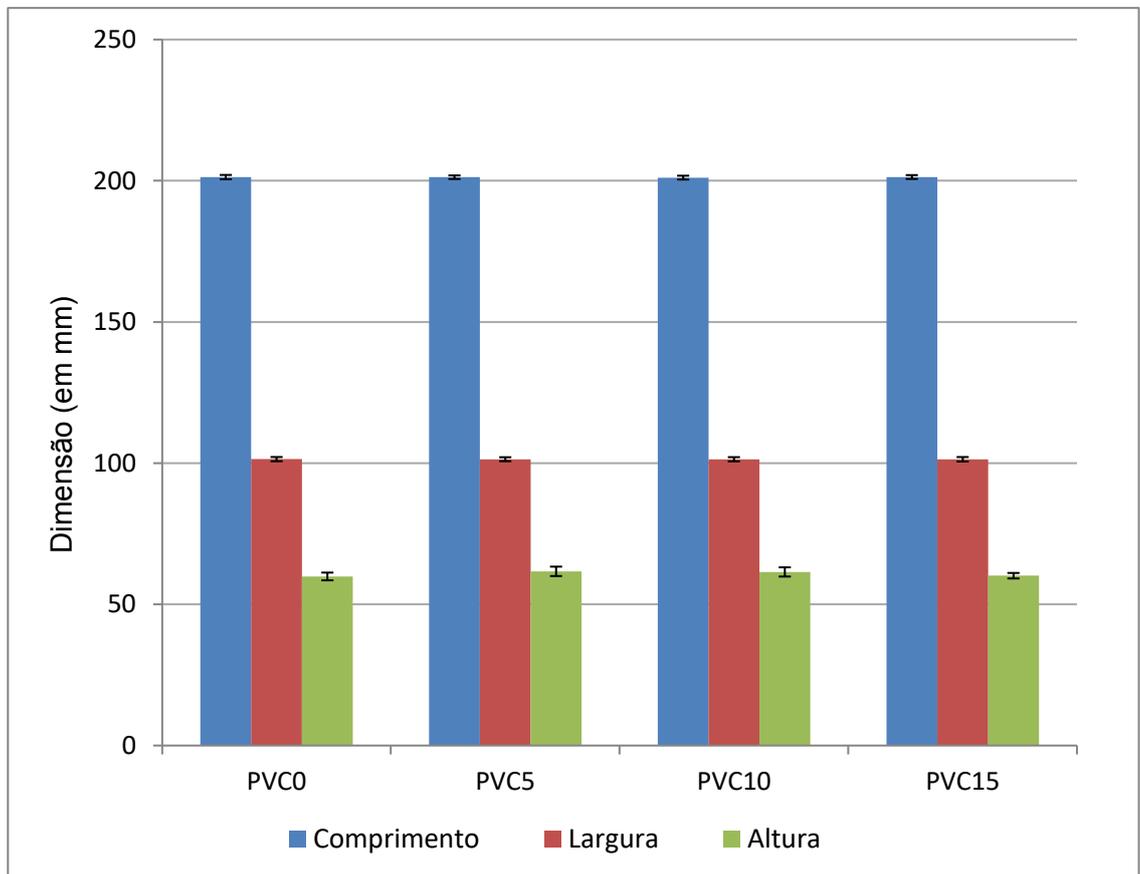
<b>Peça</b>	<b>Comprimento</b>	<b>Largura</b>	<b>Altura</b>	<b>Ângulo</b>
<b>1</b>	200,87	101,19	60,4	89°
<b>2</b>	201,4	100,01	60,08	90°
<b>3</b>	201,09	101,98	60,51	90°
<b>4</b>	202,01	101,08	58,24	90°
<b>5</b>	201,22	100,27	61,81	90°
<b>6</b>	201,66	101,04	59,64	90°
<b>7</b>	200,01	100,85	61,01	91°
<b>8</b>	201,55	101,28	60,59	90°
<b>9</b>	200,82	101,11	59,2	90°
<b>10</b>	202	102,3	59,65	91°
<b>11</b>	201,06	102,37	61	90°
<b>12</b>	199,86	100,22	58,63	90°
<b>13</b>	200,45	101,35	60,74	90°
<b>14</b>	202,24	101,97	60,58	91°
<b>15</b>	201,44	100,03	61,2	90°
<b>16</b>	201,85	102,24	60,72	90°
<b>17</b>	201,17	101,57	59,92	90°
<b>18</b>	201,14	102,22	60,98	90°
<b>19</b>	202,39	101,94	58,53	91°

<b>20</b>	201,89	102,25	59,22	90°
<b>Média</b>	201,31	101,36	60,13	90,1
<b>Desvio padrão</b>	0,687	0,793	0,978	0,489

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Todas as peças aferidas estão dentro da tolerância aceita pela NBR 9781 (ABNT, 2013). Pode-se observar que a medida que teve maior variação em todos os traços foi a altura. Isso pode ter acontecido na etapa de moldagem, em que as formas e/ou a prensa hidráulica poderiam estar desajustadas. A figura 39 apresenta os valores e os desvios de forma resumida.

**Figura 39 – Média das dimensões em forma resumida**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

#### 4.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA

O quadro 30 apresenta os resultados da absorção de água de todos os traços.

### Quadro 30 – Absorção de água (em %)

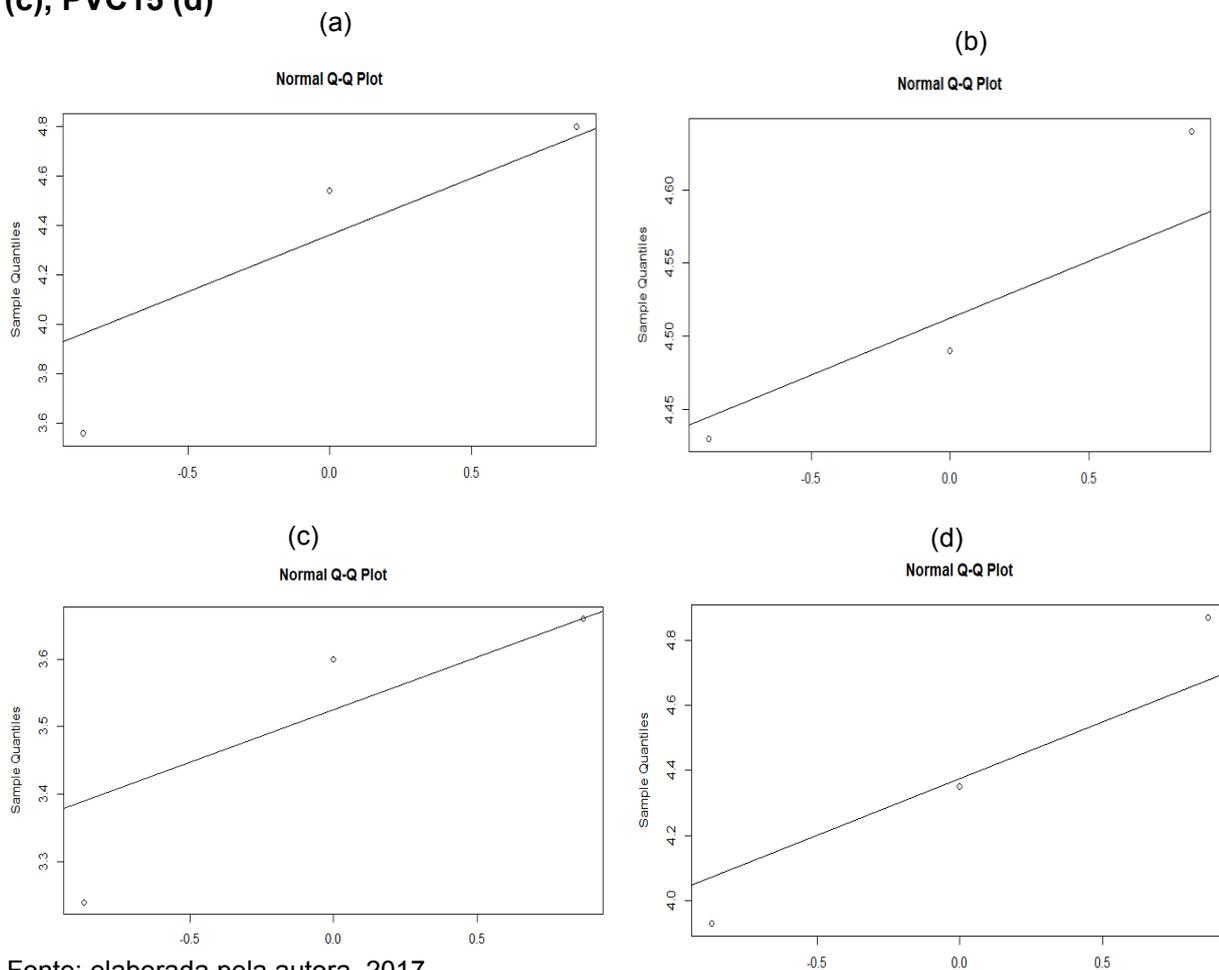
Peça	PVC0	PVC5	PVC10	PVC15
1	4,54	4,49	3,24	4,35
2	4,80	4,43	3,60	3,93
3	3,56	4,64	3,66	4,87
<b>Média</b>	4,30	4,52	3,50	4,39
<b>Desvio padrão</b>	0,653	0,108	0,227	0,471

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

De acordo com 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. Quando maior o percentual de absorção, menor a durabilidade e maior o ataque químico devido os elementos químicos.

Segundo análise estatística, as absorções encontradas de cada traço apresentam distribuição normal e são apresentadas na figura 40.

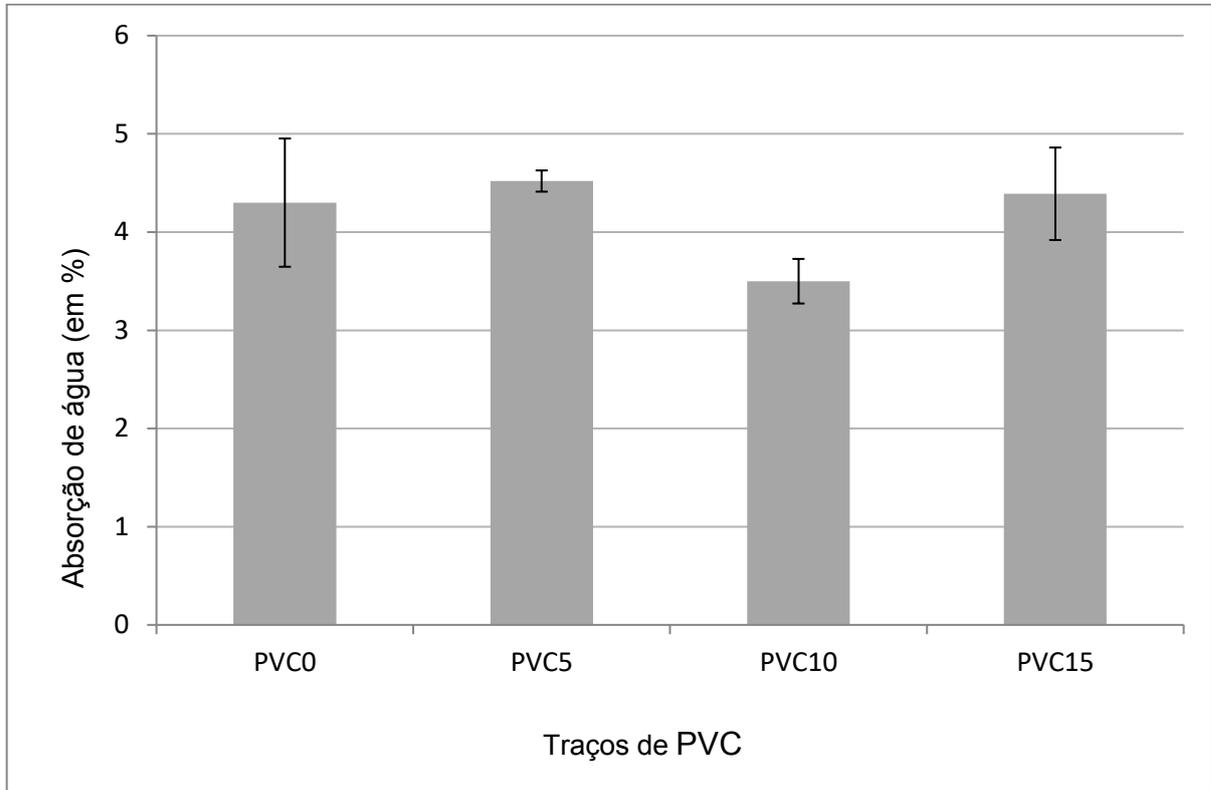
**Figura 40 – Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c), PVC15 (d)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Conforme os resultados apresentados, o percentual de absorção de água ficou entre 3,50% e 4,52% e estão dentro do limite exigido por norma. Os valores são apresentados de forma gráfica na figura 41.

**Figura 41 – Média das absorções de água (em %) de forma resumida**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

A Análise de Variância (ANOVA) foi realizada nesse ensaio. As hipóteses foram definidas: tem-se a hipótese nula ( $H_0$ ) que será testada e compreende em dizer que as médias das absorções são iguais; já a hipótese alternativa compreende em dizer que as médias não são iguais, ou seja, a presença do PVC influenciou nos resultados. O resultado é apresentado no quadro 31.

**Quadro 31 – Análise de variância da absorção de água**

F	Valor-P	F crítico
3,557	0,0672	4,06

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Através da análise estatística, tem-se que o valor p (probabilidade de significância) foi de 0,067, ou seja, superior ao nível de significância ( $\alpha$ ) a 0,05 definido previamente. Isso significa que a hipótese nula foi aceita. Sendo assim, pode-se

observar que a presença do PVC não influenciou nesse ensaio. O traço PVC5 que obteve maior média absorção de água nessa amostra foi também o que teve menor resistência à compressão.

Foi também realizado o teste de normalidade dos resíduos pelo método de Shapiro-Wilk, apresentado no quadro 32.

#### Quadro 32 – Análise da normalidade dos resíduos

<b>P-valor</b>
0,7076

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Isso significa que pode-se afirmar, com nível de significância de 5% que a amostra provém de uma população normal.

#### 4.7 ÍNDICE DE VAZIOS

O quadro 33 apresenta os resultados de índice de vazios de todos os traços.

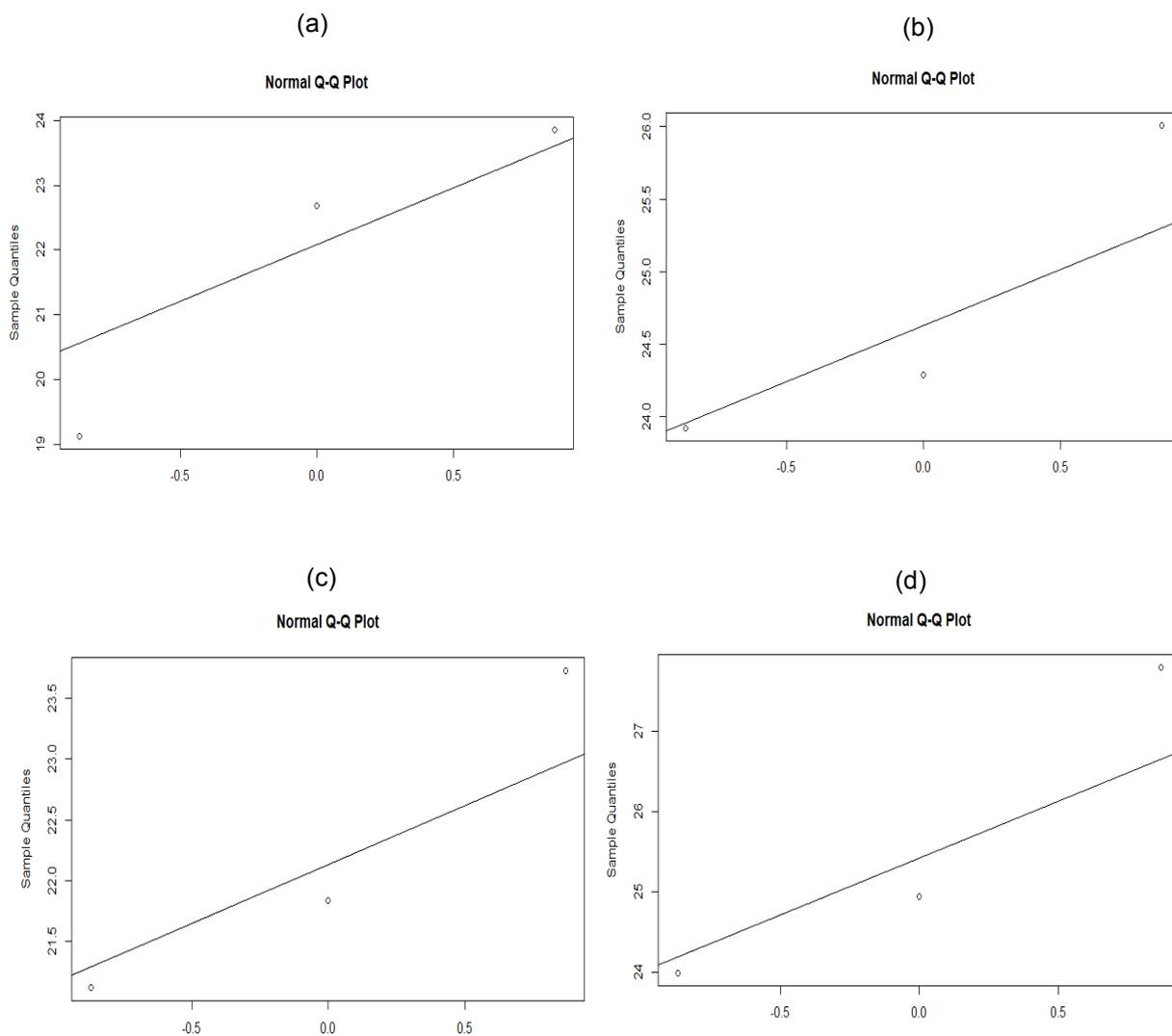
#### Quadro 33 – Índice de vazios (em %)

<b>Peça</b>	<b>PVC0</b>	<b>PVC5</b>	<b>PVC10</b>	<b>PVC15</b>
<b>1</b>	23,86	23,92	21,84	24,95
<b>2</b>	19,12	24,29	23,73	23,99
<b>3</b>	22,68	26,01	21,12	27,80
<b>Média</b>	21,88	24,74	22,23	25,58
<b>Desvio padrão</b>	2,467	1,118	1,347	1,978

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

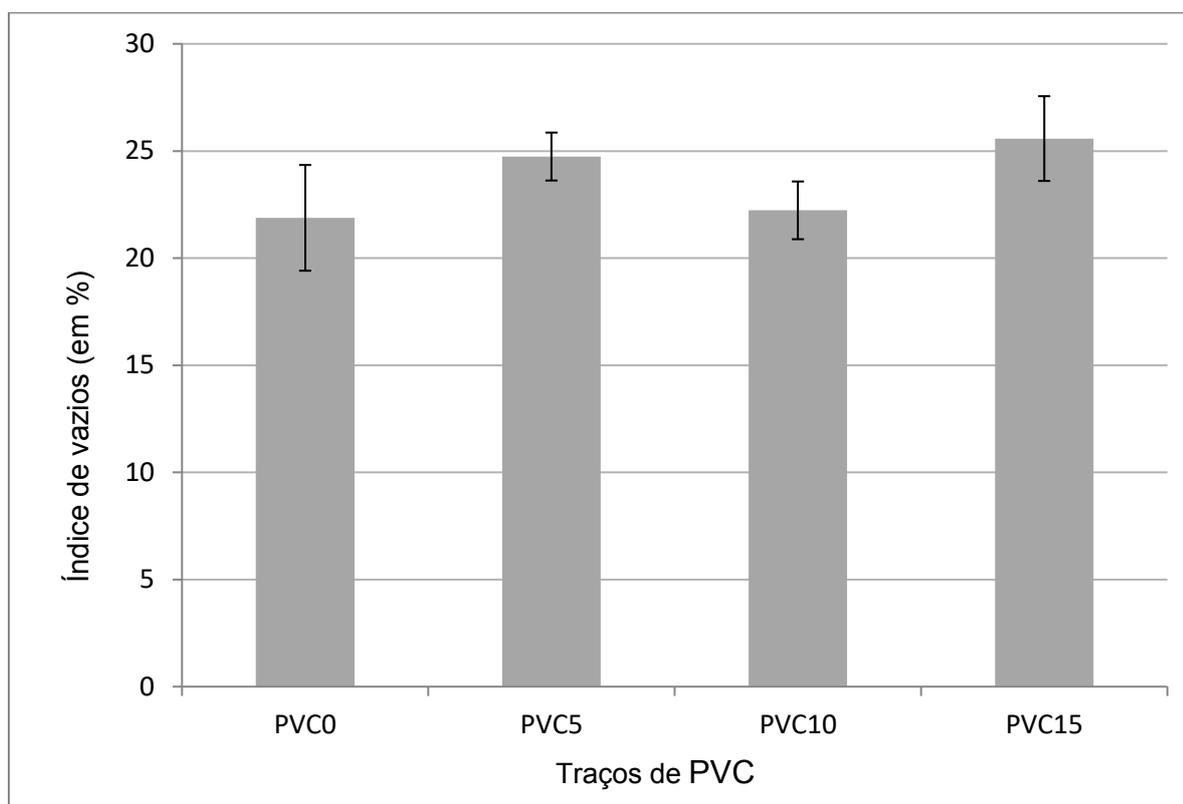
Segundo análise estatística, os índices de vazios encontrados de cada traço apresentam distribuição normal e são apresentadas na figura 42.

**Figura 42 – Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c), PVC15 (d)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Os valores são apresentados de forma gráfica na figura 43. Pode-se observar que a média dos índices de vazios ficaram entre 21,88% e 25,58%. A presença de PVC aumentou o índice de vazios das peças. O traço com maior índice de vazios foi o PVC15.

**Figura 43 – Média dos índices de vazios (em %) de forma resumida**

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

A Análise de Variância (ANOVA) foi realizada nesse ensaio. As hipóteses foram definidas: tem-se a hipótese nula ( $H_0$ ) que será testada e compreende em dizer que as médias do índice de vazios são iguais; já a hipótese alternativa compreende em dizer que as médias não são iguais, ou seja, a presença do PVC influenciou nos resultados. O resultado é apresentado no quadro 34.

**Quadro 34 – Análise de variância do índice de vazios**

F	Valor-P	F crítico
3,069	0,0909	4,06

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Através da análise estatística, tem-se que o valor p (probabilidade de significância) foi de 0,090, ou seja, superior ao nível de significância ( $\alpha$ ) a 0,05 definido previamente. Isso significa que a hipótese nula foi aceita. Sendo assim, pode-se observar que a presença do PVC não influenciou nesse ensaio. Nas amostras apresentadas, a média do índice de vazios do PVC15 foi superior aos outros. Todos os traços apresentaram índice superior a 20%, considerado ideal por Temmis (2004).

Foi também realizado o teste de normalidade dos resíduos pelo método de Shapiro-Wilk, conforme quadro 35.

#### Quadro 35 – Análise da normalidade dos resíduos do índice de vazios

<b>P-valor</b>
0,6816

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Isso significa que pode-se afirmar, com nível de significância de 5% que a amostra provém de uma população normal.

#### 4.8 MASSA ESPECÍFICA

O quadro 36 apresenta os resultados da massa específica de todos os traços.

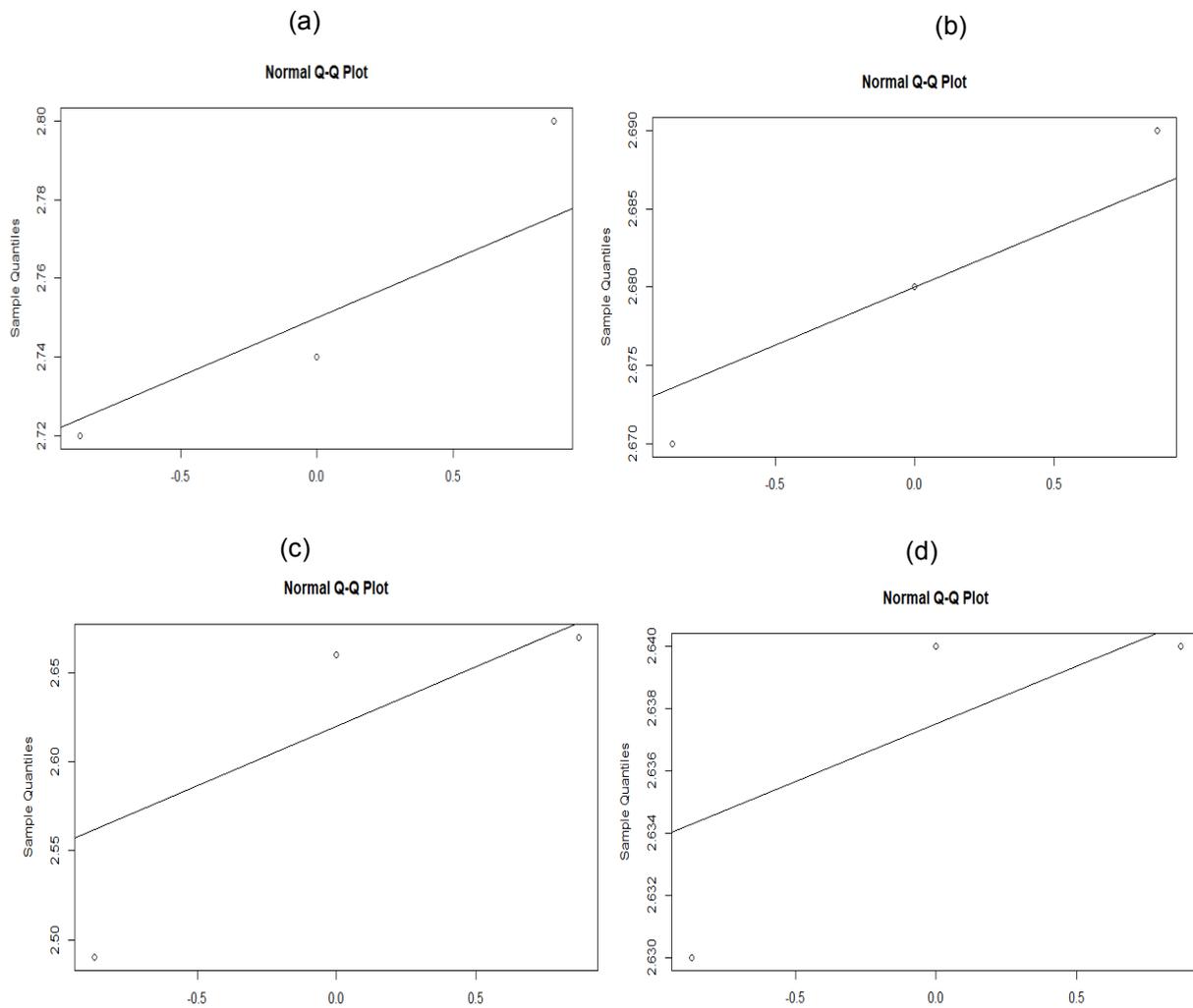
#### Quadro 36 – Massa específica (em g/cm<sup>3</sup>)

<b>Peça</b>	<b>PVC0</b>	<b>PVC5</b>	<b>PVC10</b>	<b>PVC15</b>
<b>1</b>	2,74	2,67	2,67	2,64
<b>2</b>	2,80	2,68	2,66	2,63
<b>3</b>	2,72	2,69	2,49	2,64
<b>Média</b>	2,74	2,69	2,61	2,64
<b>Desvio padrão</b>	0,045	0,009	0,102	0,008

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

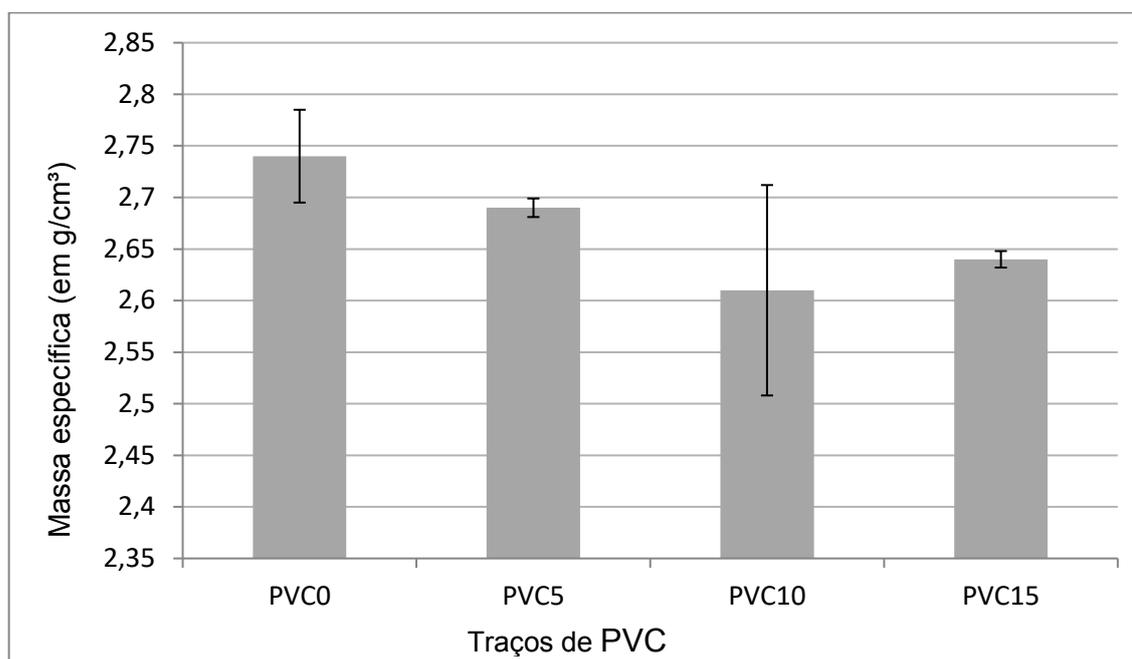
Segundo análise estatística, as massas específicas encontradas de cada traço apresentam distribuição normal e são apresentadas na figura 44.

**Figura 44 – Gráfico de normalidade de cada traço: PVC0 (a), PVC5 (b), PVC10 (c), PVC15 (d)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Os valores são apresentados de forma gráfica na figura 45. Pode-se observar que a média das massas específicas ficaram entre 2,61% e 2,74%.

**Figura 45 – Média da massa específica (em g/cm<sup>3</sup>) de forma resumida**

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

A Análise de Variância (ANOVA) foi realizada nesse ensaio. As hipóteses foram definidas: tem-se a hipótese nula ( $H_0$ ) que será testada e compreende em dizer que as médias das massas específicas são iguais; já a hipótese alternativa compreende em dizer que as médias não são iguais, ou seja, a presença do PVC influenciou nos resultados. O resultado é apresentado no quadro 37.

**Quadro 37 – Análise de variância da massa específica**

F	Valor-P	F crítico
4,371	0,0423	4,06

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Através da análise estatística, tem-se que o valor p (probabilidade de significância) foi de 0,042, ou seja, inferior ao nível de significância ( $\alpha$ ) a 0,05 definido previamente. Isso significa que a hipótese nula foi rejeitada. Sendo assim, pode-se observar que a presença do PVC influenciou nesse ensaio. O traço com menor massa específica, ou seja, a mais leve, foi o PVC10, enquanto o com maior valor foi o PVC0, sem resíduo de PVC. Através do teste de Tukey, pode-se observar que as médias que se diferenciam entre si, significativamente (p-valor menor que 0,05), foram os traços PVC0 e PVC10 e também entre os traços PVC0 e PVC15.

Foi também realizado o teste de normalidade dos resíduos pelo método de Shapiro-Wilk, conforme quadro 38.

#### Quadro 38 – Análise da normalidade dos resíduos da massa específica

<b>P-valor</b>
0.101

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Isso significa que pode-se afirmar, com nível de significância de 5% que a amostra provém de uma população normal.

#### 4.9 DURABILIDADE POR MOLHAGEM E SECAGEM

O quadro 39 apresenta os resultados do ensaio de durabilidade de cada traço da peça 1. A peça 1 compreende a porcentagem da variação de volume que o corpo de prova perdeu durante os seis ciclos exigidos em norma. Já as peças 2 e 3 são os corpos de prova que apresentam a perda de massa durante o ensaio devido o desgaste pela escova. Esses resultados foram apresentados no quadro 40.

#### Quadro 39 – Variação de volume durante o ensaio (em%)

<b>Peça</b>	<b>PVC0</b>	<b>PVC5</b>	<b>PVC10</b>	<b>PVC15</b>
<b>1</b>	2,98	2,90	2,93	2,82

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Pode-se observar que a perda de volume durante o ensaio de molhagem e secagem foi semelhante nos quatro traços apresentados. A maior variação foi entre o traço PVC0 e PVC15, apresentando cerca de 5,5% de variação.

#### Quadro 40 – Variação de massa durante o ensaio (em %)

<b>Peça</b>	<b>PVC0</b>	<b>PVC5</b>	<b>PVC10</b>	<b>PVC15</b>
<b>1</b>	2,76	3,05	3,27	3,41
<b>2</b>	3,87	3,12	3,21	3,33
<b>Média</b>	2,82	3,09	3,24	3,37

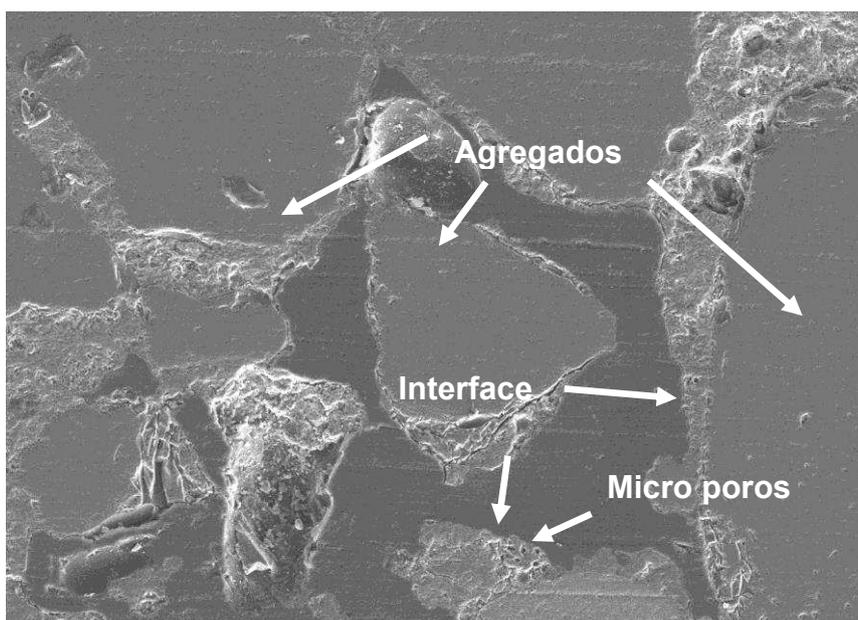
Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Pode-se observar que a média da perda de massa durante o ensaio de molhagem e secagem em que teve escovação variou entre 2,82% e 3,37% entre os quatro traços. O traço que menos perdeu massa foi o PVC0. Pode-se observar uma perda de massa com o aumento de PVC. Isso pode ter ocorrido devido o fato de o PVC ter influenciado na interação entre os agregados.

#### 4.10 ANÁLISE MICROESTRUTURAL POR MICROSCÓPICO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) E DRX

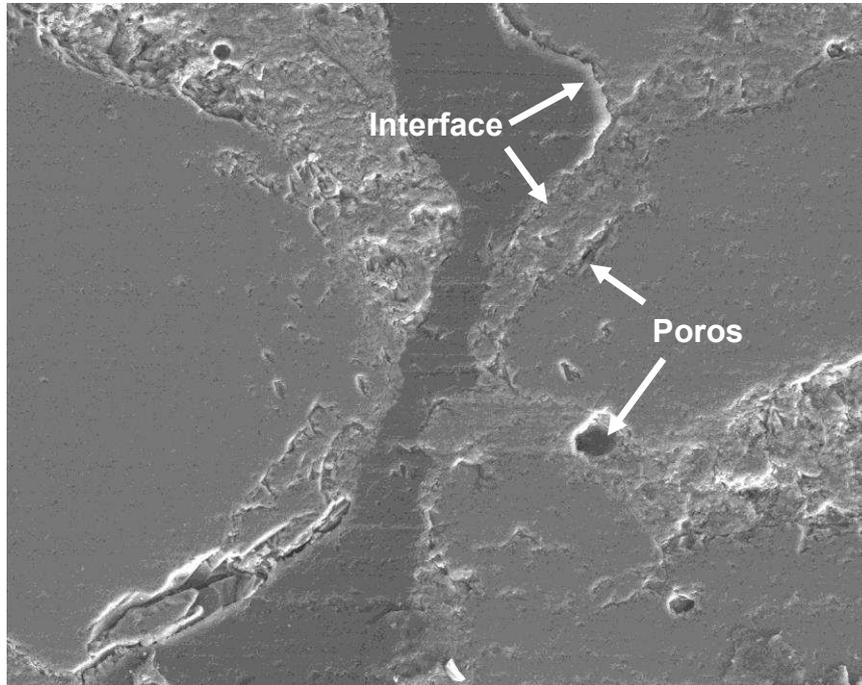
A análise da microestrutura foi realizada através do Microscópio Eletrônico da Varredura (MEV). Foram analisadas cinco amostras, conforme descrito anteriormente no item 3.3.6. Duas amostras são do traço PVC0, sendo a primeira retirada de uma peça realizada nos testes preliminares na vibroprensa manual e a segunda, PVC0 realizada em vibroprensa hidráulica. As figuras 46 e 47 apresentam as micrografias do traço de concreto PVC0 do teste preliminar, apenas com agregados naturais. A figura 48 compreende à amostra na vibroprensa hidráulica. As outras três amostras compreendem os traços PVC5, PVC10 e PVC15 também realizadas na vibroprensa hidráulica.

**Figura 46 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC0 – vibroprensa manual (150x)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

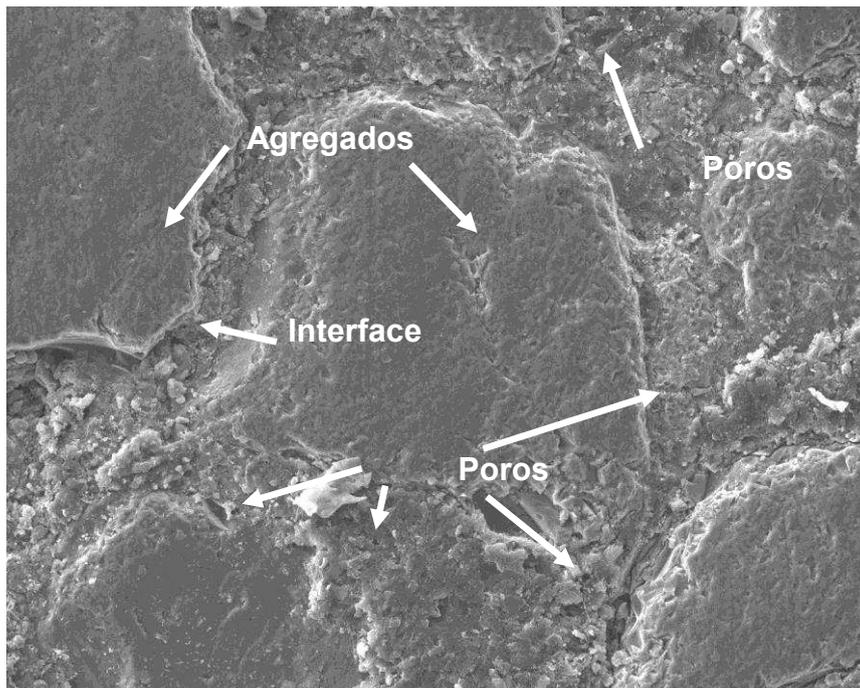
**Figura 47 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC0 - vibroprensa manual (400x)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

As figuras 48 apresenta a micrografia do traço PVC0 realizado em vibroprensa hidráulica na aproximação 400.

**Figura 48 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC0 (400x)**

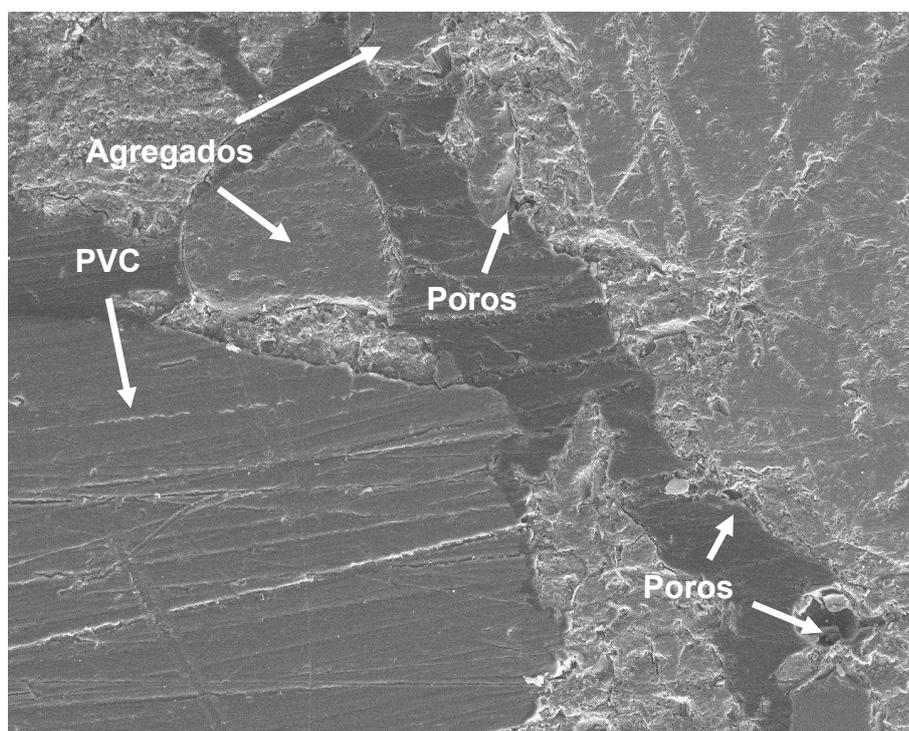


Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Pode-se observar que, em alguns pontos, houve má aderência entre os agregados e a matriz cimentícia no traço sem PVC, apresentando poros. Os poros estão em maior destaque na matriz cimentícia (figura 48) da amostra realizada na vibroprensa hidráulica, sendo que o comum é estar presente na zona de transição (interface), evento que ocorre na amostra realizada na vibroprensa manual (figura 47). Esse pode ser dos fatores que interferiu negativamente na resistência à compressão das peças.

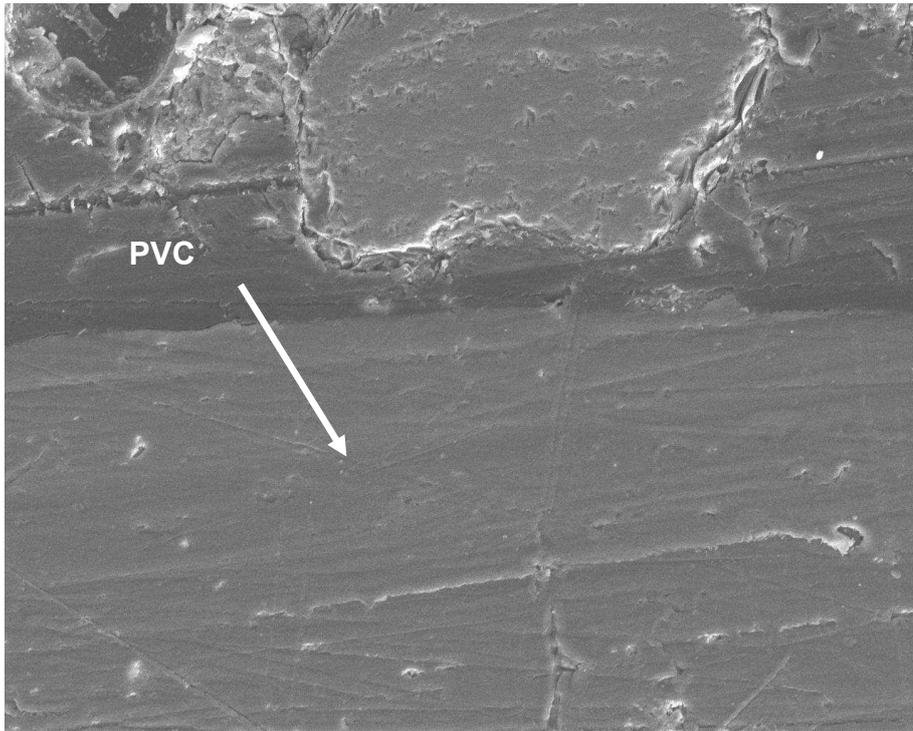
Nas figuras 49 e 50, observa-se a amostra do traço de concreto PVC5, com o objetivo de se observar a interação entre os materiais e o PVC.

**Figura 49 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC5 (150x)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

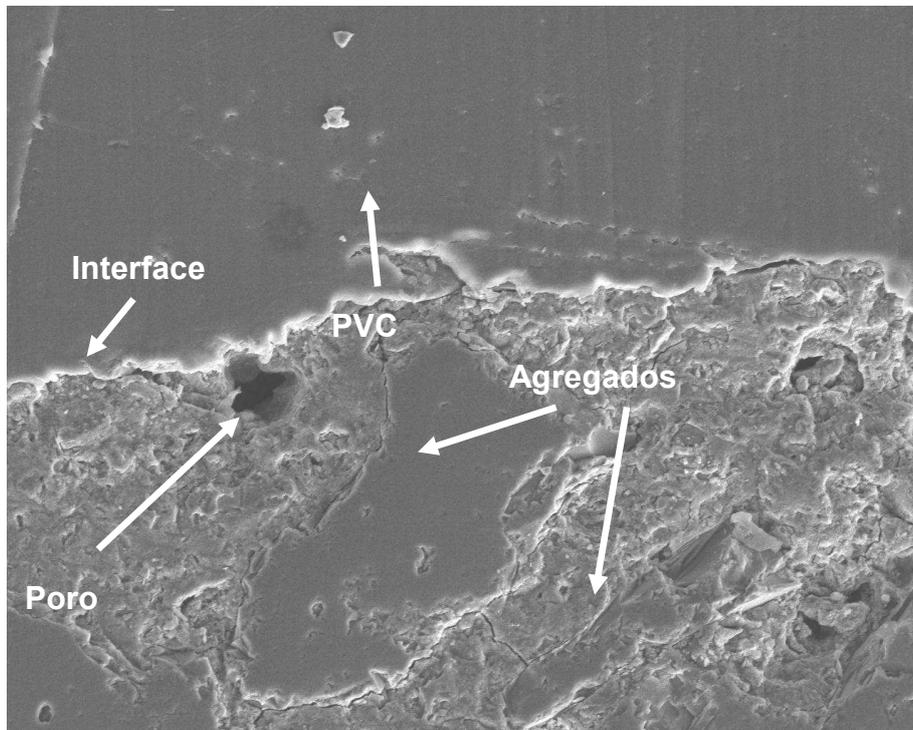
**Figura 50 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC5 (400x)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

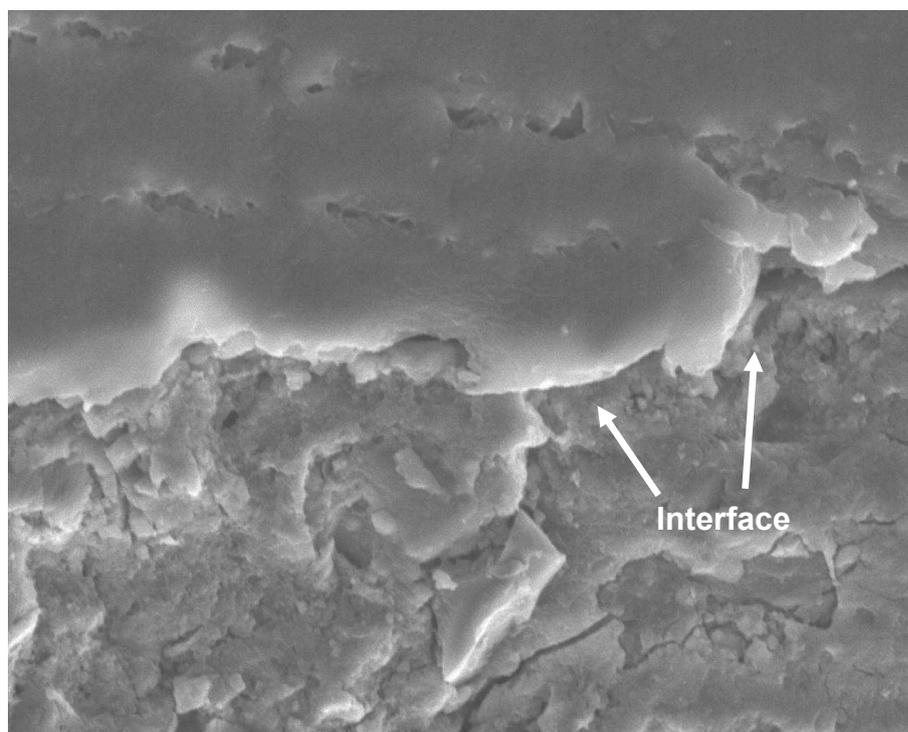
Nas figuras 51 e 52, observa-se a amostra do traço de concreto PVC10.

**Figura 51 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC10 (400x)**



Fonte: elaborada pela autora, 2017

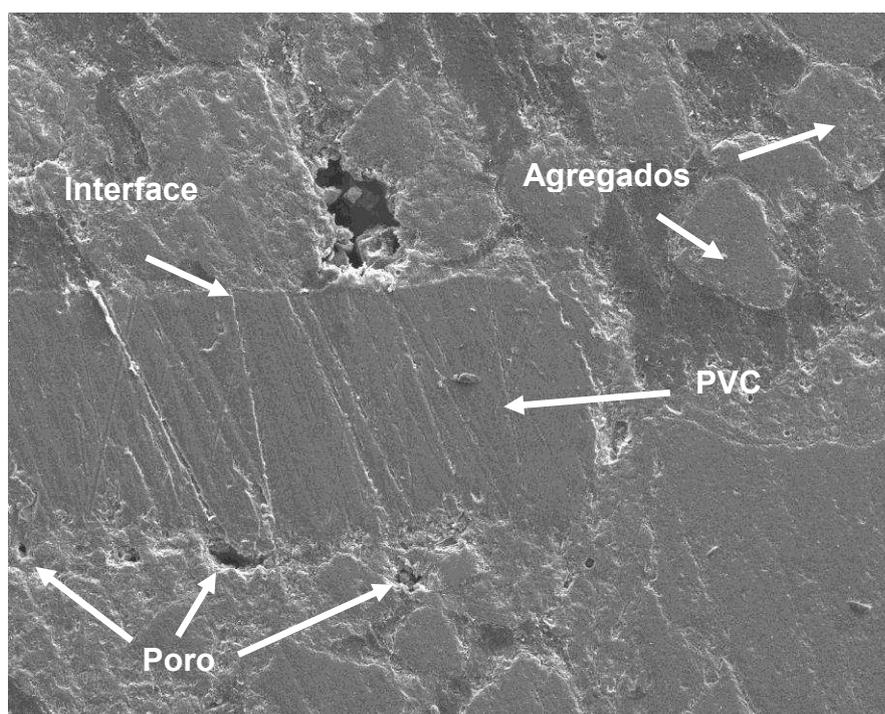
**Figura 52 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC10 (2000x)**



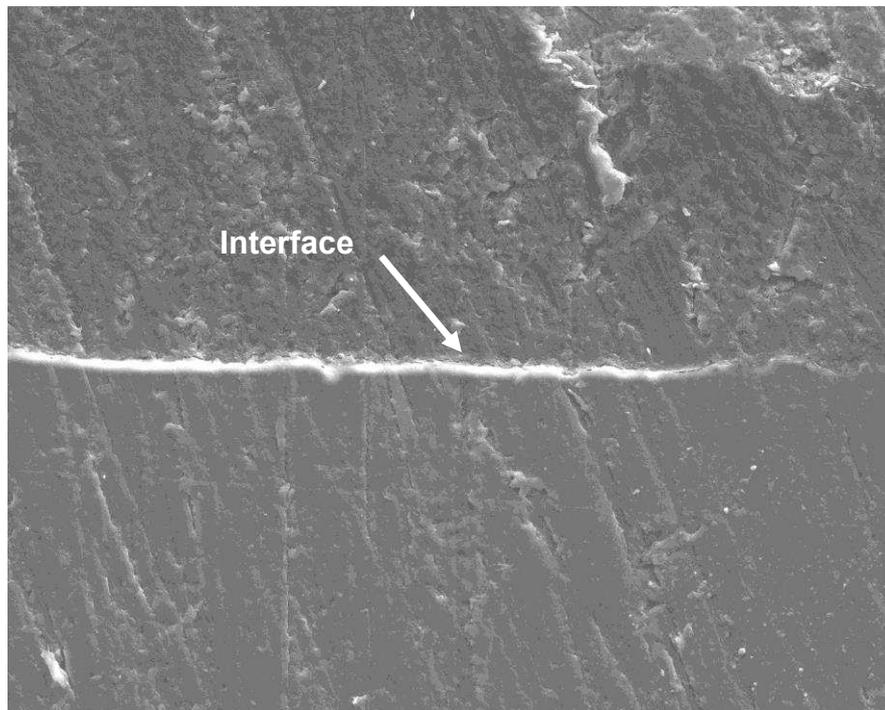
Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Nas figuras 53 e 54, observa-se a amostra do traço de concreto PVC15.

**Figura 53 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC15 (400X)**



Fonte:elaborada pela autora, 2017.

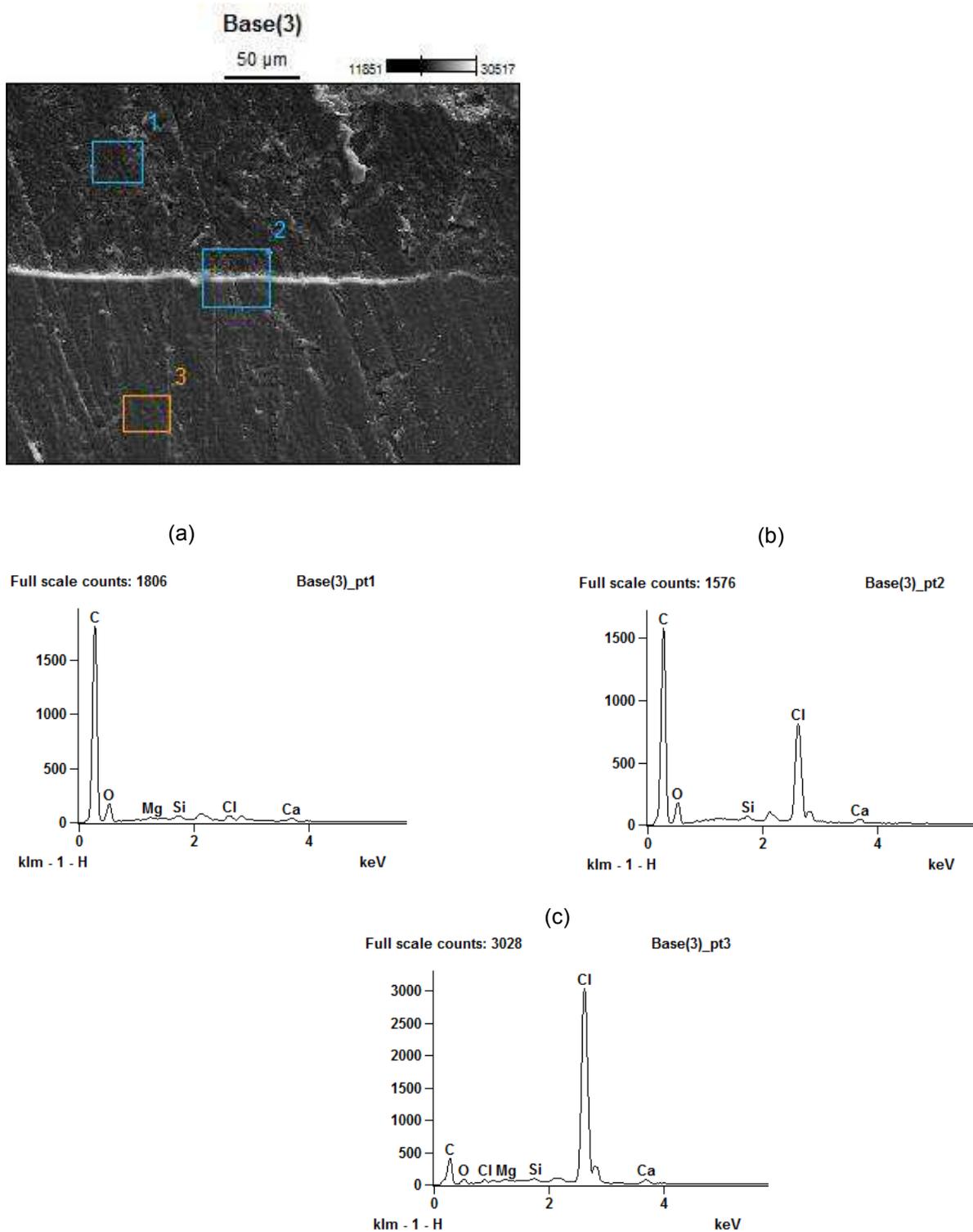
**Figura 54 – Micrografia obtida por MEV do concreto PVC15 (2000x)**

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

Há poros próximos à interface entre PVC e matriz cimentícia (figuras 49, 51 e 53), o que pode ser explicado por uma má aderência entre os materiais, resultando em baixa resistência à compressão. Também pode-se explicar o índice de vazios superior a 21%. No traço PVC10, na figura 52, pode-se observar a interface rugosa do PVC, que pode ter melhorado sua aderência à matriz cimentícia.

Na análise através da técnica de DRX, pode-se observar o difratograma dos traços PVC15. Foi o único traço em que essa análise foi realizada a fim de provar a existência do PVC no concreto. Apresentou-se na figura 55, apresenta-se três difratogramas em três diferentes regiões. A figura 55 (a) apresenta difratograma na região da matriz cimentícia. Já a figura 55 (b), está na interface entre agregado e PVC. e na figura 55 (c), no terceiro ponto, mostra-se a análise química sobre a partícula de PVC, com alta presença de cloro.

Figura 55 – Difratoograma do concreto PVC15 na região 1 (a), 2 (b) e 3 (c)



Fonte: elaborada pela autora, 2017.

O quadro 41 apresenta a presença do principal componente avaliado, o cloro.

**Quadro 41 – Composição química em % do peso do óxido Cloro**

	Cl
<b>Região1</b>	2,67
<b>Região 2</b>	19,94
<b>Região 3</b>	53,68

Fonte: elaborada pela autora, 2017.

A partir do difratograma, pode-se observar que houve sentido, ficou dentro do esperado, conforme a composição química do PVC apresentado em 2.2.2. Na análise química, verificou-se a presença de alguns grupos de minerais componentes usuais do concreto, como o silício (Si), oxigênio (O), cálcio (Ca), entre outros. Na região da matriz cimentífica, houve menos presença de Cloro, componente principal do PVC. Na interface, houve uma presença intermediária. E por fim, provou-se que o ponto analisado era, de fato, o PVC devido alta presença de Cloro.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral da pesquisa foi avaliar a influência do resíduo de PVC como substituto parcial do agregado miúdo natural nas propriedades físicas e mecânica de concreto dosado para peças para pavimentos intertravados.

Os resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados miúdos, graúdos e do PVC moído foram de acordo com a literatura. A areia tipo 1 foi classificada como fina, a areia tipo 2 como média, o pedrisco foi classificado como brita 0. O PVC teve Diâmetro Máximo Característico semelhante à areia tipo 2, por isso, optou-se por substituí-la.

A dosagem do traço de concreto foi baseada em autores que realizaram estudos semelhantes sobre peças de concreto para pavimento intertravado e também a partir dos resultados obtidos nos ensaios dos agregados utilizados. Logo, foram produzidas quatro dosagens, sendo uma de referência apenas com agregados naturais (piloto ou PVC0) e outras três com substituição de PVC. Os traços com substituição foram de 5%, 10% e 15% do agregado por PVC nomeados, respectivamente, como PVC5, PVC10 e PVC15. Foram realizados testes preliminares do traço piloto e assim, obteve-se boa trabalhabilidade da mistura, resistência próxima à mínima exigida por norma e a execução definitiva foi realizada.

Foram realizados os ensaios de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias. Aos 3 dias, pode-se observar que o concreto PVC15 obteve maior ganho de resistência, embora aos 28 dias, seu aumento não se manteve. Pode-se observar que entre 3 e 7 dias, a amostra do traço PVC0 foi o que obteve maior ganho de resistência. Entre os traços com presença de PVC, o traço PVC10 apresentou menor queda aos 28 dias, cerca de 10% a menos que o traço de referência sem presença de PVC. Pode-se concluir que, estatisticamente, a presença de PVC houve influência na resistência. Observou-se também que as resistências alcançadas não se enquadram na norma brasileira e tal parâmetro foi prejudicado por uma possível irregularidade na vidroprensa. Considera-se a norma brasileira rígida para peças de pavimento intertravado de concreto, devido ao fato de não levar em consideração apenas a resistência aferida diretamente na prensa, mas também, há fatores no cálculo que reduzem o resultado, além da resistência mínima de 35 MPa.

As peças também foram avaliadas conforme suas dimensões. Pode-se

observar que todas as peças de todos os traços obtiveram maior variação no fator altura, podendo ter sido influenciado por falha na prensagem da vibroprensa hidráulica.

No ensaio de absorção de água e de índice de vazios, a presença de PVC não teve influência nos resultados. As médias da absorção de água das peças ficaram entre 3,50 e 4,39%, dentro do valor exigido por norma. O índice de vazios das peças ficou entre 21, 88%, sendo esse do PVC0, e 25,58%, sendo esse índice do traço PVC15.

Já em relação à massa específica, houve melhora nesse parâmetro devido a presença de PVC. Pode-se considerar que a presença de PVC tornou as peças mais leves. O traço PVC10 apresentou a menor média da massa específica, 2,61g/cm<sup>3</sup>, cerca de 5% inferior à média das peças apenas com agregados naturais (PVC0).

Já no ensaio de durabilidade, a presença de PVC fez com que as peças perdessem mais massa na etapa de escovação. A perda do traço PVC5 foi de 3,09%, chegando a 3,37% no traço PVC15.

No ensaio de microscopia, pode-se observar que houve má aderência em alguns pontos entre agregados e matriz cimentícia no traço sem PVC. Os poros se destacaram na matriz cimentícia da amostra do PVC0 realizado em vibroprensa hidráulica. A presença de poros na matriz cimentícia pode justificar a baixa resistência. Essa presença também pode explicar a diminuição da massa específica das peças.

A utilização de PVC moído como substituto parcial do agregado miúdo na fabricação de peças de pavimento intertravado pode ser considerado viável tecnicamente. Essa utilização também pode ser considerada ambientalmente viável, pois contribui para preservação do ambiente e de seus recursos naturais, bem como no aumento da reciclagem de resíduos de construção e demolição. Muitos resíduos são descartados sem que todo o seu potencial seja aproveitado. A reinserção dos materiais no ciclo da construção civil tem grande importância para o desenvolvimento sustentável. Estudos complementares da utilização de PVC devem ser realizados, para que o aprofundamento do tema contribuía para a sociedade e se torne exequível.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns pontos não abordados no trabalho podem ser sugeridos para trabalhos futuros a fim de observar a viabilidade do PVC. Pode-se citar:

- adotar novas dosagens do concreto variando em porcentagens intermediárias a substituição do PVC;
- realizar o ensaio de abrasão sugerido pela norma 9781 (ABNT 2013);
- avaliar o ciclo de vida do PVC;
- analisar a viabilidade econômica da utilização do PVC como agregado miúdo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRECON - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. 2013. Disponível em: < [ww.abrecon.org.br](http://ww.abrecon.org.br)>. Acesso: 19 ago. 2016.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015**. 2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2017.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção**. São Paulo: Blucher, 2011.

ALWAEELI, M. Application of granulated lead–zinc slag in concrete as an opportunity to save natural resources. **Radiation Physics and Chemistry**, v.83, p.54-60, 2013.

AKOVALI, G. Plastic materials: polyvinyl chloride (PVC). **Toxicity of Building Materials**, p. 23-53, 2012.

AMADEI, I. B. A. **Avaliação de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição do Município de Juranda/PR**. 153 f. 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Maringá, 2011.

AMARAL, M. B.; *et. al.* **Estudo para utilização de areia de fundição em blocos de pavimentos intertravados**. Unijuí, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **A versatilidade do cimento brasileiro**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/tipos/a-versatilidade-do-cimento-brasileiro>>. Acesso em: 21 set. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. \_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto - especificação**, Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13230:** Embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis – Identificação e simbologia, Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **ABNT NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009

\_\_\_\_\_. **NBR 15953:** Pavimento intertravado com peças de concreto — Execução. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768:** Aditivos para concreto de cimento Portland, Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 13554:** Solo cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

BAPTISTA JUNIOR, J. V., ROMANELI, C. Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras. URBE, **Revista Brasileira de Gestão Urbana**. vol. 5, 27-37, 2013.

BESEN, G. R.; GUNTHER, W. M. R.; RODRIGUES, A.C.. Resíduos sólidos: vulnerabilidades e perspectivas. In: Saldiva et al. **Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles**. Instituto Saúde e Sustentabilidade. 1. ed., São Paulo, p. 107-123, 2010.

BEHL, A., SHARMA, G, KUMAR, G. A sustainable approach: Utilization of waste PVC in asphaltting of roads. **Construction and Building Materials**, v.54, p. 113-117, 2014.

BATAGIN, A.F.; RODRIGUES, H. Recomendações sobre o uso dos distintos tipos de Cimento Portland nas diferentes aplicações. **Revista Concreto e Construções**. São Paulo, ano XLI, jan/mar 2014.

BEGALLI, G.; GABRIELLA, L. **Policloreto de Vinila (PVC) na construção civil**. Universidade Estadual de Campinas, 2012.

BITTENCOURT, S. F. **Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição**. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2012.

BOGGIO, A.J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concretos de Cimento Portland**. 2000. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS, Porto Alegre, 2000.

BRASIL. Resolução CONAMA N° 307, de 05 de julho de 2002 Dispõe sobre gestão dos resíduos da construção civil. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <[www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br)>. Acesso em 20 ago. 2016.

BRASIL. **Lei 12.305**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, Ago 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm). Acesso em 18 set. 2015.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**. 61 (358), 178-189, 2015.

BRASKEM. **Tecnologia do PVC**. São Paulo, 2006. 450p. Disponível em:< <http://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/Download/Upload/Tecnologia>> . Acesso em: 24 ago. 2015.

BRASKEM. **Relatório anual** . São Paulo, 20016. 450p. Disponível em:< <http://https://www.braskem.com.br/relatorioanual2016>> . Acesso em: 24 jun. 2017.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural. São Carlos**. Tese de doutorado de pós-graduação e área de concentração em engenharia de estruturas. Universidade de São Paulo, 2007.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª ed., São Paulo, Câmara Brasileira do Livro, 2006.

CARDOZO, J. S. **Proposta de modelo para reabilitação de área degradada pela extração de argila e areia no município de Morro da Fumaça/SC**. 2006. 77 f. Monografia, 2006.

CARNEIRO, J. E.; LUCA, M. M. M.; OLIVEIRA, M. C. Análise das informações ambientais evidenciadas nas demonstrações financeiras das empresas

petroquímicas brasileiras listadas na Bovespa. **Revista Contabilidade Vista e Revista**. Belo Horizonte, v. 19, n. 3, p. 39-67, 2008.

CARVALHO, E. V. **Utilização do resíduo da retífica de cerâmica de revestimento na produção de concreto para pavimento intertravado**. 161 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2013.

CARVALHO, J. O. **O atual contexto da CFEM para a competitividade da indústria mineral: o caso da indústria do cimento**. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, Brasília, 2016.

CASTRO A.A.; CLARK O.A.C. **Planejamento da pesquisa**. In: Castro AA. Planejamento da pesquisa. São Paulo: AAC; 2001.

CAVALCANTE, et al. Design para a Sustentabilidade – um conceito interdisciplinar em construção. Projética. **Revista Científica de Design**. Londrina, v.3.,n1 julho, 2012.

CHEN, C. *et al.* Environmental Impact of Cement Production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 5, p. 478-485, mar. 2010.

CHIDIAC, S. E.; MIHALJEVIC, S. N. Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 855-863, 2011.

CIEGIS, R., RAMANAUSKIENE, J., MARTINKUS, chiB. The Concept of Sustainable Development and its Use for Sustainability Scenarios. **Revista Engineering Economics**, Lituânia, v.62, p. 28-37, 2009.

COSTA, A. V., GUMIERE, A. G. e BRANDÃO P. R. G. Interlocking concrete blocks produced with sinter feed tailings. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 244-259, 2014.

COSTA, L. A. V. da; IGNÁCIO, R. P. Relações de Consumo x Meio Ambiente: Em busca do Desenvolvimento Sustentável. In: **Âmbito Jurídico**, Rio Grande, XIV, n. 95, dez 2011. Disponível em: <[http://www.ambito-juridico.com.br/site/?n\\_link=revista\\_artigos%20leitura&artigo\\_id=10794&revista\\_caderno=5](http://www.ambito-juridico.com.br/site/?n_link=revista_artigos%20leitura&artigo_id=10794&revista_caderno=5)>. Acesso em dez 2016.

COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. Lisboa: LNEC editora, 1997.

DA SILVA, Fernando. Painéis estruturais pré-moldados maciços de concreto armado para execução de paredes. **Revista Técnica**, 180.ed., dez. 2011.

DAL MOLIN, D. C. C.; KULAKOWSKI, M. P.; RIBEIRO, J. L. D. Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5., p. 37-49, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Sumário Mineral Brasileiro 2011**. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 2011, Disponível em: < <http://www.dnpm.gov.br> > . Acesso em: 7 de Set. 2016.

DOWNING, D. e CLARK, J. **Estatística Aplicada**. Editora Saraiva, 2006.

DUTTA, Suparna; DAS, Arabinda K. Analytical perspective on waste management for environmental remediation. **Revista TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 29, n. 7, p. 636-644, 2010.

FERREIRA, G. C. *et al.* **Caracterização de resíduos da reciclagem de postes de concreto e sua utilização na fabricação de pisos intertravados**. II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, João Pessoa, 2016.

FERNANDES, I. **Blocos e Pavers** – Produção e controle de qualidade. Editora Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais, 7ª ed., Ribeirão Preto, 2013.

GREGORIO, L. T. **Orientações para fabricação de blocos de concreto e Pisos intertravados**. PROJETO SHS Solução Habitacional Simples, Rio de Janeiro/ Cachoeira Paulista, 2012.

GRISA A. M. C., SIMIONI T., CARDOSO V., ZENI M., BRANDALISE R. N., ZOPPAS B. C. D. A.: Biological degradation of PVC in landfill and microbiological evaluation. **Polímeros**, 21, 210-16, 2011.

Guerra, A. N. L. P. **Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro pellet feed em pavimentos de blocos intertravados de concreto**. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

HAGE JUNIOR., Elias. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. **Polímeros**, São Carlos, v. 8, n. 2, p. 6-9, 1998.

HARTMANN, C.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H. Aditivos Químicos para Concretos e Cimentos. *In*: IBRACON. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. São Paulo, 2010.

HELENE,P.; TERZIAN, P. R. **Manual de dosagem e controle de concreto**. Brasília: Pini, 1993.

HOOD, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Dissertação (mestrado), 2006

HUSKEN, G.; BROUWERS, H. J. H. A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**, n. 38, p. 1246- 1259, 2008.

IBEH, C. C. **Thermoplastic Materials - Properties, Manufacturing Methods, and Applications**. Taylor & Francis, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Estimativas populacionais para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros em 01.07.2016** 2016. Disponível em: <

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2016/default.shtm>>. Acesso em: 15 de dez. 2016.

INSTITUTO DO PVC. **Brasil recicla 19% do resíduo de PVC pós-consumo gerado no país**. 2013. Disponível em: <[http://www.institutodopvc.org/publico/?a=imprensa&imp\\_id=236](http://www.institutodopvc.org/publico/?a=imprensa&imp_id=236)>. Acesso em: 23 out. 2015.

ICPI. Slip and Skid Resistance of Interlocking Concrete Pavements. **Tech Spec**, n.13, 2015.

ISMAIL, Z. Z., HASHMI, E.A. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. **Revista Waste Management**, v.28, p. 2041 -2047, 2008.

Jarungthammachote, S., Dutta, A. Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. **Energy** **32**, 1660–1669, 2007.

KACI, S. O. et al. **Approche expérimentale et analytique du béton incorporant des granulats en PVC**. XXX Rencontres AUGC –IBPSA, Chambéry, France, 2012.

KEANE, M. A. **Catalytic conversion of waste plastics: focus on waste PVC**. J Chem Technol Biotechnol 2007.

LAUDONIO, Fabio. 2013. Cimento: Produto é um dos itens mais importantes na construção. **Revista Engenharia Civil**. São Paulo, n 15, p. 18-21, dez. de 2013.

LIMA, A.C., ROCHA, G.S., KONAGANO, N.Y. H. **A utilização de plásticos na construção civil**. COBENGE – XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Belém, 2012.

LOMASO, A.L., 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. 3, n. 2, jan. 2015.

KOU, S.C., et al. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. **Waste Management**. Vol. 29, p. 621 – 628, 2009.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: Rosca única Extrusão & Matrizes Injeção & Moldes**. São Paulo: Artliber, 2005.

MARCHIONI, M. L. **Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. 2012. 111p. Dissertação (mestrado). Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, São Paulo.

MEHTA, K.P.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MORAES, Brenda B. et al. **A Engenharia de Tráfego na Logística de Transporte Rodoviário**. Lins, 2013.

MOTA, M. H. A. **Concreto seco com incorporação de cinzas de madeira de algaroba (prosopis juliflora) moldado sobre pressão**. 2014, 122p. Dissertação

(mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), UFPE, Caruaru, 2014.

NABESHIMA, C. K. Y.; ORSOLIN, K.; SANTOS, R.K.X. **Análise comparativa entre sistemas de pavimentação urbana baseados em concreto asfáltico e blocos de concreto intertravados (pavers)**. Curitiba, 2011.

NEVES, F. O.; MENDONÇA, F. **Por uma leitura geográfico-cultural dos resíduos sólidos: reflexões para o debate na Geografia**. *Cuad. geogr.*, Bogotá, v. 25, n. 1, p. 153-169, Jan. 2016. Disponível em: <[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-215X2016000100011&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2016000100011&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em : 27 dez. 2016.

OLIVEIRA, W. L. A. **Análise teórica e experimental de pilares de concreto armado sob ação centrada com resistência média à compressão do concreto de 40MPa**. Escola de Engenharia de São Carlos, Dissertação (Mestrado), São Carlos, 2004.

OLIVEIRA, L. A. R. **Verificação do método de dosagem mais eficiente para o parâmetro e categoria analisado**. Porto Alegre, 2012.

PAOLI, M.A. **Degradação e Estabilização de Polímeros**. 2ª ed, 2008.

PIATTI, T., RODRIGUES, R. A. F. **Plásticos : características, usos, produção e impactos ambientais**. Maceió: Ed. Edufal, 2005.

PIRES, G. W. M. O.; FILHO PASCHOALIN, J. A. **Blocos intertravados manufaturados com concreto dosado utilizando-se resíduos de PET (Politereftalato de Etileno): Aspectos Econômicos e Ambientais**. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 2015.

PETRUCCI, E. G. B. **Concreto de Cimento Portland**. 14a ed. São Paulo: Globo, 2005.

PURIFICAÇÃO, E. B. **Estudo do uso de agregados reciclados de concreto e substituição do cimento por resíduo de polimento de porcelanato na produção de piso intertravado de concreto**. Dissertação (mestrado). Programa Pós-graduação em Construção Civil, UFMG, Belo Horizonte, 2009.

QING-LEI, S.; XIN-GANG, S.; YUN-LIANG, L.; HE, Z.; XIAO, W.; CHUAN-GE, C.; JIAN-HUA, L. Thermogravimetric-Mass Spectrometric Study of the Pyrolysis

Behavior of PVC. **Journal of China University of Mining e Technology**, vol. 17, nº 2, p. 242–245, 2007.

QUENTAL, A.C.; HANAMOTO, L.S.; FELISBERTI, M.I. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 2005.

RODOLFO JUNIOR., A.; MEI, L. H. I.. Mecanismos de degradação e estabilização térmica do PVC: a review. **Polímeros**, São Carlos , v. 17, n. 3, p. 263-275, 2007 .

RODOLFO JUNIOR, A., NUNES, L. R., ORMANJI, W. **Tecnologia do PVC**. 2. ed., revista ampliada. Pro Editores: São Paulo, 2006.

ROMEIRO, A. R. Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-ecológica. **Revista Estudos Avançados**, v.26, n.74, p.65-92, 2012.

SADAT-SHOJAI, M., BAKHSHANDEH, G. R. Recycling of PVC wastes. **Polymer Degradation and Stability**, Elsevier, p. 404-415, 2010.

SANTOS, V. R. F. **Análise do desempenho de pisos táteis, intertravados produzidos com agregados de resíduos de construção civil – RCC e fibras de aço**. 2014. 117 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

SALVADOR, U. **Química Orgânica 3**. Editora Saraiva, 2000.

SHENHADJI, Y. et al. Effect of incorporating PVC waste as aggregate on the physical, mechanical, and chloride ion penetration behavior of concrete. **Journal of Adhesion Science and Technology**, 2015.

SILVA, J. P. S. Impactos ambientais causados pela mineração. **Revista Espaço da Sophia**, n. 08, novembro, 2007. Disponível em:  
<<http://www.registrounesp.br/sites/museu/basededados/arquivos/00000429.pdf>>.  
Acesso em: 10 de out. 2016.

SILVA, F. M. **Análise da aplicação de resíduo de borracha de pneus em piso tátil intertravado de concreto**. Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

SILVA, V. A.; FERNANDES, A. L. T. Cenário do gerenciamento dos Resíduos da Construção e Demolição (RCD) em Uberaba-MG. **Revista Soc. & Nat.** Uberlândia, ano 24, n. 2, p.333-344, mai/ago. 2012..

SOTO, I., RAMALHO, M. A. Application of residual ash and sisal fiber in the production of mortar and concrete: Review. **Ingeniería y Desarrollo**, Colômbia, 32(2), p. 344-368, 2014

TARTUCE, Eduardo Guida. Sólido e Concreto. **Revista Técnica: a revista do engenheiro civil**. São Paulo, ed. 203, 2014.

TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. Pervious Concrete Pavements. **Portland Cement Association**, Skokie, Illinois, 26 p., 2004.

TOBIAS, A. C. *et. al.* Avaliação dos Impactos Ambientais causados pela extração de areia no leito do Rio Piracanjuba. **Enciclopédia biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.6, n.11; 2010. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2010c/avaliacao%20dos%20impactos.pdf>>. Acesso em: 09 de set. 2016.

VADENBO, Carl; HELLWEG, Stefanie; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, Gonzalo. Multi-objective optimization of waste and resource management in industrial networks – Part I: Model description. **Revista Resources, Conservation and Recycling**, v. 89, p. 52-63, 2014.

VARGAS, D.S. **ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES DO POLICLORETO DE VINILA UTILIZANDO PLASTIFICANTES ALTERNATIVOS AO DIOCTIL FTALATO. 2016. Dissertação (mestrado)**, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2016.

VIANA, M. B. Política e gestão ambiental da atividade minerária e sustentabilidade. **Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados**. Brasília, 2007.

VIANA, B. A. da S. **Caracterização estratigráfica, química e mineralógica do massará e conflitos socioambientais associados a sua exploração em Teresina, PI, Brasil**. 2013. 2012f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-graduação em Geografia do Instituto de Geociências - Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

VIEGAS, C. ; SAKAMOTO, R. Agregados para construção: aspectos, importância e agenda para 2014. **Revista Areia e Brita**. São Paulo, edição 62, 2014.

VIEIRA, A. P. N. B. **Viabilidade técnica da fabricação de compósito utilizando fibra de pneu na fabricação de blocos intertravados**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

VOSS, B. L.; *et al.* Evidenciação ambiental dos resíduos sólidos de companhias abertas no Brasil Potencialmente Poluidoras. **Revista Contabilidade & Finanças**, v. 24, n. 62, p. 125-141, 2013.

**VOTORANTIM** Cimentos. Disponível em: <[http:// http://www.vcimentos.com.br](http://www.vcimentos.com.br)>. Acesso em: 2 nov. 2015.

Wang, C. et al. - **Polymer Testing** 22, p. 453, 2003.

WIEBECK, H., HARADA, J. **Plásticos de engenharia**. Editora Art Liber. 1a ed., São Paulo, 2005.

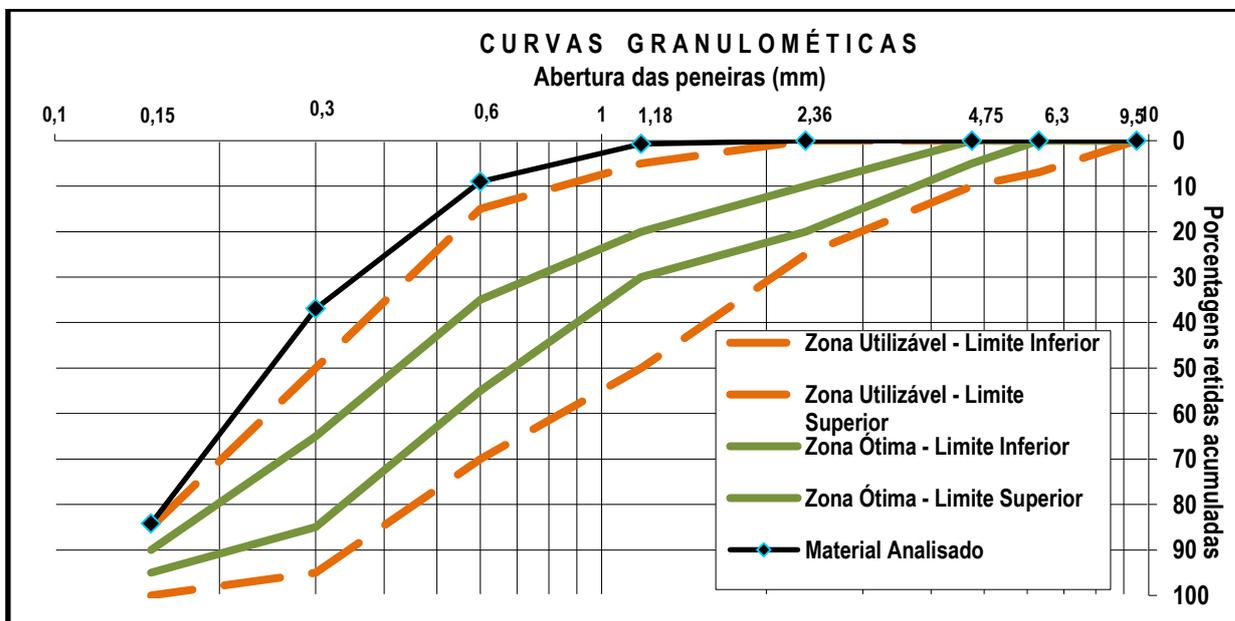
ZARZAR JÚNIOR, F. C.; HOLANDA, M. G. O PVC: Características técnicas, vantagens e relação com o meio ambiente. In: II **Semana Nacional de Ciência e Tecnologia do IFPE**, 2011, Caruaru-PE, 2011.

ZEVENNHOVEN, R., AXELSEN, E., HUPA, M. **Pyrolysis of waste-derived fuel mixtures containing PVC**. P. 507-510, 2002.

ZHU, D. Y.; *et. al.* Self- Self-healing polyvinyl chloride (PVC) based on microencapsulated nucleophilic thiol-click chemistry. **Polymer**, volume 69, p. 1-9, 2015.

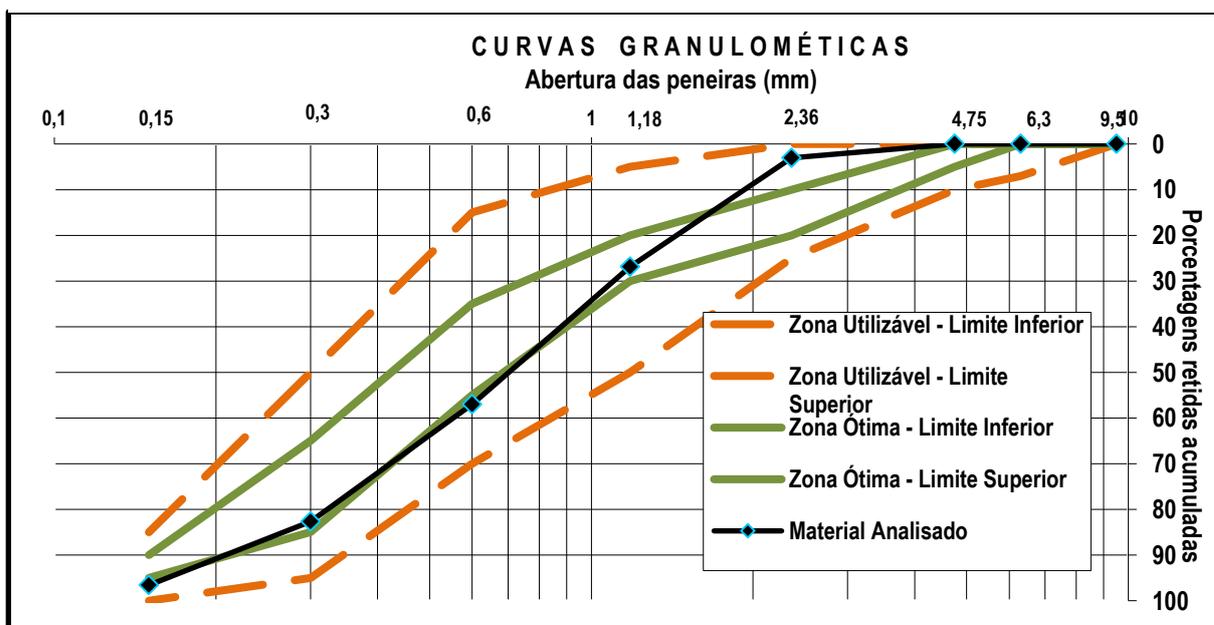
## APÊNDICE

Figura 56 - Curva granulométrica da areia tipo 1



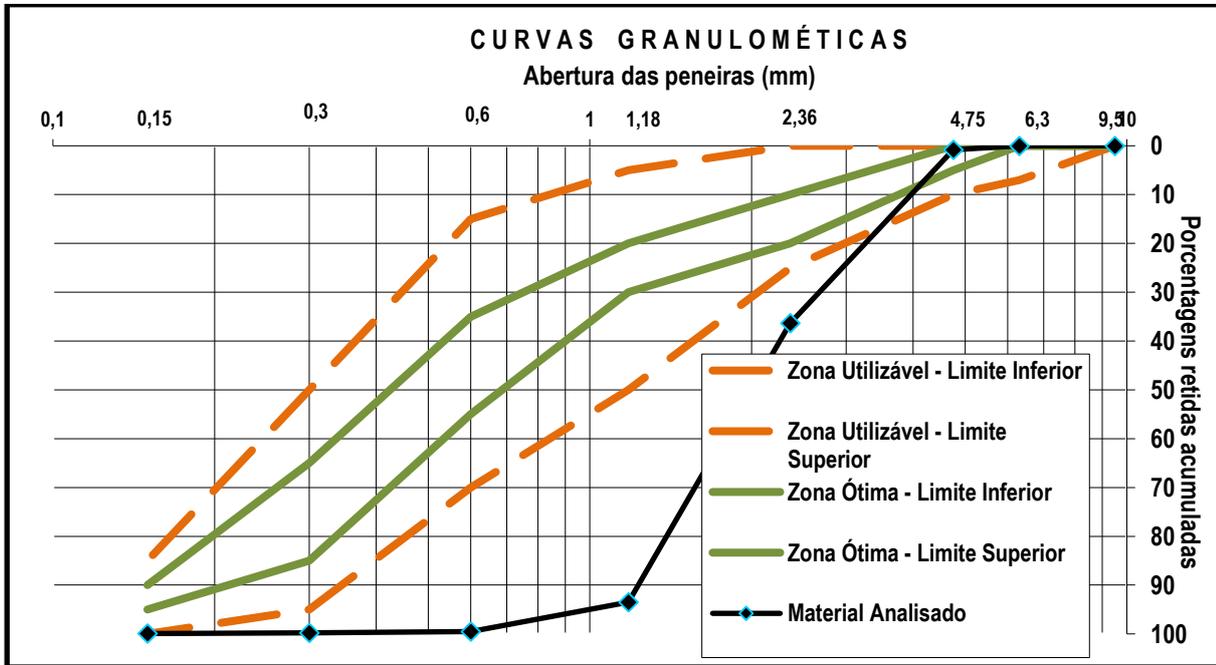
Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Figura 57 - Curva granulométrica da areia tipo 2



Fonte: elaborada pela autora, 2016.

Figura 58 - Curva granulométrica do PVC moído



Fonte: elaborada pela autora, 2016.