

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

IAGO DE OLIVERA

**CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADO RECICLADO PARA
USO EM PAVIMENTAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2017

IAGO DE OLIVEIRA

**CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADO RECICLADO PARA
USO EM PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. André Nagalli

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Amanda Dalla Rosa Johann

CURITIBA

2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADO RECICLADO PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO

Por

IAGO DE OLIVEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 3 de julho de 2017, pela seguinte banca de avaliação:

Prof. Orientador – André Nagalli, Dr.
UTFPR

Prof^a. Coorientadora – Amanda Dalla Rosa Johann, Dra.
UTFPR

Prof. Adauto José Miranda de Lima, Dr.
UTFPR

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

À todas aquelas pessoas que lutam pelos seus ideais, impactando a sociedade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço toda minha família, meus avós, tios, primos, por todo o apoio durante a minha jornada, pela confiança e o apoio incondicionais. Especialmente, agradeço os meus pais, Daniella e Itamar, pela dedicação incansável, por serem meus exemplos de vida, amor e carinho.

Ao meu irmão Caio, meu ídolo, dono da minha admiração, agradeço por estar sempre ao meu lado e ser o farol das coisas essenciais na minha vida.

Meu namorado, Rodolfo, por ser meu motivador companheiro de todos os dias, nas pesquisas, no laboratório e por ser meu consultor na minha apresentação.

A todos os meus amigos que são suporte na minha caminhada. Aos meus “Brothers”, “Turma do Churras”, “Caverna”, amigos de Areado, Swansea e Curitiba, muito obrigado por estarem comigo durante a elaboração desse trabalho.

Agradeço também aos meus mestres, professores André e Amanda, por me guiarem neste trabalho, por orientarem da melhor maneira para que alcançássemos juntos sucesso nos nossos objetivos. Também agradeço ao professor Aauto, pelas valiosas contribuições nesse trabalho, e pela ajuda para a obtenção dos materiais para o estudo. Que vocês saibam que representam de maneira justa o grupo dos melhores e mais dedicados professores da UTFPR.

Não menos importante, agradeço à excepcional ajuda dos técnicos dos laboratórios de materiais do Departamento de Construção Civil da UTFPR, Gustavo e Felipe, pela ajuda com os ensaios, pela orientação com a pesquisa e os rumos do meu trabalho. O conhecimento de vocês foi essencial para essa pesquisa.

“When you pray, move your feet.”

African Proverb

“Quando rezar, mexa os pés”

Provérbio Africano

RESUMO

DE OLIVEIRA, Iago. Concreto permeável com agregado reciclado para uso em pavimentação. 2017. 110f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

A construção civil é a atividade com maior volume de geração de resíduos sólidos no mundo, e também responsável por boa parte da extração mineral na atualidade. Um dos principais produtos dessa indústria, os pavimentos urbanos, são normalmente impermeáveis, gerando acúmulo de água nos centros urbanos e danificando o ciclo hidrológico natural. Esses materiais são muitas vezes escuros, contribuindo para o efeito ilha de calor. Com o objetivo de minimizar esses efeitos danosos, é notável a importância de pesquisas para o desenvolvimento de pavimentos que sejam permeáveis, de alta refletância, que levem resíduos reciclados em sua composição e apresentem resistência mecânica adequada ao seu uso. Assim, esse trabalho trata do estudo das propriedades do concreto com substituição do agregado virgem por agregados reciclados, assim como apresenta propriedades físicas, químicas e mecânicas desse material. O agregado reciclado utilizado foi obtido na região metropolitana de Curitiba. Foi realizada a caracterização granulométrica do material, com a determinação do índice de material pulverulento, absorção, massa específica, índice de suporte, expansibilidade, abrasão, índice de cloretos e sulfatos. Foi produzido então um concreto permeável com alto índice de agregado graúdo, com diferentes taxas de substituição do agregado virgem por reciclado (0%, 30%, 70% e 100%). No concreto fresco foi determinada o abatimento de tronco de cone, e no material endurecido foi determinada a resistência à compressão, tração e tração na flexão, assim como o índice de vazios, absorção, refletância e permeabilidade. A caracterização do agregado reciclado mostrou índices de contaminação por sulfatos e cloretos muito baixos, valores adequados ao limite estabelecido pela norma brasileira que rege sobre agregado reciclado para concreto e pavimentos. Outros índices também foram comparados com a normativa e atendem aos requerimentos, como coeficiente de não uniformidade, expansibilidade e abrasão. Também, todos os ensaios com o concreto foram avaliados em relação à substituição do agregado natural por material reciclado. Com isso, verificou-se que, conforme há a substituição por agregados reciclados, acontece uma queda na resistência mecânica, massa específica e permeabilidade, e um aumento na absorção e índice de vazios. Em todas as composições, o concreto apresentou uma reflexão de luz cerca de 3 vezes maior do que o asfalto. Os valores de resistência mecânica, em comparação com os requerimentos da norma nacional de pavimentos permeáveis, indicam que o material está apto a ser utilizado como placa de concreto permeável e concreto permeável aplicado no local, tanto para tráfego de pedestres quanto para tráfego leve de veículos, inclusive a composição com 100% de agregado reciclado, que apresenta 86,35% em massa de reciclado total incorporado.

Palavras-chave: Concreto permeável. Agregado reciclado. Pavimentos. RCD.

ABSTRACT

DE OLIVEIRA, Iago. Permeable concrete for paving using recycled aggregate. 2017. 110f. Final Project – Civil Engineering, Civil Construction Department, Federal University of Technology – Paraná, Curitiba - PR - Brazil, 2017.

Civil construction is the activity with the largest volume of solid waste generation in the world, and also responsible for a considerably part of the mineral extraction nowadays. One of the main products of this industry, urban pavements, are usually impermeable, generating water accumulation in urban centres and damaging the natural hydrological cycle. These materials are often dark, contributing to the island heat effect. Aiming to minimize these harmful effects, it is remarkable the importance of research for the development of floors that are permeable, high reflectance, leading recycled waste in its composition and with adequate mechanical resistance to its use. Thus, this work deals with the study of concrete properties with replacement of the virgin aggregate by recycled aggregates, as well as the physical, chemical and mechanical properties of this material. The recycled aggregate used was obtained in the metropolitan region of Curitiba. It was carried out the granulometric characterization of the material, with determination of the powdery material quantity, absorption, specific mass, support index, expansibility, abrasion, index of chlorides and sulphates. A permeable concrete with a high aggregate index was then produced, with different rates of substitution of the virgin aggregate by recycled (0%, 30%, 70% and 100%). In the fresh concrete the slump test was made, and in the hardened material the compressive strength, traction and tensile strength in the flexion, as well as the voids index, absorption, reflectance and permeability were determined. The characterization of the recycled aggregate showed very low contamination rates by sulphates and chlorides, values adequate to the limit established by the Brazilian standard that rules on recycled aggregate for concrete and pavements. Other indexes were also compared to the standard and meet the requirements, such as coefficient of non-uniformity, expandability and abrasion. Also, all concrete tests were evaluated in relation to the replacement of the natural aggregate with recycled material. As a result, there was a decrease in the mechanical strength, specific mass and permeability, and an increase in the absorption and voids index. In all compositions, the concrete had a light reflection about 3 times larger than the asphalt. The mechanical strength values, compared to the requirements of the national pervious pavement standard, indicate that the material is suitable for use as permeable concrete and permeable concrete applied on site for both pedestrian traffic and light vehicular traffic, including the composition with 100% recycled aggregate, which presents 86.35% by mass of total recycled content.

Key-words: Permeable concrete. Recycled aggregate. Paving. CDW.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – COBERTURAS IMPERMEÁVEIS E ESCOAMENTO DE ÁGUAS PLUVIAIS	23
FIGURA 2 - BENEFÍCIOS DA RECICLAGEM DE RCC.....	33
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TÉCNICA DE RECICLAGEM DO AGREGADO RECICLADO	34
FIGURA 4 - PLANTA DE PRODUÇÃO DO AGREGADO RECICLADO	35
FIGURA 5 - DIAGRAMA DA PRODUÇÃO DE AGREGADO RECICLADO.	36
FIGURA 6 - CORTE ESQUEMÁTICO DE UM PAVIMENTO PERMEÁVEL EM CONCRETO.....	48
FIGURA 7 - ARMAZENAMENTO DO AGREGADO RECICLADO NO DEPARTAMENTO DE MANUTENÇÃO URBANA	60
FIGURA 8 - ENSAIO DE GRANULOMETRIA DO AGREGADO RECICLADO	63
FIGURA 9 - ENSAIO DE GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO VIRGEM ...	64
FIGURA 10 - ARMAZENAMENTO DOS CORPOS DE PROVA NAS PRIMEIRAS 24 HORAS	71
FIGURA 11 - ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL APÓS ROMPIMENTO DO CORPO DE PROVA.....	72
FIGURA 12 - EQUIPAMENTO DE DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE, ANTES E DEPOIS DA SELAGEM	77
FIGURA 13 - LUXÍMETRO PHYWE COM SENSOR DO TIPO "SONDA"	79
FIGURA 14 - REALIZAÇÃO DO ENSAIO COM O SENSOR DO TIPO "SONDA"	81
FIGURA 15 - ACÚMULO DE ARGAMASSA NAS PAREDES DA BETONEIRA	89
FIGURA 16 - ENSAIO DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE COM O CONCRETO.....	90

LISTA DE QUADROS E TABELAS

TABELA 1 - POPULAÇÃO DO MUNDO E SUAS GRANDES ÁREAS EM 2015, 2030, 2050 E 2100, DE ACORDO COM A PROJEÇÃO MÉDIA.....	19
TABELA 2 - DISTRIBUIÇÃO DOS MUNICÍPIOS, POR PERCENTUAL DE RUAS PAVIMENTADAS NA ÁREA URBANA, SEGUNDO AS GRANDES REGIÕES - 2008.....	24
TABELA 3 - PERCENTUAL DE MUNICÍPIOS QUE TIVERAM EROÇÃO NOS ÚLTIMOS 5 ANOS, POR TIPO DE EROÇÃO, SEGUNDO AS GRANDES REGIÕES - 2008.....	25
TABELA 4 – REFLETÂNCIA DOS MATERIAIS PADRÕES DE PAVIMENTAÇÃO ..	26
TABELA 5 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DO TOTAL DE MUNICÍPIOS COM RUAS PAVIMENTADAS NA ÁREA URBANA, SEGUNDO AS GRANDES REGIÕES - 2000/2008.....	27
TABELA 6 - ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS DE CONCRETO.....	37
TABELA 7 - REQUISITOS GERAIS PARA AGREGADO RECICLADO DESTINADO A PAVIMENTAÇÃO	42
TABELA 8 - REQUISITOS ESPECÍFICOS PARA AGREGADO RECICLADO DESTINADO A PAVIMENTAÇÃO.....	42
TABELA 9 - REQUISITOS PARA AGREGADO RECICLADO DESTINADO AO PREPARO DE CONCRETO SEM FUNÇÃO ESTRUTURAL.....	43
TABELA 10 - TEOR DE MATERIAL PULVERULENTO DO AGREGADO RECICLADO MIÚDO DA REGIÃO DE CURITIBA.....	44
TABELA 11 - MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO RECICLADO MIÚDO DA REGIÃO DE CURITIBA.....	44
TABELA 12 - ABSORÇÃO DO CONCRETO	44
TABELA 13 - ABSORÇÃO DO AGREGADO RECICLADO MIÚDO DA REGIÃO DE CURITIBA PARA DIFERENTES TEMPOS DE IMERSÃO EM ÁGUA .	44
TABELA 14 - ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO.	44
TABELA 15 - MASSA ESPECÍFICA SECA DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO.	45
TABELA 16 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO AOS 28 DIAS, EM MPA.....	45
TABELA 17 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO CONCRETO AOS 28 DIAS, EM MPA.	45
TABELA 18 - CARACTERÍSTICAS DOS PAVIMENTOS ANALISADOS	49
TABELA 19 - SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CONCRETO PERMEÁVEL.....	53
TABELA 20 - ESPECIFICAÇÃO PARA O MATERIAL DE SUB-BASE E/OU BASE .	54
TABELA 21 - ESPECIFICAÇÃO PARA O MATERIAL DE ASSENTAMENTO.....	54
TABELA 22 - ESPECIFICAÇÃO PARA O MATERIAL DE REJUNTAMENTO.....	54
TABELA 23 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE NO PAVIMENTO.....	55
TABELA 24 - RESISTÊNCIA MECÂNICA E ESPESSURA MÍNIMA DO REVESTIMENTO PERMEÁVEL	55
TABELA 25 - CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS ANALISADOS	83
TABELA 26 - PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGREGADO RECICLADO	84
TABELA 27 - ABSORÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS	84

TABELA 28 - MASSA ESPECÍFICA DOS AGREGADOS GRAÚDOS.....	85
TABELA 29 - ABRASÃO DO AGREGADO RECICLADO	86
TABELA 30 - ENSAIOS QUÍMICOS REALIZADOS COM O AGREGADO RECICLADO	86
TABELA 31 - TRAÇOS UTILIZADOS PARA AS COMPOSIÇÕES DE CONCRETO	88
TABELA 32 - RECÍCLADO INCORPORADO NOS TRAÇOS DE CONCRETO ANALISADOS	88
TABELA 33 - RESISTÊNCIAS MECÂNICAS MÉDIAS DAS COMPOSIÇÕES DE CONCRETO.....	93
TABELA 34 - INTENSIDADE LUMINOSA REFLETIDA PELAS SUPERFÍCIES.....	97
TABELA 35 - ANÁLISE DA REFLEXÃO LUMINOSA DAS SUPERFÍCIES.....	97
QUADRO 1 - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO ...	62

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - POPULAÇÃO URBANA E RURAL NO MUNDO, 1950-2050	20
GRÁFICO 2 - EMISSÕES ATUAIS DE CARBONO ASSOCIADAS COM INFRAESTRUTURA.....	21
GRÁFICO 3 – COBERTURAS IMPERMEÁVEIS POR USOS TÍPICOS DE TERRENO.....	26
GRÁFICO 4 – ÁREAS PAVIMENTADAS POR TIPO DE USO	27
GRÁFICO 5 – MUNICÍPIOS COM SERVIÇO DE MANEJO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	30
GRÁFICO 6 – DISPOSIÇÃO NO SOLO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS.....	30
GRÁFICO 7 – MUNICÍPIOS COM SERVIÇO DE PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	31
GRÁFICO 8 – MUNICÍPIOS COM SERVIÇO DE REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	32
GRÁFICO 9 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM FUNÇÃO DO EFEITO ISOLADO DO TEOR DE SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO.....	39
GRÁFICO 10 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (FT'F) E POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (FT'D) EM FUNÇÃO DO EFEITO ISOLADO DE AGREGADO MIÚDO RECICLADO.....	39
GRÁFICO 11 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS.....	40
GRÁFICO 12 - VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS....	40
GRÁFICO 13 - TAXA DE INFILTRAÇÃO DE DOIS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS AO LONGO DO TEMPO NA SUÉCIA.....	47
GRÁFICO 14 - TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE DO MATERIAL AO LONGO DO TEMPO	50
GRÁFICO 15 - TAXA DE EVAPORAÇÃO AO LONGO DO TEMPO	50
GRÁFICO 16 - EFEITO DA PROFUNDIDADE DA ÁGUA NA TAXA DE EVAPORAÇÃO	51
GRÁFICO 17 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE DOIS CONCRETOS PERMEÁVEIS, COM E SEM CINZA VOLANTE	52
GRÁFICO 18 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CONCRETO PERMEÁVEL UTILIZANDO DIFERENTES GRANULOMETRIAS DE AGREGADO RECICLADO	56
GRÁFICO 19 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM CONCRETO PERMEÁVEL, UTILIZANDO DIFERENTES AGREGADOS	57
GRÁFICO 20 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM DIFERENTES RELAÇÕES DE AGREGADO RECICLADO.....	58
GRÁFICO 21 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO EM DIFERENTES RELAÇÕES DE AGREGADO RECICLADO	58
GRÁFICO 22 - RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E PORCENTAGEM DE AGREGADO RECICLADO SOBRE CIMENTO, EM CONCRETO PERMEÁVEL	59
GRÁFICO 23 - INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO ALTURA/DIÂMETRO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	73
GRÁFICO 24 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS UTILIZADOS.....	82

GRÁFICO 25 - UMIDADE ÓTIMA DO AGREGADO MIÚDO RECICLADO	85
GRÁFICO 26 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA AJUSTADA DOS AGREGADOS UTILIZADOS	87
GRÁFICO 27 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	91
GRÁFICO 28 - RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DO CONCRETO.....	92
GRÁFICO 29 - MASSA ESPECÍFICA DAS COMPOSIÇÕES DE CONCRETO	94
GRÁFICO 30 - ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIO DAS COMPOSIÇÕES DE CONCRETO ANALISADAS	94
GRÁFICO 31 - EVOLUÇÃO DA PERMEABILIDADE NAS COMPOSIÇÕES DE CONCRETO.....	95

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS E A INFRAESTRUTURA URBANA	19
2.1.1 Impermeabilização Urbana	22
2.1.2 Efeito Ilha de Calor	25
2.1.3 Consumo de Recursos Naturais	28
2.1.4 Resíduos Sólidos da Construção Civil	29
2.2 AGREGADO RECICLADO PARA CONCRETO	32
2.2.1 Agregado Reciclado da Região de Curitiba	43
2.3 CONCRETO PERMEÁVEL.....	45
2.3.1 Concreto Permeável com Agregado Reciclado	55
3 MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	60
3.1.1 Agregado Reciclado	60
3.1.2 Agregado Graúdo Virgem	61
3.1.3 Agregado Miúdo Virgem	61
3.1.4 Cimento Portland CP-V ARI.....	61
3.1.5 Água	62
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	62
3.2.1 Composição Granulométrica	63
3.2.2 Índice de Forma.....	64
3.2.3 Torrões de Argila e Materiais Friáveis	65
3.2.4 Absorção de Água	65
3.2.5 Massa Específica.....	66
3.2.6 Material Pulverulento	67
3.2.7 Umidade Ótima.....	68
3.2.8 Resistência à Abrasão.....	68
3.2.9 Determinação de Cloretos	69
3.2.10 Determinação de Sulfatos.....	69
3.3 CONCRETO EM ESTADO FRESCO.....	69
3.3.1 Processo de Mistura	70
3.3.2 Abatimento do Tronco de Cone	71
3.3.3 Moldagem dos Corpos de Prova	71
3.4 CONCRETO EM ESTADO ENDURECIDO	72
3.4.1 Compressão Axial.....	72
3.4.2 Tração por Compressão Diametral.....	74
3.4.3 Tração na Flexão.....	74
3.4.4 Determinação do Índice da Vazios, Absorção e Massa Específica	75
3.4.5 Permeabilidade.....	76
3.4.6 Refletância.....	79
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	82
4.1.1 Características Físicas.....	82

4.1.2	Conteúdo de Sulfatos e Cloretos	86
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EM ESTADO FRESCO	87
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EM ESTADO ENDURECIDO	90
4.3.1	Resistência Mecânica	90
4.3.2	Absorção, Índice de Vazios e Massa Específica	93
4.3.3	Permeabilidade	95
4.3.4	Refletância	96
5	CONCLUSÕES	99
6	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	100
	REFERÊNCIAS	101
	ANEXO A – DECLARAÇÃO AMBIENTAL DO CIMENTO	106
	ANEXO B – RELATÓRIO DE ENSAIOS DO CIMENTO	107

1 INTRODUÇÃO

Impactos ambientais, que são alterações no meio ambiente causadas por atividades humanas (CAMBRIDGE, 2016), acontecem continuamente, com diferentes níveis de gravidade, por uma ampla gama de atividades causadoras.

Com o passar do tempo, com o aumento contínuo da população na Terra e o aumento na taxa de urbanização ao redor do mundo, esses impactos vêm crescendo de maneira acelerada (VENHAUS, 2012). E, pela contribuição e combinação dessas ocorrências, vive-se a crise do clima.

Esta crise afeta o planeta como um todo, e não exclusivamente o entorno das fontes de impacto, tendo então uma relevância global. Afeta biomas, serviços ecossistêmicos, causa extinções na fauna e na flora (ARCHER; RAHMSTORF, 2010). De maneira direta, essa crise cria uma nova classe de refugiados: refugiados por desastres ambientais e mudanças climáticas. Isso porque uma das principais vertentes é a alta emissão de gases do efeito estufa, que, entre muitas consequências, causa uma desregulagem no clima, alterando correntes de ar, de água e aumento na temperatura média em diferentes regiões do planeta.

Dentre as principais atividades que contribuem para a evolução dessa crise, a construção civil tem um papel de grande relevância: desde o alto consumo energético, contaminação ambiental de solos e corpos d'água, até destruição de fauna e flora.

Especificamente nesse trabalho pretende-se analisar os impactos do efeito ilha de calor dos centros urbanos, impermeabilização dos solos pavimentados, consumo de matéria prima virgem natural e alta taxa de geração de resíduos.

Envolvendo todos esses impactos ambientais e observando as necessidades e insumos comumente utilizados na construção civil, faz-se necessário desenvolver um material de pavimentação que atue para mitigar esses danos, que seja ele relevante do ponto de vista de cumprir os requisitos técnicos desse tipo de material, e que possa ser produzido em escala comercial, de modo a vir atingir seu objetivo.

O principal desafio quando se trata de um material com alta taxa de vazios, é a esperada queda de resistência em comparação à um exemplar convencional, que pode vir a inviabilizar o material.

Também, é necessário, para que se alcance sucesso no modelo, entender qual o comportamento da água ao passar pelo material e atingir as próximas camadas do pavimento. É importante que se avalie os impactos desse fluxo, quais os possíveis danos e qual o melhor modelo a ser seguido para que presumíveis problemas sejam extinguidos ou diminuídos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem o objetivo geral de investigar de forma experimental um traço de concreto permeável que utilize alta taxa de componentes reciclados, que seja de fácil produção e aplicação e que possa ser utilizado em larga escala.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos dessa pesquisa resumem-se a:

- Investigar as características do agregado reciclado da região de Curitiba e fazer sua caracterização física e química;
- Comparar as características do agregado reciclado regional, com base na literatura científica e trabalhos prévios, a fim de entender se existe uma previsibilidade no seu comportamento;
- Obter um traço de concreto permeável para pavimentação que atenda às aos requisitos de resistência mecânica para o seu uso, assim como atenda aos valores mínimos estabelecidos em normativas aplicáveis;
- Desenvolver uma especificação de concreto que maximize o uso de componentes que sejam reciclados ou que contenham compostos reciclados incorporados, dando preferência a reciclados pós-consumo;
- Desenvolver um concreto que utilize materiais com alta taxa de refletância solar;

- Avaliar o comportamento da água ao passar pelo concreto permeável quando usado para pavimentação.

1.2 JUSTIFICATIVA

A chamada para a mudança no que se trata da crise do clima é cada vez mais urgente – e cada vez o risco é maior dos efeitos serem irreversíveis. Nesse sentido, é necessário que a construção civil, que é responsável por grande parte da pegada ambiental, tenha cada vez mais uma postura de preocupação ativa com a sustentabilidade ambiental no planeta Terra.

Dentre os principais impactos negativos da construção civil, muitos estão ligados aos materiais de construção e suas características, como tipo e origem da matéria prima. Alguns são ligados a urbanização e estruturas urbanas, como impermeabilização do solo e efeito ilha de calor. E, como principal atividade geradora, existem a questão dos resíduos sólidos.

Esses motivos, portanto, justificam a pesquisa por um concreto que possa ser usado para pavimentação e tenha alta taxa de compostos reciclados e conseqüente menor uso por matéria prima virgem, alta permeabilidade de água e alta taxa de reflexão solar.

Uma outra questão a ser apontada quando se trata de componentes reciclado é a de fomentar o mercado desses materiais que, ora foram – e são- descartados como lixo e que podem despontar como um produto com valor agregado e ser fonte de renda para um setor tão pouco valorizado: o dos resíduos. Mercado esse que historicamente no Brasil envolve uma parcela da população que tem poucas oportunidades.

Então, desenvolver um concreto permeável a partir de material reciclado, ao mesmo tempo que afeta positivamente a questão ambiental da construção civil, pode ter alto impacto social nas camadas mais pobres da sociedade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS E A INFRAESTRUTURA URBANA

De acordo com o Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), no documento *Perspectivas da População Mundial*, o número de habitantes no planeta Terra ultrapassou a marca dos 7 bilhões de habitantes com previsão, até 2030, de um avanço para 8,5 bilhões, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - População do mundo e suas grandes áreas em 2015, 2030, 2050 e 2100, de acordo com a projeção média

Área	População (milhões)			
	2015	2030	2050	2100
Mundo	7349	8501	9725	11213
África	1186	1679	2478	4387
Ásia	4393	4923	5267	4889
Europa	738	734	707	646
América Latina e Caribe	634	721	784	721
América do Norte	358	396	433	500
Oceania	39	47	57	71

Fonte: ONU (2015)

Ainda segundo o mesmo departamento, na publicação *Perspectivas da Urbanização Mundial*, a Organização exibe a tendência de urbanização da população global (ONU, 2014), mostrando o crescimento da parcela que vive nas cidades em relação ao crescimento dos moradores da zona rural, como pode ser observado no Gráfico 1.

Em 2007, pela primeira vez na história, a população urbana ultrapassou a população rural. É esperado que, por volta do ano 2050, aproximadamente 2/3 da população esteja presente nas cidades, como pode ser visto no Gráfico 1.

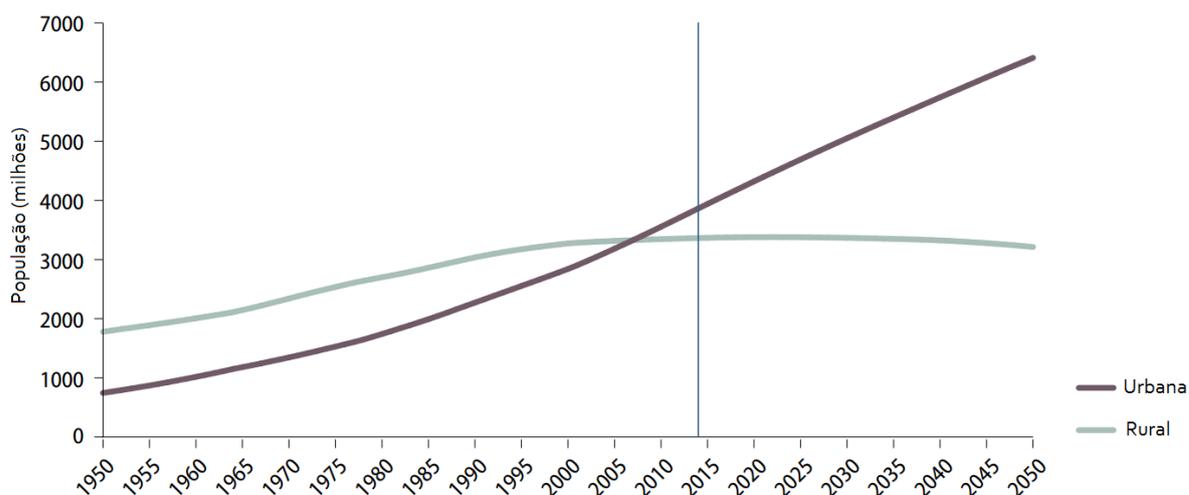


Gráfico 1 - População urbana e rural no mundo, 1950-2050

Fonte: ONU (2015)

Esse contingente populacional em crescimento traz a necessidade de investimentos em infraestrutura urbana, que levam consigo os impactos da sua instalação e manutenção. Segundo estudo apresentado pela Coroa Britânica (REINO UNIDO, 2013), no Reino Unido, que tem um índice de 82% da população vivendo nas cidades (ONU, 2014), da pegada de carbono total¹ do país (incluindo emissões territoriais e importadas), 53% é associada à infraestrutura, como pode ser visto no Gráfico 2.

É possível observar, então, em linhas gerais, o grande impacto ambiental atrelado aos investimentos em infraestrutura.

¹ É a medida da quantidade de dióxido de carbono que determinada produz em suas atividades (CAMBRIDGE, 2016).

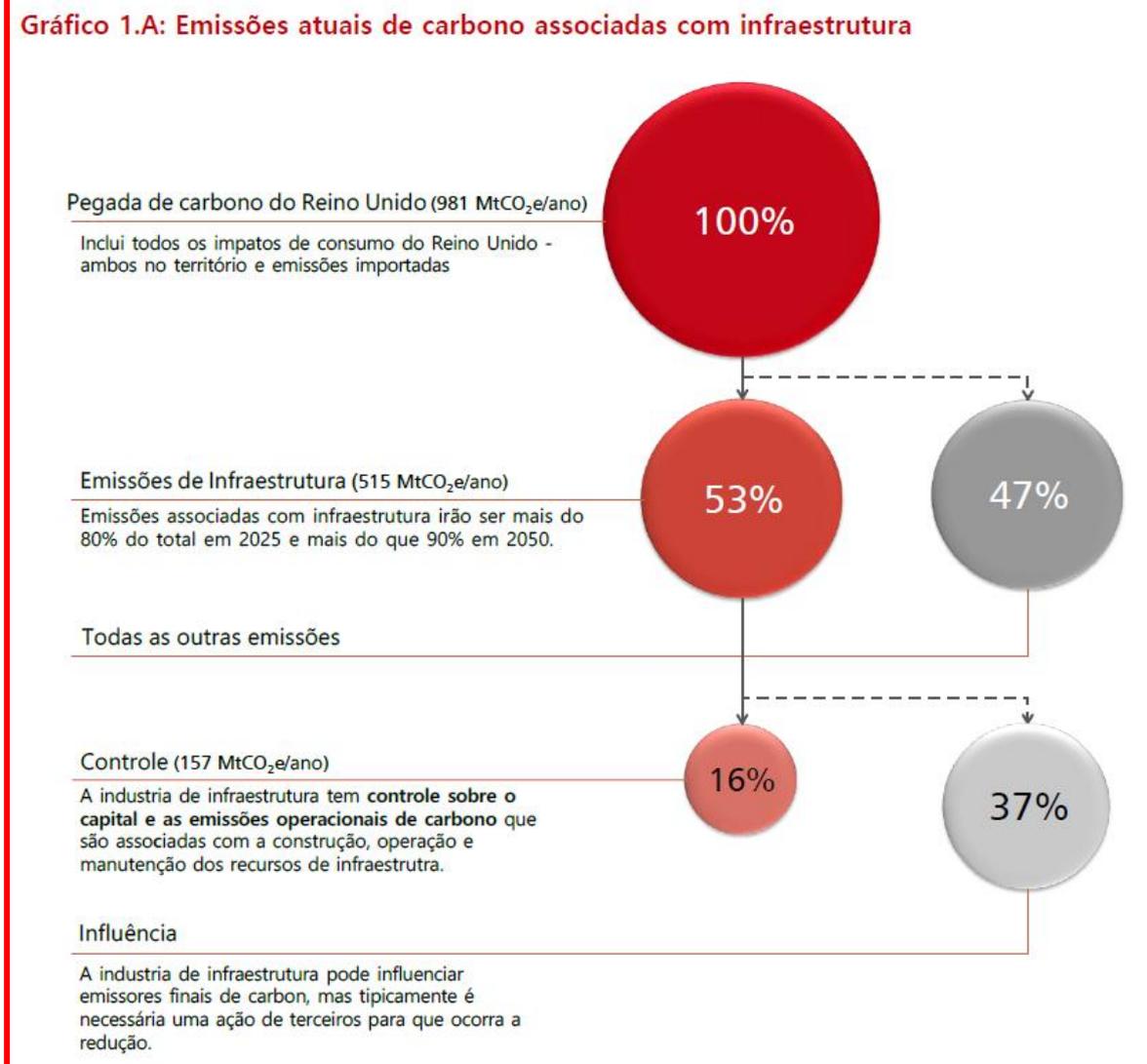


Gráfico 2 - Emissões atuais de carbono associadas com infraestrutura
Fonte: Green Construction Board apud Reino Unido (2013)

Um dos principais elementos de infraestrutura urbano é a pavimentação, que utiliza, em sua maioria, materiais impermeáveis sob o solo natural. Os pavimentos urbanos são utilizados para facilitar o tráfego de pedestres e veículos

A seguir neste capítulo, serão abordados quatro dentre os principais problemas atrelados à pavimentação: a impermeabilização do solo, o efeito ilha de calor nos centros urbanos, o vasto uso de matéria prima virgem de origem natural e a questão da alta taxa de geração de resíduos na construção civil.

2.1.1 Impermeabilização Urbana

O sistema de drenagem urbana tem importância essencial para o gerenciamento das cidades, com o objetivo de evitar prejuízos à saúde da população e promover segurança e o bem-estar no meio urbano. Esse sistema engloba a pavimentação das vias, redes superficiais e subterrâneas de captação e transporte de águas pluviais e o tratamento desse efluente (IBGE, 2008).

A pavimentação das vias, entretanto, transforma os espaços urbanos em áreas impermeabilizadas. Isso faz com haja um aumento na taxa de escoamento superficial da água da chuva. Essa taxa representa a parcela da água da chuva que não penetra o substrato e escoar sobre a última camada de cobertura, no caso, o pavimento. O escoamento superficial acontece quando a intensidade da precipitação ultrapassa a intensidade e a capacidade da infiltração da água no solo (LINSLEY *et al.*, 1975; MOHAMOUD *et al.*, 1990 *apud* PRUSKI; RODRIGUES; SILVA. 2001).

Quanto maior a parcela da área urbana coberta por superfícies impermeáveis, conseqüentemente maior escoamento superficial da água da chuva, como pode ser verificado na Figura 1, onde Venhaus (2012) ilustra diversos cenários de permeabilidade urbana conforme o nível de pavimentação.

Na mesma Figura 1, a autora não somente correlaciona o aumento do escoamento superficial com as características de permeabilidade da cobertura do terreno, mas também com a existência ou não de cobertura vegetal uma vez que esse tipo de cobertura atua ativamente minimizando o escoamento superficial através da evapotranspiração, que é a perda de água pela evaporação superficial (na cobertura, seja solo ou pavimento) e pela transpiração realizada pela planta (CAMBRIDGE, 2016).

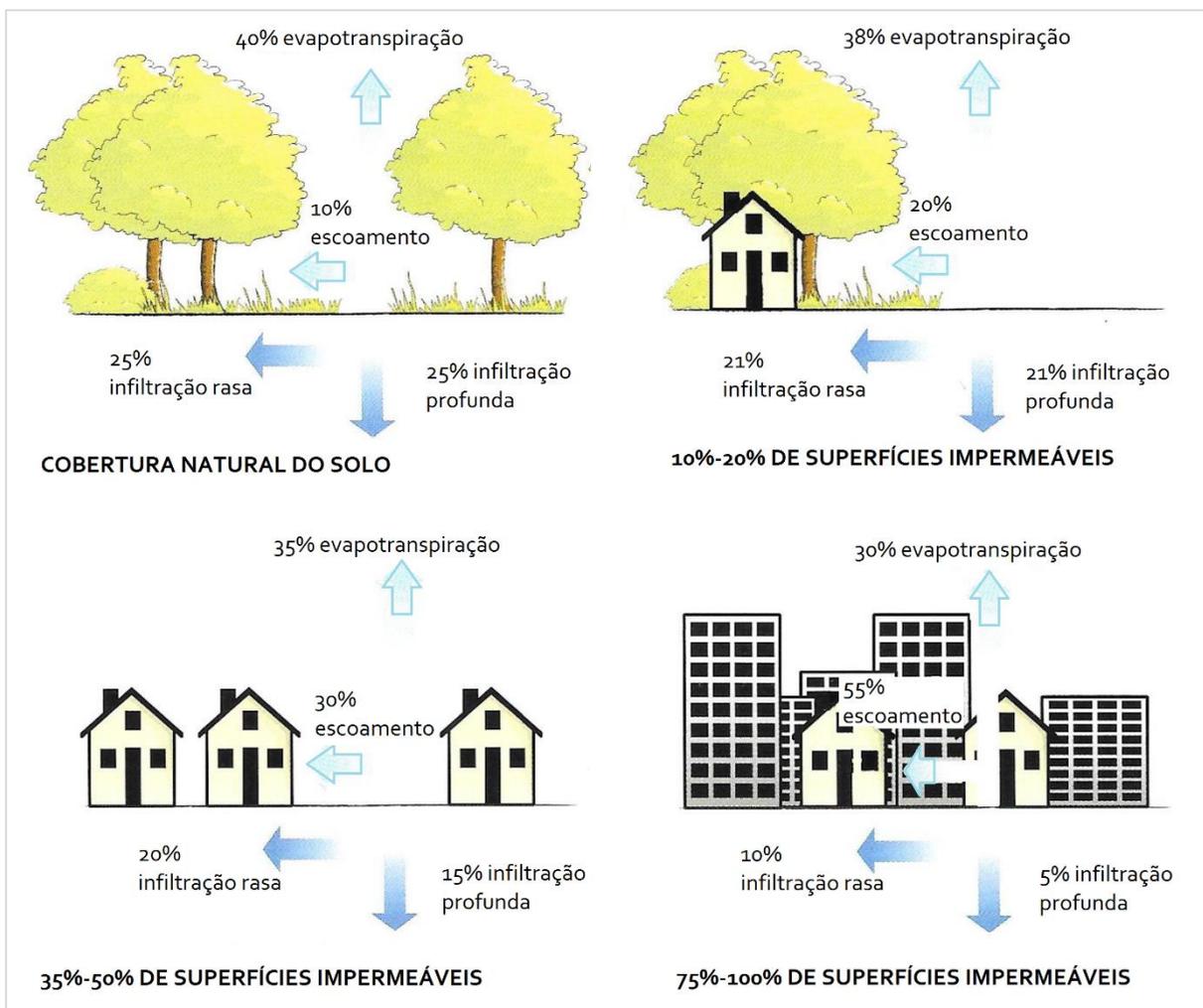


Figura 1 – Coberturas impermeáveis e escoamento de águas pluviais
Fonte: Venhaus (2012)

No Brasil, nos últimos anos, observa-se um crescimento da pavimentação urbana: entre 2000 e 2008, o número de cidades que possuem ruas pavimentadas passou de 78,3% para 94,4%, o que demonstra um crescimento de 20,6% (IBGE, 2008). Dentre os municípios que possuem ruas pavimentadas, 71,9% tem entre 60% a 100% das suas ruas pavimentadas, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Distribuição dos municípios, por percentual de ruas pavimentadas na área urbana, segundo as Grandes Regiões - 2008

Grandes Regiões	Distribuição dos municípios, por percentual de ruas pavimentadas na área urbana				
	Até 20%	20 a 40%	40 a 60%	60 a 80%	80 a 100%
Brasil	3,9	8,4	15,2	40,1	31,8
Norte	16,4	22,1	19,6	35,0	6,9
Nordeste	2,7	7,3	18,2	49,8	21,7
Sudeste	1,1	3,3	8,9	32,8	53,6
Sul	5,2	11	18,3	41,6	22,4
Centro-Oeste	3,8	12,3	15,8	32,2	35,7

Fonte: IBGE (2008)

O aumento da pavimentação, que leva consigo o aumento da impermeabilização superficial das áreas urbanas e consequente elevação do escoamento superficial, traz diversos problemas para as cidades. Dentre eles, pode-se citar o efeito mais conhecido na realidade brasileira: as inundações urbanas. Elas ocorrem porque uma parcela maior da chuva escoam superficialmente, sobrecarregando os sistemas de drenagem. As inundações acontecem principalmente nas metrópoles – locais em que a taxa de escoamento superficial é muito elevada: em torno de 5,5 vezes maior, em comparação a mesma área com cobertura vegetal (VENHAUS, 2012).

Não somente inundações são causadas pelo aumento da impermeabilização superficial do solo: 46,4% dos municípios brasileiros afirmam que ocupações intensas e não orientadas do solo levaram à erosão no perímetro urbano (IBGE, 2008).

Como pode ser visto na Tabela 3, acerca dos tipos de erosão que ocorrem nos municípios nacionais, os principais tipos têm suas causas atreladas ao aumento do escoamento superficial (erosão do leito natural do curso d'água, voçoroca, erosão de terrenos sem cobertura vegetal e erosão de taludes).

Tabela 3 - Percentual de municípios que tiveram erosão nos últimos 5 anos, por tipo de erosão, segundo as Grandes Regiões - 2008

Grandes Regiões	Percentual de municípios que tiveram erosão nos últimos 5 anos, por tipo de erosão (%)				
	Erosão do leito natural do curso d'água	Ravinamento (voçoroca)	Erosão laminar de terrenos sem cobertura vegetal	Erosão de taludes	Outro
Brasil	47,3	22,5	63,1	32,7	7,5
Norte	42,4	18,9	59,8	22,0	10,6
Nordeste	45,8	16,8	60,4	25,2	10,6
Sudeste	49,7	27,2	67,9	44,1	5,5
Sul	47,0	16,2	60,3	33,0	7,3
Centro-Oeste	46,1	33,5	59,3	12,0	6,6

Fonte: IBGE (2008)

A partir disso, é possível notar como o alto escoamento superficial, originado da permeabilidade urbana, tem efeito danoso para os centros urbanos e para a região que ele eles estão inseridos.

2.1.2 Efeito Ilha de Calor

O efeito ilha de calor se caracteriza por um aumento da temperatura média em áreas urbanizadas em comparação áreas arredores (VOOGT; OKE, 2003). Esse fenômeno é causado por uma combinação de fatores, como a geometria dos centros urbanos (em forma de cânions) e, principalmente, pela quantidade de superfícies artificiais não permeáveis de alta densidade e baixa refletância (OKE, 1982).

Refletância é a porcentagem da energia luminosa refletida por uma superfície, que é relacionada com sua cor: quanto mais escuro, menor refletância. Isso quer dizer que: quanto mais escura a superfície, mais energia luminosa ela absorve e, por conseguinte, mais calor ela retém e transmite. Essa característica é o principal determinante da temperatura superficial do material (EPA, 2008).

A Tabela 4, que contém dados do Conselho Americano de Construções Sustentáveis (USGBC, 2009), mostra a refletância dos principais materiais usados para pavimentação. É possível notar que um asfalto novo tem, em média, uma

refletância 7 vezes menor do que um concreto novo. Isso quer dizer que ele absorve 7 vezes mais energia (a partir de fonte luminosa) do que um concreto.

Tabela 4 – Refletância dos materiais padrões de pavimentação

Material	Emissividade	Refletância	SRI
Concreto cinza (novo)	0,9	0,35	35
Concreto cinza (exposto à ação do tempo)	0,9	0,20	19
Concreto branco novo	0,9	0,70	86
Concreto branco (exposto à ação do tempo)	0,9	0,40	45
Asfalto (novo)	0,9	0,05	0
Asfalto (exposto à ação do tempo)	0,9	0,10	6

*Refletâncias podem ser mantidas com a limpeza das superfícies. Lavagem sob pressão de materiais cimentícios podem restaurar a refletância próximo aos seus valores originais.

Fonte: USGBC (2009)

Como pode ser observado no Gráfico 3, segundo Venhaus (2012), entre as principais tipologias de construção (comercial, industrial, shoppings e residencial) o pavimento representa a maior parcela da cobertura impermeável do terreno.

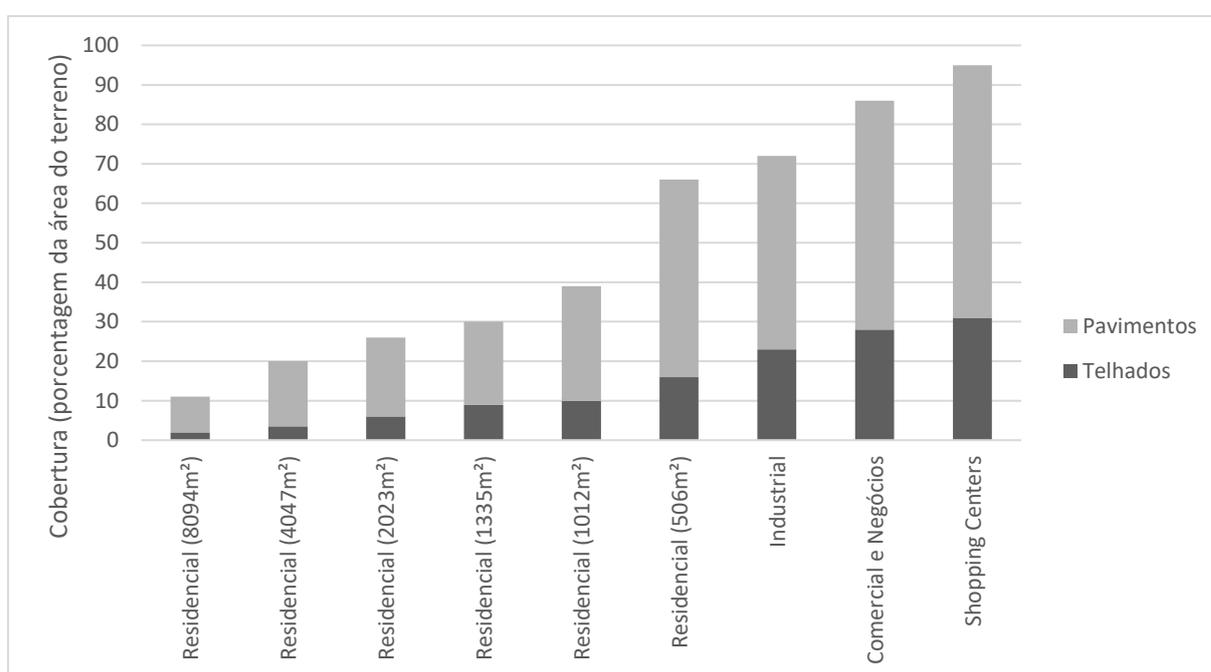


Gráfico 3 – Coberturas impermeáveis por usos típicos de terreno
Fonte: Venhaus (2012)

De acordo com o EPA (2008), em um estudo realizado em 4 cidades de grande porte nos Estados Unidos, como é visto no Gráfico 4, os principais pavimentos são estradas, estacionamentos e calçadas.

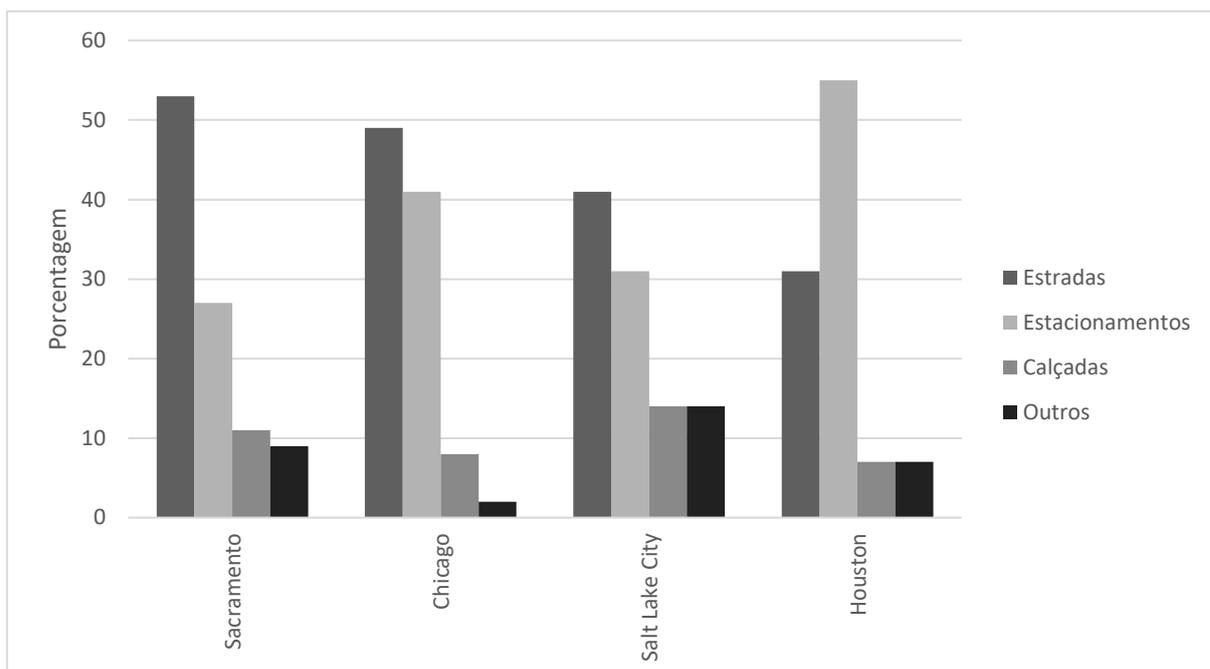


Gráfico 4 – Áreas pavimentadas por tipo de uso
Fonte: EPA (2008)

Em paralelo a isto, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (2008), houve um crescimento no Brasil de 20,6% no número de vias que são pavimentadas, conforme pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Variação percentual do total de municípios com ruas pavimentadas na área urbana, segundo as Grandes Regiões - 2000/2008

Grandes Regiões	Variação percentual do total de municípios com ruas pavimentadas na área urbana 2000/2008 (%)	Grandes Regiões	Variação percentual do total de municípios com ruas pavimentadas na área urbana 2000/2008 (%)
Brasil	20,6	Sudeste	12,0
Norte	82,4	Sul	5,4
Nordeste	31,1	Centro-Oeste	28,5

Fonte: IBGE (2008)

Fica demonstrado, então, como pavimentos são e ficam mais representativos para o efeito ilha de calor, tanto no que tange as suas características de refletância, assim como suas características de permeabilidade. Isso porque, de acordo com o Compêndio de Estratégias para Redução do Efeito Ilha de Calor (EPA, 2008), os pavimentos que são permeáveis permitem que o ar, água e vapor circulem pelos seus

espaços vazios, gerando assim um resfriamento evaporativo do pavimento. Esse tipo de resfriamento acontece quando a energia absorvida pelo material é transmitida do pavimento para água que o permeou, até que ela atinja o calor latente de valor, mudando seu estado de líquido para gás, que leva consigo a energia solar. Esse gás é liberado para a atmosfera, contribuído também com a umidade local (LI; HARVEY; GE, 2014).

Por conseguinte, isso diminui a energia térmica emitida pelo pavimento, minimizando o efeito ilha de calor

2.1.3 Consumo de Recursos Naturais

A seleção de materiais de construção gera um impacto ambiental significativo: durante o seu ciclo de vida, a sua extração, processamento, transporte, uso e descarte podem ter impactos negativos para a saúde humana e para o meio ambiente (USGBC, 2009).

Um dos principais problemas atuais da sustentabilidade é o alto consumo de recursos naturais para a produção de materiais, como o concreto (BEHERA *et al.*, 2014). A construção civil, que é responsável pelo consumo de 40% a 75% de todos os insumos produzidos no planeta (AGOPYAN, 2013), também é responsável pela utilização de até 50% de todos os recursos naturais extraídos no mundo (JOHN, 2000). A extração de matérias virgens pode ser responsável por desmatamento, degradação de cursos d'água, perda de habitat, riscos a espécies ameaçadas de extinção, liberação de químicos nocivos e violação dos direitos indígenas (USGBC, 2014).

O consumo de agregados naturais no Brasil, considerando somente os utilizados na produção de concretos e argamassas é de 220 milhões de toneladas/ano. Além da pegada ambiental associada à extração, existe os efeitos nocivos da emissão de gases estufa ligada ao transporte desse material. Uma vez que as jazidas de materiais minerais estão ficando escassas próximos a centros urbanos, como São Paulo, onde a extração pode acontecer a distâncias superiores a 100km (JOHN, 2000).

É importante notar que o agregado é um material que o processamento normalmente acontece no local da sua extração. Para materiais mais complexos ou

multicomponentes, como o cimento, é necessário perceber que existe a distância de extração da matéria prima, da jazida até a fábrica, e a distância da fábrica até a obra. Esse fator pode aumentar consideravelmente a distância percorrida pelo material e, por conseguinte, a pegada de carbono associada ao produto.

2.1.4 Resíduos Sólidos da Construção Civil

Além do alto consumo de matéria-prima virgem e extração de recursos naturais, a construção civil também é a principal atividade humana geradora de resíduos sólidos. Grandes quantidades de subprodutos são geradas anualmente a partir da produção de materiais, como escória, cinza volante e poeira calcária. Esses materiais são subaproveitados como insumo de preenchimento (*filler*) ou simplesmente descartados em terrenos baldios: áreas úteis que passam a ser áreas de aterro (BEHERA *et al.*, 2014).

Ao passo que o resíduo da construção civil (RCC) gera problemas da ordem estética, ambiental e de saúde pública, da mesma forma sobrecarrega os sistemas de limpeza urbana: segundo o Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil, produzido pelo IPEA, entre 50% e 70% da massa dos resíduos sólidos é originário da construção civil (BRASIL, 2005 *apud* IPEA, 2012). Nos Estados Unidos, cerca de 40% dos resíduos totais gerados são resíduos da construção civil. Enquanto isso, na União Europeia, 25% de todos os resíduos são RCC (USGBC,2014).

Em valores absolutos, os municípios brasileiros coletaram cerca de 45 milhões de toneladas de RCC em 2015, o que representou um aumento de 1,2% em comparação com 2014. Deve-se notar, entretanto, que o volume anualmente gerado de RCC é ainda maior, uma vez que parte dos resíduos não são coletados e, portanto, não são quantificados (ABRELPE, 2015).

Em simultâneo, no mesmo período foram coletados 71,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), que são aqueles originários da atividade industrial, doméstica e comercial, gerado nas áreas urbanas.

A questão do RCC ganha ainda mais relevância quando se avalia o destino que esses materiais tomam. Como pode ser observado nos Gráficos 5 e 6.



Gráfico 5 – Municípios com serviço de manejo de resíduos de construção e demolição
Fonte: IBGE (2008)

Se por um lado 72% das cidades brasileiras contam com algum serviço de manejo de resíduo da construção civil, aproximadamente 24% delas faz depósito de RCC em vazadouros (popularmente conhecido como lixões), que recebem múltiplos tipos de resíduos sólidos (RCC e RSU) e não possuem a infraestrutura mínima para acomodação desses materiais e tem então maior potencial poluidor.

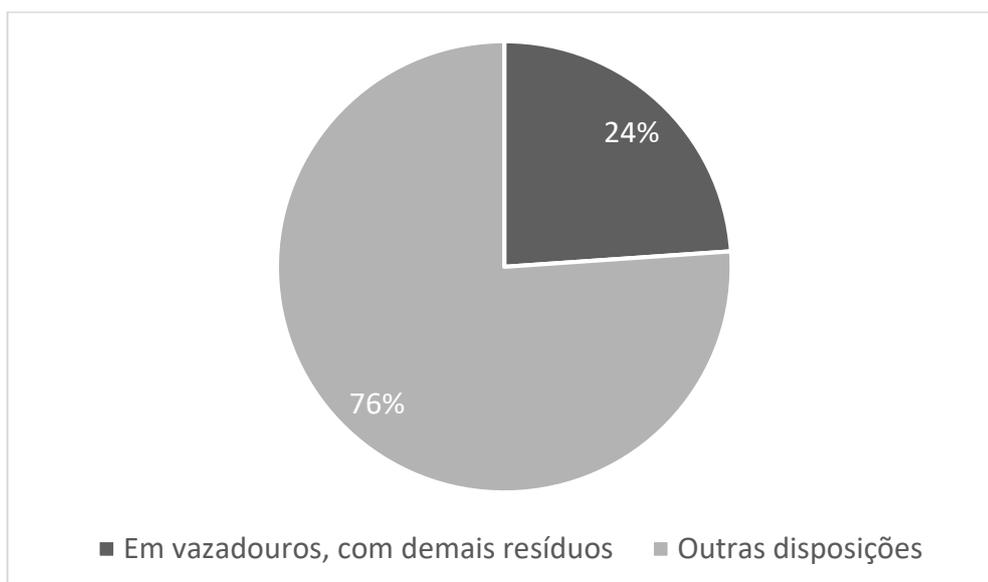


Gráfico 6 – Disposição no solo de resíduos de construção e demolição nos municípios brasileiros
Fonte: IBGE (2008)

Uma outra informação relevante, também, é que somente 7% das cidades tem algum sistema de processamento desses resíduos, como pode ser observado no Gráfico 7.

Isso mostra que mesmo que a maioria dos municípios colem e destinem os resíduos de construção e demolição para algum local, quase nenhum deles gera valor com o pós-processamento desse material, que também corroboraria para a mitigação do principal problema relacionados aos resíduos da construção civil: o grande volume gerado (KARPINSK *et al.*,2009 *apud* IPEA, 2012) que acaba sendo destinado à aterros e lixões, ao invés de ter seu ciclo de vida prolongado.

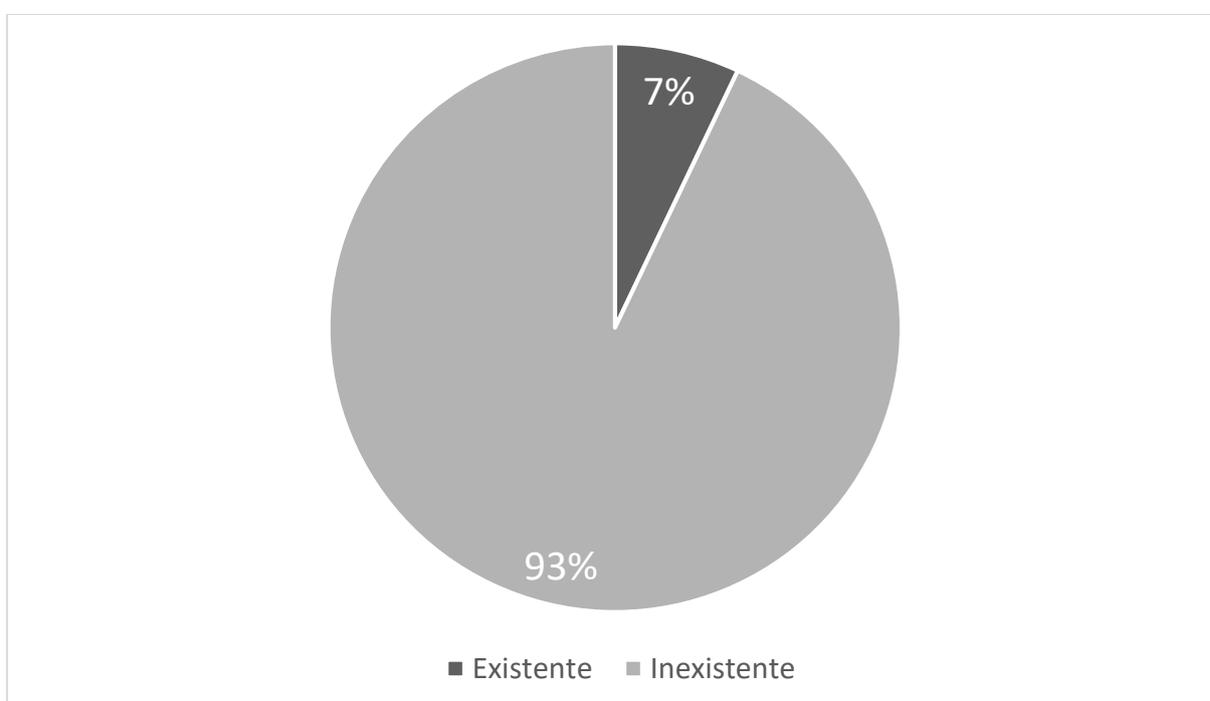


Gráfico 7 – Municípios com serviço de processamento de resíduos de construção e demolição
Fonte: IBGE (2008)

Ainda sobre o destino do resíduo da construção civil no Brasil, como é visto no Gráfico 8, somente 1% das cidades no país tem algum serviço de reaproveitamento do resíduo reciclado em algum outro componente construtivo. Isso demonstra como a atividade construtiva no país ainda não age de maneira suficiente para mitigar um dos seus principais passivos ambientais.

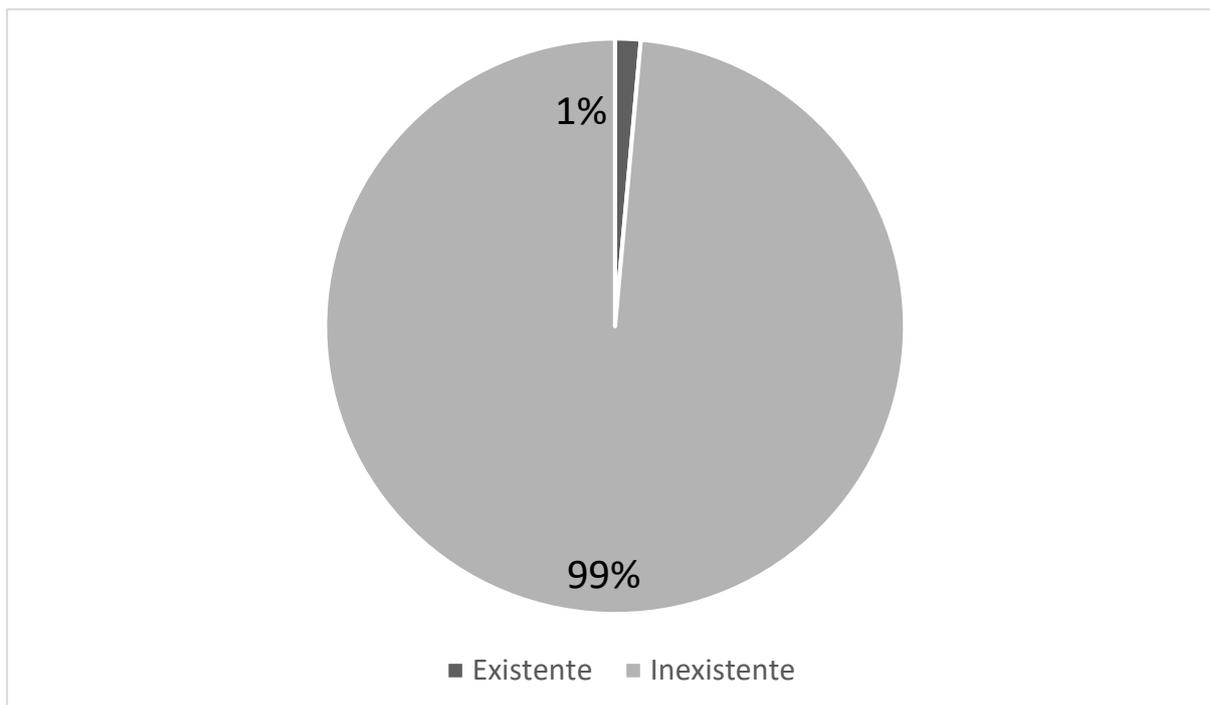


Gráfico 8 – Municípios com serviço de reaproveitamento de resíduos de construção e demolição
Fonte: IBGE (2008)

Quando se analisa a grande extração e uso de matéria-prima virgem e grande geração de resíduo nas atividades de construção civil, pode-se notar, portanto, a importância do desenvolvimento e uso de materiais que usem o quanto for possível e viável de resíduos incorporados.

2.2 AGREGADO RECICLADO PARA CONCRETO

A recente tendência da indústria da construção é o uso de fontes alternativas de materiais em substituição aos insumos naturais virgens, como forma de diminuir o impacto ambiental atrelado à produção industrial (BEHERA *et al.*, 2014). Prolongar a vida útil de um determinado insumo da construção que tem uma emissão significativa de CO₂, como concreto e argamassa, pode reduzir consideravelmente a energia incorporada para a execução de uma obra.

Um dos possíveis destinos para o RCC, e um dos principais produtos quando se pensa na valoração e na extensão da vida útil dos resíduos da construção civil, são os agregados reciclados para concreto. Isso porque no concreto, que é um dos materiais mais comuns na construção e que tem um consumo anual de mais de 20

bilhões de toneladas por ano (MEHTA; MERYMAN 2009 *apud* BEHERA *et al.*, 2014), o agregado representa cerca de 60-75% do volume total do material (BEHERA *et al.*, 2014). Pesquisas recentes demonstram que o agregado reciclado de fontes selecionadas de RCC pode substituir total ou parcialmente agregados naturais para a pavimentação, concreto estrutural e não-estrutural, argamassa para alvenaria e outros usos diversos (JIMÉNEZ *et al.*, 2012)

Também, a pegada de carbono associada ao agregado para concreto tem um papel crucial quando se compara agregado virgem à opção reciclada: a extração e a britagem do material virgem consome uma alta quantidade de energia, o que aumenta a contribuição na emissão de CO₂ (LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2016 *apud* BEHERA *et al.*, 2014). Na Figura 2 estão apresentados os quatro grupos de benefícios da reciclagem do resíduo da construção civil, todos eles reverberando em ganhos econômicos.

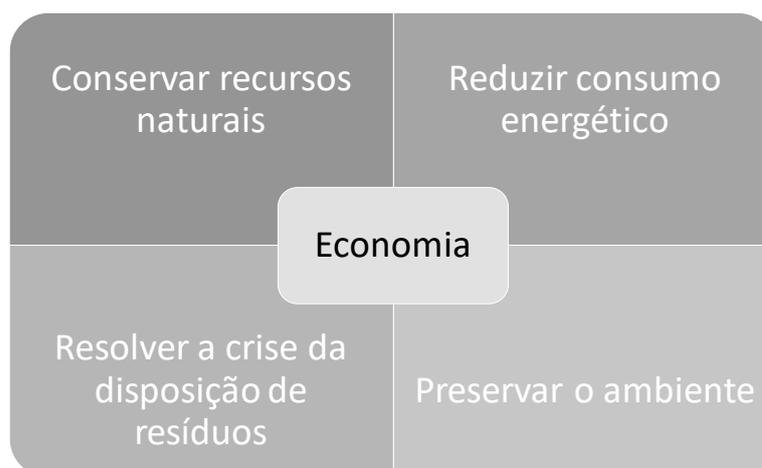


Figura 2 - Benefícios da reciclagem de RCC
Fonte: Behera *et al.* (2014)

O agregado reciclado é composto por resíduos de construção e demolição, em sua maioria de materiais minerais, como fragmentos de rocha, materiais de origem cimentícia (blocos, concreto, argamassa), materiais de origem cerâmica e asfalto (CCANZ, 2011 *apud* BEHERA *et al.*, 2014). Inicialmente esse tipo de material foi usado somente como sub-base para pavimentação e material de estabilização de canteiro, mas atualmente vem sendo utilizado como componente construtivo, como é o caso do agregado no concreto. Pare esse uso, como pode ser observado na Figura 3, existe um ciclo de vida bem definido do concreto, que ao atingir sua vida útil torna-

se RCC. Esse resíduo, quando reciclado, pode se tornar agregado reciclado para concreto, podendo novamente repetir o ciclo.

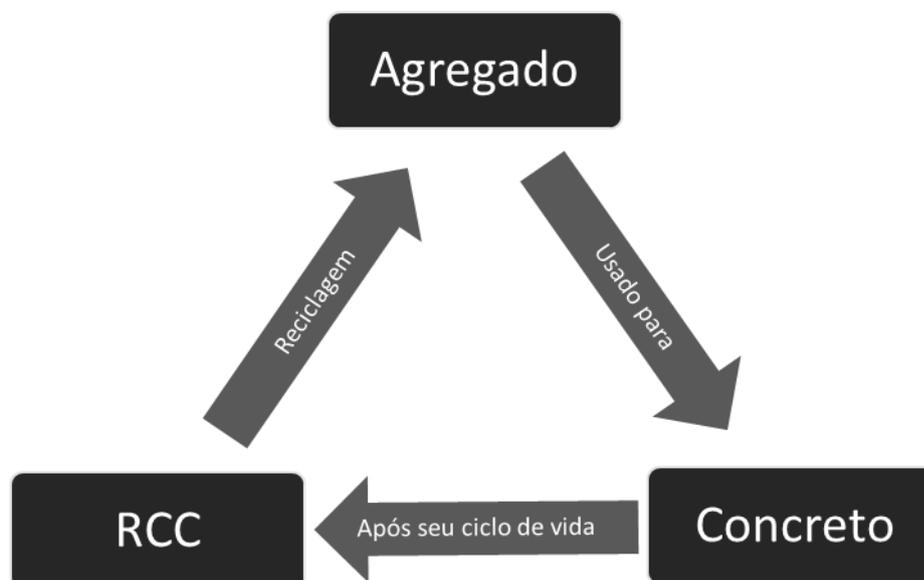


Figura 3 - Representação esquemática da técnica de reciclagem do agregado reciclado
Fonte: Behera *et al.* (2014)

Mas diferentemente de aço e madeira, que também são insumos comumente utilizado na construção civil e já possuem um fluxo de destinação, reaproveitamento e reciclagem relativamente bem estruturados, os resíduos utilizados para a fabricação de agregado reciclado ainda não tem um grande uso e, portanto, não tem um fluxo de destinação tão estruturado e funcional para absorver todo o volume gerado desses materiais (TAM; TAM, 2006). Por isso a necessidade da sua investigação e do desenvolvimento de produtos que usem esses materiais.

Com o objetivo de promover uma melhora na qualidade do agregado reciclado e minimizar os efeitos ambientais do RCC, é importante a separação do resíduo desde a sua geração: materiais perigosos, como solvente e asbestos, e componentes que são considerados impurezas, como gesso, madeira, vidro, metais, plástico e solo, devem ser separados dos outros resíduos da construção civil (JIMÉNEZ *et al.*, 2012).

É importante apontar, no entanto, que muitas vezes a separação do resíduo pode ser onerosa, uma vez que os materiais de construção muitas vezes não são projetados para a separação seletiva quando sua vida-útil chega ao fim, o que pode gerar resíduos não separados. Isso faz com que, para a produção de um agregado reciclado de alta qualidade de uma fonte mista, haja um alto consumo de energia na

separação, o que afeta um dos principais benefícios desse material (THOMARK, 2002 *apud* JIMÉNEZ et al., 2012).

Um dos principais componentes do agregado reciclado são argamassas, que podem diminuir a resistência do material (EGUCHI *et al.*, 2006). As características de resistência dependem então da qualidade e da quantidade de argamassa aderida no agregado reciclado (ETXEBERRIA *et al.*, 2007). A remoção dos materiais argamassados do agregado é possível, porém aumenta seu custo, amplia o consumo energético e faz com que uma quantidade substancial de argamassa seja destinada a fins menos nobres (como aterros). Por conta disso, o processo clássico para a fabricação de agregados reciclados não remove argamassa. Para garantir então a resistência, é possível ajustar o traço do concreto com agregado reciclado, em comparação ao traço de concreto com agregado convencional (EGUCHI *et al.*, 2006).

O processo clássico de produção do agregado reciclado se inicia a partir da pilha de estoque do RCC, onde o material segue por uma trituradora vibratória, que faz quebra inicial e conduz o material para as etapas subsequentes. O processo em planta pode ser observado na Figura 4.

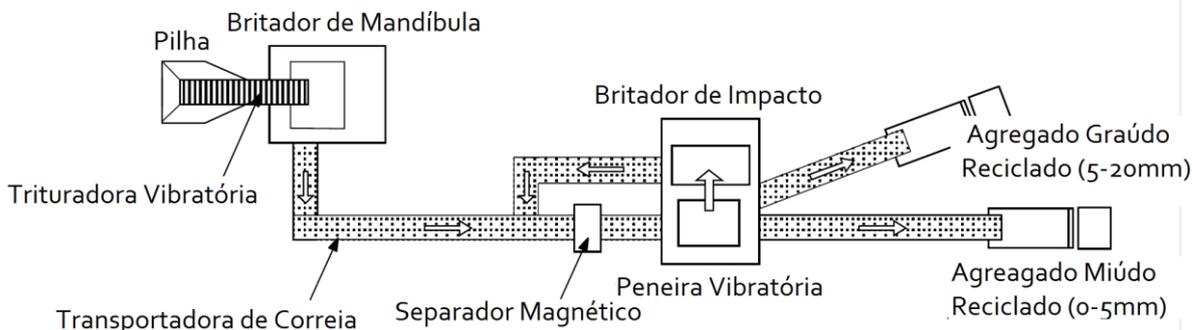


Figura 4 - Planta de produção do agregado reciclado
Fonte: Eguchi et al. (2006)

Na etapa seguinte, o material pode seguir para uma trituradora mandíbula, que faz a fragmentação efetiva do agregado, que se encaminha então para um separador magnético onde qualquer material ferroso é separado. No passo seguinte, um conjunto de peneiras vibratórias separa os componentes com mais de 20mm, os entre 20mm e 5mm e os menores de 5mm. Os primeiros seguem para um britador de impacto e voltam para a etapa da separação magnética, enquanto os outros dois são separados em pilhas independentes, dependendo da sua faixa granulométrica.

Finalmente, tem-se então uma porção de agregado reciclado graúdo e uma outra de agregado reciclado miúdo. O processo completo pode ser visto na Figura 5.

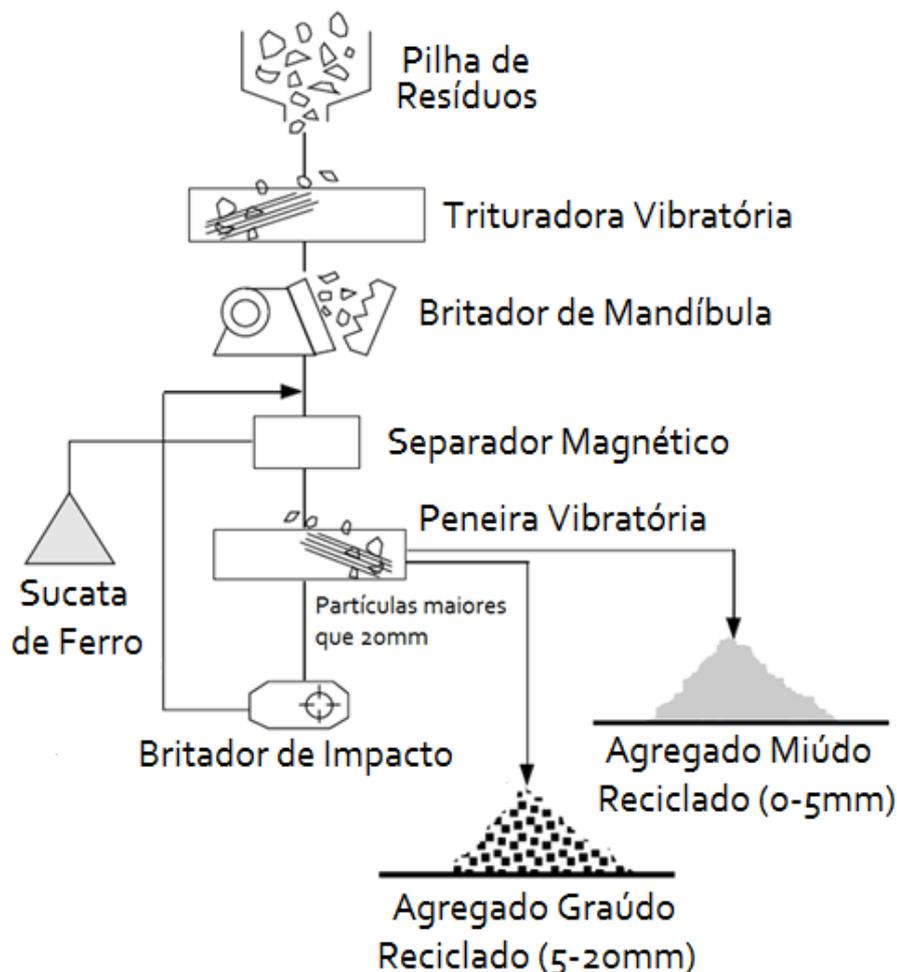


Figura 5 - Diagrama da produção de agregado reciclado.
Fonte: Eguchi et al. (2006)

Os agregados reciclados, tanto o graúdo quanto o miúdo, têm comportamentos distintos das suas versões em material natural virgem. Dentre as propriedades físicas, a massa específica dos agregados reciclados é geralmente menor do que a do agregado natural virgem: segundo a literatura, esse valor pode ser entre 4% e 19% menor (LEITE, 2001).

A capacidade de absorção de água é a principal característica que diferencia o agregado reciclado do agregado virgem: esse atributo, que pode ser entre duas a três vezes maior do que no agregado natural virgem, pode chegar a 15%. Além do tipo do material, quanto menor sua granulometria, maior sua superfície específica e, por conseguinte, a capacidade de absorção (BEHERA et al., 2014).

A maior absorção influencia propriedades do concreto fresco e endurecido, como perda de trabalhabilidade (ETXEBERRIA *et al.*, 2007). Com o objetivo mitigar os efeitos danosos do aumento da absorção do agregado, pesquisas sugerem que o material deve ser saturado antes do seu uso (NEALEN; SCHENK, 1998 *apud* ETXEBERRIA *et al.*, 2007). Ademais, sua maior angulação, rugosidade e porosidade contribuem também para a perda de trabalhabilidade no concreto fresco (ANDAL *et al.*, 2016). A Tabela 6, mostra valores gerais para absorção de água em agregados utilizados em concreto

Tabela 6 - Absorção de água dos agregados de concreto

Tamanho das partículas (mm)	Agregados reciclados de concreto			Agregados naturais		
	10-20	5-10	0-5	12-20	5-12	0-5
Absorção de água (%)	5,828	6,806	8,160	0,876	1,134	1,490

Fonte: Gómez-Soberón (2002) *apud* Frotté e Di Núbilla (2015)

A perda da trabalhabilidade também é ao mesmo tempo atribuída ao fenômeno que acontece durante a preparação do concreto: durante o processo de mistura, por conta do choque mecânico entre as partículas, a argamassa residual presente nas partículas do agregado reciclado se soltam, aumentando a taxa de finos da mistura, que afeta a absorção de água e a perda na fluidez (SAFIUDDIN *et al.*, 2011 *apud* ANDAL *et al.*, 2016).

Para superar a maior absorção do agregado reciclado, é aconselhável que a adição de água durante o processo de mistura seja feita em duas etapas: primeiramente metade da água com os agregados, e a outra metade depois de adicionado os outros ingredientes (TAO; GAO; TAM, 2005 *apud* ANDAL *et al.*, 2016). Metodologia bem próxima ao que estabelece a norma NBR 15116 e já descrita na literatura para a mistura de concretos utilizando agregado reciclado (DE OLIVEIRA; WOOD, 2016). A explicação para a efetividade desse processo está no fortalecimento da interface do concreto com o agregado reciclado, produzindo um traço mais denso, e que evita a perda de resistência nessa interface, que pode ser decisiva para a queda de resistência à compressão no concreto final (SALAU *et al.*, 2014 *apud* ANDAL *et al.*, 2016).

Segundo pesquisas anteriores (POON; CHAN, 2005; GUO; QIAN; WANG, 2013 *apud* ANDAL *et al.*, 2016), o uso de agregado reciclado para concreto diminui drasticamente o módulo de elasticidade do corpo de prova. Também, foi notado que

o uso de agregado reciclado aumenta significativamente a retração no corpo de prova, devido a maior porosidade no material. Autores descrevem um aumento variado na retração do corpo de prova: variam entre 12% e 50%, com substituições do agregado entre 25% e 70%, mas não sendo proporcional o aumento da retração com o aumento na substituição do agregado por material reciclado. Isso é explicado pela falta de uniformidade no agregado reciclado, composto por diferentes materiais com comportamentos específicos (ANDAL *et al.*, 2016).

Adicionamento, foi notado que o uso de agregado reciclado miúdo derivado de bloco cerâmico aumenta significativamente a retração e a deformação, a absorção superficial inicial e a difusão de cloretos pelo material. Graças a esses efeitos, muitas agências internacionais restringem a quantidade de agregado reciclado de origem cerâmica que pode ser utilizada no concreto, o que dificulta a reciclagem do RCC. (RILEM, 1994; BRE, 1998; MCGOVERN 2002 *apud* POON; CHAN, 2005).

Por um outro lado, em regiões climáticas que não apresentem congelamento e descongelamento, sendo a resistência a única preocupação para materiais utilizados no pavimento, esses materiais ainda podem ser utilizados para a produção de concreto para pavimentação (como placas pré-moldadas). Nesse tipo de concreto, mesmo com os efeitos do agregado de origem cerâmica, ele ainda mantém qualidades em padrões aceitáveis (POON; CHAN, 2005).

Mas, ainda de acordo com estudos anteriores (CABRAL *et al.*, 2007 *apud* FROTTÉ; DI NÚBILLA, 2015; POON; CHAN, 2007 *apud* FROTTÉ; DI NÚBILLA, 2015), o agregado reciclado miúdo que leva na sua composição resíduos de cerâmica vermelha apresentam aumento nas suas resistências à compressão e à tração. Para esse comportamento, os autores atribuem o fato do resíduo da cerâmica ter uma superfície áspera, que promove melhor ligação entre a matriz do cimento e os agregados reciclados. Também apontam para o fato da cerâmica absorver água da mistura do concreto fresco e, aos poucos, liberar esse conteúdo, que se torna disponível para a hidratação do cimento. Por fim, seguindo o que aponta Leite (2001), o incremento da resistência do material pode ser atribuído à ocorrência de reações pozolânicas com características cimentícias da cerâmica vermelha.

Sobre o comportamento mecânico do concreto que utiliza agregado reciclado, estudos mostram que quanto maior a substituição do agregado graúdo natural virgem por reciclado, menor é sua resistência. Em contrapartida, quão maior a substituição

de agregado miúdo natural virgem por reciclado, maior sua resistência (LEITE, 2001), como se observa no Gráfico 9.

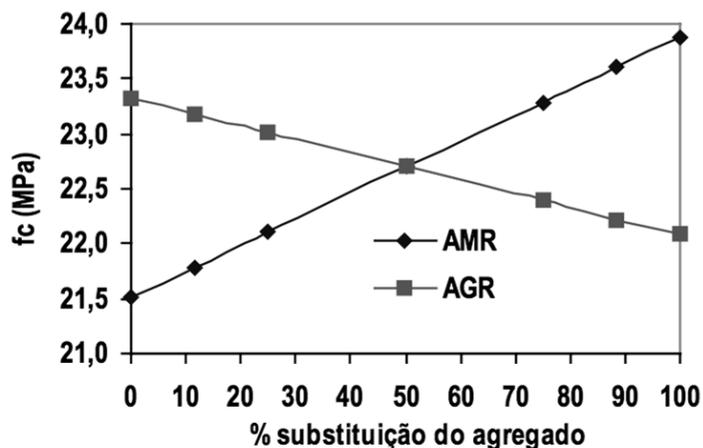


Gráfico 9 - Resistência à compressão em função do efeito isolado do teor de substituição do agregado.

Fonte: Leite (2001)

Também, foi apontado o crescimento da resistência à tração na flexão e por compressão diametral, conforme o aumento na substituição do agregado miúdo virgem natural por reciclado (LEITE, 2001), que pode ser verificado no Gráfico 10.

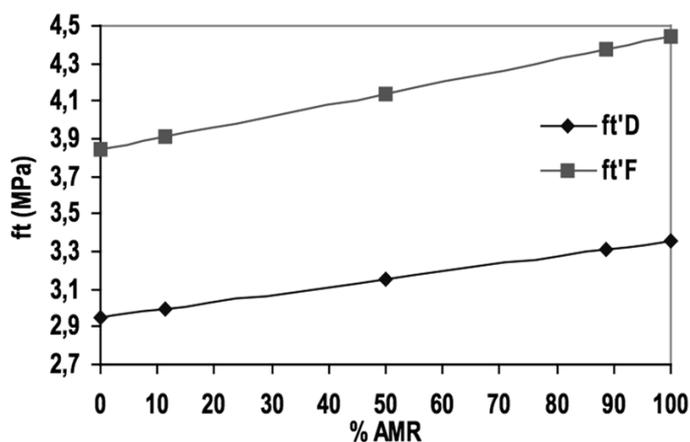


Gráfico 10 - Resistência à tração na flexão (ft'F) e por compressão diametral (ft'D) em função do efeito isolado de agregado miúdo reciclado.

Fonte: Leite (2001)

Em um compendio de diversas pesquisas cujo tema era concreto com agregado reciclado, dentre miúdo e graúdo, Behera *et al.* (2014) analisaram 10 diferentes resultados de resistência à tração na flexão, como pode ser visto no Gráfico 11.

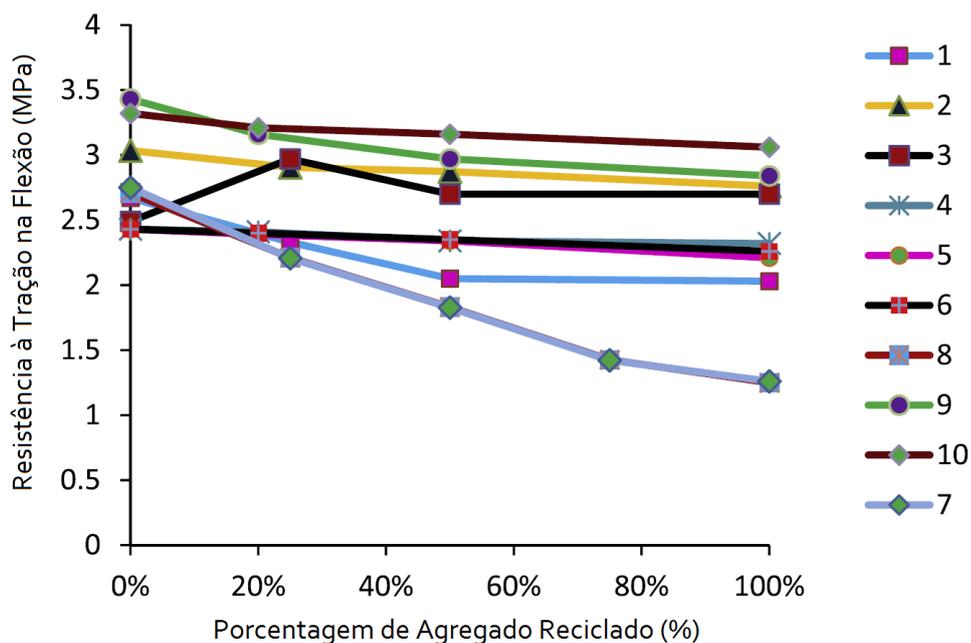


Gráfico 11 - Variação da resistência à tração na flexão aos 28 dias
 Fonte: Behera *et al.* (2014)

Behera *et al.* (2014) também estudaram 16 resultados distintos de resistência à compressão, como pode ser visto no Gráfico 12.

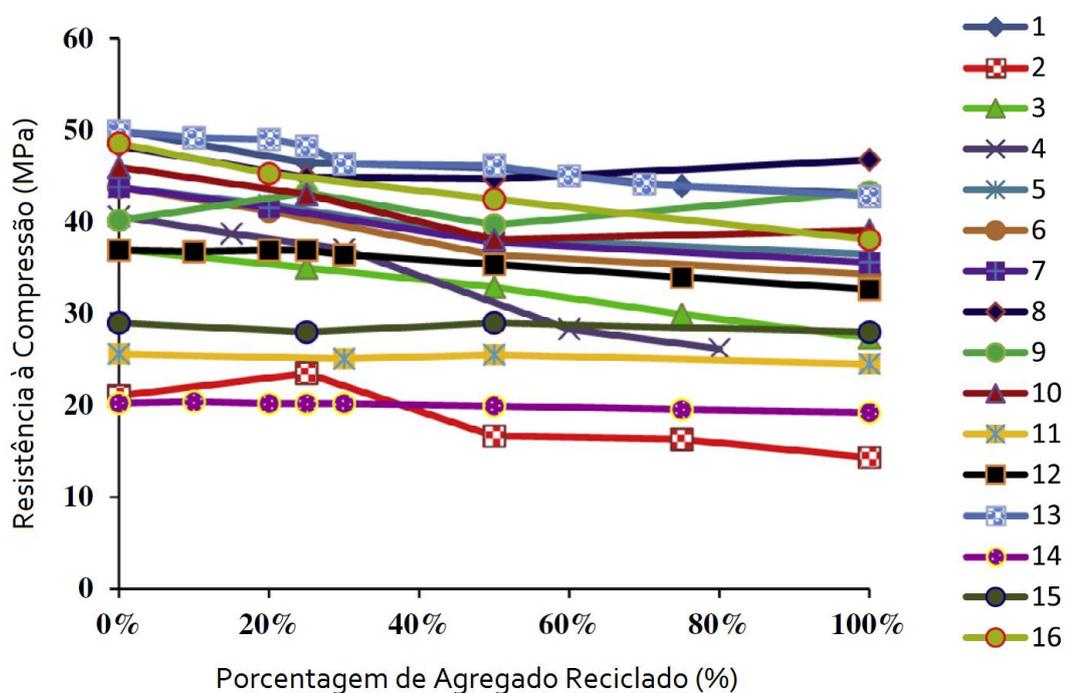


Gráfico 12 - Variação da resistência à compressão aos 28 dias
 Fonte: Behera *et al.* (2014)

Uma vez que existe uma grande variabilidade desse material, uma que é produzido a partir de diferentes fontes (CAVALLINE *et al.*, 2014 *apud* FROTTÉ; DI NÚBILLA, 2015), para se garantir padrões mínimos de qualidade e segurança, no Brasil, regulamentando o uso do agregado reciclado, existe a Norma Brasileira NBR 15116 (ABNT, 2004), sobre o uso de agregados reciclados em pavimentação e preparo de concreto não estrutural.

Primeiramente, a norma resgata a classificação da resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) acerca da classificação de resíduos, que os divide em 4 classes:

a) Classe A

São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento e outros), argamassa e concreto;
- resíduos de processo de preparo e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios e outros) produzidos nos canteiros de obras.

b) Classe B

São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros.

c) Classe C

São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou sua recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso.

d) Classe D

São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção (tintas, solventes, óleos e outros) ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparo.

Para aqueles da classe A, que podem ser reciclados como agregados, a NBR 15116 ainda os separa em:

a) Agregado de Resíduo de Concreto (ARC)

Que são aqueles compostos na sua porção graúda, pelo menos, de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

b) Agregado de Resíduo Misto (ARM)

Compõe-se na sua fração graúda de menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

A partir dessas classificações e do emprego previsto na camada de pavimento, a norma estabelece requisitos mínimos para que o agregado reciclado possa ser usado em pavimentação, como pode ser observado nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação

Propriedades	Agregado reciclado classe A		Normas de ensaios	
	Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Composição granulométrica	Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		ABNT NBR 7181	
Dimensão máxima característica	≤ 63 mm		ABNT NBR NM 248	
Índice de forma	≤ 3	-	ABNT NBR 7809	-
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm	Entre 10% e 40%		ABNT NBR 7181	
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas características ¹⁾	2	Anexo A	Anexo B
	Materiais não minerais de características distintas ¹⁾	3	Anexo A	Anexo B
	Sulfatos	2	ABNT NBR 9917	

¹⁾ Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Fonte: ABNT (2004)

Tabela 8 - Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação

Aplicação	ISC (CBR) %	Expansibilidade %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para execução de base de pavimento ¹⁾	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada

¹⁾ Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2 tf (80 kN) no período de projeto.

Fonte: ABNT (2004)

Caso o agregado não atenda aos requisitos da Tabela 8, a norma prevê que o material pode ser estabilizado granulometricamente ou ter adicionado cimento Portland ou cal hidratada, para o alcance dos requerimentos.

A mesma norma estabelece também requisitos para o agregado destinado à preparação de concreto sem função estrutural, como podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural

Propriedades		Agregado reciclado classe A				Normas de ensaios	
		ARC		ARM		Agregado graúdo	Agregado miúdo
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)		≥90	-	<90	-	Anexo A	-
Absorção de água (%)		≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1				ABNT NBR 9917	
	Sulfatos	1				ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais ¹⁾	2				Anexo A	Anexo B
	Torrões de argila	2				ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes	3				-	
Teor de material passante na malha 75 µm (%)		≤10	≤ 15%	≤ 10%	≤ 20%	ABNT NBR NM 46	

¹⁾ Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Fonte: ABNT (2004)

2.2.1 Agregado Reciclado da Região de Curitiba

Uma vez que o agregado reciclado apresenta grande variação, já que sua origem tem grande variabilidade, com o propósito de comparação e para notar qual o grau de variância das propriedades desse tipo de agregado numa mesma região, nas Tabelas 10 a 17 são mostrados valores de características do agregado reciclado regional e de concreto utilizando agregado reciclado da região de Curitiba.

É importante apontar que C_{Ref} é o concreto de referência, cujo agregado miúdo é composto por material virgem natural, C25% tem 25% do agregado miúdo total composto por material reciclado e, por fim, o concreto chamado de C50% tem 50%

dos seus agregados miúdos compostos por material reciclado. Também, é necessário dizer que AR faz referência à agregado reciclado e NA à agregado natural.

Tabela 10 - Teor de material pulverulento do agregado reciclado miúdo da região de Curitiba.

	AR Miúdo 1	AR Miúdo 2
Teor pulverulento (%)	3,62	2,43
Média	3,03	

Fonte: Frotté e Di Núbila (2015)

Tabela 11 - Massa específica do agregado reciclado miúdo da região de Curitiba.

	AN Miúdo	AN Graúdo	AR Miúdo
Massa específica (g/cm³)	2,63	2,74	2,54

Fonte: Frotté e Di Núbila (2015)

Tabela 12 - Absorção do concreto

	C _{Ref}	C25%	C50%
Absorção (%)	5,61	7,97	8,74

Fonte: Frotté e Di Núbila (2015)

Tabela 13 - Absorção do agregado reciclado miúdo da região de Curitiba para diferentes tempos de imersão em água

Tempo (min)	Absorção (%)
1	4,70
2	7,16
3	7,27
5	6,17
10	8,11
30	8,22
60	6,95
150	9,60
180	9,23
240	9,34

Fonte: Frotté e Di Núbila (2015)

Tabela 14 - Índice de vazios dos concretos no estado endurecido.

	C _{Ref}	C25%	C50%
Índice de vazios (%)	12,49	16,86	18,20

Fonte: Frotté e Di Núbila (2015)

Tabela 15 - Massa específica seca dos concretos no estado endurecido.

	C_{Ref}	C25%	C50%
M. esp. real (g/cm³)	2,54	2,54	2,55
M. esp. seca (g/cm³)	2,23	2,12	2,08
M. esp. saturada (g/cm³)	2,35	2,28	2,26

Fonte: Frotté e Di Núbila (2015)

Tabela 16 - Resultados dos ensaios de compressão axial do concreto aos 28 dias, em MPa

	C_{Ref}	C25%	C50%
	24,7	22,5	26,8
Betonada 1	27,9	22,0	21,4
	27,6	20,8	24,0
	34,0	23,6	23,8
Betonada 2	30,3	25,2	27,6
	28,3	20,2	27,2

Fonte: Frotté e Di Núbila (2015)

Tabela 17 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral do concreto aos 28 dias, em MPa.

	C_{Ref}	C25%	C50%
	2,0	2,3	2,7
Betonada 1	2,7	2,0	2,3
	2,5	2,8	3,1
Betonada 2	3,1	2,4	2,4

Fonte: Frotté e Di Núbila (2015)

2.3 CONCRETO PERMEÁVEL

O aumento das superfícies impermeáveis, com a crescente urbanização, tem resultado na redução da evaporação e infiltração da água no solo, aumentando o escoamento superficial e diminuindo a recarga de lençóis freáticos, que causam alterações do ciclo natural da água (BRUNETTI; ŠIMŮNEK; PIRO, 2016). Por conta disso, recentemente tem ganhado espaço os desenvolvimentos de baixo impacto (do inglês *Low Impact Development, LID*). LID é uma abordagem sustentável para o gerenciamento da água da chuva, cujo objetivo é maximizar ou replicar o ciclo hidrológico natural, usando medidas descentralizadas em microescala (COFFMAN, 2002 *apud* BRUNETTI; ŠIMŮNEK; PIRO, 2016). Essa abordagem construtiva tem,

também, o potencial de diminuir a necessidade por grandes investimentos em instalações para o gerenciamento de água da chuva (LI; HARVEY; GE, 2014).

Os pavimentos permeáveis apresentam-se como uma solução para o problema do aumento do escoamento superficial e impermeabilização dos centros urbanos (BRUNETTI; ŠIMŮNEK; PIRO, 2016). Uma vez que esse tipo de pavimento faz com que a água da chuva permeie suas camadas, até encontrar o solo, onde atua na recarga de lençóis freáticos, ele atua então para a manutenção do ciclo natural hidrológico. Ao mesmo tempo, como ele não é um grande sistema e não precisa ser interconectado com outras infraestruturas, o uso de pavimento permeável é uma medida descentralizada e em microescala, o que confere um grande potencial de impacto e resiliência para essa solução.

Adicionalmente, esse tipo de pavimento é conhecido pelos seus benefícios de filtragem da água, principalmente para hidrocarbonetos de petróleo (composto presente nos combustíveis fósseis, em especial a gasolina), zinco e sólidos suspenso contidos na água da chuva (ROSEEN *et al.*, 2012). Portanto, além de facilitar a permeabilidade, a água permeia menos contaminada com poluentes.

Em contrapartida, o depósito de sedimentos, matéria orgânica e detritos no pavimento e nas camadas subsequentes diminui a taxa de infiltração superficial de água, decaindo sua função hidráulica ao longo do tempo, como pode ser observado no Gráfico 11. Fatores como granulometria das partículas de resíduo, tamanhos dos poros do pavimento, presença de árvores ao redor, tipo de uso do solo nas proximidades do pavimento e aplicação de sais para derretimento de gelo, tem sido apontado como influência para o entupimento (BEAN *et al.*, 2007; SANSALONE *et al.*, 2008; FASSMAN; BLACKBOURN, 2010 *apud* WINSTON *et al.*, 2015).

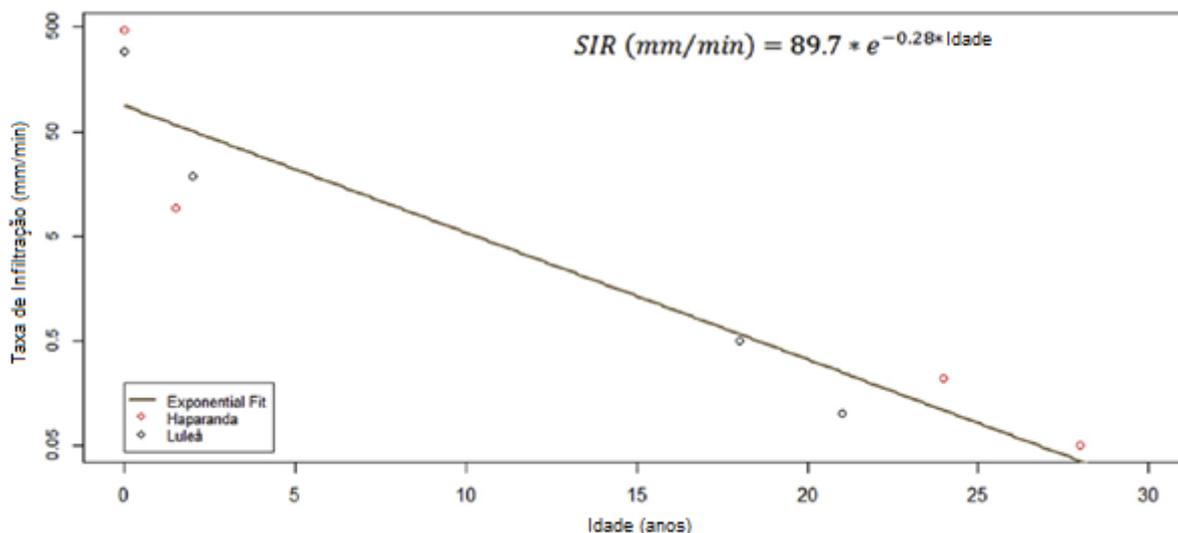


Gráfico 13 - Taxa de infiltração de dois pavimentos permeáveis ao longo do tempo na Suécia
 Fonte: Winston et al. (2015)

Pesquisas têm demonstrado, na maioria dos casos, que o entupimento acontece na superfície do pavimento, em até 2,5 cm de profundidade (GERRITS; JAMES, 2002; BEAN *et al.*, 2007 *apud* WINSTON *et al.*, 2015). Tem sido mostrado também, que existem vários métodos para mitigar os danos do entupimento, como varrição mecânica, jato de ar ou aspiração. Enquanto os dois primeiros métodos de limpeza promovem somente uma limpeza superficial, a aspiração aplica sucção, que é mais efetivo para uma limpeza mais profunda do pavimento. Mas, mesmo com os métodos de limpeza, a permeabilidade do pavimento nunca retorna à sua capacidade original (WINSTON *et al.*, 2015).

Um outro ponto a se considerar sobre os benefícios dos pavimentos permeáveis, é a retenção de água que acontece (BRATTEBO; BOTH, 2008 *apud* BRUNETTI; ŠIMŮNEK; PIRO, 2016): quando o solo abaixo do pavimento está saturado, os vazios do material, uma vez que são comunicantes, atuam como uma zona de amortecimento de pico na ocorrência de uma precipitação de grande intensidade, conferindo assim mais segurança nos centros urbanos contra inundações.

O concreto permeável, especificamente, tem benefícios adicionais, como a durabilidade e a refletância aumentada, em comparação como as outras opções de pavimentos permeáveis, como asfalto (USGBC, 2014). Pode ser pré-moldado em blocos (como os pavers) ou aplicado *in loco*. Esse pavimento permeável, como observado na Figura 6, geralmente consiste em uma camada de concreto, uma camada filtrante, que pode ser areia ou outro material que retenha partículas, uma

base, usualmente de brita ou pedra, um meio filtrante, como uma manta geotêxtil, por exemplo, e então o leito (COLLINS *et al.*, 2008 *apud* BRUNETTI; ŠIMŮNEK; PIRO, 2016). A norma brasileira NBR 16416 (ABNT, 2015b), que regra sobre pavimentos permeáveis de concreto ainda traz o mesmo esquema para pavimentos permeáveis.

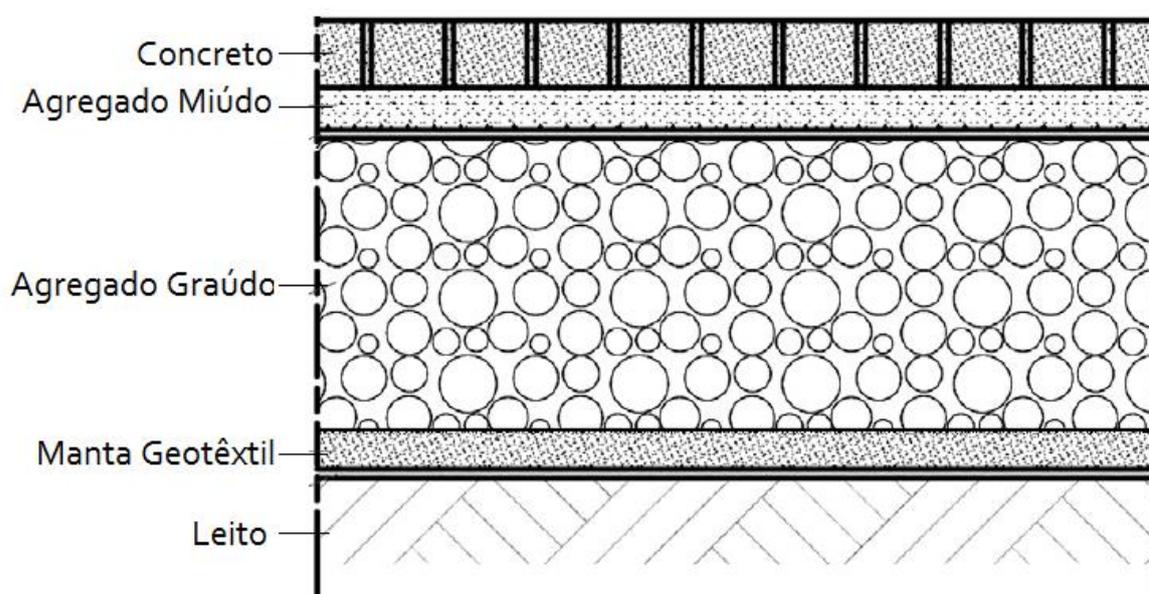


Figura 6 - Corte esquemático de um pavimento permeável em concreto
 Fonte: Adaptado de Brunetti, Šimůnek e Piro (2016)

A porosidade, no concreto permeável é considerada determinante primária da magnitude da condutividade hidráulica e da resistência à compressão. Enquanto na primeira é diretamente proporcional, na segunda, inversamente. Então, a fator determinante de uma dosagem de concreto permeável está na definição de um valor ideal de vazios, para que se alcance a resistência esperada, garantindo também permeabilidade. Essa última propriedade é regida, majoritariamente, pela proporção de agregado graúdo em relação à argamassa (ADEWUMI *et al.*, 2016).

É necessário observar também as vantagens do concreto permeável no que se refere às causas e consequências do efeito ilha de calor: sabe-se que o albedo do material não é somente ligado à sua cor, mas também à permeabilidade do material. Quando se tem um pavimento permeável de cor clara, como o concreto permeável, por exemplo, os principais mecanismos para a diminuição da temperatura são a reflexão e o resfriamento evaporativo (LI; HARVEY; GE, 2014).

Nos experimentos conduzidos por Li, Harvey e Ge (2014), os pesquisadores analisaram as características de alguns pavimentos permeáveis: asfalto permeáveis,

dois traços de concreto e, para comparação, duas granulometrias de agregados graúdos e uma de agregado miúdo. Na Tabela 18 podem ser observados os valores de permeabilidade e porcentagem de vazios para cada um dos materiais analisados.

Tabela 18 - Características dos Pavimentos Analisados

Material #	Tipo do Material (Dimensão Característica do Agregado)	Permeabilidade (cm/s)	Vazios (%)
B2	Asfalto (9,5mm) + Agregado (19mm)	0,110	12
C2	Concreto (4,75mm)	0,210	15
C3	Concreto (9,5mm) – Com Cimento Branco	0,290	17
S1	Agregado (19mm)	2,500	46
S2	Agregado (12.5mm)	1,200	25
S3	Areia	0,005	15
S0	Água	-	-

Fonte: Adaptado de Li, Harvey e Ge (2014)

Os pesquisadores notaram que a temperatura superficial do concreto permeável ao longo do dia (C2 e C3) são menores do que a do asfalto permeável (B3), como pode ser observado no Gráfico 14. Esses resultados seguem em linha com a Tabela 4, que traz a refletância por tipo de material de pavimentação (USGBC, 2009). Uma vez que ambos são permeáveis, pode se notar, portanto, como a cor do material influencia na sua temperatura e, por conseguinte, na temperatura do ambiente que o material está aplicado.

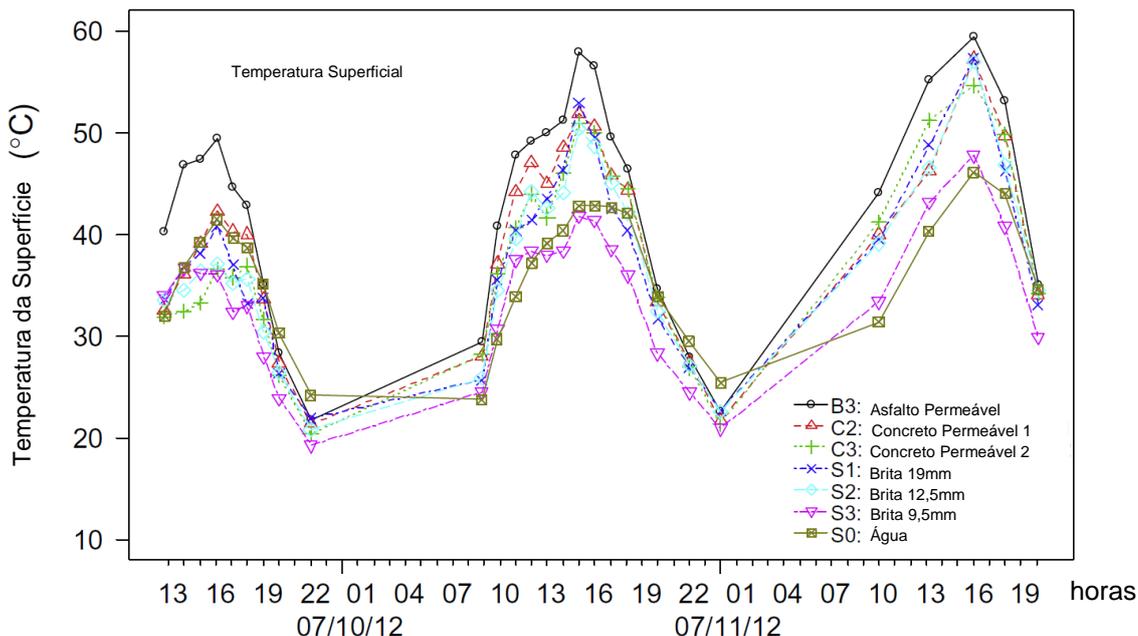


Gráfico 14 - Temperatura na superfície do material ao longo do tempo
 Fonte: Li, Harvey e Ge (2014)

No mesmo experimento, Le, Harvey e Ge (2014) apresentam a taxa de evaporação nos diferentes pavimentos, como pode ser notado no Gráfico 15.

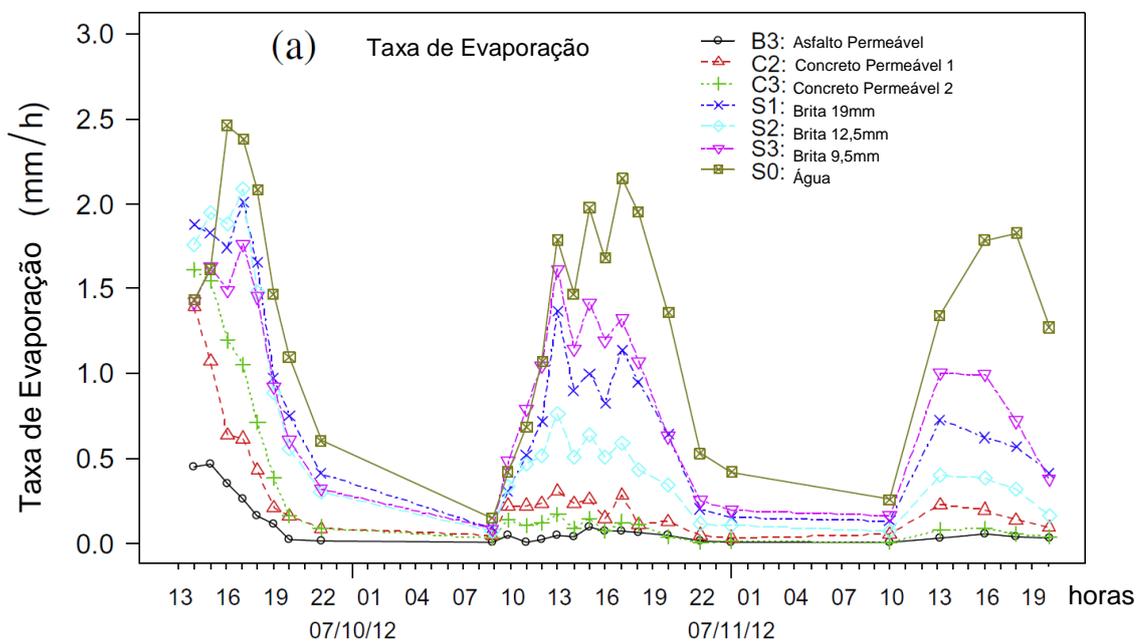


Gráfico 15 - Taxa de evaporação ao longo do tempo
 Fonte: Li, Harvey e Ge (2014)

Nesse ensaio, segundo os autores, a areia (S3) tem alta taxa de evaporação já que tem uma maior área superficial, e conseqüente maior efeito de capilaridade, em comparação com os outros materiais. Esse efeito de capilaridade consegue facilmente

mover a água que está na parte mais abaixo, para a superfície, onde está mais suscetível aos efeitos da temperatura e, por conseguinte, evaporação. Em contrapartida, reduzindo o tamanho dos poros para aumentar a capilaridade, faz com que o material tenha sua permeabilidade reduzida. Mais uma vez, é necessário buscar um valor ótimo de vazio para que se alcance, ao mesmo tempo, permeabilidade e resfriamento evaporativo no pavimento.

No Gráfico 14, ainda sobre a pesquisa de Li, Harvey e Ge (2014), os pesquisadores conseguiram observar que quanto maior a água está distância da superfície do pavimento, menor é sua taxa de evaporação. Essa taxa decai significativamente quando a profundidade da camada de água ultrapassa 20mm. Fica novamente demonstrado a importância da disponibilidade de água próximo a superfície do material para garantir assim a evaporação. Os autores chegam no valor de evaporação média dos concretos e asfalto de 0,1-0,3 mm/h.

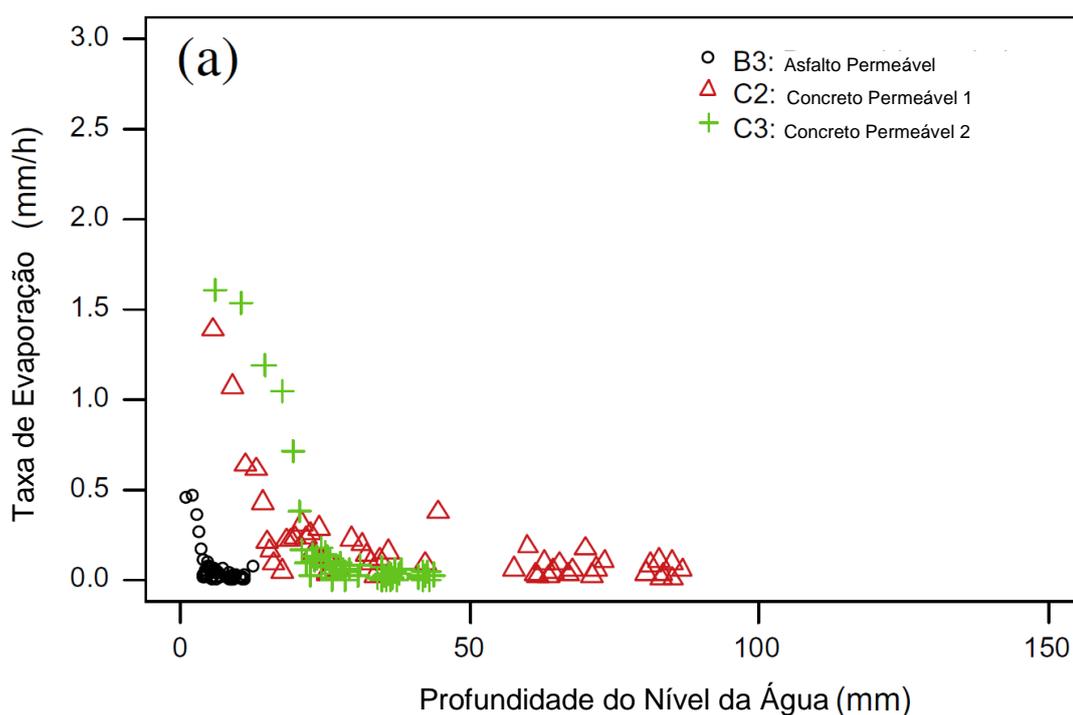


Gráfico 16 - Efeito da profundidade da água na taxa de evaporação
 Fonte: Li, Harvey e Ge (2014)

Observado por um outro ângulo é possível fazer a seguinte análise: numa superfície com pavimento permeável, a água irá infiltrar até que o solo se sature, então os vazios do pavimento passam a ser ocupados por água (uma vez que a taxa de permeabilidade do solo é menor). Então, depois da precipitação, com o ocasional

aquecimento da superfície, a água começa a evaporar em uma alta taxa, até que a camada de água alcance uma certa camada de água. Ao mesmo tempo, a água inicial penetrou o solo e os vazios estão novamente disponíveis para receber uma parcela da água que ainda está no pavimento. Isso quer dizer que, mesmo que a taxa de evaporação decaia com a profundidade, essa água ocasionalmente será absorvida pelo solo.

Acerca da resistência mecânica do concreto permeável, Kim, Gaddafi e Yoshitake (2016), estudaram dois traços: um traço cujo único aglomerante é o cimento, e outro com cimento e cinza volante. Nesse estudo não foi utilizado aditivo plastificante. Eles encontraram, então, uma queda na resistência à compressão no traço com cinza volante.

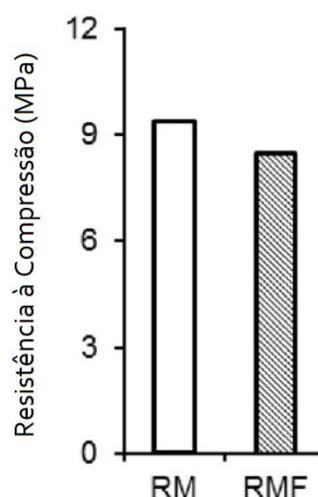


Gráfico 17 - Resistência à compressão de dois concretos permeáveis, com e sem cinza volante
Fonte: Adaptado de Kim, Gaddafi e Yoshitake (2016)

No mesmo sentido, Chandrappa e Biligiri (2016) desenvolveram um compêndio de várias pesquisas envolvendo concreto permeável e suas conclusões principais acerca da resistência a compressão dos corpos de prova, a partir de testes, modelos e traços diferentes, como apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Síntese das características de resistência à compressão em concreto permeável

Autor/Ano	Parâmetro Analisado	Aditivos	Conclusão Principal
Ghafoori e Dutta (1995)	Esforço de compactação Relação agregado/cimento Relação água/cimento	Super plastificantes	Verificou-se que a retração foi de 280×10^{-6} , que é a metade do concreto convencional típico
Yang e Jiang (2003)	Conteúdo de agregado miúdo Relação água/cimento Granulometria do agregado	Sílica ativa Vinil acetato etileno Álcool polivinílico Formaldeído hidrossol	Sílica ativa pode incrementar a resistência à compressão sem perda de permeabilidade de água
Huang <i>et al.</i> (2010)	Granulometria do agregado Areia virgem Modificação com polímero Adição de fibra	SBS látex Fibra de polipropileno	Uso de uma combinação de látex, areia e fibras pode otimizar a resistência e a drenagem no concreto permeável
Lian <i>et al.</i> (2010)	Tipos de agregado Sílica ativa Areia	Sílica ativa	Sílica ativa, sem o uso de superplastificante pode não ser efetiva para o aumento da resistência em concreto permeável
Deo <i>et al.</i> (2010)	Parâmetros de estrutura do poro	-	Um aumento da porosidade da ordem de 10% irá diminuir a resistência à compressão em 50%
Jain e Chouhan (2011)	Tamanho do agregado Forma do agregado	-	Agregados com uma menor angulosidade promovem aumento na resistência à compressão e perda na permeabilidade
Yahia e Kabagire (2014)	Tamanho do agregado Distribuição granulométrica do agregado Volume de pasta	-	Volume de pasta igual a 50% dos vazios entre partículas é um valor ótimo para combinar resistência e porosidade no concreto permeável
Gesolglu <i>et al.</i> (2014)	Tipo de borracha Adição de borracha	-	Lascas de borracha tem efeito negativo na resistência à compressão

Fonte: Adaptado de Chandrappa e Biligiri (2016)

Comparando o resultado do traço utilizando cinza volante de Kim, Gaddafi e Yoshitake (2016) e Chandrappa e Biligiri (2016), é possível aferir que o uso da cinza volante é útil para compensar a perda da resistência causada pelo aumento de vazios, desde que ao mesmo tempo seja utilizado aditivo superplastificante.

Ainda sobre concreto permeável, a norma brasileira NBR 16416 (ABNT, 2015b), estabelece requerimentos para pavimentos permeáveis de concreto.

Segundo essa normativa, existem requerimentos para o material usado como sub-base, base, camada de assentamento, material de rejuntamento e para a camada de pavimento permeável, como pode ser observado nas Tabelas 20 a 24.

Tabela 20 - Especificação para o material de sub-base e/ou base

Propriedade	Método	Especificação
Abrasão "Los Angeles"	ABNT NBR NM 51	< 40 %
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45	≥ 32 %
Índice de suporte califórnia (CBR)	ABNT NBR 9895	≥ 80 %
Material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm	ABNT NBR NM 46	≤ 2 %

Fonte: ABNT (2015b)

Tabela 21 - Especificação para o material de assentamento

Propriedade	Método	Especificação
Abrasão "Los Angeles"	ABNT NBR NM 51	< 40 %
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45	≥ 32 %
Material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm	ABNT NBR NM 46	≤ 2 %
Dimensão máxima característica (D _{máx})	ABNT NBR 7212	9,5 mm

Fonte: ABNT (2015b)

Tabela 22 - Especificação para o material de rejuntamento

Propriedade	Método	Especificação
Abrasão "Los Angeles"	ABNT NBR NM 51	< 40 %
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45	≥ 32 %
Material passante na peneira com abertura de malha de 75mm	ABNT NBR NM 46	≤ 2 %
Dimensão máxima característica (D _{max})	ABNT NBR 7212	≤ 1/3 da menor largura da junta ou área vazada

Fonte: ABNT (2015b)

Tabela 23 - Coeficiente de permeabilidade no pavimento

Tipo de revestimento	Método de Ensaio		Coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído m/s
	Local de avaliação		
	Em laboratório	Em campo	
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Anexo A	Anexo A	> 10 ⁻³
Peça de concreto permeável	ABNT NBR 13292 ou Anexo A		
Placa de concreto permeável			
Concreto permeável moldado no local			

Fonte: ABNT (2015b)

Tabela 24 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,0	≥35,0 ^a	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	≥20,0 ^a	
	Tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	≥2,0 ^b	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	≥1,0 ^c	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100,0	≥2,0 ^c	

^a determinação da resistência à compressão, conforme na ABNT 9781.
^b determinação da resistência à flexão, conforme na ANBT NBR 15805.
^c determinação da resistência à tração na flexão, conforme na ABNT NBR 12142.

Fonte: ABNT (2015b)

2.3.1 Concreto Permeável com Agregado Reciclado

Pesquisas anteriores (POON *et al.*, 2002 *apud* POON; CHAN, 2005) demonstram que a substituição de agregado natural virgem pelo agregado reciclado pode alcançar 50% em concreto para pavimentação sem registrar perda significativa na resistência à compressão. Entretanto, é necessária uma atenção adicional quando

se faz a seleção de agregados usados em pavimentos, em especial àqueles que são permeáveis. Isso porque quando a água faz contato - e/ou permeia - esses materiais, pode carregar com ela resquícios do agregado. E caso ele contenha algum contaminante (tóxico ou não), pode ser arrastado do pavimento pela água que, ocasionalmente, alcançará cursos superficiais de água ou o lençol freático, causando assim poluição de recursos hídricos (JIMÉNEZ *et al.*, 2012).

Além do fato da variabilidade no agregado reciclado, existem na literatura poucos estudos a respeito de concreto permeável que utiliza agregado reciclado, o que dificulta estabelecer um valor esperado para a resistência nesse tipo de material.

Em sua pesquisa, Cheng *et al.* (2011) analisou diferentes concretos feitos somente utilizando agregado reciclado, variando sua granulometria e a quantidade de aglomerante (cimento) por fração de volume, como pode ser observado no Gráfico 18.

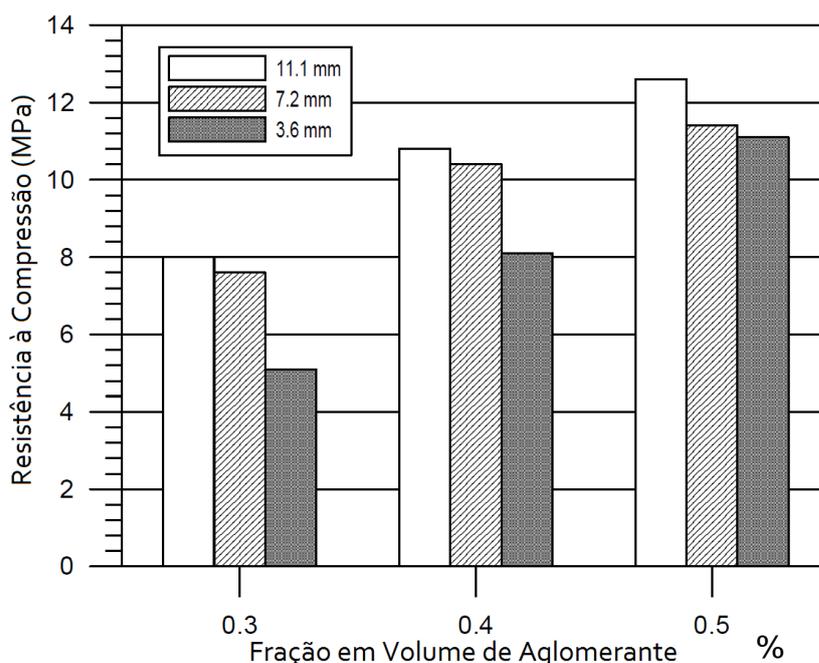


Gráfico 18 - Resistência à compressão em concreto permeável utilizando diferentes granulometrias de agregado reciclado
 Fonte: Cheng *et al.* (2011)

É possível notar como a resistência é maior quando se utiliza uma granulometria maior de agregado. Isso pode ser explicado pela diminuição da interface do agregado com a pasta, uma vez que agregados maiores tem menor área específica. Essa interface, como já discutido, é o ponto de menor resistência e que apresenta maior possibilidade de fratura no concreto. Também, no mesmo gráfico, se nota o aumento da resistência conforme mais aglomerante é adicionado na mistura.

No Gráfico 19, Cheng et al. (2011) trazem os resultados de resistência a compressão de concretos utilizando a mesma granulometria de agregado graúdo, porém para três casos distintos: utilizando agregado graúdo reciclado (RA), utilizando agregado graúdo reciclado com aditivo látex para incrementar a resistência (RA+SBL) e utilizando agregado graúdo natural virgem (NA). É possível notar como a resistência decai quando se substitui o agregado virgem pelo agregado reciclado. Mais uma vez, há um acréscimo de resistência conforme a fração de aglomerante sobre volume é incrementada.

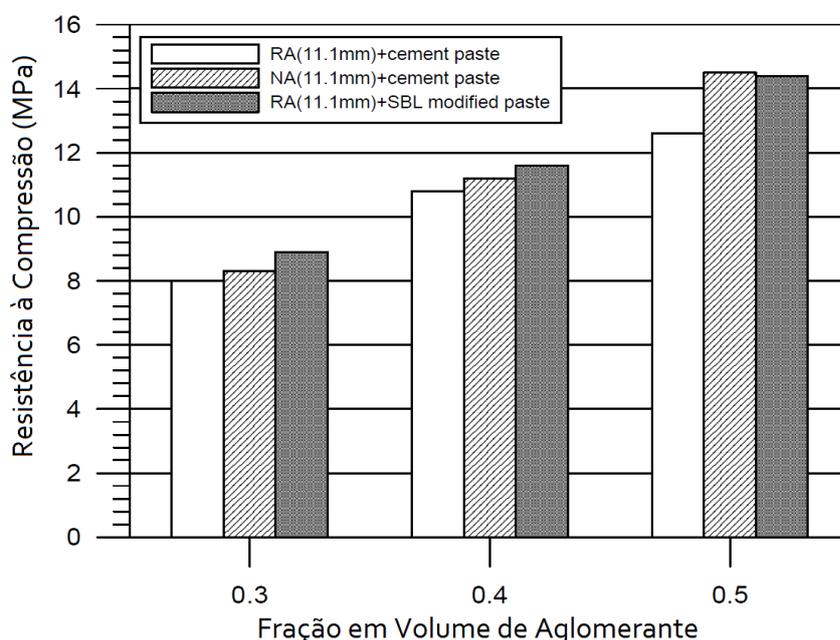


Gráfico 19 - Resistência à compressão em concreto permeável, utilizando diferentes agregados

Fonte: Cheng et al. (2011)

O efeito da queda de resistência conforme há a substituição do agregado virgem por reciclado fica ainda mais visível no trabalho de De Oliveira e Wood (2016). Aqui, os pesquisadores fizeram 4 substituições do agregado graúdo e obtiveram uma queda bastante uniforme de resistência, chegando a um R^2 , que é o coeficiente de determinação, que demonstra quanto o modelo se aproxima dos valores observados, de 0,9729, como pode ser visto no Gráfico 20.

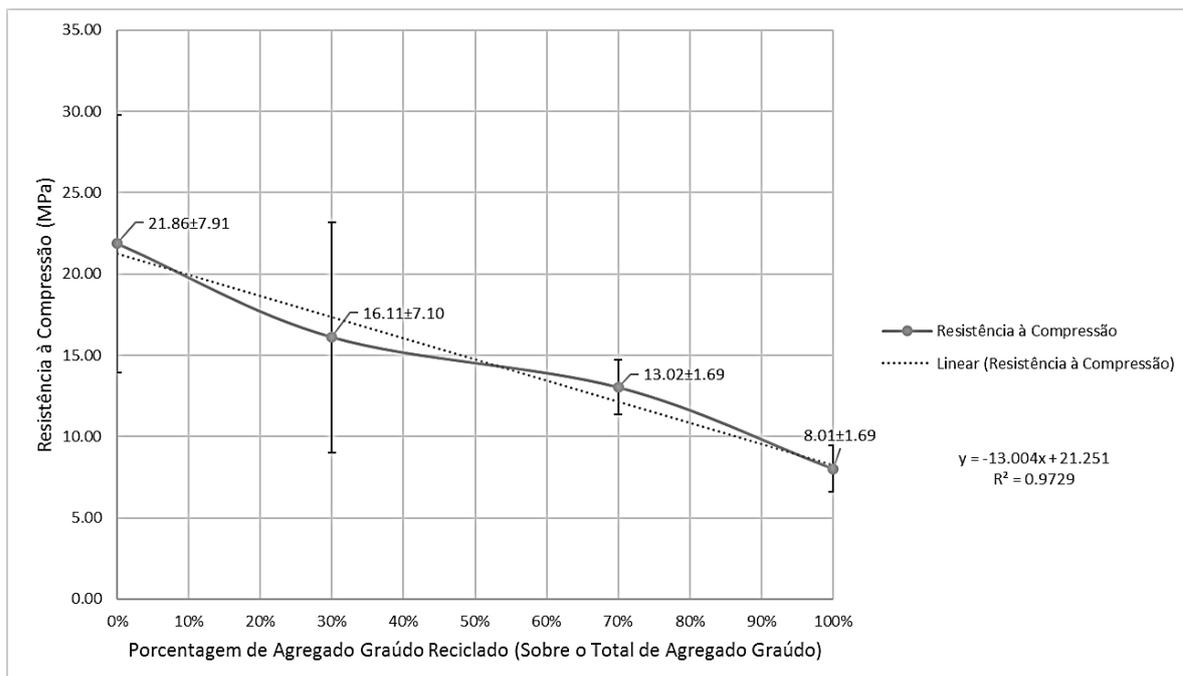


Gráfico 20 - Resistência à compressão em diferentes relações de agregado reciclado
 Fonte: De Oliveira e Wood (2016)

O mesmo acontece com a resistência à tração na flexão, com uma queda de resistência proporcional à substituição do agregado virgem pelo reciclado (DE OLIVEIRA; WOOD, 2016).

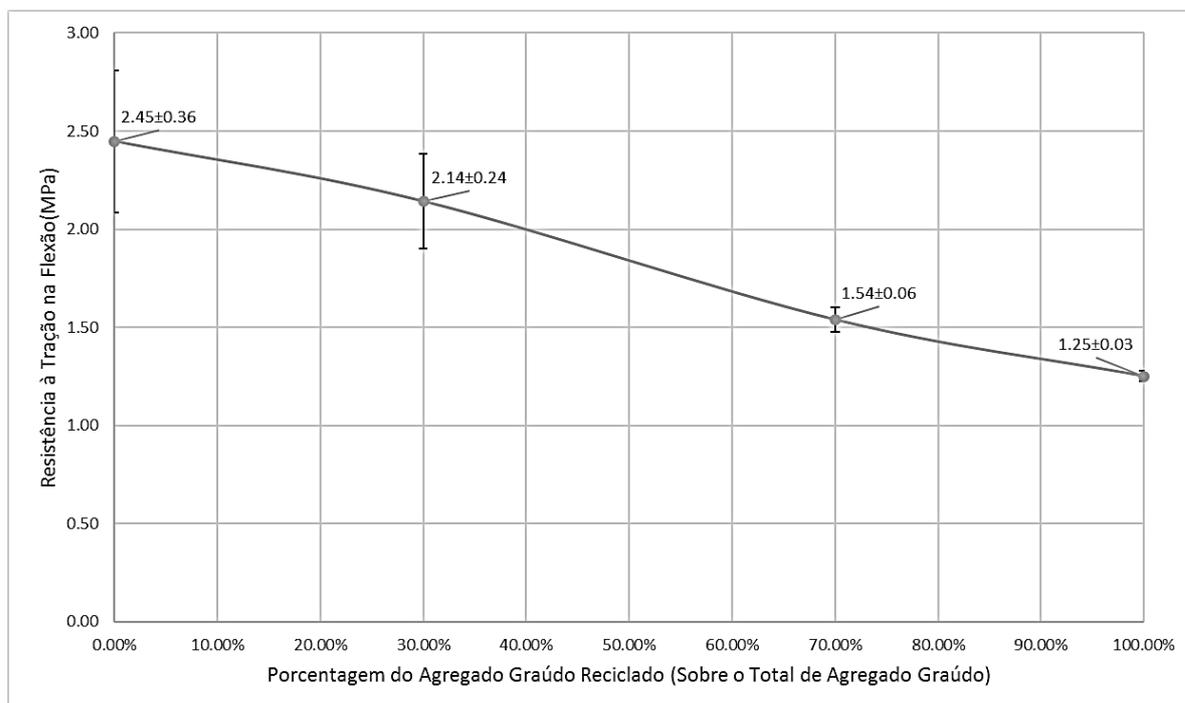


Gráfico 21 - Resistência à tração na flexão em diferentes relações de agregado reciclado
 Fonte: De Oliveira e Wood (2016)

Por fim, como observado no Gráfico 22, Cheng *et al.* (2011) analisaram a queda de resistência a compressão do concreto permeável proporcional ao aumento da relação agregado reciclado/cimento.

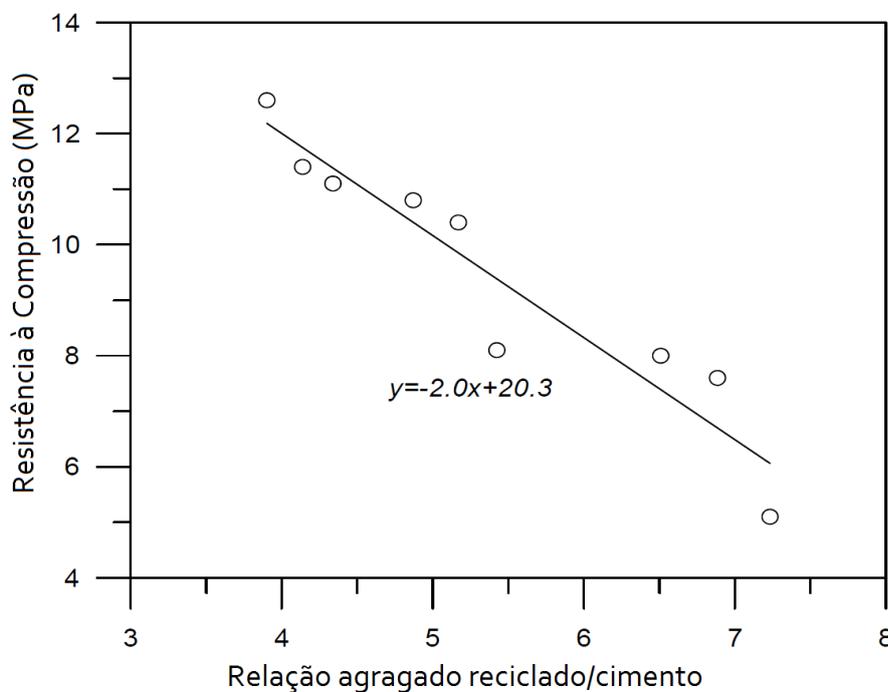


Gráfico 22 - Relação entre resistência à compressão e porcentagem de agregado reciclado sobre cimento, em concreto permeável
Fonte: Cheng *et al.* (2011)

Com as análises das pesquisas anteriores sobre concreto permeável com agregado reciclado, considerando também as pesquisas sobre os dois atributos separadamente (concreto permeável e agregado reciclado), é possível notar que existem dois fatores principais para a esperada perda de resistência em comparação ao concreto convencional: o aumento de vazios, que confere permeabilidade, e os atributos do agregado reciclado, como presença de argamassa, variabilidade na sua composição e interface frágil.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foram utilizados agregados reciclados disponíveis na região de Curitiba, compostos por miúdos e graúdos. Os ensaios realizados seguiram normativas nacionais e internacionais, e foram realizados nas dependências dos Laboratórios de Materiais do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, sede Ecoville, na cidade de Curitiba – PR, entre os dias 13 de março de 2017 e 14 de junho de 2017.

Primeiramente, foi realizada a caracterização dos agregados que seriam utilizados. Com base nessas primeiras informações, definido os traços a serem utilizados, realizada a rodagem do concreto, seguido pelos testes com o material fresco e subsequentes testes com o material em estado endurecido.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 Agregado Reciclado

O agregado reciclado utilizado é de origem cimentícia. Foi obtido no Distrito de Manutenção Urbana – Regional Pinheirinho, órgão da Prefeitura Municipal de Curitiba. O material era armazenado ao ar livre, em pilhas, como pode ser observado na Figura 7.



**Figura 7 - Armazenamento do agregado reciclado no Departamento de Manutenção Urbana
Fonte: Autoria Própria (2017)**

O material foi fornecido para o órgão municipal pela empresa Soliforte Reciclagem Ltda, localizada em Campo Largo, região metropolitana de Curitiba. O material é considerado um reciclado pós-consumo² e não apresentava contaminantes aparentes, como plástico, vidro, metal, argilas ou cerâmicas.

3.1.2 Agregado Graúdo Virgem

O agregado graúdo utilizado era armazenado ao ar livre, em uma pilha. Assim como o agregado reciclado, apresentava uniformidade e a não observância de contaminantes. É um material virgem, de origem mineral.

3.1.3 Agregado Miúdo Virgem

O agregado miúdo virgem era uma areia de origem mineral, adquirida em um pacote plástico de 15 quilos. Também uniforme, sem a presença de contaminantes ou corpo estranho.

3.1.4 Cimento Portland CP-V ARI

A respeito do aglomerante, foi utilizado no concreto um Cimento Portland de Alta Resistência Inicial, CP-V ARI, da Itambé Cimentos, que atende às normativas NBR 5733 – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial e NBR 5737 – Cimentos Portland Resistentes à Sulfatos. O cimento em questão contém 4,5% de reciclado pré-consumo³ incorporado, como pode ser observado na Declaração Ambiental do Produto, presente no Anexo A. No Anexo B pode ser encontrado o relatório dos ensaios químicos realizados no cimento, pela fabricante.

² São oriundos de produtos já consumidos, que respeitaram o ciclo de vida do material (USGBC, 2014).

³ Resíduos da fabricação de novos produtos, nunca tendo atingido seu ciclo de vida ideal (USGBC, 2014).

3.1.5 Água

Toda a água utilizada, tanto nos ensaios, quanto para a composição do concreto, foi obtida pela rede municipal, sob responsabilidade da Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Num primeiro momento, foi realizada a caracterização visual, física, química e mecânica dos agregados que seriam utilizados no concreto.

A respeito dos ensaios realizados para a análise do agregado, foram feitos os ensaios contidos na norma NBR 15116, que rege sobre agregado reciclado usado para pavimentos ou sem função estrutural (ABNT, 2004), conforme pode ser observado no Quadro 1.

Propriedades		Método de ensaio	Frequência de ensaios	
			Concreto sem função estrutural	Camada de pavimento
Composição granulométrica		ABNT NBR 7181	Não se aplica	A cada lote
		ABNT NBR NM 248	A cada lote	Não se aplica
Teor de material passante na peneira 75 µm		ABNT NBR NM 46	A cada lote	Não se aplica
Absorção de água	Agregado graúdo	ABNT NBR NM 53	A cada lote	Não se aplica
	Agregado miúdo	ABNT NBR NM 30		
Torrões de argila e materiais friáveis		ABNT NBR 7218	A cada lote	Não se aplica
Índice de forma (agregado graúdo)		ABNT NBR 7809	Não se aplica	A cada lote
Índice de suporte Califórnia e expansibilidade		ABNT NBR 9895	Não se aplica	A cada lote
Composição do agregado graúdo		Anexo A	A cada lote	
Percentual de materiais não minerais no agregado miúdo		Anexo B	A cada lote	
Teor de cloretos		ABNT NBR 9917	Uma vez por mês ou 6 000 m ^{3 1)}	Não se aplica
Teor de sulfatos		ABNT NBR 9917	Uma vez por mês ou 6 000 m ^{3 1)}	

¹⁾ O que primeiro ocorrer.

Quadro 1 - Ensaios de caracterização do agregado reciclado
Fonte: ABNT (2004)

3.2.1 Composição Granulométrica

Com o objetivo de determinar a granulometria dos agregados utilizados, foram seguidos os procedimentos contidos na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003a), que rege sobre a determinação da composição granulométrica de agregados.

O ensaio foi executado tanto para o material reciclado (parcelas miúda e graúda) quanto para os materiais virgens (areia e brita).



Figura 8 - Ensaio de granulometria do agregado reciclado
Fonte: Autoria Própria (2017)

Em resumo, o material para o ensaio foi seco em estufa à 100°C, durante 24h. Depois de resfriadas à temperatura ambiente, foi determinada a massa inicial. Então, com a ajuda de agitadores eletromecânicos, a amostra foi peneirada pelo conjunto de peneiras das séries normal e intermediária. O material retido em cada peneira teve então sua massa determinada.



Figura 9 - Ensaio de granulometria do agregado miúdo virgem
Fonte: Autoria Própria (2017)

A partir disso, foi possível elaborar a curva granulométrica de cada material analisado.

3.2.2 Índice de Forma

Para avaliar a relação entre o comprimento e a espessura dos grãos dos agregados graúdos utilizados, foi realizada a determinação do índice de forma, segundo a metodologia da norma NBR 7809 (ABNT, 2006).

O ensaio foi realizado com o material seco gerado no ensaio de granulometria, separado por faixa granulométrica. Primeiro obtêm-se o número de grãos por faixa granulométrica, e então faz a medição do comprimento e a espessura de cada grão. Por fim, o índice de forma é dado pela relação entre o comprimento e a espessura (c/e).

3.2.3 Torrões de Argila e Materiais Friáveis

Seguindo a norma NBR 7218 (ABNT, 2010), foi feita a determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis no agregado reciclado.

3.2.4 Absorção de Água

Para avaliar a absorção do agregado graúdo, foi utilizada a metodologia contida na norma NBR NM 53 (ABNT, 2003b). Para obter o valor da absorção no agregado graúdo, inicialmente a amostra é colocada em água, durante 24 horas. Após esse período, o material é retirado da água e o excesso de água superficial removido com o auxílio de um tecido, caracterizando assim o estado saturado de superfície seca. Depois disso, o material é levado para estufa, com temperatura de 100°C, durante 24 horas, para obter a massa seca do material. A absorção é dada pela fórmula:

$$A = \left(\frac{(m_s - m)}{m} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde:

A = absorção, em porcentagem

m_s = massa da amostra saturada de superfície seca

m = massa da amostra seca em estufa

Em paralelo, para determinar a absorção do agregado miúdo, foi utilizada a norma NBR NM 30 (ABNT, 2001), que dita a metodologia para o ensaio.

Em síntese, a amostra do material é seca em estufa, à 100°C por 24 horas, e então tem sua massa determinada. Depois disso, fica 24 horas coberta por água, que, após esse período, é drenada. O material úmido é inserido em um molde, com o auxílio de uma haste de compactação. O molde é então retirado: se houver umidade superficial, o material conservará a forma do molde. Se isso acontecer, a amostra é seca com o auxílio de uma corrente de ar quente e o mesmo procedimento com o molde é realizado frequentemente, até que, quando o molde for retirado, o material

desmorone. Quando isso acontecer, o material atingiu a condição de saturado de superfície seca e tem sua massa determinada. A absorção é dada pela fórmula:

$$A = \left(\frac{(m_s - m)}{m} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde:

A = absorção, em porcentagem

m_s = massa da amostra saturada de superfície seca

m = massa da amostra seca em estufa

3.2.5 Massa Específica

Para o agregado graúdo foi determinada a massa específica do agregado seco, na condição saturado de superfície seca e aparente, seguindo a metodologia descrita na norma NBR NM 53 (ABNT, 2003b), mesma normativa que dita o procedimento para obter o valor de absorção do agregado graúdo.

Para a aquisição dos resultados, é necessário a massa da amostra seca em estufa (por 24 horas, à 100°C), a massa da amostra em água e massa da amostra na condição satura de superfície seca. Com essas informações, o cálculo é dado da seguinte maneira:

$$d = \left(\frac{m}{m_s - m_a} \right) \quad (2)$$

$$d_s = \left(\frac{m_s}{m_s - m_a} \right) \quad (3)$$

$$d_a = \left(\frac{m}{m - m_a} \right) \quad (4)$$

Onde:

d = massa específica do agregado seco

d_s = massa específica do agregado na condição saturado de superfície seca

d'_s = massa específica aparente do agregado

m = massa da amostra seca em estufa

m_s = massa da amostra saturada de superfície seca

m_a = massa da amostra em água

3.2.6 Material Pulverulento

O material pulverulento é a parcela mais fina do material, que é aquela passante pela peneira com abertura de malha de 75 μ m. Esses componentes são, normalmente, materiais que se dispersam por lavagem, como argilas e materiais solúveis, tendo a metodologia normatizada pela NBR (ABNT, 2003c). Nesta pesquisa, foi realizada o ensaio de determinação do material pulverulento no agregado reciclado, composto pela parcela miúda e graúda.

De maneira resumida, inicialmente determina-se a massa de uma amostra após ter sido seca em estufa (24 horas, à 100°C). Com água, dentro um recipiente, o material é agitado com o auxílio de espátula, de modo que lave o material, e toda a água é passada por um jogo de peneiras, onde a inferior tem abertura de malha de 75 μ m e a superior corresponde à peneira de 1,18mm. Novamente é adicionada água no recipiente, agitada e então vertida sobre o conjunto de peneiras. Essa ação é repetida até que a água da lavagem fique clara.

Depois disso, o material retido nas peneiras é retornado para o recipiente com a amostra lavada. O material então é seco em estufa e tem sua massa medida. A porcentagem de material pulverulento é então dada pela equação:

$$m = \left(\frac{m_i - m_f}{m_f} \right) * 100 \quad (5)$$

Onde:

m = porcentagem de material pulverulento

m_i = massa original da amostra seca

m_f = massa da amostra seca, após a lavagem

3.2.7 Umidade Ótima

Utilizando a metodologia contida nas normas NBR 9895 (ABNT, 2016a) e NBR 7182 (ABNT, 2016a), foi determinada a umidade ótima da parcela miúda do agregado reciclado.

No ensaio, é determinada a umidade ótima do agregado, conforme metodologia normatizada, com subseqüentes adições de água a uma amostra seca de material, em um recipiente de volume fixo, até que o material atingisse a sua massa específica aparente máxima. A determinação da umidade ótima foi realizada com a parcela miúda do agregado reciclado.

3.2.8 Resistência à Abrasão

Com o objetivo de melhor analisar a resistência do agregado graúdo reciclado, foi realizado o ensaio de abrasão “Los Angeles” com o material, seguindo a metodologia presente na NBR NM 51 (ABNT, 2000).

Conforme curva granulométrica, o material foi classificado seguindo tabela de graduação. Então, a amostra foi seca em estufa, e teve as granulometrias necessárias para o ensaio separadas em agitador eletromecânico. Essas parcelas então foram inseridas na máquina “Los Angeles” e o ensaio iniciado conforme parâmetros contidos na norma, para a graduação específica.

Depois de completar o processo no equipamento, o material foi passado por peneiramento e comparado com a massa inicial. A abrasão é dada então pela Fórmula 6, a seguir.

$$P = \left(\frac{m - m_i}{m} \right) * 100 \quad (6)$$

Onde:

P = perda por abrasão, em porcentagem

m = massa original da amostra seca

m_i = massa do material retido em peneira

É importante pontuar que foram utilizadas peneiras com abertura de malha 1,19mm e 2,36mm, levemente distinta da estabelecida na NBR, que é 1,7mm. Isso porque a abertura estabelecida em norma é bastante incomum e difícil de se obter.

Como resultados, serão apresentadas as abrasões considerando as duas diferentes aberturas de peneira ensaiadas e, conforme julgamento técnico, será adotado um dos dois valores para efeito de cálculo.

3.2.9 Determinação de Cloretos

A determinação de cloreto total contida no agregado reciclado foi feita seguindo a metodologia TC 178-TMC (RILEM, 2002). A escolha do procedimento foi feita pelo método ser mais simples e rápido, que utiliza somente reagentes químicos, ao invés de eletrodos e análise por diferença de potencial, como são os métodos mais comuns adotados pelas normas brasileiras.

Foram ensaiadas duas amostras do agregado e uma amostras em branco, para calibração do método e garantia dos resultados.

3.2.10 Determinação de Sulfatos

Para medir a porcentagem de sulfatos no agregado reciclado, foi utilizada a seção 15 da metodologia C 114 -07 (ASTM, 2007). Por esse método foi descoberto a quantidade de SO_3 presente no agregado reciclado.

Nessa análise foram ensaiadas duas amostras do agregado e duas amostras em branco. O valor de calibração foi dado pela média dos valores obtidos com as amostras em branco.

3.3 CONCRETO EM ESTADO FRESCO

O traço a ser utilizado foi baseado em estudos pré-existentes e adaptado conforme as características dos agregados utilizados. Seguindo o trabalho de De Oliveira e Wood (2016), que utilizou o traço 1:1:5:0.43 (sendo os valores de cimento,

agregado miúdo, agregado graúdo e água, sequencialmente). Neste trabalho, os autores obtiveram um concreto permeável, com baixo consumo de materiais por volume e uma grande confiabilidade nos valores de resistência, conforme se variava a porcentagem de agregado reciclado sobre a quantidade total de agregado reciclado.

Foram ainda feitas 4 diferentes composições de concreto, variando-se a porcentagem de agregado reciclado sobre a quantidade total de agregado do concreto, com o objetivo de entender o comportamento do material e como ele afetava características do concreto.

Importante pontuar, também, que o agregado reciclado utilizado teve suas porções miúda e graúda separadas por peneiramento, em equipamento eletromecânico.

3.3.1 Processo de Mistura

Uma vez definido o traço, o concreto foi rodado seguindo a norma NBR 12655 (ABNT, 2015A). Adicionalmente, todo o agregado reciclado utilizado na mistura sofreu o processo de pré-molhagem. Nesse processo, é determinado uma porcentagem de pré-molhagem com base na absorção total do agregado, isso é, a quantidade de água da pré-molhagem é dada pela Fórmula 7.

$$\text{Água} = (\text{pré} - \text{molhagem} * \text{absorção} * \text{massa do agregado}) \quad (7)$$

Esse processo é realizado já que o agregado reciclado tem uma absorção muito alta, que pode retirar grande quantidade de água da argamassa e interromper o processo de hidratação do cimento.

Segundo a indicação de Soto (2016), que analisou qual o valor ideal de pré-molhagem, foi utilizado o fator de 75%. Segundo a autora, esse é o valor ótimo, que maximiza a resistência do concreto final. Esse valor é próximo do sugerido na norma NBR 15116 (ABNT, 2004), que rege sobre agregado reciclado. A normativa recomenda valores próximos a 80%.

3.3.2 Abatimento do Tronco de Cone

Com o objetivo de analisar a consistência do concreto fresco, foram realizados testes de abatimento de tronco de cone (“*slump test*”) para cada composição, seguindo a metodologia contida na norma NBR NM 67 (ABNT, 1998).

3.3.3 Moldagem dos Corpos de Prova

Foram gerados 12 corpos de prova com 10cm de diâmetro e 20cm de altura para cada uma das composições, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2016b).



Figura 10 - Armazenamento dos corpos de prova nas primeiras 24 horas
Fonte: Autoria Própria (2017)

Depois de moldados, os corpos de prova permaneceram 24 horas nos moldes. Depois disso, foram removidos e direcionados a um tanque de cura, com água à temperatura ambiente, onde permaneceram por 28 dias ou mais.

3.4 CONCRETO EM ESTADO ENDURECIDO

3.4.1 Compressão Axial

Os ensaios de compressão axial seguiram a norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 2007). Para cada uma das quatro composições, foram ensaiados quatro corpos de prova com 28 dias de idade, de modo a dar confiabilidade aos dados obtidos.



Figura 11 - Ensaio de compressão axial após rompimento do corpo de prova
Fonte: Autoria Própria (2017)

Depois de obtida a resistência com cada corpo de prova, com o objetivo de se obter parâmetros para comparação com a norma brasileira que rege sobre pavimentos permeáveis (ABNT, 2015b), foi feita a correção dos valores de resistência à compressão axial, conforme metodologia sugerida por Neville (1997). Segundo esse método, existe uma correlação entre a resistência em função da altura/diâmetro do corpo de prova, como pode ser observado no Gráfico 23.

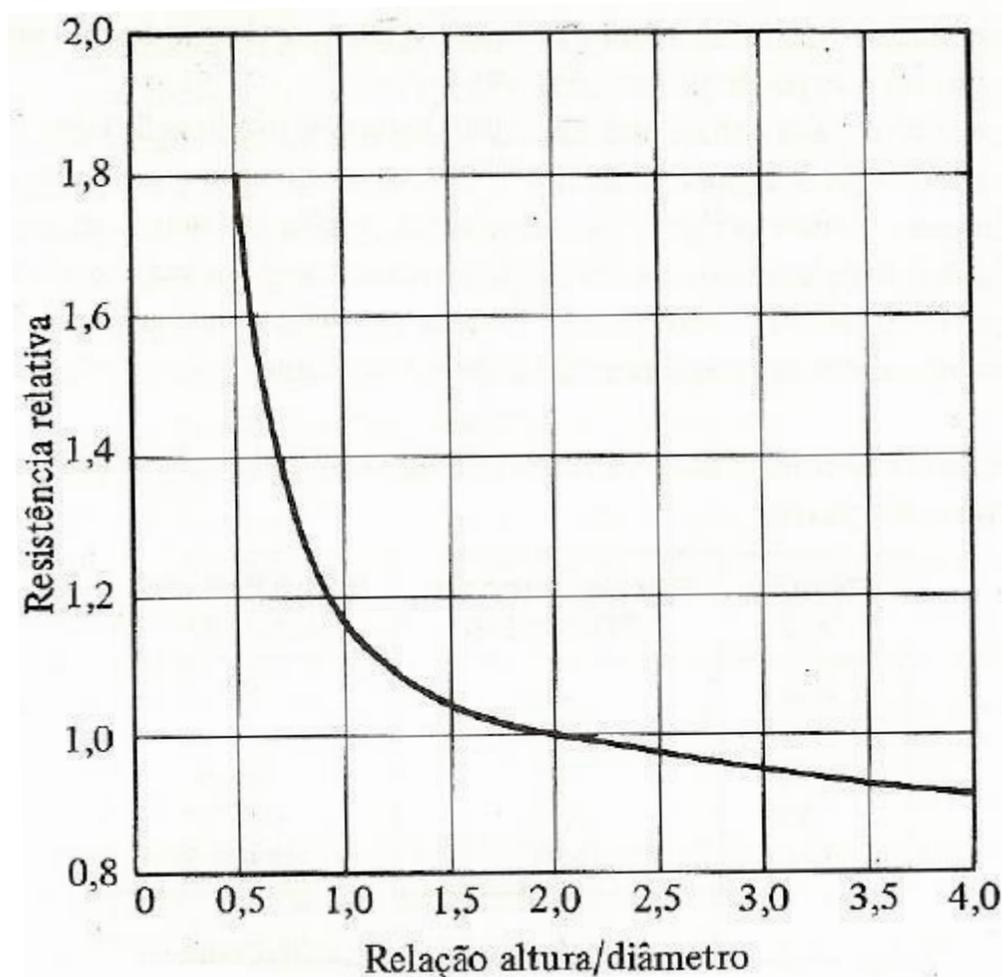


Gráfico 23 - Influência da relação altura/diâmetro na resistência à compressão do concreto
Fonte: Neville (2017)

Assim como utilizado por Jahn (2016), que também estudou concreto permeável para pavimentação, considerou-se um paver padrão de 6 cm de altura e diâmetro de ensaio de 9,7 cm, que fornece uma relação altura/diâmetro na ordem de 0,62. Com essa relação e ajuda do gráfico, obtêm-se uma correlação de resistência da ordem de 1,5. Como os corpos de prova utilizados nessa pesquisa tem uma relação altura/diâmetro de 2, a correlação de resistência é 1.

Depois de medidas e analisadas as resistências, foram calculados os desvios padrões e feita as análises de dados espúrios.

3.4.2 Tração por Compressão Diametral

Foram realizados ensaios de tração por compressão diametral em quatro corpos de prova por composição. O concreto foi ensaiado com 28 dias de idade, e seguiu a metodologia da norma NBR 7222 (ABNT, 2011). Uma vez ensaiado, todas as resistências foram computadas e, para cada composição, foi calculado o desvio padrão e feita a análise dos dados espúrios.

3.4.3 Tração na Flexão

Segundo a pesquisa de Balbo (2013), é possível correlacionar resistências à tração indireta com tração na flexão, em concreto em secos e plásticos. Nesse estudo, o autor investigou diversos tipos de traços de concreto, inclusive traços secos e com agregado reciclado incorporado, onde obteve uma curva de regressão entre pontos com uma alta taxa de confiabilidade, com um R^2 da ordem de 0,88, conforme a Fórmula 8.

$$f_{ct,f} = 1,02 * f_{ct,sp} + 1,48 \quad (8)$$

Onde:

$f_{ct,f}$ = resistência do concreto à tração na flexão, em MPa

$f_{ct,sp}$ = resistência do concreto à tração indireta, em MPa

Visto que essa fórmula possui um alto índice de confiança, tendo sido gerada em um estudo que analisou concretos com características próximas ao estudado, e levando em consideração, conforme descrito no item 3.4.2, será feita a determinação da tração por compressão axial, que é um tipo de tração indireta, a Fórmula 10 será utilizada para a determinação da resistência do concreto à tração na flexão.

3.4.4 Determinação do Índice de Vazios, Absorção e Massa Específica

Seguindo o método descrito pela NBR 9778 (ABNT, 2005a), foi calculado o índice de vazios, absorção e massa específica para cada uma das composições.

O ensaio se inicia quando o corpo de prova, depois de permanecer mais de 28 dias imerso em água, segue direto para a determinação da sua massa imersa em água. Depois de sair da água, é deixado para escorrer (já que como concreto permeável, existe água superficial no seu interior) por cerca de 10 minutos. Então ele tem sua superfície seca com o auxílio de um tecido, chegando até a condição de saturado de superfície seca, quando sua massa é determinada.

Por fim, os corpos de prova seguem para secagem em estufa, por 72 horas, à 100°C, para então ter a massa seca determinada. De posse de todas essas informações, os resultados são dados pelas fórmulas a seguir.

$$A = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \right) * 100 \quad (9)$$

$$I_v = \left(\frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \right) * 100 \quad (10)$$

$$\rho_s = \left(\frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \right) \quad (11)$$

$$\rho_{sat} = \left(\frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \right) \quad (12)$$

$$\rho_r = \left(\frac{m_s}{m_s - m_i} \right) \quad (13)$$

Onde:

A = absorção, em porcentagem

I_v = índice de vazios, em porcentagem

ρ_s = massa específica da amostra seca

ρ_{sat} = massa específica da amostra saturada

ρ_r = massa específica real

m_s = massa da amostra seca em estufa

m_{sat} = massa da amostra saturada de superfície seca

m_i = massa da amostra imersa em água

3.4.5 Permeabilidade

Com o propósito de avaliar a permeabilidade do concreto e entender a possível mudança através das composições, foi utilizado um método baseado no trabalho de Jahn (2016) e Neithalath et al. (2003), tendo algumas adaptações no equipamento e no método de cálculo. Todos os corpos de prova utilizados no ensaio estavam armazenados em água por mais de 28, estando por tanto saturados. Foi realizado o teste em todas as quatro composições de concreto, sendo feita quatro diferentes medições para cada corpo de prova analisado, a fim de avaliar a confiabilidade dos resultados.

Como pode ser observado na Figura 12, o equipamento é formado por um corpo principal, de PVC branco, com diâmetro interno de 97mm, que funciona com um reservatório de água acima do corpo de prova. Logo na base do reservatório, o corpo de prova de concreto é encaixado, seguindo por uma luva de PVC, conectando a mais um trecho de tubo de PVC, ligado a uma caixa sifonada.

Na saída lateral horizontal da caixa sifonada, está conectado um dreno, com diâmetro interno de 32mm, de PCV marrom. Esse dreno está equipado com um registro esfera, seguido por uma curva 90° e mais uma seção de tubo vertical, cuja altura ultrapassa o topo do corpo de prova.



Figura 12 - Equipamento de determinação da permeabilidade, antes e depois da selagem
Fonte: Autoria Própria (2017)

O procedimento do ensaio se deu da seguinte forma: o corpo de prova era acoplado na base de encaixe (luva, acima da caixa sifonada). Logo após isso, o corpo principal (reservatório) era encaixado na parte superior do corpo de prova.

Para garantir que toda a água passasse pelo corpo de prova e não saísse por suas laterais, ele foi vedado com filme plástico transparente, e com o auxílio de um soprador de ar quente, o filme foi aderido à lateral do concreto. Logo após isso, uma presilha metálica de pressão era afixada na conexão entre o reservatório e o corpo de prova. Subsequentemente, uma fita adesiva plástica marrom envolvia o corpo de prova e o contato dele com o equipamento de permeabilidade, de modo a conferir pressão, garantir que a água atravessasse o concreto e não houvesse vazamento.

A seguir, com o registro aberto, água era adicionada ao reservatório até que seu excesso estravasse no final do dreno. Quando isso acontecia, o registro era fechado. Então, com auxílio de uma trena, era medida a distância entre o topo do reservatório e o topo da água acumulada. Logo após a medição, água era adicionada até o topo do reservatório.

Então, usando um cronômetro, o registro era aberto ao mesmo tempo que o tempo começava a ser medido. Assim, a água fluía do reservatório até sua saída no final do dreno. Quando o fluxo cessava no dreno, o cronômetro era parado.

Tendo como conhecido a área da seção e a altura do reservatório, é possível obter o volume de água que atravessou o material no tempo medido. Desse modo, usando a Lei de Darcy (CAPUTO; CAPUTO, 2011), é possível obter o coeficiente de permeabilidade do material, como observado na Fórmula 14.

$$k = \frac{Q * L}{A * h * t} \quad (14)$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade

Q = volume de água que atravessa a amostra no tempo t

L = altura do corpo de prova

A = área da seção transversal do corpo de prova

h = desnível medido entre o topo do reservatório e a água acumulada (reservatório)

t = tempo medido para o volume Q atravessar o corpo de prova

É fundamental apontar que, como esse é um teste simplificado, o coeficiente de permeabilidade foi calculado partindo do pressuposto que o teste foi realizado em um permeâmetro de carga constante. Isso porque, como a altura do reservatório é relativamente pequena, é esperada uma pequena diferença na queda da pressão da coluna da água. Adicionado a isso, como não é um método largamente utilizado e/ou normatizado, existe um grande número de fatores que podem alterar o resultado do modelo, como a montagem do equipamento e o coeficiente de tortuosidade no escoamento poroso.

3.4.6 Refletância

Refletância é a capacidade do material em refletir a luz. Essa capacidade está correlacionada com a cor do material: quando mais claro, maior a capacidade do material em refletir a luz que o atinge, como apresentado no item 2.1.2. Ao mesmo tempo, quando mais energia luminosa ele absorve, mais calor ele retém e transmite (EPA, 2008).

De modo a analisar a refletância do concreto produzido, foi realizado um ensaio com o auxílio de um luxímetro com sensor pontual do tipo “sonda”. O equipamento, da marca Phywe, com número de série 379900012137, é de propriedade do PPGEC – UTFPR, campus Curitiba, e pode ser observado na Figura 13, com o sensor pontual acoplado.



Figura 13 - Luxímetro Phywe com sensor do tipo "sonda"
Fonte: Autoria Própria (2017)

Foram analisados nesse ensaio um corpo de prova por composição de concreto, assim como asfalto exposto à ação do tempo, que é pavimento de uma rua. O ensaio foi realizado duas vezes, sendo uma vez durante à noite, à presença de luz

artificial, e uma vez durante o dia, para poder entender a reflexão à luz natural, sendo realizado no final da tarde para evitar ofuscamento no sensor. Em cada uma das realizações do ensaio, o asfalto e cada corpo de prova foram medidos quatro vezes, para garantir confiabilidade nos dados, sendo possível geral médias e desvios padrões.

No ensaio, inicialmente, os corpos de prova foram posicionados um ao lado do outro, em um espaçamento de cerca de 25 cm, sem nenhum obstáculo próximo que pudesse realizar sombreamento. O ensaio foi realizado em uma via de asfalto, ao ar livre, abaixo de um poste de luz, isso para que o ensaio pudesse ser realizado tanto durante o dia, quanto durante a noite, com a presença de luz artificial, sem a necessidade de mover os corpos de prova, e analisando a mesma área de asfalto. Uma vez posicionados, o luxímetro era ligado. A sonda era então posicionada a 3 cm da superfície do corpo de prova, no sentido vertical, como observado na Figura 14, e então era feita a leitura no equipamento da intensidade de luz recebida pelo sensor.

As medidas eram feitas seguindo a mesma ordem dos corpos de provas e do asfalto em todas as medições. Entre cada uma das quatro medições era dado um intervalo de cinco minutos. Esse procedimento foi adotado para garantir que qualquer variação da luz, com o avançar do tempo, pudesse ser notada em todas as composições, e não se acumularia nos últimos corpos de prova, sendo assim possível comparar os dados obtidos em cada uma das composições e no asfalto. Essa metodologia foi adotada tanto para as medições durante o dia, quanto para as medições durante a noite.

É importante apontar que o objetivo desse ensaio é poder comparar a intensidade luminosa refletida pelo asfalto e pelas composições de concreto, partindo da premissa que a luz que atinge o sensor do equipamento, devido a pequena distância até o corpo de prova, é exclusivamente oriunda da reflexão da superfície do material analisado. Colabora com essa premissa o tipo do sensor, que é pontual e do formato “sonda”. Sendo assim, não é possível afirmar que os valores são necessariamente a refletância, uma vez que seria necessária uma melhor validação do método. Entretanto, é possível dizer que os valores obtidos são comparáveis entre eles, visto que o mesmo método foi aplicado para todas as composições.



Figura 14 - Realização do ensaio com o sensor do tipo "sonda"
Fonte: Autoria Própria (2017)

Ao mesmo tempo, é necessário apontar que o emprego da metodologia foi dado pela rapidez do método, e também pela dificuldade técnica em poder se realizar um ensaio de refletância normatizado, do ponto de vista da maior complexidade do método, assim que como da dificuldade em se obter os equipamentos e fornecedores do serviço.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente serão apresentados os resultados os testes com o agregado reciclado de concreto e com os agregados virgens utilizados, uma vez que esses resultados foram usados a definição do traço do concreto. Subsequentemente, serão apresentados os resultados obtidos com o concreto em estado fresco e, por fim, seus resultados em estado endurecido.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

4.1.1 Características Físicas

Os resultados obtidos no ensaio de composição granulométrica, como descrito no item 3.2.1, demonstraram que o agregado reciclado é bem graduado, sendo bem distribuído nas faixas graúdas e miúdas, como pode ser observado no Gráfico 24.

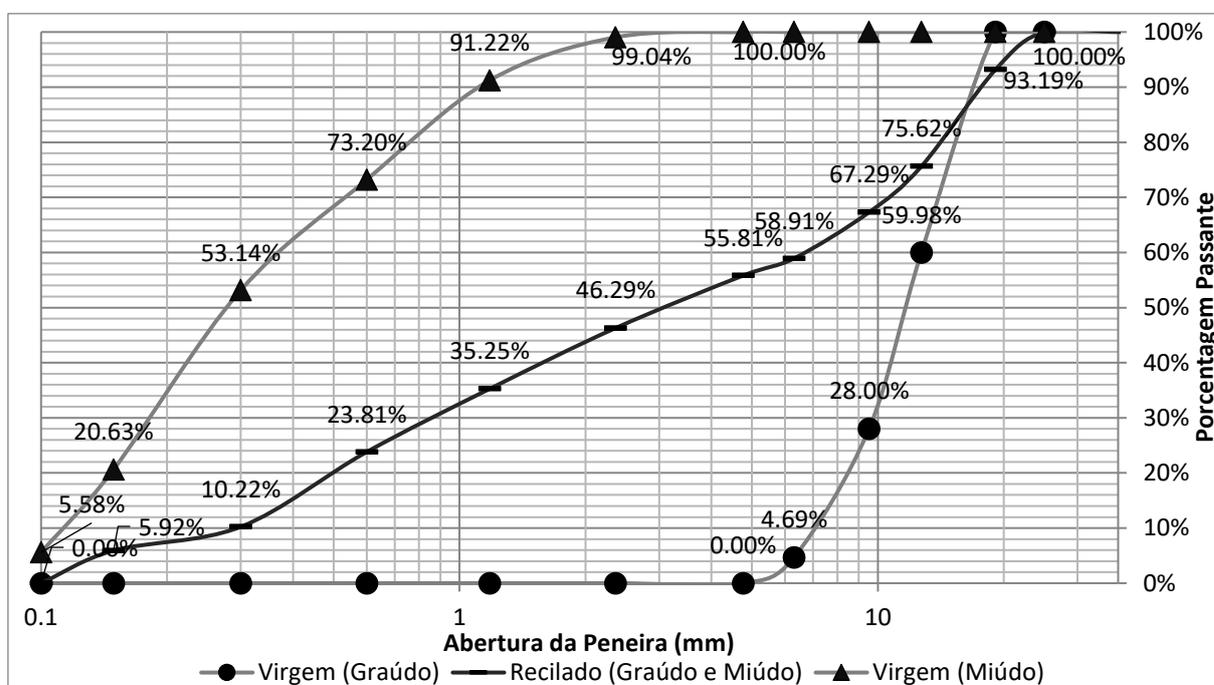


Gráfico 24 - Distribuição granulométrica dos agregados utilizados
 Fonte: Autoria Própria (2017)

É possível notar também que o agregado graúdo virgem tem uma graduação uniforme, enquanto o agregado miúdo virgem, tem uma graduação distribuída nas faixas mais finas.

Com o propósito de analisar as informações sobre granulometria, foram calculados índices relativos às características granulométricas dos agregados, como pode ser visto na Tabela 25.

Tabela 25 - Características granulométricas dos agregados analisados

Agregado	Diâmetro Máximo Característico	Módulo de Finura	Diâmetro Efetivo	Coefficiente de Não Uniformidade
Reciclado (Miúdo e Graúdo)	25mm	4,62	0,29mm	22,99
Virgem (Miúdo)	4,76mm	2,57	0,19mm	4,13
Virgem (Graúdo)	19,1mm	6,54	6,36mm	0,13

Fonte: Autoria própria (2017)

O coeficiente de não conformidade indica a uniformidade do material. Se esse índice for menor do que cinco, o material é considerado muito uniforme, entre cinco e quinze, é classificado como média uniformidade, e maior do que quinze, o material passa a ser não uniforme. Os valores obtidos mostram que os agregados virgens têm uma granulometria muito uniforme, enquanto o reciclado possui uma granulometria não uniforme, o que confirma o que foi avaliado no gráfico da distribuição granulométrica.

Observando-se ainda os outros índices da mesma Tabela 25 é possível notar que, apesar do agregado reciclado ter um diâmetro máximo característico maior, o módulo de finura mostra que o agregado graúdo virgem tem uma concentração maior de grãos maiores, ou seja, tem uma graduação mais uniforme, o que é reforçado quando se analisa o diâmetro efetivo do material. Em contrapartida, o diâmetro efetivo do agregado reciclado é baixo, mostrando que esse agregado possui uma parcela representativa em graduações menores, diferentemente da brita virgem.

Quando se compara os valores obtidos com os requisitos da norma brasileira NBR 15116 (ABNT, 2004) que rege sobre agregados reciclados da construção, como pode ser observado na Tabela 7, é possível notar que somente o agregado reciclado, composto pelas suas parcelas miúda e graúda atende os padrões mínimos de coeficiente de não uniformidade para uso em pavimentação. Esse agregado atende também a dimensão máxima característica e teor de material passante na peneira de

0,42mm, como pode observado no Gráfico 24. O agregado reciclado também não apresentou torres de argila ou materiais friáveis.

Adicionado a isso, como visto na Tabela 26, há um teor de adequado de material passante na malha de 75µm, caso o material seja destinado ao preparo de concreto não estrutural, conforme visto na Tabela 9. Entretanto, essa quantidade de material pulverulento não atende aos requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015b), para ser usado para material de sub-base, base, assentamento e rejuntamento de pavimentos em concreto permeável.

Tabela 26 - Propriedades físicas do agregado reciclado

Propriedade	Medida
Material Pulverulento	6,2%
Índice de Forma	2,4

Fonte: Autoria própria (2017)

Analisando-se o índice de forma da parcela graúda do material, mostrado na Tabela 26, é possível afirmar que o material atende aos requisitos para uso em pavimentação, disponível na norma NBR 15116 (ABNT, 2004) e presente na Tabela 7.

É necessário observar que a mesma norma afirma que caso algum requisito granulométrico não seja atendido, é possível fazer adições ou combinações com diferentes agregados, ou mesmo segregação de determinada granulometria.

Em relação à absorção dos agregados utilizados, observado a Tabela 27 é possível notar o aumento da absorção do agregado, quando se compara o material reciclado em relação ao material virgem. Quando se analisa os requisitos da NBR 15116 para agregador reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural (ABNT, 2004), como pode ser visto na Tabela 9, é possível notar que a absorção do material reciclado extrapola o limite normatizado, tanto para a parcela miúda quanto para a parcela graúda.

Tabela 27 - Absorção dos agregados utilizados

Origem do Agregado	Absorção	
	Miúdo	Graúdo
Reciclado	14,53%	9,15%
Virgem	1,73%	0,61%

Fonte: Autoria própria (2017)

A absorção do material estudado também foi levemente maior do que estudos anteriores com agregados reciclados da mesma região (FROTTE; DI NÚBILA, 2015). Na pesquisa, as autoras calcularam a absorção de 12,35% para a parcela miúda.

Como pode ser observado na Tabela 28, a massa específica do agregado graúdo reciclado também diminuiu em comparação com o agregado virgem. Frotté e Di Núbila (2015) também observaram a mesma queda na massa específica do material reciclado quando comparado ao material virgem, como visto na Tabela 11.

Tabela 28 - Massa específica dos agregados graúdos

Material	Agregado seco	Saturado de superfície seca	Aparente
Agregado Reciclado	2,19	2,40	2,75
Agregado Virgem	2,77	2,78	2,81

Fonte: Autoria própria (2017)

Essa queda na massa específica, quando analisado com o aumento da absorção, é um indicativo que o material é mais poroso do que os agregados virgens analisados. Isso pode refletir uma queda na massa específica do concreto produzido com o material e, devido ao possível aumento de porosidade, isso também pode acarretar queda na resistência mecânica do material, em comparação com sua versão produzida com agregados virgens.

Também analisado e mostrado no Gráfico 25, é possível observar a umidade ótima do agregado reciclado miúdo.

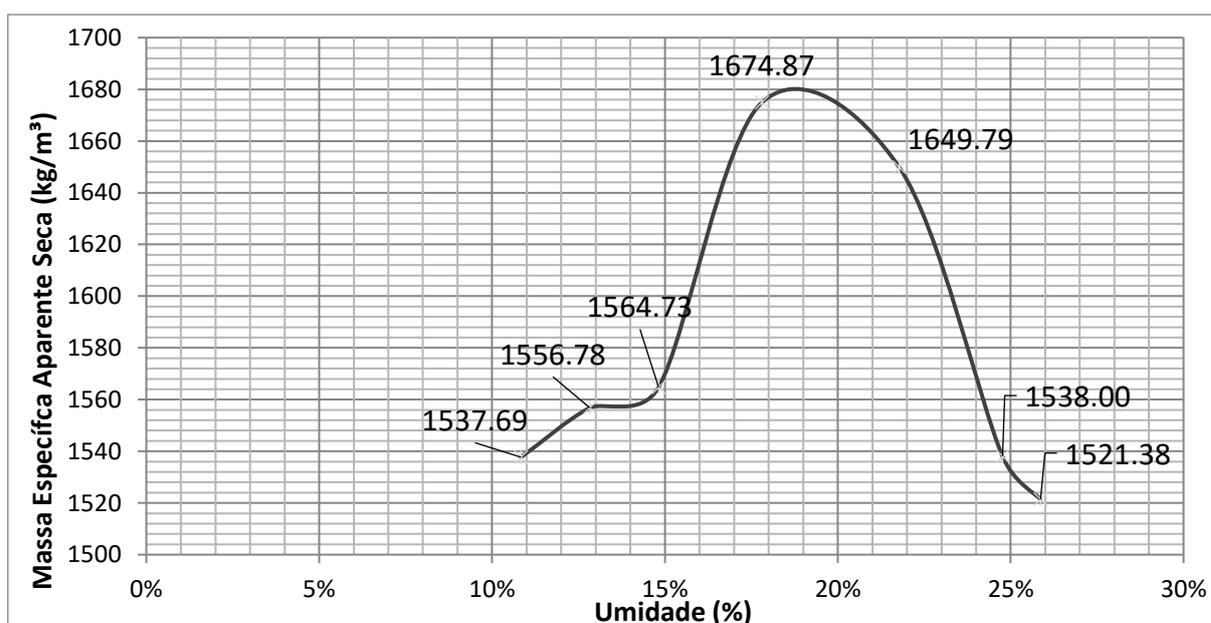


Gráfico 25 - Umidade ótima do agregado miúdo reciclado
Fonte: Autoria Própria (2017)

A umidade ótima do agregado atingiu 18,5%, com relação a sua massa específica aparente seca máxima. É possível notar que nesse valor de umidade a massa específica aparente seca do material atinge o valor de 1679 kg/m³.

Por fim, os resultados de abrasão do agregado reciclado mostram que cerca de um terço do material é perdido no ensaio de abrasão Los Angeles, como pode ser visto na Tabela 29.

Tabela 29 - Abrasão do agregado reciclado

Método	Abrasão
Utilizando peneira 1,19mm	32,27
Utilizando peneira 2,36mm	36,63

Fonte: Autoria própria (2017)

Esses resultados atendem ao que é requerido pela norma brasileira NBR 7211 (ABNT, 2005b), que apresenta as especificações de agregados para uso em concreto. Também atendente aos requerimentos da NBR 16416 (ABNT, 2015b), para ser usado como material de sub-base, base, assentamento e rejuntamento de pavimentos em concreto permeável, como observado nas Tabelas 20 a 22.

4.1.2 Conteúdo de Sulfatos e Cloretos

O agregado reciclado também teve características químicas analisadas, como concentração de cloreto total e sulfatos, como pode ser observado na Tabela 30.

Tabela 30 - Ensaios químicos realizados com o agregado reciclado

Componente	Concentração	Metodologia
Sulfato (SO ₃)	0,15%	ASTM C 114 -07
Cloreto (Total; %Cl)	0,11%	RILEM TC 178-TMC

Fonte: Autoria própria (2017)

Em comparação com a NBR 15116 (ABNT, 2004), que estabelece os requisitos para o agregado reciclado, como pode ser visto nas Tabelas 7 e 9, o material atende com segurança os limites para uso em pavimentação e como agregado para concreto não estrutural. É possível atestar, portanto, um nível muito baixo de contaminação por esses dois tipos de compostos.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EM ESTADO FRESCO

Uma vez que os resultados dos agregados foram analisados, foram definidos os traços a serem utilizados. Conforme explicado na metodologia, no item 3.3, partiu-se do estudo por De Oliveira e Wood (2016), que utilizou o traço 1:1:5:0.43.

De posse da curva granulométrica, tanto dos agregados virgens, quanto do material reciclado, como pode ser observado no Gráfico 24, comparou-se esses valores com o estudado pelos autores (DE OLIVEIRA; WOOD, 2016). Para aproximar a curva granulométrica, o traço inicial para o concreto de referência, com 0% dos agregados reciclados, foi 1:0,5:5,5:0,43.

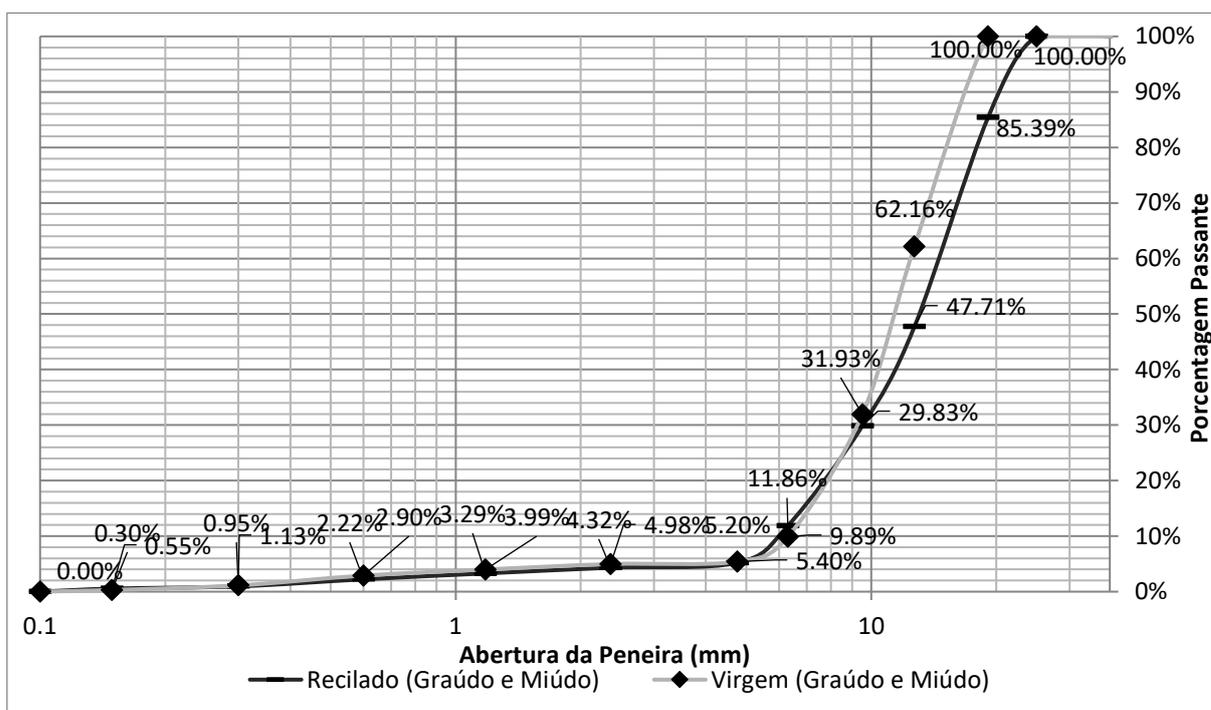


Gráfico 26 - Distribuição granulométrica ajustada dos agregados utilizados
 Fonte: Autoria Própria (2017)

Também, foi notada uma diferença na parcela graúda do agregado reciclado analisado nesse trabalho, em comparação com a brita virgem. Com o objetivo de manter curvas granulométricas mais próximas entre as composições, a quantidade de agregado miúdo em relação ao graúdo variou, sendo 0,5:5,5 na composição com 0% de reciclado, e 0,25:5,75 na composição com 100% de agregado reciclado, como pode ser visto no Gráfico 26, que mostra a composição granulométrica do agregado

reciclado e do agregado virgem, com suas porções miúda e graúda, respeitando o traço.

A Tabela 31 traz o detalhamento dos traços utilizados nas diferentes composições de concreto, baseado na porcentagem do agregado total utilizado (miúdo e graúdo) que são de origem reciclada. É possível notar a variação da relação miúdo sobre graúdo, mas em todos as composições a somatória entre o valor de agregado miúdo e graúdo é sempre constante.

Tabela 31 - Traços utilizados para as composições de concreto

Traço	Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Água
0% Reciclado	1	0,5	5,5	0,43
30% Reciclado	1	0,425	5,575	0,56
70% Reciclado	1	0,325	5,675	0,73
100% Reciclado	1	0,25	5,75	0,85

Fonte: Aatoria própria (2017)

Também, pode-se observar que a relação de água varia no traço. Isso acontece devido ao processo de pré-molhagem do agregado reciclado utilizado, como descrito no item 3.3.1.

Com base na origem dos materiais utilizados, foi calculado a quantidade de reciclado incorporado no concreto⁴, como pode ser visto na Tabela 32. Conforme mostrado no item 3.1, é possível notar que o reciclado pré-consumo tem origem no cimento, enquanto o agregado reciclado é responsável pela contribuição na porcentagem do reciclado pós-consumo

Tabela 32 - Reciclado incorporado nos traços de concreto analisados

Traço	Pré- Consumo	Pós-Consumo	Reciclado Incorporado Total
0% Reciclado	0,64%	0,00%	0,64%
30% Reciclado	0,64%	25,71%	26,35%
70% Reciclado	0,64%	60,00%	60,64%
100% Reciclado	0,64%	85,71%	86,35%

Fonte: Aatoria própria (2017)

Nesse ponto, é necessário pontuar que seria possível aumentar o valor de reciclado incorporado, uma vez que o concreto fosse gerado utilizando cimento com

⁴ Seguindo a metodologia do selo LEED de construções sustentáveis (USGBC, 2014), que desconsidera a água para o cálculo de reciclado incorporado ao concreto

mais reciclados incorporados, como o CP III, que pode chegar até um valor de 30% de reciclado pré-consumo adicionado. Caso fosse usado um cimento como esse, o valor de reciclado incorporado no concreto, no caso do traço com 100% de agregado reciclado, chegaria ao patamar de 90%.

Durante o processo de produção do concreto, foi observado um acúmulo de argamassa nas laterais da betoneira, assim como observado por Jahn (2016) em seu estudo com concreto permeável, como pode ser visto na Figura 15.



Figura 15 - Acúmulo de argamassa nas paredes da betoneira
Fonte: Jahn (2016)

Esse processo de acúmulo aumentava, conforme havia a substituição do agregado virgem pelo material reciclado. Havia um aumento também conforme a produção do concreto na betoneira avançava. Esse fenômeno pode ser atribuído a menor resistência, mais tendência à abrasão e maior porosidade do agregado, que faz com que o material se quebre durante a produção do concreto. São indícios desse processo a absorção do agregado reciclado, índice de suporte Califórnia e abrasão, conforme resultados mostrados no item 4.1.1.

Depois de produzido o concreto, antes dele ser utilizado para a produção dos corpos de prova, foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone, como visto na Figura 16.

Pode-se notar que o concreto produzido ficou bastante seco, tendo abatimento de tronco de cone de 0cm. Fato que se repetiu em todas as quatro

composições produzidas. Isso está ligado a baixa quantidade de argamassa no material, alto índice de agregado no traço e não uso de aditivos plastificantes.



Figura 16 - Ensaio de abatimento de tronco de cone com o concreto
Fonte: Autoria Própria (2017)

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO EM ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Resistência Mecânica

As resistências à compressão aos 28 dias das diversas composições concreto produzidas, calculadas segundo a metodologia descrita no item 3.4.1, podem ser vistas no Gráfico 27. Como observado, a variação da resistência apresentou um índice de confiabilidade muito alto, com um R^2 da ordem 0,9987.

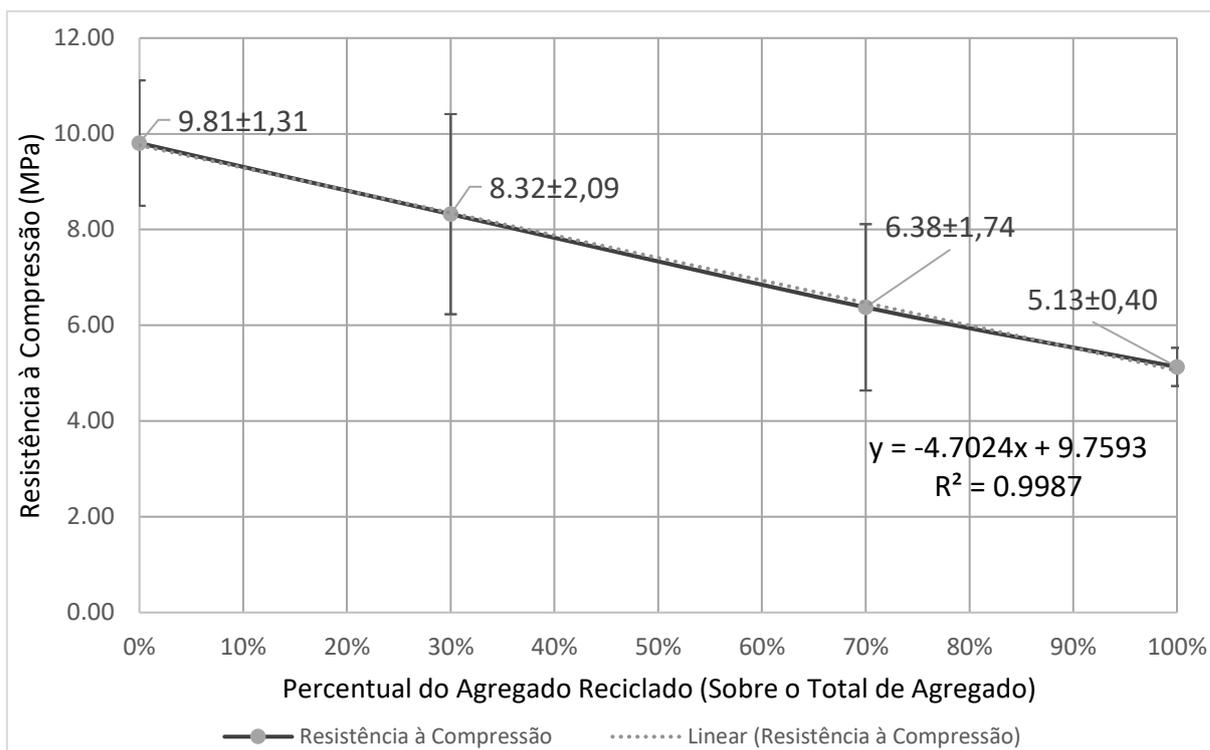


Gráfico 27 - Resistência à compressão do concreto
Fonte: Autoria Própria (2017)

É possível notar, ainda analisando a resistência à compressão, que conforme o agregado virgem é substituído pelo agregado reciclado, acontece uma queda na resistência. Esse fenômeno também é visto quando se analisa a resistência à tração por compressão diametral, mostrado no Gráfico 28, que também apresenta um grau de confiabilidade bastante elevado, com R^2 na ordem de 0,9882.

A resistência do concreto estudado, desde a composição sem agregado reciclado, apresenta um valor mais baixo do que um concreto não permeável, o que é explicado pela alta taxa de vazios do concreto, como também observado em pesquisas anteriores sobre concreto permeável (CHENG *et al.*, 2011).

Em paralelo, conforme acontece a substituição do agregado virgem pelo reciclado, há uma diminuição da resistência. Isso está ligado às características do agregado reciclado, como maior taxa de vazios, menor índice de suporte e maior absorção, como apresentado no item 4.1.1.

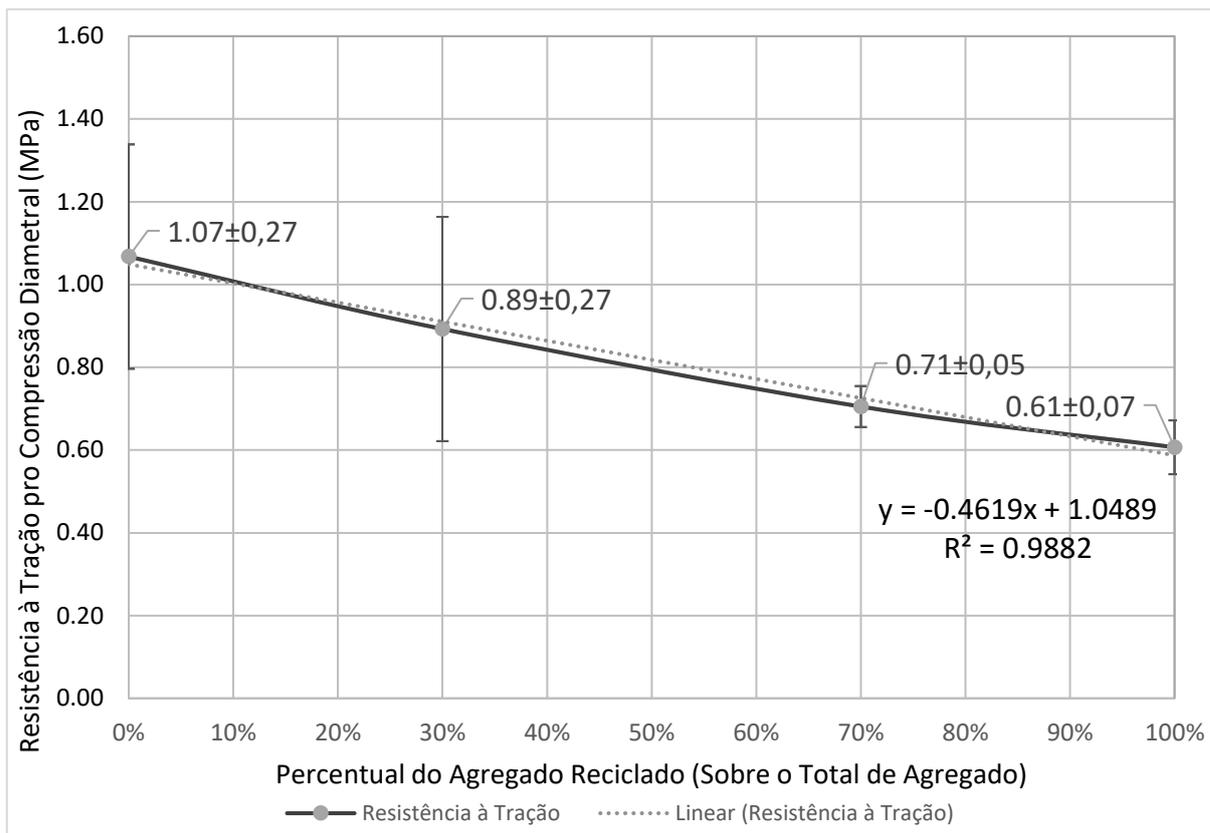


Gráfico 28 - Resistência à flexão por compressão diametral do concreto
Fonte: Autoria Própria (2017)

A queda de resistência pode ser observada tanto no estudo de resistência à compressão, quanto no estudo de resistência à tração, o que está de acordo com o esperado e com o que aconteceu em outras pesquisas anteriores (DE OLIVEIRA; WOOD, 2016). É importante pontuar também que a relação entre os dois estudos garante ainda mais confiabilidade aos resultados obtidos: entre cada uma das composições a relação da resistência à compressão e de resistência à tração por compressão diametral varia entre 9,3 e 8,4.

Também, a partir da tração, estabelecida por compressão diametral, é possível estabelecer a resistência do concreto à tração na flexão, conforme abordado no item 3.4.3. Para a resistência à flexão, foi considerada o valor obtido na tração na flexão. A Tabela 33 traz os resultados de resistência à tração na flexão, assim com as resistências à compressão e à tração por compressão diametral compiladas.

Tabela 33 - Resistências mecânicas médias das composições de concreto

Traço	Resistência (MPa)		
	Compressão	Tração por Compressão Diametral	Tração na Flexão (Flexão)
0% Reciclado	9,81±1,31	1,07±0,27	2,57±0,28
30% Reciclado	8,32±2,09	0,89±0,27	2,39±0,28
70% Reciclado	6,38±1,74	0,71±0,05	2,20±0,05
100% Reciclado	5,13±0,40	0,61±0,07	2,10±0,07

Fonte: Autoria própria (2017)

Em comparação com os requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015b), que rege sobre os requerimentos para concretos permeáveis a serem usados em pavimentação, o material, em todas as suas composições, está apto a ser placa de concreto permeável e concreto permeável moldado no local, para tráfego leve ou tráfego de pessoas, como pode ser visto na Tabela 24. Entretanto, em nenhuma composição está apto a ser peça de concreto ou peça de concreto permeável, a partir dos requisitos da norma.

4.3.2 Absorção, Índice de Vazios e Massa Específica

O Gráfico 29 traz os resultados dos estudos sobre as massas específicas das composições de concreto estudadas. É possível notar uma há uma diminuição nas massas específicas da amostra seca⁵ e da amostra saturada⁶, conforme o agregado virgem é substituído pelo agregado reciclado. Em contrapartida, é possível observar que a massa específica real⁷ sofre um decaimento com ordem muito menor do que as anteriores.

Com essas variações é possível notar mais uma vez a alta porosidade e absorção do material reciclado, isso porque a massa especifica real é a relação entre massa e volume do material, excluindo o tamanho dos seus poros, enquanto as outras duas levam em conta o volume dos poros para o cálculo.

⁵ Relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis

⁶ Relação entre a massa do material saturado e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis

⁷ Relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis

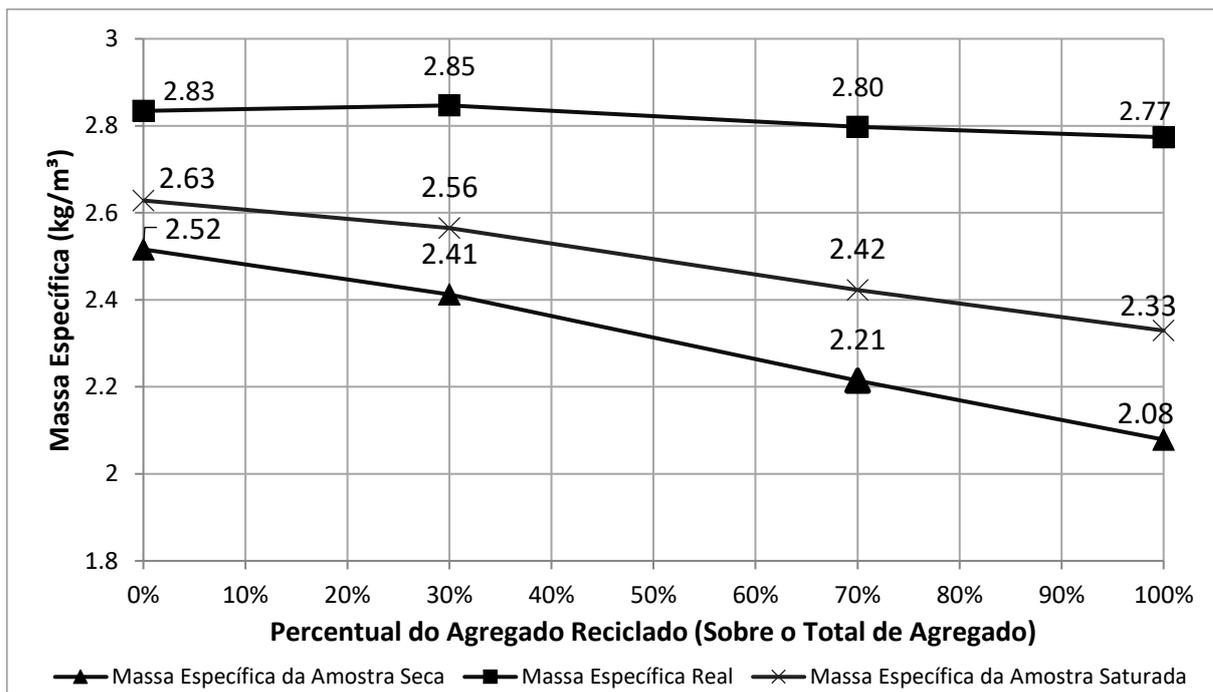


Gráfico 29 - Massa específica das composições de concreto
 Fonte: Autoria Própria (2017)

Essas observações também podem ser vistas no Gráfico 30, que traz a relação de índice de vazios e absorção nas diversas composições de concreto analisadas.

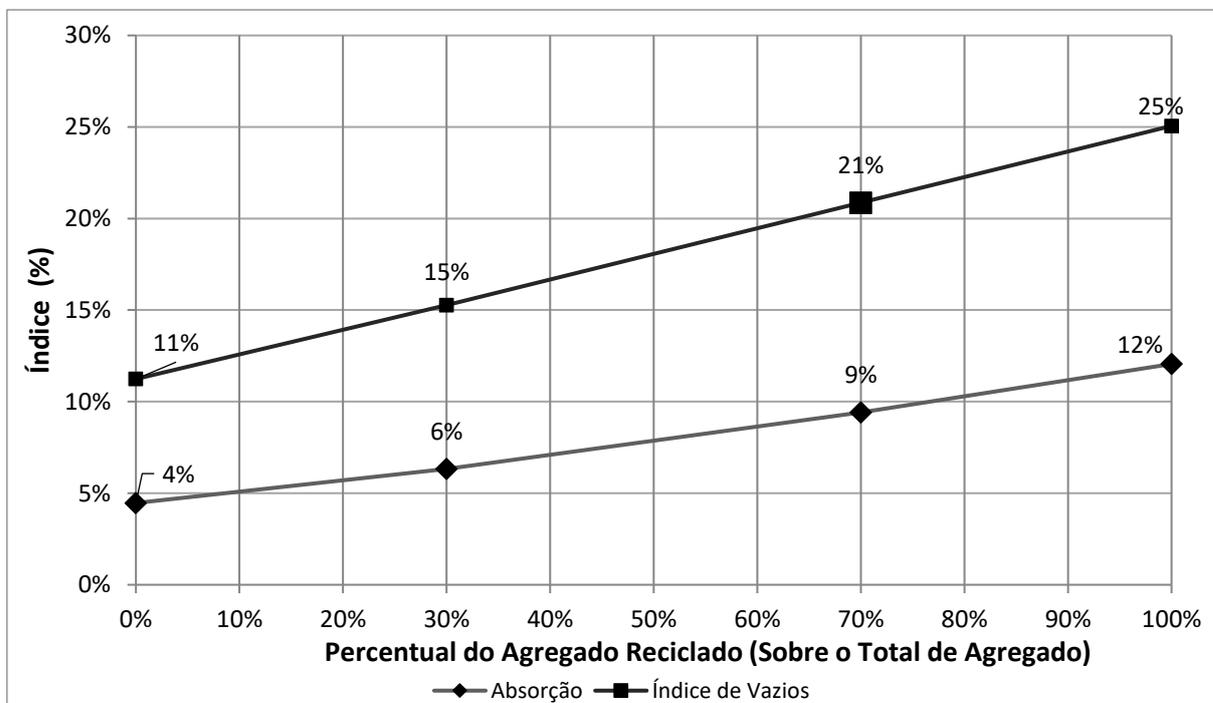


Gráfico 30 - Absorção e índice de vazio das composições de concreto analisadas
 Fonte: Autoria Própria (2017)

As informações presentes nos Gráficos 29 e 30 estão relacionadas com os resultados de resistência mecânica discutidos anteriormente, isso porque o aumento de poros e vazios no agregado leva a uma queda na resistência do concreto final.

4.3.3 Permeabilidade

O Gráfico 31 traz os resultados do teste de permeabilidade nas composições de concreto analisadas. Inicialmente, é possível notar um desvio padrão relativamente baixo nas medições de todas as composições de concreto. Também, o estudo forneceu uma equação de terceiro grau com um nível de confiança alto, com um R^2 da ordem de 1.

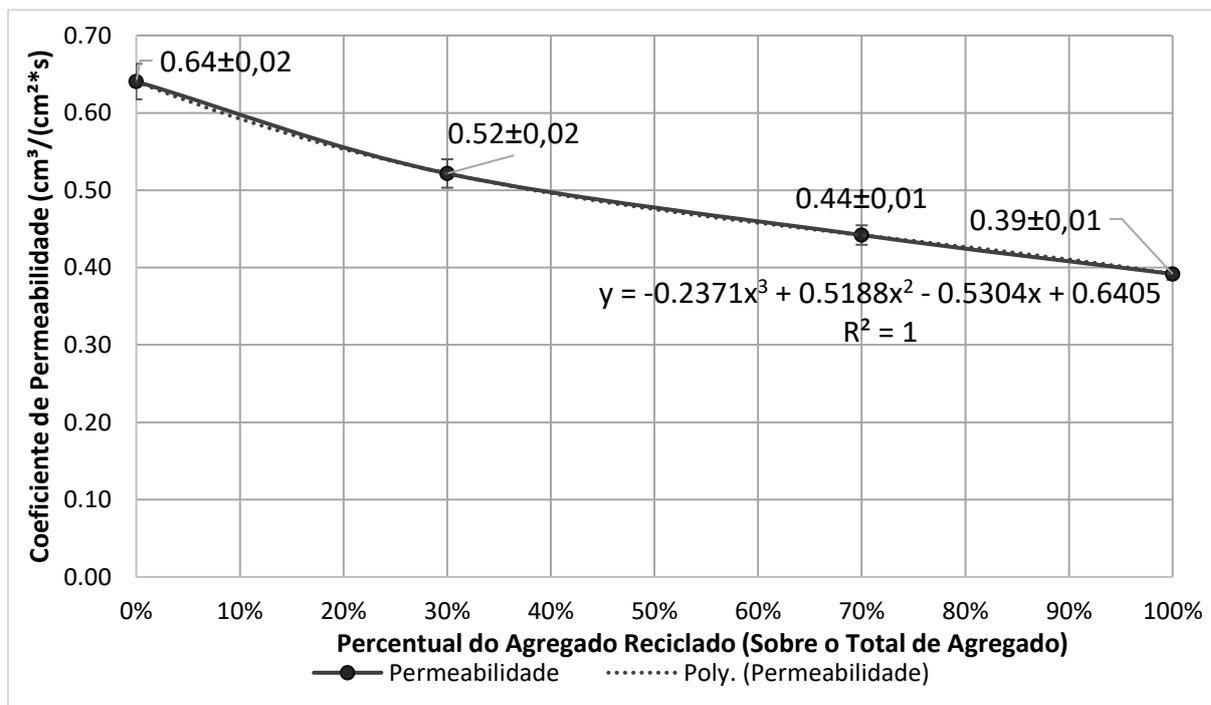


Gráfico 31 - Evolução da permeabilidade nas composições de concreto
 Fonte: Autoria Própria (2017)

A queda na permeabilidade conforme o agregado é substituído por agregado reciclado pode estar ligada, conforme abordado no item 4.2, ao fato do agregado reciclado se quebrar na betoneira durante o processo de fabricação do concreto, fato que, conforme abordado, está ligado à maior porosidade do agregado reciclado, tendência à abrasão e baixo índice de suporte. Essa quebra do material aumenta a taxa de argamassa no material, visto que o agregado se quebra em partículas

menores, diminuindo os vazios comunicantes entre as partículas de agregado graúdo. Também, o aumento da quantidade de partículas menores, aumenta a absorção de água da argamassa pelo agregado, como demonstrando na Tabela 27, o que diminui a coesão entre as partículas e pode ser um causador da diminuição na resistência do concreto final.

De posse do resultado da evolução do coeficiente de permeabilidade obtido, quando se compara com os resultados mostrados no Gráfico 32, sobre absorção e índice de vazios, pode-se notar que apesar do índice de vazios no concreto aumentar, a permeabilidade decai. A explicação é que, conforme há a substituição do agregado virgem pelo reciclado, há um aumento no índice de vazios do agregado, e não dos vazios comunicantes que colaboram para a permeabilidade no concreto.

Em comparação com os requerimentos da NBR 16416 (ANBT, 2015b), que estabelece os requerimentos para coeficiente de permeabilidade em pavimentos permeáveis de concreto, presente na Tabela 23, é possível notar que todas as composições de concreto atendem aos requerimentos da norma. É necessário comentar, também, que a norma estabelece um requerimento de $0,1 \text{ cm}^3/\text{cm}^2.\text{s}$ e as composições produzidas apresentam um coeficiente de permeabilidade de 3,8 a 6,2 vezes maior do que o requerido. O valor obtido também está em linha com outros trabalhos da literatura sobre concreto permeável (JAHN, 2016).

É necessário abordar também, conforme descrito na metodologia do ensaio, que está presente no item 3.4.5, foi assumido que o teste foi feito em um permeâmetro de carga constante, uma vez que a carga hidráulica era baixa. Do ponto de vista de obter o exato valor do coeficiente de permeabilidade do material, é possível que esse valor se altere se o ensaio for conduzido em diferente metodologia e equipamentos. Entretanto, como todos os corpos de prova seguiram o mesmo ensaio, nos mesmos equipamentos, para essa análise, é seguro concluir que a permeabilidade decai conforme o agregado é substituído por agregado reciclado.

4.3.4 Refletância

A Tabela 34 traz os resultados obtidos com o ensaio de reflexão luminosa para cada composição de concreto, assim como para o asfalto analisado.

Tabela 34 - Intensidade luminosa refletida pelas superfícies

Material	Intensidade Luminosa (luz natural, ensaio diurno)	Intensidade Luminosa (luz artificial, ensaio noturno)
Asfalto	109,00 ± 8,04 lx	4,45 ± 0,35 lx
Concreto 0% Reciclado	352,50 ± 28,63 lx	12,68 ± 1,04 lx
Concreto 30% Reciclado	338,75 ± 16,38lx	13,03 ± 1,23 lx
Concreto 70% Reciclado	349,75 ± 34,86 lx	12,73 ± 0,83 lx
Concreto 100% Reciclado	342,50 ± 22,43 lx	14,05 ± 1,55 lx

Fonte: Aatoria própria (2017)

Nota-se que existe uma pequena variação entre os diferentes traços de concreto. Variação essa que não é linear e, em comparação com a quantidade de agregado reciclado, aparentemente não apresenta relação. Isso pode observado também no fato que, comparado diferentes composições de concreto nas duas condições de ensaio (luz natural e luz artificial), enquanto em um a reflexão aumenta, em outro ela diminui. Por exemplo, entre a composição com 0% de agregado reciclado e a composição com 30% de agregado reciclado, enquanto a reflexão observada no ensaio diurno diminui com a substituição pelo agregado reciclado, a reflexão observada no ensaio noturno aumenta. Isso leva à observação de que o agregado reciclado analisado não altera a característica de refletância observada no concreto permeável sem agregado reciclado.

Por outro lado, como pode ser visto na Tabela 35, observa-se uma média bastante próxima entre todas as composições de concreto, assim como um desvio padrão muito pequeno em relação aos valores medidos.

Tabela 35 - Análise da reflexão luminosa das superfícies

Material	Intensidade Luminosa (luz natural, ensaio diurno)	Intensidade Luminosa (luz artificial, ensaio noturno)
Asfalto	109,00 ± 8,04 lx	4,45 ± 0,35 lx
Média Concreto	345,88 ± 6,35 lx	13,12 ± 0,69 lx
Relação Concreto/Asfalto	3,17	2,95

Fonte: Aatoria própria (2017)

Também, analisando a relação entre a reflexão luminosa da média das composições de concreto e o asfalto, nota-se que nas duas condições de ensaio (luz natural e luz artificial) essa relação é bastante próxima, entre 2,95 e 3,17, que leva a uma média global de 3,06. Quando se observa os valores de refletância dos materiais padrões de pavimentação, como apresentado no item 2.1.2, e presente na Tabela 4, nota-se que a relação da refletância do concreto novo, em relação ao asfalto exposto

à ação do tempo, é 3,5, em média. Importante notar que esse é o valor para a média do concreto não permeável. Já no permeável, devido à presença dos poros e alteração da geometria superficial que pode alterar a reflexão, espera-se uma refletância menor que 3,5.

Portanto, a partir das medições e comparações com valores padrões já padronizados, é possível notar que os resultados obtidos com os ensaios demonstram conformidade com o valor esperado. Nota-se, portanto, que o concreto permeável analisado reflete cerca de três vezes mais luz do que um pavimento de asfalto submetido à ação do tempo.

5 CONCLUSÕES

A partir de todas as análises e discussões apresentadas nessa pesquisa, é possível concluir que:

- O agregado reciclado analisado, fornecido pela Soliforte, apresentou granulometria não uniforme bem distribuída, índice de material pulverulento de 6,2%, baixa retração, na ordem de 0,083% e abrasão em cerca de 32,7%;

- O mesmo agregado também apresenta nível inferior de cloreto livre e sulfatos em comparação com os limites da norma brasileira que rege sobre agregado reciclado (cerca de 15% e 11% da concentração permitida, respectivamente). Isso demonstra que é mínimo o risco de contaminação, por sulfatos e cloretos, da água que atravessa o concreto permeável que utiliza esse agregado;

- O aumento da substituição do agregado virgem por agregado reciclado no concreto diminui a taxa de permeabilidade, a massa específica e provoca a queda na resistência mecânica;

- Em relação à resistência mecânica, todas as composições de concreto estudadas estão aptas a serem usadas para confecção de placas de concreto permeável ou para concreto permeável aplicado no local, tanto para tráfego de pessoas quanto para tráfego de leve de veículos;

- Todas as composições de concreto estudadas demonstraram ser permeáveis, atendendo ao requerido pela norma brasileira que trata de pavimentos permeáveis. O coeficiente de permeabilidade foi, para a composição menos permeável, 3,9 vezes maior do que o mínimo estabelecido em norma;

- O concreto permeável gerado, sob o traço em massa 1:0,5:5,5:0,43 (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água, respectivamente), assim como suas variações com agregado reciclado, apresentou uma reflexão de luz 3,06 vezes maior do que o asfalto, o que demonstra que o concreto absorve menos energia luminosa, por consequência absorvendo menos calor.

6 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com base na revisão de literatura, assim como as análises desenvolvidas e conclusões levantadas nesse projeto, podem ser feitas algumas sugestões para futuros trabalhos envolvendo pesquisas com concreto permeável utilizando agregado reciclado, tais como:

- A realização do ensaio de *squeeze flow*, para melhor entender a trabalhabilidade do concreto fresco, e obter mais informações sobre o agregado reciclado;

- A execução do ensaio de índice de suporte Califórnia, para as parcelas miúda e graúda do material, assim como para a composição mista, com o objetivo de entender como esse índice varia de acordo com a granulometria do material;

- Sugere-se também que se determine o volume unitário e índice de vazios do agregado reciclado, para ter um entendimento mais completo das suas características, e pode associar isso à taxa de vazios efetiva do concreto, assim como em outras características estudadas;

- Para conseguir aprimorar a resistência mecânica do material, é sugerido estudos utilizando faixas granulométricas uniformes do agregado reciclado, aumento a distribuição dos poros;

- É importante a realização de um estudo de refletância normatizado, com o auxílio de um espectrofotômetro, para que os dados possam ser devidamente comparáveis com outros estudos;

- É necessário um estudo mais completo e aprofundado sobre a permeabilidade, e estabelecer o seu coeficiente de permeabilidade sob ensaio normatizado para pavimentos permeáveis;

- Por fim, para o entendimento completo do material, é necessário promover estudos para entender o funcionamento da permeabilidade em uma estrutura que envolva o solo e as camadas subsequentes ao pavimento.

REFERÊNCIAS

ABNT. **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 NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo– Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo– Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 46**: Agregados– Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003c.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016a.

_____. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016b.

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

_____. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 7218**: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2005b.

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

ABRECON. Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2015.** São Paulo, 2015.

ABRELPE. Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Relatório Pesquisa Setorial – 2014/2015.** São Paulo, 2015.

ADEWUMI, Adeshina A.; OWOLABI, Taoreed O.; ALABE, Ibrahim O.; OLATUNJI, Sunday O. **Estimation of physical, mechanical and hydrological properties of permeable concrete using computational intelligence approach.** Applied Soft Computing n° 42, Elsevier, 2016.

AGOPYAN, Vahan. Globo Ciência. **Construção Civil consome até 75% da matéria-prima do planeta.** Jul, 2013. Disponível em < <http://redeglobo.globo.com/globociencia/noticia/2013/07/construcao-civil-consome-ate-75-da-materia-prima-do-planeta.html>>. Acesso em 25 out. 2016.

ANDAL, Jonathan; SHEHATA, Medhat; ZACARIAS, Philip. **Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality.** Construction and Building Materials n° 125, Elsevier, 2016.

ARCHER, David; RAHMSTORF, Stefan. **The climate crisis: an introductory guide to climate change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

ASTM. **C 144 – 07.** Standard test method for chemical analysis of hydraulic cement. West Conshohocken, 2007.

BALBO, J. T. **Relações entre resistências à tração indireta e à tração na flexão em concretos secos e plásticos.** Revista Ibracon de Estrutura e Materiais, Volume 6, Número 6, Ibracon, 2013.

BEHERA, Monalisa; BHATTACHARYYA, S.K.; Minocha, A.K.; DEOLIYA, R.; MAITI, S. **Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review.** Construction and Building Materials n° 68, Elsevier, 2014.

BRUNETTI, Giseuppe ŠIMŮNEK, Jiří; PIRO, Patrizia. **A comprehensive numerical analysis of the hydraulic behavior of a permeable pavement.** Journal of Hydrology n° 540, Elsevier, 2016.

CAMBRIDGE **Business English Dictionary.** Cambridge: Cambridge University Press. Disponível em: <<http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/environmental-impact>>. Acesso em: 09 set. 2016, 14:14.

CAPUTO, Homero P.; CAPUTO, Armando N. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. São Paulo: LTC, 2011.

CHANDRAPPA, Anush K.; BILIGRI, Krishna P. **Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review**. Construction and Building Materials n° 111, Elsevier, 2016.

CHENG, An; HSU, Hui-M; CHAO, Sao-Jeng; LIN, Kae-Long. **Experimental Study on Properties of Pervious Concrete Made with Recycled Aggregate**. International Journal of Paving Research Technology vol 4 n° 2, Chinese Society of Pavement Engineering, 2011.

DE OLIVEIRA, Iago; WOOD, Clare. **Sustainability in Civil Construction: Recycled Aggregate for Permeable Concrete**. Construction and Building Materials, Elsevier, 2016, no prelo.

EPA. Environmental Protection Agency – EUA. **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies**. Washington, 2008.

EGUCHI, Eguchi; TERANISHI, Kohji; NAKAGOME, Akira; KISHIMOTO, Hitoshi; SHINOZAKI, Kimihiko; NARIKAWA, Masafumi. **Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction**. Construction and Building Materials n° 21, Elsevier, 2006.

ETXEBERRIA, M.; VÁSQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. **Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete**. Cement and Concrete Research n°37, Elsevier, 2007.

FROTTÉ, Camila; DI NÚBILA, Clarisse Sophia Alejandra. **Estudo das propriedades de concretos com substituição parcial de agregado natural por RCD**. 2015. 86f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Produção Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais. Brasília, 2008.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil**. Brasília, 2012.

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

JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; GALVÍN, A.P.; LÓPEZ, M.; AGRELA, F. **Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads**. Construction and Building Materials n°34, Elsevier, 2012

JOHN, Vanderley M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem**. São Paulo, 2000. Disponível em < <http://www.placogyps.com.br/download/A%20Constru%E7%E3o%20Civil%20e%20o%20Meio%20Ambiente.pdf>>. Acesso em 25 out. 2016.

KIM, Yail J.; GADDAFI, Adel; YOSHITAKE, Isamu. **Permeable concrete mixed with various admixtures**. Materials and Design n° 100, Elsevier, 2016.

LEITE, M. A. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LI, Hui; HARVEY, John; GE, Zhesheng. **Experimental investigation on evaporation rate for enhancing evaporative cooling effect of permeable pavement materials**. Construction and Building Materials n° 65, Elsevier, 2014.

NEITHALATH, N. et al. **Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials**. Final Report, The institute for Safe, Quiet, and Durable Higways, 2003. Disponível em: <<https://ntl.bts.gov/lib/24000/24600/24636/index.htmlf>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Trad. Salvador e. Giannusso. 2. Ed. São Paulo: PINI, 1997.

OKE, T.R. **The energetic basis of the urban heat island**. Quartely Journal of the Royal Meteorological Society °108, 1982.

ONU. **World Population Prospects**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. The 2015 Revision. Nova Iorque, 2015.

ONU. **World Urbanization Prospects**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. The 2014 Revision. Nova Iorque, 2014.

PINI, Fabio; FERRARI, Chiara; LIBBRA, Antonio LEALI, Francesco; MUSCIO, Alberto. **Robotic implementation of the slide method for measurement of the thermal emissivity of building elements**. Energy and Buildings n° 114, Elsevier, 2015

POON, Chin Sun; CHAN, Dixon. **Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick**. Concrete and Building Materials n° 20, Elsevier, 2005.

PRUSKI, Fernando F.; RODRIGUES, Lineu N.; SILVA, Demetrius D. da. **Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas**. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 301-307, maio 2001. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662001000200021&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 20 out. 2016.

RAHMAN, Md. Aminur; IMTEAZ, Monzur A.; ARULRAJAH, Arul; PIRATHEEPAN, Jegatheesan; DISFANI, Mahdi Miri. **Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics**. Journal of Cleaner Production n° 90, Elsevier, 2015.

REINO UNIDO. **Infrastructure Carbon Review**. HM Treasury. Londres, 2013.

RILEM. **TC 178-TMC**: Testing and modelling chloride penetration in concrete. Materials and Structures, Vol. 90, Springer, 2002.

ROSEEN, R.; BALELESTERO, T.; HOULE, J.; BRIGGS, J.; HOULE, K. **Water Quality and Hydrologic Performance of a Porous Asphalt Pavement as a Storm-Water Treatment Strategy in a Cold Climate**. Journal of Environmental Engineering nº 138, American Society of Civil Engineers, 2012.

SOTO, Nicolle Talyta Arriagada. **Avaliação do uso de agregado de resíduo de construção civil nas propriedades do concreto *no slump***. 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

TAM, V.W.Y.; TAM, C.M. **A review on the viable technology for construction waste recycling**. Resources, Conservation & Recycling nº 47, Elsevier, 2006.

USGBC. LEED v2009: **Reference guide for building design and construction**. Washington: U.S. Green Building Council, 2009.

USGBC. LEED v4: **Reference guide for building design and construction**. Washington: U.S. Green Building Council, 2014.

VENHAUS, Heather. **Designing the sustainable site: integrated design strategies for small-scale sites and residential landscapes**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

VOOGT, J.A.; OKE, T.R. **Thermal remote sensing of urban climate**. Remote Sensing of Environment nº 86, Elsevier, 2003.

WINSTON, Ryan J; AL-RUBAEI, Ahmed M.; BLECKEN, Godecke T.; VIKLANDER, Maria. **Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate e The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling**. Journal of Environmental Management nº 169, Elsevier, 2016.

ANEXO A – DECLARAÇÃO AMBIENTAL DO CIMENTO

DECLARAÇÃO AMBIENTAL DO PRODUTO ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION					
					
Conteúdo reciclado e regionalidade Recycled Content and Regional Materials					
Especificação técnica do produto / Product specification Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - CP V-ARI (NBR 5733)					
RESPONSÁVEL PELA INFORMAÇÃO / INFORMATION MANAGER					
Nome / Name	Telefone / Phone				
Jorge Hiroshi Aoki	41 3317-1181				
E-mail / E-mail	aoki@cimentoitambe.com.br				
Empresa / Company	Endereço / Address				
Cia. de Cimento Itambé	BR 277 (Curitiba - Ponta Grossa), 125 - Curitiba/PR				
INFORMAÇÕES DA FÁBRICA / FACTORY'S DATA					
Nome da fábrica / Company's name	Estado / State	Cidade / City	Pais / Country		
Cia. de Cimento Itambé	Paraná	Balsa Nova	Brasil		
INFORMAÇÕES SOBRE O PRODUTO / PRODUCT'S DATA					
Item	Matérias-primas Raw materials	Porcentagem Percentage	Origem Origin	Local de extração Extraction	
1.	Fly-ash	0,0%	Conteúdo reciclado pré-consumo	Capivari de Baixo SC	
2.	Clinker	90,5%	Conteúdo não reciclado	Balsa Nova PR	
3.	Gesso	4,5%	Conteúdo reciclado pré-consumo	Cajati SP	
4.	Calcário	5,0%	Conteúdo não reciclado	Campo Largo PR	
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					
Conteúdo reciclado / Recycled Content		Pré-consumo / Pre-consumer	4,5%	Pós-consumo / Post-consumer	0,0%
DEFINIÇÕES:					
Conteúdo reciclado pré-consumo: Reutilização de resíduos gerados por outro processo industrial. Conteúdo reciclado pós-consumo: Reutilização de resíduos gerados por usuários finais e descartados no fim de sua vida útil (papel, sucata) Esse conceito NÃO contempla reaproveitamento de sobras/ ineficiências do processo industrial do produto em questão. Conteúdo não reciclado: Matéria virgem, extraída diretamente da natureza.					
DEFINITIONS:					
Pre-consumer recycled content: Reuse of waste generated by other industrial process. Post-consumer recycled content: Reuse of waste generated by end users and discarded at the end of its useful life (paper, scrap) This concept DOES NOT include reuse of waste of the same procedure/ inefficiency of the industrial product. Content not recycled: raw material, extracted directly from nature.					
Declaro, para os devidos fins, que as informações contidas neste documento são verdadeiras, submetendo-nos às penalidades legais, por omissão ou falsa informação, definidas na legislação. I declare, for appropriate purposes, that the information contained herein is true, by subjecting us to legal penalties, omission or false information, as defined in the legislation.					
			01/06/2017		

ANEXO B – RELATÓRIO DE ENSAIOS DO CIMENTO



RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

TIPO : CP V-ARI



Emissão :

31/01/2017

Data	Químicos										Físicos										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega Início	Tempo de Pega Fim	Cons. Normal	Blaire	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	h : min	h : min	%	cm ² /g	%	%	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Média	4,26	18,93	2,72	60,73	4,11	2,99	3,30	0,68	0,77	0,71	0,23	03:30	04:11	30,0	4,342	0,04	0,43	22,6	38,7	44,5	63,0
Sd	0,06	0,14	0,07	0,18	0,16	0,02	0,09	0,10	0,06	0,01	0,07	00:12	00:09	0,2	48,08	0,02	0,16	0,5	0,8	0,7	1,0
Min	4,10	18,67	2,65	60,51	3,84	2,94	3,18	0,68	0,66	0,69	0,14	03:09	03:56	29,6	4,282	0,03	0,27	21,7	37,6	43,4	60,8
Max	4,32	19,17	2,86	61,16	4,37	3,04	3,44	0,97	0,86	0,75	0,35	03:48	04:25	30,5	4,452	0,11	0,86	23,6	39,8	45,6	64,4

Obs.: A Resistência à Compressão aos 28 dias do CP V-ARI é regida pela NBR 5733, a qual não estabelece valor mínimo.

A massa específica média do CP V-ARI ITAMBÉ é 3.09 g/cm³ (NBR NM 23).

As datas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.

