

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC  
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA - PROACAD  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM  
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ELIS MACHADO DE OLIVEIRA**

**CONCRETO FABRICADO A PARTIR DA INCORPORAÇÃO DE  
RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE CANUDOS DESCARTÁVEIS  
PARA PAVIMENTO INTERTRAVADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Michael Peterson

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Gonçalves Dal-Bó

**CRICIÚMA  
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

O48c Oliveira, Elis Machado de.

Concreto fabricado a partir da incorporação de resíduos da indústria de canudos descartáveis para pavimento intertravado / Elis Machado de Oliveira. - 2020.

118 p. : il. ; 21 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2020.

Orientação: Michael Peterson.

Coorientação: Alexandre Gonçalves Dal-Bó.

1. Concreto. 2. Pavimentos de concreto. 3. Pavimento intertravado. 4. Resíduos industriais - Reaproveitamento. 5. Resíduos da indústria de canudos plásticos - Reaproveitamento. I. Título.

CDD. 22. ed. 620.136

Elis Machado de Oliveira

Concreto fabricado a partir da incorporação de resíduos da indústria de canudos descartáveis para pavimento intertravado.

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre (a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 19 de fevereiro de 2020.

**Banca Examinadora:**



**Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin**  
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



**Prof. Dr. Elídio Angioletto**  
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

**Prof. Dr. Fernando Pelisser**

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC



Documento assinado digitalmente

Fernando Pelisser  
Data: 21/10/2020 10:54:44-0300  
CPF: 891.548.350-70



A minha família, por todo o incentivo e apoio constante.



## AGRADECIMENTOS

A Deus, por não permitir que eu desistisse nos momentos de dificuldades.

Aos meus pais, Antônio de Oliveira e Maria Helena Machado de Oliveira, por todo o amor e carinho.

As minhas irmãs, Elen Machado de Oliveira e Camila Machado de Oliveira, pelo apoio e contribuição.

Ao meu orientador, Michael Peterson, e coorientador, Alexandre Gonçalves Dal-Bó, pelo auxílio e incentivo no desenvolvimento do trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM/UNESC, pelos conhecimentos compartilhados, e à Vivian, secretária do PPGCEM, pelos esclarecimentos acerca do regimento do Programa.

A empresa Evoplast Indústria de Plásticos, situada no município de São Ludgero/SC, por disponibilizar as aparas de canudos descartáveis e fornecer informações sobre o material.

Ao Instituto de Engenharia e Tecnologia IDT/UNESC e a toda a sua equipe de profissionais e pesquisadores que colaboraram com os ensaios desta pesquisa, especialmente ao pesquisador Rodrigo Cercená e aos Laboratórios de Valoração de Resíduos (LabValora) e de Reatores e Processos Industriais (LabRePI).

Aos colegas de pós-graduação, por toda a amizade e trabalhos desenvolvidos em grupo.

Ao PROSUC - CAPES, Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições Comunitárias de Ensino Superior da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro.

A UNESC, por disponibilizar a sua estrutura, permitindo a elaboração desta dissertação de mestrado.



“Os que desprezam os pequenos  
acontecimentos nunca farão  
grandes descobertas. Pequenos  
momentos mudam grandes rotas.”

Augusto Cury



## RESUMO

A produção mundial de plásticos cresceu significativamente nos últimos anos. Com isso, problemas ambientais associados à sua deposição em aterros sanitários são alvos frequentes de discussões. A construção civil, por se tratar de um setor amplamente difundido, tem buscado práticas mais sustentáveis com a inserção de resíduos em seus produtos. Considerando a quantidade de aparas geradas no processo produtivo de canudos descartáveis, bem como o tipo de polímero base da sua composição, avaliou-se o potencial deste resíduo como material de reforço em peças de concreto para pavimento intertravado em substituição às fibras comerciais de polipropileno. As aparas, após o processo de cominuição, foram submetidas a um tratamento superficial com solução de hidróxido de sódio (NaOH) nas concentrações de 0; 0,25 e 0,5 mol/L (M) e introduzidas no concreto em teores volumétricos de 0,25, 0,5 e 0,75%. Esses parâmetros foram variados segundo a metodologia estatística de um planejamento experimental fatorial e investigaram-se as propriedades de resistência à compressão aos 28 dias, tração na flexão e absorção de água das diferentes composições. As peças também foram avaliadas após 120 dias de exposição às intempéries. Os *pavers* com a adição das aparas foram comparados com as amostras de referência e com as produzidas pela incorporação de fibras de polipropileno. A resistência à compressão aos 28 dias das amostras com a adição das aparas de canudos foi inferior à da referência, mas respeitou o limite de 35 MPa determinado pela ABNT NBR 9781 (2013). O mesmo ocorreu para a absorção de água, que apesar de superior pela maior porosidade das peças, foi inferior a 6%. Estatisticamente, as amostras com aparas tratadas na concentração de 0,25 M e adicionadas em um teor volumétrico de 0,5% apresentaram resistência à tração na flexão semelhante àquela observada para o concreto de referência e com a incorporação da fibra de polipropileno. A absorção de água dos *pavers* com a fibra comercial foi superior à das peças com o resíduo, pois a hidrofobicidade das aparas foi reduzida com o tratamento alcalino, que permitiu uma maior aderência à matriz de concreto. Os resultados alcançados após 120 dias de exposição dos corpos de prova às intempéries revelaram que o ensaio não afetou as amostras negativamente, pois incrementos na resistência à compressão foram observados para todas as composições.

**Palavras-chave:** *Pavers*. Concreto. Reforço. Fibra de polipropileno. Aparas de canudos.



## ABSTRACT

The global plastics production has grown significantly in recent years. Thus, environmental problems associated with their disposal in landfills are frequent targets of discussions. The civil construction, because it is a widespread sector, has been seeking more sustainable practices with the insertion of waste in their products. Considering the amount of scraps generated in the production process of disposable drinking straw, as well as the type of base polymer of the composition, the potential of this waste as reinforcement material in interlocking pavement concrete pieces was evaluated to replace the commercial polypropylene fibers. The scraps, after the comminution process, were surface treated with sodium hydroxide solution (NaOH) at concentrations of 0; 0.25 and 0.5 mol/L (M) and introduced in the concrete in volumetric contents of 0.25, 0.5 and 0.75%. These parameters were varied according on the statistical methodology of factorial experimental design and the properties of compressive strength at 28 days, flexural tensile strength and water absorption of the different compositions were investigated. The pieces were also evaluated after 120 days of exposure to weathering. *Pavers* with the addition of scraps were compared with reference samples and those produced by incorporating polypropylene fibers. The compressive strength at 28 days of the samples with the addition of drinking straw scraps was lower than the reference, but respected the 35 MPa limit determined by ABNT NBR 9781 (2013). The same is true for water absorption, that despite higher due to the higher porosity of the pieces, was less than 6%. Statistically, samples with treated scraps at a concentration of 0.25 M and added at a volumetric content of 0.5% showed flexural tensile strength similar to that observed for the reference concrete and with the incorporation of polypropylene fiber. The water absorption of the pavers with the commercial fiber was higher than the pieces with the waste, since the hydrophobicity of the scraps was reduced with the alkaline treatment, which allowed a greater adherence to the concrete matrix. The results after 120 days of weathering revealed that the test did not affect the samples negatively, as increases in compressive strength were observed for all compositions.

**Keywords:** Pavers. Concrete. Reinforcement. Polypropylene fiber. Drinking straw scraps.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de concentração de tensões para um concreto simples e com reforço de fibras.....	30
Figura 2 - Cilindro de macrofibras poliméricas (a), fibras de polipropileno monofilamentadas (b) e fibras de polipropileno fibriladas (c). .....	32
Figura 3 - Estrutura típica do pavimento intertravado. ....	35
Figura 4 - Deslocamento das peças do pavimento intertravado. ....	36
Figura 5 - Padrões típicos de assentamento das peças de concreto. ....	38
Figura 6 - Fluxograma representativo das principais etapas do procedimento experimental. ....	41
Figura 7 - Aparas de canudos descartáveis. ....	42
Figura 8 - Aparas de canudos após segmentação.....	43
Figura 9 - Fluxograma representativo dos ensaios de caracterização dos materiais. ....	44
Figura 10 - Posicionamento da linha de ruptura fora do terço médio do corpo de prova. ....	54
Figura 11 - Termogravimetria das aparas de canudos sem tratamento em atmosfera de ar sintético.....	59
Figura 12 - FTIR/ATR das aparas de canudos descartáveis. ....	60
Figura 13 - Curvas de DSC das aparas de canudos tratadas e sem tratamento. ....	61
Figura 14 - Imagens de AFM pelo modo de contato intermitente das aparas de canudos descartáveis (a) sem tratamento e tratadas nas concentrações de (b) 0,25 M, (c) 0,5 M e (d) 1,0 M. ....	63
Figura 15 - Difratogramas de raios X das aparas de canudos tratadas na concentração de (a) 0,5 M, (b) 0,25 M, (c) sem tratamento e do (d) porta amostra. Onde 1- polipropileno sindiotático.....	65
Figura 16 - Difratograma de raios X do cimento CP V ARI. Onde 1- silicato de alumínio, magnésio e cálcio e 2- calcita.....	67
Figura 17 - Distribuição da composição granulométrica das areias fina e grossa e limites estabelecidos pela norma.....	69
Figura 18 - Superfície dos <i>pavers</i> para as diferentes composições. ....	70
Figura 19 - Índice de consistência do experimento 6. ....	71
Figura 20 - Absorção de água das diferentes composições. ....	73
Figura 21 - Superfície de resposta para os resultados de absorção de água. ....	74
Figura 22 - Imagens microscópicas das aparas de canudos no contato com a matriz cimentícia, onde: (a) aparas sem tratamento, com destaque para os vazios, e tratadas nas concentrações de (b) 0,25 M e (c) 0,5 M.....	75
Figura 23 - Resistência à tração na flexão das diferentes composições.	76

Figura 24 - Corpo de prova com a incorporação do resíduo após a ruptura. ....	77
Figura 25 - Superfície de resposta para os resultados de resistência à tração na flexão. ....	78
Figura 26 - Superfície de resposta para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias. ....	81
Figura 27 - Comparação entre as resistências à compressão aos 28 dias e após 120 dias de exposição às intempéries. ....	83
Figura 28 - Curva de DSC da fibra de polipropileno comercial. ....	84
Figura 29 - Difratoograma de raios X da (a) fibra de polipropileno e do (b) porta amostra. ....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formato das peças de concreto para pavimento intertravado. ....	37
Tabela 2 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal). ....	47
Tabela 3 - Matriz de dados do planejamento fatorial $2^2 + 3$ . ....	50
Tabela 4 - Especificações técnicas da fibra de polipropileno. ....	51
Tabela 5 - Especificações dos corpos de prova para cada ensaio. ....	52
Tabela 6 - Fator multiplicativo p. ....	55
Tabela 7 - Coeficiente de Student (nível de confiança de 80%). ....	56
Tabela 8 - Grau de cristalinidade das aparas de canudos. ....	62
Tabela 9 - Resistência à tração das aparas de canudos descartáveis comparada com dados da literatura. ....	64
Tabela 10 - Caracterização do agregado miúdo. ....	67
Tabela 11 - Distribuição da composição granulométrica da areia fina. ....	68
Tabela 12 - Distribuição da composição granulométrica da areia grossa. ....	68
Tabela 13 - Distribuição da composição granulométrica da brita nº 0. ....	69
Tabela 14 - Índice de consistência para os diferentes tipos de misturas adotados segundo o planejamento experimental. ....	70
Tabela 15 - Índice de vazios ( $I_v$ ) e massa específica ( $\rho_s$ ) das diferentes composições. ....	71
Tabela 16 - Absorção de água (A) das diferentes composições. ....	72
Tabela 17 - Análise de variância ANOVA para a absorção de água. ....	74
Tabela 18 - Resistência à tração na flexão ( $F_{ct,f}$ ) das diferentes composições. ....	76
Tabela 19 - Análise de variância ANOVA para a resistência à tração na flexão. ....	77
Tabela 20 - Resistência à compressão ( $f_{pi}$ ) aos 28 dias das diferentes composições. ....	79
Tabela 21 - Análise de variância ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias. ....	80
Tabela 22 - Resistência à abrasão das diferentes composições. ....	81
Tabela 23 - Resistência à compressão ( $f_{pi}$ ) das diferentes composições após 120 dias de exposição às intempéries. ....	82
Tabela 24 - Resultados dos ensaios das peças de concreto com a fibra de polipropileno comercial. ....	86
Tabela 25 - Teste F: duas amostras (referência e amostra com resíduo) para variâncias. ....	88

Tabela 26 - Teste t: duas amostras (referência e amostra com resíduo) presumindo variâncias equivalentes.....	88
Tabela 27 - Teste F: duas amostras (referência e amostra com a fibra comercial) para variâncias.....	89
Tabela 28 - Teste t: duas amostras (referência e amostra com a fibra comercial) presumindo variâncias equivalentes. ....	90
Tabela 29 - Teste F: duas amostras (amostra com a fibra comercial e com o resíduo) para variâncias.....	91
Tabela 30 - Teste t: duas amostras (amostra com a fibra comercial e com o resíduo) presumindo variâncias equivalentes. ....	91
Tabela 31 - Teste t: duas amostras (amostra com a fibra comercial e com o resíduo) presumindo variâncias não equivalentes. ....	91

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFM	Microscopia de força atômica
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATD	Análise térmica diferencial
ATR	Reflectância total atenuada
CECAM	Laboratório de Caracterização de Materiais
CerTec	Laboratório de Cerâmica Técnica
CP	Cimento Portland
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
EDS	Espectroscopia de raios X por energia dispersiva
FTIR	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
IDT	Instituto de Engenharia e Tecnologia
LabValora	Laboratório de Valoração de Resíduos
LAPPA	Laboratório de Processamento de Polímeros Avançados
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
NBR	Norma Brasileira
PET	Polietileno tereftalato
PP	Polipropileno
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial



## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Absorção de água
a	Distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e linha correspondente ao apoio mais próximo
$A_c$	Área de carregamento
$A_t$	Área transversal da apara no plano da fratura
b	Largura média do corpo de prova
d	Altura média do corpo de prova
$d_g$	Massa específica do agregado seco
$d_m$	Massa específica do agregado
F	Força máxima registrada na máquina de ensaio
$f_{ct,f}$	Resistência à tração na flexão
$F_f$	Força para a falha
$f_p$	Resistência média das peças
$f_{pi}$	Resistência à compressão das peças
$f_{pk,est}$	Resistência característica estimada à compressão
$I_v$	Índice de vazios
l	Dimensão do vão entre apoios
m	Massa da amostra seca em estufa
$m_1$	Massa do conjunto frasco mais agregado
$m_2$	Massa total, frasco mais agregado mais água
$m_a$	Massa em água da amostra
$m_{ar}$	Massa do recipiente mais o agregado
$m_{as}$	Massa ao ar da amostra seca
$m_i$	Massa da amostra saturada imersa em água após fervura
$m_r$	Massa do recipiente vazio
$m_s$	Massa da amostra na condição saturada com superfície seca
$m_{sat}$	Massa da amostra saturada em água após imersão e fervura
n	Número de peças da amostra
p	Fator multiplicativo em função da altura da peça
P	Carga de ruptura
s	Desvio padrão da amostra
t	Coefficiente de Student
V	Volume do frasco / recipiente
$V_a$	Volume de água adicionada ao frasco
$X_c$	Grau de cristalinidade
$\Delta H^0$	Entalpia de fusão do material 100% cristalino
$\Delta H_f$	Entalpia de fusão das amostras
$\rho_a$	Massa específica da água

$\rho_{ap}$  Massa unitária do agregado  
 $\rho_s$  Massa específica da amostra seca  
 $\sigma_t$  Resistência à tração

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>27</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	27
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>29</b>
3.1 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA .....	29
3.2 PAVIMENTO INTERTRAVADO .....	34
<b>3.2.1 Estrutura do pavimento intertravado</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2.2 Características do revestimento do pavimento intertravado</b> .	<b>36</b>
3.3 FABRICAÇÃO DE CANUDOS DESCARTÁVEIS DE PLÁSTICO .....	39
<b>4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>41</b>
4.1 MATERIAIS .....	41
4.2 MÉTODOS .....	42
<b>4.2.1 Preparação dos materiais</b> .....	<b>42</b>
<b>4.2.2 Caracterização dos materiais</b> .....	<b>43</b>
<b>4.2.3 Dosagem do concreto</b> .....	<b>49</b>
<b>4.2.4 Mistura dos materiais</b> .....	<b>51</b>
<b>4.2.5 Confeção dos corpos de prova</b> .....	<b>52</b>
<b>4.2.6 Ensaios</b> .....	<b>52</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>59</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	59
5.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO .....	70
<b>5.2.1 Fibra de polipropileno comercial</b> .....	<b>83</b>
<b>5.2.2 Comparação entre os resultados</b> .....	<b>87</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>93</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>97</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>109</b>
<b>APÊNDICE A - Tabela de índice de vazios e massa específica das amostras</b> .....	<b>110</b>
<b>APÊNDICE B - Tabela de absorção de água das amostras</b> .....	<b>112</b>
<b>APÊNDICE C - Tabela de resistência à tração na flexão das amostras</b> .....	<b>113</b>
<b>APÊNDICE D - Tabela de resistência à compressão aos 28 dias das amostras</b> .....	<b>114</b>
<b>APÊNDICE E - Tabela de resistência à abrasão das amostras</b> .....	<b>116</b>
<b>APÊNDICE F - Tabela de resistência à compressão após 120 dias de exposição das amostras às intempéries</b> .....	<b>117</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Os plásticos são utilizados em uma variada gama de produtos destinados a diferentes segmentos, principalmente para os setores de embalagem, construção, automotivo, eletrônico e para a agricultura (PLASTICSEUROPE, 2018). Conseqüentemente, a produção mundial cresceu significativamente nas últimas décadas, passando de 0,5 milhão de toneladas em 1950 (THOMPSON et al., 2009) para 348 milhões de toneladas em 2017 (PLASTICSEUROPE, 2018).

Essa crescente demanda desencadeia um problema ambiental global. A maior parte do resíduo é aterrada ou incinerada. Devido aos baixos preços das commodities e à contaminação das embalagens coletadas, um pequeno percentual é reciclado (WAGNER, 2019). Dos 6,3 bilhões de toneladas de resíduos plásticos produzidos até o ano de 2015, apenas 9% foram reciclados, 12% incinerados e o restante (4,9 bilhões de toneladas) foi descartado em aterros sanitários e em ambientes naturais (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Em muitos materiais plásticos, aditivos como plastificantes, retardadores de chama, antioxidantes, pigmentos, estabilizadores são incorporados ao polímero básico para melhorar seu desempenho (por exemplo, durante a moldagem, seja ela por sopro, a vácuo, extrusão, etc.), funcionalidade e propriedades de envelhecimento. Apesar da vasta aplicação desses aditivos, eles são potenciais contaminantes do solo, água e ar (HAHLADAKIS et al., 2018; HERMABESSIERE et al., 2017).

O setor da construção civil, por sua representatividade no cenário mundial, é fortemente influenciado a buscar novos materiais mais sustentáveis, com redução do uso de recursos não renováveis, melhor custo-benefício, desempenho ambiental e eficiência energética (KUTNIK; SUTTIE; BRISCHKE, 2017).

A reutilização de resíduos se tornou um dos meios viáveis para a sustentabilidade na construção civil. O concreto é um dos materiais mais utilizados nesse ramo e muitos resíduos e subprodutos podem ser inseridos em sua produção. Introduzi-los ao processo configura uma maneira útil e eficiente para a sua aplicação (GILL; SIDDIQUE, 2018).

As fibras são empregadas no concreto principalmente para melhorar seu desempenho estrutural. Porém, o uso nas misturas também influencia outras propriedades nos estados frescos e endurecidos, como trabalhabilidade e ductilidade. As mais comuns são feitas de aço, vidro e polipropileno - PP (SIMÕES et al., 2018).

Concretos reforçados com fibras de polipropileno são vistos em áreas extensas, como em estacionamentos, pavimentos, revestimentos

industriais, em tanques de armazenamento de água ou outro produto químico, especialmente pela eficácia das fibras na estabilização de fissuras, contribuindo para a durabilidade do concreto (MYNUDDIN, 2017; SAKETH et al., 2017).

Estudos demonstram que a incorporação da quantidade adequada de fibras de polipropileno melhora a resistência à tração e à flexão do concreto. Archana et al. (2017) salientam que a adição de 0,8% em volume promove o incremento das propriedades, mas quando superado este valor, as mesmas são prejudicadas. Sukontasukkul et al. (2018) observaram que a melhora diminui à medida que o teor de fibras aumenta acima de uma fração volumétrica de 1%. Um alto teor de fibras dificulta o processo de mistura, resultando em má compactação, distribuição não uniforme das fibras e aumento no volume de vazios.

Para o volume gerado de resíduos plásticos e o descarte inadequado, uma alternativa seria utilizá-los como reforço em concretos (KHALID et al., 2018). Diversos trabalhos avaliaram a substituição das fibras comerciais por fibras de polietileno tereftalato (PET) reciclado e obtiveram resultados satisfatórios em relação às propriedades mecânicas do concreto (FRATERNALI et al., 2011; IRWAN et al., 2013; PELISSER et al., 2012; WON et al., 2010).

Blocos de concreto tornaram-se uma opção para a pavimentação pelas vantagens proporcionadas a este sistema: baixo custo de manutenção, rápida liberação do tráfego, boa superfície de rolamento, diferentes padrões de assentamento das peças e facilidade de colocação (GUIMARÃES; RECENA; PEREIRA, 2007).

No Brasil, embora o Distrito Federal, Espírito Santo, Maranhão, Rio Grande do Norte, Santa Catarina sancionaram leis que proíbem o uso de canudos plásticos (CIDADES INTELIGENTES, 2018), estes artefatos representam cerca de 4% de todo o lixo plástico mundial (CARPALLO, 2017), por isso estudou-se a viabilidade das aparas de canudos descartáveis como reforço em peças de concreto para pavimento intertravado, buscando contribuir para a valorização do resíduo e redução deste material em aterros sanitários.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial do resíduo da indústria de canudos descartáveis como material de reforço em concretos em substituição às fibras comerciais de polipropileno.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o resíduo a fim de determinar suas propriedades físicas, químicas e mecânicas;
- Adequar o comprimento e a superfície das aparas de canudos descartáveis para a incorporação em concreto;
- Verificar o volume de incorporação admitido pela mistura de concreto para garantir uma melhor homogeneidade;
- Avaliar o efeito do resíduo sobre o desempenho mecânico das peças de pavimento intertravado para compará-las com aquelas obtidas a partir das fibras de polipropileno comerciais.



### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O concreto, amplamente utilizado na construção civil, tornou-se o segundo material mais consumido do mundo (MONTEIRO; MILLER; HORVATH, 2017). Caracteriza-se por sua alta resistência, densidade, durabilidade, módulo de elasticidade e baixa permeabilidade (LIU; CHO, 2018).

Constituído por cimento, água, agregados, aditivos e adições, seu uso destaca-se pela facilidade de configurar elementos estruturais com diferentes formas e tamanhos, baixo custo e rápida disponibilidade de material para a execução de uma obra. Barragens, revestimentos de canais, pavimentos, fundações, lajes, vigas, muros externos e tubos são produzidos em virtude dessas características (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O concreto é formado por três fases: pasta de cimento hidratada, agregado e a zona de transição. A fase agregado confere principalmente a massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional, sendo estas propriedades dependentes da densidade e resistência do agregado. A resistência e durabilidade do concreto endurecido são fornecidas pela pasta de cimento hidratada. A zona de transição é a fase limitante da resistência do concreto e sua microestrutura, vazios e microfissuras afetam a rigidez e a durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

#### 3.1 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA

O concreto é considerado um compósito por apresentar mais de duas fases distintas (pasta, poros e agregados). Entretanto, quando reforçado com fibras, definem-se como fases principais a própria matriz de concreto e as fibras, que podem ser fabricadas em diferentes materiais como aço, vidro, polipropileno, náilon, dentre outros materiais (FIGUEIREDO, 2011).

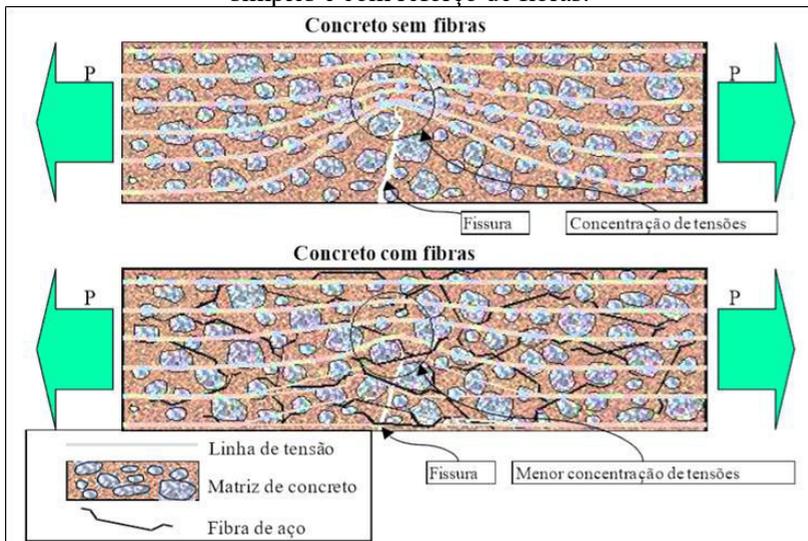
O concreto apresenta diversas características que garantem a ele o título de material estrutural mais utilizado. Porém, possui limitações relacionadas ao seu comportamento frágil e à baixa deformação antes da ruptura quando submetido a um esforço de tração. Logo, sua resistência à tração é reduzida se comparada à sua capacidade de suporte à compressão, em virtude da suscetibilidade às fissuras que podem surgir em seu interior, em muitos casos, pela própria retração da pasta restringida pelo agregado gráúdo. A introdução de fibras como reforço é

uma alternativa técnica adotada para minimizar essa patologia (FIGUEIREDO, 2011).

A menor resistência à tração do concreto está associada à sua dificuldade em cessar a propagação das fissuras. A área disponível para suporte de carga fica restrita, acarretando no aumento das tensões presentes nas extremidades das fissuras quando estas se deslocam transversalmente à direção principal da tensão (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Por exibir uma superfície de ruptura menor, o gasto energético relacionado à ruptura por tração também é reduzido, o que descreve o seu comportamento mais frágil. A ponte de transferência das tensões realizada pelas fibras nas fissuras do concreto propicia o incremento dessa energia e o controle da propagação (FIGUEIREDO, 2011).

A Figura 1 representa a concentração de tensões para o concreto simples e com reforço de fibras. Figueiredo (2011) salienta que para o concreto simples, verifica-se que a fissura representa uma barreira à propagação de tensões, demonstradas por linhas. Isso provoca um desvio, concentrando-as nas bordas das fissuras, levando a uma ruptura frágil do material caso a tensão supere a resistência da matriz.

Figura 1 - Esquema de concentração de tensões para um concreto simples e com reforço de fibras.



Fonte: Figueiredo, 2011.

A presença de fibras, com resistência e módulo de elasticidade adequados e em um teor apropriado, altera o comportamento frágil do concreto. Sua função é servir como ponte de transferência de tensões, diminuindo a concentração das mesmas na extremidade das fissuras e sua velocidade de propagação, resultando em um comportamento pseudo-dúctil ou não frágil. O concreto reforçado com fibra apresenta maior resistência após fissuração quando tracionado (FIGUEIREDO, 2011).

Mehta e Monteiro (2008) destacam que o tipo de fibra e a fração volumétrica exercem influência significativa nas propriedades do concreto reforçado e, convenientemente, são classificados de acordo com as frações volumétricas:

- Baixa fração volumétrica (menor que 1%): utilizada para reduzir a fissuração por retração, é aplicada em lajes e pavimentos com grande superfície exposta;
- Fração volumétrica moderada (entre 1 e 2%): a introdução desta fração volumétrica de fibras incrementa o módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência ao impacto. É empregada em métodos construtivos, como concreto projetado, que requerem capacidade de absorção de energia e resistência ao lascamento, fadiga e delaminação;
- Alta fração volumétrica (maior que 2%): a presença das fibras neste teor ocasiona o endurecimento por deformação dos compósitos. Em virtude do melhor desempenho, os compósitos denominam-se como de alto desempenho reforçados com fibras.

Um alto teor de fibras implica em uma quantidade considerável atravessando uma seção fraturada, o que ativa o mecanismo de resistência à falha e resulta no aumento da resistência à tração da matriz de concreto (KHALID et al., 2018).

A orientação e o posicionamento das fibras também interferem no desempenho final do concreto (ALBERTI; ENFEDAQUE; GÁLVEZ, 2016), assim como a uniformidade de dispersão e a força de adesão entre elas e a matriz (FU et al., 2018).

A fibra de aço longa, macrofibra de polipropileno e fibra de álcool polivinílico configuram-se como fibras grandes e suas funções dentro da matriz de concreto são preencher as fissuras e impedir a sua posterior propagação em grande escala, melhorando o comportamento à flexão. As microfibras, exemplificadas pelas fibras de carbono, polipropileno e aço curto, distinguem-se das anteriores, pois unem as microfissuras e

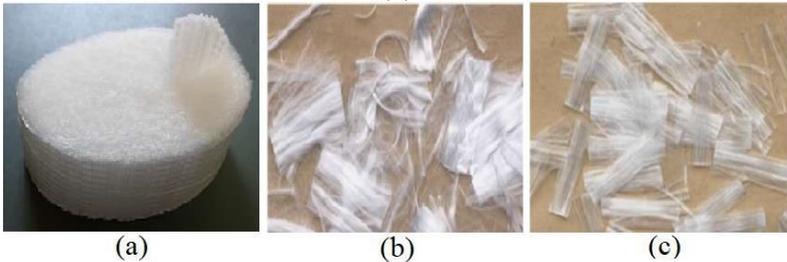
impedem a sua formação e desenvolvimento em pequena escala (LI et al., 2018). Caracterizam-se como microfibras aquelas que apresentam diâmetro inferior à 0,30 mm e como macrofibras as de diâmetro superior a este valor (ABC POLYMER INDUSTRIE, 2017).

Atualmente, as fibras mais utilizadas em concreto são de aço, vidro, carbono e sintéticas. Porém, nos últimos anos, pelas suas excelentes propriedades como baixa densidade, pequeno diâmetro de filamento, preço compatível, resistência a ácidos e álcalis e fácil dispersão, as fibras sintéticas ganharam maior espaço no setor de engenharia (CHEN; CEN; CUI, 2018).

As fibras de polipropileno vêm sendo empregadas como reforço em materiais à base de cimento Portland em consequência da sua alta tenacidade e durabilidade (RANJBAR et al., 2016).

Divididas em dois grupos, as macrofibras (Figura 2(a)) são adequadas para reforço estrutural com o mesmo objetivo das fibras de aço. As microfibras são fornecidas na forma de monofilamentos (Figura 2(b)) constituídos em fios cortados em comprimentos padrões ou sob a forma de uma malha de finos filamentos de seção retangular, chamadas de fibriladas (Figura 2(c)) (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 2 - Cilindro de macrofibras poliméricas (a), fibras de polipropileno monofilamentadas (b) e fibras de polipropileno fibriladas (c).



Fonte: Figueiredo, 2011.

Das et al. (2018) estudaram o acréscimo, em volume, de 0,5%, 0,75% e 1% de fibras de polipropileno no concreto, identificando que o teor ótimo de fibras é de 0,5%. Teores maiores inviabilizaram a distribuição uniforme em virtude da menor trabalhabilidade e mistura inadequada. Dessa forma, as fibras acumularam-se e formaram pontos mais fracos que atuaram como vazios, deixando o concreto mais

suscetível à fissuração, provocando a redução da resistência à compressão.

Zhang et al. (2018) avaliaram teores de fibras de 0,8, 1,2, 1,6, 2,0, e 5,0 kg/m<sup>3</sup> com diferentes relações de água/cimento (0,4, 0,5 e 0,6). Os autores observaram que ao exceder uma determinada quantidade de fibra, a resistência à compressão foi menor que a do concreto simples, sendo esta quantidade de 1,6 kg/m<sup>3</sup> para as relações de 0,4 e 0,5 e 1,2 kg/m<sup>3</sup> para a relação de 0,6. O uso dessas fibras é mais adequado para concretos com maiores relações de água/cimento, pela melhor trabalhabilidade e dispersão uniforme das fibras. Para eles, a redução da resistência à compressão é menos acentuada.

Ramezaniapour et al. (2013) constataram que as resistências máximas à tração e flexão para o concreto são obtidas com a incorporação de 0,7 kg/m<sup>3</sup> de microfibras de polipropileno, com um acréscimo, em relação à mistura de controle, de 39% e 10%, respectivamente. Já a resistência à compressão é reduzida em 8,8%.

As fibras de polipropileno, por serem de natureza hidrofóbica, frequentemente apresentam uma má ligação com os compósitos de concreto. Baseado nisso, Akand, Yang e Wang (2018) avaliaram diferentes tratamentos químicos aplicados a elas com o intuito de melhorar sua adesão à matriz. A rugosidade da fibra tratada com acetato de polivinila aumentou em mais de três vezes em relação a não tratada e com dicromato de ácido sulfúrico, quase duas vezes. Esses resultados refletiram na excelente resistência ao cisalhamento interfacial obtido para as amostras de concreto, assim como na resistência à flexão.

Para aumentar a adesão da fibra de polipropileno à matriz cimentícia, López-Buendia et al. (2013) realizaram um tratamento alcalino. Modificações superficiais levaram a um aumento da rugosidade da fibra, permitindo uma melhora das propriedades mecânicas do concreto em comparação ao compósito com fibras sem tratamento.

Castoldi, Souza e De Andrade Silva (2019), por meio de um estudo comparativo do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal, verificaram que para alcançar a mesma resistência residual, um maior teor de fibra de sisal é necessário, pois a alta absorção deste material prejudica o desempenho.

Chen, Zhong e Zhang (2020) investigaram as propriedades do concreto com a adição (em volume) de 0,1; 0,2; 0,4; e 0,8% de fibra de polímero de pneu reciclado e compararam com amostras de referência e com a incorporação de 0,1% de microfibras de polipropileno. A resistência à compressão do concreto com ambos os materiais de reforço foi inferior à referência. Já para a resistência à tração na flexão, as fibras de polímero

de pneu reciclado melhoraram o desempenho do concreto, sendo que para o teor de 0,2%, o resultado se mostrou semelhante ao alcançado com a fibra de polipropileno, indicando que ela pode ser substituída por uma maior quantidade de fibra de polímero de pneu reciclado.

Shen et al. (2020) produziram misturas de concreto com a introdução de 8 kg/m<sup>3</sup> de fibras plásticas de polipropileno em três comprimentos distintos, 42, 54 e 60 mm, com o objeto de investigar o efeito do comprimento na resistência à fissuração do concreto de alto desempenho. Os autores relataram que o aumento do comprimento reduz a resistência à fissuração do concreto, fato que pode estar relacionado à mudança da distribuição de tensões provocada pelas fibras longas, o que facilita a fissuração, e também à dispersão não uniforme das fibras que gera defeitos internos.

## 3.2 PAVIMENTO INTERTRAVADO

O pavimento intertravado apresenta excelentes propriedades que fortaleceram sua utilização. A facilidade de construção permite a rápida substituição das peças de concreto, promovendo menos desperdícios de material e horas trabalhadas, tornando-o mais sustentável em relação às estruturas convencionais de asfalto e concreto (MURUGAN; NATARAJAN; CHEN, 2016).

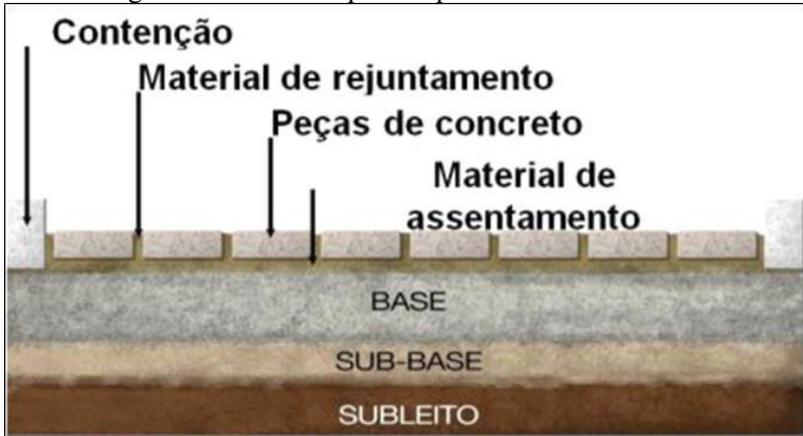
### 3.2.1 Estrutura do pavimento intertravado

O pavimento, que se caracteriza por uma estrutura com diferentes camadas de espessuras finitas, é construído sobre a superfície de terraplanagem e pode ser classificado em flexível e rígido. Sua principal função é resistir aos esforços resultantes do tráfego de veículos e do clima, além de oferecer aos usuários conforto, segurança e condições de rolamento (BRASIL, 2017). O pavimento flexível permite deformações locais, que o diferencia do rígido (ALSAIF et al., 2018).

Segundo a ABNT NBR 9781 (2013), o pavimento intertravado classifica-se como um pavimento flexível, sendo sua estrutura composta por uma camada de base (ou base e sub-base) e uma de assentamento, revestida por peças de concreto justapostas. As juntas entre elas são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é assegurado pelas contenções laterais.

A Figura 3 representa uma estrutura de pavimento intertravado e suas camadas.

Figura 3 - Estrutura típica do pavimento intertravado.



Fonte: Silva, s.d.

A camada de assentamento acomoda as peças de concreto, promovendo o correto nivelamento do pavimento, sendo composta por material granular (ABCP, 2010).

A camada de base, a mais importante estruturalmente, tem como finalidade resistir aos esforços do tráfego e os distribuir para as camadas subjacentes, transmitindo-os de forma mais atenuada (BRASIL, 2017).

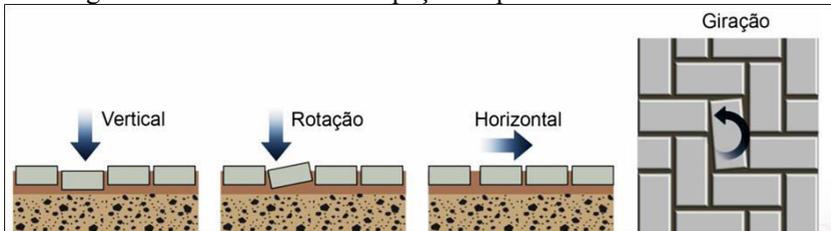
A sub-base é uma camada complementar, executada quando, por questões técnicas ou financeiras, não for possível construir somente a camada de base sobre o subleito. Utilizada para reduzir a espessura da base, tem como função as mesmas descritas para ela (BRASIL, 2017).

O subleito é constituído de solo natural ou de empréstimo, devendo ser compactado antes de receber as camadas superiores (ABCP, 2010).

A contenção lateral impede o deslocamento das peças, promovendo o seu intertravamento juntamente com a areia de selagem das juntas, que proporciona a transferência dos esforços entre as peças de forma que resistam simultaneamente às cargas solicitantes. O intertravamento do sistema, definido como a capacidade dos blocos em resistir a movimentos de deslocamento individual, na vertical, horizontal ou de rotação em relação aos seus vizinhos, propicia um melhor desempenho e durabilidade ao pavimento (ABCP, 2010).

A Figura 4 exemplifica os movimentos sofridos pelas peças na ausência do intertravamento.

Figura 4 - Deslocamento das peças do pavimento intertravado.



Fonte: Silva, s.d.

### 3.2.2 Características do revestimento do pavimento intertravado

As peças de concreto podem apresentar diferentes formatos, agrupados em quatro categorias pela ABNT NBR 9781 (2013), representados na Tabela 1.

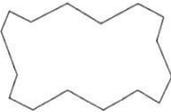
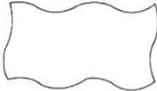
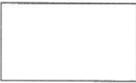
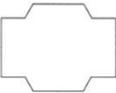
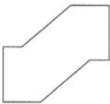
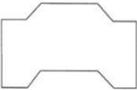
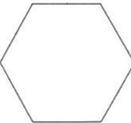
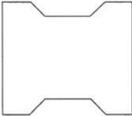
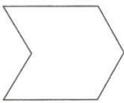
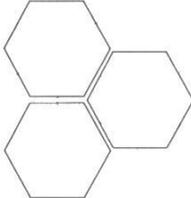
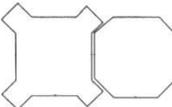
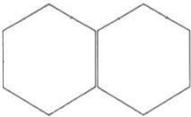
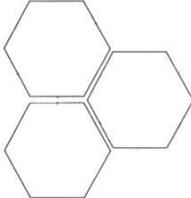
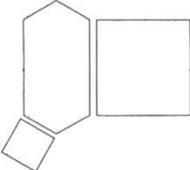
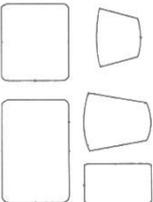
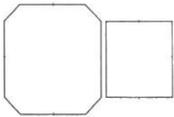
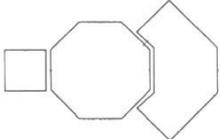
O tipo I refere-se a peças de concreto com formato próximo ao retangular que se arranjam entre si nos quatro lados, com relação entre comprimento e largura igual a dois. O assentamento pode ser realizado em fileiras ou espinha de peixe.

O tipo II compreende peças com formato único diferente do retangular, podendo somente ser assentadas em fileiras.

O tipo III abrange peças com peso superior a quatro quilos e com formatos geométricos diferenciados, como trapézios, hexágonos, triedros, dentre outros.

O tipo IV engloba peças de concreto com diferentes tamanhos ou uma única peça com juntas falsas e elas podem ser assentadas com um ou mais padrões.

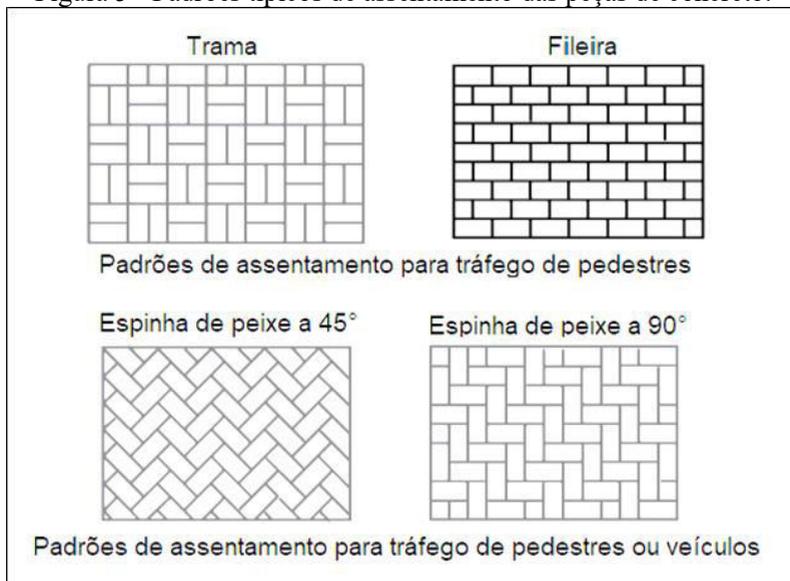
Tabela 1 - Formato das peças de concreto para pavimento intertravado.

Tipo	Modelos dos formatos		
Tipo I			
Tipo II			
Tipo III			
Tipo IV			
			
			

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9781, 2013.

As peças de pavimento intertravado podem ser dispostas de diferentes maneiras, demonstradas na Figura 5. Segundo a Especificação Técnica 10 (TECH SPEC 10, 2015), os padrões de espinha de peixe a 45° e 90° são recomendados para áreas sujeitas ao tráfego de veículos, pois fornecem o máximo intertravamento e desempenho estrutural.

Figura 5 - Padrões típicos de assentamento das peças de concreto.



Fonte: Adaptado de TECH SPEC 10, 2015.

Para calçadas residenciais recomenda-se *pavers* com espessura de 60 mm, para tráfego de veículos, normalmente exigem-se peças com 80 mm. *Pavers* com 100 e 120 mm de espessura são empregados em pavimentos comerciais que utilizam cargas pesadas (TECH SPEC 10, 2015).

A ABNT NBR 9781 (2013) especifica que as peças de concreto não devem apresentar valores médios de absorção de água superiores a 6%. Em relação à resistência à compressão aos 28 dias, para pavimentos com tráfego de pedestres, veículos leves e comerciais de linha, deve ser igual ou superior a 35 MPa, já para tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de promover abrasões acentuadas, a resistência mínima é de 50 MPa. Murugan, Natarajan e Chen (2016) destacam que a durabilidade do pavimento depende principalmente da resistência e qualidade dos blocos.

Navya e Rao (2014) salientam que o uso de fibras em peças de concreto para pavimentos eleva a resistência à compressão, flexão, ao impacto e abrasão, aumentando a qualidade e vida útil do pavimento pela maior durabilidade fornecida aos blocos.

Kundu, Chakraborty e Chakraborty (2018) realizaram estudos introduzindo 1% de fibra de juta, em relação ao peso do cimento, na

produção de *pavers*. Foram formuladas quatro composições, a de referência, as com fibra de juta não modificada e fibra de juta modificada com polímero à base de água e outra incorporando também uma mistura natural à base de plantas (tanino). Ambas as formulações demonstraram resultados superiores de resistência à compressão e à flexão em relação à amostra de referência, porém, as fibras de juta modificadas apresentaram as melhores respostas para estes esforços, 19% e 31% de acréscimo, respectivamente, para as modificadas com polímero, e 30% e 49% na presença do tanino. O tratamento realizado nas fibras proporcionou melhor aderência entre elas e à matriz de concreto, comprovada pelas análises de microscopia eletrônica, aumentando as resistências.

### 3.3 FABRICAÇÃO DE CANUDOS DESCARTÁVEIS DE PLÁSTICO

Historicamente, os canudos eram produzidos de papel, mas na atualidade, o polipropileno é o material mais comum, pois apresenta diversas propriedades que o tornam adequado para este fim (SCHUELLER, [s.d.]).

Os artefatos de polipropileno são leves, apresentam boa rigidez, alta resistência ao envelhecimento (JMAL et al., 2018), normalmente não exibem problemas com fissuras por tensão, têm excelente resistência química a altas temperaturas, possuem boas propriedades termoplásticas que permitem ser formados em diferentes configurações e, ao serem reaquecidos, moldados novamente (LIU; CHENG; LI, 2018). Outra característica essencial é a segurança para contato com alimentos e bebidas, por isso que, além dos canudos, esse polímero é utilizado em embalagens de margarina, iogurte, garrafas e tampas (SCHUELLER, [s.d.]).

Os canudos são confeccionados a partir de uma mistura formulada de resina plástica, corantes e outros aditivos. Os materiais adicionados para controlar as propriedades do canudo acabado são os plastificantes, para aumentar a flexibilidade do polipropileno, antioxidantes, para diminuir as interações prejudiciais entre o plástico e o oxigênio do ar, estabilizadores, que incluem os filtros de luz ultravioleta para proteger o material contra as implicações causadas pela radiação, e enchimentos inertes, que podem ser adicionados para elevar a densidade do plástico (SCHUELLER, [s.d.]).

A fabricação dos canudos inicia-se com a mistura da resina de polipropileno com os plastificantes, corantes, antioxidantes, estabilizantes e cargas na forma de pó, que são inseridos em uma extrusora que incorpora e funde o material enquanto percorre o canal do

equipamento. A mistura de plástico fundida é forçada a passar por orifícios para que permaneça na forma de fios com 0,3175 cm de diâmetro que, após o resfriamento, são cortados na forma de *pellets* (SCHUELLER, [s.d.]).

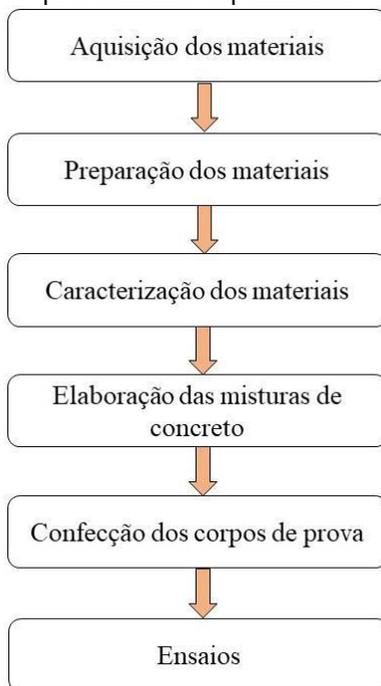
Os *pellets* são transferidos para outra extrusora que os transformam em tubos ocos com extenso comprimento. Em seguida, são movidos por um extrator, para que suas formas sejam alteradas, e encaminhados até o resfriamento. O último processo consiste no corte dos tubos no comprimento adequado por um conjunto de facas (SCHUELLER, [s.d.]).

O principal produto residual da fabricação dos canudos é a resina plástica. Segundo informações de uma empresa da região sul de Santa Catarina, em um dia de produção, sem adversidades como problemas mecânicos, quedas ou picos de energia e trocas de produtos, na produção dos canudos, 1 a 1,2% tornam-se aparas. Parte desse material é passível de reutilização.

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As principais etapas do procedimento experimental encontram-se no fluxograma da Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma representativo das principais etapas do procedimento experimental.



Fonte: Do autor, 2020.

O detalhamento das etapas é apresentado nas seções seguintes.

### 4.1 MATERIAIS

As aparas de canudos foram fornecidas por uma empresa do município de São Ludgero/SC e são demonstradas na Figura 7.

Figura 7 - Aparas de canudos descartáveis.



Fonte: Do autor, 2020.

O cimento escolhido foi o CP V ARI e como agregado miúdo, as areias fina e grossa, e agregado graúdo a brita nº 0.

Para o tratamento superficial do resíduo utilizou-se o hidróxido de sódio P.A. (Dinâmica Química Contemporânea Ltda, pureza  $\geq 97\%$ ).

A fibra de polipropileno comercial empregada foi a FibroMac 12 da marca MACCAFERRI.

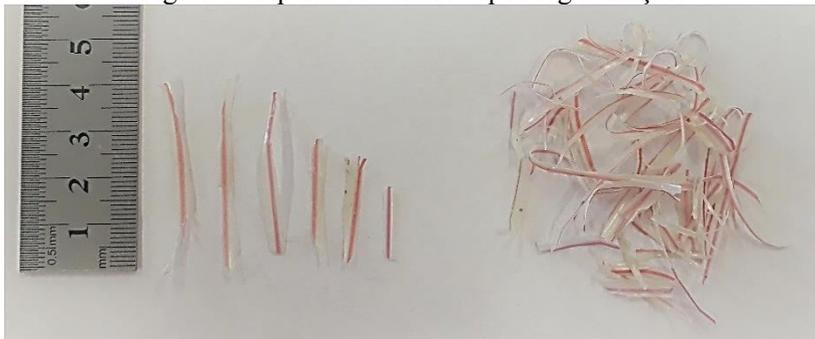
## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Preparação dos materiais

As aparas de canudos, após o corte em segmentos de 4 cm, foram conduzidas a um liquidificador caseiro (marca Britânia) para adequação da forma e do tamanho do resíduo para incorporação no concreto (Figura 8). Com base no trabalho de Saravanan e Devaraju (2018), que imergiram bainhas de palma em soluções de hidróxido de sódio nas concentrações de 0,25 M e 0,5 M, para melhorar a aderência com a matriz de concreto por meio de alterações superficiais, o mesmo procedimento foi executado para o resíduo. Amostras de 150 g foram imersas em 2 litros de solução e

o sistema permaneceu sob agitação mecânica durante duas horas. Ao final do processo, o material foi lavado com água deionizada e seco.

Figura 8 - Aparas de canudos após segmentação.

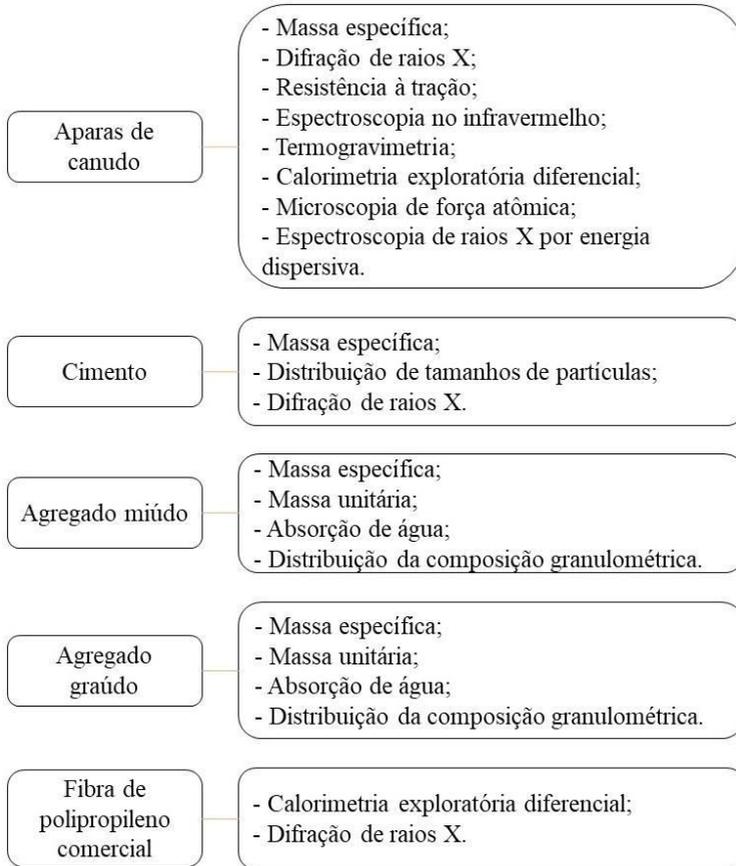


Fonte: Do autor, 2020.

#### **4.2.2 Caracterização dos materiais**

O fluxograma da Figura 9 representa os ensaios de caracterização dos materiais constituintes do concreto.

Figura 9 - Fluxograma representativo dos ensaios de caracterização dos materiais.



Fonte: Do autor, 2020.

A determinação da massa específica do agregado miúdo seguiu as recomendações descritas na ABNT NBR NM 52 (2009), sendo obtidas por meio das Equações 1 e 2. O procedimento foi realizado no Laboratório de Valoração de Resíduos (LabValora), pertencente ao Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT/UNESC).

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a}$$

(1)

Onde

$V_a$ : volume de água adicionada ao frasco ( $\text{cm}^3$ );

$m_1$ : massa do conjunto frasco mais agregado (g);

$m_2$ : massa total, frasco mais agregado mais água (g) e

$\rho_a$ : massa específica da água ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$$d_m = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (2)$$

Onde

$d_m$ : massa específica do agregado ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m$ : massa da amostra seca em estufa (g);

$V$ : volume do frasco ( $\text{cm}^3$ ) e

$m_s$ : massa da amostra na condição saturada com superfície seca (g).

O agregado saturado superfície seca refere-se às partículas que atingiram o grau de saturação, porém mantêm a superfície seca como consequência da ação de uma suave corrente de ar (ABNT NBR NM 52, 2009).

Para o agregado gráudo, adotou-se o ensaio descrito pela ABNT NBR NM 53 (2009) e a massa específica foi determinada pela Equação 3.

$$d_g = \frac{m_{as}}{m_{as} - m_a} \quad (3)$$

Onde

$d_g$ : massa específica do agregado seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m_{as}$ : massa ao ar da amostra seca (g) e

$m_a$ : massa em água da amostra (g).

A ABNT NBR NM 53 (2009) designa a massa ao ar da amostra seca como “m”. Contudo, essa representação foi citada na Equação 2 da massa específica do agregado miúdo. Por isso, adotou-se o símbolo  $m_{as}$  para massa ao ar da amostra.

A diferença ( $m_{as} - m_a$ ) é numericamente igual ao volume do agregado, incluindo os vazios permeáveis (ABNT NBR NM 53, 2009).

A massa específica do cimento e das aparas de canudos foram avaliadas por picnometria a gás hélio (picnômetro Quantachrome, modelo Ultrapyc 1200e) no Laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec) do IDT/UNESC.

Calculou-se a massa unitária dos agregados miúdo e graúdo segundo a metodologia da ABNT NBR NM 45 (2006), aplicando a Equação 4. O ensaio foi conduzido no LabValora/IDT/UNESC.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (4)$$

Onde

$\rho_{ap}$ : massa unitária do agregado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$m_{ar}$ : massa do recipiente mais o agregado (kg);

$m_r$ : massa do recipiente vazio (kg) e

V: volume do recipiente ( $\text{m}^3$ ).

Verificou-se a absorção de água dos agregados miúdo e graúdo com a metodologia descrita nas normas ABNT NBR NM 30 (2001) e ABNT NBR NM 53 (2009), respectivamente, empregando a Equação 5.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (5)$$

Onde

A: absorção de água (%).

Para os agregados miúdo e graúdo, o valor da massa seca foi obtido após a secagem do material em estufa à temperatura de  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Realizou-se o ensaio no LabValora/IDT/UNESC.

Para identificar a distribuição da composição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo, suas dimensões máximas características e seus módulos de finura, adotou-se os procedimentos da ABNT NBR NM 248 (2003).

As amostras foram secas em estufa a  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  por um período de 24 horas. Após resfriadas à temperatura ambiente, inseriram-se 1.000 g em porções na peneira superior do conjunto, cujas malhas se encontram na Tabela 2. Após agitação, foram identificadas as massas retidas em cada peneira. Executou-se o ensaio no LabValora/IDT/UNESC.

Tabela 2 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

Série normal	Série intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
0,60 mm	-
0,30 mm	-
0,15 mm	-

Fonte: ABNT NBR NM 248:2003.

Com os percentuais retidos acumulados, foi determinada a dimensão máxima característica do agregado e o módulo de finura pelos critérios estabelecidos pela mesma norma:

- A dimensão máxima do agregado corresponde à abertura nominal da peneira da série normal ou intermediária, em milímetros, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa;
- O módulo de finura se define pela soma dos percentuais retidos acumulados em massa de um agregado nas peneiras da série normal dividida por 100.

A distribuição de tamanho de partícula do cimento foi estimada em granulômetro a laser Cilas 1064, com o material disperso em água e faixa de leitura de 0,04 - 500  $\mu\text{m}$ , do Laboratório de Caracterização de Materiais (CECAM), pertencente ao IDT/UNESC.

Os difratogramas de raios X do cimento, da fibra de polipropileno comercial e das aparas de canudos antes e após o tratamento superficial

foram obtidos com um difratômetro Shimadzu XRD-6000 do CECAM/IDT/UNESC, radiação  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ), tensão de 25 kV e 25 mA de corrente elétrica. O intervalo de medida em  $2\theta$  foi de 10 a  $80^\circ$  com velocidade de varredura de  $2^\circ/\text{min}$ .

A determinação da resistência à tração das aparas de canudos baseou-se na metodologia descrita na ASTM C1557 (2014). Utilizaram-se cinco canudos com comprimentos de dez centímetros que foram tracionados em máquina universal de ensaios mecânicos EMIC DL 10000 com velocidade de carregamento de 300 mm/min. A norma estabelece que a velocidade aplicada seja suficiente para provocar a ruptura em 30 segundos. Porém, devido às limitações do equipamento, esse tempo não foi respeitado. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do IDT/UNESC.

A seção transversal da apara foi avaliada com um paquímetro e com isso a resistência foi calculada por meio da Equação 6.

$$\sigma_t = \frac{F_f}{A_t} \quad (6)$$

Onde

$\sigma_t$ : resistência à tração (Pa);

$F_f$ : força para a falha (N) e

$A_t$ : área transversal da apara no plano da fratura ( $\text{m}^2$ ).

A ASTM C1557 (2014) designa a área transversal da apara no plano de fratura como “A”. Contudo, essa representação foi citada na Equação 5 da absorção de água dos agregados. Por isso, adotou-se o símbolo  $A_t$ .

A resistência à tração das aparas tratadas em solução de hidróxido de sódio também foi avaliada.

A análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) das aparas de canudos aconteceu em um espectrofotômetro Bruker Tensor II com acessório de reflectância total atenuada (ATR) do LabValora/IDT/UNESC, na região de 4.000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$  e 200 varreduras.

As aparas de canudos foram submetidas à análise termogravimétrica em um analisador térmico simultâneo NETZSCH STA 449 F3 Jupiter do LabValora/IDT/UNESC. O aquecimento foi conduzido de 35  $^\circ\text{C}$  a 400  $^\circ\text{C}$ , a uma taxa de aquecimento de 5  $^\circ\text{C}/\text{min}$ , com

atmosfera de ar sintético, fluxo de 40 cm<sup>3</sup>/min e com um cadinho de alumina.

O cálculo do grau de cristalinidade das aparas de canudos antes e após o tratamento superficial e da fibra de polipropileno comercial se deu pela Equação 7.

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H^0} \times 100 \quad (7)$$

Onde

$X_c$ : grau de cristalinidade (%);

$\Delta H_f$ : entalpia de fusão das amostras (J.g<sup>-1</sup>) e

$\Delta H^0$ : entalpia de fusão do material 100% cristalino (J.g<sup>-1</sup>).

A entalpia de fusão das amostras foi estimada por meio da curva de DSC obtida com um equipamento da marca NETZSCH, modelo DSC 3500 do Laboratório de Processamento de Polímeros Avançados (LAPPA/IDT/UNESC). A análise foi conduzida em um cadinho de alumínio, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/ min, de 0 °C a 200 °C e sob atmosfera de nitrogênio.

A fim de investigar as alterações superficiais promovidas pelo tratamento das aparas de canudos com hidróxido de sódio, amostras tratadas e não tratadas foram avaliadas por microscopia de força atômica (AFM) em microscópio SHIMADZU SPM-9700 do LAPPA/IDT/UNESC operando no modo de contato intermitente e fornecendo imagens de topografia. As imagens foram feitas com 512 x 512 pixels, com tamanhos entre 20 e 30 µm.

Para verificar se o tratamento com NaOH deixou traços de sódio na superfície das aparas de canudos, os materiais tratados e não tratados foram analisados em microscópio eletrônico de varredura ZEISS EVO MA10 equipado com um detector Bruker XFlash 6 | 10 de espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS) do CerTec/IDT/UNESC.

### 4.2.3 Dosagem do concreto

A dosagem inicial do concreto adotada baseou-se no trabalho de Fernandes (2015). O traço, em massa, empregado foi de 1:1,8:2,4:1,8 para cimento, areia fina, areia grossa e brita nº 0, respectivamente. Após os resultados dos testes preliminares de resistência à compressão, foi alterado para 1:1,5:1,5:2,5 para respeitar a resistência mínima exigida

pela ABNT NBR 9781 (2013) de 35 MPa. Aplicou-se a relação água/cimento de 0,55 para todas as diferentes composições, que se distinguem pelo teor volumétrico das aparas de canudos incorporadas, 0,25%, 0,5% e 0,75%.

Parâmetros como teor de fibras e a concentração de hidróxido de sódio utilizada no tratamento químico das aparas de canudos foram definidos segundo a metodologia estatística de um planejamento fatorial  $2^k$  com dois fatores e um ponto central em triplicata, apresentado na Tabela 3.

As variáveis resposta do planejamento descrito foram a resistência à tração na flexão, absorção de água e resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 3 - Matriz de dados do planejamento fatorial  $2^2 + 3$ .

Experimento	Níveis		Fatores	
			Teor de resíduo (%)	Concentração da solução de NaOH (M)
1	-1	-1	0,25	0,00
2	+1	-1	0,75	0,00
3	-1	+1	0,25	0,50
4	+1	+1	0,75	0,50
5	0	0	0,50	0,25
6	0	0	0,50	0,25
7	0	0	0,50	0,25

Fonte: Do autor, 2020.

Para avaliar se as aparas de canudos descartáveis conferem ao concreto as mesmas propriedades que as fibras de polipropileno comerciais, uma mistura com o mesmo traço, porém com o teor de fibras indicado pelo fabricante, foi realizada a fim de verificar a possibilidade de substituição do material pelo resíduo.

Embora o fabricante indique que a recomendação mínima é de 600 g/m<sup>3</sup> de concreto (teor volumétrico de 0,066%), outras empresas destacam que esta é a concentração ideal (BAUTECH, [s.d.]; MULTNELL, [s.d.]). As especificações técnicas da fibra se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações técnicas da fibra de polipropileno.

Diâmetro	18 $\mu\text{m}$
Seção	Circular
Comprimento	12 mm
Alongamento	80%
Massa específica	0,91 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de fusão	160 °C
Temperatura de ignição	365 °C
Resistência à tração	300 MPa
Módulo de Young	3.000 MPa
Campos de aplicação indicados	Concreto projetado, pré-fabricados, pavimentos, pisos e revestimento.
Dosagem (recomendação mínima)	600 g/m <sup>3</sup> de concreto

Fonte: Adaptado de MACCAFERRI, 2008.

As propriedades físicas e mecânicas do concreto sem adição das aparas de canudos (referência) foram comparadas com as das amostras cuja adição conciliou os melhores resultados por meio dos testes para comparação de duas variâncias (Teste F) e teste para comparação de duas médias (Teste t). Os mesmos procedimentos estatísticos foram adotados para confrontar os dados das amostras com a incorporação de fibra de polipropileno comercial. Para as análises, empregou-se o *software Excel*.

#### 4.2.4 Mistura dos materiais

Realizou-se a mistura dos materiais conforme as especificações da ABNT NBR 12821 (2009) no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) pertencente ao IDT/UNESC. Antes do procedimento, os materiais foram secos em estufa à temperatura de  $105 \pm 5$  °C durante 24 horas.

Os materiais na betoneira (marca Horbach, com capacidade de 400 litros) foram inseridos na seguinte sequência: a) agregado graúdo e um terço da água de amassamento, com acionamento do equipamento por 30 segundos; b) cimento e um terço da água de amassamento, com acionamento da betoneira por mais 30 segundos; c) agregado miúdo e o restante da água, com acionamento do equipamento com o tempo necessário para a homogeneização da mistura.

Para as composições com as aparas de canudos, assim como as fibras de polipropileno, estas foram adicionadas lentamente ao final do

processo para evitar a aglomeração, permanecendo em movimento no equipamento até a completa distribuição na mistura.

Após o término do procedimento, verificou-se o índice de consistência do concreto no estado fresco de acordo com a ABNT NBR NM 67 (1998).

#### 4.2.5 Confeção dos corpos de prova

A moldagem e cura dos corpos de prova seguiu o que prescreve a ABNT NBR 5738 (2016) e aconteceu no LMCC/IDT/UNESC.

Para o formato cilíndrico, foram utilizados moldes metálicos e para o prismático e retangular, formas de madeira de compensado plastificado. Em ambos, inseriu-se o concreto em uma única camada e o adensamento foi realizado em mesa vibratória por tempo suficiente para a distribuição uniforme da mistura no molde. Após a moldagem, mantiveram-se os corpos de prova em local protegido de intempéries e cobertos para evitar a perda de água. A desmoldagem ocorreu após 24 horas para todos os corpos de prova, sendo encaminhados na sequência para o tanque de cura com temperatura de  $23 \pm 2$  °C por 28 dias.

A Tabela 5 demonstra as especificações dos corpos de prova para cada ensaio e composição, definindo seu formato, dimensão e quantidade.

Tabela 5 - Especificações dos corpos de prova para cada ensaio.

Ensaio	Formato	Dimensão	Quantidade
Índice de vazios e massa específica	Cilíndrico	10 cm x 20 cm	5
Resistência à tração na flexão	Prismático	10 cm x 35 cm x 10 cm	3
Resistência à compressão	Retangular	10 cm x 20 cm x 6 cm	12
Absorção de água	Retangular	10 cm x 20 cm x 6 cm	4
Resistência à abrasão	Retangular	10 cm x 20 cm x 6 cm	3

Fonte: Do autor, 2020.

#### 4.2.6 Ensaios

Para avaliar a porosidade e massa específica das diferentes composições, os corpos de prova foram colocados em estufa a  $105 \pm 5$  °C por um período de 72 horas. Na sequência, foram pesados para obtenção

de sua massa seca e imersos em água por 72 horas. A conclusão do processo de saturação se deu em um recipiente com água em ebulição durante 5 horas, passado este tempo, permaneceram imersos até o resfriamento natural à temperatura de  $23 \pm 2$  °C. A massa do corpo de prova saturado imerso em água foi expressa após a retirada do recipiente com o auxílio de uma balança hidrostática e verificou-se a massa do corpo de prova saturado após a secagem com pano úmido, segundo a metodologia da ABNT NBR 9778 (2009) realizada no LMCC/IDT/UNESC.

O índice de vazios do concreto foi determinado pela Equação 8 e a massa específica pela Equação 9.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (8)$$

Onde

$I_v$ : índice de vazios (%);

$m_{sat}$ : massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

$m$ : massa da amostra seca em estufa (g) e

$m_i$ : massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

$$\rho_s = \frac{m}{m_{sat} - m_i} \quad (9)$$

Onde

$\rho_s$ : massa específica da amostra seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

A ABNT NBR 9778 (2009) designa a massa da amostra seca em estufa como “ $m_s$ ”. Entretanto, essa representação foi citada na Equação 2 da massa específica do agregado miúdo. Por isso, adotou-se o símbolo  $m$ .

O procedimento do ensaio de resistência à tração na flexão, executado no Laboratório de Ensaio Mecânicos do IDT/UNESC, foi de acordo com a ABNT NBR 12142 (2010).

Os corpos de prova prismáticos com dimensões de 10 cm x 10 cm x 35 cm (vão de 30 cm) foram centralizados no dispositivo de carregamento (máquina universal de ensaios mecânicos EMIC DL 10000) e uma força foi aplicada continuamente e sem choques, promovendo o incremento da tensão no intervalo de 0,9 MPa/min a 1,2 MPa/min até a ruptura. Determinou-se, na seção de ruptura, a altura e a largura média

(média de três medições) do corpo de prova, a fim de avaliar a resistência à tração na flexão pela Equação 10.

$$f_{ct,f} = \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (10)$$

Onde

$f_{ct,f}$ : resistência à tração na flexão (MPa);

F: força máxima registrada na máquina de ensaio (N);

l: dimensão do vão entre apoios (mm);

b: largura média do corpo de prova (mm) e

d: altura média do corpo de prova (mm).

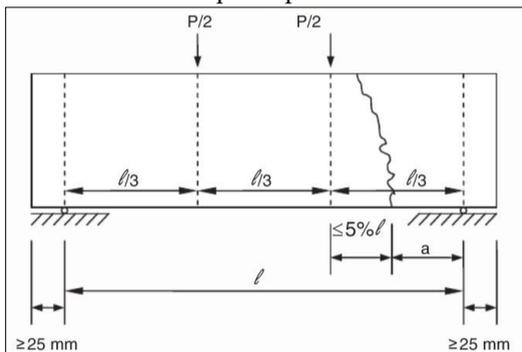
Para os corpos de prova em que a ruptura ocorreu fora do terço médio, a uma distância não superior a 5% da dimensão do vão, como mostra a Figura 10, o valor da resistência à tração na flexão foi obtido por meio da Equação 11.

$$f_{ct,f} = \frac{3 \times F \times a}{b \times d^2} \quad (11)$$

Onde

a: distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm).

Figura 10 - Posicionamento da linha de ruptura fora do terço médio do corpo de prova.



Fonte: ABNT NBR 12142:2010.

Para os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, os corpos de prova (6 para cada composição) passaram por capeamento e permaneceram saturados em água a  $23 \pm 5$  °C até o momento da ruptura. O equipamento adotado foi a prensa EMIC PC 200I do LMCC/IDT/UNESC, com velocidade de carregamento de 550 kPa/s, conforme estabelece a ABNT NBR 9781 (2013).

A resistência à compressão das peças, em MPa, foi calculada pela Equação 12, com uma área de carregamento de 4.901,67 mm<sup>2</sup>.

$$f_{pi} = \frac{P}{A_c} \times p \quad (12)$$

Onde

$f_{pi}$ : resistência à compressão das peças (MPa);

P: carga de ruptura (N);

$A_c$ : área de carregamento (mm<sup>2</sup>) e

p: fator multiplicativo em função da altura da peça (Tabela 6).

Tabela 6 - Fator multiplicativo p.

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

Fonte: ABNT NBR 9781:2013.

A ABNT NBR 9781 (2013) designa a área de carregamento como "A". Contudo, essa representação foi citada na Equação 5 da absorção de água dos agregados. Por isso, adotou-se o símbolo  $A_c$ .

A resistência à compressão característica também foi estimada pelas Equações 13 e 14.

$$s = \sqrt{\frac{\Sigma(f_p - f_{pi})^2}{n - 1}} \quad (13)$$

Onde

s: desvio padrão da amostra (MPa);

$f_p$ : resistência média das peças (MPa) e

n: número de peças da amostra.

$$f_{pk,est} = f_p - t \times s \quad (14)$$

Onde

$f_{pk,est}$ : resistência característica estimada à compressão (MPa) e  
t: coeficiente de Student, fornecido na Tabela 7, em função do tamanho da amostra.

Tabela 7 - Coeficiente de Student (nível de confiança de 80%).

n	t	n	t	n	t	n	t
6	0,920	10	0,883	18	0,863	26	0,856
7	0,906	12	0,876	20	0,861	28	0,855
8	0,896	14	0,870	22	0,859	30	0,854
9	0,889	16	0,866	24	0,858	32	0,842

Fonte: ABNT NBR 9781:2013.

Para avaliar a absorção de água dos corpos de prova para pavimento intertravado, eles foram escovados, para remover o pó e as partículas soltas, e em seguida imersos em água à temperatura de  $23 \pm 5$  °C durante 24 horas. As peças foram drenadas sobre uma tela metálica durante 1 minuto e secas por um pano úmido, para retirar a água superficial visível, e pesadas individualmente. O procedimento se repetiu a cada 2 horas até que não se registrou diferença superior a 0,5% em massa em relação ao valor anterior.

Posteriormente, encaminharam-se as peças saturadas para uma estufa à temperatura de  $110 \pm 5$  °C por 24 horas. Suas massas foram verificadas a cada duas horas até não serem registradas diferenças superiores a 0,5% em massa.

A absorção de água para cada corpo de prova foi calculada por meio da Equação 15.

$$A = \frac{m_s - m}{m} \quad (15)$$

Onde

A: absorção de água (%);

m: massa da amostra seca em estufa (g) e

$m_s$ : massa da amostra na condição saturada com superfície seca (g).

A ABNT NBR 9781 (2013) designa a massa da amostra seca em estufa como “ $m_1$ ” e a massa da amostra na condição saturada superfície seca como “ $m_2$ ”. Entretanto, essas representações foram citadas na Equação 1, por isso, adotaram-se os símbolos  $m$  e  $m_s$ , respectivamente.

O ensaio foi realizado no LMCC/IDT/UNESC, seguindo as orientações da ABNT NBR 9781 (2013).

As peças foram submetidas ao ensaio de resistência à abrasão no Laboratório de Cerâmica e Construção Civil no SENAI/SC, segundo a norma ABNT NBR 9781 (2013).

Os corpos de prova, após 28 dias em cura, foram expostos a um fluxo de material abrasivo de  $100 \pm 0,05$  g a cada  $100 \pm 5$  rotações do disco de aço. Posteriormente, avaliou-se o comprimento da cavidade formada com o auxílio de uma lente de aumento e um paquímetro.

A estrutura do concreto com diferentes composições foi investigada com um microscópio digital Haiz 1600X. Para tal análise, foram reaproveitados os corpos de prova dos ensaios mecânicos.

Na avaliação das peças de pavimento intertravado em maiores idades, 6 corpos de prova (após 28 dias no tanque de cura) ficaram expostos às intempéries por 120 dias a fim de se verificar alterações na resistência à compressão.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

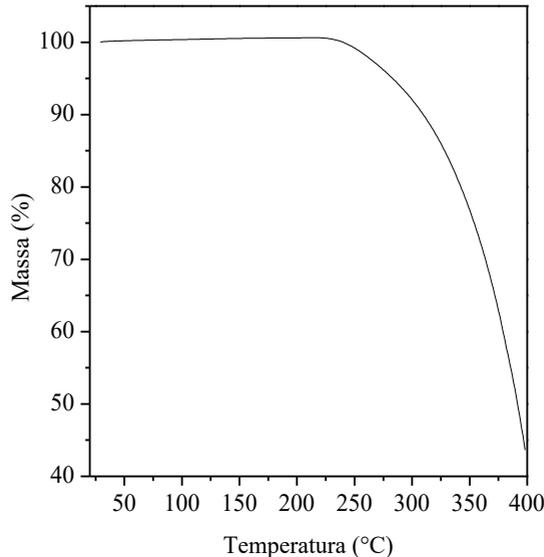
Os resultados alcançados nesta pesquisa são apresentados e discutidos nas seções subsequentes.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A massa específica das aparas de canudos descartáveis foi determinada em  $0,90 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ , valor próximo a do polipropileno puro ( $0,90 \text{ g/cm}^3$ ) encontrada na literatura (ŞAHİN; SAHİN; İNAL, 2018) e da fibra de polipropileno do tipo monofilamentada utilizada no estudo de De Alencar Monteiro, Lima e De Andrade Silva (2018),  $0,92 \text{ g/cm}^3$ .

A temperatura de início da degradação para as aparas de canudos sem tratamento, de acordo com a Figura 11, ficou próxima a  $240 \text{ °C}$ . Tang et al. (2017) e Zhang et al. (2017) encontraram para o polipropileno puro sob a mesma atmosfera,  $230 \text{ °C}$  e  $220 \text{ °C}$ , respectivamente. Porém, a  $400 \text{ °C}$ , ambos obtiveram uma perda de massa de 95%, o que não foi observado para o material em estudo, que nesta temperatura demonstrou uma perda de massa de aproximadamente 56%.

Figura 11 - Termogravimetria das aparas de canudos sem tratamento em atmosfera de ar sintético.

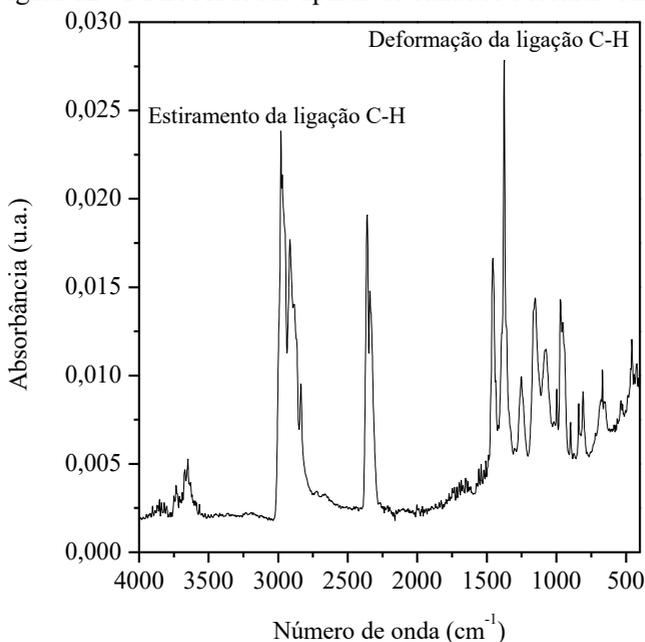


Fonte: Do autor, 2020.

Conforme os dados fornecidos pela empresa que doou o resíduo, não são inseridas cargas durante a fabricação do produto. Entretanto, alguns fornecedores de matéria-prima destacam a utilização de estabilizantes térmicos, o que reduziria a perda de massa, concordando com a análise realizada por Bafana et al. (2017), que em 400 °C observaram uma perda de massa de aproximadamente 25% para o polipropileno puro.

O espectro de FTIR/ATR das aparas não tratadas é mostrado na Figura 12. Nele, segundo Buček et al. (2016), são observadas bandas típicas de ligações C-H do polipropileno, comprovando o tipo de polímero do resíduo. Os picos entre 2.800 e 3.000  $\text{cm}^{-1}$  correspondem ao estiramento das ligações de carbono e hidrogênio, aqueles em 1.375 e 1.450  $\text{cm}^{-1}$  referem-se à deformação angular das ligações. Outros picos menos intensos são observados em 1.154; 998; 971 e 840  $\text{cm}^{-1}$  e também estão de acordo com o espectro de referência do polipropileno (GORASSINI et al., 2016).

Figura 12 - FTIR/ATR das aparas de canudos descartáveis.

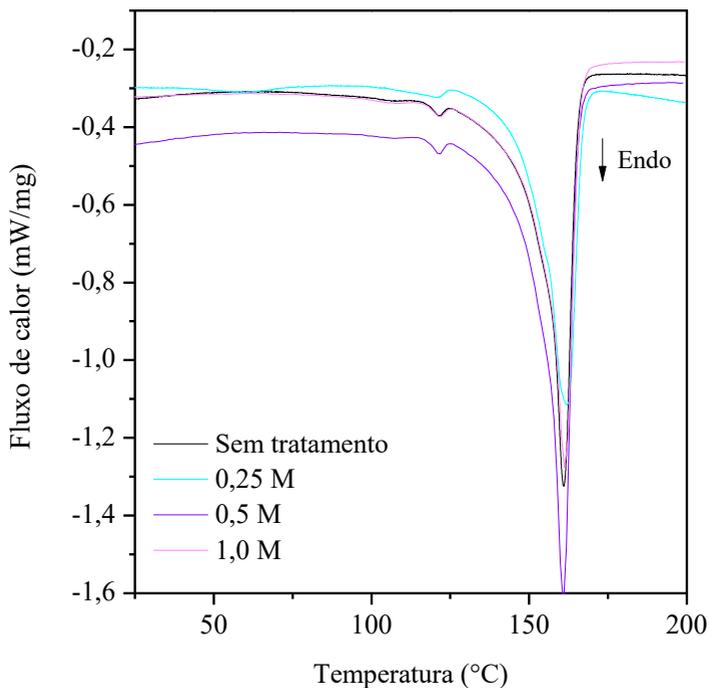


Fonte: Do autor, 2020.

Os picos em  $2.360$  e  $670\text{ cm}^{-1}$  são do dióxido de carbono adsorvido na superfície, conforme a base de dados EPA\_NIST.S01 (espectro 3233). A banda entre  $4.000$  e  $3.500\text{ cm}^{-1}$  é atribuída à água/umidade (CHEN et al, 2019).

A Figura 13 demonstra a análise térmica por DSC das aparas de canudos sem e com tratamento superficial com hidróxido de sódio em três concentrações distintas.

Figura 13 - Curvas de DSC das aparas de canudos tratadas e sem tratamento.



Fonte: Do autor, 2020.

Como a entalpia de fusão de um material corresponde à área do pico endotérmico na curva de DSC, a Figura 13 indica que as amostras apresentam diferentes valores de  $\Delta H_f$  e, por consequência, diferentes graus de cristalinidade, calculados pela Equação 7 e apresentados na Tabela 8.

Segundo Franciszczak et al. (2019), encontram-se na literatura para a entalpia de fusão do polipropileno 100% cristalino valores que

variam entre 138 e 239 J/g. Adotou-se para os cálculos 165 J/g, o mesmo valor utilizado pelos autores.

Tabela 8 - Grau de cristalinidade das aparas de canudos.

Tratamento superficial	Entalpia de fusão ( $\Delta H_f$ )	Grau de cristalinidade ( $X_c$ )
Sem tratamento	68,8 J.g <sup>-1</sup>	41,7%
0,25 M	61,7 J.g <sup>-1</sup>	37,4%
0,50 M	85,8 J.g <sup>-1</sup>	52,0%
1,00 M	71,5 J.g <sup>-1</sup>	43,3%

Fonte: Do autor, 2020.

Verificou-se que a solução de hidróxido de sódio 1,0 M não alterou de forma significativa a estrutura do material, pois o grau de cristalinidade das aparas de canudos tratadas nesta condição foi semelhante ao da amostra sem tratamento. Porém, a solução na concentração de 0,5 M aumentou consideravelmente a cristalinidade das aparas em 24,7% em relação às sem tratamento.

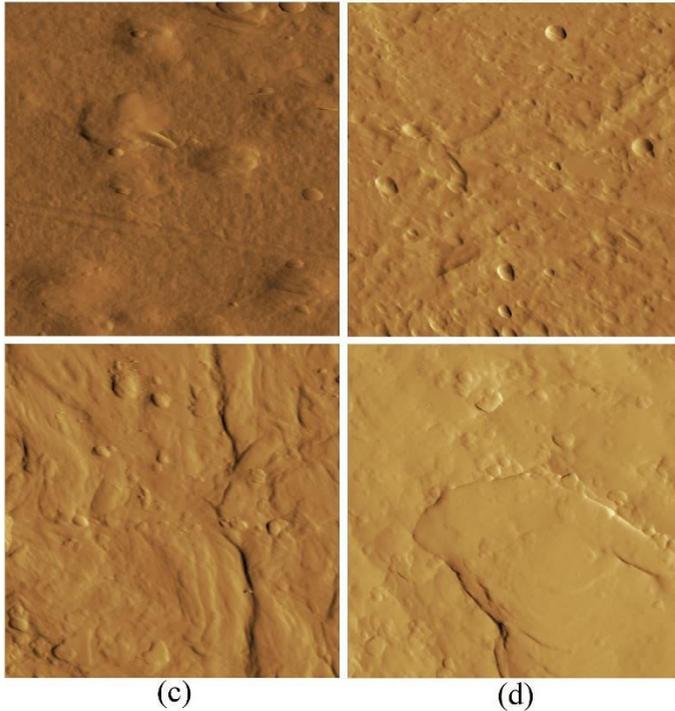
Kawahara et al. (2016) avaliaram o tratamento de polietileno tereftalato (PET) e constataram que as regiões amorfas são preferencialmente atacadas pela solução alcalina. Aqui, o mesmo mecanismo foi considerado para o polipropileno.

Baah e Baah (2002), ao tratarem o polipropileno em soluções de hidróxido de sódio, verificaram que a perda de massa do polímero foi maior em baixas concentrações.

Assim, supõe-se que a solução na concentração de 0,5 M atingiu somente as regiões amorfas das aparas de canudos, enquanto a de 0,25 M promoveu um ataque mais severo no material, afetando tanto regiões amorfas quanto cristalinas, reduzindo o grau de cristalinidade.

Na Figura 14, a área das seções capturadas pelo AFM foi de 5  $\mu\text{m}$   $\times$  5  $\mu\text{m}$ . As maiores alterações superficiais, em relação ao resíduo não tratado, são observadas para as amostras tratadas nas concentrações de 0,25 e 0,5 M, expostas na Figura 14(b) e (c), respectivamente.

Figura 14 - Imagens de AFM pelo modo de contato intermitente das aparas de canudos descartáveis (a) sem tratamento e tratadas nas concentrações de (b) 0,25 M, (c) 0,5 M e (d) 1,0 M.



Fonte: Do autor, 2020.

Tanto a análise térmica (Figura 13) como as imagens de AFM (Figura 14) demonstraram que as concentrações de 0,25 e 0,5 M provocaram modificações mais significativas na aparas de canudos descartáveis. Portanto, adotaram-se como níveis do planejamento experimental fatorial  $2^2 + 3$  da Tabela 3 as concentrações de 0; 0,25 e 0,5 M para o tratamento do resíduo.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração das aparas de canudos descartáveis encontram-se na Tabela 9. Os valores são aproximados, pois se tratando de um resíduo, as medidas (dimensões) variam em uma mesma amostra.

Aparentemente, o tratamento superficial do resíduo com hidróxido de sódio não influenciou na resistência à tração dos materiais em estudo, pois ambos (tratados e não tratados) mostraram valores semelhantes.

Contudo, observou-se durante o ensaio uma redução do alongamento para as amostras tratadas na concentração de 0,25 M, que pode estar associada ao seu menor grau de cristalinidade. Estruturas mais amorfas tendem a apresentar menor deformação, pois segundo Callister e Rethwisch (2012), em polímeros semicristalinos ocorre inicialmente o alongamento das moléculas das cadeias nestas regiões e posteriormente, em um segundo estágio, a deformação da parte cristalina.

Tabela 9 - Resistência à tração das aparas de canudos descartáveis comparada com dados da literatura.

Tratamento superficial	Identificação da amostra	Resistência à tração (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
Sem tratamento	Amostra 1	24,35	29,25	3,72
	Amostra 2	26,33		
	Amostra 3	30,60		
	Amostra 4	32,19		
	Amostra 5	32,78		
0,25 M	Amostra 1	27,45	27,79	1,02
	Amostra 2	28,36		
	Amostra 3	27,15		
	Amostra 4	29,26		
	Amostra 5	26,74		
0,5 M	Amostra 1	31,70	28,85	3,93
	Amostra 2	25,33		
	Amostra 3	25,32		
	Amostra 4	34,11		
	Amostra 5	27,76		
PP puro	A	31 – 41,4		
PP puro	B	28		
Fibra de PP	C	600 - 650		
Fibra de PP	D	300		

Nota: A: Callister e Rethwisch (2012)

B: Şahin, Sahin e İnal (2018)

C: De Alencar Monteiro, Lima e De Andrade Silva (2018)

D: Akand, Yang e Wang (2018)

Fonte: Do autor, 2020.

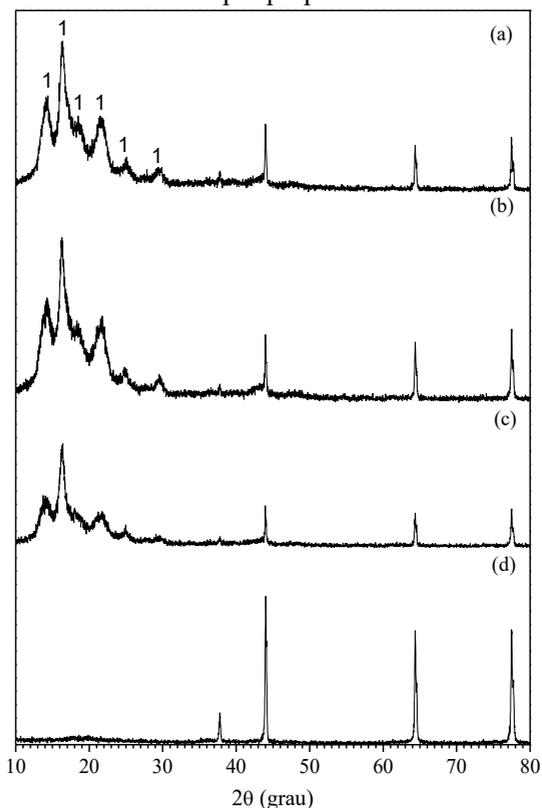
A resistência à tração das aparas de canudos tratadas ficou próxima à do polipropileno puro (amostras A e B). Porém, ao serem comparadas com a da fibra de De Alencar Monteiro, Lima e De Andrade Silva (2018),

amostra C da Tabela 9, com 0,54 mm de diâmetro e comprimento de 40 mm, foi inferior em mais de vinte vezes.

No trabalho de Akand, Yang e Wang (2018), a resistência à tração da fibra de polipropileno com 0,76 mm de diâmetro e comprimento de 19 mm foi de 300 MPa (amostra D - Tabela 9), demonstrando que esta propriedade apresenta grande variabilidade.

A Figura 15 traz os difratogramas de raios X das aparas de canudos e também do porta amostra do equipamento, pois como o resíduo foi inserido na forma de pequenos fragmentos que não recobriram toda a sua superfície, a análise demonstrou alguns picos relativos a ele (Figura 15(d)).

Figura 15 - Difratogramas de raios X das aparas de canudos tratadas na concentração de (a) 0,5 M, (b) 0,25 M, (c) sem tratamento e do (d) porta amostra. Onde 1- polipropileno sindiotático.



Fonte: Do autor, 2020.

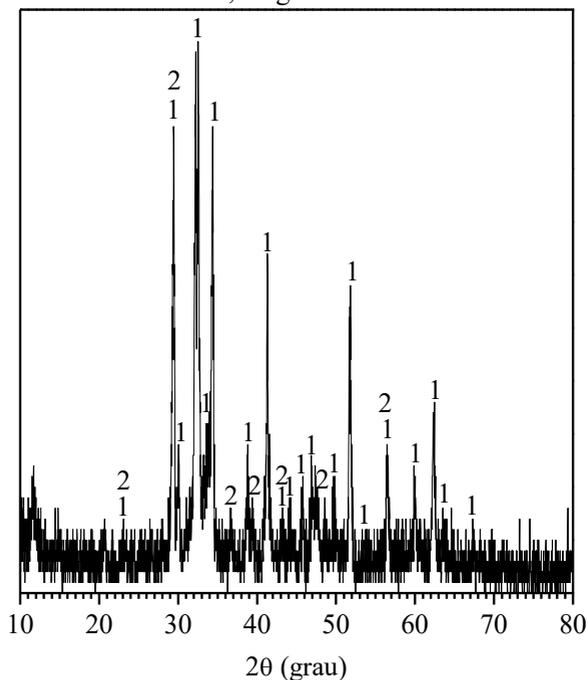
As aparas exibiram os picos característicos do polipropileno sindiotático ( $(C_3H_6)_n$  / JCPDS: 49-2204) e para as tratadas com a solução de NaOH na concentração de 0,25 M (Figura 15(b)) evidencia-se um halo amorfo mais acentuado na região  $10^\circ < 2\theta < 30^\circ$ , concordando com o grau de cristalinidade calculado a partir da análise térmica da Figura 13 e apresentado na Tabela 8.

Traços de sódio não foram detectados por EDS nas superfícies dos materiais tratados, sugerindo que o elemento não estava presente em quantidade suficiente para que pudesse ser quantificado. Isso evidencia que o método empregado na limpeza das aparas após a imersão na solução de NaOH foi eficiente para removê-lo. A eficiência desse processo é fundamental, pois segundo as pesquisas de Islam e Akhtar (2013), a reação entre álcalis e alguns constituintes mineralógicos dos agregados provoca a expansibilidade e perda de resistência mecânica do concreto, acarretando na sua deterioração.

O difratograma de raios X da Figura 16 é do cimento CP V ARI utilizado na confecção dos corpos de prova de concreto. Nele, foram identificadas as fases cristalinas de silicato de alumínio, magnésio e cálcio ( $54CaO.16SiO_2.Al_2O_3.MgO$  / JCPDS: 11-0593) e calcita ( $CaCO_3$  / JCPDS: 5-0586), que estão de acordo com a composição química apresentada por Capraro et al. (2019), que também obtiveram para o material uma massa específica de  $3,12 \text{ g/cm}^3$ , valor muito próximo ao encontrado neste trabalho por picnometria a gás hélio ( $3,14 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ ).

A distribuição de tamanhos de partículas evidenciou que 90% das partículas de cimento CP V ARI apresentam diâmetro inferior a  $27,39 \mu\text{m}$ , 50% abaixo de  $12,60 \mu\text{m}$  e 10% menor que  $1,93 \mu\text{m}$ , com um diâmetro médio de  $13,77 \mu\text{m}$ . Ainda, a análise mostrou que todas as partículas estão com um tamanho inferior a  $45 \mu\text{m}$ , atendendo à especificação física relativa à finura estabelecida pela ABNT NBR 16697 (2018), que determina que o resíduo na peneira com abertura de  $75 \mu\text{m}$  deve ser inferior ou igual a 6%.

Figura 16 - Difratoograma de raios X do cimento CP V ARI. Onde 1- silicato de alumínio, magnésio e cálcio e 2- calcita.



Fonte: Do autor, 2020.

A caracterização das areias encontra-se na Tabela 10. As massas específicas e unitárias desses materiais são semelhantes aos agregados empregados nas pesquisas de Senani, Ferhoune e Guettala (2018) e Martins et al. (2019).

Tabela 10 - Caracterização do agregado miúdo.

Característica	Areia fina	Areia grossa
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,58	2,49
Massa unitária ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1.415,0	1.593,0
Absorção de água (%)	0,94	0,81

Fonte: Do autor, 2020.

A areia fina apresentou maior absorção de água em relação à areia grossa, 0,94% e 0,81%, respectivamente. Essa diferença pode estar relacionada com o módulo de finura (Tabelas 11 e 12), que para a areia

fina foi mais baixo. Dessa forma, sua maior área superficial contribuiu para elevar a absorção de água.

Tabela 11 - Distribuição da composição granulométrica da areia fina.

Peneira (mm)	% Retido	% Retido Acumulado	Dimensão máxima característica (mm)	Módulo de finura
4,75	0,0	0,0		
2,36	0,6	0,6		
1,18	0,9	1,5		
0,60	0,9	2,4	0,60	1,05
0,30	4,2	6,6		
0,15	87,4	94,0		
Fundo	6,0	100,0		

Fonte: Do autor, 2020.

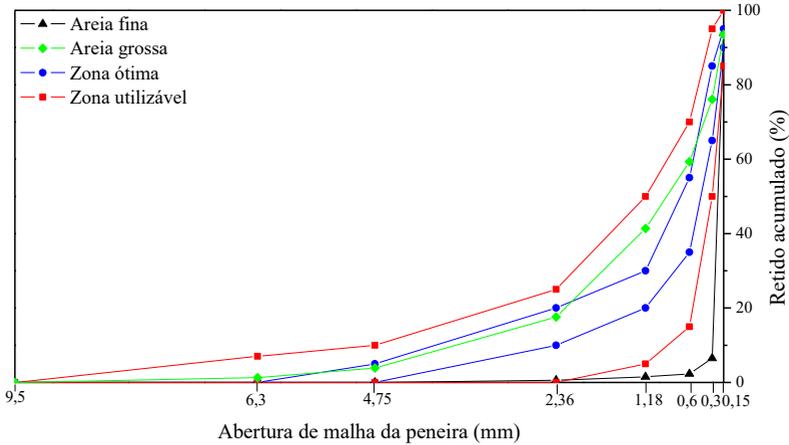
Tabela 12 - Distribuição da composição granulométrica da areia grossa.

Peneira (mm)	% Retido	% Retido Acumulado	Dimensão máxima característica (mm)	Módulo de finura
6,3	1,3	1,3		
4,75	2,6	3,9		
2,36	13,7	17,6		
1,18	23,8	41,4		
0,60	17,9	59,3	4,75	2,92
0,30	16,8	76,1		
0,15	17,4	93,5		
Fundo	6,5	100,0		

Fonte: Do autor, 2020.

Na Figura 17, nota-se que em relação aos limites descritos na ABNT NBR 7211 (2009), a areia fina apresenta uma granulometria inadequada, posicionando-se abaixo da zona utilizável inferior. A areia grossa atendeu aos parâmetros estabelecidos pela norma, situando-se na zona ótima entre as peneiras com abertura de 0,15 - 0,6 mm e 2,36 - 4,75 mm e na zona utilizável superior das demais. A norma não distingue os parâmetros para as diferentes tipologias de areia, o que levou ao não cumprimento pela areia fina. Mas, supõe-se que a mistura de ambas atenda aos limites da norma.

Figura 17 - Distribuição da composição granulométrica das areias fina e grossa e limites estabelecidos pela norma.



Fonte: Do autor, 2020.

A dimensão máxima característica e o módulo de finura da brita nº0, conforme a Tabela 13, foi 9,5 mm e 5,67, respectivamente. Pelisser, Vieira e Bernardin (2018) encontraram em seu trabalho um módulo de finura semelhante de 5,62.

Tabela 13 - Distribuição da composição granulométrica da brita nº 0.

Peneira (mm)	% Retido	% Retido Acumulado	Dimensão máxima característica (mm)	Módulo de finura
9,5	0,0	0,0		
6,3	25,4	25,4		
4,75	46,4	71,8		
2,36	26,5	98,3		
1,18	0,8	99,1	9,5	5,67
0,60	0,1	99,2		
0,30	0,0	99,2		
0,15	0,1	99,3		
Fundo	0,7	100,0		

Fonte: Do autor, 2020.

Verificou-se por meio da distribuição da composição granulométrica que apenas 25,4% das partículas ficaram retidas na peneira com abertura de 6,3 mm, permitindo que a superfície do *paver* adquirisse um bom acabamento, como mostra a Figura 18. Para a brita nº0

0, a massa específica foi de 3,02 g/cm<sup>3</sup>, massa unitária de 1.496,0 kg/m<sup>3</sup> e a absorção de água igual a 0,93%.

Figura 18 - Superfície dos *pavers* para as diferentes composições.



Fonte: Do autor, 2020.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

O consumo de cimento empregado nesta pesquisa (351,90 kg por metro cúbico de concreto) ficou entre os valores de 300 e 400 kg/m<sup>3</sup> encontrados em trabalhos envolvendo a produção de peças para pavimento intertravado (UYGUNOĞLU et al., 2012; GENÇEL et al., 2012).

Os índices de consistência das diferentes composições estão na Tabela 14. Os baixos valores encontrados estão relacionados com a produção de misturas mais secas, como mostra a Figura 19, com o intuito de elevar a resistência mecânica, reduzir sua porosidade e, consequentemente, a absorção de água.

Tabela 14 - Índice de consistência para os diferentes tipos de misturas adotados segundo o planejamento experimental.

Experimento	Teor de resíduo (%)	Concentração da solução de NaOH (M)	Índice de consistência (mm)
Referência	0,00	0,00	15,0
1	0,25	0,00	10,0
2	0,75	0,00	5,0
3	0,25	0,50	5,0
4	0,75	0,50	5,0
5	0,50	0,25	5,0
6	0,50	0,25	5,0
7	0,50	0,25	5,0

Fonte: Do autor, 2020.

O índice de consistência foi reduzido pelo aumento do teor de resíduo assim como pelo tratamento com o hidróxido de sódio, indicando que a modificação da superfície do material melhorou a sua interação com o concreto e seus constituintes. Yin et al. (2015) também observaram que a adição de fibras poliméricas reduz a trabalhabilidade do concreto.

Figura 19 - Índice de consistência do experimento 6.



Fonte: Do autor, 2020.

O índice de vazios e massa específica para todas as composições encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15 - Índice de vazios ( $I_v$ ) e massa específica ( $\rho_s$ ) das diferentes composições.

Experimento	$I_v$ (%)	$I_v$ (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Referência	10,8	0,5	2,3	0,0
1	12,0	0,6	2,3	0,0
2	9,8	0,5	2,3	0,0
3	11,8	0,4	2,3	0,0
4	12,0	0,3	2,3	0,0
5	11,3	0,6	2,3	0,0
6	11,7	0,6	2,3	0,0
7	8,4	0,4	2,3	0,0

Fonte: Do autor, 2020.

O resíduo foi introduzido ao concreto como uma adição em teores volumétricos baixos (0,25%, 0,50% e 0,75%), não substituindo nenhum componente de massa específica elevada, contribuindo para que sua incorporação não modificasse a massa específica do concreto de 2,3 g/cm<sup>3</sup>, resultado próximo aos encontrados na literatura (UYGUNOĞLU et al., 2012; GENCEL et al., 2012).

Os valores de índice de vazios não foram compatíveis com a absorção de água das peças de concreto descritas na Tabela 16, pois aquelas com índices de vazios mais elevados não apresentaram as maiores absorções de água. Por orientação normativa (ABNT NBR NM 67, 1998), adotaram-se moldes cilíndricos com altura de 20 cm que dificultaram no momento da moldagem a identificação da homogeneidade da mistura em seu interior, associada à trabalhabilidade reduzida. Além disso, foram observados vazios nas faces externas dos corpos de prova. Esses fatores favoreceram a alteração dos resultados.

As Tabelas 15, 16, 18, 20, 22 e 23 apresentam as propriedades médias determinadas para cada experimento. Nos Apêndices A, B, C, D, E e F encontram-se os resultados utilizados nos tratamentos estatísticos, que incluíram todas as amostras.

A Tabela 16 evidencia que para as peças com a incorporação do resíduo, o tratamento das aparas de canudos com hidróxido de sódio reduziu a absorção de água. Para a adição de 0,25%, comparando os experimentos 1 (sem tratamento) e 3 (tratadas na concentração de 0,5 M), observa-se uma redução de 22,8%. Já para a introdução de 0,75%, experimentos 2 (sem tratamento) e 4 (tratadas na concentração de 0,5 M), a redução foi de 30,9%.

Embora todos os experimentos atendam à exigência da ABNT NBR 9781 (2013), com valores de absorção de água inferiores a 6%, o teor de 0,75% de aparas tratadas na concentração de 0,5 M (experimento 4) permitiu uma absorção de água menor em relação às amostras de referência.

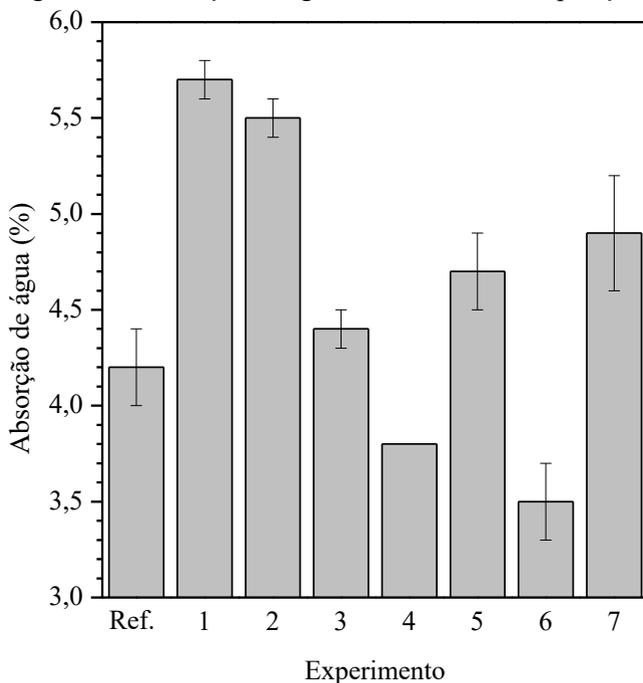
Tabela 16 - Absorção de água (A) das diferentes composições.

Experimento	A (%)	
	Média	Desvio padrão
Referência	4,2	0,2
1	5,7	0,1
2	5,5	0,1
3	4,4	0,1
4	3,8	0,0
5	4,7	0,2
6	3,5	0,2
7	4,9	0,3

Fonte: Do autor, 2020.

A Figura 20 traz uma representação gráfica dos resultados da Tabela 16.

Figura 20 - Absorção de água das diferentes composições.



Fonte: Do autor, 2020.

A Tabela 17 exibe a análise de variância ANOVA e aponta que, com 95% de confiança, a concentração da solução de hidróxido de sódio utilizada no tratamento e a curvatura são fatores significativos ( $p < \alpha$ , para  $\alpha = 0,05$ ) para a variável resposta absorção de água. Apesar dos outros fatores apresentarem um valor  $p > \alpha$ , quando não considerados na análise estatística, reduziram o  $R^2$ , prejudicando o ajuste do modelo.

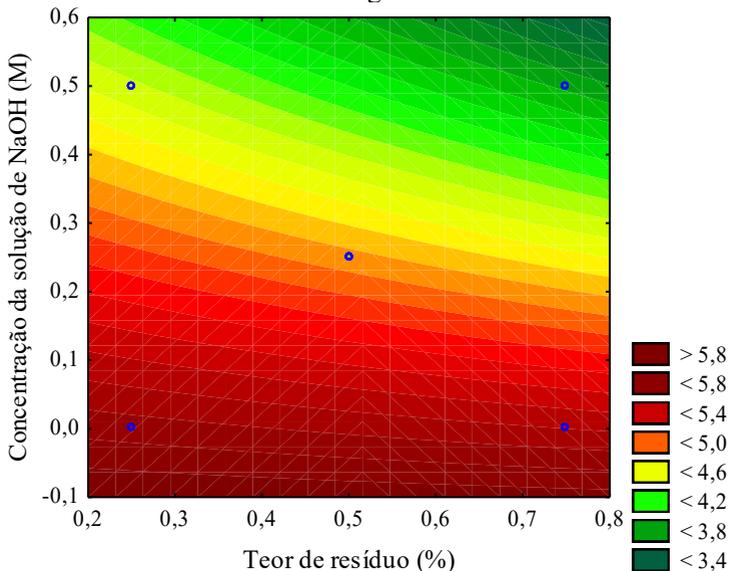
A superfície de resposta da Figura 21 indica que as maiores absorções de água ocorreram para as peças de concreto em que as aparas de canudos não foram submetidas ao tratamento superficial, sugerindo que o método melhorou a aderência do resíduo à matriz. Foi adotado o nível 0 de curvatura para a superfície de resposta, pois não foram observadas diferenças expressivas com a aplicação de valores distintos de curvatura.

Tabela 17 - Análise de variância ANOVA para a absorção de água.

Fator	SS	df	MS	F	p
<b>Curvatura</b>	<b>1,80107</b>	<b>1</b>	<b>1,801071</b>	<b>7,98547</b>	<b>0,009583</b>
(1) Teor de resíduo	0,64000	1	0,640000	2,83759	0,105606
<b>(2) Concentração</b>	<b>8,70250</b>	<b>1</b>	<b>8,702500</b>	<b>38,58458</b>	<b>0,000002</b>
1 x 2	0,25000	1	0,250000	1,10843	0,303358
Erro	5,18750	23	0,225543		
Total SS	16,58107	27			
R <sup>2</sup>	0,68714				
R <sup>2</sup> ajustado	0,63273				
$\alpha$	0,05				

Fonte: Do autor, 2020.

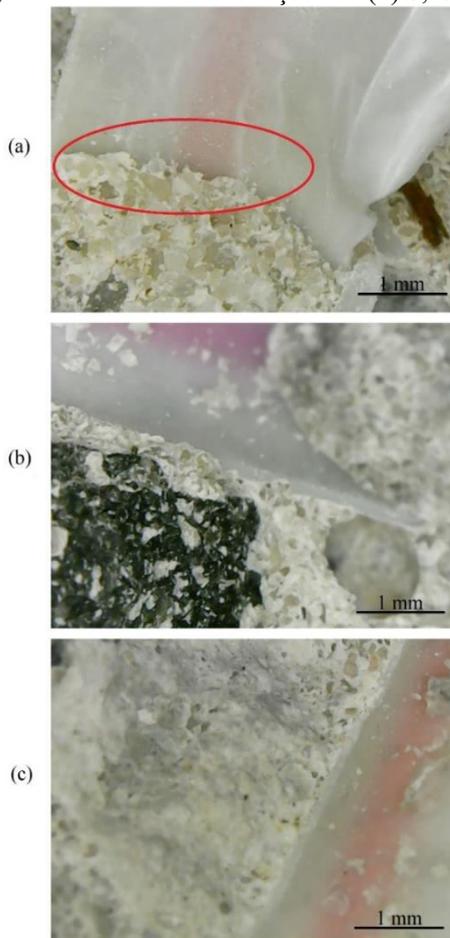
Figura 21 - Superfície de resposta para os resultados de absorção de água.



Fonte: Do autor, 2020.

A compatibilidade entre o resíduo e a matriz reduz os vazios, como pode ser visualizado nas imagens da Figura 22. López-Buendia et al. (2013) constataram que o tratamento alcalino em fibras de polipropileno aumenta a molhabilidade do material.

Figura 22 - Imagens microscópicas das aparas de canudos no contato com a matriz cimentícia, onde: (a) aparas sem tratamento, com destaque para os vazios, e tratadas nas concentrações de (b) 0,25 M e (c) 0,5 M.



Fonte: Do autor, 2020.

A durabilidade do concreto está intimamente relacionada com a absorção de água, pois o transporte de líquidos para o seu interior permite a entrada de íons corrosivos, como cloretos e sulfatos, que colaboram diretamente com o processo de deterioração físico-química (NGUYEN; NAKARAI; NISHIO, 2019). Portanto, devido a menor absorção de água, as peças de concreto mais duráveis associam-se à concentração mais alta da solução de NaOH adotada no planejamento fatorial.

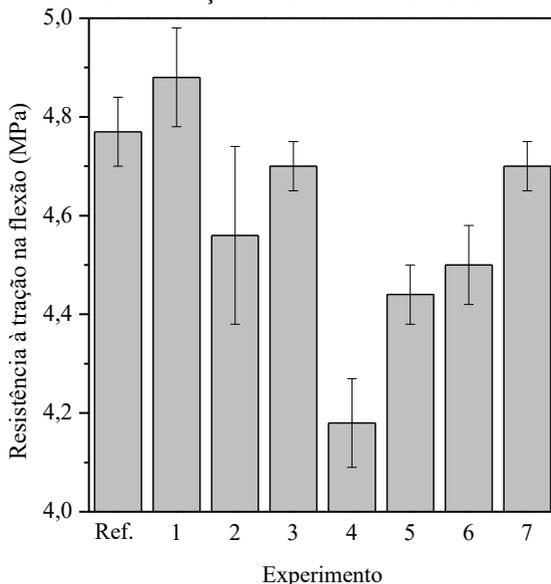
Para todos os corpos de prova, a ruptura no ensaio de resistência à tração na flexão ocorreu no terço médio e os valores de resistência são apresentados na Tabela 18 e Figura 23. Para as amostras com a incorporação de resíduo sem tratamento e tratado na concentração de 0,5 M, a adição das aparas de canudos em um teor mais elevado acarretou na redução da resistência à tração na flexão.

Tabela 18 - Resistência à tração na flexão ( $F_{ct,f}$ ) das diferentes composições.

Experimento	$F_{ct,f}$ (MPa)	
	Média	Desvio padrão
Referência	4,77	0,07
1	4,88	0,10
2	4,56	0,18
3	4,70	0,05
4	4,18	0,09
5	4,44	0,06
6	4,50	0,08
7	4,70	0,05

Fonte: Do autor, 2020.

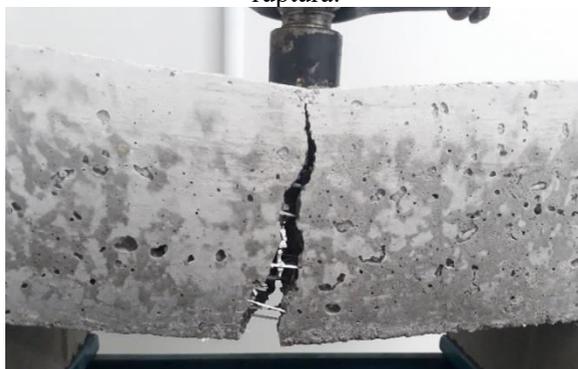
Figura 23 - Resistência à tração na flexão das diferentes composições.



Fonte: Do autor, 2020.

Exceto para o experimento 1, os resultados demonstraram que o resíduo não foi eficiente para elevar a resistência à tração na flexão do concreto, mas ele permitiu que mesmo após a ruptura, o corpo de prova não se fragmentasse, como mostra a Figura 24.

Figura 24 - Corpo de prova com a incorporação do resíduo após a ruptura.



Fonte: Do autor, 2020.

A análise de variância ANOVA da Tabela 19 aponta que os fatores teor de resíduo e concentração da solução de hidróxido de sódio utilizada no tratamento são significativos para a variável resposta resistência à tração na flexão. A interação entre os fatores, apesar de não significativa, se excluída, reduz o  $R^2$ , prejudicando o ajuste do modelo. Nesse caso, para o intervalo adotado para as variáveis independentes, o modelo explica 76,054% da resistência à tração na flexão.

Tabela 19 - Análise de variância ANOVA para a resistência à tração na flexão.

Fator	SS	df	MS	F	p
<b>(1) Teor de resíduo</b>	<b>0,525008</b>	<b>1</b>	<b>0,525008</b>	<b>35,95344</b>	<b>0,000014</b>
<b>(2) Concentração</b>	<b>0,232408</b>	<b>1</b>	<b>0,232408</b>	<b>15,91571</b>	<b>0,000949</b>
1 x 2	0,031008	1	0,031008	2,12350	0,163279
Erro	0,248242	17	0,014602		
Total SS	1,036667	20			
$R^2$	0,76054				
$R^2$ ajustado	0,71828				
$\alpha$	0,05				

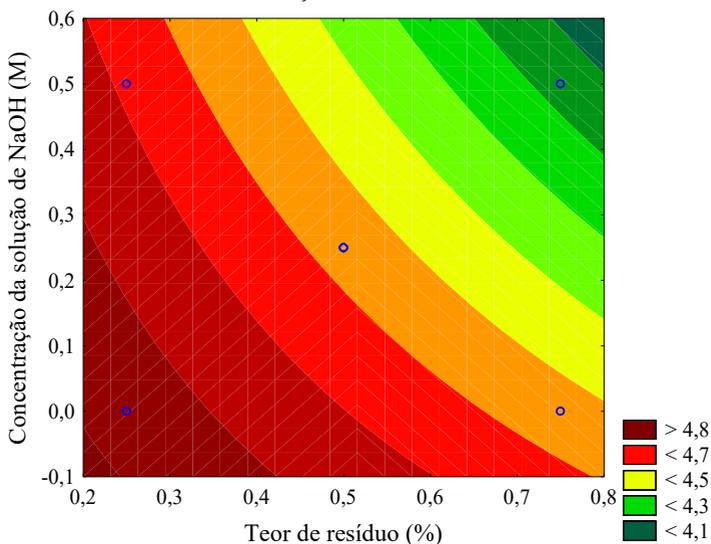
Fonte: Do autor, 2020.

A maior resistência à tração na flexão estar vinculada a menores teores de resíduo incorporados (Figura 25) denota que, apesar do tratamento modificar a superfície do material, a ancoragem não foi suficiente para que funcionasse como ponte de transferência de tensões na matriz de concreto, o que pode estar relacionado com a baixa resistência à tração das aparas de canudos.

Rostami et al. (2019) empregaram fibras de polipropileno com diferentes diâmetros, comprimento de 18 mm e resistência à tração de 240,36 a 295,01 MPa, valor muito superior à resistência do resíduo utilizado nesta pesquisa, e relataram incrementos na resistência à tração na flexão, em relação à amostra de referência (3,7 MPa), entre 5 e 6,3 MPa com a introdução de 0,55% em volume de fibras após um tratamento alcalino com uma solução de hidróxido de sódio na concentração de 2,5 M.

Chen, Zhong e Zhang (2020) salientam que a redução da resistência à tração na flexão pode estar vinculada a trabalhabilidade reduzida, que ocasiona menor compactação e maior porosidade pela má distribuição das fibras. Desta forma, a distribuição não uniforme interfere na ligação entre a fibra e a matriz e, conseqüentemente, na eficiência como ponte de transferência de tensões, afetando a propriedade mecânica.

Figura 25 - Superfície de resposta para os resultados de resistência à tração na flexão.



Fonte: Do autor, 2020.

Para um mesmo teor de resíduo, a resistência à tração na flexão reduz à medida que a concentração de NaOH aumenta, indicando que traços de sódio, não quantificados por EDS, podem ter afetado a resistência da matriz de concreto (ISLAM; AKHTAR, 2013).

Bhogayata e Arora (2017) descreveram um decaimento médio de 9% na resistência à tração na flexão do concreto com a dosagem de até 1% em volume de fibra de resíduo de plástico metalizado, demonstrando que a resistência do concreto simples era resultado da resistência da matriz. Contudo, a característica de deformação por flexão foi melhorada pela incorporação da fibra, fato semelhante ao que aconteceu neste trabalho.

Considerando que a resistência é governada pela matriz cimentícia, para um mesmo volume de concreto, o volume de matriz é reduzido na proporção em que o teor de resíduo é incorporado, provocando uma queda na resistência, pois a fibra não possui as mesmas propriedades dos constituintes do concreto.

A Tabela 20 traz a resistência à compressão aos 28 dias das diferentes composições. Com exceção do experimento 4, todos os outros atenderam à resistência mínima de 35 MPa exigida pela ABNT NBR 9781 (2013). Em relação à resistência característica estimada, que segundo a Equação 14 é influenciada pelo número de amostras reduzido e pelo desvio padrão, os experimentos 2, 4 e 7 não atenderam à resistência mínima.

Tabela 20 - Resistência à compressão ( $f_{pi}$ ) aos 28 dias das diferentes composições.

Experimento	$f_{pi}$ (MPa) Média	$f_{pi}$ (MPa) Desvio padrão	$F_{pk,est}$ (MPa)
Referência	43,61	2,16	41,62
1	44,18	2,84	41,57
2	35,26	1,26	34,10
3	37,70	0,49	37,24
4	34,52	1,33	33,29
5	37,22	1,88	35,49
6	38,31	0,98	37,40
7	36,47	1,63	34,98

Fonte: Do autor, 2020.

A Tabela 21 expõe a análise de variância ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias, demonstrando que os fatores teor de resíduo e a concentração da solução de hidróxido de sódio utilizada no

tratamento, bem como a interação entre eles, são significativos para a variável resposta.

Tabela 21 - Análise de variância ANOVA para a resistência à compressão aos 28 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
<b>(1) Teor de resíduo</b>	<b>219,6150</b>	<b>1</b>	<b>219,6150</b>	<b>77,36035</b>	<b>0,000000</b>
<b>(2) Concentração</b>	<b>78,3371</b>	<b>1</b>	<b>78,3371</b>	<b>27,59458</b>	<b>0,000006</b>
<b>1 x 2</b>	<b>49,4214</b>	<b>1</b>	<b>49,4214</b>	<b>17,40891</b>	<b>0,000169</b>
Erro	107,8766	38	2,8389		
Total SS	455,2500	41			
R <sup>2</sup>	0,76304				
R <sup>2</sup> ajustado	0,74433				
$\alpha$	0,05				

Fonte: Do autor, 2020.

De acordo com a Tabela 21, para o intervalo adotado para as variáveis independentes, 76,304% da resistência à compressão pode ser explicada pelo modelo.

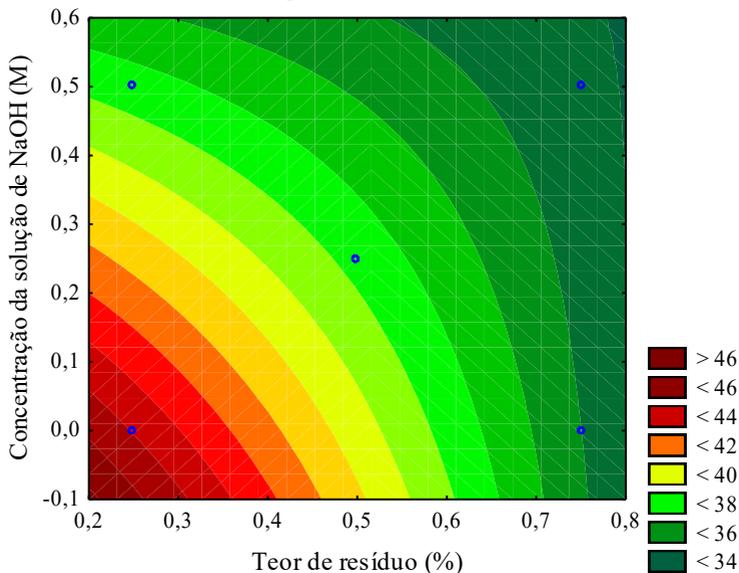
A superfície de resposta da Figura 26 revela que conciliando menores teores de resíduo e baixas concentrações da solução de hidróxido de sódio, melhores resultados de resistência à compressão são alcançados para as peças de concreto, assim como constatado para a resistência à tração na flexão, evidenciando que a modificação superficial do resíduo pelo tratamento alcalino não foi eficiente como alternativa para melhorar a resistência mecânica do concreto com adição de aparas de canudos.

Neste caso, não houve uma relação direta entre a porosidade do concreto e a resistência à compressão, já que as maiores absorções de água ocorreram para as peças de pavimento intertravado com a adição do resíduo sem tratamento.

Na Figura 26, para os menores teores de resíduo, nota-se que a resistência à compressão decai à medida que a concentração de solução de hidróxido de sódio aumenta, dando indícios de que, embora não quantificável por EDS, o sódio presente na superfície do material pode ter afetado a resistência mecânica do concreto (ISLAM; AKHTAR, 2013).

Já para maiores teores de resíduo, a concentração da solução de NaOH mais elevada não promoveu grandes alterações na resistência à compressão aos 28 dias. É provável que haja um equilíbrio entre o desempenho das aparas na retenção da abertura das fissuras e a menor resistência da matriz de concreto.

Figura 26 - Superfície de resposta para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: Do autor, 2020.

A resistência à abrasão das diferentes composições é exibida na Tabela 22.

Tabela 22 - Resistência à abrasão das diferentes composições.

Experimento	Cavidade (mm)	
	Média	Desvio padrão
Referência	25,14	0,40
1	25,11	0,82
2	24,50	1,41
3	25,61	1,35
4	25,63	1,26
5	25,91	3,29
6	25,09	1,46
7	24,72	1,03

Fonte: Do autor, 2020.

Gencil et al. (2012) constataram que a resistência à abrasão melhora com o aumento da resistência à compressão dos blocos para pavimentação. No entanto, isso não foi verificado neste estudo, pois

valores semelhantes foram observados para todos os experimentos, embora suas resistências mecânicas tenham decaído com a introdução das aparas de canudos descartáveis.

A ABNT NBR 9781 (2013) preconiza que a determinação da resistência à abrasão é facultativa, sendo a cavidade máxima permitida para solicitações de tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha de 23 milímetros. Portanto, esse requisito não foi atendido por nenhum experimento (incluindo as amostras de referência), cujos valores variaram entre 24,50 a 25,91 mm.

Ghorbani et al. (2019) encontraram uma cavidade de 25 mm para o concreto quando empregaram um agregado graúdo com dimensão máxima de 12,5 mm para um traço em massa de 1:2:1,625 (cimento, agregado miúdo e agregado graúdo) com relação água/cimento de 0,59. A cavidade formada reduziu à medida que foram utilizados agregados com dimensões maiores, o que pode explicar os resultados encontrados nesta pesquisa, cuja dimensão máxima da brita selecionada foi de 9,5 mm.

A Tabela 23 demonstra a resistência à compressão das peças de pavimento intertravado após 120 dias de exposição às intempéries. Todas as composições apresentaram um ganho de resistência, com incrementos variando entre 10 a 44%, possivelmente pela hidratação progressiva do cimento.

Diferentemente do comportamento aos 28 dias, aos 120 dias, o aumento do teor de resíduo não prejudicou a resistência.

Tabela 23 - Resistência à compressão ( $f_{pi}$ ) das diferentes composições após 120 dias de exposição às intempéries.

Experimento	$f_{pi}$ (MPa) Média	$f_{pi}$ (MPa) Desvio padrão	$F_{pk,est}$ (MPa)
Referência	54,23	2,17	52,23
1	48,78	2,49	46,69
2	48,00	2,27	45,91
3	45,36	1,27	44,20
4	45,43	2,53	43,10
5	44,75	1,29	43,57
6	47,58	1,06	46,60
7	52,56	2,24	50,50

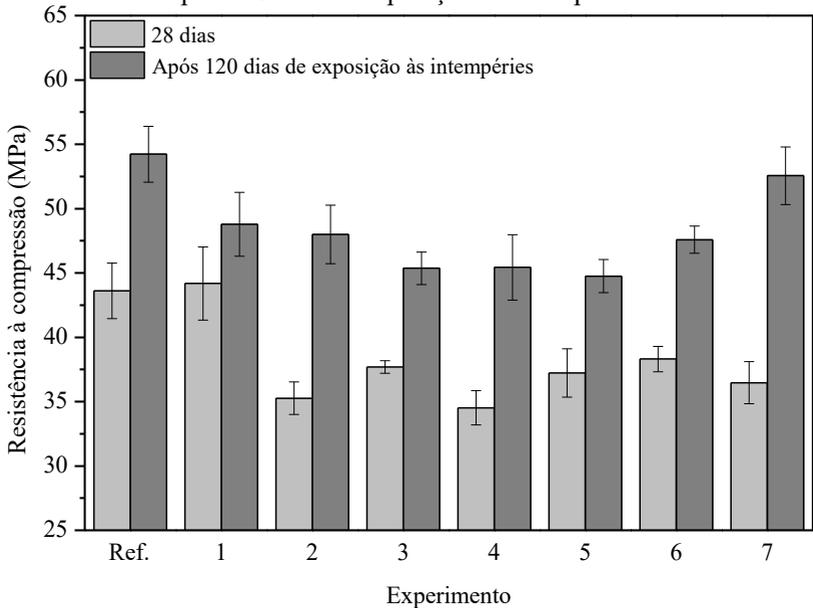
Fonte: Do autor, 2020.

Castoldi, Souza e De Andrade Silva (2019) testaram a durabilidade do concreto com teor volumétrico de macrofibra de polipropileno de 0,65% submetido a ciclos de envelhecimento acelerado e verificaram que

não houve alterações no comportamento à flexão, indicando que a fibra não sofreu degradação na matriz cimentícia.

A variação das resistências aos 120 dias entre as composições foi inferior em relação àquela avaliada anteriormente (aos 28 dias), indicando que ambas tendem a alcançar valores semelhantes em idades posteriores, como demonstrado na Figura 27.

Figura 27 - Comparação entre as resistências à compressão aos 28 dias e após 120 dias de exposição às intempéries.

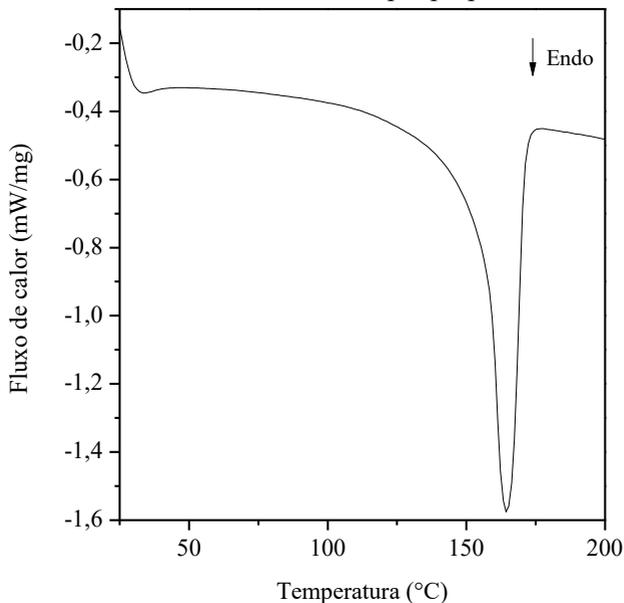


Fonte: Do autor, 2020.

### 5.2.1 Fibra de polipropileno comercial

Com base na análise térmica da Figura 28, a fibra de polipropileno apresenta uma entalpia de fusão de  $94,2 \text{ J.g}^{-1}$ , com um grau de cristalinidade de 57,1%, superior ao das aparas de canudos descartáveis. O seu processamento por extrusão, onde o material é forçado a passar por um orifício, propicia a organização das cadeias, implicando em uma estrutura mais cristalina. O resíduo com o grau de cristalinidade mais próximo ao da fibra, cerca de 52,0%, foi o tratado na concentração de 0,5 M.

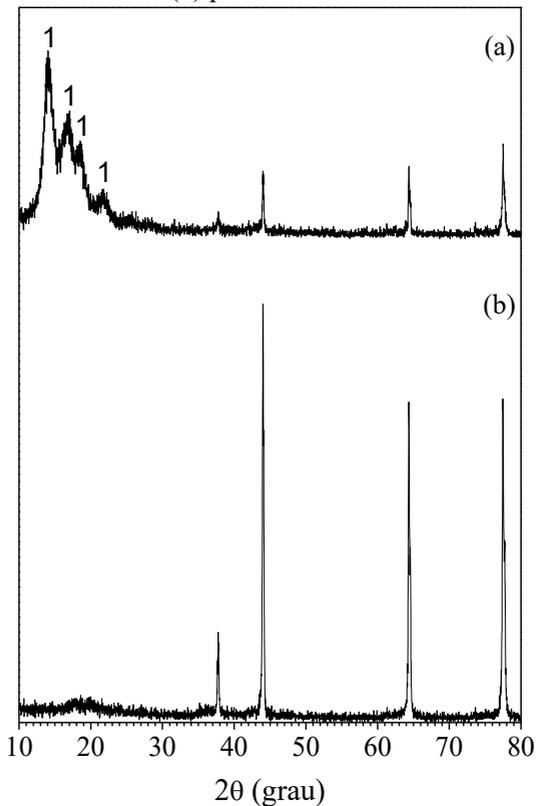
Figura 28 - Curva de DSC da fibra de polipropileno comercial.



Fonte: Do autor, 2020.

O difratograma de raios X da fibra de polipropileno (Figura 29) mostra os picos característicos do polipropileno  $\alpha$  ( $(C_3H_6)_n$  / JCPDS: 50-2397), distintos aos observados para as aparas de canudos (JCPDS: 49-2204), diferença associada ao modo como os grupos laterais estão alocados na cadeia polimérica. Picos referentes ao porta amostra do equipamento também são vistos.

Figura 29 - Difratoograma de raios X da (a) fibra de polipropileno e do (b) porta amostra.



Fonte: Do autor, 2020.

A Tabela 24 apresenta os resultados dos ensaios das peças de concreto com a fibra de polipropileno comercial para comparar sua eficiência com o resíduo da indústria de canudos descartáveis.

Como a fibra de polipropileno é de natureza hidrofóbica (AKAND; YANG; WANG, 2018), há a formação de vazios no seu contato com a matriz cimentícia. Dessa forma, a maior absorção de água, superior em mais de 33% em relação à referência, pode estar relacionada a isso. No entanto, o limite estabelecido pela ABNT NBR 9781 (2013) foi respeitado, com um valor inferior a 6%.

Tabela 24 - Resultados dos ensaios das peças de concreto com a fibra de polipropileno comercial.

Ensaio	Resultado	Média	Desvio padrão
Índice de consistência (mm)	5,0		
Resistência à tração na flexão (MPa)	4,67 4,77 4,73	4,72	0,05
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	43,78 43,27 45,79 42,20 43,37 46,97	44,23	1,79
Absorção de água (%)	5,7 5,7 5,7 5,5	5,6	0,1
Resistência à abrasão (mm)	21,35 21,52 21,68	21,52	0,17

Fonte: Do autor, 2020.

A resistência à compressão aos 28 dias, superior a 35 MPa, atendeu à ABNT NBR 9781 (2013). Porém, não houve uma melhora em relação aos *pavers* de referência (43,61 MPa), demonstrando que a fibra não exerce influência sobre essa propriedade, pois a existência dos vazios supera a eficácia no controle da abertura de fissuras, fenômeno este também relatado na literatura. Li e Liu (2020) introduziram macrofibras de polipropileno nas dosagens de 0,4 kg/m<sup>3</sup> e 6 kg/m<sup>3</sup> no concreto e encontraram resistências de 50,6 e 53,0 MPa respectivamente, próximas à da referência (52,9 MPa).

As peças de concreto com a fibra de polipropileno mostraram resistência à tração na flexão semelhante à referência, 4,72 MPa e 4,77 MPa, respectivamente. O teor volumétrico empregado, de 0,066%, foi superior ao aplicado na pesquisa de Wang et al. (2019). Os autores incorporaram fibras de polipropileno em teores de 0%, 0,025%, 0,033% e 0,042% (de mesmo comprimento que as fibras utilizadas neste trabalho) e alcançaram resultados satisfatórios, com as resistências aumentando gradativamente com o volume adicionado.

Como a quantidade de água adicionada à mistura interfere na existência de vazios na estrutura, a distinção entre os resultados associa-se com a menor quantidade utilizada pelos pesquisadores, permitida pelo uso de aditivo redutor de água, e também pelo uso de sílica ativa que, segundo Fu et al. (2018), melhora a dispersão das fibras no concreto e sua aderência à matriz.

Ao contrário do resíduo, a fibra de polipropileno possibilitou que no ensaio de resistência à abrasão não se formassem cavidades superiores a 23 milímetros, respeitando os requisitos da ABNT NBR 9781 (2013). Essa melhora pode estar relacionada ao fato de que a fibra reduz a fissuração por retração das peças, comumente visualizada quando o cimento CP V ARI é empregado, devido à secagem mais rápida do concreto, o que o torna mais suscetível à cavitação.

### 5.2.2 Comparação entre os resultados

De acordo com o planejamento experimental, os melhores resultados de resistências à compressão aos 28 dias e tração na flexão são alcançados para menores teores de resíduo e menores concentrações da solução de NaOH empregada no tratamento superficial das aparas de canudos. No entanto, a absorção de água das peças produzidas nessas condições foi superior à dos outros experimentos. Por isso, para comparar as peças com a adição de resíduo com as amostras de referência, adotou-se o experimento 7 (um dos pontos centrais) por conciliar as melhores propriedades.

As análises foram conduzidas ao nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ) e adotaram-se como hipóteses:

Teste F

$H_0$ :  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ ; a variância da amostra de referência ( $\sigma_1^2$ ) é igual à variância da amostra do experimento 7 ( $\sigma_2^2$ ).

$H_1$ :  $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ ; a variância da amostra de referência ( $\sigma_1^2$ ) é diferente da variância da amostra do experimento 7 ( $\sigma_2^2$ ).

Teste t

$H_0$ :  $\mu_1 = \mu_2$ ; a média da amostra de referência ( $\mu_1$ ) é igual à média da amostra do experimento 7 ( $\mu_2$ ).

$H_1$ :  $\mu_1 \neq \mu_2$ ; a média da amostra de referência ( $\mu_1$ ) é diferente da média da amostra do experimento 7 ( $\mu_2$ ).

Os testes estatísticos para a comparação entre os resultados encontram-se nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 25 - Teste F: duas amostras (referência e amostra com resíduo) para variâncias.

Ensaio	$\sigma_1^2$	$\sigma_2^2$	F	p
Absorção de água			0,4835165	0,565849
Tração na flexão			2,19403	0,6261682
Compressão (28 dias)	Ref.	Exp. 7	1,772727	0,5450406
Abrasão			0,1469141	0,2561902
Compressão (120 dias)			0,9356742	0,9436152

Fonte: Do Autor, 2020.

Na Tabela 25, para todas as comparações,  $p > \alpha$ , sendo  $\alpha = 0,05$ . Então, aceita-se  $H_0$ , pois não há evidências estatísticas de que as variâncias não são equivalentes. Logo, o Teste t pressupõe equivalência.

Tabela 26 - Teste t: duas amostras (referência e amostra com resíduo) presumindo variâncias equivalentes.

Ensaio	$\mu_1$	$\mu_2$	t	p
Absorção de água			-4,323065	0,004966086
Tração na flexão			1,572248	0,1909954
Compressão (28 dias)	Ref.	Exp. 7	6,454964	$7,30 \times 10^{-5}$
Abrasão			0,6482469	0,5521586
Compressão (120 dias)			1,310075	0,2194645

Fonte: Do Autor, 2020.

Na Tabela 26, exceto para o ensaio de absorção de água e resistência à compressão aos 28 dias, os valores  $p > \alpha$ , indicam que não há evidências estatísticas de que as médias são diferentes. Aceita-se  $H_0$ . Logo, a incorporação das aparas de canudos descartáveis não prejudicou as propriedades de resistência à tração na flexão, abrasão e compressão aos 120 dias.

Para a resistência à compressão aos 28 dias e absorção de água, como  $p < \alpha$ , rejeita-se  $H_0$ . Há evidências estatísticas de que as médias são diferentes.

A resistência à compressão das peças de concreto com o resíduo reduziu em aproximadamente 16,4%, concordando com os resultados

encontrados por Bhogayata e Arora (2017), que relataram uma diminuição dos valores pela adição de fibras de resíduo de plástico metalizado em teores volumétricos entre 0 e 2%.

Os resultados podem ser atribuídos aos vazios na matriz que aumentam pela adição do resíduo, o que explica a maior absorção de água em relação à amostra de referência. Dessa forma, o efeito dos vazios sobre a resistência é superior ao da retenção da abertura das fissuras. Contudo, os resultados estão de acordo com os limites descritos na ABNT NBR 9781 (2013).

A comparação entre os resultados dos ensaios com as amostras de referência e com a incorporação da fibra de polipropileno comercial encontra-se nas Tabelas 27 e 28. As análises foram conduzidas ao nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ) e adotaram-se como hipóteses:

#### Teste F

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ ; a variância da amostra de referência ( $\sigma_1^2$ ) é igual à variância da amostra com a fibra de polipropileno comercial ( $\sigma_2^2$ ).

$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ ; a variância da amostra de referência ( $\sigma_1^2$ ) é diferente da variância da amostra com a fibra de polipropileno comercial ( $\sigma_2^2$ ).

#### Teste t

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ ; a média da amostra de referência ( $\mu_1$ ) é igual à média da amostra com a fibra de polipropileno comercial ( $\mu_2$ ).

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ ; a média da amostra de referência ( $\mu_1$ ) é diferente da média da amostra com a fibra de polipropileno comercial ( $\mu_2$ ).

Tabela 27 - Teste F: duas amostras (referência e amostra com a fibra comercial) para variâncias.

Ensaio	$\sigma_1^2$	$\sigma_2^2$	F	p
Absorção de água			3,666667	0,3142399
Tração na flexão			1,934211	0,6816143
Compressão (28 dias)	Ref.	Fibra	1,471482	0,6820012
Abrasão			5,736842	0,296875

Fonte: Do Autor, 2020.

Na Tabela 27, para todas as comparações,  $p > \alpha$ , sendo  $\alpha = 0,05$ . Então, aceita-se  $H_0$ , pois não há evidências estatísticas de que as variâncias não são equivalentes. Logo, o Teste t pressupõe equivalência.

Tabela 28 - Teste t: duas amostras (referência e amostra com a fibra comercial) presumindo variâncias equivalentes.

Ensaio	$\mu_1$	$\mu_2$	t	p
Absorção de água			-13,8873	$8,68 \times 10^{-6}$
Tração na flexão			0,9375093	0,4015746
Compressão (28 dias)	Ref.	Fibra	-0,5441913	0,5982334
Abrasão			14,6383	0,000126706

Fonte: Do Autor, 2020.

Na Tabela 28, exceto para as resistências à tração na flexão e compressão aos 28 dias, os valores  $p < \alpha$  indicam que há evidências estatísticas de que as médias são diferentes. Rejeita-se  $H_0$ . Portanto, a fibra comercial melhora a resistência à abrasão dos *pavers*, porém eleva a absorção de água.

Para as resistências à tração na flexão e compressão aos 28 dias, os testes estatísticos evidenciaram que não há diferença entre as amostras de referência e aquelas com a fibra de polipropileno comercial, pois  $p > \alpha$ . Aceita-se  $H_0$ . Logo, a incorporação da fibra não melhora essas propriedades das peças de pavimento intertravado.

A comparação entre os resultados dos ensaios das amostras com a incorporação da fibra de polipropileno comercial e com o resíduo encontra-se nas Tabelas 29, 30 e 31. As análises foram conduzidas ao nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ) e adotaram-se como hipóteses:

#### Teste F

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ ; a variância da amostra com a fibra de polipropileno comercial ( $\sigma_1^2$ ) é igual à variância da amostra do experimento 7 ( $\sigma_2^2$ ).

$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ ; a variância da amostra com a fibra de polipropileno comercial ( $\sigma_1^2$ ) é diferente da variância da amostra do experimento 7 ( $\sigma_2^2$ ).

#### Teste t

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ ; a média da amostra com a fibra de polipropileno comercial ( $\mu_1$ ) é igual à média da amostra do experimento 7 ( $\mu_2$ ).

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ ; a média da amostra com a fibra de polipropileno comercial ( $\mu_1$ ) é diferente da média da amostra do experimento 7 ( $\mu_2$ ).

Tabela 29 - Teste F: duas amostras (amostra com a fibra comercial e com o resíduo) para variâncias.

Ensaio	$\sigma_1^2$	$\sigma_2^2$	F	p
Absorção de água			0,1318681	0,130197
Tração na flexão			1,134328	0,9370629
Compressão (28 dias)	Fibra	Exp. 7	1,204722	0,8430413
Abrasão			0,02560888	0,04993888

Fonte: Do Autor, 2020.

Na Tabela 29, exceto para a resistência à abrasão, para todas as comparações,  $p > \alpha$ . Então, aceita-se  $H_0$ , pois não há evidências estatísticas de que as variâncias não são equivalentes e o Teste t da Tabela 30 pressupõe equivalência. Para a resistência à abrasão, rejeita-se  $H_0$ , aplicando o Teste t para variâncias diferentes (Tabela 31).

Tabela 30 - Teste t: duas amostras (amostra com a fibra comercial e com o resíduo) presumindo variâncias equivalentes.

Ensaio	$\mu_1$	$\mu_2$	t	p
Absorção de água			5,290585	0,00184639
Tração na flexão			0,7526178	0,493548
Compressão (28 dias)	Fibra	Exp. 7	7,871272	$1,36 \times 10^{-5}$

Fonte: Do Autor, 2020.

Tabela 31 - Teste t: duas amostras (amostra com a fibra comercial e com o resíduo) presumindo variâncias não equivalentes.

Ensaio	$\mu_1$	$\mu_2$	t	p
Abrasão	Fibra	Exp. 7	-5,318246	0,03013795

Fonte: Do Autor, 2020.

Nas Tabelas 30 e 31, exceto para a resistência à tração na flexão, os valores  $p < \alpha$  indicam que há evidências estatísticas de que as médias são diferentes. Rejeita-se  $H_0$ .

Para a resistência à tração na flexão, os testes estatísticos evidenciaram que não há diferença entre as peças com a incorporação do resíduo e aquelas com a fibra de polipropileno comercial, pois  $p > \alpha$ . Aceita-se  $H_0$ .

A absorção de água dos *pavers* com a fibra de polipropileno foi superior às do com resíduo, indicando que o tratamento com hidróxido de sódio permitiu uma melhor aderência do polímero à matriz cimentícia,

reduzindo a hidrofobicidade da sua superfície e a porosidade do concreto, contribuindo para uma provável melhora da durabilidade das peças.

Apesar de as peças de concreto com a fibra de polipropileno serem mais porosas, a resistência à compressão foi superior, evidenciando a capacidade da fibra de controlar a abertura das fissuras, função não desempenhada com a mesma eficiência pelas aparas de canudos descartáveis.

Supõe-se que o resíduo não consegue evitar do mesmo modo que a fibra de polipropileno comercial a fissuração por retração do concreto, implicando na menor resistência à abrasão das peças com a incorporação das aparas de canudos. Porém, o ensaio de resistência à abrasão é facultativo, que não impede a aplicação do resíduo em peças de pavimento intertravado, pois os limites de resistências à compressão aos 28 dias e de absorção de água respeitam a norma ABNT NBR 9781 (2013).

## 6 CONCLUSÃO

As aparas de canudos descartáveis são compostas por polipropileno e possuem massa específica de  $0,90 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ , semelhante ao valor do polipropileno puro e da fibra comercial. Sua resistência à tração se mostrou inferior à da fibra e o tratamento superficial com a solução de hidróxido de sódio não modificou esta propriedade, alterando apenas a superfície do resíduo e o grau de cristalinidade.

As aparas após o processo de cominuição atingiram diferentes comprimentos, não sendo possível controlá-los por limitações do equipamento empregado. Quando submetidas ao tratamento em solução alcalina, uma melhor aderência à matriz de concreto foi observada por microscopia, com a redução dos vazios na interface entre ela e o material de reforço (resíduo).

Para as propriedades de resistência à tração na flexão e compressão aos 28 dias, o menor teor volumétrico de resíduo (0,25%) concilia os melhores resultados, pois ao ser adicionado ao concreto, ocasiona uma redução da matriz cimentícia, principal responsável pela resistência mecânica. A absorção de água das peças de pavimento intertravado não foram afetadas pelo teor de aparas, mas sim pela concentração da solução empregada no tratamento superficial.

Os *pavers*, quando expostos às intempéries, apresentaram ganhos consideráveis de resistência à compressão, demonstrando que o concreto não é afetado pela penetração de água, mesmo que os testes tenham evidenciado que as peças com a incorporação das aparas absorvam mais que as amostras de referência.

Os resultados evidenciaram que os corpos de prova com as aparas tratadas na concentração de 0,25 M e adicionadas em um teor volumétrico de 0,5% equipararam-se com as amostras de referência nas propriedades de resistência à abrasão, tração na flexão e compressão aos 120 dias e distinguiram-se nos quesitos absorção de água e resistência à compressão aos 28 dias. Porém, a fibra de polipropileno comercial também não promoveu o aumento da resistência à compressão, sendo que a absorção de água foi superior em relação às amostras com o resíduo e de referência, propriedade fundamental para a durabilidade, que atualmente tem grande relevância para a sustentabilidade das construções.

As peças de concreto com as aparas de canudos descartáveis não se fragmentam após a fissuração, o que impediria o seu deslocamento no pavimento. Além disso, os limites estabelecidos pela ABNT NBR 9781

(2013) foram atendidos, exceto para a resistência à abrasão, ensaio facultativo que não impede a sua aplicação.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio dos resultados alcançados com esta pesquisa, sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Buscar um novo mecanismo de cominuição das aparas de canudos descartáveis para a obtenção de tamanhos uniformes;
- Utilizar sílica ativa na composição do concreto para aumentar a aderência do resíduo à matriz;
- Empregar aditivo redutor de água com o objetivo de diminuir a porosidade das peças de pavimento intertravado.



## REFERÊNCIAS

ABC POLYMER INDUSTRIE. **WHAT ARE THE DIFFERENCES BETWEEN MICRO & MACRO SYNTHETIC FIBERS?**, 2017.

ABCP. **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, 2010.

ABNT NBR 12142. **Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT NBR 12821. **Preparação de concreto em laboratório - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR 16697. **Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT NBR 5738. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT NBR 7211. **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

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

ABNT NBR 9781. **Peças de concreto para pavimentação - Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT NBR NM 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT NBR NM 30. **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT NBR NM 45. **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT NBR NM 52. **Agregado miúdo - Determinação da massa**

**específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

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

ABNT NBR NM 67. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

AKAND, Lutfur; YANG, Mijia; WANG, Xinnan. Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 32–39, 2018.

ALBERTI, M. G.; ENFEDAQUE, A.; GÁLVEZ, J. C. Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete: Study of the influence of the concrete properties, casting procedures, the fibre length and specimen size. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 154, p. 225–244, 2016.

ALSAIF, Abdulaziz; KOUTAS, Lampros; BERNAL, Susan A.; GUADAGNINI, Maurizio; PILAKOUTAS, Kypros. Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 533–543, 2018.

ARCHANA, P; NAYAK, Ashwini N; NAYAK, Sanjana R; VADDAR, Harshita. Study of Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 6, n. 06, p. 8–12, 2017.

ASTM C1557. **Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers.** West Conshohocken, 2014.

BAAH, C. A.; BAAH, J. I. Polypropylene degradation in NaOH environments. **Materials and Design**, v. 23, p. 341–343, 2002.

BAFANA, Adarsh Pradip; YAN, Xingru; WEI, Xin; PATEL, Manisha; GUO, Zhanhu; WEI, Suying; WUJCIK, Evan K. Polypropylene nanocomposites reinforced with low weight percent graphene nanoplatelets. **Composites Part B: Engineering**, v. 109, p. 101–107,

2017.

BAUTECH. **Bautech fibra de polipropileno**. Disponível em: <<http://www.bautechbrasil.com.br/produtos/aditivos-para-argamassas-e-concretos/bautech-fibra-de-polipropileno>>. Acesso em: 27 dez. 2019.

BHOGAYATA, Ankur C.; ARORA, Narendra K. Fresh and strength properties of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 455–463, 2017.

BRASIL. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes**. 1. ed. Brasília: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2017.

BUČEK, Andrej; POPELKA, Anton; ZAHORANOVÁ, Anna; KOVÁČIK, Dušan; NOVÁK, Igor; ČERNÁK, Mirko. Acrylic Acid Plasma Treatment of Polypropylene Nonwoven Fabric. **Fibres and Textiles in Eastern Europe**, v. 24, p. 161–164, 2016.

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAPRARO, Ana Paula Brandão; CHEREMETA, Marcos Antonio; GONÇALVES, Marcos Paulo Galvão; CREMONEZ, Claiton; DE MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias. Influence of the cement type and water/cement ratio in concretes exposed in sewage treatment plants. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116842, 2019.

CARPALLO, Silvia C. **Começa segunda guerra de canudos**. El País, 2017. Disponível em: <[https://brasil.elpais.com/brasil/2017/04/26/internacional/1493243502\\_138078.html](https://brasil.elpais.com/brasil/2017/04/26/internacional/1493243502_138078.html)>. Acesso em: 8 out. 2018.

CASTOLDI, Raylane de Souza; SOUZA, Lourdes Maria Silva De; DE ANDRADE SILVA, Flávio. Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fiber reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 617–628, 2019.

CHEN, Dengyu; WANG, Yun; LIU, Yixuan; CEN, Kehui; CAO,

Xiaobing; MA, Zhongqing; LI, Yanjun. Comparative study on the pyrolysis behaviors of rice straw under different washing pretreatments of water, acid solution, and aqueous phase bio-oil by using TG-FTIR and Py-GC/MS. **Fuel**, v. 252, p. 1–9, 2019.

CHEN, Meng; ZHONG, Hui; ZHANG, Mingzhong. Flexural fatigue behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, p. 103441, jan. 2020.

CHEN, Yue; CEN, Guoping; CUI, Yunhua. Comparative study on the effect of synthetic fiber on the preparation and durability of airport pavement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 34–44, 2018.

CIDADES INTELIGENTES. **Saiba quais as cidades que já proibiram o canudo plástico**. Disponível em: <<https://ci.eco.br/saiba-quais-as-cidades-que-ja-proibiram-o-canudo-plastico/>>. Acesso em: 22 jan. 2020.

DAS, Chandra Sekhar; DEY, Tanish; DANDAPAT, Ramkrishna; MUKHARJEE, Bibhuti Bhusan; KUMAR, Jitendra. Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 649–659, 2018.

DE ALENCAR MONTEIRO, Vitor Moreira; LIMA, Leonardo Reis; DE ANDRADE SILVA, Flávio. On the mechanical behavior of polypropylene, steel and hybrid fiber reinforced self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 280–291, 2018.

FERNANDES, Idário. **Blocos e Pavers: Produção e Controle de Qualidade** (Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, Ed.). Ribeirão Preto, 2015.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues. Concreto com fibras. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1327–1365.

FRANCISZCZAK, P.; WOJNOWSKI, J.; KALNIŃSKA, K.; PIESOWICZ, E. The influence of matrix crystallinity on the mechanical performance of short-fibre composites – Based on homo-polypropylene and a random

polypropylene copolymer reinforced with man-made cellulose and glass fibres. **Composites Part B: Engineering**, v. 166, p. 516–526, 2019.

FRATERNALI, Fernando; CIANCIA, Vincenzo; CHECHILE, Rosaria; RIZZANO, Gianvittorio; FEO, Luciano; INCARNATO, Loredana. Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. **Composite Structures**, v. 93, p. 2368–2374, 2011.

FU, Qiang; NIU, Ditao; ZHANG, Jian; HUANG, Dagan; WANG, Yan; HONG, Mengshu; ZHANG, Lu. Dynamic compressive mechanical behaviour and modelling of basalt–polypropylene fibre-reinforced concrete. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 18, p. 914–927, 2018.

GENCEL, Osman; OZEL, Cengiz; KOKSAL, Fuat; ERDOGMUS, Ertugrul; MARTÍNEZ-BARRERA, Gonzalo; BROSTOW, Witold. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. **Journal of Cleaner Production**, v. 21, p. 62–70, 2012.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, p. 19–24, 2017.

GHORBANI, Saeid; SHARIFI, Sohrab; GHORBANI, Sahar; TAM, Vivian WY; DE BRITO, Jorge; KURDA, Rawaz. Effect of crushed concrete waste's maximum size as partial replacement of natural coarse aggregate on the mechanical and durability properties of concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 149, p. 664–673, 2019.

GILL, Anhad Singh; SIDDIQUE, Rafat. Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 323–332, 2018.

GORASSINI, Andrea; ADAMI, Gianpiero; CALVINI, Paolo; GIACOMELLO, Alessandro. ATR-FTIR characterization of old pressure sensitive adhesive tapes in historic papers. **Journal of Cultural Heritage**, v. 21, p. 775–785, 2016.

GUIMARÃES, André Tavares da Cunha; RECENA, Fernando Antonio Piazza; PEREIRA, Fernanda Macedo. Produtos de Cimento Portland.

In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 945–982.

HAHLADAKIS, John N.; VELIS, Costas A.; WEBER, Roland; IACOVIDOU, Eleni; PURNELL, Phil. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. **Journal of Hazardous Materials**, v. 344, p. 179–199, 2018.

HERMABESSIERE, Ludovic; DEHAUT, Alexandre; PAUL-PONT, Ika; LACROIX, Camille; JEZEQUEL, Ronan; SOUDANT, Philippe; DUFLOS, Guillaume. Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: A review. **Chemosphere**, v. 182, p. 781–793, 2017.

IRWAN, J.M.; ASYRAF, R.M.; OTHMAN, Norzila; KOH, Heng B; ANNAS, Mahamad Mohd Khairil; FAISAL, S.K. The Mechanical Properties of PET Fiber Reinforced Concrete from Recycled Bottle Wastes. **Advanced Materials Research**, v. 795, p. 347–351, 2013.

ISLAM, Mohammad Shahidul; AKHTAR, Sazeda. A Critical Assessment to the Performance of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete. **Canadian Chemical Transactions**, v. 1, n. 4, p. 253–266, 2013.

JMAL, Hamdi; BAHLOULI, Nadia; WAGNER-KOCHER, Christiane; LERAY, Dimitri; RUCH, Frédéric; MUNSCH, Jean Nicolas; NARDIN, Michel. Influence of the grade on the variability of the mechanical properties of polypropylene waste. **Waste Management**, v. 75, p. 160–173, 2018.

KAWAHARA, Yutaka; YOSHIOKA, Taiyo; TAKARADA, Wataru; KIKUTANI, Takeshi; TSUJI, Masaki. Alkaline Hydrolysis Kinetics of Poly(ethylene terephthalate) Fibers. **Journal of Fiber Science and Technology**, v. 72, n. 1, p. 9–16, 2016.

KHALID, F. S.; IRWAN, J. M.; IBRAHIM, M. H. Wan; OTHMAN, N.; SHAHIDAN, S. Performance of plastic wastes in fiber-reinforced concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 451–464, 2018.

KUNDU, Sarada Prasad; CHAKRABORTY, Sumit; CHAKRABORTY, Subrata. Effectiveness of the surface modified jute fibre as fibre reinforcement in controlling the physical and mechanical properties of concrete paver blocks. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 554–563, 2018.

KUTNIK, M.; SUTTIE, E.; BRISCHKE, C. Durability, efficacy and performance of bio-based construction materials: Standardisation background and systems of evaluation and authorisation for the European market. **Performance of Bio-based Building Materials**, p. 593–610, 2017.

LI, Biao; CHI, Yin; XU, Lihua; SHI, Yuchuan; LI, Changning. Experimental investigation on the flexural behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 80–94, 2018.

LI, Dong; LIU, Shi. Macro polypropylene fiber influences on crack geometry and water permeability of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 231, p. 117128, 2020.

LIU, Wenfeng; CHENG, Lu; LI, Shengtao. Review of electrical properties for polypropylene based nanocomposite. **Composites Communications**, v. 10, p. 221–225, 2018.

LIU, Yu Wen; CHO, Shih Wei. Study on application of fiber-reinforced concrete in sluice gates. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 737–746, 2018.

LÓPEZ-BUENDÍA, Angel M.; ROMERO-SÁNCHEZ, María Dolores; CLIMENT, Verónica; GUILLEM, Celia. Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 54, p. 29–35, 2013.

MACCAFERRI. **FibroMac 12 - Fibras para reforço do concreto**, 2008.

MARTINS, Maria Auxiliadora de Barros; BARROS, Regina Mambeli; SILVA, Gilbert; SANTOS, Ivan Felipe Silva Dos. Study on waste foundry exhaust sand, WFES, as a partial substitute of fine aggregates in conventional concrete. **Sustainable Cities and Society**, v. 45, p. 187–

196, 2019.

MEHTA, Provindar Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2008.

MONTEIRO, Paulo J. M.; MILLER, Sabbie A.; HORVATH, Arpad. Towards sustainable concrete. **Nature Materials**, v. 16, p. 698–699, 2017.

MULTNELL. **Fibra para concreto**. Disponível em: <[http://multnell.com.br/solucao/fibra-para-concreto/?gclid=EAIaIQobChMI5a7jw9285gIVFcpkCh2ceQQbEAMYASAAEgLYE\\_D\\_BwE](http://multnell.com.br/solucao/fibra-para-concreto/?gclid=EAIaIQobChMI5a7jw9285gIVFcpkCh2ceQQbEAMYASAAEgLYE_D_BwE)>. Acesso em: 27 dez. 2019.

MURUGAN, R. Bharathi; NATARAJAN, C.; CHEN, Shen En. Material development for a sustainable precast concrete block pavement. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 3, n. 5, p. 483–491, 2016.

MYNUDDIN, Shaik Ahamed. Statistical Analysis of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete. **International Journal of Advance Research in Engineering**, v. 5, n. 3, p. 2958–2962, 2017.

NAVYA, G; RAO, J Venkateswara. Experimental Investigation on Properties Concrete Paver Block with the Inclusion of Natural Fibers. **Int. Journal of Engineering Research and Applications**, v. 4, n. 8, p. 34–38, 2014.

NGUYEN, May Huu; NAKARAI, Kenichiro; NISHIO, Sohei. Durability index for quality classification of cover concrete based on water intentional spraying tests. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103355, 2019.

PELISSER, Fernando; MONTEDO, Oscar Rubem Klegues; GLEIZE, Philippe Jean Paul; ROMAN, Humberto Ramos. Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete. **Materials Research**, v. 15, n. 4, p. 679–686, 31 jul. 2012.

PELISSER, Fernando; VIEIRA, Alexandre; BERNARDIN, Adriano Michael. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 324–332,

2018.

PLASTICSEUROPE. **Plastics – the Facts 2018: An analysis of European plastics production, demand and waste data.** Bruxelles. Association of Plastics Manufacturers, 2018.

RAMEZANIANPOUR, A.A.; ESMAEILI, M.; GHAHARI, S.A.; NAJAFI, M.H. Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 411–418, jul. 2013.

RANJBAR, Navid; MEHRALI, Mehdi; BEHNIA, Arash; JAVADI PORDSARI, Alireza; MEHRALI, Mohammad; ALENGARAM, U. Johnson; JUMAAT, Mohd Zamin. A Comprehensive Study of the Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Based Geopolymer. **PLOS ONE**, v. 11, n. 1, p. 1–20, 2016.

ROSTAMI, Rouhollah; ZARREBINI, Mohammad; MANDEGARI, Mansoor; SANGINABADI, Khaled; MOSTOFINEJAD, Davood; ABTAHI, Sayyed Mahdi. The effect of concrete alkalinity on behavior of reinforcing polyester and polypropylene fibers with similar properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 97, p. 118–124, 2019.

ŞAHİN, Yıldız; SAHİN, Senol; İNAL, Melih. Modelling of the Tensile Properties of Calcium Carbonate Filled Polypropylene Composite Materials with Taguchi and Artificial Neural Networks. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 30, p. 282–286, 2018.

SAKETH, Ch; MANIKANTA PATEL, J; RAJESH, M; SADANAND, G; MANOJ, M. Statistical Analysis of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete. **International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology**, v. 3, n. 3, p. 518–532, 2017.

SARAVANAN, P.; DEVARAJU, A. Improving mechanical properties of palm sheath composites using sodium hydroxide [NaOH] treatment. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, p. 14355–14361, 2018.

SCHUELLER, Randy. Drinking Straw. **How Products Are Made**, v. 4, [s.d.].

SENANI, Meriem; FERHOUNE, Noureddine; GUETTALA, Abdelhamid. Substitution of the natural sand by crystallized slag of blast furnace in the composition of concrete. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, p. 851–857, 2018.

SHEN, Dejian; LIU, Xingzuo; ZENG, Xuan; ZHAO, Xiaoguang; JIANG, Guoqing. Effect of polypropylene plastic fibers length on cracking resistance of high performance concrete at early age. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 117874, maio 2020.

SILVA, Cláudio Oliveira. **Execução e Manutenção de Pavimento Intertravado**. Associação Brasileira de Cimento Portland, [s.d.].

SIMÕES, T.; COSTA, H.; DIAS-DA-COSTA, D.; JÚLIO, E. Influence of type and dosage of micro-fibres on the physical properties of fibre reinforced mortar matrixes. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 1277–1285, 2018.

SUKONTASUKKUL, Piti; PONGSOPHA, Phattharachai; CHINDAPRASIRT, Prinya; SONGPIRIYAKIJ, Smith. Flexural performance and toughness of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced geopolymer. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 37–44, 2018.

TANG, Hanying; LIU, Peng; LU, Ming; DING, Yanfen; WANG, Feng; GAO, Chong; ZHANG, Shimin; YANG, Mingshu. Thermal-oxidative effect of a co-condensed nanosilica-based antioxidant in polypropylene. **Polymer**, v. 112, p. 369–376, 2017.

TECH SPEC 10. **Application Guide for Interlocking Concrete Pavements**. [s.l.]. Interlocking Concrete Pavement Institute, 2015.

THOMPSON, R. C.; MOORE, C. J.; VOM SAAL, F. S.; SWAN, S. H. Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 364, n. 1526, p. 2153–2166, 27 jul. 2009.

UYGUNOĞLU, Tayfun; TOPCU, Ilker Bekir; GENCEL, Osman; BROSTOW, Witold. The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of pre-fabricated concrete interlocking

blocks (PCIBs). **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 180–187, 2012.

WAGNER, Travis P. Sustainability and Plastic Waste. **Encyclopedia of Food Security and Sustainability**, v. 2, p. 588–592, 2019.

WANG, Dehong; JU, Yanzhong; SHEN, Hao; XU, Libin. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 464–473, 2019.

WON, Jong-Pil; JANG, Chang-Il; LEE, Sang-Woo; LEE, Su-Jin; KIM, Heung-Youl. Long-term performance of recycled PET fibre-reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 660–665, 2010.

YIN, Shi; TULADHAR, Rabin; SHI, Feng; COMBE, Mark; COLLISTER, Tony; SIVAKUGAN, Nagaratnam. Use of macro plastic fibres in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 180–188, 2015.

ZHANG, Hua; WANG, Lei; ZHENG, Kai; BAKURA, Tijjani Jibrin; TOTAKHIL, Peer Gul. Research on compressive impact dynamic behavior and constitutive model of polypropylene fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 584–595, 2018.

ZHANG, Qian; JIAO, Qian; LEROUX, Fabrice; TANG, Pinggui; LI, Dianqing; FENG, Yongjun. Antioxidant intercalated hydrocalumite as multifunction nanofiller for Poly(propylene): Synthesis, thermal stability, light stability, and anti-migration property. **Polymer Degradation and Stability**, v. 140, p. 9–16, 2017.



## APÊNDICES

**APÊNDICE A - Tabela de índice de vazios e massa específica das amostras**

Experimento*	m (g)	m <sub>i</sub> (g)	m <sub>sat</sub> (g)	I <sub>v</sub> (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão (g/cm <sup>3</sup> )
R.1	3.635,7	2.231,5	3.811,4	11,1			2,3		
R.2	3.606,0	2.202,9	3.781,0	11,1			2,3		
R.3	3.552,5	2.175,7	3.726,9	11,2	10,8	0,5	2,3	2,3	0,0
R.4	3.595,3	2.189,2	3.757,3	10,3			2,3		
R.5	3.590,3	2.187,0	3.751,6	10,3			2,3		
1.1	3.475,7	2.130,2	3.670,5	12,6			2,3		
1.2	3.601,9	2.210,8	3.794,0	12,1			2,3		
1.3	3.557,6	2.179,8	3.753,3	12,4	12,0	0,6	2,3	2,3	0,0
1.4	3.577,7	2.183,7	3.759,3	11,5			2,3		
1.5	3.604,7	2.196,4	3.785,2	11,4			2,3		
2.1	3.602,1	2.182,6	3.755,1	9,7			2,3		
2.2	3.587,1	2.172,7	3.748,2	10,2			2,3		
2.3	3.518,9	2.133,9	3.678,6	10,3	9,8	0,5	2,3	2,3	0,0
2.4	3.605,7	2.174,0	3.756,1	9,5			2,3		
2.5	3.595,0	2.168,6	3.740,4	9,3			2,3		
3.1	3.556,5	2.174,4	3.743,5	11,9			2,3		
3.2	3.487,2	2.125,7	3.674,1	12,1			2,3		
3.3	3.560,3	2.164,6	3.736,1	11,2	11,8	0,4	2,3	2,3	0,0
3.4	3.567,1	2.174,0	3.759,6	12,1			2,2		
3.5	3.590,0	2.182,4	3.773,6	11,5			2,3		

Experimento*	m (g)	m <sub>i</sub> (g)	m <sub>sat</sub> (g)	I <sub>v</sub> (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)	ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão (g/cm <sup>3</sup> )
4.1	3.580,6	2.193,4	3.773,6	12,2			2,3		
4.2	3.553,0	2.177,4	3.748,3	12,4			2,3		
4.3	3.579,0	2.192,5	3.764,2	11,8	12,0	0,3	2,3	2,3	0,0
4.4	3.504,1	2.142,0	3.690,0	12,0			2,3		
4.5	3.563,2	2.170,7	3.749,0	11,8			2,3		
5.1	3.511,7	2.139,5	3.682,2	11,1			2,3		
5.2	3.580,0	2.185,7	3.768,5	11,9			2,3		
5.3	3.605,6	2.206,9	3.786,5	11,5	11,3	0,6	2,3	2,3	0,0
5.4	3.557,2	2.170,9	3.743,1	11,8			2,3		
5.5	3.560,3	2.162,1	3.724,3	10,5			2,3		
6.1	3.578,1	2.186,0	3.760,0	11,6			2,3		
6.2	3.578,6	2.194,3	3.771,6	12,2			2,3		
6.3	3.512,9	2.149,4	3.704,2	12,3	11,7	0,6	2,3	2,3	0,0
6.4	3.561,5	2.175,7	3.745,2	11,7			2,3		
6.5	3.610,7	2.201,3	3.781,0	10,8			2,3		
7.1	3.702,8	2.250,1	3.837,4	8,5			2,3		
7.2	3.629,5	2.201,4	3.770,8	9,0			2,3		
7.3	3.654,6	2.214,9	3.790,4	8,6	8,4	0,4	2,3	2,3	0,0
7.4	3.634,0	2.199,0	3.758,4	8,0			2,3		
7.5	3.692,5	2.233,0	3.820,7	8,1			2,3		

\*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo - 1.1 corresponde ao corpo de prova 1 do experimento 1. A letra R representa as amostras de referência.

Fonte: Do autor, 2020.

### APÊNDICE B - Tabela de absorção de água das amostras

Experimento*	m (g)	m <sub>s</sub> (g)	A (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)
R.1	2.819,6	2.940,7	4,3		
R.2	2.772,3	2.891,5	4,3		
R.3	2.838,5	2.950,1	3,9	4,2	0,2
R.4	2.814,4	2.930,0	4,1		
1.1	2.783,1	2.938,2	5,6		
1.2	2.806,1	2.963,4	5,6		
1.3	2.818,6	2.980,5	5,7	5,7	0,1
1.4	2.803,6	2.962,5	5,7		
2.1	2.847,7	3.002,6	5,4		
2.2	2.777,5	2.932,0	5,6		
2.3	2.829,6	2.984,7	5,5	5,5	0,1
2.4	2.720,7	2.870,5	5,5		
3.1	2.807,9	2.934,7	4,5		
3.2	2.848,5	2.975,6	4,5		
3.3	2.875,3	3.002,6	4,4	4,4	0,1
3.4	2.896,8	3.020,4	4,3		
4.1	2.919,8	3.026,7	3,7		
4.2	2.892,2	3.001,3	3,8		
4.3	2.818,9	2.927,3	3,8	3,8	0,0
4.4	2.884,1	2.992,6	3,8		
5.1	2.838,2	2.976,1	4,9		
5.2	2.823,4	2.950,6	4,5		
5.3	2.900,3	3.031,3	4,5	4,7	0,2
5.4	2.712,6	2.840,2	4,7		
6.1	2.967,3	3.066,1	3,3		
6.2	2.943,2	3.040,7	3,3		
6.3	2.915,6	3.019,7	3,6	3,5	0,2
6.4	2.824,1	2.927,1	3,6		
7.1	2.865,9	2.999,5	4,7		
7.2	2.839,4	2.971,0	4,6		
7.3	2.944,3	3.097,9	5,2	4,9	0,3
7.4	2.795,3	2.933,7	5,0		

\*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo - 1.1 corresponde ao corpo de prova 1 do experimento 1. A letra R representa as amostras de referência.

Fonte: Do autor, 2020.

**APÊNDICE C - Tabela de resistência à tração na flexão das amostras**

Experimento*	F (N)	b (mm)	d (mm)	F <sub>ct,f</sub> (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
R.1	16.228,93	101,74	100,52	4,74		
R.2	17.004,05	102,09	101,55	4,85	4,77	0,07
R.3	16.741,35	102,27	101,99	4,72		
1.1	16.838,65	102,25	101,15	4,83		
1.2	17.026,75	102,73	101,76	4,80	4,88	0,10
1.3	17.464,58	102,86	100,98	5,00		
2.1	15.544,61	101,80	101,69	4,43		
2.2	15.161,92	103,28	99,01	4,49	4,56	0,18
2.3	17.150,00	102,65	102,57	4,76		
3.1	16.491,63	102,70	101,54	4,67		
3.2	16.141,36	102,38	99,68	4,76	4,70	0,05
3.3	16.261,36	103,31	100,57	4,67		
4.1	14.565,17	102,46	100,03	4,26		
4.2	14.626,79	102,46	102,43	4,08	4,18	0,09
4.3	14.681,93	101,97	101,38	4,20		
5.1	15.641,91	103,37	100,34	4,51		
5.2	14.860,30	102,80	99,28	4,40	4,44	0,06
5.3	15.372,73	102,54	101,11	4,40		
6.1	15.217,05	104,05	99,45	4,44		
6.2	16.134,88	102,54	102,86	4,46	4,50	0,08
6.3	16.108,93	104,40	100,43	4,59		
7.1	17.010,54	102,66	102,53	4,73		
7.2	16.488,38	104,30	100,30	4,71	4,70	0,05
7.3	16.267,85	102,67	101,18	4,64		

\*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo - 1.1 corresponde ao corpo de prova 1 do experimento 1. A letra R representa as amostras de referência.

Fonte: Do autor, 2020.

**APÊNDICE D - Tabela de resistência à compressão aos 28 dias das amostras**

Experimento*	P (N)	$f_{pi}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$F_{pk,est}$ (MPa)
R.1	232.455	45,05			
R.2	233.771	45,31			
R.3	217.581	42,17	43,61	2,16	41,62
R.4	238.509	46,23			
R.5	215.080	41,68			
R.6	212.579	41,20			
1.1	204.944	39,72			
1.2	245.486	47,58			
1.3	240.484	46,61	44,18	2,84	41,57
1.4	230.743	44,72			
1.5	226.400	43,88			
1.6	219.687	42,58			
2.1	179.014	34,69			
2.2	194.941	37,78			
2.3	177.566	34,41	35,26	1,26	34,10
2.4	179.409	34,77			
2.5	181.778	35,23			
2.6	179.014	34,69			
3.1	194.809	37,76			
3.2	192.966	37,40			
3.3	199.416	38,65	37,70	0,49	37,24
3.4	194.151	37,63			
3.5	192.966	37,40			
3.6	192.703	37,35			
4.1	169.010	32,76			
4.2	174.275	33,78			
4.3	175.855	34,08	34,52	1,33	33,29
4.4	188.623	36,56			
4.5	182.963	35,46			
4.6	177.829	34,47			

Experimento*	P (N)	$f_{pi}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$F_{pk,est}$ (MPa)
5.1	181.515	35,18	37,22	1,88	35,49
5.2	205.471	39,82			
5.3	190.070	36,84			
5.4	201.917	39,13			
5.5	189.676	36,76			
5.6	183.489	35,56			
6.1	201.522	39,06	38,31	0,98	37,40
6.2	194.414	37,68			
6.3	197.837	38,34			
6.4	189.281	36,68			
6.5	199.943	38,75			
6.6	202.970	39,34			
7.1	182.436	35,36	36,47	1,63	34,98
7.2	203.497	39,44			
7.3	181.910	35,26			
7.4	182.831	35,43			
7.5	191.913	37,19			
7.6	186.517	36,15			

\*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo - 1.1 corresponde ao corpo de prova 1 do experimento 1. A letra R representa as amostras de referência.

Fonte: Do autor, 2020.

**APÊNDICE E - Tabela de resistência à abrasão das amostras**

Experimento*	Cavidade (mm)	Média (mm)	Desvio padrão (mm)
R.1	25,12		
R.2	25,54	25,14	0,40
R.3	24,75		
1.1	25,01		
1.2	25,98	25,11	0,82
1.3	24,34		
2.1	26,08		
2.2	24,02	24,50	1,41
2.3	23,39		
3.1	25,05		
3.2	27,15	25,61	1,35
3.3	24,63		
4.1	25,65		
4.2	26,88	25,63	1,26
4.3	24,37		
5.1	29,28		
5.2	25,73	25,91	3,29
5.3	22,71		
6.1	26,34		
6.2	25,45	25,09	1,46
6.3	23,49		
7.1	23,90		
7.2	24,39	24,72	1,03
7.3	25,88		

\*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo - 1.1 corresponde ao corpo de prova 1 do experimento 1. A letra R representa as amostras de referência.

Fonte: Do autor, 2020.

**APÊNDICE F - Tabela de resistência à compressão após 120 dias de exposição das amostras às intempéries**

Experimento*	P (N)	$f_{pi}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$F_{pk,est}$ (MPa)
R.1	297.084	57,58			
R.2	280.367	54,34			
R.3	263.914	51,15	54,23	2,17	52,23
R.4	280.499	54,36			
R.5	272.469	52,81			
R.6	284.448	55,13			
1.1	245.749	47,63			
1.2	259.438	50,28			
1.3	267.468	51,84	48,78	2,49	46,69
1.4	261.544	50,69			
1.5	236.272	45,79			
1.6	239.563	46,43			
2.1	237.456	46,02			
2.2	241.800	46,86			
2.3	254.568	49,34	48,00	2,27	45,91
2.4	237.720	46,07			
2.5	246.802	47,83			
2.6	267.599	51,86			
3.1	230.217	44,62			
3.2	236.140	45,77			
3.3	240.616	46,63	45,36	1,27	44,20
3.4	223.372	43,29			
3.5	240.221	46,56			
3.6	233.771	45,31			
4.1	222.188	43,06			
4.2	220.476	42,73			
4.3	228.901	44,36	45,43	2,53	43,10
4.4	241.010	46,71			
4.5	239.168	46,35			
4.6	254.700	49,36			

Experimento*	P (N)	$f_{pi}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$F_{pk,est}$ (MPa)
5.1	223.241	43,27			
5.2	234.824	45,51			
5.3	224.162	43,45	44,75	1,29	43,57
5.4	238.115	46,15			
5.5	237.193	45,97			
5.6	227.848	44,16			
6.1	244.038	47,30			
6.2	246.539	47,78			
6.3	235.482	45,64	47,58	1,06	46,60
6.4	246.934	47,86			
6.5	251.409	48,73			
6.6	248.645	48,19			
7.1	271.680	52,65			
7.2	284.711	55,18			
7.3	259.965	50,38	52,56	2,24	50,50
7.4	282.342	54,72			
7.5	255.884	49,59			
7.6	272.601	52,83			

\*Nota referente à nomenclatura adotada: Exemplo - 1.1 corresponde ao corpo de prova 1 do experimento 1. A letra R representa as amostras de referência.

Fonte: Do autor, 2020.