

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**PROPOSTA DE PAVIMENTO PERMEÁVEL PARA TRÁFEGO LEVE A
MODERADO A PARTIR DE CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO E
PARAFINA COMO AGENTE ESPAÇADOR**

FABIANA MENDES

JOINVILLE – SC

2021

FABIANA MENDES

**PROPOSTA DE PAVIMENTO PERMEÁVEL PARA TRÁFEGO LEVE A
MODERADO A PARTIR DE CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO E
PARAFINA COMO AGENTE ESPAÇADOR**

Dissertação de mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia de Processos, na Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE.

Orientadora: Prof^a Dr^a Noeli Sellin

JOINVILLE – SC

2021

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

M538p	<p>Mendes, Fabiana</p> <p>Proposta de pavimento permeável para tráfego leve a moderado a partir do concreto com agregado reciclado e parafina como agente espaçador / Fabiana Mendes ; orientadora Dra. Noeli Sellin. – Joinville: UNIVILLE, 2021.</p> <p>138 p.: il.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)</p> <p>1.Pavimentos. 2. Agregados (Materiais de construção). 3. Concreto - Permeabilidade. 4. Construção civil. 5. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Sellin, Noeli (orient.). II. Título.</p> <p>CDD 666.893</p>
-------	--

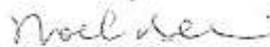
Termo de Aprovação

“Proposta de pavimento permeável para tráfego leve a moderado a partir de concreto com agregado reciclado e parafina como agente espaçador”

por

Fabiana Mendes

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Desenvolvimento e Gestão de Processos e Produtos e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos.

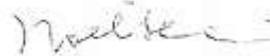


Profa. Dra. Noeli Sellin
Orientadora (UNIVILLE)



Profa. Dra. Ana Paula Testa Pezzin
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos (UNIVILLE)

Banca Examinadora:



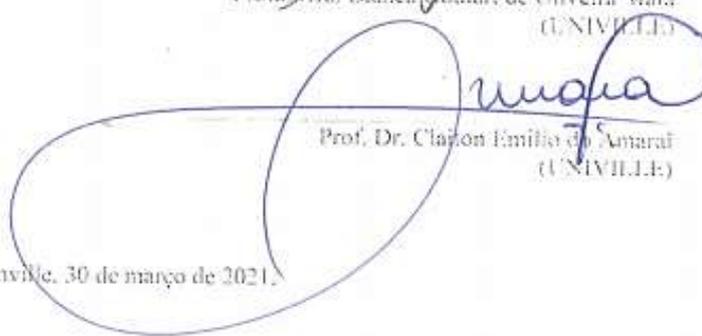
Profa. Dra. Noeli Sellin
Orientadora (UNIVILLE)



Profa. Dra. Carine Cardoso dos Santos
(Centro Universitário - Católica SC)



Profa. Dra. Bianca Coullart de Oliveira Maia
(UNIVILLE)



Prof. Dr. Cláudio Emílio do Amaral
(UNIVILLE)

Joinville, 30 de março de 2021.

Este trabalho é dedicado a Deus, ao meu marido Adilson Quirino Ramos, ao meu filho Frederico Mendes Ramos e aos meus pais Ary da Silveira Mendes (*in memoriam*) e Maria Clarice Mendes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me guiado, me amparado e me capacitado para mais esta conquista.

Agradecimento especial ao meu marido Adilson Quirino Ramos e meu filho Frederico Mendes Ramos pelo suporte ao longo desta jornada de 2 anos, pela ajuda e auxílio em diversas etapas.

Dedico este trabalho aos meus pais Ary da Silveira Mendes (*in memoriam*) e Maria Clarice Mendes e meus irmãos Maria Alessandra Mendes e Ary da Silveira Mendes Júnior.

Minha enorme gratidão pela orientação da Prof^a Dr^a Noeli Sellin que abraçou meu trabalho e foi comigo por todos os caminhos para chegarmos ao resultado final. Sua competência, seriedade e profissionalismo permitiram que eu pudesse alcançar e ampliar meus conhecimentos nesta área de materiais.

Também agradeço ao corpo docente do Mestrado em Engenharia de Processos da Univille por todo conhecimento compartilhado.

Ao instrutor do Laboratório de Materiais do Centro Universitário Católica de Santa Catarina Robson Luiz Rosa pelo auxílio em todo processo de execução dos ensaios da minha dissertação.

À Terraplanagem Medeiros, em específico ao Engenheiro Ambiental e Sanitarista Israel de Farias, meu muitíssimo obrigado pela doação do resíduo para o agregado reciclado, material base deste trabalho, e pela presteza de sempre.

À empresa Fainatex Indústria e Comércio pelo fornecimento da parafina sólida.

Aos meus amigos pelo apoio e amizade, meus sinceros agradecimentos. Obrigado pelo carinho.

Aproveito a oportunidade de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

*“Na natureza, nada se cria, nada se perde,
tudo se transforma”.*

(Antoine Lavoisier)

RESUMO

Um dos maiores problemas do crescimento dos centros urbanos é a grande geração de resíduos de construção e demolição (RCD), pois mesmo com a criação de políticas para o gerenciamento destes resíduos, ainda há grandes quantidades dispostas em locais inadequados. Visando a minimização desses problemas, propõem-se o estudo de um concreto permeável com agregados reciclados com resistência mecânica e permeabilidade compatíveis para aplicação em pavimentação de áreas de tráfego leve a moderado. O traço utilizado foi 1:3 (cimento:agregado graúdo) e as misturas de concreto permeável foram elaboradas com substituição parcial de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% (em massa) do agregado graúdo convencional (brita) pelo agregado reciclado de RCD, com 15% desse valor composto de parafina granulada incorporada na mistura do concreto como material formador de porosidade de forma a permitir o fluxo de água através do pavimento. Para efeito de comparação, o pavimento permeável também foi produzido somente com agregados convencionais. Os agregados convencionais e reciclados foram caracterizados por análise granulométrica, módulo de finura, índice de forma, desgaste por abrasão e massa unitária aparente. A influência dos agregados reciclados e da parafina granulada nas características e propriedades das amostras de concreto permeável foi avaliada considerando o material no estado endurecido por análise do comportamento mecânico (resistência à compressão axial, compressão por tração diametral e tração na flexão) e hidráulico (porosidade e permeabilidade). Foi realizada uma avaliação da proposta de reutilização e reciclagem, conforme os critérios Classificação, Potencialidade, Quantidade/Viabilidade, Aplicabilidade (CPQvA). Os resultados mostraram boa correlação com os dados existentes na literatura. Os grânulos de parafina na mistura ocasionaram um aumento considerável no coeficiente de permeabilidade. Todos os concretos produzidos apresentaram coeficiente de permeabilidade superiores ao valor mínimo recomendado para pavimentos permeáveis. O concreto permeável com substituição de 40% do agregado convencional pelo agregado reciclado apresentou os melhores resultados de resistência mecânica à tração (4,11 MPa), porosidade (22,96%) e permeabilidade (2,51 cm/s). Na análise dos fatores CPQvA, a proposta de valorização do resíduo mostrou-se viável economicamente e a disponibilidade de material e sua aplicabilidade foi comprovada. Os agregados reciclados apresentaram potencial para uso como pavimento permeável em áreas de tráfego leve a moderado contribuindo para a minimização dos problemas e custos associados aos resíduos da construção civil e à impermeabilização das áreas urbanas.

Palavras-chave: valorização de resíduos, concreto permeável, agregado reciclado de RCD, parafina.

ABSTRACT

One of the biggest problems in the growth of urban centers is the large generation of construction and demolition waste (RCD), because even with the creation of policies for the management of this waste, there are still large quantities disposed in inadequate locations. Aiming to minimize these problems, it was proposed to study a permeable concrete with recycled aggregates with compatible mechanical resistance and permeability for application in paving areas of light to moderate traffic. The mix used was 1:3 (cement:coarse aggregate) and permeable concrete mixtures were made with partial replacement of 20%, 40%, 60%, 80% and 100% (by mass) of the conventional coarse aggregate (crushed stone) by the recycled aggregate of RCD, with 15% of that value composed of granulated paraffin incorporated in the concrete mixture as a porosity-forming material in order to allow the flow of water through the pavement. For comparison, the permeable pavement was also produced only with conventional aggregates. Conventional and recycled aggregates were characterized by particle size analysis, fineness modulus, shape index, abrasion wear and apparent unit mass. The influence of recycled aggregates and granulated paraffin on the characteristics and properties of permeable concrete samples was evaluated considering the material in the hardened state by analyzing the mechanical behavior (resistance to axial compression, compression by diametrical traction and flexion traction) and hydraulic (porosity and permeability). An evaluation of the proposal for reuse and recycling was carried out, according to the criteria Classification, Potentiality, Quantity/Viability, Applicability (CPQvA). The results showed a good correlation with the existing data in the literature. The paraffin granules in the mixture caused a considerable increase in the permeability coefficient. All the concretes produced showed a permeability coefficient higher than the minimum recommended value for permeable pavements. The permeable concrete with replacement of 40% of the conventional aggregate by the recycled aggregate presented the best results of mechanical resistance to traction (4.11 MPa), porosity (22.96%) and permeability (2.51 cm / s). In the analysis of CPQvA factors, the proposal for the valorization of the residue proved to be economically viable and the material availability and its applicability was proven. These recycled aggregates exhibited potential for use as permeable pavement in areas of light to moderate traffic contributing to minimizing the problems and costs associated with construction waste and waterproofing urban areas.

Keywords: waste recovery, permeable concrete, recycled RCD aggregate, paraffin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de gestão dos resíduos sólidos	23
Figura 2 – Origem do RCD em algumas cidades brasileiras (% da massa total).	27
Figura 3 – Composição dos RCD no Brasil.	28
Figura 4 – Aspecto típico de um concreto permeável.	32
Figura 5 – Amostras de concreto permeável com diferentes teores de água: (a) pouca água, (b) quantidade apropriada de água, (c) demasiada água.	33
Figura 6 – Textura de um pavimento de concreto poroso.	35
Figura 7 – Amostra de pavimento permeável.	35
Figura 8 – Pavimento permeável com infiltração total no solo.	36
Figura 9 – Pavimento permeável com infiltração parcial no solo.	37
Figura 10 – Pavimento permeável sem infiltração no solo.	37
Figura 11 – Zona de transição (interação) entre as partículas de agregado e a pasta de cimento.	40
Figura 12 – Presença de poros no concreto endurecido	41
Figura 13 – Distribuição da colmatação no pavimento de concreto permeável.	42
Figura 14 – Evolução da colmatação em pavimentos permeáveis com limpeza periódica anual e sem manutenção da limpeza.	43
Figura 15 – Relação entre pavimento impermeável (a) e pavimento permeável (b).	44
Figura 16 – Escoamento superficial observado em seis tipos de pavimentos.	45
Figura 17 – Diagrama esquemático do problema hidrológico nas cidades.	45
Figura 18 – Fluxograma do desenvolvimento experimental.	47
Figura 19 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland CP II-Z-40 (a) componentes; (b) exigências físico-mecânicas; (c) exigências química e (d) influência nas propriedades de pastas, argamassas e concretos.	49
Figura 20 – Etapas do ensaio de módulo de finura: (a) pesagem do cimento; (b) peneiramento do cimento; (c) material retido na peneira; (d) pesagem do material retido na peneira.	50
Figura 21 - Etapas de recebimento e preparação dos resíduos: (a) veículo de transporte; (b) material a ser rompido; (c) rompimento; (d) trama de ferro; (e) material rompido; (f) transporte até o britador; (g) britador operando; (h) material britado.	51

Figura 22 – Células para cada tipo de material dentro da área de transbordo e reciclagem da empresa	52
Figura 23 – Locais de armazenamento dos resíduos: (a) vista geral do britador, (b) esteira que conduz o material britado, (c e d) material depositado <i>in loco</i>	52
Figura 24 – Amostras acondicionadas pós coleta na usina.	53
Figura 25 – Secagem da amostra em estufa e esfriamento à temperatura ambiente.	53
Figura 26 – Agitador mecânico e sistema de peneiramento.	54
Figura 27 – (a) Agregados convencionais e (b) agregados reciclados	56
Figura 28 – Faixa dos agregados reciclados descartados.....	56
Figura 29 – Faixa dos agregados reciclados utilizados na confecção do concreto permeável.	57
Figura 30 – Interpretação da forma do agregado graúdo	57
Figura 31 – Determinação das dimensões dos agregados graúdos utilizando o paquímetro.....	58
Figura 32 – Grãos medidos no ensaio de índice de forma	58
Figura 33 – Etapas da determinação das medidas dos grãos: (a) Paquímetro digital, (b) Medição do comprimento C e (c) Medição da espessura e.....	59
Figura 34 – Máquina de ensaio de abrasão de <i>Los Angeles</i> e as esferas de aço ...	60
Figura 35 – Etapas do ensaio de abrasão de <i>Los Angeles</i> : (a) 5 kg do material colocado no tambor, (b) material retirado pós rotação no tambor, (c) pesagem material pós rotação no tambor e (d) retirada do material pulverulento peneirado na #1,7 mm	61
Figura 36 – Sequência do ensaio de determinação de massa aparente.	62
Figura 37 – Agregado graúdo utilizado na confecção dos corpos de prova de concreto permeável convencional.	63
Figura 38 – Parafina granulada usada na confecção do concreto permeável com agregados reciclados.	64
Figura 39 – Modelos gráficos: (a) Superfícies de resposta e (b) Contorno de resposta	68
Figura 40 – Betoneira 120 litros utilizada para confecção dos concretos.....	69
Figura 41 – Concreto fresco com agregado reciclado (teste visual da pelota)	70
Figura 42 – Ensaio de <i>Slump Test</i>	71

Figura 43 – Mesa de consistência para compactação do concreto nos moldes prismáticos.....	72
Figura 44 – Corpos de prova moldados para os ensaios: (a) cilíndrico (10x20 cm), (b) prismático (4x16 cm) e (c) prismático (14x16 cm)	72
Figura 45 – Cura por imersão na água dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos.	73
Figura 46 – Corpos de prova após cura: (a) 20% de RCD, (b) 40% de RCD, (c) 60% de RCD, (d) 80% de RCD, (e) 100% de RCD e (f) 0% de RCD (concreto padrão)...	73
Figura 47 – Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão	74
Figura 48 – Equipamento utilizado na retificação de corpos de prova cilíndricos	74
Figura 49 – Corpo de prova retificados.....	75
Figura 50 – Corpo de prova posicionado para o ensaio de compressão envolto com plástico filme	75
Figura 51 – Representação da resistência à tração por compressão diametral.....	76
Figura 52 – Corpo de prova cilíndrico posicionado para a realização do ensaio.....	77
Figura 53 – Equipamento utilizado no ensaio de resistência à tração na flexão: (a) e (b) máquina universal EMIC e (c) dispositivo de Rilem	78
Figura 54 – Corpo de prova prismático 4x4x16 cm	78
Figura 55 – Corpo de prova prismático posicionado para a realização do ensaio ...	78
Figura 56 – Corpos de prova prontos para determinação do coeficiente de permeabilidade	80
Figura 57 – Ensaio de permeabilidade (a) 20% de RCD, (b) 40% de RCD, (c) 60% de RCD, (d) 80% de RCD, (e) 100% de RCD e (f) 0% de RCD (concreto padrão).....	80
Figura 58 – Sequencia ensaio de porosidade: (a) material na estufa, (b) pesagem pós estufa, (c) material submerso em água e (d) pesagem pós submersão.....	81
Figura 59 – Placa de concreto permeável com 40% de RCD: (a) placa na fôrma de madeira e (b) placa desformada.....	83
Figura 60 – Ensaio de permeabilidade da placa de concreto permeável com 40% de RCD: (a) determinação do coeficiente de permeabilidade e (b) ensaio de permeabilidade	83
Figura 61 – Curva granulométrica dos agregados reciclados com grãos como recebidos.	86
Figura 62 – Representação de agregados bem graduados	87

Figura 63 – Distribuição granulométrica dos agregados reciclados com grãos como recebidos	87
Figura 64 – Agregados utilizados: (a) agregados reciclados e (b) agregados convencionais.	89
Figura 65 – Curva granulométrica dos agregados: (a) agregados reciclados e (b) agregados convencionais.....	90
Figura 66 – Representação de agregados de graduação contínua e uniforme.....	90
Figura 67 – Distribuição granulométrica dos agregados: (a) agregados reciclados e (b) agregados convencionais.	91
Figura 68 – Presença da parafina na estrutura interna de corpo de prova rompido.	94
Figura 69 – Sequência do ensaio de <i>slump test</i>	96
Figura 70 – Ruptura em corpos de prova cilíndricos após o ensaio de compressão	98
Figura 71 – Resistência à compressão axial	98
Figura 72 – Ruptura em corpos de prova cilíndricos após o ensaio de tração por compressão diametral	100
Figura 73 – Resistência à tração por compressão diametral	101
Figura 74 – Ruptura em corpos de prova prismático após o ensaio de tração na flexão	102
Figura 75 – Resistência à tração na flexão.....	102
Figura 76 – Porosidade	104
Figura 77 – Coeficientes de permeabilidade	105
Figura 78 – Tração por Compressão Diametral versus Tração na flexão	107
Figura 79 – Tração na Flexão versus Permeabilidade.....	108
Figura 80 – Tração na Flexão versus Porosidade	109
Figura 81 – Porosidade versus Permeabilidade	110
Figura 82 – Placa de concreto permeável comercial com 40% de substituição	111

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos resíduos da construção civil.	26
Quadro 2 - Tipologias do agregado reciclado.	31
Quadro 3 - Diferenças entre agregados reciclados e agregados naturais.	32
Quadro 4 - Características técnicas dos concretos convencionais e drenante.	34
Quadro 5 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.	38
Quadro 6 - Alguns estudos realizados nos últimos anos de pavimentos permeáveis com utilização de agregados reciclados.	39
Quadro 7 - Série de peneiras normal.	55
Quadro 8 - Ordem da mistura dos componentes do concreto permeável.	66
Quadro 9 – Dados quantitativos das amostras dos ensaios de caracterização	71
Quadro 10 – Dimensões da norma e dimensões adaptadas do corpo de prova para o ensaio de tração na flexão	79
Quadro 11 – Tamanho dos agregados convencionais comerciais.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações técnicas do equipamento	60
Tabela 2 – Graduações para o ensaio de abrasão de <i>Los Angeles</i>	60
Tabela 3 – Número de esferas e rotações	61
Tabela 4 – Propriedades físico-químicas da parafina.	65
Tabela 5 – Composição do traço de concreto permeável, em massa (kg)	67
Tabela 6 – Resumo do processo de produção do concreto permeável.....	82
Tabela 7 – Análise granulométrica dos agregados reciclados com grãos na forma original.	86
Tabela 8 – Tabela comparativa com os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados reciclados e os convencionais	88
Tabela 9 – Análise granulométrica do agregado reciclado utilizado e agregado convencional.	89
Tabela 10 – Massa inicial e massa final do ensaio de abrasão de <i>Los Angeles</i>	92
Tabela 11 – Peso específico dos corpos de prova de concreto permeável (corpo de prova cilíndrico – $V = 0,001571 \text{ m}^3$).....	95
Tabela 12 – Resultados do ensaio de <i>slump test</i> para cada tipo de dosagem	96
Tabela 13 – Resultados finais do pavimento executado	112
Tabela 14 – Valores para a geração de resíduos até a venda final.....	114
Tabela 15 – Valores para produção de pavimento permeável com agregado convencional – traço 1:3	114
Tabela 16 – Valores para produção de pavimento permeável com agregado convencional e reciclado – traço 1:3, 40% RCD.....	115
Tabela 17 – Custo material piso drenante	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
BH-Tec	Parque Tecnológico de Belo Horizonte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
CP-II-Z	Cimento Portland Composto com Pozolana
CPQvA	Critérios classificação, potencialidade, quantidade, viabilidade e aplicabilidade.
EPA	United States Environmental Protection Agency
LAO	Licença Ambiental de Operação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
POC	Porous Concrete
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
T1	Traço do concreto permeável
T2	Traço do concreto referência
UFF	Universidade Federal Fluminense
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

MF	Módulo de finura
R	Quantidade de resíduo
M	Massa
IF	Índice de forma
c	Comprimento
e	Espessura
An	Abrasão de Los Angeles
γ	massa unitária do agregado
V	Volume
fcd	Resistência a compressão diametral
F	Força aplicada
d ou \emptyset	Diâmetro
l	Distância
fct	Resistência a tração na flexão
b	Largura do corpo de prova
h	Altura do corpo de prova
k	Coefficiente de permeabilidade
Ac	Área da seção
t	Tempo
P	Porosidade
γ água	Peso específico da água

SUMÁRIO

1	OBJETIVOS	22
1.1	OBJETIVO GERAL.....	22
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
2	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS	23
2.2	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	24
2.2.1	Composição dos resíduos de construção e demolição	27
2.2.2	Reutilização de resíduos de construção e demolição na indústria da construção civil	29
2.3	CONCRETO RECICLADO	30
2.3.1	Agregados reciclados	30
2.4	CONCRETO PERMEÁVEL – DEFINIÇÃO E LIMITAÇÕES.....	32
2.4.1	Pavimentos permeáveis	34
2.4.2	Estrutura de pavimentos permeáveis	36
2.4.3	Pavimentos permeáveis com agregados reciclados	38
2.4.4	Formação de poros no concreto permeável	40
2.4.5	Colmatação e manutenção nos pavimentos de concreto permeável	41
2.5	ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DRENAGEM URBANA.....	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	48
3.2	CIMENTO	48
3.2.1	Obtenção do cimento	48
3.2.2	Ensaio de Finura	49
3.3	AGREGADOS RECICLADOS	50
3.3.1	Obtenção dos agregados reciclados	50
3.3.2	Secagem dos agregados reciclados	53
3.3.3	Análise granulométrica dos agregados reciclados	54
3.3.4	Módulo de finura dos agregados reciclados	55
3.3.5	Composição granulométrica dos agregados reciclados	55
3.3.6	Determinação do índice de forma dos agregados reciclados	57
3.3.7	Determinação do desgaste por abrasão de Los Angeles	59

3.3.8	Determinação da massa unitária aparente (estado solto) das amostras	62
3.4	AGREGADOS CONVENCIONAIS.....	63
3.4.1	Obtenção e caracterização dos agregados convencionais.....	63
3.5	AGENTE ESPAÇADOR (PARAFINA SÓLIDA).....	64
3.6	ÁGUA.....	65
3.7	DEFINIÇÃO DO TRAÇO DE CONCRETO.....	65
3.7.1	Composição do traço do concreto permeável com adição de parafina ..	66
3.8	PRODUÇÃO DA MISTURA DE CONCRETO, MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	68
3.8.1	Consistência ou <i>Slump Test</i>.....	70
3.8.2	Moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos.....	71
3.8.3	Resistência à compressão axial.....	73
3.8.4	Resistência à tração indireta: Tração por Compressão Diametral e Tração na Flexão.....	75
3.8.5	Permeabilidade dos corpos de prova de concreto permeável.....	79
3.8.6	Porosidade dos corpos de prova.....	81
3.9	RESUMO: METODOLOGIA DE PRODUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	82
3.10	CONFECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA PLACA DO PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL.....	83
3.11	VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE RCD: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA CPQVA.....	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
4.1	CIMENTO.....	85
4.1.1	Módulo de Finura.....	85
4.2	AGREGADOS.....	85
4.2.1	Curva e distribuição granulométrica dos agregados reciclados.....	85
4.2.2	Características e propriedades dos agregados reciclados e agregados convencionais.....	88
4.3	CONCRETO PERMEÁVEL.....	94
4.3.1	Agente espaçador (parafina sólida).....	94
4.3.2	Peso específico.....	95
4.3.3	Ensaio de <i>Slump Test</i>.....	95
4.3.4	Resistência à compressão (axial).....	97

4.3.5 Resistência à tração indireta: Tração por Compressão Diametral e Tração na Flexão.	99
4.3.6 Porosidade	103
4.3.7 Permeabilidade	105
4.3.8 Correlação entre os ensaios mecânicos e hidráulicos.	106
4.3.9 Pavimento Permeável Comercial	110
4.4 ANÁLISE CPQVA APLICADA À PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE RCD	112
4.4.1 Classificação	112
4.4.2 Potencialidade	112
4.4.3 Quantidade / Viabilidade	113
4.4.4 Aplicabilidade	116
5 CONCLUSÕES	118
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXO I – FOLDER EXPLICATIVO DOS SERVIÇOS DA TERRAPLANAGEM MEDEIROS	135
ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL	136
ANEXO III – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	137
ANEXO IV – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO	138

INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento e desde os primórdios da humanidade, até hoje, ainda é executada de forma artesanal, gerando como subproduto grande quantidade de resíduos de diversas naturezas, sendo também responsável pelo consumo excessivo de recursos naturais provenientes de fontes não-renováveis (BRASILEIRO, 2013).

Neste ramo, a utilização de matérias-primas, como areia, argila ou material pétreo, para a construção de um empreendimento, tem origem em atividades de extração em jazidas que requerem um maior cuidado ambiental, uma vez que os impactos são visíveis e as retiradas descontroladas em longo prazo implicam em escassez do material procurado. Brasileiro (2013) afirma que o campo da construção civil se destaca como o maior consumidor de recursos naturais do planeta, chegando a consumir 50% destes recursos. Desta forma, a utilização de materiais renováveis e reciclados, além de ser uma prática mais sustentável, pode elevar a qualidade do empreendimento, tornando-se, inclusive, mais acessível do que os métodos convencionais (SOUZA, ASSIS e SOUTO, 2014).

A indústria da construção civil é um dos principais setores da economia brasileira. Há registros do aumento da parcela correspondente à construção civil no produto interno bruto (PIB) nacional desde 1995 (RODRIGUES e FUCALE, 2014), com crescimento médio anual de 1,72% nos últimos 15 anos (CBIC Dados, 2020). Apesar desta indústria ter um papel importante como atividade de desenvolvimento das cidades, ela também é responsável por gerar, diariamente, 290,5 mil toneladas de resíduos de construção e demolição, os chamados RCDs (DAGNINO, 2018).

No Brasil, até 2002, não existiam leis e resoluções para os resíduos gerados pelo setor da construção civil. Em janeiro deste mesmo ano, o Ministério do Meio Ambiente, por meio do Conselho Nacional do Meio Ambiente, criou a resolução nº 307, que estabelece as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil em todo o país (CONAMA 307, 2002).

A preocupação com a preservação ambiental e a conservação das jazidas minerais faz com que a indústria da construção desenvolva novos conceitos e soluções técnicas visando à sustentabilidade de suas atividades.

A implantação de usinas de reciclagem de RCDs têm se tornado uma solução para a destinação destes resíduos, pois parte dos resíduos gerados ou encaminhados para usinas recicladoras podem ser transformados em agregados reciclados reutilizáveis. Porém, muitos resíduos desse setor ainda são destinados de forma incorreta e são pouco aproveitados. Somente de 20% a 30% do total dos resíduos são recuperados (principalmente concreto, asfalto, metais, madeira) em operações de reprocessamento e reciclagem (BAPTISTA JUNIOR E ROMANEL, 2013).

Entre os principais impactos causados ao meio ambiente e a sociedade urbana relacionados à geração de RCD, está o originado da deposição irregular dos resíduos, pois causa impactos nos âmbitos ambientais e sanitários. Os resíduos depositados em locais inadequados e impróprios, ou os poluentes sedimentados no entorno da área urbana, são transportados pelas chuvas, diminuindo a capacidade de permeabilidade do solo, deixando as áreas de drenagem limitadas, criando, desta forma, um volume de água no qual o escoamento acaba tornando-se mais lento e volumoso, causando transbordamentos (RAMOS, 2018).

De acordo com Finocchiaro *et al.* (2017), as principais cidades do Brasil e do mundo detém um grande número de construções e áreas pavimentadas impermeáveis. Muitas cidades brasileiras, principalmente, aquelas que apresentam processos acelerados de urbanização, sofrem sérios problemas de infraestrutura e inúmeros impactos ambientais nos sistemas de abastecimento de água, de coleta e drenagem de águas pluviais provocadas pela intensa deposição de resíduos da construção civil nestes locais. Ainda, o forte crescimento populacional, com significativa aglomeração nos centros urbanos, cria regiões de pouca ou nenhuma permeabilidade, e essa ausência de áreas permeáveis contribui para o aumento dos picos de descarga pluviais nos corpos hídricos, que inevitavelmente transbordam e causam danos, como os alagamentos (PEREIRA e BARBOSA, 2015).

Os alagamentos, uma das consequências da crescente impermeabilização do solo resultante da urbanização, têm sido um dos principais problemas enfrentados no meio urbano (TAVARES e KAZMIERCZAK, 2016). O tradicional sistema de drenagem utilizado é o baseado no rápido afastamento do excesso pluvial, o que contribui para um aumento nos volumes escoados e vazões de pico, aumentando-se, assim, a frequência e intensidade das inundações. Uma das medidas para conter os alagamentos, reduzir o escoamento superficial e recuperar a capacidade de natural de armazenamento do solo é a utilização dos pavimentos permeáveis (ACIOLI, 2005).

Conforme demonstrado em diferentes estudos, a utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição na produção de pavimentos permeáveis surge como alternativa válida, tanto para o problema do excesso de resíduos gerados como para os efeitos negativos da urbanização no escoamento das águas pluviais. Segundo Rubim *et al.* (2016), a reutilização destes resíduos trará sustentabilidade às construções civis pela ausência de extração de matéria-prima da natureza (RUBIM *et al.*, 2016; TAVARES e KAZMIERCKAK, 2016; SANTOS *et al.*, 2016). A maioria dos estudos envolvendo o uso de agregados reciclados para produção de concreto permeável são voltados ao uso em tráfego leve, como por exemplo, as calçadas para pedestres (SANTOS, FERNANDES e GONÇALVES, 2016; MUBASHIR *et al.*, 2018).

Embora existam vários estudos sobre o uso de agregados reciclados na produção de concreto permeável, metodologias de dosagem, mistura, moldagem e adensamento do material ainda não estão bem estabelecidas. No processo de valorização de resíduos, o produto final deve passar por uma avaliação mais abrangente de critérios de viabilidade de aplicação da proposta. Neste sentido, a metodologia do CPQvA faz essa avaliação meio de quatro critérios: Classificação, Potencialidade, Quantidade/Viabilidade, Aplicabilidade (RAUPP-PEREIRA, 2006).

Considerando a heterogeneidade da composição desses resíduos, existe ainda um grande potencial para sua utilização e estudos visando melhoria de propriedades e desempenho dos materiais obtidos. Desta forma, neste trabalho, foi desenvolvido um pavimento de concreto permeável, a partir de agregados de resíduos de construção e demolição e parafina como agente espaçador formador de porosidade, para aplicação como revestimento em áreas externas, principalmente, calçamento de ruas em condomínios e pequenas áreas de estacionamentos, com resistência mecânica compatível para tráfego leve à moderado.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um pavimento permeável com resistência mecânica compatível para aplicação em áreas externas para tráfegos de leve à moderado a partir de agregados reciclados de RCD em substituição à brita.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Obter amostras de agregados de RCD a partir de resíduos de construção e demolição de uma empresa de terraplanagem;
- b) Adequar os agregados reciclados quanto à granulometria e formato para uso na confecção dos corpos de prova de concreto;
- c) Definir os traços para a dosagem do concreto permeável com agregados convencionais e com diferentes percentuais de agregados reciclados e agente formador de porosidade (parafina);
- d) Realizar a moldagem e a caracterização dos corpos de prova de concreto permeável com agregados convencionais e com diferentes percentuais de agregados reciclados e parafina;
- e) Confeccionar uma amostra de pavimento permeável com agregados reciclados e parafina, avaliar a resistência à compressão, tração e a taxa de permeabilidade à água e compará-las com as de um pavimento permeável com agregados convencionais;
- f) Avaliar o potencial de valorização do resíduo de construção e demolição por meio da metodologia CPQvA (classificação, potencialidade, quantidade, viabilidade e aplicabilidade).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (MMA, 2010), Lei 12305/2010, define resíduo sólido como

material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

No Art. 13, incisos I e II da PNRS, os resíduos sólidos são classificados quanto à origem em 11 (onze) categorias. Os resíduos de construção e demolição (RCD) são citados nesta classificação no item h “resíduos da construção civil”.

A PNRS ainda estabelece uma hierarquia para a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, na qual deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (SILVA, 2015).

Neste contexto, a hierarquia para gestão de resíduos sólidos, como mostrado na Figura 1, se aplica aos resíduos de construção e demolição.

Figura 1 – Esquema de gestão dos resíduos sólidos



Fonte: Adaptado de De Paula Júnior (2019)

Pesquisas nacionais e internacionais, vem demonstrando que concretos fabricados com agregados reciclados de RCD têm atendido os requisitos técnicos,

principalmente, os relacionados ao desempenho mecânico e à durabilidade, apesar da grande variabilidade e heterogeneidade dos resíduos utilizados. Segundo Cesar *et al.* (2019), é inquestionável que a utilização dos RCD reciclados nas próprias obras ou para outros fins é ambientalmente vantajoso pela economia de recursos naturais, e trabalhos disponíveis na literatura atestam que a utilização desses materiais não afeta a qualidade do produto final, desde que feita de modo adequado, com considerações criteriosas dos componentes necessários. No entanto, a viabilidade ambiental e econômica ainda exige estudos mais primorosos (SILVA e MACIEL, 2009). As discussões a respeito do que fazer com o grande volume de entulho gerado pelo setor da construção, depositado inadequadamente nos locais não propícios para esse fim, vem, aos poucos, ocupando espaço na política e na sociedade, dada a importância do tema e a conscientização ambiental e econômica (SILVA e MACIEL, 2009). Dessa forma, conhecer e diagnosticar os resíduos gerados possibilitará o melhor encaminhamento para o gerenciamento dos RCD, trazendo melhor valor econômico (BARRETO, 2014).

2.2 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

De acordo com Ramos (2018), resíduos são materiais inerentes às realizações da humanidade, especialmente àqueles que são intimamente ligados às atividades da área de construção civil, que por vezes trabalha com processo de demolição e um grande descarte de diferentes tipos de produtos.

O tema resíduo da construção civil ou, tecnicamente, Resíduos de Construção e Demolição (RCD), deve ser tratado com aprimorado conhecimento técnico, pois esses materiais são, na maioria das vezes, matéria-prima para agregados de ótima qualidade, podendo ser utilizados em outras etapas do processo construtivo (SANTOS *et al.*, 2018).

Silva *et al.* (2017), salienta que o modelo de construção praticado no Brasil, na sua cadeia de produção, independentemente de sua tipologia e porte, resulta em vários prejuízos ambientais, pois, além de utilizar matéria-prima não renovável e consumo elevado de energia, tanto na extração, quanto no transporte e processamento dos insumos, acaba sendo uma grande fonte geradora de resíduos, gerando altos custos para a remoção e tratamento destes resíduos, interferindo, inclusive, na qualidade de vida da sociedade.

Desta forma, o entulho deve ser visto como uma fonte de materiais com potencial utilidade para a construção civil. O uso mais tradicional em aterros nem sempre é o mais racional, pois esse material pode se transformar em matéria-prima para componentes de construção, com qualidade comparável aos materiais tradicionais (SILVA *et al.*, 2017).

Ainda segundo este autor, os resíduos da construção civil são fruto do crescimento e do desenvolvimento das cidades, aumento da população e ampliação de vias e edificações. Neste contexto, o desperdício estimado com os RCD é de aproximadamente 150 kg de material por metro quadrado construído.

Segundo Brasileiro (2013), estes resíduos podem ser oriundos de diferentes obras, material de escavação, demolição de edificações, construções, renovação de edifícios, limpeza de terrenos e até mesmo de catástrofes naturais (tsunamis, tornados, terremotos, etc.) ou artificiais (incêndios, desabamentos, bombardeios, etc.).

A Resolução CONAMA nº 307, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, de 5 de julho de 2002, Art. 2º., adota a seguinte definição para os resíduos da construção civil:

são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Ainda de acordo com esta Resolução, Art. 3º., alterada pela Resolução nº 348, de agosto de 2004, os resíduos da construção civil são classificados conforme apresentado no Quadro 1. Neste quadro também estão descritas a composição e destinação dos resíduos.

Quadro 1 – Classificação dos resíduos da construção civil.

Classe	Composição	Destinação
A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;	Deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;
B	Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;	Deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;	Deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.
D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.	Deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Fonte: CONAMA 307, artigo 3º, 2004 (adaptado pelo autor)

O Art. 4 desta mesma resolução enfatiza que os RCDs não podem ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei. Para os RCD Classe A, (Classe II-B de acordo com a ABNT NBR 10004/2004) a disposição final adequada é em aterro de inertes como reserva de material para usos futuros, podendo ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados.

O processo de reciclagem é a melhor alternativa para reduzir o impacto que o ambiente pode sofrer com o consumo de matéria-prima e a geração desordenada de resíduos. De acordo com Leite (2001), a reciclagem de resíduos tem sido estimulada em todo o mundo, seja por questões políticas, econômicas ou ecológicas. Somado ao gerenciamento dos resíduos sólidos dos municípios, a reciclagem traz uma diminuição dos pontos de descarte irregulares ou clandestinos, melhorando o bem-estar social e ambiental.

O emprego de RCD proveniente de zonas urbanas pode e deve ser uma fonte alternativa de matéria-prima para agregados em pavimentação, que considerando um quilômetro de pista simples com duas faixas de rolamento, consome cerca de cinco

vezes mais agregados que o consumo de uma obra de edifício de apartamentos de 15 andares (RICCI, BALBO, 2009). Esses autores ainda destacam que a maior parte dos RCD gerados nos municípios brasileiros tem origem em reformas, ampliações e demolições, conforme mostrado na Figura 2.

De acordo com Vargas (2018), uma pesquisa feita pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) evidencia que a quantidade de resíduos gerada no Brasil diariamente é preocupante, já que são, na sua maioria, materiais cerâmicos.

Figura 2 – Origem do RCD em algumas cidades brasileiras (% da massa total).



Fonte: Adaptado de Vargas (2018).

Dados desta pesquisa mostram que os municípios brasileiros coletaram em 2016, 123.619 t/dia de RCD, o equivalente a 0,600 kg/hab. dia. A Região Sudeste é a maior geradora de RCD do país, onde foram coletadas 63.981 t/dia do material.

Vale destacar que esse volume representa apenas a parcela coletada, ou seja, os números seriam ainda maiores se fosse mensurada a parcela descartada irregularmente, em aterros não licenciados, terrenos e vias públicas (MANTOVAN *et al.*, 2017).

2.2.1 Composição dos resíduos de construção e demolição

Existe uma grande diversidade de matérias-primas e técnicas construtivas que afetam, de modo significativo, as características dos resíduos gerados, principalmente, quanto a composição e a quantidade (CABRAL e MOREIRA, 2011).

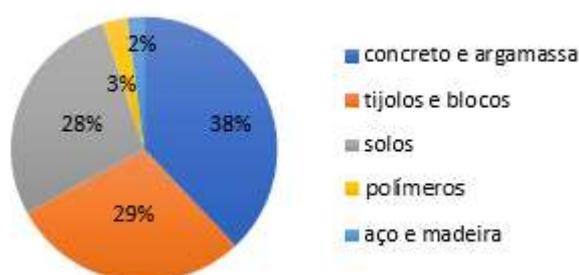
Segundo Morand (2016), os resíduos possuem características físicas variáveis, que dependem do processo gerador, podendo apresentar-se tanto em dimensões e geometrias já conhecidas dos materiais de construção (como a da areia e a da brita), como em formatos e dimensões irregulares.

A composição dos RCD, popularmente chamado de entulho, dentre outros aspectos, varia em função de características regionais, como tipo de construções existentes, matéria-prima disponível, práticas construtivas e forma de manuseio do resíduo (MORAND, 2016). Conhecer a composição do RCD gerado na obra torna-se essencial para justificar técnica e economicamente esse reaproveitamento.

Na Espanha, a composição típica dos RCD é de 54% cerâmica, 12% concreto, 7% rejeito, 5% rochas, 5% asfalto, 4% agregado, 4% madeira, 2,5% metais, 1,5% plástico, 0,5% vidro, 0,3% papel, 0,2% gesso e 4% outros (CAETANO, SELBACH e GOMES, 2016). Em Shangai, os resíduos de demolição têm a seguinte composição: 63,8% tijolos e blocos, 22,6% concreto, 8,4% madeira, 3,1% metal e 2,1% gesso. No Brasil, estima-se que, em média, 32% do material descartado é argamassa, 28% são solos, 29% é material cerâmico, proveniente de tijolos e blocos, 6% é concreto, 3% são plásticos e 2% são outros materiais, como aço e madeira (MORAND, 2016). As construtoras são responsáveis pela geração de 20 a 25% desse entulho, sendo que o restante provém de reformas e de obras de autoconstrução (BRASILEIRO, 2013).

Em geral, o RCD é composto basicamente por concretos, argamassas, pedras, cerâmicas vermelhas (telhas, tijolos e lajotas), cerâmicas de revestimento (pisos e azulejos), asfalto, mármore e granitos (BRASILEIRO, 2013). Entretanto, a composição deste material é variável em função da região geográfica, da época do ano, do tipo de obra, dentre outros fatores e, desta forma, podem existir vários outros componentes inorgânicos, componentes orgânicos, polímeros, materiais betuminosos, na sua composição (CABRAL e MOREIRA, 2011). A variação da composição (em massa) é estimada, em geral, em termos de materiais. Na Figura 3 estão apresentadas as composições de RCD no Brasil.

Figura 3 – Composição dos RCD no Brasil.



Fonte: Adaptado de Cabral (2011).

Os agregados reciclados dividem-se em materiais nobres e materiais mistos. Os materiais nobres são compostos em sua fração gráuda de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas e são classificados como agregados de resíduo de concreto. Enquanto, os materiais mistos são os que possuem composição em massa inferior a 90% de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, sendo denominados como agregados de resíduo misto.

2.2.2 Reutilização de resíduos de construção e demolição na indústria da construção civil

De acordo com a Resolução 307 do CONAMA, a reutilização de resíduos consiste no processo de reaplicação do resíduo, sem que ocorra a transformação do mesmo. Como em todo processo industrial, o uso dos insumos da indústria da construção civil gera resíduos em grande escala, que necessitam ser gerenciados.

Segundo Morand (2016), os resíduos produzidos numa obra podem ser reutilizados desde que sejam empregados procedimentos adequados.

Para a definição de possíveis utilizações dos RCDs, faz-se importante o estudo das características físico-químicas e das propriedades destes resíduos, por meio de ensaios e métodos apropriados. Alguns parâmetros importantes na caracterização são: a massa aparente, a composição gravimétrica, a absorção da água, granulometria e a composição química (MORAND, 2016).

O Brasil não possui um bom processo de separação dos resíduos na fonte (canteiros de obra, demolições e reformas) e por ser feito o beneficiamento em instalações consideradas simples, os agregados reciclados não apresentam homogeneidade de suas características, dificultando seu emprego (MORAND, 2016). Quanto mais adequados às normas técnicas, maiores serão as possibilidades de utilização dos resíduos.

De acordo com Santos *et al.* (2016), as principais aplicações dos resíduos reciclados são:

- Preenchimento de rasgos de paredes para tubulações hidráulicas e elétricas;
- Chumbamento de caixas elétricas e tubulações;
- Contrapiso de interiores de unidades habitacionais;

- Sistemas de drenagem (deve possuir alta permeabilidade para coletar e transportar os efluentes gerados em uma velocidade maior que a de produção);
- Aterramento de valetas junto ao solo;
- Pavimentação;
- Agregados para o concreto e argamassa.

O resíduo reciclado utilizado nos sistemas de pavimentação como base, sub-base ou pavimento primário, deve ser processado por britador até a obtenção da granulometria desejada (DE PAULA JUNIOR, 2019).

O uso dos resíduos com essa funcionalidade permite, principalmente, utilizar todos os componentes minerais do entulho (tijolos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.) sem a necessidade de separação de nenhum deles e reutilizar o entulho em maior escala, inclusive aquele proveniente de demolições e pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem/trituração (DE PAULA JUNIOR, 2019).

2.3 CONCRETO RECICLADO

O concreto reciclado é aquele produzido com resíduos de construção e demolição britados, em substituição parcial ou total aos agregados convencionais.

Segundo Alencar (2013), a diferença essencial entre um concreto convencional e um concreto reciclado é a porosidade. Devido aos agregados convencionais serem oriundos de rochas britadas, seixos e areias lavadas de rio, eles apresentam poucos poros, em função disto, a resistência ou durabilidade do concreto convencional é controlada exclusivamente pela porosidade (vazios) da pasta de cimento, enquanto, os agregados reciclados são mais porosos. Assim, a resistência e a durabilidade destes são controladas, não apenas pela porosidade da pasta de cimento, mas também pela porosidade do agregado.

2.3.1 Agregados reciclados

Como a construção civil é um dos setores de grande ascendência no Brasil, é fundamental que se pense, em um destino para resíduos e demais componentes construtivos que são descartados no meio-ambiente. O tipo de resíduo produzido em

uma obra está condicionado a algumas características do processo construtivo, como fatores de qualidade e cultura da empresa, além dos materiais que estão sendo utilizados (GONÇALVES, 2001). Dentro desta temática, surgiram os agregados reciclados.

De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004), agregado reciclado é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia.

Os agregados de RCD são constituídos por fragmentos de concretos, argamassas, cerâmicas e outros materiais secundários, obtidos pela britagem e outras operações de descontaminação (ANGULO e FIGUEIREDO, 2005). Assim, a composição desse agregado é bastante variável, podendo ser constituído quase exclusivamente por concreto, ou misturado com cerâmica vermelha. Dependendo da triagem realizada no RCD ou técnica de reciclagem utilizada, esses agregados reciclados passam a apresentar características bem distintas de composição e porosidade. As tipologias do agregado reciclado estão descritas no Quadro 2.

Quadro 2 - Tipologias do agregado reciclado.

Tipo de material reciclado	Gerador do resíduo	Composição	Nomenclatura
Agregados reciclados somente de resíduos de concreto.	Empresas de pré-moldados, demolições de estruturas de construções e pavimentos em concreto	Concreto	Agregado Nobre
Agregados reciclados de resíduos de concreto e resíduos de demolições de paredes de alvenaria.	Demolições de estruturas de construções e pavimentos em concreto e demolições de paredes de alvenaria em tijolo cerâmico	Concreto e artefatos cerâmicos com camada de argamassa	Agregado Misto

Fonte: Própria (2020).

Gonçalves (2001) descreve que os agregados provenientes de resíduos de concreto possuem grandes potenciais de reutilização devido, principalmente, ao conhecimento de suas características básicas e seu menor grau de contaminação por outros resíduos (óleo, vidro, borracha, etc.).

Conforme cita Alencar (2013), os agregados reciclados possuem algumas diferenças entre suas propriedades em relação aos agregados naturais e estas estão, principalmente, relacionadas à quantidade de argamassa do concreto original aderida

à superfície. Algumas destas diferenças de acordo com Gonçalves (2001), estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Diferenças entre agregados reciclados e agregados naturais.

Propriedade	Diferença (reciclado x natural)
Absorção de água	Maior x Menor
Massa específica	Menor x Maior
Módulo de elasticidade	Menor x Maior
Resistência à compressão	Menor x Maior
Fluência	Maior x Menor

Fonte: Gonçalves (2001).

2.4 CONCRETO PERMEÁVEL – DEFINIÇÃO E LIMITAÇÕES

De acordo com Finocchiaro e Girardi (2017), o termo "concreto permeável", é usado para designar concretos com altos índices de vazios interligados entre si, permitindo a passagem de fluidos devido a sua elevada permeabilidade.

O concreto permeável ou *porous concrete* (POC) é um tipo especial de concreto que surge para combater os impactos ambientais e toda a problemática associada à impermeabilização urbana, direta ou indiretamente, sendo destinado, principalmente, para pavimentação. Seu aspecto pode ser verificado na Figura 4.

Figura 4 – Aspecto típico de um concreto permeável.



Fonte: Tavares e Kazmierczak (2016).

Este tipo de concreto apresenta algumas particularidades nas suas propriedades, as quais são dependentes da relação água/cimento, do teor de cimento, da forma e da distribuição granulométrica dos agregados, da forma de lançamento e

adensamento durante a aplicação do concreto. Na Figura 5 pode ser visualizado o aspecto de algumas amostras de concretos permeáveis com diferentes teores de água.

Figura 5 – Amostras de concreto permeável com diferentes teores de água: (a) pouca água, (b) quantidade apropriada de água, (c) demasiada água.



Fonte: Lima (2018)

De acordo com Monteiro (2010), é muito utilizado nos Estados Unidos e Europa, sendo composto por cimento Portland, materiais de graduação aberta, agregado graúdo, pouco ou nenhum fino, aditivos e água. Ainda segundo o autor, este material, também chamado de poroso, drenante ou de concreto sem finos, “deve ser pouco adensável para que a pasta de cimento não escorra para o fundo”.

Além de ser usado como pavimento, ajudando no processo de infiltração e escoamento superficial das águas pluviais, este tipo de concreto também pode ser utilizado na fabricação de elementos do sistema de drenagem, impedindo o seu entupimento e evitando a entrada de detritos nas tubulações e canalizações (DE PAULA JUNIOR, 2019).

Ainda segundo o autor, a introdução do concreto permeável no mercado brasileiro trata-se de uma inovação e vem se desenvolvendo a partir da adoção de projetos-piloto. Empresas do ramo cimenteiro já se dedicam a introduzir o composto como alternativa viável em relação à infiltração e à garantia de permeabilidade durante o processo de pavimentação, obedecendo alguns requisitos das legislações municipais. Importante salientar sobre a necessidade de manutenção periódica, pois é suscetível a colmatação por sedimentos.

Vale ressaltar, como fator limitante, a presença de faces polidas em materiais cerâmicos (pisos, azulejos, etc.), as quais interferem negativamente na resistência à compressão do concreto produzido (FARIA *et al.*, 2019), conforme mostra o Quadro 4.

Quadro 4 - Características técnicas dos concretos convencionais e drenante.

Tipo	Resistência à compressão (MPa)	Areia	Brita
Convencional	20 a 60	De 30 a 50% do agregado total	Bem graduado, grãos arredondados
Drenante	3 a 30	Pouco ou nenhum	Graduação aberta, grãos angulosos (Brita 0 e pedriscos)

Fonte: Faria *et al.* (2019).

2.4.1 Pavimentos permeáveis

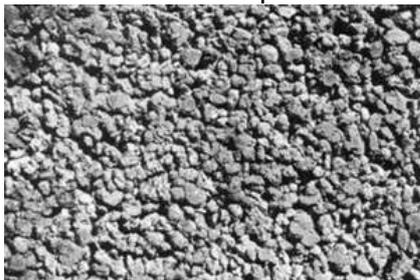
De acordo com Gonçalves e De Oliveira (2014), pavimentos permeáveis são definidos como sendo aqueles que possuem espaços livres em sua estrutura por onde a água pode penetrar, podendo infiltrar no solo ou ser transportada através de sistema auxiliar de drenagem.

Este tipo de pavimento permite, simultaneamente, o fluxo de tráfego e a retenção da água pluvial para o amortecimento das vazões de cheias em bacias hidrográficas urbanizadas e sua implementação como artifício de combate ao fenômeno de impermeabilização urbana vem ganhando destaque nas últimas décadas em todo o mundo (GONÇALVES e DE OLIVEIRA, 2014).

Segundo Da Costa *et al.* (2019), o concreto permeável é um material composto por ligante hidráulico, material britado de graduação uniforme, água e pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo.

É considerado uma tecnologia sustentável em drenagem urbana, pois como sua estrutura possui poros, permite que o pavimento cumpra sua função principal de imitar o solo, que, em suas condições naturais, é uma estrutura permeável e porosa (SANTOS, 2016). Nas Figuras 6 e 7, podem ser visualizadas as texturas de um pavimento de concreto poroso.

Figura 6 – Textura de um pavimento de concreto poroso.



Fonte: Strzoda *et al.* (2017).

Figura 7 – Amostra de pavimento permeável.



Fonte: De Paula Junior (2019)

O ponto principal deste material é a grande melhoria para os impactos durante as enxurradas urbanas, que permite a infiltração da água ao subsolo. Suas principais características são a elevada porosidade e excelente drenabilidade.

A porosidade e a permeabilidade de concretos permeáveis podem variar dependendo das características dos materiais empregados na sua composição. Segundo Marchioni e Silva (2013), a porosidade de um concreto permeável pode variar de 15% a 30% e a água geralmente escoar com taxas entre 0,2 cm/s até 1 cm/s, dependendo do material e da sua disposição. Para fins de comparação, em concretos convencionas (não permeáveis), a porosidade é de 1% a 2% (BATEZINI, 2013).

A permeabilidade do concreto permeável produzido por Schaefer (2006) *apud* De Paula (2019) variam entre 0,04 cm/s e 1,45 cm/s. Alves (2016) encontrou, em seus estudos envolvendo a substituição gradual de agregado graúdo natural por resíduos de construção e demolição, coeficientes de permeabilidade entre 1,19 cm/s e 2,24 cm/s.

Segundo Acioli (2005), o pavimento permeável é um dispositivo de infiltração, no qual o escoamento superficial é desviado através de uma superfície permeável para uma camada com pedras, por onde infiltra através do solo, podendo sofrer evaporação ou atingir o lençol freático. Este tipo de pavimentação é comumente

utilizado em passeios, estacionamentos, quadras de esporte e ruas de tráfego leve (ALVES, 2016).

Um exemplo de projeto com utilização de pavimento em concreto permeável no Brasil é o Parque Tecnológico de Belo Horizonte (BH-Tec), que terá toda sua pavimentação com este material para diminuir os riscos de enchente e foi concebido para ser executado de forma ecologicamente correta. Tem caráter inédito na América Latina e funcionará próximo ao campus Pampulha da UFMG (JAHN, 2019).

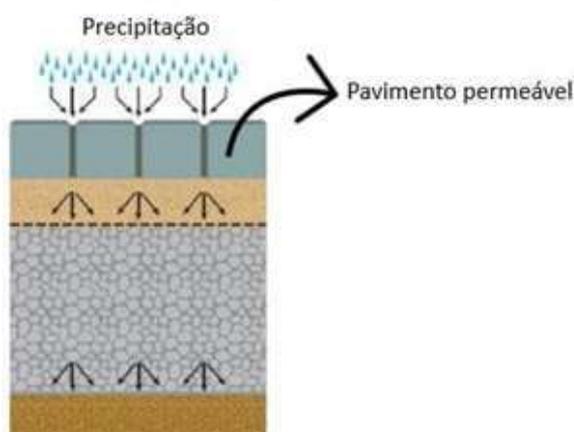
2.4.2 Estrutura de pavimentos permeáveis

Como descrito anteriormente, os pavimentos permeáveis promovem a infiltração, armazenamento e percolação de parte ou da totalidade da água provinda do escoamento superficial para dentro de uma camada de armazenamento temporário no terreno, a qual é absorvida gradualmente pelo solo (MONTEIRO, 2010). Este tipo de pavimento busca reduzir o volume de água referente ao escoamento superficial e, por consequência, reduzir a solicitação do sistema de drenagem urbana e a probabilidade de inundações e alagamentos.

Além de ser usado como pavimento, favorecendo a infiltração e o retardo do escoamento superficial das águas pluviais, pode ser utilizado também na fabricação de elementos do sistema de drenagem, impedindo o seu entupimento e evitando a entrada de detritos nas tubulações e canalizações (DE PAULA JUNIOR, 2019).

Em relação ao sistema de infiltração de água precipitada do pavimento permeável, são definidas três modalidades, conforme mostrado nas Figuras 8, 9 e 10.

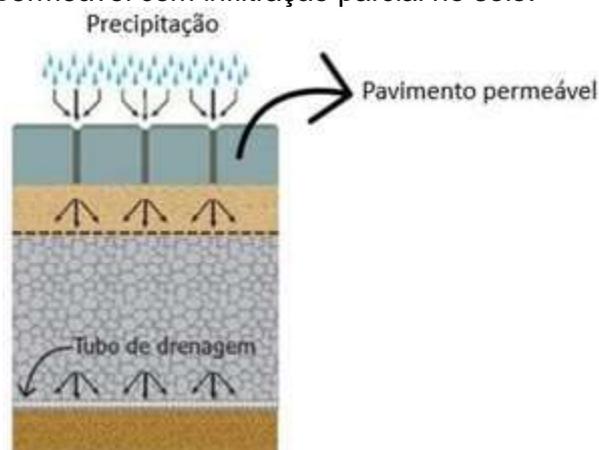
Figura 8 – Pavimento permeável com infiltração total no solo.



Fonte: De Paula Junior (2019)

Neste pavimento permeável, a infiltração é total e toda água é direcionada ao subleito. Esta condição torna-se viável quando o solo do subleito apresenta alta permeabilidade ou o nível do lençol freático for suficientemente baixo (GONÇALVES e OLIVEIRA, 2014).

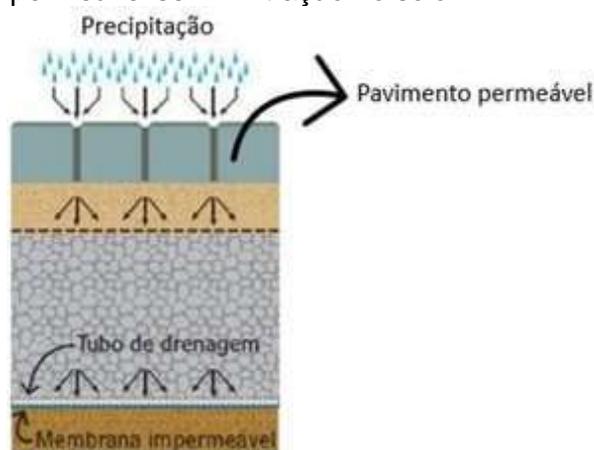
Figura 9 – Pavimento permeável com infiltração parcial no solo.



Fonte: De Paula Junior (2019)

Neste tipo de pavimento ocorre uma situação intermediária das condições de solo e/ou do lençol freático, permitindo infiltração parcial, apesar da necessidade de sistema de coleta por dreno (GONÇALVES e OLIVEIRA, 2014).

Figura 10 – Pavimento permeável sem infiltração no solo.



Fonte: De Paula Junior (2019)

No pavimento sem infiltração no solo, a água é direcionada por completo para uma tubulação de drenagem. Esta condição torna-se viável quando o solo do subleito

apresenta baixa permeabilidade ou o nível do lençol freático encontra-se elevado (GONÇALVES e OLIVEIRA, 2014).

De acordo com De Paula Junior (2019), é definido que 100% da água precipitada sobre a superfície do pavimento e eventuais áreas de contribuição deve percolar por entre a área pavimentada para que ela seja considerada permeável. É importante destacar que a capacidade de infiltração de um pavimento não representa o único fator que influi na transformação da precipitação em escoamento superficial: a declividade do pavimento, cujo valor é limitado pela NBR 16416 (ABNT, 2015) em 5%, também tem papel fundamental.

A NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece requisitos mínimos para projeto, especificação, execução e manutenção de pavimentos de concreto permeável, contemplando métodos de avaliação e desempenho essenciais para o bom funcionamento e define a resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável, conforme apresentado no Quadro 5:

Quadro 5 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima	Resistência mecânica característica – compressão (1) e tração (2)
Peça de concreto com juntas alargadas ou áreas vazadas	Tráfego de pedestres	60 mm	≥ 35 MPa (1)
	Tráfego leve / moderado	80 mm	
Peça de concreto permeável	Trafego de pedestres	60 mm	≥ 20 MPa (1)
	Tráfego leve / moderado	60 - 80 mm	
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60 mm	≥ 2 MPa (2)
	Tráfego leve / moderado	60 - 80 mm	

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015).

2.4.3 Pavimentos permeáveis com agregados reciclados

No Brasil, recentemente, vem sendo realizados diversos estudos envolvendo a utilização de resíduos reciclados em substituição a agregados de origem natural na fabricação de pavimentos permeáveis (DE PAULA JUNIOR, 2019).

Os agregados reciclados são materiais heterogêneos e possuem alta porosidade em comparação aos agregados de rochas normalmente utilizados para fazer o concreto. No caso de um pavimento permeável com adição de RCD, a porosidade dos agregados pode ser uma grande vantagem, já que o objetivo é aumentar a capacidade de drenagem (TAVARES e KAZMIERCZAK, 2016).

Além da variabilidade da composição do agregado proveniente de RCDs, existem na literatura poucos estudos a respeito de concreto permeável que utilizam agregados reciclados, o que dificulta estabelecer um valor esperado para a resistência mecânica nesse tipo de material (MARIANO, 2013).

No Quadro 6, são apresentados alguns dos estudos realizados nos últimos anos de pavimentos permeáveis com utilização de agregados reciclados.

Quadro 6 - Alguns estudos realizados nos últimos anos de pavimentos permeáveis com utilização de agregados reciclados.

TÍTULO	AUTORES / ANO	OBJETIVO
CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETO PERMEÁVEL PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO PERMEÁVEL EM AMBIENTE URBANO.	VIDAL (2014)	Estudo da viabilidade estrutural da utilização de agregados graúdos de resíduos reciclados de construção e de demolição, como substituto parcial ou total do agregado convencional, para a produção de elementos de concreto permeável, para pavimentação do ambiente urbano.
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL COMO AGREGADO GRAÚDO NA CONFECÇÃO DE CONCRETO	SANTOS <i>et al.</i> (2015)	Avaliação da utilização de agregados reciclados de resíduos da construção civil para a produção de concretos.
UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADOS GRAÚDOS NATURAIS EM PEÇAS DE CONCRETO PERMEÁVEL	MANTOVAN <i>et al.</i> (2017)	Desenvolvimento de pisos Intertravados porosos com agregado miúdo reciclado a partir de moagem de resíduo da demolição de paredes.
CONCRETO PERMEÁVEL A PARTIR DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	RUBIM <i>et al.</i> (2016)	Análise da qualidade da reutilização dos RCD na confecção de concretos permeáveis substituindo totalmente o agregado graúdo.
CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTAÇÃO URBANA COM USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PRODUZIDOS NA USINA DE RECICLAGEM DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO	ALVES (2016)	Estudo do emprego de resíduos de construção e demolição, da Usina de Reciclagem de São José do Rio Preto, na produção de novos concretos destinados à aplicação em calçadas, com enfoque na permeabilidade do pavimento.
THE INFLUENCE OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATES IN PERVIOUS CONCRETE	TAVARES e KAZMIERCZAK (2016)	Avaliação da possibilidade de confecção de concreto permeável para pavimentação utilizando agregados reciclados de concreto. O estudo avaliou permeabilidade, consistência, resistência mecânica e outras interferências em diferentes tipos de composição do concreto.

Continua:

TÍTULO	AUTORES / ANO	OBJETIVO
PAVIMENTO INTERTRAVADO PERMEÁVEL COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E MICROESFERAS DE PARAFINA	SANTOS <i>et al.</i> (2016)	Desenvolvimento de pisos Intertravados porosos com a utilização de agregado miúdo reciclado a partir de moagem de resíduo da demolição de paredes.
ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO GRAÚDO PARA CONCRETOS PERMEÁVEIS	DE PAULA JUNIOR 2019)	Avaliação da potencialidade de aplicação do resíduo de concreto em substituição a 100% do agregado graúdo convencional na confecção de concreto permeável destinado à pavimentação urbana.

Fonte: Própria (2020).

2.4.4 Formação de poros no concreto permeável

O concreto é um material que, por sua própria constituição, é poroso. É um material composto por 2 fases: as partículas de agregado e a matriz de cimento. À nível microscópico surge uma 3ª fase: a zona de transição, região interfacial entre as partículas do agregado e a pasta, com espessura de 10 a 50 µm conforme mostrado na Figura 11.

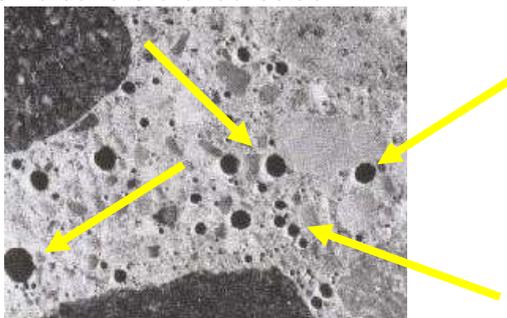
Figura 11 – Zona de transição (interação) entre as partículas de agregado e a pasta de cimento.



Fonte: Neto (2018).

No processo de endurecimento do concreto, criam-se alguns poros, mas conforme vai acontecendo o processo de endurecimento e surgem os produtos da hidratação do cimento, a tendência destes poros é fecharem, mas não na sua totalidade, conforme mostrado na Figura 12 (NETO, 2018).

Figura 12 – Presença de poros no concreto endurecido



Fonte: Neto (2018).

No caso do concreto permeável, para que ele tenha a capacidade de permitir o escoamento da água pelo seu interior, é necessário a presença de um alto índice de vazios, ou seja, de poros. Este resultado pode ser alcançado a partir da eliminação parcial ou total do agregado miúdo e/ou pela utilização de ativos químicos incorporadores de ar. Quando não se utilizam aditivos químicos, os poros de ar são do tipo “poros de ar aprisionado”, que surgem no processo de adensamento do concreto (MONTEIRO, 2010).

Neste estudo, optou-se pela não utilização de agregados miúdos e aditivos químicos. O aumento do caráter permeável foi obtido com a utilização de parafina sólida, material espaçador, formador de porosidade residual e que, após sua completa remoção por aquecimento a 70 °C, permite o fluxo de líquido através do pavimento. Esta técnica, já aplicada na área biomédica para a produção de poros nos materiais, nada mais é do que a utilização de microesferas de parafina dispersas no interior da massa, que após a produção e cura da peça é retirada por meio da aplicação de calor, proporcionando a fusão da parafina adicionada ao processo (SANTOS *et al.*, 2016).

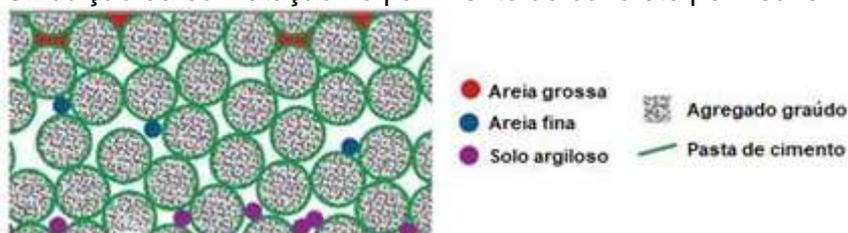
2.4.5 Colmatação e manutenção nos pavimentos de concreto permeável

O concreto permeável, com o passar do tempo, tem a possibilidade de perder seu potencial drenante em função do fenômeno denominado colmatação, que ocorre naturalmente e consiste na obstrução dos poros pela deposição e acúmulo de partículas de areia ou solo, tornando a pavimentação impermeável (POLASTRE E SANTOS, 2006). A eficácia da taxa de infiltração da água de chuva no concreto permeável pode ser parcialmente comprometida devido à ocorrência da colmatação, que é influenciada pelo tipo e tamanho do sedimento infiltrado junto a água e a

intensidade da precipitação (OLIVEIRA, 2017). Os poros obstruídos por detritos reduzem gradativamente a contribuição hidráulica destes pavimentos como dispositivo de drenagem. Os sedimentos infiltrados no concreto permeável podem ter sua origem na corrosão de elementos próximos, detritos de materiais transportados por veículos, matéria orgânica, no caso de existir vegetação próxima, fluídos oleosos, se empregado como estacionamento, ou até mesmo pequenas partículas provenientes do desgaste por abrasão do próprio pavimento (OLIVEIRA, 2017).

De acordo com Kayhanian (2012) *apud* Oliveira (2017), a obstrução dos poros com partículas maiores que 3,8 mm ocorre na parte superficial do concreto permeável. A colmatção por partículas menores, geralmente encontrada nas áreas urbanas, atinge a profundidade completa do pavimento. A Figura 13 mostra a distribuição da colmatção no pavimento de concreto permeável.

Figura 13 – Distribuição da colmatção no pavimento de concreto permeável.



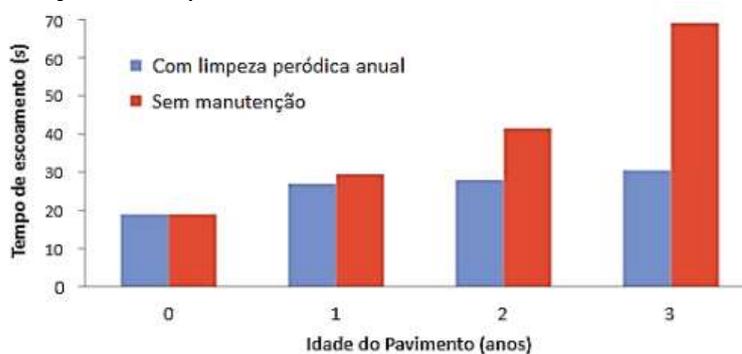
Fonte: Oliveira (2017).

Segundo Polastre e Santos (2006), a maioria dos pavimentos em concreto permeável exigem pouca manutenção, que consiste, em primeiro lugar, em prevenir obstruções dos vazios de forma a manter a eficiência do sistema. Alguns pesquisadores sugerem que seja realizada manutenção com periodicidade máxima de 6 meses (Portal UFF, 2018). De qualquer modo, a manutenção, no mínimo anual, seria suficiente para evitar que a estrutura do pavimento seja comprometida em sua capacidade de funcionar como “material drenante”, devendo esta manutenção fazer parte da boa prática de implementação de pavimentos permeáveis. Segundo Oliveira (2017), a manutenção para retirada dos detritos pode ser feita através da lavagem com pressão, varredura, jatos de ar e vácuo, lavagem com escovação e a combinação de tais procedimentos. Segundo Maruyama e Franco (2016), nos primeiros dois anos há a tendência de o concreto poroso perder 50% da permeabilidade e continuar perdendo por completo após sete anos, se não for feita sua limpeza conforme recomendado. A United States Environmental Protection Agency – EPA (2016) recomenda que o

pavimento poroso deve ser limpo com equipamentos à vácuo no mínimo 4 vezes por ano e/ou lavado com mangueira de pressão de água para remover as partículas evitando a colmatação.

É importante verificar o quanto o processo de colmatação prejudicou o escoamento da água ao longo do tempo de utilização e comprovar se a drenabilidade ainda está funcionando e exercendo a função de permitir a total infiltração da água. Em pavimentos com pouca ou nenhuma manutenção, acredita-se que o preenchimento dos vazios em 10 anos comprometa a capacidade filtrante do pavimento em cerca de 90% (MARCHIONI e SILVA, 2013), ou seja, a eficiência do pavimento se reduz ao longo dos anos, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Evolução da colmatação em pavimentos permeáveis com limpeza periódica anual e sem manutenção da limpeza.



Fonte: Caldeira (2016).

Portanto, a utilização dos pavimentos permeáveis, em um contexto geral, pode indicar uma redução dos volumes escoados se utilizando adequadamente, respeitando seus limites físicos, e que seja conservado periodicamente com uma manutenção preventiva, evitando assim a colmatação. Concretos mais porosos, com mais vazios demoram mais para colmatar quando comparados a concretos pouco porosos em mesmas condições de uso. Desta forma, o estudo de técnicas de retardamento da perda de permeabilidade é importante para manutenção da eficiência deste tipo de dispositivo.

2.5 ESCOAMENTO SUPERFICIAL E DRENAGEM URBANA

De acordo com o Centro de Informações das Nações Unidas no Brasil (2012) – ONU-Habitat – a população urbana na América Latina é a região mais urbanizada

do mundo, apresentando uma taxa de população urbana de 80%. Este crescimento ocorreu de forma desorganizada e aumentou a impermeabilização das superfícies devido aos telhados e vias pavimentadas. Com isso, água que infiltrava no solo ou ficava retida na vegetação passou a gerar maior escoamento superficial, levando a uma maior ocorrência de alagamentos (MARCHIONI e SILVA, 2013).

A drenagem pluvial urbana tem um importante papel na infraestrutura de uma região. Segundo De Paula Junior (2019), todos os transtornos relativos aos resíduos se intensificam em ambientes onde as áreas eram originalmente permeáveis e, com o passar dos anos, tornaram-se impermeáveis. Quando esse processo se vincula à atividade de urbanização, pode causar diminuição da infiltração no solo, acúmulo de água na superfície (acarretando em inundações e alagamentos) e aumento da velocidade de escoamento superficial (podendo elevar a vazão máxima de inundação em até sete vezes).

No Brasil, o crescimento da urbanização das cidades acarretou sérios problemas de infraestrutura, como os sistemas de abastecimento de água, de coleta, drenagem de águas pluviais dentre outros (FINOCCHIARO e GIRARDI, 2017). A ausência de áreas permeáveis contribui significativamente para o aumento dos picos de descarga pluviais, transbordando e causando danos que, devido ao aumento populacional, só tendem a crescer, diminuindo a capacidade do solo, conforme pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Relação entre pavimento impermeável (a) e pavimento permeável (b).



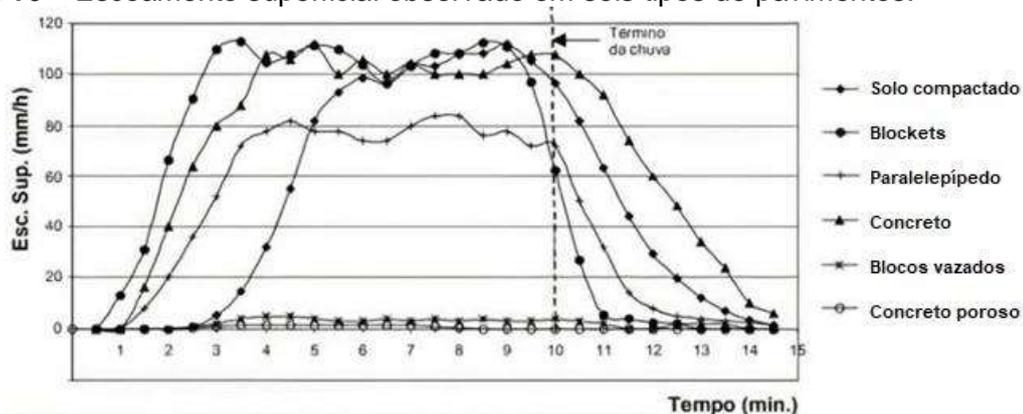
Fonte: Marchioni e Silva (2013)

O pavimento permeável, quando corretamente projetado e implantado, pode influenciar consideravelmente nas vazões de pico que ocorrem durante eventos de chuva em determinado local (BATEZINI, 2013). Dessa forma, este tipo de pavimento

serve de apoio para melhorar a drenagem e, conseqüentemente, dar segurança e conforto aos usuários.

Na Figura 16 pode ser visualizada a variação do escoamento superficial em função do tempo, de seis tipos de pavimentos. Os pavimentos executados em blocos vazados ou concreto poroso apresentam escoamento superficial muito menor que pavimentos em paralelepípedos ou concreto convencional.

Figura 16 – Escoamento superficial observado em seis tipos de pavimentos.



Fonte: Mantovan *et al.* (2017)

Todos os tipos de pavimento permeável compartilham os mesmos objetivos, que são: permitir a infiltração da água na sua superfície; reduzir o aumento da taxa e do volume de escoamento superficial; e melhorar a degradação da qualidade da água resultante da urbanização e alteração do uso do solo. Dependendo da permeabilidade do solo, ainda apresentam a vantagem de permitir a recarga dos aquíferos (ANTUNES, 2017). A Figura 17 apresenta um diagrama esquemático que demonstra brevemente o problema hidrológico das cidades provocado pela urbanização.

Figura 17 – Diagrama esquemático do problema hidrológico nas cidades.



Fonte: Antunes (2017)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

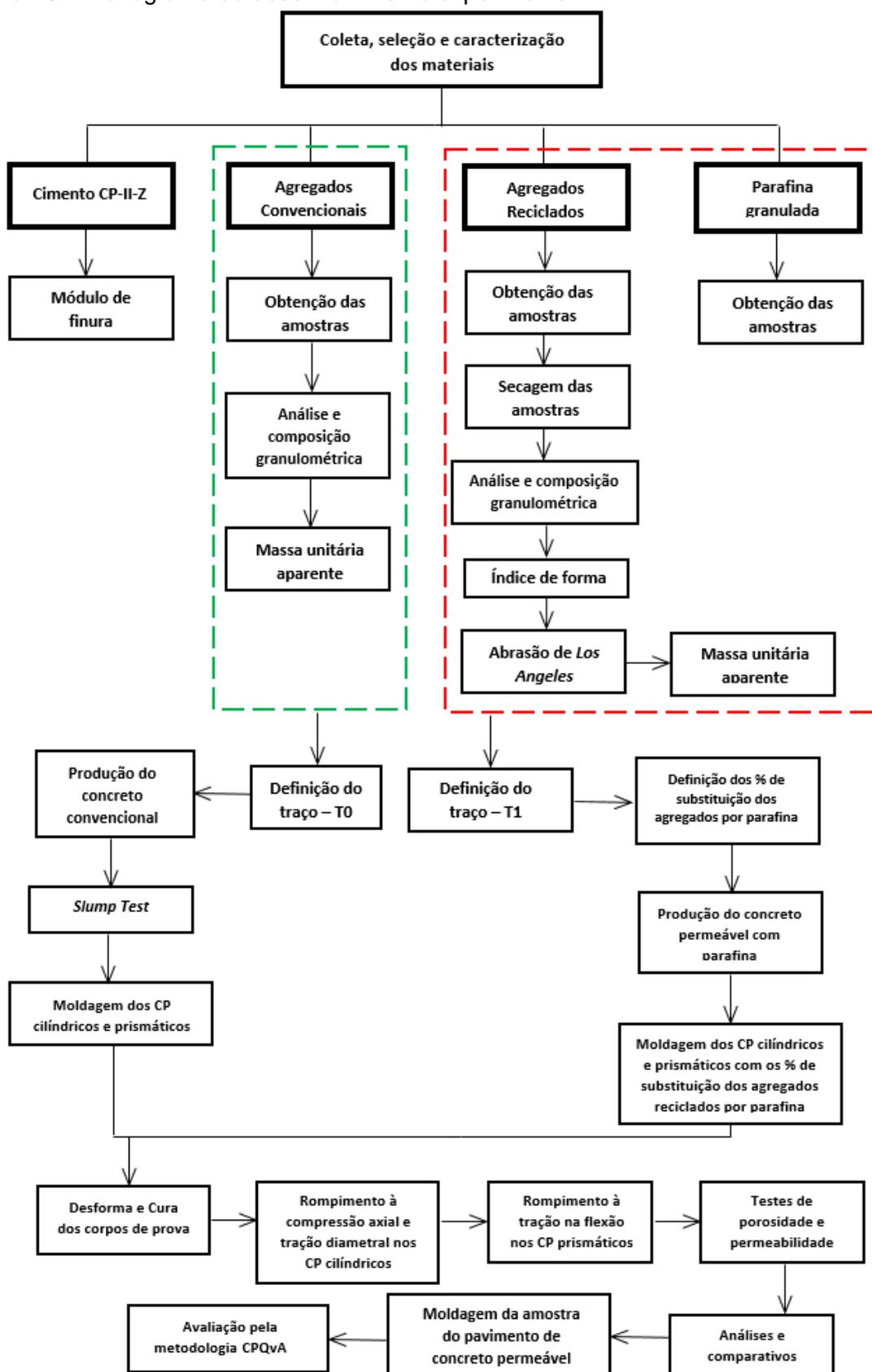
Neste estudo foi desenvolvido um pavimento de concreto permeável empregando agregados oriundos de resíduos de construção e demolição (RCD) e parafina como agente espaçador e formador de porosidade, visando aplicação como revestimento em áreas externas para tráfego leve à moderado, como calçamento de ruas em condomínios e pequenas áreas de estacionamentos. Os corpos de prova de concreto e o pavimento permeável confeccionados a partir dos agregados reciclados e parafina foram caracterizados e suas propriedades (resistência à compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão, porosidade e taxa de permeabilidade à água) foram comparadas com as dos obtidos com agregados convencionais. A avaliação da valorização do resíduo se deu através da metodologia CPQvA (Classificação, Potencialidade, Quantidade/Viabilidade, Aplicabilidade).

A caracterização dos materiais utilizados, dosagem, confecção dos corpos de prova e produção dos concretos foram realizadas no Laboratório de Materiais do Centro Universitário Católica de Santa Catarina, campus Joinville/SC.

Os procedimentos experimentais empregados no desenvolvimento do estudo foram baseados nas recomendações da NBR 16416 (ABNT, 2015). No entanto, por não existir uma metodologia específica para dosagem de concreto permeável normatizada, foi realizado um estudo de dosagem experimental, visando determinar a melhor proporção dos constituintes para confecção desse material.

As etapas empregadas no desenvolvimento da parte experimental estão apresentadas no fluxograma da Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma do desenvolvimento experimental



Fonte: Própria (2020).

3.1 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O concreto permeável é fabricado com os mesmos materiais que compõem o concreto convencional, o qual é constituído pela mistura de aglomerante (cimento), agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e água em proporções exatas e bem definidas. A diferença está numa pequena alteração no traço: o concreto permeável dispõe de proporções maiores de pedra e pouca ou nenhuma areia (agregados miúdos) (DE PAULA JUNIOR, 2019).

No presente estudo não foi utilizado agregado miúdo (areia), pois a permeabilidade do concreto é inversamente proporcional aos finos presentes na mistura (PIRES *et al.*, 2017). Dessa forma, apenas os agregados graúdos (brita e RCD) e cimento Portland foram utilizados na confecção do concreto permeável. Embora seja prática frequente o uso de aditivos químicos (plastificantes e super plastificantes) na produção de concretos dessa categoria, neste trabalho não foram utilizados aditivos químicos nos traços elaborados, pois pretendia-se entender o comportamento do concreto permeável sem aditivos e evitar custos com o seu uso.

Primeiramente, foi realizada a caracterização dos agregados que seriam utilizados na confecção do concreto permeável. Com base nos resultados dessa caracterização, foram definidos os traços a serem utilizados. Foram realizados testes com o material fresco e, posteriormente, com o material em estado endurecido.

3.2 CIMENTO

3.2.1 Obtenção do cimento

Para a produção do concreto, optou-se pelo cimento CP Votoran CP-II-Z-40 (Cimento Portland composto com pozolana) – Obras Estruturais – da Votorantim Cimentos, como material aglomerante. Esse material foi escolhido, devido suas especificações técnicas relacionadas à secagem e resistência: Cimento Premium com secagem 3 vezes mais rápida e 20% mais resistência, de acordo com ensaios previstos na NBR 5739 (ABNT, 2018) e atende os requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018). Ainda, conforme o Guia de Produtos da Votorantim Cimentos (2019), este tipo de cimento permite liberação para trânsito após 5 horas, sem deixar marcas de pegadas.

Na Figura 19 são apresentadas as principais características do cimento empregado nesta pesquisa, disponibilizadas pela fabricante.

Figura 19 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland CP II-Z-40 (a) componentes; (b) exigências físico-mecânicas; (c) exigências química e (d) influência nas propriedades de pastas, argamassas e concretos.

(a)

Nome Técnico do Cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clinker + gesso	Escória	Pozolana	Filer calcário
Composto com Pozolana	CPII-Z	25, 32, 40	94-76	0	6-14	0-10

(b)

Tipo de cimento	Classe	Finura		Tempos de pega (h)		Expansibilidade (mm)		Resistência à compressão (MPa)				
		Resíduo #75 µm	Área específica (m ² /kg)	Início	Fim	A frio	A quente	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
CPII-Z	40	≤ 10,0	≥ 260	≥ 1	≤ 10 ¹⁾	≤ 5 ¹⁾	≤ 5	-	≥ 10	≥ 20	≥ 40	-

(c)

Tipos de Cimento	Resíduo Insolúvel (%)	Perda ao Fogo (%)	Teores de óxidos (%)		
			MgO	SO ₃	CO ₂
CPII-Z	≤ 16,0	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0

(d)

Influência	Tipo de Cimento
	Pozolânico
Resistência à compressão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura
Calor gerado na reação do cimento com a água	Menor
Impermeabilidade	Maior
Resistência aos agentes agressivos (água do mar e esgotos)	Maior
Durabilidade	Maior

Fonte: Adaptado de Votorantim Cimentos (2019).

3.2.2 Ensaio de Finura

O ensaio de finura foi realizado no cimento escolhido para uso nesse estudo, visando verificar se o mesmo apresentava resíduo (#75 µm) ≤ 10 %, conforme consta no Figura 19 e que é exigido pela norma brasileira para cimentos CP-II-Z-40.

Módulo de finura é a porcentagem, em massa, de material retido na peneira n. 200 após um ensaio de peneiramento. A medida da finura do cimento Portland busca

verificar a granulometria dos grãos deste material. O ensaio de módulo de finura do cimento foi realizado de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2012).

Para o ensaio, foram pesadas 50 g de amostra de cimento, que foram submetidas à análise granulométrica em um sistema da marca Contenco, utilizando peneira redonda com Ø 8" x 2" (diâmetro x altura), para eliminar os finos. O tempo de permanência na peneira foi de 3 min. Ao final da análise, com a ajuda de um pincel, o material retido na peneira foi retirado e pesado. Na Figura 20 estão mostradas fotos das etapas realizadas no ensaio.

Figura 20 – Etapas do ensaio de módulo de finura: (a) pesagem do cimento; (b) peneiramento do cimento; (c) material retido na peneira; (d) pesagem do material retido na peneira.



Fonte: Própria (2019).

O módulo de finura (MF), em porcentagem, foi calculado pela Equação 1:

$$MF = \left(\frac{R}{M} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

MF é o módulo de finura do cimento, em %;

R é a quantidade de resíduo retido na peneira n°. 200 (#75 µm), em g;

M é massa total da amostra de cimento (50 g).

3.3 AGREGADOS RECICLADOS

3.3.1 Obtenção dos agregados reciclados

Os agregados reciclados foram cedidos pela empresa Terraplanagem Medeiros, localizada na cidade de Joinville, SC (Anexo 1). Esta empresa é a única na cidade que possui licença ambiental de operação para realizar o armazenamento,

transbordo e reciclagem de resíduos da construção civil e com autorização para reciclagem de material classe A e madeira, conforme Licença Ambiental de Operação LAO nº 035/2019. Os resíduos recebidos pela empresa são submetidos ao processo de quebra em pedaços menores por meio de marteleto hidráulico. Na sequência, são conduzidos por meio de pá-carregadeira até a caçamba que alimenta a mandíbula de britagem que tritura o material. Posteriormente, o material é transportado pela esteira, que possui uma estrutura imantada que separa os materiais ferrosos. Os materiais não ferrosos são separados por meio de segregação manual. Essas etapas podem ser visualizadas nas fotos da Figura 21.

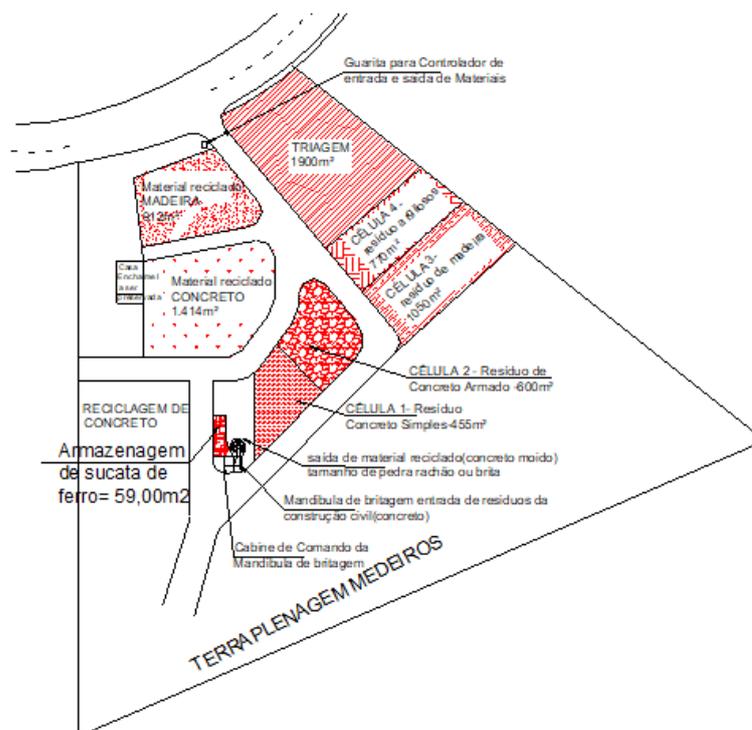
Figura 21- Etapas de recebimento e preparação dos resíduos: (a) veículo de transporte; (b) material a ser rompido; (c) rompimento; (d) trama de ferro; (e) material rompido; (f) transporte até o britador; (g) britador operando; (h) material britado.



Fonte: Farias (2010)

O transporte dos materiais que são recebidos é realizado por caminhões poli-guindastes ou basculantes, os quais passam por uma vistoria com objetivo de verificar se a carga está de acordo com as normas da empresa e entrega de documentos pertinentes. Os diversos tipos de materiais que entram na área de transbordo e reciclagem seguem uma classificação, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Células para cada tipo de material dentro da área de transbordo e reciclagem da empresa



Fonte: Farias (2010)

Os resíduos reciclados são vendidos diariamente com a finalidade de atender diversas obras prediais, drenagem, acabamento, sub-base, entre outros. Na Figura 23 podem ser observados os locais de armazenamento dos resíduos que chegam na usina de reciclagem.

Figura 23 – Locais de armazenamento dos resíduos: (a) vista geral do britador, (b) esteira que conduz o material britado, (c e d) material depositado *in loco*



Fonte: Própria (2019).

Neste estudo, foram utilizados resíduos de construção e demolição mistos, Classe A, segundo a Resolução Conama 307, proveniente de concreto e artefatos cerâmicos com camada de argamassa como agregado graúdo, e classificados como resíduos Classe II B de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004) – resíduos inertes – que quando em contato com água, não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas. O agregado graúdo utilizado, proveniente de entulhos de demolição, encontrava-se armazenado ao ar livre na empresa.

Para os ensaios, foram coletados cerca de 120 quilos de resíduos mistos da usina de reciclagem da empresa entre os meses de outubro/2019 e abril/2020. Após a coleta, as amostras de agregados reciclados foram acondicionadas em recipientes e levadas ao Laboratório de Materiais do Centro Universitário Católica de Santa Catarina, Campus Joinville, para realização dos ensaios. Na Figura 24 estão apresentadas fotos dos resíduos coletados na empresa e acondicionados.

Figura 24 – Amostras acondicionadas pós coleta na usina.



Fonte: Própria (2020)

3.3.2 Secagem dos agregados reciclados

Os materiais coletados na empresa foram secos e esterilizados, em estufa da marca Med Clave, modelo 5 (56x48x68 cm), a 105 °C por 24 horas. Posteriormente, foram resfriados à temperatura ambiente, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Secagem da amostra em estufa e esfriamento à temperatura ambiente.



Fonte: Própria (2020).

3.3.3 Análise granulométrica dos agregados reciclados.

A análise granulométrica foi realizada visando avaliar as dimensões das partículas dos agregados reciclados e suas proporções relativas de ocorrência e a partir destas elaborar a curva granulométrica do material.

Com as informações obtidas nas análises, foram definidas as frações de agregados reciclados para serem usados na produção do concreto permeável, sendo utilizadas as partículas com faixa granulométrica correspondente à dos agregados graúdos, britas 0 e 1, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019).

Como as usinas de reciclagem de resíduos da construção civil no Brasil produzem agregado reciclado com alta variabilidade mineral e dimensional, os agregados reciclados com os grãos na sua forma original, como retirados na usina, possuem grãos com dimensões e geometrias maiores. Por este motivo, foram feitas duas análises granulométricas: primeiro com os agregados reciclados com os grãos da forma como foi coletado da usina (como recebido), somente lavados com a retirada dos finos presentes e, na sequência, um segundo ensaio granulométrico com as frações dos agregados reciclados utilizados no estudo (frações de 9,5 mm à 4,76 mm).

A análise foi realizada seguindo os procedimentos da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para o ensaio, foram utilizados 5 kg do agregado reciclado, os quais foram analisados em peneiras de malha quadrada com aberturas padronizadas. A análise foi realizada utilizando um sistema de 8 peneiras de 50 x 50 x 10 cm marca Solotest, com diferentes aberturas. As amostras foram agitadas mecanicamente no Agitador de Peneiras Vibratório com Controle de Intensidade, marca Granuteste, modelo G, conforme mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Agitador mecânico e sistema de peneiramento.



Fonte: Própria (2020).

3.3.4 Módulo de finura dos agregados reciclados

O módulo de finura (MF) é um parâmetro muito importante para avaliar as dimensões dos grãos (superfície específica). Serve para determinar a quantidade de cimento necessária para envolver os grãos e a quantidade de água necessária para se obter consistência desejada na mistura de concreto.

O módulo de finura foi determinado a partir dos resultados da análise granulométrica, seguindo os procedimentos da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Foi obtido pela soma das porcentagens acumuladas em massa do agregado, nas peneiras da série normal, representadas no Quadro 7, dividida por 100, conforme Equação 2.

Quadro 7 - Série de peneiras normal.

Serie Normal / Série Normal
75 mm
37,5 mm
19 mm
9,5 mm
4,75 mm
2,36 mm
1,18 mm
600 µm
300 µm
150 µm

Fonte: ABNT NBR NM 248 (2003)

$$MF = \left(\frac{\sum \% \text{ retido nas peneiras série normal}}{100} \right) \quad (2)$$

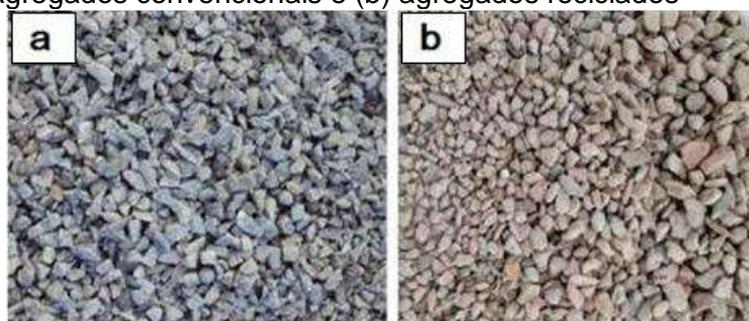
3.3.5 Composição granulométrica dos agregados reciclados

O tamanho e o formato dos grãos de um agregado reciclado são influenciados diretamente pelo tipo de material e pela regulação do britador. Em geral, os agregados reciclados apresentam formas angulares e texturas mais rugosas (porosas), por causa das aderências superficiais de argamassa nas partículas cerâmicas (VIDAL, 2014).

A análise da composição granulométrica das amostras de agregados reciclados foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para a dosagem e traço de concreto permeável é necessário que os agregados tenham granulometria, a mais próxima possível, à da brita convencional. Os agregados de RCDs, que já passaram pelo ensaio de peneiramento, apresentaram, de maneira geral, dimensões e geometrias comuns aos materiais de construção convencionais, conforme pode ser visualizado na Figura 27. Os agregados reciclados apresentados na Figura 27 (b) foram os selecionados para a confecção dos corpos de prova de concreto permeável, conforme definido e descrito anteriormente no item referente à análise granulométrica.

Figura 27 – (a) Agregados convencionais e (b) agregados reciclados



Fonte: Própria (2020).

Na Figura 28 estão apresentadas fotos dos agregados reciclados descartados e na Figura 29 estão apresentadas as fotos dos agregados reciclados separados para uso no desenvolvimento do concreto permeável.

Figura 28 – Faixa dos agregados reciclados descartados.



Fonte: Própria (2020).

Figura 29 – Faixa dos agregados reciclados utilizados na confecção do concreto permeável.



Fonte: Própria (2020).

3.3.6 Determinação do índice de forma dos agregados reciclados

A forma do agregado gráudo exerce influência nas propriedades mecânicas do concreto e está relacionada às características geométricas dos grãos, que podem ser cúbicas, alongadas, lamelares e alongadas-lamelares, conforme mostra a Figura 30 (SILVA, 2018). A forma predominante entre os grãos de um agregado é avaliada por um índice, denominado Índice de Forma (IF), que também permite avaliar, além da forma a qualidade do agregado gráudo.

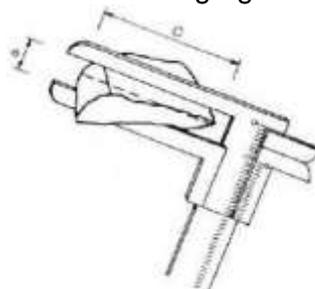
Figura 30 – Interpretação da forma do agregado gráudo

Forma Cúbica	Forma Alongada	Forma Lamelar	Forma Alongada-lamelar
			
$c/e < 1,8$	$c/e > 1,8$	$c/e > 2,4$	$c/e > 3,0$

Fonte: Leite (2001).

O índice de forma é determinado para agregados gráudos com diâmetro máximo característico igual ou superior a 9,5 mm de acordo com a NBR 7809 (ABNT, 2008) que estabelece o ensaio pelo método do paquímetro. O ensaio do índice de forma dos agregados foi realizado de acordo com a norma técnica, sendo definido como a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe. O comprimento de um grão é a maior dimensão possível de ser medida em qualquer direção do grão, enquanto a espessura de um grão é a menor dimensão possível entre planos paralelos entre si em qualquer direção do grão. Estas dimensões são mostradas na Figura 31.

Figura 31 – Determinação das dimensões dos agregados graúdos utilizando o paquímetro



Fonte: Leite (2001).

Após o ensaio de determinação das frações dos grãos que foram utilizados no estudo, o material foi seco em estufa a 105° C, marca Med Clave, modelo 5 (56x48x68 cm), por 24 horas. Foram separados 200 grãos do agregado reciclado, conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Grãos medidos no ensaio de índice de forma



Fonte: Própria (2021).

Na sequência, com auxílio de paquímetro digital de inox 150 mm, marca Digimess, modelo 100.174BL, foi efetuada a medida do comprimento e da espessura de cada um dos grãos obtidos. (Figura 33). O IF foi calculado pela Equação 3 e corresponde à média do IF das 200 amostras selecionadas, sendo uma grandeza adimensional.

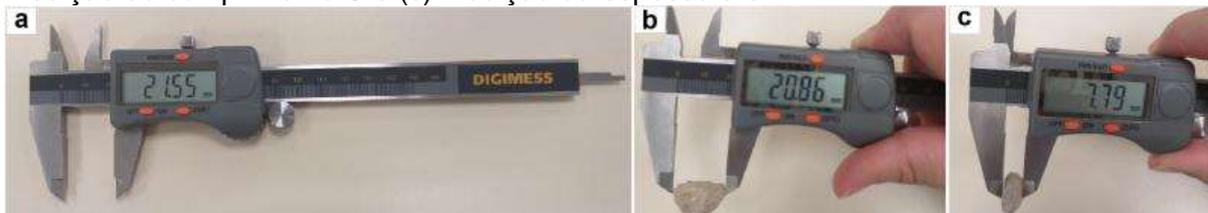
$$IF = \left(\frac{c}{e} \right) \quad (3)$$

Onde:

C = comprimento dos grãos (mm)

e = espessura dos grãos (mm)

Figura 33 – Etapas da determinação das medidas dos grãos: (a) Paquímetro digital, (b) Medição do comprimento C e (c) Medição da espessura e



Fonte: Própria (2021).

3.3.7 Determinação do desgaste por abrasão de Los Angeles

Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019), o ensaio de desgaste “Los Angeles” mede o desgaste do agregado graúdo por abrasão, fornecendo um indicativo da qualidade do material a ser utilizado na produção do concreto. Esse desgaste pode acarretar mudanças nas propriedades de forma dos agregados graúdos e a resistência à abrasão mede, portanto, a capacidade que o agregado tem de se não alterar quando manuseado.

A resistência à abrasão é medida em uma máquina chamada “Los Angeles”, composta por um tambor cilíndrico que gira durante um tempo estabelecido com agregado juntamente com bolas de ferro fundido no seu interior (Figura 34), o impacto das bolas com o agregado provoca o desgaste dos grãos. Inicialmente, a amostra possui uma granulometria e massa definidas. Depois do atrito, a amostra é peneirada e lavada para medir o desgaste. O ensaio de abrasão foi realizado segundo especificações da norma NBR NM 51 (ABNT, 2001).

O equipamento utilizado é constituído de um tambor giratório marca Solotest, modelo 1.252.250, 220V, 50/60Hz – no qual as amostras dos agregados reciclados foram introduzidas, com a granulometria pré-definida, juntamente com esferas de aço em quantidade estabelecida de acordo com a graduação do agregado ensaiado, conforme mostrado nas Tabelas 1, 2 e 3. No caso deste estudo, todas as frações dos grãos utilizados apresentaram graduação C. Portanto, foram utilizados 5 kg do agregado reciclado, com 8 esferas de aço e 500 rotações. Neste ensaio, a norma recomenda que a máquina deve ser rotacionada a uma velocidade de 30 a 33 rotações por minuto.

Figura 34 – Máquina de ensaio de abrasão de *Los Angeles* e as esferas de aço

Fonte: Própria (2021).

Tabela 1 – Informações técnicas do equipamento

Equipamento	
Diâmetro interno do tambor	700 mm
Comprimento interno do tambor	500 mm
Diâmetro de cada esfera de aço	48 mm
Peso de cada esfera de aço	400 – 435 g

Fonte: Catálogo Solotest (2019)

Tabela 2 – Graduações para o ensaio de abrasão de *Los Angeles*

Graduação	Peneira (mm)		Massa da amostra (g)	
	Passante	Retida	Por faixa	Total
A	38,1	25,4	1250 ± 25	5000 ± 100
	25,4	19,1	1250 ± 25	
	19,1	12,7	1250 ± 25	
	12,7	9,52	1250 ± 25	
B	19,1	12,7	5000 ± 100	5000 ± 100
	12,7	9,52	1250 ± 50	
C	9,52	6,35	1250 ± 50	5000 ± 100
	6,35	4,76	1250 ± 50	
D	4,76	2,38	5000 ± 100	5000 ± 100
	76,2	63,5	2500 ± 50	
E	63,5	50,8	2500 ± 50	10000 ± 200
	50,8	38,1	5000 ± 100	
F	50,8	38,1	5000 ± 100	10000 ± 200
	38,1	25,4	5000 ± 100	
G	38,1	25,4	5000 ± 100	10000 ± 200
	25,4	19,1	5000 ± 100	

Fonte: ABNT NBR NM 51 (2001)

Tabela 3 – Número de esferas e rotações

Graduação	Número de esferas	Massa total das esferas (g)	Número de rotações
A	12	5000 + 25	500
B	11	4584 + 25	500
C	8	3330 + 25	500
D	6	2500 + 25	500
E	12	5000 + 25	1000
F	12	5000 + 25	1000
G	12	5000 + 25	1000

Fonte: ABNT NBR NM 51 (2001)

Na sequência, o material foi retirado do tambor, separado das esferas e limpos com o auxílio de uma escova. Esse material resultante foi peneirado na peneira malha 1,7 mm, lavado na própria peneira e em seguida seco em estufa à 105°C e por um mínimo de 3 horas. A Figura 35 apresenta a sequência do ensaio executado.

O desgaste por abrasão foi calculado através da Equação 4:

$$An = \left(\frac{M_n - M_n'}{M_n} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

An= abrasão “Los Angeles” da graduação n

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G)

Mn = massa total da amostra seca, colocada na máquina (g)

Mn’= massa da amostra levada e seca, após o ensaio, retirada na peneira de 1,7 mm (g)

A norma estabelece que o índice de desgaste por abrasão não deve ser superior a 50% em massa do material inicial.

Figura 35 – Etapas do ensaio de abrasão de Los Angeles: (a) 5 kg do material colocado no tambor, (b) material retirado pós rotação no tambor, (c) pesagem material pós rotação no tambor e (d) retirada do material pulverulento peneirado na #1,7 mm



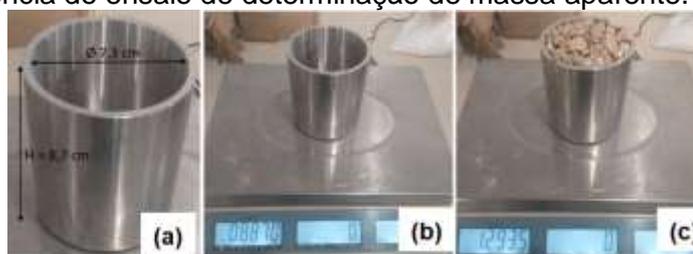
Fonte: Própria (2021).

3.3.8 Determinação da massa unitária aparente (estado solto) das amostras

Após o ensaio de determinação das frações dos grãos que foram utilizados no estudo, foi feita a lavagem para retirar a maior quantidade de material pulverulento que fica em contato com a superfície do agregado reciclado. Após isso, o material foi submetido à secagem ao ar. A determinação da massa unitária aparente (estado solto) foi realizada a partir do peso da unidade de volume, incluindo-se os vazios contidas nos grãos.

O ensaio foi baseado nos procedimentos descritos na NBR NM 45 (ABNT, 2006) – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. O “método C” desta norma deve ser empregado para determinar a massa unitária de material no estado solto. Na Figura 36 estão mostradas fotos referentes ao ensaio de determinação de massa unitária.

Figura 36 – Sequência do ensaio de determinação de massa aparente.



Fonte: Própria (2020).

Primeiramente, a massa do recipiente vazio, Figura 36 (a) com $V_r = 364,13 \text{ cm}^3$, foi determinada e registrada na balança analítica de bancada marca Bel, classe II, capacidade de 30 kilos, com precisão de 1 grama. Em seguida, Figura 36 (b), o recipiente metálico foi preenchido com o agregado reciclado, despejando o mesmo de uma altura inferior a 50 mm acima da borda superior do recipiente. Isso foi realizado para evitar a segregação do material, e a camada superficial do agregado foi então nivelada. Na sequência, Figura 36 (c), a massa do recipiente mais seu conteúdo foi determinada e registrada.

A massa unitária do agregado foi calculada pela Equação 5:

$$\gamma = \frac{(M_{ra} - M_r)}{V_r} \quad (5)$$

Onde:

γ = massa unitária do agregado (kg/dm^3)

M_{ra} = Massa do recipiente mais amostra (kg)

M_r = Massa do recipiente (kg)

V_r = Volume do recipiente (m^3)

3.4 AGREGADOS CONVENCIONAIS

3.4.1 Obtenção e caracterização dos agregados convencionais

Como agregado convencional, foi utilizado somente agregado graúdo (brita) adquirida em uma empresa de material de construção, localizada na cidade de Joinville, acondicionada em embalagens plásticas de 20 kg. A brita utilizada é originária da rocha granito, proveniente de uma pedreira localizada em Joinville, Rodovia SC 301, km 8, Pirabeiraba – Britador Hubner Ltda. Foi aplicada brita número 1 como diâmetro máximo em todos os experimentos, conforme Figura 37.

Figura 37 – Agregado graúdo utilizado na confecção dos corpos de prova de concreto permeável convencional.



Fonte: Própria (2020).

Os mesmos ensaios de caracterização (análise granulométrica, módulo de finura, índice de forma, abrasão de *Los Angeles*, massa unitária aparente) realizadas para os agregados reciclados foram efetuadas para os agregados convencionais, empregando as mesmas normas e procedimentos.

3.5 AGENTE ESPAÇADOR (PARAFINA SÓLIDA)

Neste estudo, foi utilizada a parafina como agente espaçador formador de porosidade na confecção do concreto permeável com agregados reciclados.

A importância da utilização da parafina está relacionada ao fato de ser um material bioinerte, muito acessível, de baixo custo, insolúvel em água e com baixo ponto de fusão, de 59 a 62,8 °C. Esta propriedade facilita a formação dos poros, justificando seu uso como agente espaçador) (TESTAI *et al.*, 2014).

Neste experimento foi incorporado parafina sólida granulada marca Solven, ao traço do concreto permeável com o intuito de aumentar os poros, seguido da sua extração por fusão a 70 °C por 24 horas. Esse processo foi realizado na estufa, marca Med Clave, modelo 5 (56x48x68 cm).

A parafina granulada, na forma de lentilhas, foi adquirida na empresa Fainatex Indústria e Comércio de Parafinas, situada em Joinville/SC. Ela apresenta elevado ponto de fulgor (199 °C) o que torna o produto seguro para o manuseio. Na Figura 38 está apresentada foto da parafina utilizada no estudo.

Figura 38 – Parafina granulada usada na confecção do concreto permeável com agregados reciclados.



Fonte: Própria (2020).

Devido à inércia química e baixa solubilidade, a parafina não é considerada passível de causar danos ao meio ambiente. É um produto não tóxico. Na Tabela 4 estão apresentadas as propriedades físico-químicas da parafina utilizada neste estudo, cujas informações foram obtidas da Ficha Técnica disponibilizada pelo fabricante Solven Solventes e Químicos Ltda. (2020).

Tabela 4 – Propriedades físico-químicas da parafina.

parâmetros	parafina utilizada
estado físico	sólido
forma	lentilhas
coloração	branca
odor	baixo
ph	não aplicável
ponto de fusão	~ 60 °C
taxa de evaporação	não disponível
solubilidade na água	insolúvel

Fonte: Adaptado de Solven Solventes e Químicos Ltda (2020).

3.6 ÁGUA

A água utilizada nos ensaios e na composição do concreto, foi obtida da rede municipal, sob responsabilidade da Águas de Joinville Companhia de Saneamento Básico.

3.7 DEFINIÇÃO DO TRAÇO DE CONCRETO

O traço do concreto nada mais é do que a formulação da massa a ser misturada para a obtenção do composto final.

Como não existem metodologias específicas para dosagem de concreto permeável normatizadas. Desta forma, para determinar o traço foi utilizada como base a relação água/cimento (a/c) e dados descritos em estudos de diversos autores, como Rubim *et al.* (2016), Vidal (2014) e Tavares e Kazmierczak (2016), os quais demonstram que as maiores resistências mecânicas são obtidas a partir das composições 1:3 e 1:4 (cimento: agregado graúdo).

Outro ponto de extrema importância no processo de definição do traço está relacionado com a taxa de absorção de água dos agregados reciclados. Conforme Leite (2001), os agregados de RCD absorvem mais de 40% da massa total de água nos primeiros 10 minutos. Assim, neste estudo, foi realizada uma umidificação destes agregados antes do início da mistura dos componentes de forma manual por aproximadamente 30 minutos. Essa pré molhagem foi executada para evitar que o

agregado reciclado, por causa da sua taxa de absorção, tornasse a mistura mais seca, absorvendo parte da água da mistura, dificultando a moldagem dos corpos de prova (OLIVEIRA, 2017). Vidal (2014) aconselha a utilização de aditivo superplastificante para melhorar a trabalhabilidade e consistência do concreto permeável com agregado reciclado. Porém, neste estudo, foi realizada a pré molhagem, sem o uso de aditivos químicos, para compreender o comportamento do concreto permeável sem adições de insumos químicos e conferir um caráter inovador no compósito.

Para determinar a relação água/cimento foram utilizadas as quantidades médias de água e cimento obtidas em estudo da literatura (variação em torno de 0,27 a 0,50), conforme Pereira e Barbosa (2015), Batezini (2013) e De Paula Junior (2019), mas adequando ao material utilizado de forma que obtivesse um concreto trabalhável, com consistência satisfatória e que apresentasse uma resistência adequada, pois sabe-se que a relação água/cimento e a resistência à compressão são inversamente proporcionais.

3.7.1 Composição do traço do concreto permeável com adição de parafina

Para conferir a permeabilidade no concreto, as microesferas de parafina (agente espaçador) foram dispersas no interior da massa de concreto e sua colocação aconteceu junto à adição do cimento, item 3 do Quadro 8.

A sequência da mistura (manual) dos materiais usados na preparação do traço do concreto permeável foi baseada na estabelecida por VIDAL (2014), conforme Quadro 9.

Quadro 8 - Ordem da mistura dos componentes do concreto permeável.

ITEM	SEQUÊNCIA DA MISTURA DOS COMPONENTES DO CONCRETO
1	Adicionar todo o agregado graúdo
2	Adicionar 40% da água e misturar por 1 minuto, findo este tempo aguardar 10 minutos
3	Adicionar o cimento e a parafina e misturar por mais 1 minuto
4	Adicionar os 60% restantes da água e misturar por mais 3 minutos. A mistura está pronta para moldar os corpos de provas.

Fonte: Adaptado de Vidal (2014)

As composições do traço do concreto permeável definidas para o estudo estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição do traço de concreto permeável, em massa (kg)

Materiais T1 - traço 1:3 (cimento : agregado graúdo) relação a/c ~0,50	Substituições de agregado convencional				
	por agregado reciclado				
	20%	40%	60%	80%	100%
Agregado graúdo convencional (kg)	2,4	1,8	1,2	0,9	0
Agregado graúdo reciclado (kg)	0,51	1,02	1,53	2,04	2,55
Parafina granulada (15% do agregado reciclado) (kg)	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45

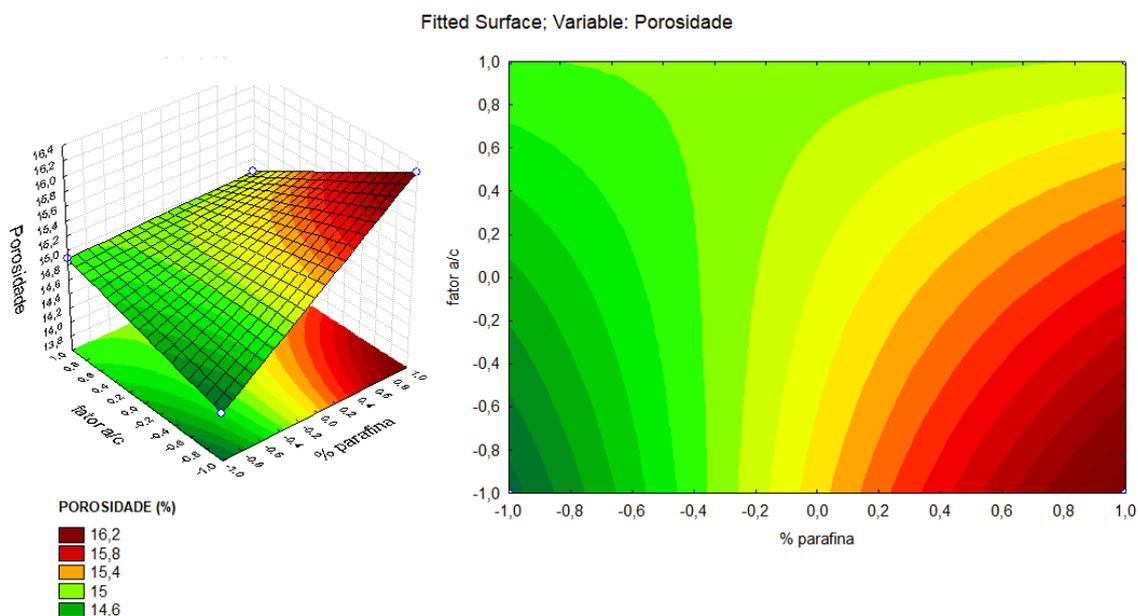
Fonte: Primária (2020)

Foi utilizada proporção de cimento agregado em 1:3, com relação a/c aproximadamente de 0,50 (com adequação da relação a/c) e as devidas porcentagens de substituição do agregado convencional pelo resíduo de construção e demolição RCD. As relações a/c de todas as misturas foram ajustadas de forma a obter uma consistência semelhante em todas as dosagens.

A adição do material espaçador (microesferas de parafina) foi substituída na porcentagem de RCD. No trabalho desenvolvido por SANTOS *et al.*, 2016, foi utilizado um percentual de esferas de parafina em 5% do RCD (em massa), mas não obtiveram resultados satisfatórios em relação à porosidade e, por consequência, o concreto analisado resultou em baixa permeabilidade. Neste estudo, com o intuito de elevar o resultado do índice de porosidade e coeficiente de permeabilidade, optou-se por aumentar a porcentagem de poros a partir do aumento da quantidade de parafina. Para a análise e diagnóstico deste percentual, foi utilizado como metodologia a aplicação do software *Statística* versão 7 a partir de um planejamento experimental no *Experimental Design (DOE)*. A metodologia de superfície de resposta é uma técnica estatística utilizada para a modelagem e análise de problemas nos quais a variável resposta é influenciada por alguns fatores, cujo objetivo é a otimização dessa resposta, sendo uma ferramenta muito usada para testes de hipóteses (ZHANG *et al.*, 2020). A porosidade foi definida como variável dependente e o % de parafina e relação a/c como variáveis independentes, com concreto permeável no traço 1:3. A Figura 39 mostra o traçado da superfície de resposta (a) e seu contorno (b). Observa-se que a relação a/c não foi uma variável significativa para o resultado “porosidade”.

Os resultados destes traçados comprovam que com o nível inferior de parafina (5%) houve uma redução considerável no valor final da porosidade e que este percentual começa a ter uma interferência positiva a partir do nível médio (10%). Desta forma, optou-se por utilizar 15% de parafina (nível superior) na substituição (em massa) dos agregados reciclados.

Figura 39 – Modelos gráficos: (a) Superfícies de resposta e (b) Contorno de resposta



Fonte: Primária (2020)

Foi denominado de T1 o traço para os concretos permeáveis com agregados reciclados, exibidos na Tabela 5.

As substituições do agregado convencional pelo reciclado foram nas proporções de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% e as esferas de parafina foram substituídas em 15% da proporção do agregado reciclado e este percentual foi mantido para todas as dosagens.

Os ensaios foram realizados de acordo os procedimentos descritos na norma técnica NBR 12655 (ABNT, 2015), que especifica os ensaios para preparo, controle e aceitação do concreto.

3.8 PRODUÇÃO DA MISTURA DE CONCRETO, MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A dosagem do concreto referência (ou convencional) foi realizado pelo método da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Em seguida, foram realizadas as dosagens das amostras com substituição do agregado graúdo convencional pelo reciclado, nas porcentagens citadas anteriormente na Tabela 5 e confeccionados os concretos com agregados reciclados.

O processo de produção dos traços de concreto ocorreu em momentos distintos. Primeiro, foi confeccionado o Traço T0 1:3 (traço referência, sem substituição de agregado graúdo natural por RCD), depois, o Traço T1 1:3, com suas devidas substituições do agregado natural por RCD e adição de parafina, conforme composição apresentada na Tabela 5.

O procedimento experimental foi constituído pela moldagem dos corpos de prova, seguida da cura deles imersos em água e realização de ensaios para avaliação do desempenho mecânico e de durabilidade. Foram moldados, para cada ensaio, 3 corpos de prova cilíndricos por tipo de mistura e 6 corpos de prova prismáticos, para cada ensaio, 1 para cada tipo de mistura.

A sequência da mistura dos materiais foi baseada na mesma descrita por Vidal (2014), conforme apresentada no Quadro 8. Os materiais foram misturados de forma mecanizada, em uma betoneira de 120 litros, marca Menegotti, Top 1000, ½ hp, modelo 246450, conforme mostra a Figura 40.

No momento da produção do concreto permeável, é realizado um teste visual, no qual uma mão cheia da amostra formando uma “bola” não pode se desintegrar, conforme mostrado na Figura 41 (a) e a pasta deve fluir para dentro dos espaços vazios que existem entre os agregados. O concreto fresco com agregados reciclados pode ser verificado na Figura 41 (b).

Figura 40 – Betoneira 120 litros utilizada para confecção dos concretos



Fonte: Própria (2021).

Figura 41 – Concreto fresco com agregado reciclado (teste visual da pelota)



Fonte: Própria (2020).

3.8.1 Consistência ou *Slump Test*

A consistência é uma propriedade que representa o grau de umidade do concreto no estado fresco. Após verificar a homogeneidade e trabalhabilidade da mistura, foi realizado o ensaio do abatimento pelo tronco de cone *Slump Test*, que serve para verificar a consistência do concreto no estado fresco, sendo considerado um índice qualitativo da estabilidade e fluidez da mistura de concreto no estado fresco (RICCI, BALBO, 2009). Esse ensaio se justifica pela possibilidade dos resíduos mistos alterar a consistência do concreto, reduzindo sua trabalhabilidade.

Entre outras características no estado fresco, o concreto permeável com agregados reciclados apresenta *slump* variando de zero à 20 mm. No caso daqueles que não utilizam agregado miúdo, em geral, são considerados “desmoronados”, ou seja, o concreto não é necessariamente plástico e coeso para ser avaliado por esse ensaio (MONTEIRO, 2010).

Para verificar a consistência das amostras no estado fresco, primeiramente, o molde metálico em formato tronco-cônico (altura de 30 cm, diâmetro superior de 10 cm, diâmetro inferior de 20 cm), juntamente com a gola, foram umedecidos com água e colocados sobre a placa metálica de base 50 x 50 x 0,3 cm. Na sequência, os pés foram apoiados sobre as abas inferiores do molde. O cone foi preenchido com o concreto em três camadas intercaladas que sofreram, cada uma, 25 golpes com uma haste metálica. Após, o excesso de material da superfície do molde foi retirado e então o cone foi levantado cuidadosamente, e posicionado de forma invertida ao lado da amostra de concreto. Com o auxílio de uma régua metálica graduada, foi efetuada a leitura da diferença entre a altura do molde e a do eixo do corpo de prova desmoldado, conforme mostra a Figura 42. O ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos

da norma NBR 16889 (ABNT, 2020). Na sequência, os concretos foram submetidos à moldagem dos corpos de prova.

Figura 42 – Ensaio de *Slump Test*



Leitura da diferença entre a altura do molde e a da haste com o concreto desmoldado

Fonte: Própria (2021).

3.8.2 Moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos

Para a moldagem dos CP cilíndricos foram utilizados moldes fabricados em aço inoxidável, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura ($V = 0,001571 \text{ m}^3$). Para a moldagem dos CP prismáticos foram utilizados 2 moldes em aço inoxidável, de 4x4x16 cm ($V = 0,000256 \text{ m}^3$) e de 6x14x16 cm ($V = 0,00134 \text{ m}^3$). Os dados quantitativos dos ensaios de caracterização executados são mostrados no Quadro 10.

Quadro 9 – Dados quantitativos das amostras dos ensaios de caracterização

Ensaio	Tipo de CP	Dimensão (cm)	Quantidade de CP
Compressão Axial	Cilíndrico	10 x 20	24
Compressão por Tração Diametral	Cilíndrico	10 x 20	12
Tração na Flexão	Prismático	4 x 4 x 16	18
Permeabilidade	Prismático	6 x 14 x 16	12
Porosidade	Cilíndrico	10 x 20	12

Fonte: Própria (2021).

Na preparação dos corpos de prova cilíndricos, o concreto sofreu adensamento em duas camadas com 12 golpes com haste de socamento manual padronizada (barra de aço de 600 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro) por camada. Os corpos de prova prismáticos sofreram adensamento na mesa de consistência marca Solotest, modelo MC-119, com curso excêntrico, acionamento elétrico com contador de golpes, para uma melhor compactação e preenchimento das

arestas dos moldes, conforme Figura 43. Não foi realizada vibração em nenhum dos corpos de prova de concreto permeável confeccionados, pois poderia ocasionar o adensamento da pasta de cimento, o que ocasionaria o preenchimento indesejável dos vazios, interferindo na capacidade drenante das amostras de concreto.

Na Figura 44 estão apresentados exemplos de corpos de prova moldados nos formatos cilíndrico (10x20 cm), prismático (4x16 cm) e prismático (14x16 cm)

Figura 43 – Mesa de consistência para compactação do concreto nos moldes prismáticos.



Fonte: Própria (2021).

Figura 44 – Corpos de prova moldados para os ensaios: (a) cilíndrico (10x20 cm), (b) prismático (4x16 cm) e (c) prismático (14x16 cm)



Fonte: Própria (2021).

Os corpos de prova (cilíndricos e prismáticos) foram desmoldados 24 h após a moldagem e submetidos ao processo de cura. Para a cura dos corpos de prova, foram seguidos os procedimentos de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). A cura foi realizada por submersão em água, em um reservatório com água potável à temperatura ambiente, cobrindo toda a superfície do corpo de prova, até o dia do ensaio especificado. Este procedimento tem como finalidade evitar a evaporação da água, mantendo o concreto saturado, porém estudos comprovam que a cura úmida dos concretos leva a um aumento de 10% nos resultados de resistência comparados aos concretos curados ao ar (VIDAL, 2014). O processo de cura dos corpos de prova

(cilíndricos e prismáticos) está demonstrado na Figura 45. Após, os corpos de prova foram caracterizados para determinação das propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto convencional e permeável (Figura 46).

Figura 45 – Cura por imersão na água dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos.



Fonte: Própria (2020).

Figura 46 – Corpos de prova após cura: (a) 20% de RCD, (b) 40% de RCD, (c) 60% de RCD, (d) 80% de RCD, (e) 100% de RCD e (f) 0% de RCD (concreto padrão).



Fonte: Própria (2021)

3.8.3 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial é uma das propriedades mecânicas mais avaliadas e que tem importância na caracterização do concreto no estado endurecido. A aplicação deste ensaio tem por finalidade determinar essa a resistência mecânica do concreto permeável estudado de maneira análoga à técnica empregada no controle tecnológico do concreto tradicional (LEITE, 2001).

Os corpos de prova, após serem mantidos em cura úmida até o dia do rompimento, foram submetidos ao ensaio de resistência a compressão axial simples, seguindo os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2018).

Os ensaios foram realizados com carregamento contínuo e sem choques na prensa EMIC, modelo PC2000 SSH-300, com célula de compressão Trd30 de 2000 kN, a qual pode ser conferida na Figura 47. É importante salientar que antes do ensaio as faces da máquina foram limpas, e os corpos ensaiados ao menor tempo possível depois de retirados das condições de cura.

Figura 47 – Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão



Fonte: Própria (2020).

Devido à alta porosidade do concreto permeável e a ausência de finos (areia), os corpos de prova apresentaram uma superfície bastante irregular nas duas faces, sendo necessário executar a retificação para o ensaio de compressão axial. A retificação foi realizada na retificadora automática, marca ViaTest, modelo VC-964 (Figura 48) com fixação pneumática, para CP com dimensões de 10x20cm, disco diamantado 135mm. Na Figura 49 são mostrados exemplos de corpos de prova retificados.

Por se tratar de um ensaio destrutivo, levando-se em consideração uma possível ruptura brusca e para evitar sujeira no local, os corpos de prova foram envoltos com plástico filme, conforme mostrado na Figura 50.

Figura 48 – Equipamento utilizado na retificação de corpos de prova cilíndricos



Fonte: Própria (2021).

Figura 49 – Corpo de prova retificados



Fonte: Própria (2021).

Figura 50 – Corpo de prova posicionado para o ensaio de compressão envolto com plástico filme



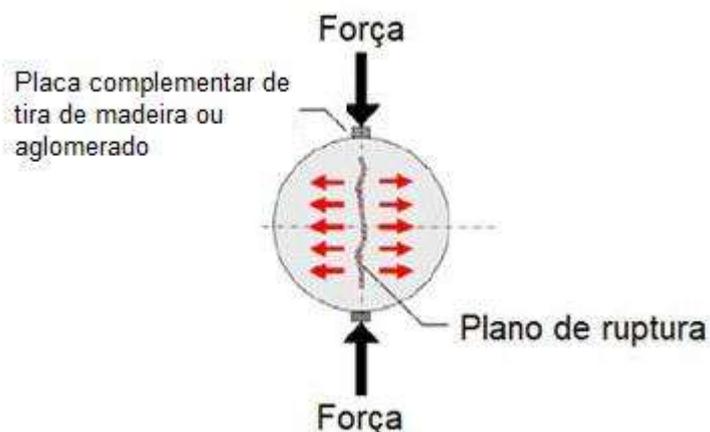
Fonte: Própria (2021).

3.8.4 Resistência à tração indireta: Tração por Compressão Diametral e Tração na Flexão

A resistência à tração dos concretos geralmente se apresenta como uma característica mecânica secundária, visto que o concreto não se apresenta como bom material para resistir aos esforços de tração das estruturas. Mas quando se trata do estudo de um novo material, essa propriedade mecânica não pode ser desprezada (GONÇALVES, 2011).

A resistência à tração por métodos indiretos é dada pelos ensaios de tração por compressão diametral e tração na flexão. No ensaio de tração por compressão diametral os corpos de provas de concreto cilíndricos são submetidos a cargas de compressão ao longo de duas linhas axiais que são diametralmente opostas (Figura 51).

Figura 51 – Representação da resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Vidal (2014).

Sua execução é semelhante ao processo de ensaio da compressão axial, onde uma carga crescente é aplicada ao corpo de prova até que este atinja sua tensão de tração última. O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi executado de acordo com os procedimentos da NBR 7222 (ABNT, 2011) e realizado em corpos de prova de 10x20 cm, os quais foram retirados da cura úmida aos 28 dias diretamente para o ensaio.

Os ensaios foram realizados no mesmo laboratório e com os mesmos equipamentos descritos anteriormente no ensaio de Compressão Axial. A prensa do equipamento aplica duas forças de compressão concentradas de mesma intensidade e sentidos opostos no corpo-de-prova, gerando tensões de tração uniformes no sentido perpendicular ao diâmetro solicitado. A NBR 7222 (ABNT, 2011) ainda sugere que quando o diâmetro, ou a maior dimensão dos pratos da máquina de ensaios, for menor que o comprimento do cilindro a ser ensaiado, deve ser utilizada uma viga ou placa complementar de aço usinado, de forma a distribuir uniformemente, sobre todo o corpo de prova, as cargas aplicadas (Figura 52).

Figura 52 – Corpo de prova cilíndrico posicionado para a realização do ensaio



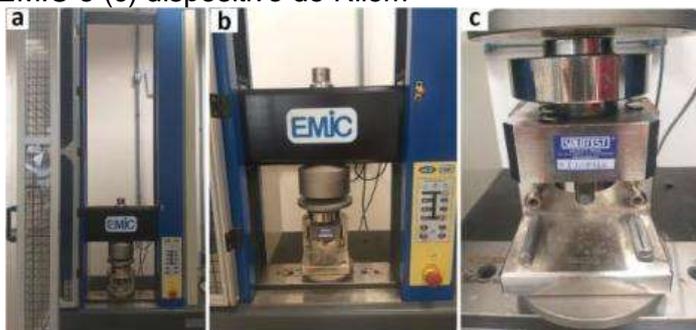
Fonte: Própria (2021).

A resistência a tração na flexão é fundamental no dimensionamento de pavimentos, embora não seja requerida nos projetos (MONTEIRO, 2010). Para o ensaio de determinação da resistência à tração na flexão das amostras de concreto permeável foi utilizada a NBR 12142 (ABNT, 2010), cujo procedimento consiste na aplicação de cargas progressivas, flexionando os corpos de prova, onde parte dela é comprimida e parte é tracionada. O método de ensaio descrito nesta norma envolve o “princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão”.

De acordo com a norma, o corpo de prova prismático ensaiado deve ter medidas de 10x10x40 cm. Mas a própria norma afirma que existe a possibilidade de redução das medidas do corpo de prova prismáticos para o ensaio de tração na flexão, devido ao peso da amostra e suas grandes dimensões, que acarretam dificuldades no manuseio.

Os ensaios foram realizados com carregamento contínuo e sem choques na máquina universal EMIC, modelo DL10000, com célula de compressão e tração Trd 28 de 100 kN. Para a realização deste ensaio foi utilizado o dispositivo de Rilem, marca Solotest, em aço zincado, com rolete de adaptação móvel e acabamento anti-corrosivo, os quais podem ser conferidos na Figura 53. Este dispositivo trabalha com corpos de prova prismáticos de 4x4x16 cm (Figura 54), com as dimensões proporcionais às recomendações da norma. Portanto, todas as linhas de referência sugeridas na norma, também tiveram seus valores adaptados de forma proporcional. Na Figura 55 pode ser visualizado um corpo de prova posicionado para o ensaio, conforme as linhas de referência recomendadas pela norma e o Quadro 11 com estão descritas as dimensões da norma e as dimensões adaptadas.

Figura 53 – Equipamento utilizado no ensaio de resistência à tração na flexão: (a) e (b) máquina universal EMIC e (c) dispositivo de Rilem



Fonte: Própria (2021).

Figura 54 – Corpo de prova prismático 4x4x16 cm



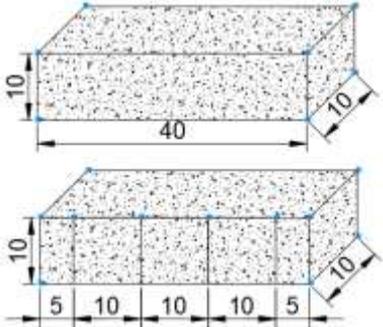
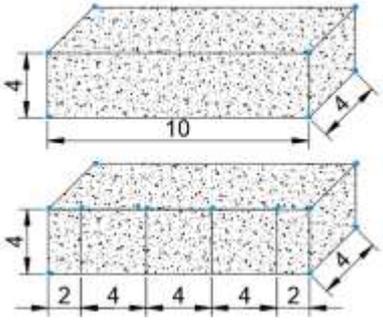
Fonte: Própria (2021).

Figura 55 – Corpo de prova prismático posicionado para a realização do ensaio



Fonte: Própria (2021).

Quadro 10 – Dimensões da norma e dimensões adaptadas do corpo de prova para o ensaio de tração na flexão

Dimensões e linhas de referência do corpo de prova segundo a NBR 12142/210 para o ensaio de tração na flexão (em cm)	Dimensões e linhas de referência adaptadas para o ensaio de tração na flexão feito na prensa universal Rilen (em cm)
	
1ª linha de referência: 5 cm da borda esquerda (local do 1º apoio)	1ª linha de referência: 2 cm da borda esquerda (local do 1º apoio)
3 linhas com distância de 10 cm entre elas (terços do vão)	3 linhas com distância de 4 cm entre elas (terços do vão)
2ª linha de referência: 5 cm da borda direita (local do 2º apoio)	2ª linha de referência: 2 cm da borda direita (local do 2º apoio)

Fonte: Própria (2020).

3.8.5 Permeabilidade dos corpos de prova de concreto permeável

A permeabilidade é definida como o índice de infiltração da água através da estrutura do material. A condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade, representa um dos parâmetros de maior relevância do concreto permeável (BATEZINI, 2013). A permeabilidade tem relação direta com a área superficial vazia e com o tamanho dos poros.

Antes dos ensaios de permeabilidade, os corpos de prova prismáticos de concreto permeável foram colocados em estufa, marca Med Clave, modelo 5 (56x48x68 cm), a 70°C por 24 horas para a completa fusão da parafina.

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade foi utilizado o método do “coeficiente de permeabilidade pelo anel de infiltração”, conforme procedimentos descritos na NBR 16416 (ABNT, 2015). O cilindro utilizado foi de PVC, material impermeável (Ø75 mm para as peças de 14x16 cm e Ø100 mm para a placa de 50x50 cm), ambos com 7 cm de altura, com uma marcação limite interna de 50 mm capaz

de medir o nível de água durante o ensaio, fixados com massa de calafetar para garantir a estanqueidade do procedimento, conforme Figura 56.

Foi feita a pré molhagem dos corpos de prova e após o lançamento do volume de água, foi cronometrado o tempo que leva a percolação da água do volume lançado (400 ml), com a água na marcação de 50 mm do tubo, conforme pode ser visualizado na Figura 57. Com a área do cilindro, o volume de água utilizado e o tempo de percolação, calculou-se o coeficiente de percolação k pela Equação 6 (PARRIÃO, 2017).

$$k = \frac{V}{(Ac.t)} \quad 6)$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade (m/s);

Ac = área da seção do cilindro (m²);

t = tempo decorrido de escoamento entre a peça de concreto (s);

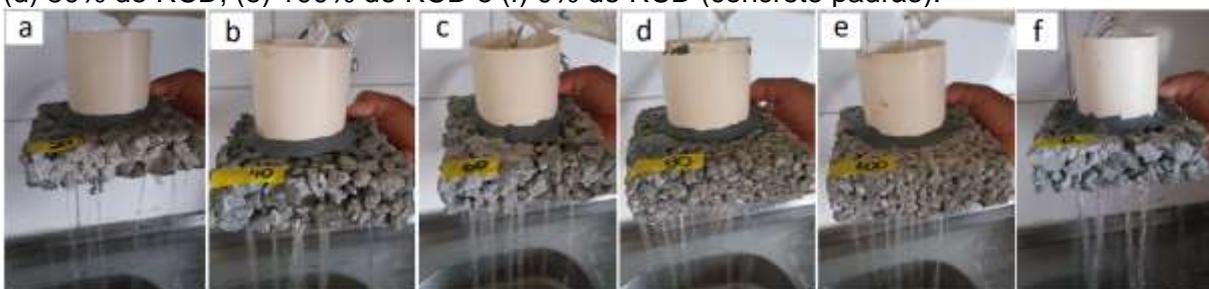
V = volume de água utilizada (m³).

Figura 56 – Corpos de prova prontos para determinação do coeficiente de permeabilidade



Fonte: Própria (2021).

Figura 57 – Ensaio de permeabilidade (a) 20% de RCD, (b) 40% de RCD, (c) 60% de RCD, (d) 80% de RCD, (e) 100% de RCD e (f) 0% de RCD (concreto padrão).



Fonte: Própria (2021).

3.8.6 Porosidade dos corpos de prova

A porosidade, ou índice de vazios, é um parâmetro importante na avaliação da qualidade do concreto permeável endurecido, pois influencia diretamente as características de resistência mecânica do material.

A porosidade das amostras foi determinada pela pesagem da massa seca e da massa submersa de cada corpo de prova conforme NBR 9778 (ABNT, 2009), conforme Figura 58. A pesagem foi feita na balança analítica de bancada marca Bel, classe II, com capacidade de 30 kg e precisão de 1 g. O material ensaiado ficou na estufa por 72 h à 105 °C, e teve sua massa registrada. Na sequência, foi submerso na água, onde permaneceu por mais 72 h. Foi retirado e teve sua massa também registrada. Com essas informações, calculou-se a porosidade das amostras.

O cálculo do índice de vazios, baseado em Batezini (2013), foi realizado a partir da Equação 7 que correlaciona os valores de massa de cada amostra ao seu respectivo volume.

$$P = 1 - \left[\frac{(M_{sec} - M_{sub}) / \gamma_{\text{água}}}{V} \right] \times 100\% \quad 7)$$

Onde:

P = porosidade da amostra de concreto (%);

M_{sec} = peso da amostra concreto seco por 72 h (Kg);

M_{sub} = do concreto submerso por 72 h (Kg);

γ_{água} = peso específico da água (kg/m³);

V = volume da amostra de concreto permeável (m³).

Figura 58 – Sequencia ensaio de porosidade: (a) material na estufa, (b) pesagem pós estufa, (c) material submerso em água e (d) pesagem pós submersão



Fonte: Própria (2020).

3.9 RESUMO: METODOLOGIA DE PRODUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

Na Tabela 6 está apresentado um resumo do processo de produção do concreto permeável e dos ensaios executados.

Tabela 6 – Resumo do processo de produção do concreto permeável

1) Dosagem do concreto permeável com resíduo de concreto:

- Traço adotado: 1:3
- Fator água/cimento: ~0,50
- Dosagem de parafina (agente de porosidade): 15% da proporção do agregado reciclado

2) Preparação do agregado reciclado:

- Coleta dos agregados: usina de reciclagem
- Secagem das amostras: estufa à 105°C por 72 hs
- Separação granulométrica (faixa granulométrica utilizada): entre 9,5 mm à 4,76 mm
- Caracterização do resíduo de concreto obtido: índice de forma, abrasão de “*Los Angeles*” e massa unitária aparente (estado solto)

3) Agente de porosidade:

- Parafina: em lentilhas, granulada, proveniente de empresa especializada, vaporizada à 70°C

4) Mistura dos materiais:

- Pré-molhagem dos agregados
- Adição de todo agregado graúdo
- Mistura do agregado graúdo com 40% da quantidade de água
- Aguardar 10 minutos
- Adição de todo cimento e parafina
- Adição do restante de água
- Mistura tudo por aproximadamente 3 minutos
- Conferência tátil-visual da mistura

5) Moldagem dos artefatos:

- Acomodação do concreto nas formas (em camadas regulares) e adensamento

6) Desforma dos artefatos:

- Mínimo 24 hs após a moldagem

7) Cura dos artefatos:

- Em água por 7 e 28 dias, dependendo do ensaio mecânico

8) Realização de ensaios normativos e complementares:

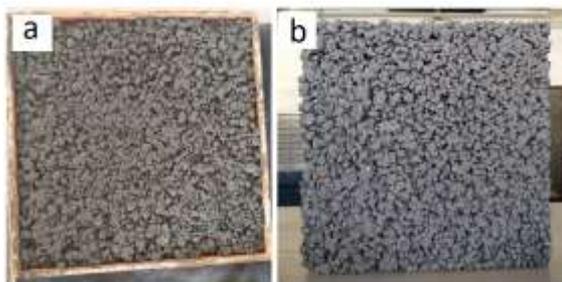
- Resistência característica à compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão e coeficiente de permeabilidade
 - Determinação da porosidade (índice de vazios)
-

Fonte: Própria (2020).

3.10 CONFECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA PLACA DO PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL

Com base nos resultados encontrados, foi produzida uma placa de concreto permeável com substituição de 40% de RCD com dimensões de 50x50 cm e espessura de 6 cm, moldada em uma forma de madeira de MDF. A desforma aconteceu depois de 3 dias. Nesta placa, foi realizado o teste de permeabilidade para comprovação dos valores obtidos para os corpos de prova prismáticos de 14x16 cm do mesmo traço e dosagem. Este teste foi realizado seguindo os mesmos procedimentos empregados para os corpos de prova prismáticos. Na Figura 59 estão apresentadas as fotos da moldagem e desforma da placa de concreto permeável com substituição de 40% de RCD.

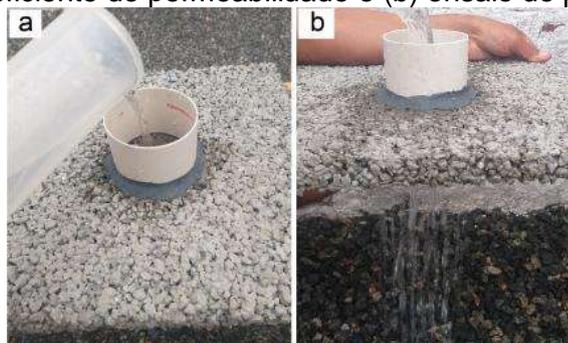
Figura 59 – Placa de concreto permeável com 40% de RCD: (a) placa na fôrma de madeira e (b) placa desformada



Fonte: Própria (2021).

A Figura 60 apresenta as fotos do ensaio de permeabilidade efetuados na placa de concreto permeável com substituição de 40% de RCD.

Figura 60 – Ensaio de permeabilidade da placa de concreto permeável com 40% de RCD: (a) determinação do coeficiente de permeabilidade e (b) ensaio de permeabilidade



Fonte: Própria (2021).

3.11 VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE RCD: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA CPQVA

Para a análise da viabilidade ambiental e econômica dos agregados reciclados, foi realizada uma avaliação da proposta de reutilização deste material seguindo os critérios da metodologia CPQvA (RAUPP-PEREIRA, 2006), que tem o intuito de demonstrar possíveis aplicações a partir da valorização destes resíduos. Essa análise foi realizada por meio dos critérios Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicabilidade, que reúne os seguintes aspectos para valorização do resíduo: classificação legislativa quanto à periculosidade (critério “C”); identificação da potencialidade (critério “P”), avaliação da quantidade/disponibilidade e homogeneidade da fonte geradora (critério “Qv”), e, por fim, a aplicação (critério “A”).

A análise econômica foi feita apenas sobre valores de obtenção dos agregados, não levando em conta os custos externos, como, por exemplo, custos com transporte. Os valores dos agregados foram utilizados em função da unidade de comercialização dos produtos, que, em geral, é vendida por metro cúbico (m³) de produto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados na produção do pavimento de concreto permeável com agregados reciclados proveniente de resíduo de construção e demolição e a avaliação da viabilidade técnica da aplicação destes resíduos para a obtenção de pavimento permeável.

4.1 CIMENTO

4.1.1 Módulo de Finura

O módulo de finura (MF) encontrado para o cimento utilizado em todos os experimentos (CP-II-Z-40) foi de 3,0%, valor de acordo com os limites da norma que especifica que este tipo de cimento deve ter MF inferior a 10%.

4.2 AGREGADOS

4.2.1 Curva e distribuição granulométrica dos agregados reciclados.

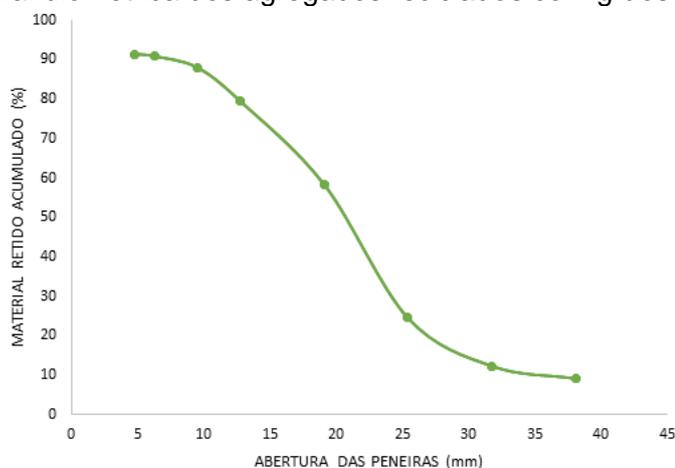
Os agregados reciclados têm características variáveis e, em consequência disso os concretos produzidos tendem a apresentar variabilidade das propriedades que dependem do agregado. Desta forma, os agregados devem ser cuidadosamente selecionados em função de sua composição granulométrica. Na Tabela 7 estão apresentados os resultados da análise granulométrica dos agregados reciclados como recebidos. O módulo de finura é muito importante para avaliar as dimensões dos grãos e se obter controle de materiais da mesma procedência, como, por exemplo, separar os agregados em lotes com o mesmo módulo de finura. O valor encontrado para o MF foi de 3,41, com um diâmetro máximo característico de 38 mm. Quanto maior o módulo de finura, mais graúdo é o agregado.

Tabela 7 – Análise granulométrica dos agregados reciclados com grãos na forma original.

# peneira (mm)	% retido acumulado
37,50	9,11
31,75	12,30
25,40	24,53
19,10	58,30
12,70	79,63
9,50	88,05
6,30	90,90
4,75	92,10
2,36	93,45
Fundo	100,00
Diâmetro máximo característico = 38 mm	
Módulo de Finura = 3,41	

Fonte: Própria (2020).

A curva granulométrica dos agregados reciclados é mostrada na Figura 61. Verifica-se que a mesma apresenta o formato de um “S” suave e alongado na horizontal, com curvatura típica de materiais bem graduados, conforme mostrado na Figura 62. As dimensões das partículas abrangem uma extensa faixa de valores e apresenta todas as frações em sua curva de distribuição granulométrica sem grandes mudanças de curvatura.

Figura 61 – Curva granulométrica dos agregados reciclados com grãos como recebidos.

Fonte: Própria (2020).

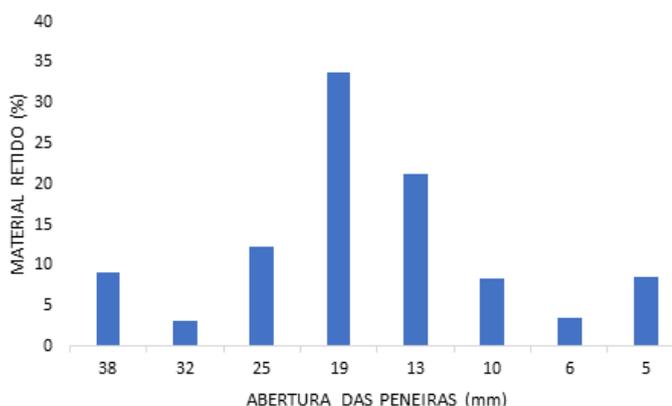
Figura 62 – Representação de agregados bem graduados



Fonte: Romanini (2017).

Na Figura 63 está apresentada a distribuição granulométrica dos agregados reciclados como recebidos. Verifica-se, que a faixa granulométrica descartada (12,7 mm a 38 mm) apresentou percentual de material retido superior ao da faixa granulométrica utilizada neste trabalho (9,5 mm a 4,76 mm), demonstrando que o material com granulometria aproveitada neste estudo foi menor que a quantidade não aproveitada. A quantidade de resíduos aproveitados nos experimentos foi de aproximadamente 23% da quantidade total de resíduos coletada. Os 77% de resíduos que não foram aproveitados neste trabalho podem ter outras aplicações. Segundo De Paula (2010), os agregados miúdos reciclados podem ser aplicados na produção de blocos de sem função estrutural para uso em alvenaria de vedação. De acordo com Oliveira (2015) também podem ser utilizados como argamassa para revestimento de alvenaria. Enquanto que as maiores frações podem ser utilizadas como reforço para bases e sub-bases de pavimentos rodoviários (TAVARES, 2018).

Figura 63 – Distribuição granulométrica dos agregados reciclados com grãos como recebidos



Fonte: Própria (2020).

4.2.2 Características e propriedades dos agregados reciclados e agregados convencionais

Na Tabela 8 estão demonstrados os resultados dos ensaios de caracterização dos grãos dos agregados estudados (reciclado e convencional). Observa-se que possuem valores e características parecidas, demonstrando a similaridade entre as propriedades e tamanho dos grãos, confirmando que ambos se encontram dentro dos patamares aceitáveis para suas aplicações em concretos.

Tabela 8 – Tabela comparativa com os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados reciclados e os convencionais

Propriedade	Agregado reciclado	Agregado convencional
Diâmetro máximo (mm)	19,10	19,10
Módulo de finura	2,33	2,49
Característica dos grãos	Graduação contínua e uniforme	Graduação contínua e uniforme
Índice de forma	2,35	2,68
Forma geométrica	Lamelar	Lamelar
Abrasão de <i>Los Angeles</i> (%)	43,83	15,21
Massa unitária aparente (kg/dm ³)	1,12	1,59

Fonte: Própria (2020).

Como já citado, realizou-se a correção e adequação da granulometria do agregado graúdo reciclado através de peneiramento a fim de obter uma distribuição equivalente à composição granulométrica do agregado natural utilizado nas misturas.

Assim como todo agregado convencional, os agregados reciclados necessitam também serem avaliados antes da utilização em concretos principalmente em termos da distribuição granulométrica. Os agregados graúdos de RCD com as frações utilizadas neste estudo, possuem, de maneira geral, dimensões e geometrias comuns às britas (agregados graúdos convencionais), conforme pode ser observado na Figura 64.

Figura 64 – Agregados utilizados: (a) agregados reciclados e (b) agregados convencionais.



Fonte: Própria (2020).

Os valores encontrados para os MF demonstram que os grãos dos agregados reciclados têm tamanhos um pouco maiores do que os encontrados nos agregados convencionais, mas apresentaram o mesmo valor para diâmetro máximo característico. Estes resultados indicam que os materiais ensaiados apresentam grãos com dimensões bastante similares, mas não indicam, necessariamente, que os agregados são iguais, pois o formato e a textura dos grãos também são características que devem ser levadas em consideração (SANTOS, 2016).

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados da análise granulométrica do material reciclado e convencional.

Tabela 9 – Análise granulométrica do agregado reciclado utilizado e agregado convencional.

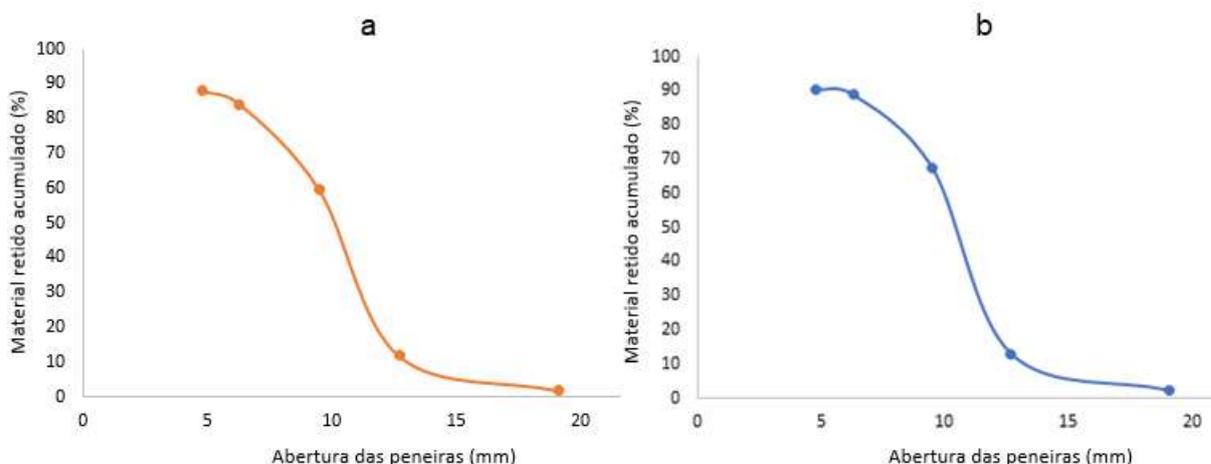
# peneira (mm)	% retido acumulado	
	Agregado reciclado	Agregado convencional
19,10	1,73	2,31
12,70	11,76	12,97
9,50	59,53	67,45
6,30	84,16	88,96
4,76	88,00	90,47
Fundo	100,00	100,00

Fonte: Própria (2020).

Na Figura 65 estão apresentadas as curvas granulométricas dos agregados reciclados e convencionais. Observa-se que ambas as curvas granulométricas apresentam maior declividade, com o formato de um “S” alongado na vertical, que demonstra que os agregados reciclados e convencionais apresentam uma granulometria contínua e uniforme, conforme mostrado na Figura 66. Um agregado com granulometria contínua faz com que a mistura seja mais homogênea, resultando

em um concreto mais trabalhável. Estas curvas granulométricas confirmam a similaridade entre os formatos e dimensões dos grãos dos agregados reciclados e convencionais.

Figura 65 – Curva granulométrica dos agregados: (a) agregados reciclados e (b) agregados convencionais.



Fonte: Própria (2020).

Figura 66 – Representação de agregados de graduação contínua e uniforme



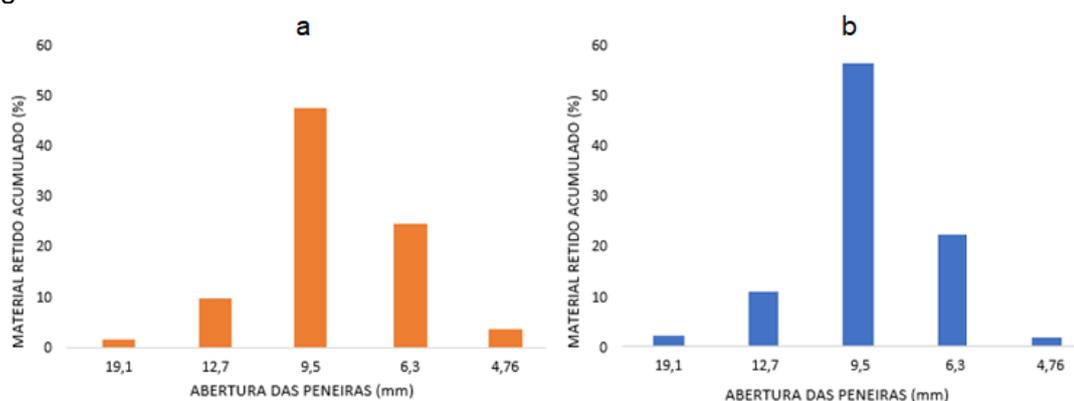
Fonte: Romanini (2017).

Agregados caracterizados e classificados com granulometria contínua indicam que os agregados estão graduados, de maneira bem distribuída, dentro de uma determinada faixa de tamanhos, o que permite maior possibilidade de interação física entre as partículas, evitando a segregação dos grãos, proporcionando como resultado no estado endurecido maior resistência à compressão e outras propriedades mecânicas (SANTOS, 2016).

Na Figura 67 está apresentada a distribuição granulométrica dos agregados reciclados e convencionais. Observa-se que a maior quantidade foi retida na peneira de 9,50 mm em ambos os casos, constatando que as pedras utilizadas como agregado reciclado e convencional neste estudo é a brita 1, tanto pela nomenclatura de acordo com NBR 7211 (ABNT, 2019) como pela nomenclatura comercial, de acordo com o Quadro 12.

Observa-se também que a fração granulométrica com dimensão de 9,5mm representa mais de 50% da massa da amostra do agregado reciclado e do convencional. O agregado reciclado apresenta uma maior fração granulométrica com dimensão de 9,5 mm, indicando que, por se tratar de um agregado misto, existe uma tendência a ter argamassa aderida, trazendo o aumento o tamanho das partículas dos agregados nesta fração.

Figura 67 – Distribuição granulométrica dos agregados: (a) agregados reciclados e (b) agregados convencionais.



Fonte: Própria (2020).

Quadro 11 – Tamanho dos agregados convencionais comerciais.

Pedra britada numerada	(NBR-7225)		Comercial	
	Tamanho nominal			
	Malha da peneira (mm)			
Número	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
brita 0			4,8	9,5
brita 1	4,8	12,5	9,5	19,0
brita 2	12,5	25,0	19,0	38,0
brita 3	25,0	50,0	38,0	50,0
brita 4	50,0	76,0	50,0	76,0
brita 5	76,0	100,0		

Fonte: Santos (2017)

A forma do agregado graúdo é uma das propriedades referenciadas por vários pesquisadores. Os resultados encontrados para esta propriedade corroboram com os valores encontrados em outras pesquisas. Estudos realizados por Leite (2001) e Almeida (2014) encontraram valores médios de 2,6 para o índice de forma dos agregados convencionais e 2,4 para os agregados reciclados de RCD. Já nos estudos de Boaretto (2017), a determinação deste índice resultou em valores médios de 2,5 e 2,45 para os agregados convencionais e reciclados, respectivamente. Observa-se que

em todos os estudos, o índice de forma do agregado reciclado foi ligeiramente inferior ao do agregado convencional, porém, em todos os casos, os agregados são classificados como lamelares ($C/e > 2,4$). Estes tipos de partículas exigem um esforço maior no processo de mistura do concreto, e não devem ser utilizadas em traços com baixo consumo de cimento, como por exemplo, traços 1:4 e 1:5.

Os agregados reciclados e convencionais utilizados nesta pesquisa estão de acordo com a NBR 7211 (ABNT 2019), visto que a mesma especifica que os agregados para concreto tenham, em média, valores de índice de forma inferiores a 3, quando calculados pela NBR 7809 (ABNT 2008). Desta forma, conclui-se que os valores obtidos são compatíveis com os encontrados na literatura, apresentando mesma ordem de grandeza e formatos, podendo ser comparados entre si.

O ensaio de abrasão de Los Angeles foi adotado como parâmetro na quantificação da desagregação dos agregados utilizados. Embora não existam referências normativas que estabeleçam o limite máximo de perda por abrasão para agregados reciclados, o conhecimento desta propriedade torna-se importante pois interfere nas propriedades mecânicas do concreto.

Neste estudo, o agregado convencional (brita de origem granítica) sofreu um menor desgaste de perda por abrasão. Esses resultados estão analisados em conjunto com resultados de resistência à compressão axial.

Os resultados encontrados mostram que os agregados utilizados neste estudo (reciclado e convencional) estão aprovados quanto ao desgaste por abrasão *Los Angeles*, cujo limite máximo do índice de desgaste estabelecido pela NBR 7211 para agregados convencionais (ABNT, 2009) é de 50%.

A Tabela 10 mostra as massas iniciais e as massas finais da pesagem dos agregados.

Tabela 10 – Massa inicial e massa final do ensaio de abrasão de *Los Angeles*

Agregado	Massa inicial (kg)	Massa final (kg)
Reciclado	5,0000	2,8085
Convencional	5,0000	4,2395

Fonte: Própria (2021).

Mesmo para materiais reciclados com composição muito parecida, os resultados de massa unitária aparente (estado solto) encontrados na bibliografia são

muito variáveis. Isto pode ser explicado, principalmente, em função da própria composição do material e do tipo de beneficiamento realizado (VIDAL, 2014).

Em trabalho desenvolvido por Topçu e Güncan (1995) *apud* Vidal (2014), que utilizou como agregado graúdo reciclado de composição mista, o mesmo tipo de material utilizado neste estudo, os valores encontrados para a massa unitária aparente dos agregados reciclados utilizados na confecção do concreto reciclado possuíam massa unitária de $1,16 \text{ kg/dm}^3$. Nos estudos de Latterza (1998) *apud* Vidal (2014), a massa unitária aparente dos agregados reciclados de construção e demolição utilizado no concreto reciclado produzido para aplicações estruturais no estado solto foi de $1,19 \text{ kg/dm}^3$ e dos agregados convencionais de $1,59 \pm 0,06 \text{ kg/dm}^3$.

Os agregados reciclados apresentaram resultado para massa unitária aparente 42% menor quando comparado com o valor encontrado para os agregados convencionais. Isso ocorre, principalmente, pela presença de partículas de materiais cerâmicos e pela quantidade de argamassa aderida na superfície dos agregados reciclados mistos. A forma irregular das partículas do agregado reciclado também contribuem para a redução deste valor (CABRAL, 2007). Esses resultados seguem o comportamento apontado pela literatura. Na composição do concreto, este valor tem influência direta na absorção de água. Segundo Vieira e Dal Molin (2011), mesmo com o processo de pré-molhagem, no qual a água absorvida primeiramente pelos agregados reciclados, posteriormente torna-se disponível dentro da mistura, podendo hidratar as partículas de cimento não-hidratadas, além de ajudar no processo de cura do concreto, a relação água/cimento para concretos que utilizam agregados reciclados mistos tendem a ser maiores do que os concretos fabricados com agregados convencionais, pois misturas com agregados reciclados absorvem grande parte da água do traço, dificultando a trabalhabilidade do concreto.

O valor encontrado para a massa unitária aparente (estado solto) foi muito próximo aos utilizados por alguns autores. Em trabalho desenvolvido por Silva Júnior e Martinelli (2014), a massa unitária aparente no estado solto do agregado graúdo convencional proveniente de granito (brita granítica) foi de $1,51 \text{ kg/dm}^3$ e a obtida por Mehta e Monteiro (1994) *apud* Leite (2001) para os agregados naturais no estado solto varia entre $1,30$ a $1,75 \text{ kg/dm}^3$.

Vale destacar que a curva e a distribuição granulométrica, juntamente com a massa unitária aparente, índice de forma e abrasão de *Los Angeles*, são características específicas de cada tipo particular de agregado, seja ele reciclado ou

convencional. Por isso o ensaio de peneiramento e essas outras propriedades verificadas são importantes, pois com a obtenção destes valores é possível obter agregados com características granulométricas equivalentes e próximas para a confecção de concretos de boa qualidade.

4.3 CONCRETO PERMEÁVEL

Os efeitos dos agregados reciclados foram avaliados sobre as propriedades mecânicas do concreto permeável no estado endurecido (resistência à compressão axial, porosidade e permeabilidade). Para os corpos de prova cilíndricos das diferentes misturas de concreto permeável foram determinados os pesos específicos, a resistência à compressão axial e as porosidades e para os corpos de prova prismáticos a permeabilidade.

A partir dos resultados obtidos, foi produzida a placa de concreto permeável com agregados reciclados na composição que apresentou melhores propriedades, que pode ser aplicada como pavimentação final.

4.3.1 Agente espaçador (parafina sólida)

A utilização de esferas de parafina teve o intuito de conferir maior porosidade e, portanto, maior permeabilidade. A Figura 68 mostra a estrutura interna de um corpo de prova rompido (antes do processo de remoção da parafina por aquecimento) exclusivamente para mostrar a presença e a distribuição da parafina no concreto endurecido.

Figura 68 – Presença da parafina na estrutura interna de corpo de prova rompido



Fonte: Própria (2020).

4.3.2 Peso específico

Os valores referentes ao peso específico no estado endurecido obtidos através de ensaios realizados no corpo de prova cilíndrico dos concretos permeáveis constam na Tabela 11.

Tabela 11 – Peso específico dos corpos de prova de concreto permeável (corpo de prova cilíndrico – V = 0,001571 m³)

Propriedade	Padrão (agregados convencionais)	20% RCD	40% RCD	60% RCD	80% RCD	100% RCD
Peso (kg)	3,125	2,977	2,773	2,694	2,545	2,381
Peso específico (kg/m ³)	1.989,18 ± 12,61	1.894,97 ± 6,23	1.765,12 ± 9,03	1.714,83 ± 12,03	1.619,99 ± 14,96	1.515,60 ± 15,23

Fonte: Própria (2021).

O peso específico do concreto é diretamente influenciado pelas propriedades e proporções relativas aos materiais que o constituem. Observa-se uma redução sistemática do peso específico dos concretos ensaiados conforme aumenta a proporção de substituição do agregado convencional pelo reciclado. Isso ocorre em função do agregado reciclado ter menor massa unitária em relação ao agregado convencional (GÜNEYISI *et al.*, 2014). Os concretos permeáveis com substituição de agregados reciclados variaram de 1.755,16 a 1.463,90 kg/m³, correspondendo de 77% a 93% do peso específico do concreto permeável convencional obtido neste estudo.

Geralmente, são encontrados valores de peso específico do concreto permeável na ordem de 1.300 kg/m³ a 2.000 kg/m³ (DE PAULA, 2019). De acordo com a NBR 8953 (ABNT 2015), são considerados concretos leves aqueles que tem peso específico seco inferior a 2.000 kg/m³. Pavimentos permeáveis de concreto leve apresentam maior presença de poros, ocasionando uma grande fração de vazios, além de ter um menor consumo de cimento, tornando o seu custo mais baixo. Todos os concretos permeáveis executados e ensaiados se encaixam como concretos leves.

4.3.3 Ensaio de *Slump Test*

Foi realizado o ensaio de abatimento para cada traço para observar a consistência de cada tipo dosagem nas amostras de concreto. Os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de *slump test* para cada tipo de dosagem

Dosagem	Slump obtido (mm)
Concreto padrão	15
20% substituição de RCD	0
40% substituição de RCD	0
60% substituição de RCD	5
80% substituição de RCD	5
100% substituição de RCD	8

Fonte: Própria (2021).

O concreto permeável é considerado um concreto “seco”, ou seja, que não possui fluidez. Verifica-se na Figura 69 que, devido ao alto índice de vazios da mistura e a pouca quantidade de água adicionada em função de um melhor controle por causa da resistência à compressão axial, os valores de *slump* foram baixos, alguns próximos de zero. De qualquer forma, mesmo com essa consistência seca já se conseguiu uma trabalhabilidade razoável para a moldagem das amostras. Nenhum dos concretos estudados apresentou característica de *slump* “desmoronado”.

Figura 69 – Sequência do ensaio de *slump test*



Fonte: Própria (2021).

Tradicionalmente, a mistura de concreto permeável é mais rígida do que a mistura de concreto tradicional e com a inserção de agregados reciclados mistos, essa mistura torna-se ainda mais rígida. Isto ocorre em função da alta absorção de água deste tipo de agregado que absorve parte da água de amassamento do concreto

durante o estado fresco, ocasionando uma redução na fluidez da mistura. Devido à não utilização de areia, o concreto permeável com RCD não possui a trabalhabilidade que o concreto convencional apresenta, e por isso, em ensaios de *slump*, geralmente o abatimento é menor do que 20 mm, segundo De Oliveira *et al.* (2017). Segundo Faria *et al.* (2019), o abatimento do cone para a mistura de concreto permeável é considerado menor que 20 mm e são raros os casos que se emprega abatimento superior a 50 mm.

Outros fatores além da alta absorção dos agregados reciclados podem também influenciar no valor da consistência do concreto, como por exemplo, sua forma heterogênea e sua textura rugosa, características que causam um maior travamento nas misturas de concreto no estado fresco. Quanto menor for o teor de água (relação a/c), maior é a resistência mecânica do concreto e menor é a sua trabalhabilidade. A substituição do agregado graúdo convencional pelos agregados reciclados não demonstrou um efeito significativo sobre a consistência do concreto, mas observa-se que conforme ocorre o aumento do teor de substituição, o resultado do abatimento do tronco de cone tende a aumentar também.

4.3.4 Resistência à compressão (axial)

O uso do concreto permeável como pavimento depende do seu comportamento estrutural, o qual é influenciado pela resistência mecânica à compressão axial do compósito que é afetada por diversos fatores, destacando-se, sobretudo, o índice de vazios da mistura. Portanto, a resposta da resistência está diretamente relacionada com a porosidade dos materiais, quanto mais porosos estes se apresentam, menor tende a ser sua resistência a compressão axial.

Os tipos de ruptura que podem ocorrer no concreto, a partir deste ensaio, são determinados a partir da análise das especificações da NBR 5739 (ABNT, 2018), a qual fornece as denominações e formatos dos possíveis tipos de rupturas de corpos de prova cilíndricos e estes devem ser moldados seguindo as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2015). As rupturas finais observadas nas amostras (Figura 70) foram do tipo cônica /cisalhada e podem ter sido causadas pelo surgimento de planos inclinados de cisalhamento, e por esse motivo explica-se a ruptura em forma de cone e com planos cisalhantes em corpos de prova de concreto de formato cilíndricos (VIEIRA E DAL MOLIN, 2011).

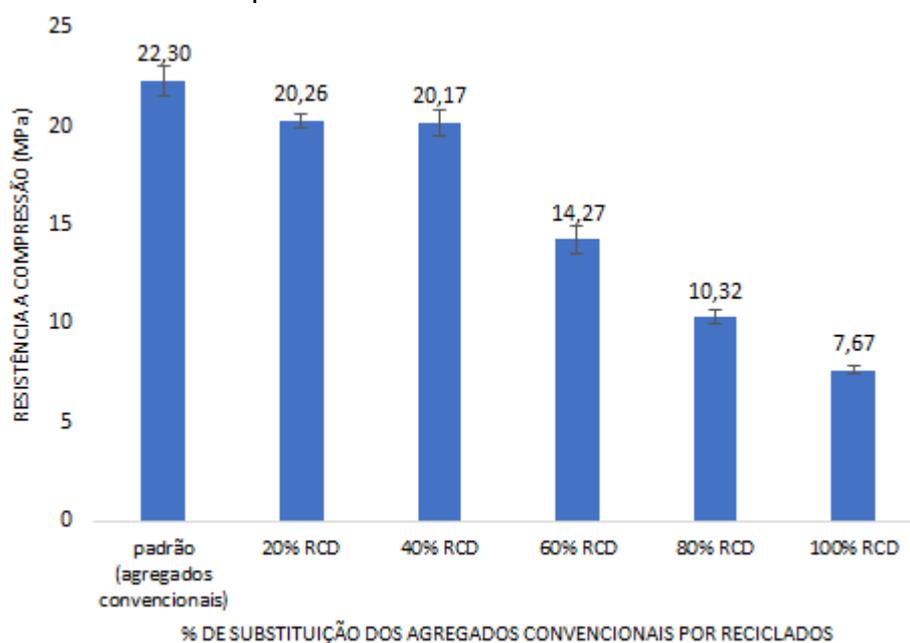
Figura 70 – Ruptura em corpos de prova cilíndricos após o ensaio de compressão



Fonte: Própria (2021).

Na Figura 71 estão apresentados os resultados de resistência à compressão axial (aos 28 dias) dos corpos de prova cilíndricos das misturas de concreto permeável (Anexo II).

Figura 71 – Resistência à compressão axial



Fonte: Própria (2021).

Observa-se que, conforme aumenta o teor de substituição dos agregados convencionais pelos agregados naturais, a resistência à compressão do concreto permeável diminui. Este comportamento pode ter sido ocasionado pela própria resistência dos agregados reciclados, que é menor devido à sua heterogeneidade ou pelo excesso da água de absorção diminui a relação a/c ou por uma provável redução da interface da pasta de cimento com os agregados reciclados. Uma das formas de

reduzir esta absorção seria por imersão prévia do agregado reciclado em parte da água de amassamento (PELISSARI *et al.*, 2020).

No caso deste estudo, onde o objetivo foi o desenvolvimento de placas de concreto permeável com agregados de RCD, o método de ensaio de resistência exigido pela norma NBR 16416 (ABNT, 2015) é a resistência à tração. Porém, como se trata de pavimentos de concreto, buscou-se, através da NBR 8359 (ABNT, 2015), um concreto com resistência à compressão com valores de 20 MPa. Para a obtenção de valores mais altos de resistência a compressão, além do equilíbrio da granulometria, foi feito um controle efetivo na hora da mistura do concreto da relação a/c através de um ajuste e compatibilização da porosidade da pasta de cimento.

Amostras de concreto com até 40% de RCD apresentaram valores de resistência à compressão axial superiores à 20 MPa, mas menores (~10%) que a amostra com agregados convencionais.

Conforme descrito anteriormente, nos resultados do ensaio de desgaste de *Los Angeles*, o agregado convencional apresentou desgaste de 15,21% e o agregado reciclado de 43,83%, demonstrando que um agregado mais resistente promove uma elevação correspondente na resistência à compressão simples. Os concretos com maiores % de substituições, os quais apresentaram reduções acentuadas na resistência, evidenciam a influência negativa da porosidade dos agregados de RCD graúdos sobre sua própria resistência e sobre a resistência do concreto.

Mesmo com a natureza heterogênea dos agregados reciclados utilizados nos concretos permeáveis e sem o uso de aditivos químicos, os corpos de prova com até de agregados reciclados apresentaram resistência à compressão axial na faixa de valores correspondentes a concretos permeáveis com agregados reciclados, de 3,5 MPa a 28 MPa, apresentada na literatura (ALENCAR, 2013). Em alguns estudos, amostras de concreto permeável com agregados reciclados apresentaram resistências à compressão menores que o especificado na norma, porém apresentaram maiores valores de resistência a tração tanto por compressão diametral como na flexão (OLIVEIRA, 2015; OLIVEIRA, 2017).

4.3.5 Resistência à tração indireta: Tração por Compressão Diametral e Tração na Flexão.

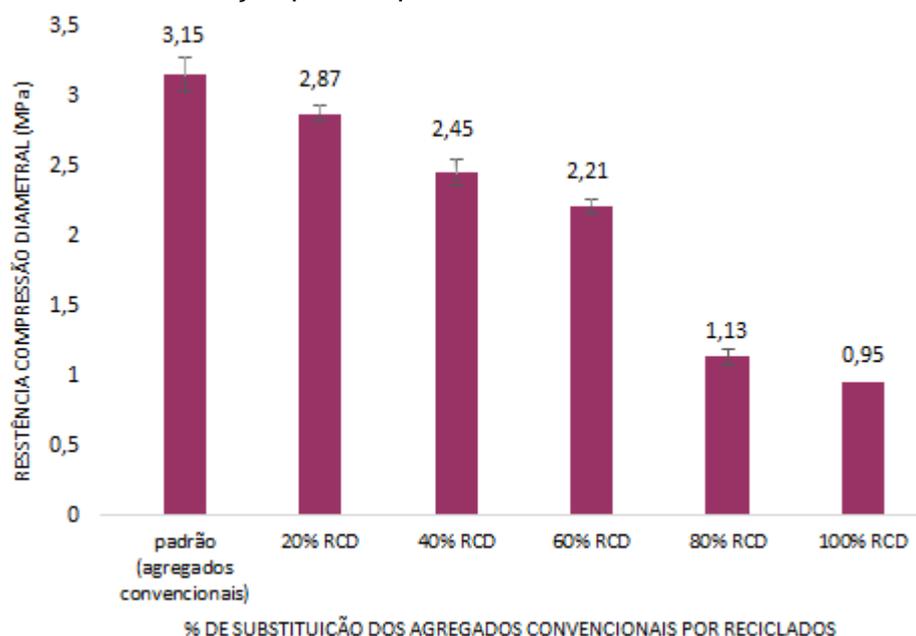
De acordo com Cabral (2007), a tração do concreto é uma propriedade física que não tem um significado absoluto, pois depende do tipo de ensaio. Para a tração por compressão diametral é considerado, aproximadamente, 12% da resistência à compressão axial e, para a tração na flexão, cerca de 15% da resistência à compressão axial. O autor também afirmou que a resistência à tração por compressão diametral é, em geral, 35% menor que a resistência à tração na flexão.

Neste ensaio, como as linhas de aplicação da carga são verticais, aplicadas na geratriz (eixo) do corpo de prova, as tensões de tração são direcionadas no sentido horizontal. Desta forma, após a ruptura, obtêm-se o corpo de prova dividido em 2 partes, como está mostrado na Figura 72. Na Figura 73 estão apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral (aos 28 dias) dos corpos de prova prismáticos das misturas de concreto permeável (Anexo III).

Figura 72 – Ruptura em corpos de prova cilíndricos após o ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Própria (2021).

Figura 73 – Resistência à tração por compressão diametral

Fonte: Própria (2021).

Verifica-se na Figura 73 que todas as amostras de concreto permeável com RCD apresentaram resistência à tração por compressão diametral menor que a do concreto com agregados convencionais. Comparando com a literatura, os valores foram maiores que os obtidos por De Oliveira *et al.* (2017), que foi de 1,65 MPa para o concreto de referência e 1,34 MPa para o concreto com 20% de substituição dos agregados graúdos convencionais por RCD.

De acordo com De Paula Júnior (2019), os estudos acerca do concreto permeável com resíduos de construção e demolição são bastante escassos em relação ao ensaio de resistência à tração na flexão, em função das características irregulares comumente encontradas nos corpos de prova, as quais dificultam a execução de ensaios dessa natureza em laboratório. Segundo Monteiro (2010), agregados com partículas variando entre 9,5mm e 4,75mm produzem um aumento na resistência à tração da flexão, enquanto agregados com granulometria descontínua ocasionam sua diminuição.

Na Figura 74 podem ser visualizados os corpos de prova após o ensaio de resistência à tração na flexão. Quanto ao local da ruptura nos corpos de prova, mesmo sendo feitos com agregados reciclados de natureza heterogênea, sendo que esta característica pode ter grande influência sobre a variação das propriedades físicas e mecânicas do concreto, identificou-se um padrão de ruptura: o rompimento ocorreu

no terço médio da seção longitudinal (entre os apoios), local que representa o segmento de momento fletor máximo (DE PAULA JÚNIOR, 2019).

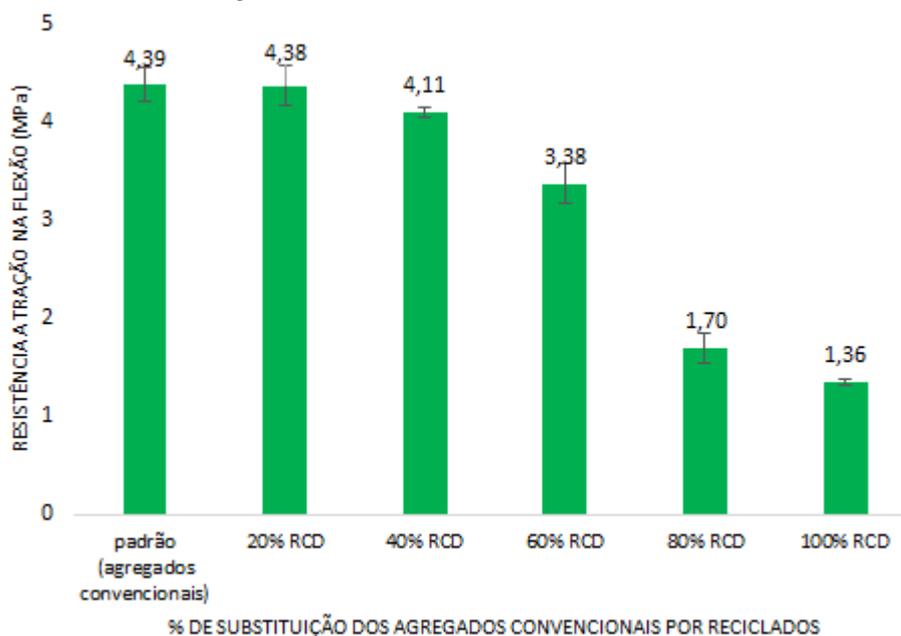
Figura 74 – Ruptura em corpos de prova prismático após o ensaio de tração na flexão



Fonte: Própria (2021).

Na Figura 75 estão apresentados os resultados de resistência à tração na flexão (aos 28 dias) dos corpos de prova prismáticos das misturas de concreto permeável (Anexo IV).

Figura 75 – Resistência à tração na flexão



Fonte: Própria (2021).

Verifica-se que, as amostras de concreto permeável com 20 e 40% de RCD apresentaram resistências à flexão similares à da amostra com agregado convencional (concreto padrão), com valores médios entre 4,39 e 4,11 MPa, e que

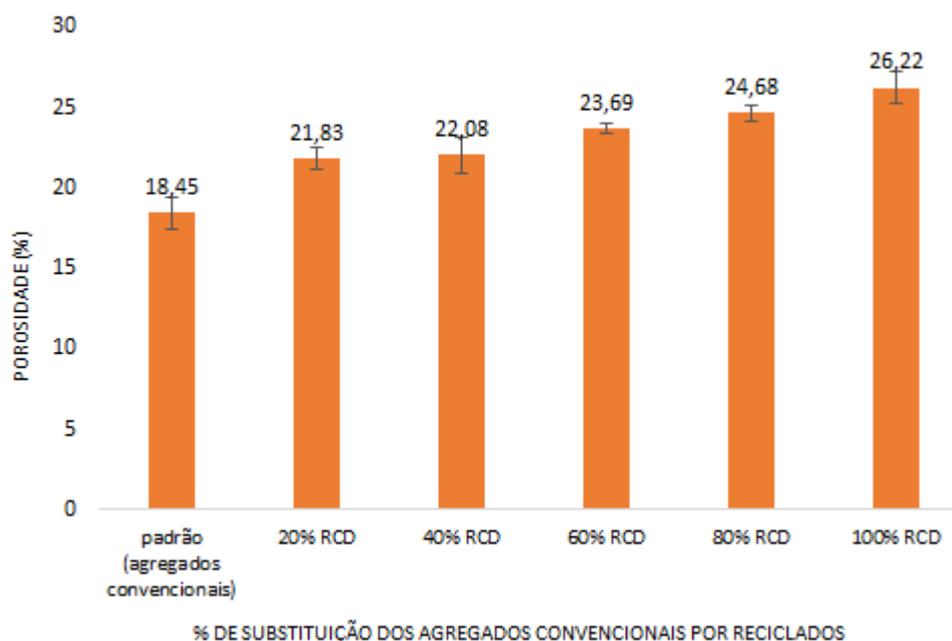
quanto maior o percentual de agregados reciclados menor a resistência mecânica, o que está relacionado com a absorção de água desses materiais.

A norma NBR 16416 (ABNT, 2015) apresenta os requisitos para concreto permeável obtido com agregados convencionais e especifica que para uso como placa de concreto permeável deve possuir resistência à tração ≥ 2 MPa (em tráfego leve e de pedestres); e para uso como concreto permeável moldado no local deve ter resistência à tração ≥ 1 MPa para tráfego de pedestres e ≥ 2 MPa para tráfego leve. Desta forma, observa-se que os resultados obtidos neste ensaio mostram que todas as amostras podem ser utilizadas para pavimento de tráfego de pedestres e as amostras de 20%, 40% e 60% de RCD podem ser utilizadas em locais para tráfego leve de veículos.

Os valores de resistência à tração na flexão das amostras de concreto com até 60% de RCD foram maiores que os descritos por Vidal (2014) e Batezini (2013), que encontraram valores médios de 2,12 MPa em amostras de concretos com substituições parciais de até 50% de agregado reciclado. Todas as amostras analisadas no presente estudo apresentaram resistência à tração superiores aos obtidos por Güneyisi *et al.* (2014), que obtiveram valores entre 1,0 MPa, com 75% de agregados reciclados e 1,29 MPa, com 25% de agregados reciclados. É importante salientar que, em função do elevado índice de vazios inerente a essa classe de concretos, associado à inserção de RCD na mistura, as amostras tendem a apresentar irregularidades superficiais, o que pode representar uma dispersão, ainda que irrelevante, dos resultados encontrados (DE PAULA, 2019).

4.3.6 Porosidade

Na Figura 76 estão apresentados os resultados de porosidade das amostras de concreto permeável com agregados convencionais e reciclados.

Figura 76 – Porosidade

Fonte: Própria (2021).

Observa-se que a porosidade das amostras de concreto permeável aumentou conforme aumentou o percentual de substituição dos agregados convencionais pelos reciclados, com um aumento de 26,22% para o concreto com 100% de agregados reciclados. No comparativo entre o concreto padrão com o concreto de menor substituição de RCD (20%), houve um aumento de ~18%. Quando comparado o concreto de menor (20%) com o concreto de maior substituição (100%) o aumento passa a ser de 20%. Isso ocorre, provavelmente, porque o agregado de resíduos possui uma taxa de absorção maior que o agregado convencional e por causa da acomodação dos resíduos de RCD, que conferem um maior volume de vazios.

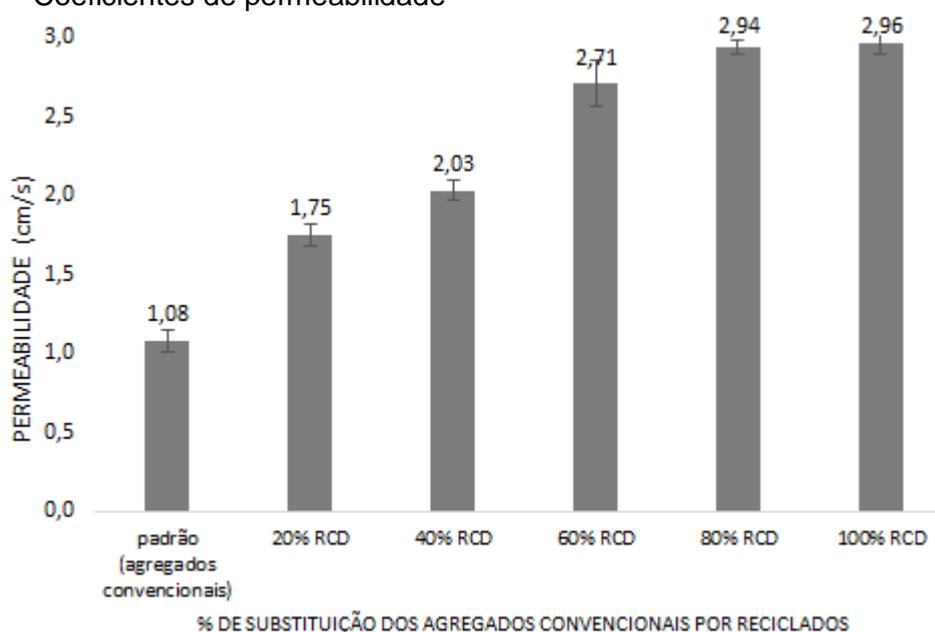
Concretos que apresentam porosidade menor que 15% são classificados como de baixa porosidade e acima de 30% são altamente porosos (MARCHIONI e SILVA, 2013). Porém, valores muito acima de 30% resultariam em resistências, principalmente a de compressão axial, muito baixas. Com base nestas informações, as amostras de concreto permeável avaliadas podem ser classificadas sendo de média porosidade. Concretos produzidos sem a adição de agregados miúdos, como no caso deste estudo, apresentam maior porosidade e com isso permitem maior passagem de água pelos vazios. De Paula Júnior (2019) obteve valores de porosidade para o concreto permeável produzido com agregados reciclados mistos na faixa média de 19%. Em sua pesquisa, Lamb (2014) encontrou índice de vazios variando entre

15% a 20% para os concretos permeáveis produzidos com agregados reciclados mistos.

4.3.7 Permeabilidade

A grande vazão de água que passa através dos corpos de prova prismáticos confeccionados indica que o ensaio de permeabilidade teve seu objetivo atingido. Na Figura 77 estão apresentados os resultados dos coeficientes de permeabilidade das amostras de concreto permeável com agregados convencionais e reciclados.

Figura 77 – Coeficientes de permeabilidade



Fonte: Própria (2020).

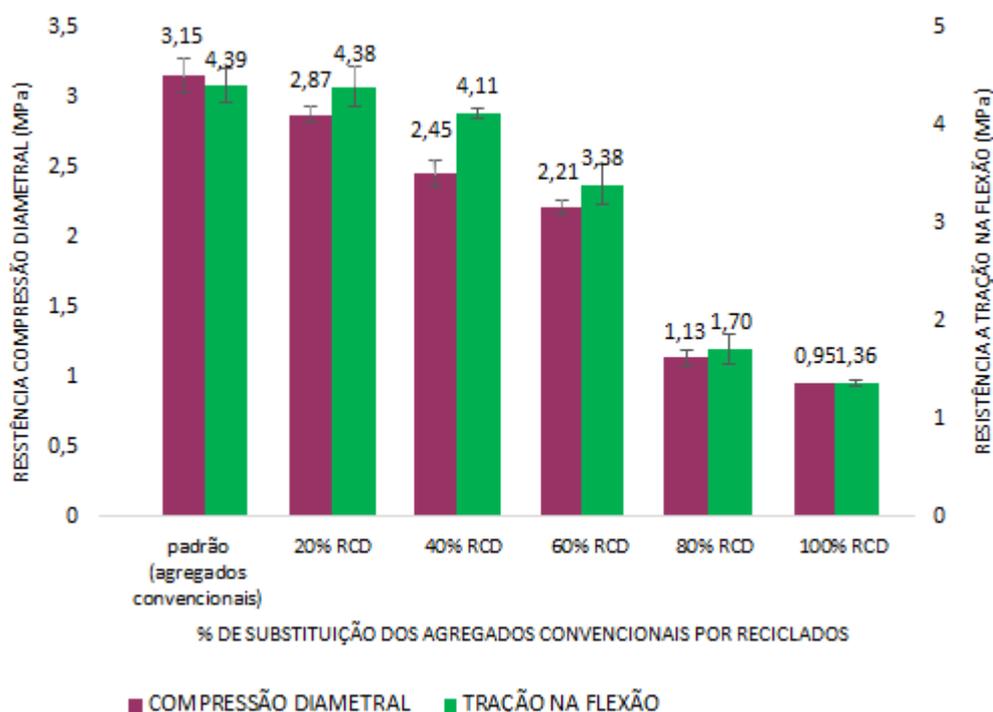
Verifica-se nos resultados que com o aumento da concentração de agregados reciclados na mistura de concreto permeável trouxe aumento do coeficiente de permeabilidade. Comparando o corpo de prova de 20% de RCD com o de 100% de RCD, observa-se um aumento de 69% no valor do coeficiente de permeabilidade. Todos os corpos de prova, inclusive o piso permeável padrão (0% de agregados reciclados), exibiram alto grau de permeabilidade, com valores acima do limite mínimo estabelecido pela NBR 16416 (ABNT, 2015), que é de 10^{-3} m/s ou 0,1 cm/s. O coeficiente de permeabilidade alto ocorreu, provavelmente, em função da não utilização de areia (agregado miúdo) na mistura do concreto permeável e devido à

parafina sólida, que ao ser removida por aquecimento promove a formação dos poros. Os valores obtidos neste ensaio são condizentes com os reportados em estudos de outros autores. A permeabilidade do concreto permeável com agregados reciclados mistos produzido por Schaefer *apud* De Paula (2019) variou entre 0,04 cm/s e 1,45 cm/s. Alves (2016) encontrou, em seus estudos envolvendo a substituição gradual de agregado graúdo natural por resíduos de construção e demolição, coeficientes de permeabilidade entre 1,19 cm/s e 2,24 cm/s. Segundo Marchioni e Silva (2013), a água geralmente escoava com taxas entre 0,2 cm/s até 1 cm/s, dependendo do material usado na fabricação do concreto permeável e da sua disposição.

4.3.8 Correlação entre os ensaios mecânicos e hidráulicos.

A Figura 78 relaciona os resultados encontrados nos ensaios de análise do comportamento mecânico dos corpos de prova ensaiados. Observando-se os resultados, pôde-se comprovar o esperado de acordo com as literaturas nacionais e internacionais pesquisadas que, quanto maiores são as resistências mecânicas, menores são as propriedades de porosidade e, conseqüentemente, de coeficientes de permeabilidade, onde verificou-se uma proporcionalidade entre os resultados.

Enfatizando que, para os traços com RCD, houve o cuidado na ordem de colocação dos componentes do concreto, de forma a evitar uma perda da água de amassamento para o resíduo e evitar resultados contraditórios.

Figura 78 – Tração por Compressão Diametral versus Tração na flexão

Fonte: Própria (2021).

Observa-se que, em relação às resistências mecânicas dos ensaios realizados, que o comportamento segue a mesma tendência: quanto maior o teor dos agregados reciclados sobre os convencionais, ocorre a diminuição das propriedades de resistência dos concretos. Também se constata que o concreto permeável com reciclados se mostra menos resistente que o concreto permeável com agregados convencionais. No caso da resistência à tração, os valores obtidos para um mesmo concreto, os resultados da tração na flexão são maiores que os resultados obtidos na tração por compressão diametral. Esta resistência depende muito das dimensões dos corpos de prova, principalmente de sua altura e do carregamento. O seu valor é maior do que a resistência obtida na tração por compressão diametral, porque a maior tensão ocorre na área mais externa (fibras externas) dos corpos de prova e, por conseguinte, as fibras internas, menos solicitadas, colaboram na resistência.

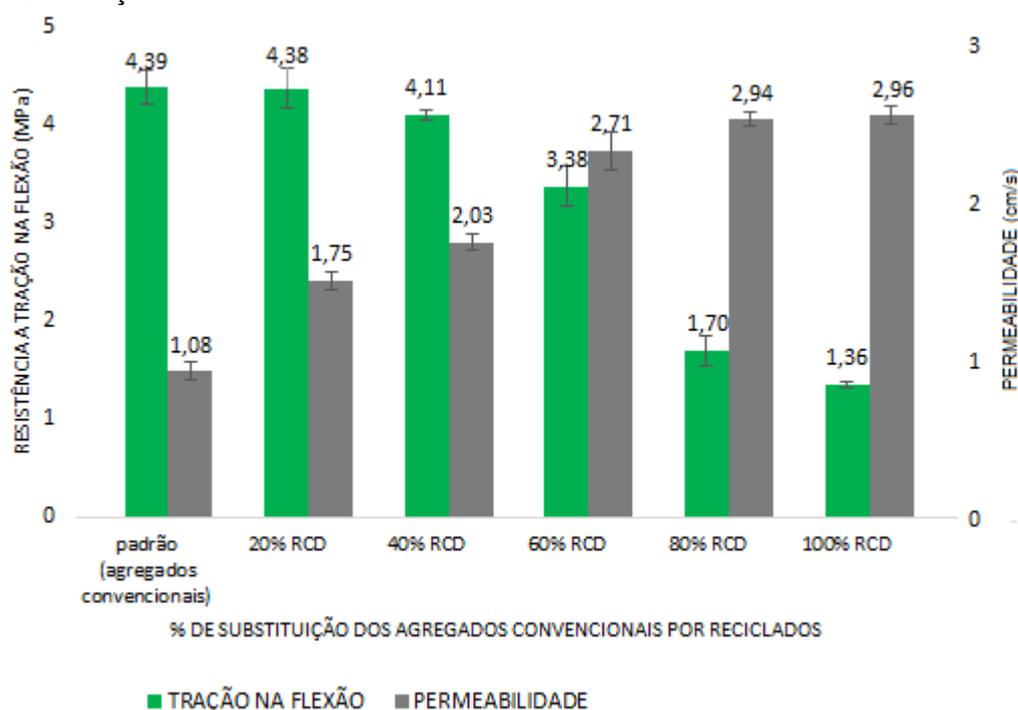
O concreto obedece à lei clássica de Ciência dos Materiais, que estabelece uma relação inversamente proporcional entre resistência e porosidade. Quanto maior o número de vazios na estrutura do concreto, maior a sua porosidade, maiores são os espaços nas misturas, portanto menor o seu valor de resistência mecânica à compressão. Ao se reduzir a quantidade de agregado miúdo ou simplesmente eliminá-lo, caso deste estudo, a porosidade tende a aumentar (BATEZINI, 2013). Desta forma,

em relação à determinação do índice de vazios, já se esperava valores elevados em virtude da descontinuidade de massa associada ao material deste estudo, o qual envolve a utilização de resíduos na confecção de concreto permeável.

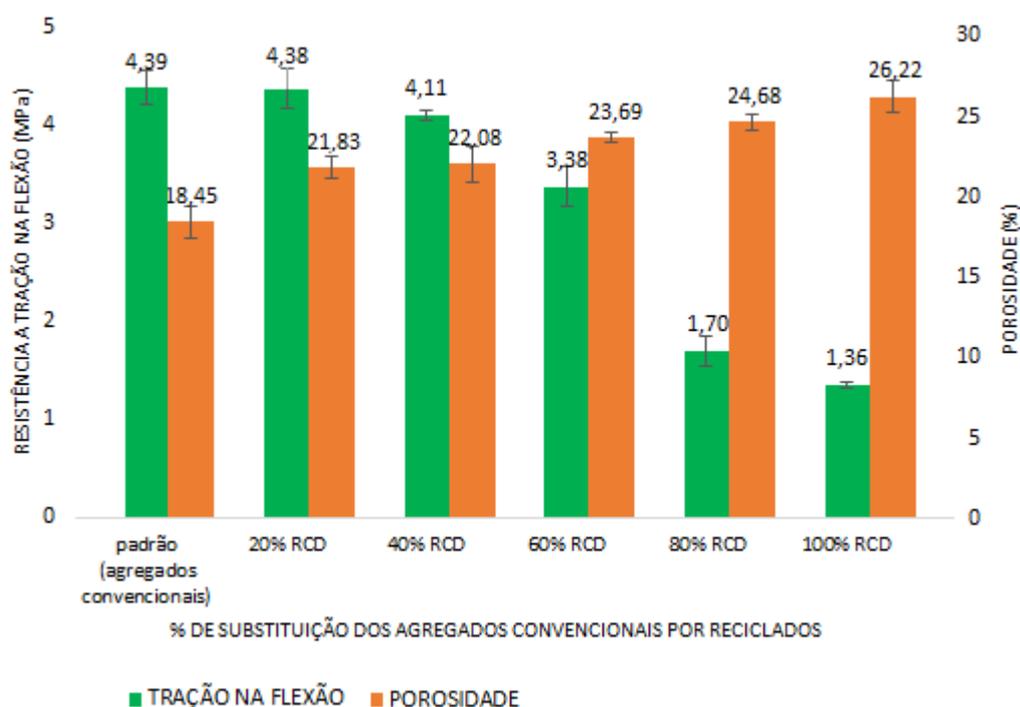
Na Figura 79 está apresentada a relação entre a resistência à tração na flexão e os coeficientes de permeabilidade e na Figura 80 a relação entre a resistência à tração na flexão e a porosidade das misturas de concreto permeável com agregados convencionais e reciclados.

Observa-se a influência da porosidade e permeabilidade na resistência à tração na flexão. O comportamento de ambas as propriedades hidráulicas em relação a esta resistência mecânica é semelhante.

Figura 79 – Tração na Flexão versus Permeabilidade



Fonte: Própria (2021).

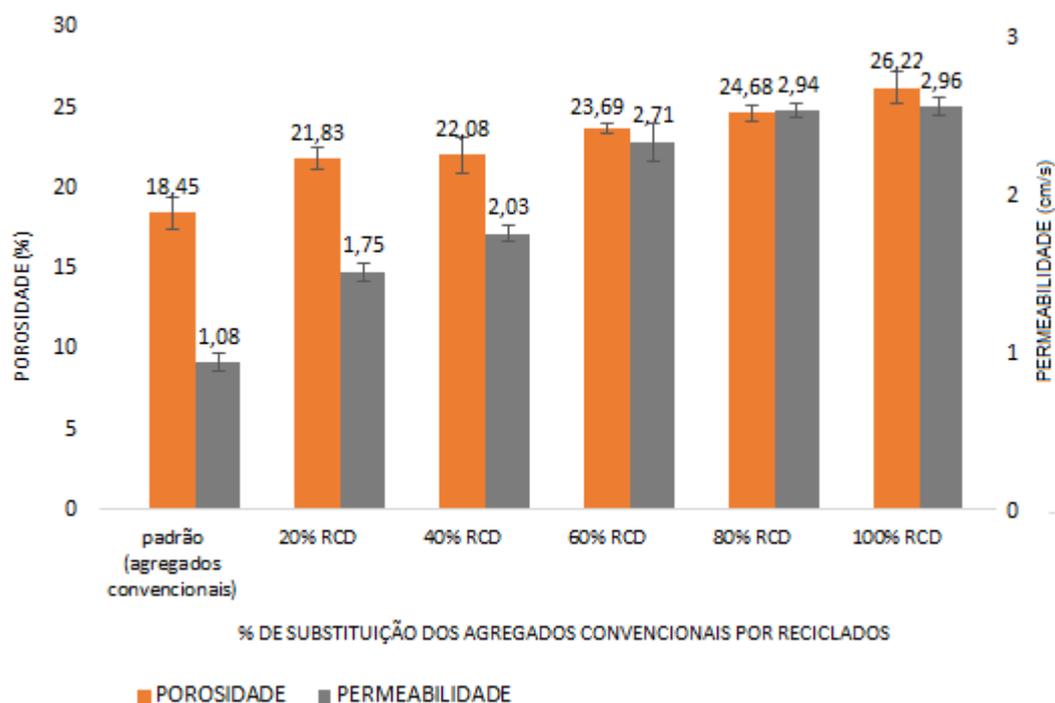
Figura 80 – Tração na Flexão versus Porosidade

Fonte: Própria (2021).

A porosidade, o coeficiente de permeabilidade e as frações de substituição aumentam, enquanto a resistência à tração sofre redução em função do aumento da criação de vazios nos concretos estudados. Na correlação da tração na flexão em relação a porosidade, a tensão reduz em ~53% do maior valor até o menor valor encontrado nos concretos com substituições (20% e 100%), enquanto, nesta mesma condição, a porosidade aumenta ~29%. Na correlação com a permeabilidade, ocorre um aumento de ~53%.

Na Figura 81 está apresentada a relação entre a porosidade e o coeficiente de permeabilidade das amostras de concreto permeável. Verifica-se que a permeabilidade dos concretos permeáveis é diretamente proporcional à porosidade (índice de vazios) do material. Como neste trabalho não foi utilizado agregado miúdo (areia) e aditivos químicos, esse aumento da porosidade e, conseqüentemente, da permeabilidade, ocorre unicamente por causa das frações de substituição do agregado convencional pelo reciclado.

Conclui-se, desta forma, que aumentar a porosidade/permeabilidade implica em um maior índice de vazios, mas diminui a capacidade de carga do concreto permeável. Essa diminuição da resistência a compressão pode resultar em uma vida útil mais curta do pavimento. (GÜNEYISI *et al.*, 2014).

Figura 81 – Porosidade versus Permeabilidade

Fonte: Própria (2021).

4.3.9 Pavimento Permeável Comercial.

Nesse trabalho foram avaliadas as propriedades mecânicas e hidráulicas de amostras elaboradas em laboratório. Com base nos resultados descritos anteriormente, foi realizada uma análise para definir qual seria traço adotado para a execução do pavimento comercial final.

A mistura com 40% de substituição dos agregados convencionais por RCD foi a que apresentou o melhor desempenho em relação as resistências mecânicas analisadas e pela condutividade hidráulica alcançada. Os traços com 60%, 80% e 100% de RCD foram descartados, devido aos baixos valores de resistências mecânicas à compressão axial obtidos.

A viabilidade técnica e econômica torna-se válida quando se tem um maior teor de substituição dos agregados convencionais pelos agregados reciclados, pela questão custo, e os resultados da análise dos ensaios mecânicos e hidráulicos são favoráveis e de acordo com as normas técnicas.

O traço com 40% de agregados reciclados apresentou resistência à compressão em média 1% inferior ao de 20%, mas obteve melhores resultados hidráulicos. Na resistência a tração, seus valores foram satisfatórios. Embora sua a

resistência à compressão e tração na flexão tenham sido menores que a do traço com 20%, sua porosidade e permeabilidade foram maiores em 1% e 16%, respectivamente.

Com base nestas análises, concluiu-se que o melhor concreto permeável com agregado reciclado é o de 40% de substituição de agregados convencionais por reciclados. Na Figura 82 pode ser visualizado o piso permeável padrão comercial produzido com 40% de agregados reciclados antes e após a moldagem.

Figura 82 – Placa de concreto permeável comercial com 40% de substituição



Fonte: Própria (2021).

Os resultados encontrados para a porosidade (22,96%) e coeficiente de permeabilidade (2,51 m/s) da placa moldada em concreto permeável com substituição de 40% do agregado convencional pelo agregado reciclado corroboram com os valores encontrados para os mesmos ensaios com os corpos de prova prismáticos para este % de substituição e com os valores mencionados pela literatura: pavimento com média porosidade (MARCHIONI e SILVA, 2013) e com valores acima do limite mínimo estabelecido pela NBR 16416 (ABNT, 2015), que é de 10^{-3} m/s ou 0,1 cm/s, para o coeficiente de permeabilidade. Na Tabela 13 estão apresentados os resultados finais encontrados para a placa de 50x50 cm, com substituição de 40% do agregado convencional pelo agregado reciclado.

Tabela 13 – Resultados finais do pavimento executado

Concreto Permeável com substituição de 40% dos agregados convencionais por agregados reciclados	
Propriedade	Resultado obtido
Peso específico	1.894,97 kg/m ³
<i>Slump test</i>	0
Resistência do concreto a compressão axial	20,17 MPa
Resistência da placa à tração por compressão diametral	2,45 MPa
Resistência da placa à tração na flexão	4,11 MPa
Porosidade	22,96%
Coefficiente de permeabilidade	2,51 cm/s

Fonte: Própria (2021).

4.4 ANÁLISE CPQVA APLICADA À PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE RCD

Seguem as análises, de acordo com a metodologia CPQvA, para a avaliação da viabilidade ambiental e econômica dos agregados reciclados.

4.4.1 Classificação

Como já citado na Revisão da Literatura, a Resolução CONAMA nº 307, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, classifica os RCD como resíduos Classe A. De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), é classificado como Classe II-B (resíduo não perigosos e inerte). Ainda, conforme ensaio de classificação dos resíduos realizado pela empresa geradora, responsável pelo recebimento, triagem, britagem e destinação final de resíduos de construção e demolição, eles são classificados como Classe II-B.

4.4.2 Potencialidade

O resíduo de RCD apresenta grande potencial de utilização. Destacam-se o reaproveitamento no próprio canteiro de obras, aterros, obras de pavimentação, agregado para argamassa, agregado para concreto e como agregado reciclado na

fabricação de artefatos de concreto e blocos de pavimentação (BARRETO, 2014). A NBR 15115 (ABNT, 2004) trata dos procedimentos para que agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil sejam utilizados na execução de camadas de pavimentação. A presente pesquisa foi realizada para avaliar indicadores de potencialidades para a utilização desses agregados reciclados em placas para pavimentos permeáveis com parafina sólida para aumento da porosidade, que utiliza como materiais exclusivamente cimento, agregado reciclado, parafina sólida e água.

Os agregados reciclados provenientes de RCD apresentam grande potencial de utilização em pavimentos permeáveis de concreto, conforme resultados apresentados nesta pesquisa. Ainda não existe uma legislação específica para pavimentos permeáveis de concreto que utilize o resíduo de RCD. Os requisitos técnicos para aceitação de pavimento permeável de concreto seguem as recomendações gerais da NBR 16416 (ABNT, 2015) e os critérios para os resíduos de RCD são abordados nas legislações que tratam sobre resíduos modo geral.

4.4.3 Quantidade / Viabilidade

Conforme dados da empresa Terraplanagem Medeiros, fornecedora dos resíduos de RCD e única empresa na cidade que possui licença ambiental de operação para realizar o armazenamento, transbordo e reciclagem de resíduos da construção civil e com autorização para reciclagem de material classe A e madeira (LAO nº 035/2019), o volume de resíduos recebidos, que ficam na área de transbordo, passam pela triagem, peneiramento, moedores, britadores, até a saída do produto, é de 5000 m³ por mês, em média, com todos os resíduos (em média de 40 à 50 caçambas de 6 m³ por dia). Desse total, após a separação, 3500 m³, em média, são de resíduos de construção e demolição que podem gerar agregados reciclados (nobres e mistos). Atualmente, segundo informações da empresa, existe um volume de 2000 m³ de resíduos de RCD na área de transbordo (pátio). Na Tabela 14 estão os valores gastos no processo global da empresa, até a venda e retirada do pátio, independentemente do tipo de resíduo.

Tabela 14 – Valores para a geração de resíduos até a venda final

Etapa)	Custo (R\$ / m³)	Venda (R\$ / m³)
Entrada do material (recebimento)		
1. Material já separado por classe	18,00	-
2. Material misturado (terá que ser classificado)	3,00	-
Processo de triagem (peneiramento, moedores, trituradores, britadores)	5,50	-
Venda (saída com retirada do pátio)	-	40,00
Valor total	26,50	40,00

Fonte: Terraplanagem Medeiros (2021).

Com o intuito de verificar os custos relacionados aos pavimentos de concreto permeável, foi realizada uma análise simplificada no mercado. Para análise da viabilidade econômica da produção de pavimento de concreto permeável com agregados de RCD e parafina como agente espaçador, considerou-se o seguinte cenário: área pavimentada com 5000 m² (V = 300 m³), somente considerando os materiais utilizados e desconsiderando o custo de produção, mão de obra para execução, base e sub-base e elementos de drenagem final. O concreto com 40% de RCD foi o traço que se apresentou como a melhor solução técnica entre os concretos produzidos com outros percentuais de reciclados avaliados neste estudo, sendo este definido para o estudo de viabilidade econômica e os resultados para produção do concreto permeável com agregados convencionais e reciclados (40% RCD) são apresentados nas Tabelas 15 e 16, respectivamente.

Tabela 15 – Valores para produção de pavimento permeável com agregado convencional – traço 1:3

Material	R\$ total para produzir 5000 m²
Cimento CP-II-Z-40	45.000,00
Brita n. 1	32.000,00
Custo Total	77.000,00
Custo por m² (somente material)	15,40

Fonte: Própria (2021).

Tabela 16 – Valores para produção de pavimento permeável com agregado convencional e reciclado – traço 1:3, 40% RCD

Material	R\$ total para produzir 5000 m²
Cimento CP-II-Z-40	45.000,00
Brita n. 1	12.000,00
Agregado reciclado de RCD	3.000,00
Parafina sólida	1.000,00
Custo Total	61.000,00
Custo por m² (somente material)	12,20
Redução em relação ao pavimento somente com agregado convencional	-26,2%

Fonte: Própria (2021).

Para efeito comparativo, os dados apresentados na Tabela 17, são estimativos de custo com base nos valores apresentados pelo sistema SINAPI, base de dados da caixa Econômica Federal para orçamentos, catálogo de outubro de 2020. O custo de produção interna foi retirado para efeito de comparação entre os preços.

Tabela 17 – Custo material piso drenante

Material	R\$ total para produzir 5000 m²
Placa/piso de concreto poroso/pavimento permeavel 40 cm x 40 cm, e = 6 cm, cor natural	120.000,00 (SINAPI, 2020)
Custo Total	120.000,00
Custo por m² (somente material)	24,00
Custo em relação ao pavimento somente com agregado convencional	+ 56%
Custo em relação ao pavimento somente com agregado reciclado	+97%

Fonte: Própria (2021).

A utilização dos agregados reciclados é de grande importância para a inserção da variável ambiental no setor da construção civil em conjunto com as usinas de reciclagem de entulho, importantes agentes neste processo.

De acordo com os valores encontrados nas Tabelas 16 e 17, observa-se que o uso dos agregados reciclados em substituição parcial aos agregados convencionais em concretos permeáveis, é um material que pode ser transformado em agregado

reciclado trazendo viabilidade econômica para empreendimentos em vias urbanas para tráfego leve a moderado. A sua utilização em pavimentação é uma maneira de reduzir os impactos ambientais gerados pela deposição irregular desses resíduos e a exploração de recursos naturais e a utilização deste tipo de material não-convencional nos pavimentos permeáveis representa uma alternativa de reduzir custos de obras desta natureza e agregar valor aos resíduos.

4.4.4 Aplicabilidade

Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição (ABRECON), reciclar os resíduos provenientes de RCD, independente do uso que a ele for dado, representa vantagens econômicas, sociais e ambientais, como economia na aquisição de matéria-prima, devido a substituição de materiais convencionais, pelo entulho; diminuição da poluição gerada pelo entulho e de suas consequências negativas como alagamentos, inundações e assoreamento de rios e córregos, e preservação das reservas naturais de matéria-prima. A ABRECON ainda destaca que o entulho processado pelas usinas de reciclagem pode ser utilizado como agregado para concreto não estrutural, a partir da substituição dos agregados convencionais (areia e brita), com vantagens como utilização de todos os componentes minerais do entulho (tijolos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.), sem a necessidade de separação de nenhum deles; economia de energia no processo de moagem do entulho (em relação à sua utilização em argamassas), uma vez que, usando-o no concreto, parte do material permanece em granulometrias graúdas; possibilidade de utilização de uma maior parcela do entulho produzido, como o proveniente de demolições e de pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem/ trituração e possibilidade de melhorias no desempenho do concreto em relação aos agregados convencionais, quando se utiliza baixo consumo de cimento.

De acordo com uma pesquisa realizada pela ABRECON, apenas 20% dos resíduos da construção são aproveitados no Brasil, muito abaixo dos países europeus, em que a reciclagem atinge 98%. Diante deste cenário, a associação criou o Manual de Aplicação de Agregado Reciclado (MARE). O material foi produzido em conjunto com a Universidade Federal da Bahia e lançado em novembro de 2018, durante o Seminário Nacional da Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição, a fim de

padronizar a nomenclatura dos agregados, bem como mapear suas aplicações e facilitar a comunicação entre compradores e vendedores. Além disso, o documento também visa difundir o conceito de gestão de resíduos no canteiro de obras, reduzindo custos com destinação e transporte.

A reciclagem na construção civil pode gerar inúmeros benefícios, dentre eles a redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, a redução de área necessária para aterro, pela minimização de volume de resíduos, a redução do consumo de energia durante o processo de produção, destacando-se a indústria de cimentos, redução da poluição. O processo de reciclagem de RCD através de uma usina de beneficiamento é uma alternativa que traz ganhos ambientais, sociais e pode também apresentar atratividade do ponto de vista econômico. Entretanto, o fato de ter uma única empresa legalizada no município de Joinville para receber os materiais recolhidos não garante a viabilidade do negócio.

Pesquisas nacionais que tratam da utilização de agregados reciclados têm chegado a conclusões similares: concretos com esse tipo de agregado têm alcançado bons desempenhos em relação à avaliação mecânica e à durabilidade (MIKAMI, 2017), sugerindo que a proposta de valorização do resíduo mostrou-se viável em termos de disponibilidade de material.

5 CONCLUSÕES

Ações como a reutilização dos RCD e a prospecção de novos produtos com esse tipo de resíduo se fazem necessárias, pois além de contribuir com a limpeza da cidade, aliviam o impacto nas áreas de aterros e amenizam alagamentos e inundações. A grande quantidade de RCD gerados nas cidades são considerados problemas para o meio, gerando preocupação nos aspectos ambientais, econômicos e social. O estudo sobre concreto permeável com agregados reciclados surge justamente a partir da necessidade de um produto que amenize problemas urbanas associadas à impermeabilização superficial (alagamentos, patologias, entre outros).

Com o objetivo de investigar e ampliar o conhecimento sobre concreto permeável e seus efeitos combinados com a substituição parcial de agregados convencionais por reciclados de RCD mistos, neste trabalho foi avaliada a proposta de um pavimento permeável com resistência compatível para aplicação em áreas de fluxo de tráfego de leve a moderado.

Este estudo foi feito a partir de agregados reciclados de RCD em substituição aos agregados convencionais (brita), sem a utilização de finos e agentes ligantes (aditivos químicos e adições minerais) e utilização da parafina sólida, como material formador de porosidade. Foram realizados ensaios mecânicos, e hidráulicos.

Os agregados reciclados mistos provenientes de construção e demolição avaliados no estudo são materiais bem graduados e abrangem as frações de grãos de forma bem distinta, sendo materiais de alto potencial para execução de concretos, podendo substituir os agregados graúdos convencionais (brita).

A presença dos agregados reciclados tornou os concretos permeáveis mais leves do que os confeccionados apenas com agregados convencionais.

Com a substituição do agregado convencional pelo agregado reciclado houve redução na resistência mecânica à compressão axial, porém os resultados para ensaios de resistência à tração foram superiores aos recomendados pelas normas técnicas NBR 722 e 12142 (ABNT 2019; ABNT 2010).

A substituição dos agregados convencionais por reciclados e o uso da parafina sólida resultou em ganhos de porosidade e permeabilidade. Todos corpos de prova de concreto permeável exibiram boa porosidade e alta permeabilidade.

A mistura com 40% de RCD foi a que apresentou o melhor desempenho, englobando todas as propriedades estudadas e avaliadas neste estudo.

Com base nos resultados obtidos é possível constatar um potencial de utilização dos concretos permeáveis com os agregados reciclados disponíveis na região. Percebe-se que há possibilidade de se estabelecer traços e dosagens capazes de resultar boa resistência mecânica com elevada permeabilidade.

A aplicação da metodologia CPQvA demonstrou que o uso dos agregados de RCD, material não convencional, em pavimentação é uma maneira de reduzir os impactos ambientais gerados pela deposição irregular desses resíduos e a exploração de recursos naturais, além de representar uma alternativa de reduzir custos de obras desta natureza e agregar valor aos resíduos. Atualmente, o agregado convencional (brita 1, utilizada neste trabalho) tem um custo de R\$ 88,00/m³ e o agregado reciclado com granulometria similar de R\$ 35,00/m³. Por ser um material mais leve que a brita, o custo do transporte também é menor, colaborando com uma melhor viabilidade econômica.

Importante salientar que não existe uma regra para o comportamento, tanto mecânico quanto hidráulico, de uma mistura de concreto permeável com uso de RCD, depende da origem do agregado reciclado, pois as características dos RCD podem variar para resíduos coletados em outros locais, podendo apresentar diferentes parcelas dos materiais constituintes do agregado reciclado, granulometria, compactação e, por consequência, obter resultados finais diferentes dos encontrados nesta pesquisa.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguem algumas sugestões para trabalhos futuros adequados à continuidade deste estudo como incentivo para aplicação prática de revestimentos permeáveis com uso de resíduos reciclados:

- Avaliar outro tipo de agregado reciclado que não seja o tipo misto, para as mesmas condições e ensaios deste trabalho;
- Avaliar o uso da parafina sólida em maiores e menores proporções;
- Elaborar misturas de concreto permeável com agregados reciclados com o uso de aditivos químicos que potencializem as principais características do material;
- Fazer análise MEV que permita uma interpretação aprimorada do desempenho micro estrutural do concreto permeável com resíduo de RCD;
- Analisar os pavimentos estudados com carregamentos reais;
- Avaliar os efeitos da lixiviação nos concretos permeáveis com RCD para melhor entendimento das consequências deste fenômeno, principalmente quanto a permeabilidade;
- Verificar a necessidade de limpeza do revestimento para evitar o entupimento dos poros (colmatação) e consequente perda de eficiência do pavimento permeável;
- Fazer estudo mais aprofundado da viabilidade ambiental neste tipo de pavimento, inclusive da qualidade da água infiltrada no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLI, L. A. **Estudo Experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista.

ALENCAR, A. C. M. F. **Avaliação de piso drenante com a utilização de agregados reciclados**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará.

ALMEIDA, R.P.M. **Avaliação do desempenho hidráulico de agregados reciclados de escórias de aciaria e RCD à água e ao lixiviado de RSU e sua comparação com basalto e calcário**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Universidade Nova de Lisboa.

ALVES, P. B. **Concreto permeável para pavimentação urbana com uso de resíduos de construção e demolição produzidos na usina de reciclagem de São José do Rio Preto**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANTUNES, P.T.S.C. **Uso do pavimento permeável de concreto para atenuação de cheias urbanas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro. 2006.

_____. **NBR NM 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"**. Rio de Janeiro. 2001.

_____. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003.

_____. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro. 2015.

_____. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro. 2018.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro. 2014.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro. 2019.

_____. **NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro. 2019.

_____. **NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Rio de Janeiro. 2008.

_____. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro. 2015.

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

_____. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro. 2004.

_____. **NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200).** Rio de Janeiro. 2013.

_____. **NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro. 2010.

_____. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro. 2015.

_____. **NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.** Rio de Janeiro. 2004.

_____. **NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro. 2015.

_____. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro. 2018.

_____. **NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro. 2020.

BAPTISTA JUNIOR, J.V.; RAMANEL, C. Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras. **urbe Revista Brasileira de Gestão Urbana.** v. 5, n. 2, p. 27-37. 2013

BARRETO, L.S.S. **Avaliação ambiental e econômica de ciclo de vida da gestão de resíduos de construção e demolição.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo.

BOARETTO, G.O.F. **Estudo comparativo da substituição gradativa de agregado graúdo na forma lamelar pela forma cúbica nas propriedades do concreto.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Infraestrutura) - Universidade Federal de Santa Catarina.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei no. 12.305, de 02 de agosto de 2010.** Disponível em:

<<http://www.mncr.org.br/biblioteca/legislacao/leis-e-decretos-federais.305-/Lei%20%20122010%20Politica%20de%20Residuos%20Solidos.pdf/view>>. Acesso em: 15 de maio de 2020.

BRASILEIRO, L. L. **Utilização de Agregados Reciclados Provenientes de RCD em Substituição ao Agregado Natural no Concreto Asfáltico**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Piauí.

BRASILEIRO, L. L. MATOS, J.M.E. **Reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil**. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>>. Acesso em: 04 de dezembro de 2020.

CABRAL, A.E.B.; MOREIRA, K.M.V. **Manual sobre os Resíduos Sólidos da Construção Civil**. Fortaleza. Sindicato da Indústria da Construção Civil do Ceará Sinduscon-CE, 44 p, 2011.

CABRAL, A.E.B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição de RCD**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo.

Caixa Econômica Federal. **Referência de Preços e Custos**. 2020. Disponível em: <<https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/referencias-precos-insumos/Paginas/default.aspx>> Acesso em 15 Fev 2021.

CALDEIRA, A.C.V.; SERRADILHA, V.H.; CRUZ, A.H.G; ALVES, L.G.; YOKOMIZO, L.G.P; RODRIGUES, P.S.H. Estudo e desenvolvimento de concreto permeável com função estrutural e análise de viabilidade de utilização. **Revista Engenharia em ação UniToledo**. v. 1, n. 1, p.130-141. 2016.

CBIC Dados. **Câmara Brasileira da Indústria da Construção**. 2020. Disponível em: < <http://www.cbicdados.com.br/home/>> Acesso em: 17 Nov 2020.

CAETANO, M.O.; SELBACH, J. B. O.; GOMES, L. P. Composição gravimétrica dos RCD para a etapa de acabamento em obras residenciais horizontais. **Ambiente Construído**. V.16, n.2, p.51-67, 2016.

CERVO, T.C. **Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal de Santa Maria.

CESAR, V.H.S.; BERNARDI, F. H.; DAMACENO, F.N. Estudo de viabilidade econômico-financeira da reciclagem de constituintes de resíduos de construção e demolição. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil – REEC**. v. 15, n. 2, p. 179-191. 2019.

Concreto permeável: UFF pesquisa soluções para uma urbanização sustentável. **Portal da Universidade Federal Fluminense**. 2018. Disponível em: <<http://www.uff.br/?q=noticias/15-08-2018/concreto-permeavel-uff-pesquisa-solucoes-para-uma-urbanizacao-sustentavel>> Acesso em: 04 Jan 2021.

COSTA, M.C.B. da; SILVA, L.S.; NOGUEIRA, M.H.P.; LIMA, G.K.M.; BATISTA, N.J.S. Estudo da viabilidade técnica do uso de concreto permeável em pavimentos urbanos de baixo tráfego utilizando agregado graúdo regional. **Revista de Ciência e Tecnologia**. v.5, n.8, 2019.

DAGNINO, G.B. **DCI Diário Comércio Indústria e Serviços**. 2018. Disponível em: <<https://www.dci.com.br/impreso/brasil-recicla-apenas-0-6-de-entulho-1.768517>> Acesso em: 14 Set 2019.

DE OLIVEIRA, D.D.; PIRES, D.M.; SOARES, F. D.N.; BRESSAN, G. S.C.; DESSUY, T.Y.; KRUG, L.F. Análise da influência do RCD na resistência mecânica de concretos permeáveis. **Salão do Conhecimento UNIJUI – XXV Seminário de Iniciação Científica**. 2017.

DE PAULA, P.R.F. **Utilização dos resíduos da construção civil na produção de blocos de argamassa sem função estrutural**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco.

DE PAULA JUNIOR, A.C. **Estudo do potencial de aplicação de resíduo de concreto em substituição ao agregado graúdo para concretos permeáveis**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Juiz de Fora.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Conceptual Green Infrastructure Design for Washington Street, City of Sanford**. Disponível em <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/sanford_concept_design_508.pdf>. Acesso em: 01 Fev 2021.

FARIA, A.C.; SANTANA, J.G.; BARBOSA, J.M.; DONATO, M. Pavimento de concreto drenante: estudo da granulometria que favorece a drenagem e que afete o mínimo na resistência. **33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**. p. 2016-2027, 2019.

FARIAS, I.; LOBO, M. G. **Estudo de caso do gerenciamento do recebimento do resíduo da construção civil em área de transbordo e reciclagem**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade da Região de Joinville.

FERNANDES, A.L.T.; SILVA, V.A. da. Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba. **Soc. & Nat., Uberlândia**, ano 24 n. 2, 333-344, 2012.

FIGUEIREDO, A.D.; JOLIN, M. Especificando o concreto projetado com foco em durabilidade. **54º Congresso Brasileiro do Concreto**. 2012.

FINOCCHIARO, P. S.; GIRARDI, R. Concreto permeável produzido com agregado reciclado. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, n. 5. pp. 19-26, 2017.

FUNDAÇÃO MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE. **Plano Municipal de Resíduos Sólidos**. Joinville. Lei n. 12.305/2010. Prefeitura Municipal de Joinville, 2010.

GONÇALVES, A. B.; OLIVEIRA, R. H. PAVIMENTOS PERMEÁVEIS e sua influência sobre a Drenagem. **Seminário** - Universidade de São Paulo. 2014.

GONÇALVES. M.S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. 2011. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

GONÇALVES. R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto – Um novo material para dosagens estruturais**. 2001. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo.

GONZÁLEZ, G.; VAITSMAN, D.S. Efeito do campo magnético na precipitação de parafinas. **Química Nova**. p.11-15, 1998.

GÜNEYISI, E.; GESOGLU, M.; KAREEM, Q.; IPEK, S. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. **Materials and Structures**. DOI 10.1617/s11527-014-0517-y. 2014.

JAHN, L.C. **influência do tamanho e teor de agregado nas propriedades do concreto permeável**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e análise do desempenho dos elementos de drenagem fabricados em concreto permeável**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados com resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MANTOVAN, A. H.; CARVALHO, M. R.; SILVA, C. A. R. **Utilização de resíduos de construção e demolição na substituição de agregados graúdos naturais em peças de concreto permeável.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Centro Universitário Toledo Araçatuba.

Manual da abrecon auxilia na gestão e aplicação de agregado reciclado na construção civil. **Revista Agregados Online.** Disponível em: <<https://agregadosonline.com.br/manual-abrecon-auxilia-gestao-agregado-reciclado/>> Acesso em 12 Fev 2021.

MARCHIONI, M. L.; SILVA, C.O. **Conceitos e Requisitos para Pavimentos Intertravado Permeável.** 2013. Disponível em: <https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/PR2_Conceitos_requisitos_pav_permeavel.pdf> Acesso em: 03 Out 2019.

MARIANO, H. R. **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás.

MIKAMI, R. J. **Lixiviação de sulfato e metais pesados em concreto permeável produzido com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002.** Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 12 de abril de 2020.

MONTEIRO, A. C. N. **Concreto poroso: dosagem e desempenho.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal De Goiás.

MORAND, F. G. **Estudo das principais aplicações de resíduos de obra como materiais de construção**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MUBASHIR, V. P.; VYSHAK, R.M.; ATHUL, K. E.; JARITH, P.; AFSANA, M..A.C, GOKUL, A. Pervious Concrete Block with Recycled Aggregate. **SSRG International Journal of Civil Engineering**, v. 5, 2018.

NETO, J.C.M.; CAPELINI, M.; BITTENCOURT, V.S.A.; SCHALCH, V. Impactos causados pelos resíduos de construção e demolição no meio ambiente urbano. **Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável**, p.4916, 2004.

NETO. J.T.S. **Compósito cimentício reforçado com fibras poliméricas de alta resistência mecânica**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto e Universidade do Estado de Minas Gerais.

OLIVEIRA, B.T. **Uso de resíduos de construção e demolição em argamassas para revestimento de Alvenaria**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, L.C.B. **Análise da permeabilidade e da colmatação em concretos permeáveis produzidos com agregado reciclado de concreto**. 2017. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

OLIVEIRA, M.E.D. de; SALES, R.J.M.; OLIVEIRA, L.A.S. de; CABRAL, A.E.B. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.16, n.3, 2011.

ONU-HABITAT. **Relatório Anual**. 2012. Disponível em: <<http://www.informeavina2012.org/portugues/ciudades.shtml>> Acesso em: 04 Jan 2021.

PARRIÃO, M. S. **Análise de permeabilidade e resistência do concreto permeável para vias de tráfego leve em Palmas – TO**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Palmas.

PELISSARI, V.; MATOSKI, A.; ALBERTI, M.E.; MEDEIROS, A. Absorção de água de amassamento em concretos produzidos com agregados reciclados. **Brazilian Applied Science Review**. 2020. v. 4, n. 1, p. 51-69.

PEREIRA, K. K.; BARBOSA, M. P. Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de Campinas. **XX Encontro de Iniciação Científica**, 2015.

PIRES, D.M.; SOARES, F.D.N.; DESSUY, T.Y.; BRESSAM, G.S.C.; OLIVEIRA, D.D.O.; LUCAS FERNANDO KRUG, L.F. Permeabilidade e durabilidade de concretos com substituição parcial do agregado graúdo por resíduos da construção civil. **XXV Seminário de Iniciação Científica UNIJUÍ**. 2017.

POLASTRE, B.; SANTOS, L.D. **Concreto Permeável – Impermeabilização do solo e drenagem urbana**. 2006. Disponível em: <<https://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0221/Trabalhos%20Finais%202006/Concreto%20perme%C3%A1vel.pdf>>. Acesso em: 04 Jan 2021.

QUADROS, P. A. **Estudo das correlações entre as propriedades mecânicas do concreto**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais.

RAMOS, G.M. **Análise das propriedades do concreto permeável com adição de agregado miúdo e resíduo (cinza de madeira)**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal De Santa Catarina.

RAUPP-PEREIRA, F. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais - Universidade de Aveiro).

RICCI, G.; BALBO, J. T. Resistência e elasticidade de concretos compactados com agregados reciclados de construção e de demolição para aplicações em pavimentação. **Revista TRANSPORTES**, v. 17, n. 2, p. 27-35, 2009.

RODRIGUES, C. R. S.; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Revista Ambiente Construído**, v.14, n.1, p.99-111, 2014.

ROMANINI, A. **Tamanho das partículas e granulometria dos solos**. 2017. Disponível em: < http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_14968_aula_02_-_pdf_Aula_02_-_pdf.pdf>. Acesso em: 17 Nov 2020.

ROSSIGNOLO, J.A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos**. 2003. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo.

RUBIM, N.C.; SILVEIRA, W.S.; SILVA, C.D.; ALMEIDA, S.F.; FONSECA, C.B. Concreto permeável a partir de resíduos de construção e demolição. **22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2016.

SANTOS, A. **Portal Cimentos Itambé**. 2017. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/pavimento-permeavel-contr-enchentes/>>. Acesso em: 15 Set 2019.

SANTOS, T. F.; FERNANDES, M. E.; GONÇALVES, E. P. **Pavimento intertravado permeável com resíduos da construção civil e microesferas de parafina**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale da Paraíba.

SANTOS S.; CAVALLI FILHO E.; DORNELLES J. D.; PEDRONI G. C.; PADILHA V. Z. Utilização de resíduos sólidos da construção civil como agregado graúdo na confecção de concreto. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia**, 2016.

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates**. Final Report, Civil Engineering, National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University, Ames, IA, USA, 2006.

SILVA, A.B.; MACIEL, J.C.S. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Revista IGAPÓ Tecnologia**. n. 1, p. 109-114. 2009.

SILVA, D. A.; GEYER, A. L. B. Análise e classificação da forma do agregado graúdo britado para concreto. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 03, n. 12, v. 05, p. 18-28. 2018.

SILVA, F.F. da. **Uso de métodos numéricos para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa.

SILVA JÚNIOR F.A.; MARTINELLI A.E. Análise das propriedades do agregado graúdo: brita de origem calcária, proveniente do rejeito da fabricação de cimentos, para compósitos cimentícios. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2014.

SILVA, R. B da; ANGULO, S. C.; PILEGGI, R. G.; SILVA, C. O. Concretos secos produzidos com agregados reciclados de RCD separados por densidade. **Ambiente Construído**. v. 15, n. 4, p. 335-349. 2015.

SILVA, V.R.G. **Estudo dos parâmetros ambientais, químicos e mineralógicos dos agregados reciclados oriundos da construção civil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba.

SOUZA, L. M.; ASSIS, C. D. de; SOUTO, S. B. G. Agregado reciclado: um novo material da construção civil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. v. 18, n. 1, p.273-278. 2014

SOUZA, P.A.B.F. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. 2007. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

STRZODA, F.A.; MORAES, M.L.; MAGALHÃES, F.C.; REAL, M.V. Concreto permeável como alternativa para pavimentos retro portuários. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. v. 9, n. 2. p.155-164. 2017

TAVARES, L.M.; KAZMIERCZAK, C.S. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. **Revista IBRACON Structures and Materials Journal**. v.9, n. 1, p. 75-90. 2016.

TESTAI, H.R.; RESENDE, K.L.; LOPES, T. J.; FERNANDES, G. A. Avaliação do processo de obtenção de microesferas de parafina através de metodologia de superfície de resposta (MSR). **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. p.2, 2014.

UNIC Rio de Janeiro. **Centro de Informações das Nações Unidas no Brasil**. 2012. Disponível em: <https://unicrio.org.br/onu-lanca-relatorio-sobre-cidades-latino-americanas/>. Acesso em: 17 Nov 2020.

VARGAS, C. **Análise da gestão de resíduos da construção civil no estado do paraná e município de Cascavel**. 2018. Dissertao (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

VIDAL, A. S. **Caracterizao de concreto permeável produzido com agregados reciclados de construo e demolio para utilizao em pavimento permeável em ambiente urbano**. 2014. Dissertao (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliao da resistência  compressão, resistência  traço e formao de microfissuras em concretos produzidos com

diferentes tipos de cimentos, quando aplicado um pré-carregamento de compressão.

Ambiente Construído. v. 11, n. 1, p. 25-40. 2011.

VOTORANTIM. **Guia de Produtos**. 2018. Disponível em:

<<https://www.votorantimcimentos.com.br/wp-content/uploads/2019/08/guia-de-produtos-votorantim-cimentos-2019.pdf>>. Acesso em: 03 Jun 2020.

ZHANG, Q.; FENG, X.; CHEN, X.; LU, K. Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology. **Construction and Building Materials**. n.259. 2020.

ANEXO I – Folder explicativo dos serviços da Terraplanagem Medeiros

A Terraplanagem Medeiros, tem como atividade principal obras de terraplanagem e drenagem, e é especializada no recebimento, tratamento e destinação final de resíduos de madeira e concreto.

Os materiais são transportados para a unidade da empresa que dá a correta destinação dos resíduos, colaborando para a sadia qualidade de vida e meio ambiente da região, como modo de prevenção e precaução.

BENEFÍCIOS DA RECLAGEM

Diminuição da exploração de recursos naturais.

Reforço e utilização dos recursos gerados pelos aterros sanitários (terra fértil e água).

Redução dos impactos socioambientais causados pelo descarte inadequado dos resíduos, tal como a contaminação do solo, da água, a poluição do ar e a geração de lixo.

Sócio meio:
Terraplanagem Medeiros Ltda.
R. Dona Francisca, 9275 - Zona Industrial,
Joinville - SC - 89218-100
www.terrapiagemmedeiros.com.br
(47) 3425-5555

CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS

Wu como são classificados e como devem ser descartados os resíduos de obras, conforme a Resolução CONAMA nº 400/2012.

TIPOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Classe A - Materiais que podem ser processados e britados.
Resíduos Recicláveis, como agregados, tijolos, blocos, telhas, argamassa, concreto, areia e pedras.

Classe B - Materiais que podem ser processados e triturados.
Resíduos Recicláveis para outras destinações, tais como plástico, papel, papéisão, metais, vidros, madeira e gesso.

Classe C
Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem ou recuperação.

Classe D
Resíduos Perigosos, como óleos, solventes, gases e outros.

DESCRIÇÃO DE CADA UMA DAS PARTES

O contêiner (caminhão) e o caminhão:

- pelo transporte e destinação correta dos materiais descartados nas caçambas;
- pelo descarte correto dos materiais em cada caçamba;
- pela separação dos materiais que não poderão ser reciclados;
- pelo respeito ao limite de capacidade do contêiner;
- pelo fornecimento correto dos dados para o preenchimento do MTR (Manifesto de Transporte de Resíduos).

O transportador da caçamba é responsável:

- pela transporte e destinação correta dos materiais descartados nas caçambas;
- por manter a caçamba na estrada, caso os materiais não estejam acondicionados corretamente;
- por identificar e gerar os resíduos através do MTR (Manifesto de Transporte de Resíduos).

DESCARTE CONSCIENTE DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL



A Terraplanagem Medeiros trabalha com a coleta de Resíduos Sólidos oriundos da Construção Civil e são tratados conforme a legislação vigente. O objetivo é o destino correto dos resíduos, dando a eles o tratamento adequado, sempre pensando no Meio Ambiente.

RECLAGEM e MEIO AMBIENTE

Grande parte da matéria-prima utilizada na fabricação da construção civil trata-se de recursos naturais não renováveis (minerais) e, além disso, a reciclagem desses materiais foge ao custo e significativamente baixa. Por isso, a Terraplanagem Medeiros, preocupada com o meio ambiente, está implementando o processo de reciclagem dos resíduos da construção civil (RCC). Desta forma, fornece para seus clientes uma alternativa viável e ambientalmente correta da destinação final destes resíduos, evitando a extração de recursos da natureza, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do planeta. O descarte irregular de resíduos da construção civil em locais públicos, acarreta grandes impactos ao meio ambiente e na sociedade. Para solucionar os problemas causados pelo rejeito incorreto destes resíduos, a Terraplanagem Medeiros processa os materiais com a utilização de equipamentos de britagem e trituradores, transformando estes resíduos em matéria-prima para uso em obras.



O QUE PODE SER DESCARTADO NAS CAÇAMBAS?

Caçamba - Alvenaria
Materiais que possam ser processados ou britados.



Tijolos - telhas - pisos - placas de revestimento - cimento - grãos - estacas - vigas - laje - blocos estruturais - gesso - reboco - terra - areia

Caçamba - Madeira
Materiais que possam ser processados ou triturados.



Tábua - compensado - caixas - garrafões - portas - resto de ferramentas

Caçamba - Recicláveis



Plástico - papel - papéisão - latas, vidros e garrafões PET (pingua e sêco) - metais

Caçambas - Específicas*

- 1) Caçamba para Argila
- 2) Caçamba para Amianto
- 3) Caçamba para Gesso

*Estes materiais serão enviados a um aterro industrial para manejo específico.

O QUE NÃO PODE SER DESCARTADO NAS CAÇAMBAS?



Líquido - Resíduos orgânicos (restos de comida) - solventes orgânicos - garrafões PET (suco) - latas com tinta, óleo, solventes - pneus e estacas - óleos, gases, aditivos - poças de graxa e fitagem - lodo

Esses materiais devem ser separados na obra e destinados a outra caçamba especificamente atendida para este fim, cujo destino será dado pela Terraplanagem Medeiros, para manejo específico em um aterro industrial.



Fonte: Terraplanagem Medeiros (2019)

AUTORIZAÇÃO

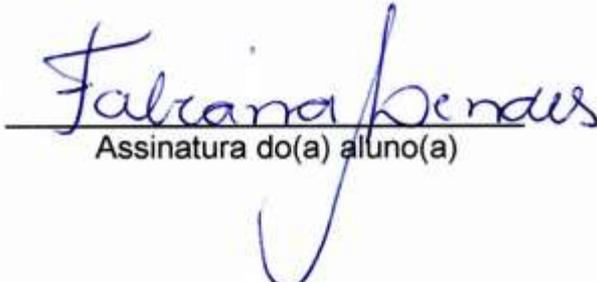
Nome do(a) autor(a): FABIANA MENDES

RG: 2.279.882

Título da Dissertação: PROPOSTA DE PAVIMENTO PERMEÁVEL PARA TRÁFEGO LEVE A MODERADO A PARTIR DE CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO E PARAFINA COMO AGENTE ESPAÇADOR

Autorizo a Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, através da Biblioteca Universitária, disponibilizar cópias da dissertação de minha autoria.

Joinville, 07 de maio de 2021.


Assinatura do(a) aluno(a)