

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil:
Construção e Infraestrutura

**ESTUDO DO USO DE AGREGADOS DE CONCRETO
RECICLADO EM CONCRETO PERMEÁVEL PARA
PAVIMENTOS**

Helena Lunkes Strieder

Porto Alegre

2021

HELENA LUNKES STRIEDER

**ESTUDO DO USO DE AGREGADOS DE CONCRETO
RECICLADO EM CONCRETO PERMEÁVEL PARA
PAVIMENTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Porto Alegre
2021

HELENA LUNKES STRIEDER

**ESTUDO DO USO DE AGREGADOS DE CONCRETO
RECICLADO EM CONCRETO PERMEÁVEL PARA
PAVIMENTOS**

Porto Alegre, 2021.

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, BR
Orientador

Prof.^a Ângela Gaio Graeff
PhD. pela University of Sheffield, UK
Coorientadora

Prof.^a Angela Borges Masuero
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Berenice Martins Toralles (UEL)
PhD. pela Universitat Politècnica de Catalunya, ES

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
PhD. pela University of Leeds, UK

Prof.^a Vanessa Fátima Pasa Dutra (UFRGS)
Dr.^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BR

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Washington Peres Núñez por todos os ensinamentos, pelo incentivo e a disponibilidade. Obrigada por ser tão presente na minha vida e por ser alguém que eu posso contar sempre.

Agradeço muito a minha orientadora Ângela Gaio Graeff pela oportunidade, disponibilidade e por compartilhar a sua paixão pela pesquisa e pelo LEME. Agradeço também à professora Vanessa Pasa Dutra por todo o auxílio durante o desenvolvimento do estudo. É difícil expressar o quanto eu admiro vocês duas, meus grandes exemplos de mulheres pesquisadoras. Obrigada por serem inspiração.

Agradeço à família LEME, que me acolheu tanto. Agradeço, especialmente aos bolsistas Joana Maggi Schardosim, Luíse Mezacasa Sassi, Felipe Raul Meert Merten e Ronaldo Beraldin, aos técnicos Edgar Wallace Pereira Lucas e Eurípedes Martins Fontes, e ao José Orvandır. Agradeço também à Carolina Dal Agnol Dalazene e ao Lucas Alexandre Reginato pelo auxílio na realização dos ensaios. E, ainda, à tantas outras pessoas especiais que tive a oportunidade de conviver nesse período.

Aos colegas do LAPAV: Lucas Marin Malabarba, Matheus Ferreira Matuella, William Fedrigo e Daniel Pinheiro Fernandes. Agradeço em especial às grandes amigas que o laboratório trouxe: Deise Elise Guerra Favero, Camila Kern, Thaís Radünz Kleinert. Obrigada por dividirem tantas alegrias e dores desse período. Vocês são conforto.

Aos grandes amigos que Porto Alegre me presenteou: Gabriela Sartori, Gabrielle Crestani Dutra, João Soliman Junior, Laura Pilz Bicca, Maria Eduarda Amaral, Maurício Pertile, Natali Brandt, Victoria Bottini Milan e Yasmin Rabaioli Rama. E às amigas que o mestrado: Anna Paula Zappe, Bruna Calabria Diniz, Carine Molz e Helena Szortika Quadros.

Às amigas que intercâmbio me trouxe: Débora Braga Monte, Gabriela Bartzén Pereira, Rafaella Migliavacca Marchioretto e Raquel Arruda Carvalho de Oliveira. Obrigada por serem alívio e suporte.

Aos meus colegas da Ecoplan Engenharia: Bruna Dutra Daniel, Cecília Vione, Lunardi Clarissa de Oliveira Penna, Fábio Diogo Silva de Sousa, Janquiel Fumagalli, Juliana de Lima e Silva

Pires, Raimundo Santos e Thais Rutkoski pela companhia diária ao longo desses anos e pela compreensão, especialmente com os horários de trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

À Construtora Queiroz Galvão e à ONG Solidariedade, especialmente ao Sérgio Amaral pelo material utilizado na pesquisa.

Ao Gabriel Grassioli Schreinert pelo apoio, suporte e por ser meu grande companheiro nessa jornada.

Aos meus pais Marinês e Nelson e minha irmã Débora por todo o amor e cuidado. Muito obrigada por fazerem dos meus sonhos, os sonhos de vocês.

À Deus por permitir o desenvolvimento desse trabalho.

The present is theirs; the future,
for which I have really worked, is mine

Nikola Tesla

RESUMO

STRIEDER, H. L. Estudo do uso de agregados de concreto reciclado em concreto permeável para pavimentos. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

A pesquisa relatada nesta dissertação buscou avaliar a viabilidade do uso de resíduos da construção civil (RCC) como agregados reciclados para a produção de concreto permeável visando a aplicação em pavimentos. Para se ter um maior controle da composição, assim como um melhor comportamento mecânico da mistura, optou-se pelo uso de RCC composto unicamente por concreto. Investigou-se o desempenho do material constituído por diferentes proporções do agregado reciclado, além de verificar a influência do uso de aditivo modificador de reologia e da redução da relação água/cimento (a/c). Foram realizados ensaios hidráulicos (condutividade hidráulica e taxa de infiltração), mecânicos (resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade) e resistência à abrasão superficial, além da verificação da porosidade e densidade em todas as amostras. Os resultados obtidos nessa etapa mostraram que a substituição do agregado natural pelo reciclado leva, em geral, a uma melhoria das propriedades hidráulicas, mas também a uma redução do comportamento mecânico. Posteriormente, buscando avaliar o desempenho do material em campo, foi dimensionada e construída uma pista experimental com revestimento de concreto permeável constituído exclusivamente por agregados reciclados. Para a verificação de desempenho, foram realizados ensaios de taxa de infiltração *in situ* e corpos de prova foram extraídos para ensaios laboratoriais de condutividade hidráulica, taxa de infiltração, resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade. Além disso, foram medidas deflexões com um *Light Weight Deflectometer* (LWD) e realizada uma reatransição para a determinação dos módulos de elasticidade das camadas. Comparando-se os resultados de amostras obtidas na pista experimental com os da etapa laboratorial, apenas a resistência à compressão uniaxial apresentou diferença significativa. No entanto, observou-se um elevado desvio padrão nos resultados dos ensaios, evidenciando a necessidade do estrito controle das propriedades físicas do material em campo. A análise global de resultados de laboratório e campo permite concluir que é tecnicamente possível, e ambientalmente desejável, o emprego de agregados de concreto reciclado na construção de pavimentos com concreto permeável.

Palavras-chave: agregado de concreto reciclado, RCC, concreto permeável, pavimento experimental

ABSTRACT

STRIEDER, H. L. Study of the use of recycled aggregates in pervious concrete for pavements. 2021. Dissertation (Master of Civil Engineering) - Civil Engineering Graduate Program: Construction and Infrastructure, UFRGS, Porto Alegre.

The research in this dissertation evaluated the viability of the construction waste (CW) use as recycled aggregates in the production of pervious concrete aiming for the application in pavements. It was used CW constituted only by concrete to obtain greater control of the composition and better mechanical behavior of the mixture. This research investigated the performance of the material composed of different proportions of recycled aggregate. It also verified the use of the influence of rheology modifying admixture and the reduction of the water-cement ratio. Laboratory tests were conducted to evaluate hydraulic conductivity (permeability and infiltration rate), mechanical performance (compression strength, tensile strength, elasticity modulus), and resistance to surface abrasion, in addition to checking hardened density and porosity in all the samples. The results showed that the replacement for recycled aggregate improves hydraulic properties and reduces mechanical performance. Subsequently, an experimental pavement was built with a pervious concrete surface composed exclusively of recycled aggregates to evaluate the material field performance. In situ infiltration rate tests were conducted to verify the performance and, it was extracted specimens to test hydraulic conductivity, compression strength, and elasticity modulus. Besides, deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD) were measured, and a reanalysis was performed to determine the layers' elasticity modulus. Only the compression strength showed a significant difference when comparing the sample results obtained on the experimental pavement with the laboratory stage. However, the results showed a high standard deviation, which evidences the need for strict control of the physical properties of the material in the field. The global analyses of the laboratory and the field results allow concluding that it is technically possible -and environmentally desirable-, to use recycled aggregates in the construction of pavements with pervious concrete.

Keywords: recycled concrete aggregates, CW, pervious concrete, experimental pavement

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema da pesquisa.....	23
Figura 2. Tipos de poros no concreto permeável	27
Figura 3. Relação entre resistência à compressão e porosidade de concreto permeável com agregados reciclados.....	39
Figura 4. Relação entre condutividade hidráulica e porosidade de concreto permeável com agregados reciclados.....	41
Figura 5. Seção típica de um pavimento permeável.....	44
Figura 6. Tipos de sistemas de infiltração	45
Figura 7. Árvore de decisão de análise estrutural e hidrológica de pavimento permeável	49
Figura 8. Beneficiamento do agregado reciclado de concreto: (a) aspecto geral do britador; (b) britador de mandíbula parte externa; (c) britador de mandíbula parte interna e (d) coleta do material	57
Figura 9. Curva granulométrica do agregado natural	58
Figura 10. Agregados retidos nas peneiras 9,6 mm, 4,8 mm e 2,4 mm	59
Figura 11. Aspecto dos materiais após ensaio de abrasão Los Angeles: (a) agregado natural e (b) agregado de concreto	61
Figura 12. Caixa metálica para ensaio de índice de forma.....	61
Figura 13. Aspecto dos agregados natural e reciclado	62
Figura 14. Ensaio de condutividade hidráulica: (a) permeâmetro; (b) posicionamento do corpo de prova com a membrana.....	64
Figura 15. Ensaio de taxa de infiltração: (a) preparação dos corpos de prova e (b) realização do ensaio	65
Figura 16. Ensaio de resistência à compressão uniaxial: (a) início do ensaio e (b) após a ruptura do corpo de prova.....	66
Figura 17. Ensaio de resistência à tração na flexão: (a) início do ensaio e (b) após a ruptura do corpo de prova	67
Figura 18. Ensaio de módulo de elasticidade estático e coeficiente de Poisson	69
Figura 19. Ensaio de resistência à abrasão superficial: (a) realização do ensaio e (b) detalhe cilindro cortante rotativo	70
Figura 20. Ajuste da consistência do concreto permeável: (a) seca, (b) ideal e (c) fluída	72
Figura 21. Aparência do corpo de prova compactado em duas camadas	74
Figura 22. Procedimento de moldagem: (a) mistura em betoneira; (b) inspeção tátil-visual e (c) preparação das formas.....	74

Figura 23. Procedimento de compactação dos corpos de prova prismáticos: (a) moldagem com rolo de aço adaptado e (b) aspecto das vigotas após a compactação.....	75
Figura 24. Procedimento de compactação dos cilindros: (a) compactação dinâmica; (b) anel complementar usado para a compactação da última camada e (c) aspecto dos corpos de prova após a compactação	75
Figura 25. Corpo de prova capeado com argamassa	76
Figura 26. Resultados dos ensaios de densidade real no estado endurecido: (a) valores em relação à porosidade e (b) valores médios por teor de substituição	78
Figura 27. Resultados de ensaios de condutividade hidráulica: (a) valores para todos os corpos de prova em função da porosidade e (b) valores médios por teor de substituição	80
Figura 28. Resultados de taxa de infiltração: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios e desvio padrão de taxa de infiltração e porosidade por teor de substituição.....	81
Figura 29. Valores médios de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias em função do teor de substituição	82
Figura 30. Resultados de resistência à compressão uniaxial em relação à porosidade de todas as amostras rompidas aos 28 dias	83
Figura 31. Resultados de resistência à tração na flexão: (a) valores para todos os corpos de prova em função da porosidade e (b) valores médios e desvio padrão por teor de substituição	84
Figura 32. Ensaio de tração na flexão: gráfico de força vs deslocamento para todos os traços em estudo.....	86
Figura 33. Resultados de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson: (a) valores de E para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios de E e ν por teor de substituição	87
Figura 34. Resultados de abrasão superficial: (a) perda de peso pelo tempo de ensaio e (b) valores médios e desvio padrão de abrasão superficial por teor de substituição.....	88
Figura 35. Teste de consistência do traço 0,26-AD: (a) sem aditivo; (b) teor de 0,045 (c) teor de 0,06	90
Figura 36. Traço 0,30-AD-0,08: (a) teste de consistência e (b) aspecto das amostras após desmoldagem.....	91
Figura 37. Resultados de densidade real no estado endurecido: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios e desvio padrão por traço	91
Figura 38. Condutividade hidráulica: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios por teor de substituição.....	93
Figura 39. Taxa de infiltração: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios e desvio padrão de taxa de infiltração e porosidade por traço	94

Figura 40. Resultados de resistência à compressão uniaxial: (a) valores em relação à porosidade e (b) valores médios, desvio padrão e porosidade por traço	95
Figura 41. Resultados de resistência à tração na flexão e módulo elástico flexural: (a) valores em relação à porosidade e (b) valores médios e desvio padrão por traço	96
Figura 42. Resultados de módulo de elasticidade estático e Poisson: (a) valores de E para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios de traço	97
Figura 43. Resultados de abrasão superficial: (a) perda de peso pelo tempo de ensaio e (b) valores médios e desvio padrão de abrasão superficial por teor de substituição.....	98
Figura 44. Sondagem a trado para a caracterização do solo.....	102
Figura 45. Ensaio de caracterização do subleito: (a) curva de compactação e (b) Índice Suporte Califórnia	102
Figura 46. Comportamento resiliente do solo do subleito.....	103
Figura 47. Granulometria do agregado do reservatório.....	104
Figura 48. Ensaio de módulo de resiliência do agregado do reservatório	104
Figura 49. Comparativo entre faixas granulométricas usada na obra e nos ensaios laboratoriais preliminares	105
Figura 50. Tela com dados de saída do <i>PerviosPave</i>	107
Figura 51. Local de implantação do módulo experimental	111
Figura 52. Seção transversal do pavimento implantado	112
Figura 53. Sinalização e limpeza do local da obra	113
Figura 54. Serviços de escavação e compactação do subleito.....	113
Figura 55. Instalação da manta sobre o subleito.....	114
Figura 56. Sistema de drenagem e coleta de água.....	115
Figura 57. Execução da camada granular.....	116
Figura 58. Dosagem e mistura: (a) dosagem em volume; (b) mistura em betoneiras e (c) controle da consistência.....	117
Figura 59. Execução do revestimento de concreto permeável	117
Figura 60. Croqui dos locais de extração dos corpos de prova	118
Figura 61. Extração de corpos de prova: (a) equipamento de extração; (b) cavidade após a extração do corpo de prova e (c) aspecto de um corpo de prova extraído	119
Figura 62. Ensaio de determinação da taxa de infiltração in situ	119
Figura 63. Configuração do <i>Light Weight Deflectometer</i>	120
Figura 64. Execução do ensaio de cone de areia	121
Figura 65. Procedimento de execução do revestimento: (a) faixa piloto e (b) etapas posteriores com adaptação do método de lançamento	122

Figura 66. Resultados de densidade real no estado endurecido: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios por faixa concretada.....	124
Figura 67. Taxa de Infiltração: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios por faixa concretada	125
Figura 68. Resultados de condutividade hidráulica: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios por faixa concretada e porosidade.....	126
Figura 69. Resultados de resistência à compressão: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios por faixa concretada e porosidade.....	127
Figura 70. Valores médios e desvio padrão de taxa de infiltração <i>in situ</i> e obtidos em laboratório.....	129
Figura 71. Valores de deflexão obtidas com um LWD	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Proporções típicas de materiais para concreto permeável	30
Tabela 2. Propriedades do concreto permeável com agregados reciclados.....	43
Tabela 3. Tipos de subleito e intervalo de valores de coeficiente de recalque.....	46
Tabela 4. Especificação para material de base e/ou sub-base	47
Tabela 5. Resistência mecânica e espessura mínima de revestimento permeável.....	48
Tabela 6. Resumo das misturas estudadas	55
Tabela 7. Quantidade de corpos de prova por traço	56
Tabela 8. Frações granulométricas utilizadas na dosagem.....	59
Tabela 9. Valores de massa específica dos agregados em estudo	59
Tabela 10. Valores de taxa de absorção dos agregados em estudo	60
Tabela 11. Valores de abrasão Los Angeles dos agregados em estudo.....	60
Tabela 12. Valores de índice de forma dos agregados em estudo	62
Tabela 13. Características do CP V-ARI MAX	62
Tabela 14. Traços avaliados no estudo.....	72
Tabela 15. Resultados obtidos.....	73
Tabela 16. Traços estudados.....	77
Tabela 17. Valores médios e desvios-padrão de densidades e porosidade para misturas com diferentes teores de agregado reciclado.....	78
Tabela 18. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de condutividade hidráulica para misturas com diferentes teores de ARC.....	80
Tabela 19. Valores médios, desvios-padrão, coeficiente de variação e análise estatística para taxa de infiltração para misturas com diferentes teores de ARC.....	81
Tabela 20. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias para misturas analisadas.....	84
Tabela 21. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de tração na flexão e porosidade para misturas analisadas.....	85
Tabela 22. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de módulo de elasticidade estático e coeficiente de Poisson para as misturas analisadas	88
Tabela 23. Valores médios, desvios-padrão, coeficiente de variação e análise estatística de abrasão superficial para as misturas analisadas	89
Tabela 24. Traços avaliados	90

Tabela 25. Valores médios, desvios-padrão e análise de variância da porosidade para as misturas estudadas	92
Tabela 26. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de condutividade hidráulica para as misturas estudadas	93
Tabela 27. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de condutividade hidráulica para as misturas em estudo	94
Tabela 28. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de resistência à compressão uniaxial para as misturas em estudo	95
Tabela 29. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de resistência à tração na flexão e módulo elástico flexural para as misturas em estudo	96
Tabela 30. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de módulo de elasticidade estático e coeficiente de Poisson para as misturas analisadas	97
Tabela 31. Resultados médios, desvio padrão, coeficiente de variação e análise estatística dos ensaios realizados	99
Tabela 32. Resumo das propriedades da brita do reservatório granular.....	103
Tabela 33. Características dos materiais e espessura das camadas	108
Tabela 34. Resultados do dimensionamento estrutural da camada granular	109
Tabela 35. Verificação da deformação permanente no topo do subleito.....	109
Tabela 36. Porosidade da camada compactada	121
Tabela 37. Valores médios e desvios-padrão de densidades e porosidade de acordo com a faixa concretada.....	124
Tabela 38. Valores médios e desvios-padrão de taxa de infiltração e porosidade de acordo com a faixa concretada	125
Tabela 39. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de condutividade hidráulica por faixa concretada.....	126
Tabela 40. Valores médios, desvios de resistência à compressão por faixa concretada	127
Tabela 41. Resultados do ensaio de taxa de infiltração realizados na pista	128

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	19
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	22
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 CONCRETO PERMEÁVEL.....	25
2.1.1 Materiais	25
2.1.2 Propriedades relevantes	26
2.1.2.1 Porosidade.....	26
2.1.2.2 Propriedades hidráulicas	27
2.1.2.3 Resistência mecânica	28
2.1.2.4 Resistência à abrasão	29
2.1.3 Composição	30
2.1.4 Fatores que influenciam nas propriedades.....	31
2.1.4.1 Agregados	31
2.1.4.2 Aditivos e adições.....	32
2.1.4.3 Relação água/cimento	34
2.1.4.4 Relação agregado: aglomerante	34
2.1.4.5 Compactação.....	35
2.2 USO DE AGREGADOS RECICLADOS NO CONCRETO PERMEÁVEL	36
2.2.1 Tipo e dimensão de agregados.....	36
2.2.2 Resistência mecânica e abrasão	38
2.2.3 Propriedades hidráulicas.....	40
2.2.4 Influência de aditivos e adições.....	41
2.3 PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL.....	44
2.3.1 Estrutura	44
2.3.1.1 Subleito	44
2.3.1.2 Camada granular	46
2.3.1.3 Revestimento	47
2.3.1.4 Interface entre as camadas	49
2.3.2 Metodologia e critérios de dimensionamento.....	49
2.3.2.1 Análise estrutural	50
2.3.2.2 Análise hidrológica	51

2.3.2.3 Software PerviousPave	52
3 ESTUDOS LABORATORIAIS PRELIMINARES	54
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	54
3.2 MATERIAIS	56
3.2.1 Agregados	56
3.2.1.1 Natural	56
3.2.1.2 Reciclado	56
3.2.1.3 Caracterização dos agregados	57
3.2.1.3.1 Composição granulométrica	58
3.2.1.3.2 Massa específica	59
3.2.1.3.3 Absorção	59
3.2.1.3.4 Abrasão Los Angeles	60
3.2.1.3.5 Índice de forma	61
3.2.2 Cimento	62
3.2.3 Aditivo	63
3.3 MÉTODOS DE ENSAIOS	63
3.3.1 Porosidade e densidade	63
3.3.2 Condutividade hidráulica	64
3.3.3 Taxa de infiltração	65
3.3.4 Resistência à compressão uniaxial	66
3.3.5 Resistência à tração na flexão	67
3.3.6 Módulo de elasticidade e coeficiente de <i>Poisson</i>	69
3.3.7 Abrasão superficial	69
3.4 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM E PRODUÇÃO	71
3.4.1 Método de dosagem	71
3.4.2 Ajuste do traço referência	71
3.4.3 Definição do método de compactação	73
3.4.4 Mistura, moldagem e cura	74
3.4.5 Capeamento	76
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS ENSAIOS LABORATORIAIS	77
4.1 AVALIAÇÃO DO TEOR DE AGREGADO RECICLADO	77
4.1.1 Porosidade e densidade real no estado endurecido	77
4.1.2 Condutividade hidráulica	79
4.1.3 Taxa de infiltração	81
4.1.4 Resistência à compressão uniaxial	82

4.1.5 Resistência à tração na flexão e módulo elástico flexural	84
4.1.6 Módulo de elasticidade e coeficiente de <i>Poisson</i>	87
4.1.7 Abrasão superficial	88
4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO	89
4.2.1 Porosidade e densidade real no estado endurecido	91
4.2.2 Condutividade hidráulica	93
4.2.3 Taxa de infiltração	94
4.2.4 Resistência à compressão uniaxial	95
4.2.5 Resistência à tração na flexão e módulo elástico flexural	96
4.2.6 Módulo de elasticidade e coeficiente de <i>Poisson</i>	97
4.2.7 Abrasão superficial	98
5 ETAPA DE CAMPO	101
5.1 MATERIAIS	101
5.1.1 Subleito	101
5.1.2 Camada de reservatório granular	103
5.1.3 Revestimento em concreto permeável	105
5.2 DIMENSIONAMENTO	105
5.2.1 Utilização do <i>PerviousPave</i>	106
5.2.2. Verificação Estrutural	108
5.2.3 Porosidade do reservatório	110
5.2.4 Tubos de drenagem	110
5.3 PROJETO	111
5.4 CONSTRUÇÃO	112
5.4.1 Serviços preliminares	112
5.4.2 Escavação e preparo do subleito	113
5.4.3 Instalação de manta impermeável	114
5.4.4 Implantação dos dispositivos de drenagem e coleta de água	115
5.4.5 Execução da camada de reservatório	115
5.4.6 Preparo e aplicação do concreto permeável	116
5.5 VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO	118
5.5.1 Ensaios laboratoriais	118
5.5.2 Ensaios de campo	119
5.5.2.1 Taxa de infiltração <i>in situ</i>	119
5.5.2.2 Avaliação estrutural	120
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CAMPO	121

6.1 AVALIAÇÃO DO PROCESSO CONSTRUTIVO	121
6.1.1 Reservatório granular	121
6.1.2 Revestimento	122
6.2 VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO.....	123
6.2.1 Ensaios laboratoriais.....	123
6.2.1.1 Porosidade e densidade no estado endurecido	123
6.2.1.2 Taxa de infiltração	124
6.2.1.3 Condutividade hidráulica	125
6.2.1.4 Resistência à compressão uniaxial.....	126
6.2.1.5 Módulo de elasticidade	127
6.2.2 Ensaios de campo	128
6.2.2.1 Taxa de infiltração <i>in situ</i>	128
6.2.2.2 Avaliação estrutural	129
7 CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES.....	132
7.1 CONCLUSÕES.....	132
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	134

1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo, inicialmente, é feita a contextualização do tema, envolvendo a problemática dos resíduos provenientes da construção e do gerenciamento das águas pluviais, assim como as lacunas de conhecimento acerca dos assuntos e a justificativa para a realização do estudo. Na sequência, são relatados os objetivos da pesquisa e a estrutura do trabalho.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

Com o desenvolvimento econômico, o crescimento populacional e a rápida urbanização evidenciada nas últimas décadas, grande quantidade de resíduos tem sido gerada em construções, demolições e sobras do processo construtivo. Na União Europeia, por exemplo, entre 30% e 40% do total de resíduos sólidos coletados são provenientes da construção civil (EUROSTAT, 2018). No Brasil, a situação é ainda pior, pois esse número chega a 60% (ABRELPE, 2018). Ao mesmo tempo, há uma demanda crescente por agregados e, em muitos países, constata-se a escassez de recursos naturais (TAM *et al.*, 2018). Além disso, com o enrijecimento das políticas ambientais e da crescente conscientização sobre o gerenciamento sustentável de resíduos, cada vez mais, a reciclagem e reutilização de resíduos da construção em projetos de engenharia civil ganha importância.

Devido à composição desse material, principalmente concreto e cerâmica, há um grande potencial de reaproveitamento como agregados reciclados (TAM *et al.*, 2018). Entre as possibilidades de uso, estudos diversos abordaram sua aplicação como camada estrutural de pavimentos, principalmente, em vias de baixo/médio tráfego (SANGIORGI *et al.*, 2015; CARDOSO *et al.*, 2016; DELONGUI *et al.*, 2018; LANCIERI *et al.*, [s.d.]). Alguns resultados promissores mostraram que o desempenho do resíduo como material granular é comparável ao de agregados naturais para as camadas de base e sub-base (CARDOSO *et al.*, 2016; DELONGUI *et al.*, 2018). Pesquisas também apontaram a viabilidade do uso de agregados reciclados no concreto (ISMAIL *et al.*, 2017; THOMAS *et al.*, 2018). Existem, portanto, indicativos que o RCC pode ser um material interessante e viável para a fabricação de elementos de concreto. Essa percepção foi um dos fundamentos para a proposição do presente trabalho que, todavia, buscou uma aplicação inovadora, avaliando a possibilidade de incorporar o resíduo em concretos permeáveis.

Concreto permeável é outro tema que tem atraído atenção, uma vez que ajuda a mitigar problemas urbanos relacionados à impermeabilização do solo. A redução de superfícies permeáveis causa o desequilíbrio no ciclo hidrológico, reduzindo a infiltração e aumentando, vertiginosamente, o escoamento superficial, o que sobrecarrega o sistema de drenagem, provocando inundações, enchentes e alagamentos. Isso é evidenciado pelos dados do Perfil dos Municípios Brasileiros (Munic) que, de acordo com o levantamento realizado, a proporção de desastres naturais é maior nas áreas urbanas devido à construção de moradias, rodovias e outras obras que interferem na drenagem da água das chuvas. Segundo a mesma pesquisa, entre 2013 a 2017, dos municípios com mais de 500 mil habitantes, cerca de 93% foram atingidos por alagamentos e 62% por deslizamentos (IBGE, 2018).

O uso de pavimentos permeáveis em substituição aos revestimentos tradicionais ajuda a devolver ao solo a capacidade de absorção e retenção da água superficial. Dentre as alternativas de revestimento, o concreto permeável vem ganhando atenção de diversos pesquisadores devido aos seus benefícios ambientais. Esse concreto especial tem quantidade limitada de finos em sua composição, o que gera vazios no seu interior e permite o fluxo de água através dele. Esse tipo de dispositivo possibilita a drenagem rápida da água em períodos de chuva para posterior infiltração pelo solo ou, então, escoamento por um sistema de drenagem auxiliar. Além da capacidade de infiltração, outros benefícios estão associados a um pavimento de concreto permeável, entre eles, a redução dos efeitos de ilhas de calor nos centros urbanos, o reabastecimento de aquíferos e a melhoria da qualidade da água, com a filtragem e redução de metais pesados. Além disso, esse tipo de pavimento melhora a segurança e o conforto dos usuários que trafegam na pista, reduzindo o efeito “*spray*”, a aquaplanagem dos veículos e, ainda, o ruído causado pelo atrito entre pneu e pavimento (ACI 522R, 2010; KEVERN; FARNEY, 2015; HASELBACH, 2016; LORENZI *et al.*, 2018).

Concreto permeável foi aplicado na pavimentação pela primeira vez em um estacionamento na Flórida para lidar com a enorme quantidade de água durante as tempestades. Países europeus tiveram uso extensivo desde a década de 1980 (ACI 522R, 2010). Embora não seja uma alternativa recente, ainda há lacunas de conhecimento em diversos aspectos, como no procedimento de dosagem dos materiais, no dimensionamento da estrutura e no domínio de técnicas de execução e manutenção (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016; SANDOVAL *et al.*, 2020). A incorporação de RCC em concreto permeável surge como uma alternativa inovadora. Contudo, devido às características do agregado reciclado, ainda existe uma abordagem conservadora que limita a sua aplicação em campo.

As pesquisas desenvolvidas até o momento, focaram no efeito da incorporação do agregado reciclado nas propriedades do concreto permeável através de ensaios laboratoriais (ALIABDO *et al.*, 2018; YAP *et al.*, 2018; EL-HASSAN *et al.*, 2019). A partir dessa experiência inicial, foi evidenciado que, embora o uso de agregados reciclados no concreto permeável seja viável, uma redução no desempenho mecânico deve ser considerada. Entretanto, esse efeito pode ser mitigado com o aumento do teor de cimento e de finos na mistura, com a redução da porosidade, com o uso de adições ou a incorporação de aditivos (BHUTTA *et al.*, 2013; WU *et al.*, 2016; EL-HASSAN *et al.*, 2019).

Nesse contexto, na pesquisa relatada nesta dissertação, buscou-se uma alternativa conjunta aos problemas urbanos relacionados à impermeabilização do solo, à disposição inadequada de resíduos e ao esgotamento das fontes de recursos naturais. Este tema enquadra-se como instrumento para a concretização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), em atendimento as metas dos Objetivos 6, 9, 11, 12 e 13, que se referem à implementação de políticas e planos para a eficiência dos recursos naturais, incentivo do reuso da água, construção de infraestruturas sustentáveis e adoção de medidas urgentes para combater mudanças climáticas e seus impactos nas comunidades (ONU, 2015).

É importante ressaltar que esse trabalho integra uma linha de pesquisa que vem sendo desenvolvido há alguns anos no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS. Inicialmente, foi realizado um estudo exploratório para o entendimento das propriedades do concreto permeável (HÖLTZ, 2011; LAMB, 2014). Além disso, nesse período, foram desenvolvidos dois dispositivos para a avaliação da colmatação, cujos resultados são apresentados por Lamb (2014). Pereira *et al.* (2013) avaliaram o efeito do uso de RCC no concreto permeável. Na sequência, foram realizadas diversas pesquisas juntamente com a pesquisadora Liv Haselbach, referência mundial sobre concreto permeável. Haselbach *et al.* (2016) e Lorenzi *et al.* (2018) apresentaram resultados de desempenho térmico do material em uma vaga de estacionamento. Costa *et al.* (2018) elencaram as boas técnicas desenvolvidas no laboratório ao longo desses anos para a produção do concreto permeável e a realização dos ensaios específicos. Recentemente, Costa (2019) avaliou a incorporação de materiais alternativos, como sílica ativa e fibra de polipropileno, e verificou a viabilidade de aplicação do material como revestimento para pavimentos de tráfego leve a médio.

Dentro desse contexto, buscando viabilizar o uso de agregados reciclados em concretos permeáveis para pavimentos, foi realizado um amplo estudo experimental para a avaliação das propriedades do

agregado reciclado e do efeito da incorporação do resíduo na mistura permeável. Além disso, visando uma maior compreensão dos métodos de dimensionamento e dos procedimentos de execução de um pavimento de concreto permeável, bem como avaliar o desempenho da mistura desenvolvida em campo, houve a aplicação em escala real com a construção de um pavimento experimental em uma área de passagem de veículos. Dessa forma, com o intuito de alcançar o propósito dessa pesquisa, foram estabelecidos os objetivos a seguir.

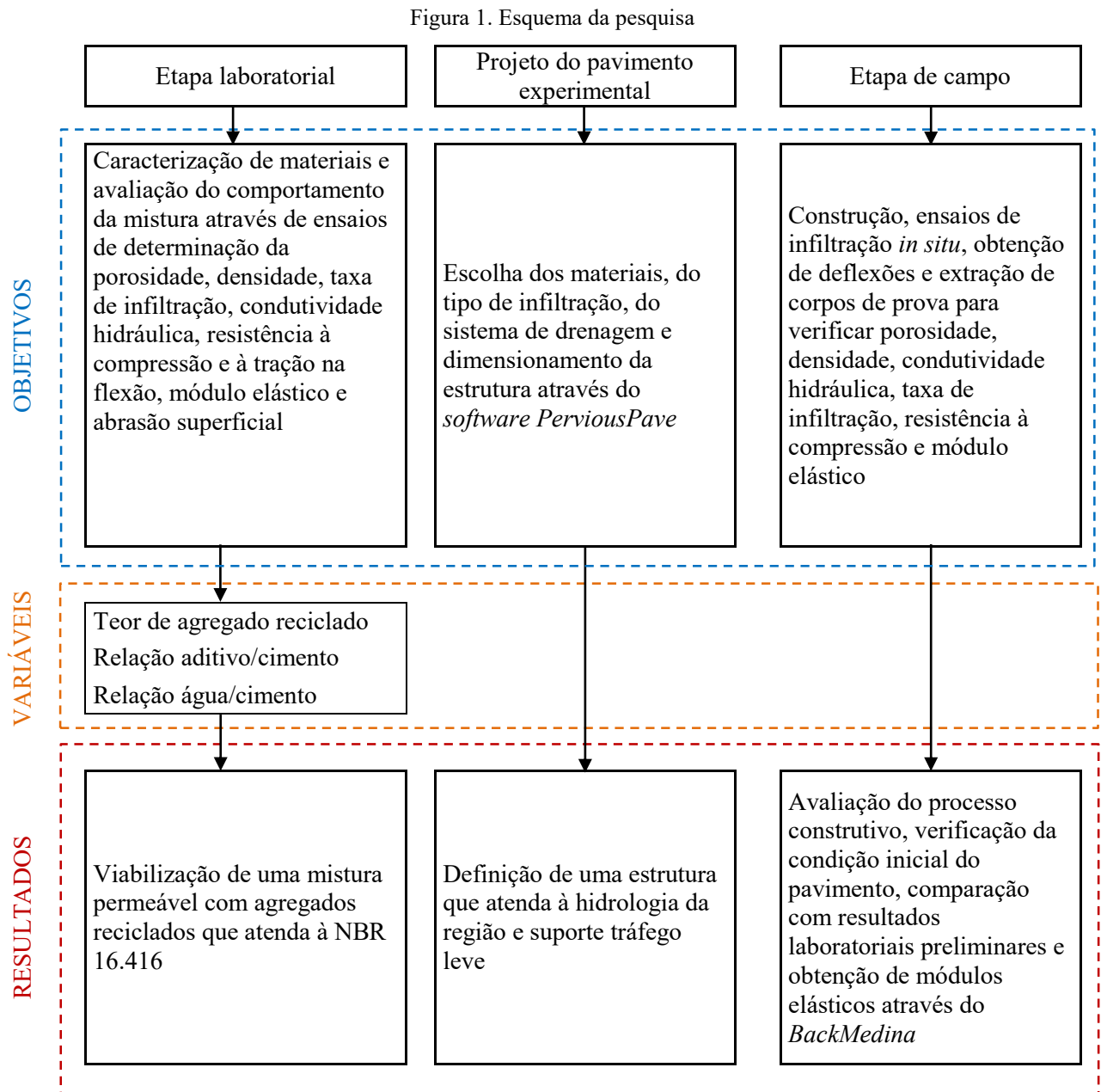
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O trabalho teve como objetivo geral avaliar a viabilidade de utilização de agregados de concreto reciclado no concreto permeável como revestimento em pavimentos permeáveis, em relação aos critérios físicos, mecânicos e hidráulicos. Buscando complementar e subsidiar a análise, a pesquisa teve os seguintes objetivos específicos:

- a) quantificar a influência de diferentes teores de substituição do agregado natural pelo de concreto reciclado nas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas das misturas;
- b) verificar a viabilidade do método de compactação por impacto para a moldagem de corpos de prova cilíndricos, visando a obtenção da densidade projetada pelo método de dosagem IPT/EPUSP;
- c) avaliar a influência do aditivo modificador de reologia e da redução da relação água/cimento nas propriedades da mistura reciclada;
- d) comparar a porosidade projetada para a camada de reservatório com a obtida em campo;
- e) comparar a taxa de infiltração *in situ* pelo método da ASTM C1701 (2017) com os resultados laboratoriais obtidos pela adaptação do método em amostras cilíndricas;
- f) comparar os resultados de ensaios realizados em corpos de prova moldados em laboratório com os obtidos em amostras extraídas da pista experimental;
- g) medir as deflexões superficiais na pista experimental e obter os módulos de elasticidade *in situ* através de retroanálise.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Buscando atingir os objetivos propostos, o trabalho foi desenvolvido seguindo o esquema apresentado na Figura 1.



A presente dissertação está estruturada em 7 capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a problemática e motivação para a realização da pesquisa, assim como os objetivos que nortearam o desenvolvimento do trabalho.

A revisão bibliográfica está apresentada no Capítulo 2, sendo dividida em três partes. A primeira focou nas características e propriedades do concreto permeável e nos métodos de ensaio, buscando o entendimento do material e a definição do programa experimental. Na segunda etapa foi realizado um relato do estado da arte sobre concreto permeável com a incorporação de agregados reciclados. Por fim, na terceira parte foi feita uma análise dos procedimentos de projeto, dimensionamento e execução de pavimento permeável, focando no método construtivo de revestimento de concreto moldado *in loco*.

A etapa laboratorial, apresentada no Capítulo 3, descreve o programa experimental, apresenta a caracterização dos materiais e os métodos dos ensaios realizados nessa etapa da pesquisa, cujos resultados são apresentados no Capítulo 4.

O Capítulo 5 apresenta os materiais utilizados na etapa de campo, o dimensionamento da estrutura e as etapas de execução do pavimento experimental. Também são apresentados os métodos de ensaios para a verificação de desempenho. A discussão do procedimento executivo e dos resultados obtidos nessa etapa são apresentados no Capítulo 6.

As conclusões finais da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 7. Por fim, são indicadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo traz uma revisão dos aspectos que contribuíram para o desenvolvimento do trabalho. Inicialmente, buscando subsidiar a seleção dos materiais, a definição do traço e o planejamento experimental, foram analisados os principais conceitos e propriedades referentes ao concreto permeável, assim como os aspectos que influenciam no seu desempenho. Na sequência, foi avaliado o efeito da incorporação de agregados reciclados no comportamento mecânico e hidráulico do concreto permeável. Por fim, buscou-se o entendimento de aspectos referentes ao projeto e dimensionamento de pavimentos de concreto permeável.

2.1 CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável, também chamado de poroso ou sem finos, é um concreto especial conhecido, principalmente, por permitir a passagem de água através do material. Diferentemente do concreto convencional, além de ter um comportamento mecânico adequado, também deve permitir uma boa drenabilidade à água. Dessa forma, o bom desempenho do material está relacionado a diversos aspectos, como tipos e proporções dos materiais e métodos de compactação. Nessa seção, serão discutidos os principais fatores e propriedades que influenciam nas características do concreto permeável.

2.1.1 Materiais

O concreto permeável é composto, basicamente, por agregados, cimento e água. De acordo com a ACI 522R (2010), tipicamente, os agregados usados têm a graduação uniforme, de tamanho único ou com diâmetros variando entre 19 e 9,5 mm. Uma das principais características do concreto permeável é ter quantidade limitada ou inexistente de finos, uma vez que estes tendem a diminuir a porosidade e a conexão dos poros da mistura.

De acordo com a ACI 211.3R-02 (2009), as graduações mais comuns de agregados usados em concreto permeável atendem aos requisitos das peneiras da ASTM C33 (2016) para distribuição granulométricas de 9,5 a 2,36 mm (tamanho nº 8), 12,5 a 4,75 mm (tamanho nº 7) e 19 a 4,75 mm (tamanho nº 6).

Além do cimento Portland, outros materiais cimentícios podem ser empregados, como sílica ativa (COSTA, 2019), casca de arroz (HESAMI *et al.*, 2014), escórias (EL-HASSAN *et al.*, 2019) e, ainda, algumas adições como os polímeros (BHUTTA *et al.*, 2013), fibras (WU *et al.*, 2016) e borracha (ALIABDO *et al.*, 2018), geralmente com o objetivo de melhorar a resistência mecânica do material.

Também é comum a utilização de aditivos no concreto permeável. Vários tipos de aditivos são sugeridos pela ACI 522R (2010), que podem funcionar como retardadores de pega, modificadores da viscosidade, redutores de água, entre outros. Atualmente, também estão disponíveis no mercado aditivos especiais para concreto permeável. Esses aditivos, conhecidos como modificadores de reologia, contemplam uma série de funções em um mesmo produto, não sendo necessária a combinação de vários aditivos (GCP APPLIED TECHNOLOGIES, 2020).

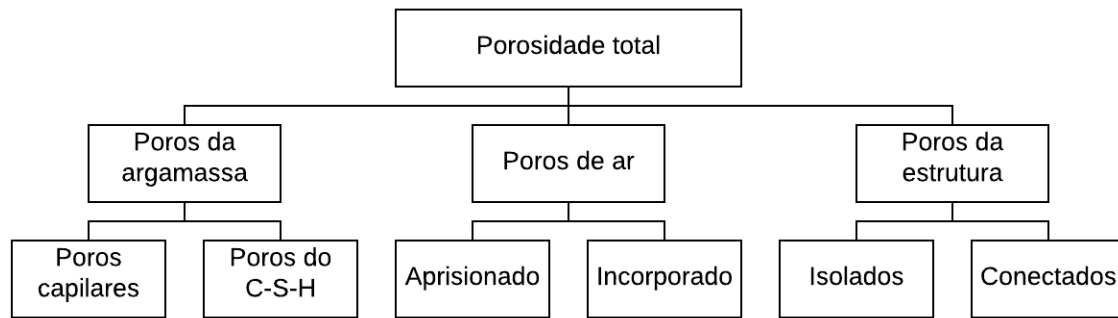
2.1.2 Propriedades relevantes

2.1.2.1 Porosidade

A porosidade total é um dos principais parâmetros que influenciam nas propriedades do concreto permeável. Em geral, a faixa de porosidade de um concreto permeável varia entre 15% e 25% (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016), sendo 15% o mínimo recomendado (NRMCA, [s.d]). Dependendo do tipo de uso, também são aceitas porosidades superiores a 30%, nesse caso, são conhecidos na literatura como concretos macroporos (BARNHOUSE; SRUBAR, 2016).

Embora a porosidade seja uma propriedade comumente relatada em pesquisas sobre concreto permeável, ainda existe alguma confusão quanto à sua definição. De acordo com Pieralisi (2016), a porosidade total no interior do concreto permeável é dividida em três tipos: poros da argamassa, vazios de ar e poros da estrutura, conforme apresentado na Figura 2. Segundo o autor, os poros da argamassa são formados durante o processo de hidratação do cimento. Eles são subdivididos em poros capilares, que é o espaço não preenchido pelos produtos sólidos da hidratação, e poros de gel, que estão dentro do hidrato de silicato de cálcio (C-S-H). Em relação aos poros de ar, eles podem ser de dois tipos; os poros de ar aprisionado, que são pequenos vazios esféricos envolvidos pelo misturador, e os vazios de ar incorporado, que são formados por bolhas resultantes do uso de aditivos próprios para esse fim. E ainda, os poros da estrutura, que podem ser isolados ou conectados um ao outro, estão relacionados à fatores como a falta de pasta de cimento, características dos agregados, relação agregado/cimento e grau de compactação (PIERALISI, 2016).

Figura 2. Tipos de poros no concreto permeável



Fonte: adaptado de PIERALISI (2016).

As propriedades mecânicas devem ser relacionadas à porosidade total das misturas (PIERALISI, 2016). Entretanto, de acordo com Chandrappa e Biligiri (2016), alguns dos vazios encontrados no concreto permeável não são eficazes no transporte de água através do material. Os vazios considerados efetivos para a condução e drenabilidade da água estão relacionados à tortuosidade e à conectividade entre os poros.

A ASTM C1688 (2012) e a ASTM C1754 (2012), normas específicas para concreto permeável, definem procedimentos para calcular a porosidade do concreto permeável no estado fresco e endurecido, respectivamente. No entanto, esses métodos fornecem apenas a porosidade total das amostras; outras propriedades, como tamanho, distribuição dos poros e variação da porosidade vertical, ainda são propriedades difíceis de determinar. Estudos recentes utilizaram tecnologia de processamento de imagem e técnicas de tomografia computadorizada de raios-X para a visualização e análise da rede de poros do material (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2018; MARTIN *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2018).

2.1.2.2 Propriedades hidráulicas

A condutividade hidráulica, também conhecida como permeabilidade, é uma das características mais importantes do concreto permeável, uma vez que ela descreve a facilidade com que a água pode passar através da mistura.

Na literatura dois tipos de métodos de ensaio são comumente utilizados para medir a condutividade hidráulica do concreto permeável: permeâmetro de carga variável e permeâmetro de carga constante. Ambos os métodos utilizam um permeâmetro, o que muda é o procedimento de ensaio. No de carga constante, o sistema deve ser constantemente abastecido e é determinada a quantidade de água que passa pela amostra em um intervalo de tempo, enquanto no de carga variável, mede-se

o tempo para uma determinada coluna de água passar pela amostra (NBR 13292, 1995; NBR 14545, 2000). Qin *et al.* (2015) discutiram a diferença entre os valores de condutividade hidráulica obtidos por ambos os métodos. De acordo com os autores, os resultados gerados pelo método de carga variável são inferiores em função da redução da pressão de água aplicada na amostra, o que não acontece no método com abastecimento constante de água.

Em geral, os métodos encontrados na literatura para calcular a condutividade hidráulica de materiais porosos são baseados na lei de Darcy. Montes e Haselbach (2006) realizam um estudo para avaliar a velocidade e o regime de fluxo de água dentro do concreto permeável, uma vez que essa lei é válida para o fluxo laminar. De acordo com o estudo, amostras com porosidades variando entre 15% a 32% apresentaram fluxo laminar. Em porosidades mais elevadas pode haver fluxo turbulento, nesse caso, as suposições da lei de Darcy não são mais válidas e, por isso, não deve ser aplicada.

Outra forma de avaliar a capacidade de infiltração e transporte de água é através do método de do anel aderido à superfície (ASTM C1701, 2017). Esse ensaio é usado para medir a condutividade hidráulica em campo e, também, contribui para a determinação da perda da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis ao longo do tempo devido ao efeito da colmatação dos poros. A adaptação do método em amostras cilíndricas foi utilizada por alguns autores (COSTA, *et al.*, 2018; HASELBACH *et al.*, 2017).

2.1.2.3 Resistência mecânica

As propriedades mecânicas do concreto permeável são fundamentais em projetos de pavimentos permeáveis, pois influenciam na espessura das camadas, nas características funcionais e de durabilidade da estrutura (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016). Estudos diversos já foram realizados para analisar as características mecânicas de concretos permeáveis, incluindo resistência à compressão uniaxial, resistência à tração e comportamento à fadiga. Especialmente devido ao alto índice de vazios, a resistência atingida para um concreto permeável é, em geral, menor que para concretos convencionais, variando entre 3 e 28 MPa de resistência a compressão e entre 1,0 e 3,4 MPa para a resistência à tração (ACI 522R, 2010).

Estudos anteriores indicaram que a resistência do concreto permeável é dependente de diferentes variáveis, como proporções de materiais que o compõe, porosidade, espessura da pasta de cimento, tamanho e forma dos agregados (DEO; NEITHALATH, 2011; ALAM; HASELBACH, 2014; YU *et al.*, 2019; COSTA, 2019). Bhutta *et al.* (2013) destaca a importância de uma composição

adequada e do emprego de aditivos e adições na busca de misturas que atinjam elevados valores de resistência mecânica. Contudo, o mesmo autor comenta que, em geral, isso ocorre devido a redução da porosidade e, conseqüentemente, influencia na redução do desempenho hidráulico do material.

Atualmente, não existem ensaios específicos para avaliar o desempenho mecânico do concreto permeável. Da mesma forma, ainda não se tem um método padrão de compactação das amostras em laboratório, o qual influencia fortemente no material produzido. Entre os métodos de moldagem em laboratório, estão a mesa vibratória, a prensa pneumática, a haste metálica e o compactador *Marshal* (GAEDICK *et al.*, 2014). O método sugerido pela ASTM *Subcommittee C09.49* define a compactação de corpos de prova cilíndricos com a utilização de um soquete metálico em duas camadas, com a aplicação de 20 golpes por camada. Para a moldagem *in situ*, a ACI 522R (2010) recomenda a compactação com o uso de rolo de aço com peso aproximado de 62 kg/m. Nesse sentido, buscando prever o comportamento de campo, muitos autores moldam placas de concreto permeável com rolos para a extração de corpos de prova cilíndricos (COSTA *et al.*, 2018; GAEDICK *et al.*, 2014).

2.1.2.4 Resistência à abrasão

A resistência à abrasão é outra preocupação essencial uma vez que o alto teor de vazios, a redução da pasta de cimento envolvendo os agregados e a baixa resistência mecânica tornam o concreto permeável mais vulnerável ao desgaste, desagregação e formação de fissuras sob a ação de cargas de tráfego (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016).

Existem vários métodos de ensaio de resistência à abrasão do concreto. Bakke (2006) apresentou uma discussão detalhada dos diferentes ensaios existentes. De acordo com o autor, atualmente, existem quatro métodos de ensaio propostos pela ASTM para avaliar a resistência do concreto submetido a vários tipos de ações abrasivas. O da ASTM C418 (2020) simula a resistência à abrasão pela técnica de jateamento de areia. O método de ASTM C944 (2012) mede a resistência à abrasão pela máquina de corte rotativo. O método ASTM C779 (2019) avalia a resistência à abrasão superficial através da máquina giratória de disco, de rodas ou de rolamentos de esferas. E o método da ASTM C1138 (2019) avalia a resistência de superfícies de concreto sujeitas à ação abrasiva de partículas transportadas pela água. De acordo com o autor, os procedimentos da ASTM C799 (2012) e da ASTM C944 (2012) são os mais adequados para simular a maioria das ações abrasivas relacionadas ao tráfego leve.

Diversos autores utilizaram o método da ASTM C944 (2012) para a avaliação da resistência à abrasão superficial do concreto permeável (ZAETANG *et al.*, 2016; RANGELOV *et al.*, 2016; KEVERN; FARNEY, 2015; IBRAHIM *et al.*, 2017). Além disso, vários autores analisaram a degradação do concreto permeável seguindo a norma ASTM C1747 (2013). Esse método, conhecido como Cantabro, mede a perda de massa de amostras cilíndricas submetidas a 500 rotações no equipamento de abrasão Los Angeles (COSTA, 2019; GAEDICK *et al.*, 2016).

Gaedick *et al.* (2016) fizeram um estudo comparativo entre os métodos de ensaio de abrasão Los Angeles (teste de Cantabro) e o de abrasão superficial pelo método da ASTM C944 (2012). A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a variação média dos resultados com o equipamento de abrasão Los Angeles foi de cerca de 4,5%, enquanto, no ensaio de abrasão superficial, foi superior a 32%. Kevern e Farney (2015) encontraram coeficientes de variação entre 33 e 36% para o método de ensaio da ASTM C944 (2012). Esses resultados indicam que o ensaio de abrasão superficial em questão, utilizado em concretos convencionais, pode não ter o nível de precisão adequado para o controle de qualidade de concretos permeáveis.

2.1.3 Composição

A definição do traço apropriado deve ser baseada em um equilíbrio entre vazios, conteúdo de pasta, resistência e trabalhabilidade (DEBNATH; SARKAR, 2018). Como não há um procedimento padrão de dosagem para concretos permeáveis, devem ser testadas várias composições até que os critérios de desempenho necessários sejam atendidos. A Tabela 1 apresenta faixas típicas definidas pela ACI 522R (2010) que podem ser usadas como referência e ponto de partida nos projetos das misturas.

Tabela 1. Proporções típicas de materiais para concreto permeável

Material	Proporção
Cimento (kg/m ³)	250 - 400
Agregados (kg/m ³)	1100 - 1500
Relação água/cimento	0,26 - 0,40
Relação cimento:agregado	1:4 - 1:4,5

Entretanto, essas relações variam de acordo com os critérios mecânicos e hidráulicos que a mistura deve atender de acordo com o tipo de uso. Quanto a relação cimento: agregado, por exemplo, uma

faixa de valores bem abrangente para a foi encontrada na literatura, entre 1:2,3 e 1:12, e densidades variando entre 1400 a 1800 kg/m³ (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016). Liu *et al.* (2019) sugere aumentar o conteúdo de materiais cimentícios, adicionar agregados finos ou diminuir a porosidade das misturas para aumentar a região de ligação entre as partículas e, conseqüentemente, melhorar o desempenho mecânico das misturas permeáveis.

A quantidade de água controla a consistência e a trabalhabilidade da mistura. Segundo Tennis *et al.* (2004), são comuns relações a/c entre 0,34 e 0,40 em misturas sem aditivo e, com o uso de aditivos, especialmente os superplastificante, vêm sendo empregadas relações entre 0,27 e 0,30. O uso de aditivos na mistura permeável tem efeito similar à água, ou seja, quando em excesso, causam fluidez excessiva e precipitação da pasta, fechando dos poros da mistura (COSTA, 2019).

O concreto permeável é conhecido por ser um concreto de “*Slump 0*”, dessa forma, diferentemente do concreto convencional, a consistência do material não é verificada pelo método de ensaio de abatimento do tronco de cone (ASTM C143, 2020; NBR NM 67, 1998). A relação a/c e o teor ideal de aditivo para o concreto permeável podem ser calibrados visualmente, verificando se há cobertura e envolvimento adequado dos agregados, ou ainda, através do teste de consistência pelo método da bola na mão (ASTM C860, 1995).

2.1.4 Fatores que influenciam nas propriedades

2.1.4.1 Agregados

Ainda não há um consenso entre os pesquisadores sobre a influência da dimensão do agregado nas propriedades mecânicas do concreto permeável. Diversos estudos apontam que agregados com diâmetros menores e a adição de finos melhoram as propriedades mecânicas das misturas (EL-HASSAN *et al.*, 2019). Por outro lado, outros estudos mostraram que o aumento do tamanho dos agregados resultou em maiores valores de resistência à compressão (YU *et al.* 2019).

Sandoval *et al.* (2019) estudaram três composições granulométricas de agregados de escória de alto forno, com diâmetros variando entre 6 mm e 20 mm, e diferentes teores de areia (grãos < 4,8 mm). De acordo com os autores, agregados com curvas granulométricas mais contínuas, apresentaram mais pontos de contato entre as partículas, o que facilita a distribuição de tensões e resulta no aumento da resistência mecânica, em relação a curvas uniformes. Além disso, a partir dos resultados

obtidos foi possível estabelecer uma correlação linear entre a resistência à compressão e a porcentagem de areia, ou seja, quanto maior a quantidade de areia, maior a resistência do material.

YU *et al.* (2019) também estudaram a influência da dimensão do agregado na resistência à compressão simples. Nesse estudo foram testados oito traços com a mesma porosidade, variando o tamanho dos agregados de 2,36 mm a 15 mm. Os resultados obtidos mostraram que os valores de resistência à compressão cresceram, rapidamente, com o aumento do diâmetro do agregado até 7 mm. Os autores relacionaram esse aumento de resistência com a redução dos poros de pequena dimensão, assim, com o aumento da dimensão dos agregados, cria-se mais espaço entre as partículas e o conteúdo de poros pequenos reduz, o que influencia no aumento do desempenho mecânico.

Em relação às propriedades hidráulicas, há uma redução de desempenho com o incremento de agregados de diâmetros menores devido à redução do volume de vazios e da conexão entre os poros. Para Sandoval *et al.* (2019), o aumento do percentual de areia resultou na diminuição da condutividade hidráulica do material, pois preencheu os vazios, reduzindo a capacidade hidráulica dos canais internos do concreto e, conseqüentemente, a velocidade de passagem da água. Além disso, agregados miúdos têm maior área superficial, o que exige mais pasta de cimento para revestir os agregados e manter a trabalhabilidade (DEBNATH; SARKAR, 2019).

Além da dimensão dos agregados, outros parâmetros também influenciam nas propriedades do concreto permeável. De acordo com a ACI 522R (2010), partículas finas e alongadas devem ser evitadas, por serem mais frágeis. Ainda, a superfície dos agregados deve estar livre de poeira e produtos químicos que possam prejudicar a aderência entre pasta e agregado e a hidratação do cimento (ACI 522R, 2010).

A umidade dos agregados na mistura é outro fator importante. Os agregados devem estar na condição saturado superfície seca. Caso contrário, um agregado seco pode resultar em uma mistura que não possui trabalhabilidade adequada para lançamento e compactação. Por outro lado, agregados excessivamente úmidos podem contribuir para o escorrimento da pasta, causando o fechamento dos vazios da mistura (ACI 522R, 2010).

2.1.4.2 Aditivos e adições

Os aditivos são frequentemente usados na produção do concreto permeável com o objetivo de melhorar o desempenho, a durabilidade, a resistência ou a trabalhabilidade da mistura.

Em muitos estudos, aditivos redutores de água e superplastificantes são usados com o intuito de melhorar a trabalhabilidade, mantendo o consumo de água e a relação a/c, evitando a perda de resistência mecânica (BATEZINI, 2019). Sandoval *et al.* (2019) estudaram a incorporação de superplastificante na mistura com o objetivo de utilizar uma relação a/c muito baixa. De acordo com os autores, isso contribuiu para o aumento da resistência à compressão, atingindo valores entre 19 e 31 MPa.

Também são usados aditivos retardadores de pega para controlar a hidratação do cimento e manter a trabalhabilidade da mistura. Batezini (2019) usou o aditivo com o objetivo de retardar a hidratação do CPV ARI RS e o início da pega do concreto permeável, em razão do tempo de transporte entre a usina e o local de lançamento.

O aditivo modificador de reologia é um aditivo específico para concreto permeável. A vantagem da utilização desse tipo de aditivo é a soma efeitos sem a necessidade de combinar vários aditivos: melhora a trabalhabilidade, controla a hidratação dos materiais cimentícios, aumenta o tempo de manuseio e facilita a compactação. Esse aditivo foi utilizado por COSTA (2019).

Chen *et al.* (2013) mostraram que devido ao uso de materiais cimentícios suplementares (sílica ativa e cinza volante) e de aditivo superplastificante foi possível obter um concreto permeável de alta resistência mecânica, com valores superiores a 35 MPa para resistência à compressão. Para El-Hassan *et al.* (2019), a substituição de 50% de cimento por escórias de alto forno promoveu um incremento de resistências à compressão e à tração na flexão de até 27% e 23%, respectivamente, para amostras com 20% de porosidade.

Além disso, diferentes agentes poliméricos e microfibras também vêm sendo adicionados nas misturas permeáveis. O objetivo é atuar na prevenção de fissuras e aumentar a resistência mecânica e a durabilidade, mas seu efeito ainda não é dominado pelos pesquisadores. Wu *et al.* (2016) por exemplo, verificaram que a fibra de polipropileno pode melhorar a resistência à abrasão e a durabilidade ao congelamento e descongelamento do concreto permeável. Por outro lado, Costa (2019) estudou o uso de macrofibras de polipropileno e observou que a adição não acarretou melhorias nas propriedades mecânicas nem ao desgaste por abrasão. De acordo com a autora, as fibras não têm o mesmo efeito que em concretos convencionais e, ainda, podem causar problemas devido à falta de aderência com a matriz porosa, por isso seu uso não é recomendado.

2.1.4.3 Relação água/cimento

A relação a/c é outro parâmetro fundamental na dosagem do concreto permeável. A quantidade de água controla a coesão e a trabalhabilidade da mistura no estado fresco e a porosidade no estado endurecido (DEBNATH; SARKAR, 2018).

Contudo, diferentemente do concreto convencional, a diminuição da relação a/c não leva, necessariamente, a um aumento de resistência mecânica da mistura. Menor quantidade de água pode reduzir a trabalhabilidade do material e prejudicar a compactação, o que aumenta a porosidade e reduz a resistência mecânica (COSTA, 2019). Para Debnath e Sarkar (2019), a relação a/c deve produzir uma trabalhabilidade média. Enquanto uma baixa relação resulta em misturas pouco trabalháveis, prejudicando o adensamento e a compactação, uma quantidade excessiva de água pode causar a segregação da pasta e o entupimento dos poros. A partir dos resultados obtidos em laboratório, de acordo com os mesmos autores, o intervalo limite para a relação deve ser entre 0,30 e 0,32.

Atenta-se ao cuidado que se deve ter em misturas reciclados, pois a absorção dos agregados interfere diretamente na relação a/c. Devido ao agregado ser mais poroso que um agregado natural, muitas vezes, explicado pela presença de argamassa aderida na superfície, o aumento do teor de agregados reciclados, causa o aumento da absorção de água, o que interfere nas ligações entre as partículas e prejudica a trabalhabilidade das misturas (THOMAS *et al.*, 2018).

2.1.4.4 Relação agregado: aglomerante

Diversos autores relacionam o aumento do teor de materiais cimentantes e da espessura da pasta envolvendo os agregados com o aumento da resistência mecânica. De acordo com Debnath e Sarkar (2018), misturas com uma alta relação agregado/cimento apresentam um fraco contato entre as partículas, o que reduz a resistência do concreto permeável. Os resultados obtidos por Zhang *et al.* (2017) evidenciaram que uma mistura com menor teor de cimento resulta em valores mais baixos de resistência à compressão e de módulo de elasticidade. De acordo com Chandrappa e Biligiri (2016), a redução da espessura da pasta torna um pavimento permeável mais suscetível a fissuras sob esforços repetitivos (fadiga).

Alguns autores optaram pela incorporação de materiais cimentícios suplementares para diminuir o consumo de cimento, reduzindo o custo e tornando o material mais sustentável. Sriravindrarajah *et al.* (2012), por exemplo, fizeram a substituição de até 70% de cimento por escórias de alto forno e,

de acordo com os autores os valores de resistência à compressão não foram significativamente afetados. Os resultados obtidos por Gaedick *et al.* (2014) mostraram que o uso de escória de alto forno não tem um efeito prejudicial sobre a resistência à abrasão do concreto permeável.

Por outro lado, o aumento do teor de cimento tende a reduzir a porosidade e a condutividade hidráulica das misturas. El-Hassan *et al.* (2019) relataram que a incorporação de materiais cimentícios suplementares proporcionou um melhor desempenho mecânico, mas densificou a mistura e criou uma estrutura menos porosa e permeável, o que não é desejável em concretos permeáveis. De acordo com Yap *et al.* (2018), com menos pasta de cimento conectando os agregados, uma maior rede porosa fica disponível para a água infiltrar através do concreto.

2.1.4.5 Compactação

Bonicelli *et al.* (2015) relataram que a energia de compactação desempenha um papel importante nas propriedades finais do concreto permeável. Os autores analisaram diversas propriedades mecânicas e hidráulicas de três composições submetidas a diferentes níveis de energia de compactação. A partir do estudo, foi observada a redução de porosidade e do coeficiente de condutividade hidráulica com o aumento da energia de compactação. Por outro lado, com mais energia de compactação aplicada, houve o aumento da resistência à abrasão.

O método de compactação também influencia fortemente no desempenho do concreto permeável no estado endurecido (ACI 522R, 2010). Costa *et al.* (2018) fizeram a comparação entre amostras cilíndricas extraídas de placas compactadas com o auxílio de um cilindro metálico e corpos de prova moldados com golpes de um soquete metálico. A partir dos resultados, os autores concluíram que, embora a compactação com o rolo metálico seja a mais representativa dos procedimentos de campo, amostras compactadas com o soquete Proctor são mais fáceis de produzir no laboratório, por dispensar o processo de extração, e apresentaram resultados menos variáveis, o que é importante para verificar a influência de um fator em relação à referência. Gaedicke *et al.* (2014) também encontraram resultados mais consistentes para corpos de prova moldados com o soquete Proctor.

Além disso, de acordo com os resultados obtidos por Gaedicke *et al.* (2014), corpos de prova extraídos apresentaram menor resistência, e isso pode estar associado à influência das microfissuras geradas no processo de corte para a extração das amostras. Além disso, foram obtidos resultados de condutividade hidráulica menores para amostras compactados com rolo em relação à compactação

com o Proctor para o mesmo valor de porosidade total. De acordo com os autores, a compactação com o rolo tende a diminuir a capacidade de infiltração devido ao selamento da superfície.

Haselbach e Freeman (2006) destacam a diferença no gradiente vertical de porosidade, resultante da compactação superficial com o uso de rolo. Segundo os autores, ocorre o aumento da porosidade ao longo da profundidade do pavimento, o que pode induzir fissuras na parte inferior do concreto permeável, onde a porosidade é mais elevada. Por outro lado, essa característica previne quanto acúmulo de material que colmata os poros da mistura.

2.2 USO DE AGREGADOS RECICLADOS NO CONCRETO PERMEÁVEL

Em geral, a qualidade do concreto permeável produzido com agregados reciclados está relacionada ao material que deu origem ao agregado, ao processo de britagem e à nova composição da mistura. Dessa forma, esse item discute as principais propriedades e características dos agregados reciclados que influenciam no desempenho das misturas e faz uma revisão do estado da arte sobre concreto permeável com a incorporação de agregados reciclados. No final do capítulo, na Tabela 2, é apresentada uma compilação desses estudos, quanto aos resultados físicos e obtidos em ensaios mecânicos e hidráulicos.

2.2.1 Tipo e dimensão de agregados

Estudos realizados anteriormente mostraram que a dimensão máxima dos agregados reciclados e a distribuição granulométrica influenciam na porosidade, nas propriedades mecânicas e hidráulicas das misturas permeáveis. Seguindo esse conceito já difundido entre os pesquisadores, pode ser observada a tendência de utilização de curvas granulométricas uniformes, com diâmetros variando entre 4,75 e 25 mm e a exclusão de finos, conforme apresentado na Tabela 2.

Aliabdo *et al.* (2018), em sua pesquisa sobre concreto permeável com agregados de concreto, fizeram a comparação entre agregados com diâmetros máximos de 9,5 e 19 mm. A partir desse estudo, verificou-se que o aumento da dimensão dos agregados, bem como o incremento de agregados reciclados, resultaram no aumento da porosidade da mistura. Da mesma forma, o uso de finos pode ser diretamente associado ao aumento do desempenho mecânico das misturas.

Debnath e Sarkar (2019) estudaram três proporções diferentes de agregados finos nas misturas permeáveis (10%, 15% e 20%). De acordo com o estudo, houve uma tendência quase linear entre o

aumento de resistência à compressão e as porcentagens crescentes de agregados finos. Esse fato pode ser explicado devido ao melhor empacotamento e maior intertravamento entre as partículas, o que reduz a porosidade. Isso também foi evidenciado por Sriravindrarajah *et al.* (2012), que associam a redução do tamanho dos agregados com a menor da porosidade e o melhor desempenho mecânico das misturas.

De acordo com Zhang *et al.* (2017), que avaliaram a incorporação de concreto e de tijolos triturados no concreto permeável, os agregados reciclados são mais ásperos e têm mais arestas e cantos afiados em relação ao agregado natural, por isso, tornam a mistura mais coesa e com menor trabalhabilidade. Consequentemente, o tipo de britagem e o número de estágios de processamento influenciam diretamente no desempenho do concreto reciclado. De acordo com Silva *et al.* (2014), um britador de mandíbula, geralmente usado no estágio de britagem primária, acentua as formas planas e angulares, enquanto o britador de cone torna as arestas mais arredondadas e menos afiadas.

A redução da trabalhabilidade também pode ser atribuída a alta absorção do agregado reciclado. Os valores de absorção para agregado reciclado ficam na faixa de 6,6 e 8,7%. Comparativamente, para o agregado natural são encontrados valores entre 0,22 e 3,5% (ULLOA-MAYORGA *et al.*, 2018; YAP *et al.*, 2018; EL-HASSAN *et al.*, 2019). Yap *et al.* (2018) realizaram análise microscópica de misturas permeáveis com agregado reciclado de concreto, mostrando que a quantidade de pasta diminui consideravelmente a medida que se aumenta a proporção de agregados reciclados na mistura. Assim, de acordo com os autores, devido a essas características, agregados reciclados, em geral, necessitam de mais pasta de cimento para produzir misturas mais trabalháveis.

Por outro lado, para Ulloa-Mayorga *et al.* (2018), a alta absorção dos agregados reciclados contribui para o aumento do desempenho mecânico do concreto permeável. Nesse estudo, foi testada a incorporação de dois tipos diferentes de agregados reciclados: de cerâmica e de concreto. As misturas com agregado de cerâmica apresentaram maiores resultados de resistência à compressão e à flexão. De acordo com os autores, isso pode ser explicado devido ao alto teor de absorção do material cerâmico, o que faz com que absorva a pasta de cimento das misturas, reduzindo a tendência de ruptura nos agregados, o que leva a um aumento o desempenho da mistura.

Para alguns autores, algumas características do agregado britado, como a textura rugosa, contribuem para a melhoria da aderência entre a pasta e o agregado. De acordo com Gaedicke *et al.* (2014), devido a angularidade e a rugosidade superficial dos agregados reciclados, há um maior

intertravamento entre as partículas e, devido a isso, as misturas recicladas tem maior resistência à abrasão em relação ao concreto permeável convencional. Zaetang *et al.* (2016), que estudaram o uso de agregados de concreto em substituição ao agregado natural, afirmam que, além da superfície rugosa, a elevada abrasão dos agregados reciclados causa a densificação e redução de porosidade das misturas, o que aumenta o desempenho mecânico.

2.2.2 Resistência mecânica e abrasão

A Tabela 2 apresenta valores de resistência mecânica obtidos em diversos estudos com o uso de agregados reciclados. A faixa de valores é bem abrangente, variando entre 2 a 36 MPa para resistência à compressão axial e entre de 1 a 3 MPa para resistência à tração na flexão. Vários autores associam a redução do desempenho mecânico com o incremento no teor de agregados reciclados nas misturas (EL-HASSAN *et al.*, 2019, ZHANG *et al.*, 2017; DEBNATH; SARKAR, 2019). De acordo com El-Hassan *et al.* (2019), por exemplo, para cada 10% de agregado de concreto adicionado nas misturas, a redução média na resistência a compressão foi de cerca de 12%.

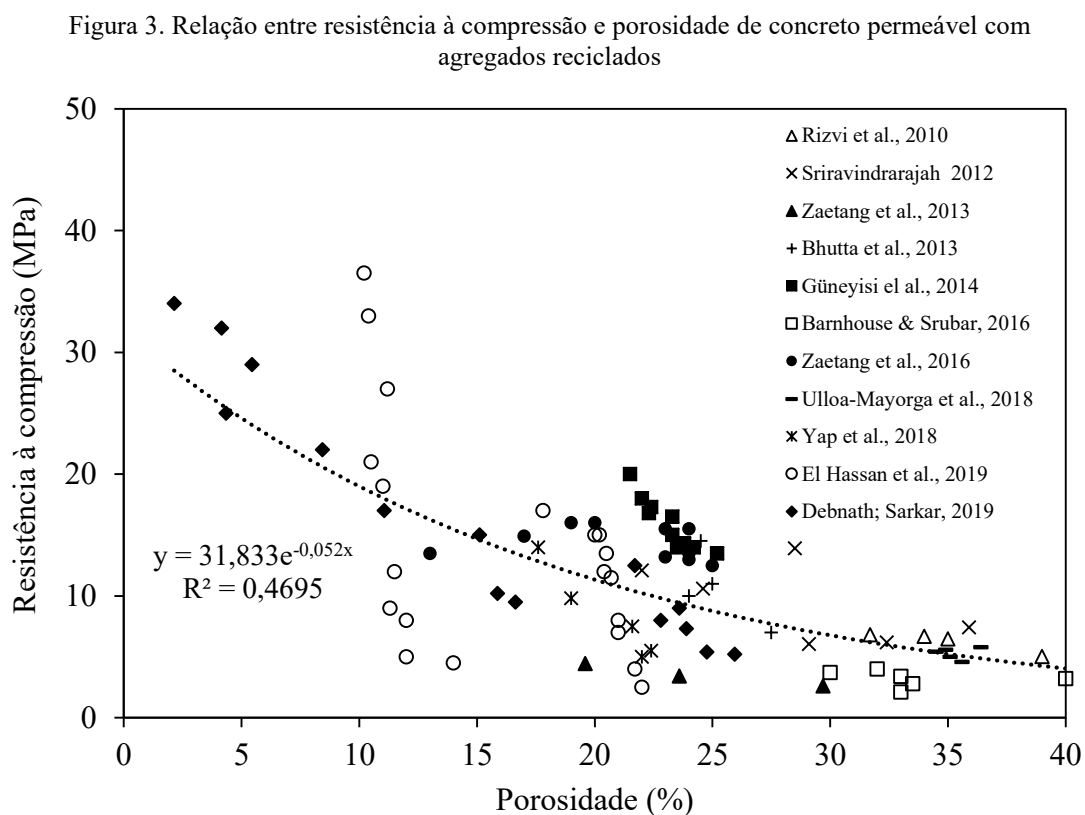
Yap *et al.* (2018) avaliou a resistência à abrasão de misturas permeáveis com o uso de agregados de concreto. Os autores observaram que os resultados foram semelhantes aos da referência para substituições de até 20%, ou seja, cerca de 40% de abrasão. Nesse caso, as perdas foram atribuídas à baixa resistência do concreto permeável e não ao agregado. Para teores de substituição acima de 20%, as perdas de abrasão foram entre 50 e 55%, causadas pela alta absorção de água da mistura e a redução da pasta de cimento envolvendo os agregados, o que gera uma maior rede de poros interligados e aumenta a propensão a quebras por abrasão.

Acredita-se que a presença de argamassa envolvendo os agregados seja uma das principais explicações para o desempenho mecânico inferior de misturas recicladas. Para Hassan *et al.* (2019), devido à fraca ligação entre agregado e argamassa aderida, a resistência mecânica e à abrasão são inferiores em relação a misturas permeáveis com agregados pétreos naturais. Yap *et al.* (2018) verificaram através de análises microscópicas que o caminho de falha das amostras com agregado de concreto ocorreu na argamassa aderida.

Vários autores também relacionam a redução da resistência à compressão com o aumento da porosidade das misturas. Estudos como o de Sriravindrarajah *et al.* (2012) afirmam a resistência mecânica depende, principalmente, da porosidade do concreto, sendo que os tipos de agregados e

materiais cimentícios, as idades de cura e as formas das amostras têm um efeito marginal sobre a resistência em relação a porosidade.

Na Figura 3, são plotados os resultados obtidos em pesquisas que utilizaram agregados reciclados em concretos permeáveis. Também foi obtida uma regressão exponencial com todos os resultados. Vale destacar que Zaetang *et al.* (2013), Ulloa-Mayorga *et al.* (2018) e Debnath e Sarkar (2019) utilizaram agregados cerâmicos, enquanto as demais pesquisas foram feitas com agregados de concreto.



Fonte: elaborado pela autora.

Para Berry *et al.* (2012), a resistência à compressão reduziu linearmente com o aumento da densidade da amostra. De acordo com o autor, essa tendência indica que misturas com quantidades variadas de agregados reciclados podem atingir resistências à compressão comparáveis a um concreto permeável tradicional se forem preparadas com densidades semelhantes.

Segundo o mesmo autor, o uso de 50% de agregados de concreto não afetou significativamente nenhum resultado testado em relação à mistura de controle, feita apenas com materiais virgens. De

acordo com Yap *et al.* (2018) e Rizvi *et al.* (2010), que estudaram a incorporação de agregados de concreto, o efeito da substituição não é significativo para níveis de substituição de 20% e 15%, respectivamente.

De acordo com Barnhouse e Srubar (2016), a substituição por agregados reciclados em concretos macroporos (porosidade acima de 30%), não compromete a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto permeável. Para Zaetang *et al.* (2016), o uso de agregados de concreto não tem efeito significativo na resistência à flexão do concreto permeável para nenhum nível de substituição.

2.2.3 Propriedades hidráulicas

Na literatura foram encontrados valores de condutividade hidráulica para misturas permeáveis com o uso de agregados reciclados variando entre 1 a 40 mm/s, aproximadamente, conforme apresentado na Tabela 2 e na Figura 4. Também pode ser visto na Figura 4 que a condutividade hidráulica está diretamente relacionada à porosidade das misturas de concreto permeável. Entretanto, também é possível observar que essa não é uma relação linear, e uma relação exponencial foi a que apresentou o melhor ajuste ($R^2 = 0,567$). Isso quer dizer que, além da porosidade, diferentes variáveis da mistura também influenciam a condutividade hidráulica.

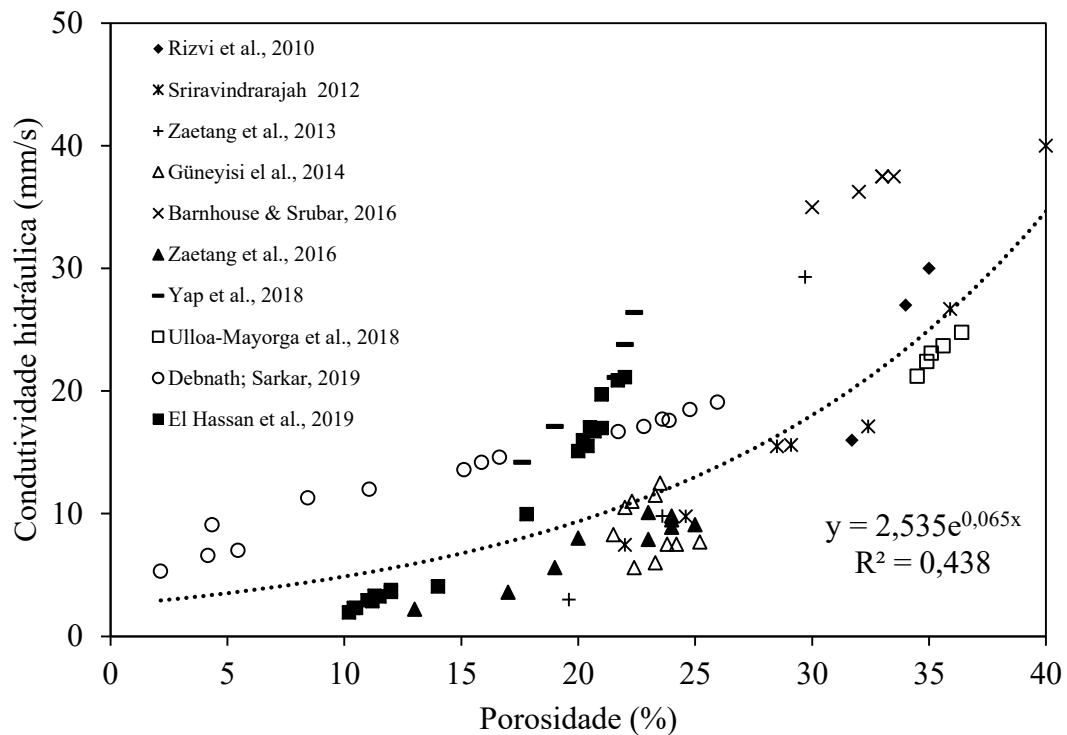
Diversos pesquisadores relacionam a condutividade hidráulica com outros fatores de projeto, como tamanho e forma do agregado, relação água/cimento, proporção cimento:agregado, quantidade de finos, entre outros. De acordo com Yap *et al.* (2018), o tipo de agregado influencia na propriedade e, por isso, misturas com agregados reciclados, em geral, apresentam maior condutividade hidráulica. Para o autor, isso é atribuído à elevada porosidade do agregado reciclado, resultando em uma maior rede de poros para que a água infiltre através do concreto permeável.

Alguns autores atribuem o aumento da condutividade hidráulica à maior angularidade do agregado reciclado, que implica na redução trabalhabilidade, na dificuldade de adensamento e no aumento dos vazios da mistura (RIZVI *et al.*, 2010; GÜNEYISI *et al.*, 2014). Para Ulloa-Mayorga *et al.* (2018) a aplicação de elevadas energias de compactação influenciou diretamente na condutividade hidráulica, pois densificou as misturas, reduzindo a porosidade.

De acordo com Debnath e Sarkar (2018), que estudou o uso de agregados cerâmicos em concreto permeável, a dimensão máxima do agregado e a curva granulométrica têm um elevado efeito na

condutividade hidráulica da mistura. De acordo com os autores, a presença de agregados finos aumenta o intertravamento e ajuda a preencher os vazios disponíveis na mistura, o que causa a redução da condutividade hidráulica.

Figura 4. Relação entre condutividade hidráulica e porosidade de concreto permeável com agregados reciclados



Fonte: elaborado pela autora.

2.2.4 Influência de aditivos e adições

É de conhecimento comum que o concreto permeável, devido à elevada porosidade, apresenta um desempenho mecânico inferior ao concreto convencional. Alguns estudos também associam o uso de agregados reciclados com a redução da resistência mecânica. Dessa forma, conforme pode ser verificado na Tabela 2, diversos autores optaram pelo aumento do consumo de cimento, incorporação de aditivos ou adições, com o objetivo de melhorar algumas características da mistura e aumentar a resistência mecânica.

El-Hassan *et al.* (2019), por exemplo, obtiveram valores superiores à 35 MPa e 3MPa para resistência à compressão e à tração, respectivamente, com a incorporação de aditivo superplastificante e a adição de escórias de alto forno. Debnath e Sarkar (2019), adicionando 20%

de areia, chegaram em valores de resistência a compressão de cerca de 35 MPa. Barnhouse e Srubar (2016) também utilizaram areia na mistura e, de acordo com os autores, a adição de 7% de areia aumentou a resistência à compressão em até 19%.

De acordo com Aliabdo *et al.* (2018), o uso de fibras de polipropileno aumentou a resistência à tração e à abrasão de misturas recicladas. Além disso, a adição de sílica ativa e o polímero estireno-butadieno densificou a mistura e melhorou os índices de resistência. Os autores recomendam a incorporação de até 20% de polímero estireno-butadieno e de 10% de sílica para melhorar as propriedades do concreto permeável com uso de agregado reciclado.

Bhutta *et al.* (2013) adicionaram polímeros no concreto permeável reciclado, o que melhorou as propriedades na mistura no estado fresco, como a trabalhabilidade e a fluidez da pasta de cimento, e influenciou na facilidade de adensamento e no aumento da resistência. Entretanto, foi evidenciada a redução na proporção de vazios da mistura permeável.

Aditivos também são utilizados para melhorar as características das misturas recicladas. Diversos autores utilizam o aditivo superplastificante com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade da mistura reciclada no estado fresco (DEBNATH; SARKAR, 2019; ZAETANG *et al.*; 2016). Berry *et al.* (2012) fizeram a combinação de três tipos de aditivos: o incorporador de ar, o redutor de água e o modificador de viscosidade.

Tabela 2. Propriedades do concreto permeável com agregados reciclados

Tipo agregado	Traço (massa)	Aditivo / Adição	D (mm)	P (%)	a/c	D (kg/m³)	k (mm/s)	RC (MPa)	RTF (MPa)	Autor
Concreto	-	-	9,5	31,7-39,3	-	1710-1965	16-78,5	5-9,2	-	Rizvi <i>et al.</i> (2010)
Concreto	1:2,8-1:4	Escória de alto forno	5-13; 13-20	7-32,4	0,33	1385-1650	9,78-17,1	4,5-13,3	-	Sriravindrarah et al. 2012
Concreto	1:4,3	Incorporador de ar, redutor de água e modificador viscosidade	4,75-25	-	0,27	1789-1890	7,5-8,7	12,5-17,7	-	Berry <i>et al.</i> (2012)
Concreto	1:5,9	Polímeros	5-22	23-28	0,30	-	24-37	6,5-16	1,9-3,2	Bhutta <i>et al.</i> (2013)
Concreto	1:2,3-1:1,4	Superplastificante	4,8-9,5	19,6-29,7	0,24	602-775	3-29,3	2,6-4,5	-	Zaetang <i>et al.</i> (2013)
Concreto	1:3,7; 1:5,7	-	9,5-12,5	22-25,3	0,27 e 0,32	1781-1925	5,9-12,4	18-13,5	-	Güneyisi <i>et al.</i> (2014)
Concreto	1:4,5	Superplastificante	4,75-9,5	13-25	0,24	1820-2000	2,2-10,1	13-17	2,8-4,8	Zaetang <i>et al.</i> (2016)
Concreto	1:3; 1:3,2	Areia e dióxido de titânio (TiO ₂)	4,75	30-40	0,27	1312-1568	35-40	2,1-4	-	Barnhouse; Srubar (2016)
Concreto e Cerâmico	1:4,3	Superplastificante	5-10	15,1-16,5	0,34	-	3,1-3,8	15,5-24,2	2,5-3,6	Zhang <i>et al.</i> (2017)
Concreto e Cerâmico	1:3-1:3,2	Superplastificante	9,5-12,5	34,5-36,4	0,28	1360-1469	21,2-24,8	4,6-5,8	1,4-2,1	Ulloa-Mayorga <i>et al.</i> (2018)
Concreto	1:3,6-1:4,1	-	4,5-9,5	-	0,35	-	14,2-26,4	5,5-11,4	1,7-2,4	Yap <i>et al.</i> (2018)
Concreto	1:4,1	Areia, Fibra de polipropileno, borracha e sílica	12,5-9,5; 25-19	14-25	0,30	1620-192	4,2-10,2	3-15,2	1,3-3,0	Aliabdo <i>et al.</i> (2018)
Concreto	1:2,4-1:4	Escória de alto forno	4,75-22	10,2-22	0,40	1625-1984	1,88-21,14	37-2,5	0,9-3,1	Hassan <i>et al.</i> (2019)
Cerâmico	1:2,1-1:2,6	Superplastificante e areia	2,36-19	2,1-25,9	0,28-0,35	-	5,3-19,1	-	-	Debnath; Sarkar (2019)

D = Diâmetro. P = Porosidade. a/c = Relação água/cimento. D = Densidade. k = Permeabilidade. RC = Resistência à compressão. RTF = Resistência à tração.

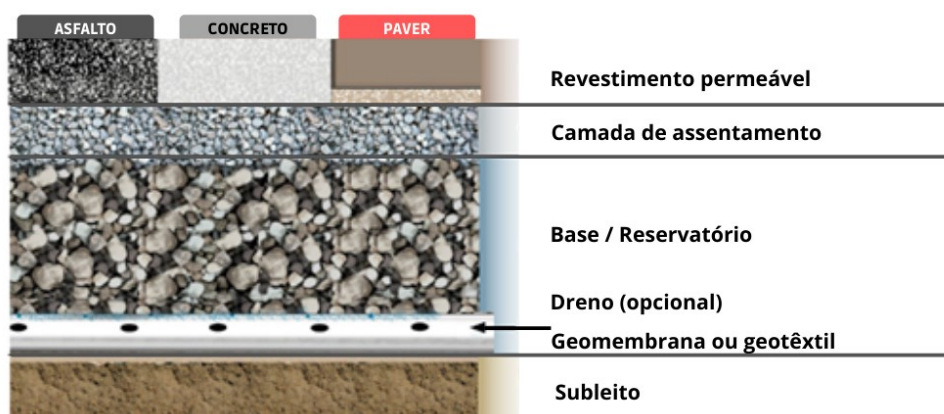
2.3 PAVIMENTO DE CONCRETO PERMEÁVEL

Diferentemente de um pavimento convencional, um pavimento permeável deve ser projetado não apenas para suportar o tráfego, mas também, para permitir o escoamento e, algumas vezes, a coleta da água das chuvas. Dessa forma, a escolha dos materiais, o tipo de estrutura e as espessuras das camadas devem atender aos requisitos estruturais e hidrológicos simultaneamente. Dessa forma, nesse capítulo, serão analisadas as camadas que compõem um pavimento permeável e os critérios que influenciam no projeto e no dimensionamento da estrutura.

2.3.1 Estrutura

Conforme pode ser visto na Figura 5, uma seção típica de um pavimento permeável consiste em um revestimento poroso e uma camada granular sobre o subleito. Dependendo das características do solo existente, pode ser necessário um reforço do subleito e a instalação de um sistema de drenagem. Além disso, pode ser usada manta geotêxtil nas interfaces entre as camadas e, ainda, dependendo do sistema de infiltração adotado, uma geomembrana sobre o subleito. Cada um desses elementos será detalhado a seguir.

Figura 5. Seção típica de um pavimento permeável



Fonte: adaptado de ASCE (2015).

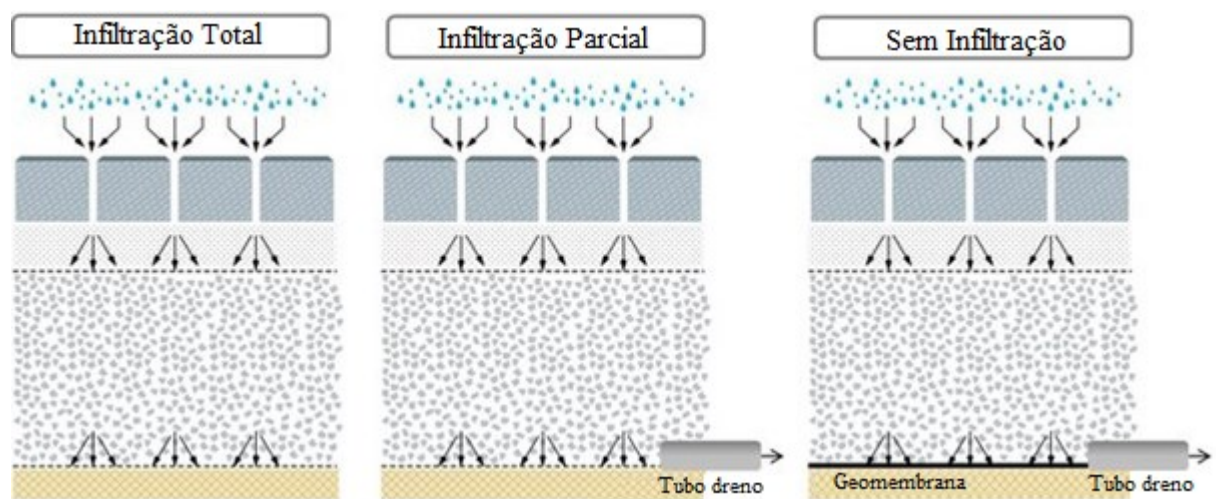
2.3.1.1 Subleito

A NBR 16416 (ABNT, 2015) sugere que solos com valores de condutividade hidráulica maiores que 0,1 mm/s são os mais adequados para pavimentos permeáveis. Nesse caso, pode ser adotado um sistema de infiltração total, em que toda a água sai por infiltração no subleito.

Contudo, um pavimento permeável também pode ser implantado em solos com taxas de condutividade hidráulica inferiores a essa, adicionando um sistema de drenagem. Assim, a inclusão de drenos proporciona a drenagem da água que não conseguiria infiltrar no subleito, ou infiltraria de uma forma muito lenta.

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), em solos com condutividade hidráulica entre 0,01 e 0,1 mm/s, pode ser adotado o sistema de infiltração parcial, no qual a água pode sair por infiltração no solo ou por um dreno instalado na parte inferior do reservatório. Em solos com valores de condutividade hidráulica inferiores a 0,01 mm/s, deve ser utilizado o sistema sem infiltração, nesse caso, a água da chuva fica armazenada na estrutura até ser removida integralmente por drenos. Os tipos de sistemas de infiltração são esquematizados na Figura 6.

Figura 6. Tipos de sistemas de infiltração



Fonte: adaptado de Marchioni e Silva (2011).

Além da capacidade de infiltração, outros fatores também determinam o sistema de infiltração a ser utilizado nos pavimentos permeáveis. Em subleitos com solos expansivos, propensos a instabilidade na presença de água, ou, ainda, quando há risco de contaminação do lençol freático, deve ser usado o sistema sem infiltração. Além disso, quando há possibilidade de coleta e reaproveitamento da água retida, devem ser usados sistemas de infiltração parcial ou sem infiltração (SHACKEL, 2010; ASCE, 2015).

É importante destacar que, embora seja um pavimento com infiltração para parcial ou sem infiltração, ainda há benefícios no uso de pavimento permeável como ferramenta de

gerenciamento de águas pluviais. Nesses casos, a principal função do pavimento é reter temporariamente a água durante os picos de chuva, evitando o elevado escoamento superficial, e controlar a saída de água através de um tubo de drenagem a uma taxa escolhida para não sobrecarregar as instalações urbanas (SHACKEL, 2010).

Além da infiltração, como em qualquer pavimento, a capacidade de suporte é importante para a estabilidade da estrutura. Um parâmetro relativo ao suporte do subleito é o coeficiente de recalque (k), também denominado módulo de reação ou módulo de Westergaard. Este parâmetro pode ser determinado em campo conforme normas DNIT 055 (2004) e ASTM D1196 (2016). O valor k do subleito é um dado de entrada nos *softwares* de dimensionamento. Dessa forma, a relação aproximada entre tipo de solo do subleito e o coeficiente de recalque pode ser vista na Tabela 3, que pode ser usada para estimativa prévia de k .

Tabela 3. Tipos de subleito e intervalo de valores de coeficiente de recalque

Tipo de solo	Capacidade de suporte	k (MPa/m)	CBR
Solos de grãos finos com predomínio partículas do tamanho de argila	Baixa	20 a 34	2,5 a 3,5
Areias e cascalhos com quantidades moderadas de argila	Média	35 a 49	4,5 a 7,5
Areias e cascalhos relativamente isentos de argila	Alta	50 a 60	8,5 a 12

Fonte: Tennis *et al.*, (2004).

2.3.1.2 Camada granular

As camadas granulares de base e sub-base de um pavimento permeável, assim como em um pavimento convencional, destinam-se a fornecer suporte estrutural ao pavimento. Em pavimentos de concreto permeável, a camada de revestimento absorve grande parte das tensões aplicadas na superfície e, dessa forma, não há a necessidade da camada de base. Nesse caso, o revestimento pode ser assentado diretamente sobre a sub-base. Além da função estrutural, a camada granular deve ter capacidade de armazenamento e/ou permitir a drenagem da água para o subleito. Devido a essa função de armazenamento, essa camada também é denominada na literatura como estrutura-reservatório (NÚÑEZ *et al.*, [s.d]).

A espessura dessa camada deve ser determinada com base no gerenciamento de águas pluviais e nos requisitos estruturais. De acordo com a ASCE (2015), na maioria dos casos, a profundidade da camada de armazenamento, dimensionada conforme o projeto hidrológico, será mais espessa que a necessária para o carregamento imposto pelo tráfego, todavia, ambos projetos devem ser feitos para definir a estrutura.

Em geral, a espessura da camada granular de pavimentos permeáveis fica entre 150 a 300 mm (TENNIS *et al.*, 2004). De acordo com a ASCE (2015), aplicações de baixo volume de tráfego podem não exigir nenhuma camada de base ou sub-base. Tráfegos mais pesados, normalmente, requerem profundidades de reservatório que variam de 200 mm a 300 mm. Camadas mais espessas, entre 300 mm e 400 mm, são sugeridas em locais com climas muito frios para evitar o acúmulo e o congelamento da água nos espaços vazios da superfície do pavimento.

O material utilizado na camada de reservatório de um pavimento permeável deve ter graduação aberta, diâmetro máximo de 25 mm e volume de vazios entre 20 a 40% (ASCE, 2015). Além disso, para atender aos requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015), deve seguir as especificações apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Especificação para material de base e/ou sub-base

Propriedade	Método	Especificação
Abrasão	ABNT NBR NM 51	< 40%
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45	≥ 32%
Índice Suporte Califórnia (CBR)	ABNT NBR NM 9895	≥ 80%
Material passante na peneira 0,075 mm	ABNT NBR NM 46	≤ 2%

Fonte: NBR 16416 (ABNT, 2015).

Além do agregado natural, recentemente, outros tipos de materiais vêm sendo testados para compor a camada de reservatório, como agregados provenientes de RCC (BATEZINI, 2019; ONO *et al.*, 2017). Além disso, essa camada granular também pode ser tratada com cal, cimento, ou ainda, ser incorporado ligante asfáltico com o objetivo de aumentar a capacidade estrutural (OESER *et al.*, 2009).

2.3.1.3 Revestimento

A NBR 16416 (ABNT, 2015) define que pavimentos permeáveis de concreto podem ser executados na forma de peças, placas ou moldado no local. Nas peças de concreto convencional,

a infiltração da água ocorre através das juntas e áreas vazadas. No caso de revestimentos com concreto permeável, a infiltração da água ocorre através da mistura e, no caso das peças ou placas, também pelas juntas.

A NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece que, independentemente do tipo de revestimento permeável adotado, quando recém construído, deve apresentar coeficiente de condutividade hidráulica maior que 1 mm/s, o que corresponde a 60 l/min escoando em uma área de 1 m², que deve ser verificada pelo método do anel (ASTM C1701, 2017). Além disso, o revestimento deve atender as especificações da Tabela 5 .

Tabela 5. Resistência mecânica e espessura mínima de revestimento permeável

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

Fonte: NBR 16.416 (ABNT, 2015).

Vale destacar que, de acordo com essa norma, tráfego leve é composto, especialmente, por veículos leves com volume diário médio (VDM) de até 400, podendo existir a passagem ocasional de ônibus e caminhões com um VDM de até 20.

De acordo com ACI 522R (2010), em concretos permeáveis moldados no local, deve haver juntas de contração a cada 6 metros de comprimento, com profundidade entre 1/3 e 1/4 da espessura do revestimento. O método mais usual para o corte das placas é com o auxílio de um equipamento conhecido como “cortador de pizza”, uma espécie de rolo com um disco cortante. O procedimento deve ser realizado previamente ao início de pega para evitar a formação de fissuras.

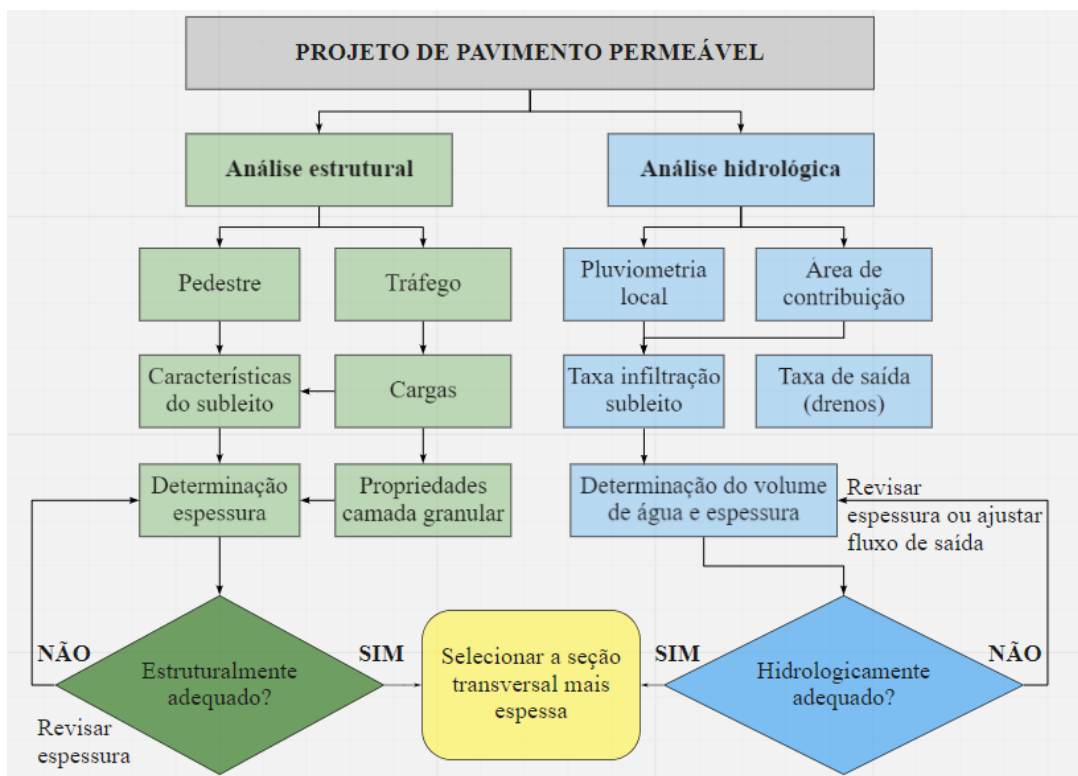
2.3.1.4 Interface entre as camadas

É recomendado o uso de manta geotêxtil entre o reservatório e o subleito (ABNT, 2015). Alguns autores também sugerem o uso de geotêxtil abaixo da camada de revestimento. Esse material permite a passagem de água, mas evita o bombeamento de finos para as camadas superiores, evitando a colmatção. Além disso, alguns estudos mostram que o material contribui na remoção dos poluentes e auxilia na filtragem da água pluvial (SCHOLZ, 2013). Por outro lado, também há pesquisas que relatam a perda da capacidade de infiltração do pavimento devido ao entupimento do geotêxtil (ACIOLI, 2005).

Mantas impermeáveis são utilizadas em sistemas sem infiltração, garantindo a impermeabilização do solo e possibilitando a retenção da água para coleta e/ou reuso. Além de garantir a estanqueidade do reservatório, também podem ter a função de evitar a contaminação do lençol freático e de proteger o subleito em caso de solos com propensão à instabilidade ou perda de resistência em contato com a água (VIRGILIIS, 2009).

2.3.2 Metodologia e critérios de dimensionamento

Figura 7. Árvore de decisão de análise estrutural e hidrológica de pavimento permeável



Fonte: adaptado de ASCE (2015).

Inúmeras variáveis, incluindo o tipo de revestimento, a finalidade de uso, os materiais de pavimentação e as características locais, influenciam no projeto da estrutura do pavimento permeável. O dimensionamento estrutural fornece a espessura necessária para suportar as cargas de tráfego, enquanto o dimensionamento hidrológico determina a espessura do reservatório necessária para armazenar o volume de água captado. O fluxograma ou a árvore de decisão mostrada na Figura 7, adaptado da ASCE (2015), apresenta a análise do processo do projeto estrutural e hidrológico de um pavimento permeável.

2.3.2.1 Análise estrutural

Dentre os revestimentos adotados em estruturas permeáveis no país, destacam-se o uso de blocos de concreto intertravado, asfalto poroso e concreto permeável. Baseado na experiência nacional, projetos estruturais desses pavimentos vêm sendo feitos da mesma forma que os revestimentos convencionais. De acordo com a ASCE (2015), revestimento de concreto permeável é um tipo de pavimento rígido e deve ser projetado da mesma forma. Entre os principais métodos para dimensionamento de pavimento de concreto utilizados no contexto brasileiro, destaca-se a metodologia da *Portland Cement Association* (PCA) de 1984 (DNIT, 2005). Em âmbito internacional, são utilizados os métodos Lockpave, Interpave e AASHTO 1993 (Tennis *et al.*, 2004).

Independentemente do método adotado, na maioria dos casos, os critérios de dimensionamento levam em consideração o tipo de tráfego, a capacidade de suporte do subleito, os módulos e resistências dos materiais. De acordo com Shackel (2010), o ideal é sempre projetar para a pior condição, dessa forma, deve ser considerado o subleito saturado (quando não houver geomembrana) e a camada de sub-base imersa em água, ou seja, pode-se prever uma redução de até 50% no valor do módulo de resiliência dos materiais na condição seca.

Batezini (2013) realizou análises mecanicistas de um pavimento de concreto permeável através do *software* EverFE. O estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso de uma mistura com porosidade de 25% como revestimento para um estacionamento de tráfego de veículos de passeio e comerciais. O critério considerado para a determinação da espessura do revestimento foi o modelo de fadiga desenvolvido pela *Portland Cement Association* (PCA) de 1984. Nesse método, a relação de tensão (RT), obtida pela relação entre tensão atuante na placa e resistência à tração na flexão, deve ser inferior a 0,45 para que o número de passagens do eixo padrão (80 kN) seja ilimitado. O autor observou que, para o tráfego de veículos leves, 11 cm seriam

suficientes para atender a vida de projeto, sem a ocorrência de ruptura por fadiga para o modelo de deterioração considerado. No entanto, o concreto permeável desenvolvido na pesquisa não atende ao critério para o tráfego de veículos pesados para as espessuras analisadas (até 30 cm).

Costa (2019) avaliou o comportamento de uma placa de concreto permeável sujeita à carga de um eixo padrão para diferentes modelos de fadiga. Para análise das espessuras foram considerados o modelo de fadiga da PCA (1984), o modelo obtido através dos ensaios experimentais de Chen *et al.* (2013) e o modelo obtido através do estudo de Zhou *et al.* (2016). A partir dos resultados alcançados, foi possível observar que as espessuras obtidas através dos modelos de Chen *et al.* (2013) e Zhou *et al.* (2016) foram semelhantes. Por outro lado, os valores a partir do modelo da ACPA (2010) foram até 32% menores que os demais, obtendo espessuras entre 20,3 cm (vias locais) e 25,4 cm (vias coletoras) para um concreto com 25% de porosidade.

2.3.2.2 Análise hidrológica

O projeto hidrológico de um pavimento permeável deve considerar a condutividade hidráulica dos materiais e a capacidade de armazenamento de água na estrutura. O excesso de escoamento superficial causado por valores excessivamente baixos de condutividade hidráulica, ou devido à capacidade de retenção inadequada, deve ser evitado (TENNIS *et al.*, 2014). O volume total de armazenamento do sistema é a relação entre o volume de água captado e a quantidade que sai por infiltração no solo subjacente ou por drenos (ASCE, 2015).

Acioli (2005) construiu um módulo experimental de aproximadamente 264 m², dividido em duas partes, uma com revestimento de asfalto poroso e a outra com blocos vazados de concreto. A estrutura foi dimensionada por critérios hidráulicos, através do método da curva envelope (SILVEIRA; GOLDENFUM, 2007), e devido à baixa condutividade hidráulica do solo foi utilizado um sistema de infiltração parcial. A altura dimensionada para o reservatório foi de 15,1 cm que, considerando a declividade longitudinal de 1%, foi adotada a espessura média de 25 cm para o reservatório. Por dimensionamento mecânico, essa espessura mostrou-se suficiente para suportar as solicitações impostas pelo tráfego. Os dados de armazenamento coletados mostraram que em nenhum evento observado, esse volume superou em 25% da capacidade máxima do reservatório. Com base nesses dados, a autora afirmou que a metodologia utilizada superdimensionou a espessura do reservatório.

Virgiliis (2009) também utilizou a espessura da camada granular obtida através do dimensionamento hidráulico. O cálculo foi feito determinando a altura total precipitada, correspondente ao tempo de duração de 1 hora e período de retorno de 2 anos, dividida pela porosidade do reservatório, resultando em uma altura de 35 cm. Pelo dimensionamento estrutural, a altura necessária para atender o para um tráfego leve ($N = 10^5$) foi de 19 cm para revestimento em blocos de concreto ($f_{ck} \geq 25$ MPa) e de 10 cm para concreto asfáltico poroso, ambas as espessuras inferiores à obtida no dimensionamento hidráulico.

Ono *et al.* (2017) dimensionaram um pavimento permeável apenas por critérios hidrológicos. Foi utilizado um revestimento de blocos de concreto articulados, que são blocos interconectados por meio de encaixes, dispensando o uso de material de rejunte, o que aumenta a condutividade hidráulica do revestimento. Buscando avaliar o desempenho do material, foi construída uma pista experimental. O cálculo da espessura da camada da base seguiu o método da NBR 16416 (ABNT, 2015), com sistema sem infiltração, utilizando membrana (e, portanto, coeficiente de condutividade hidráulica do solo nulo) e camada de base com 40% de porosidade, chegando a uma altura mínima de 15 cm. O pavimento foi projetado para duas seções distintas, uma com base composta por agregados reciclado e a outra com agregados virgens, assim, definiu-se por uma camada de base com espessura de 30 cm para ambas as situações, em um cenário a favor da segurança.

2.3.2.3 Software *PerviousPave*

O *PerviousPave* foi desenvolvido pela *American Concrete Pavement Association* (ACPA), especificamente para o dimensionamento de pavimentos permeáveis, o qual depende de uma licença comercial para a utilização. Através desse *software*, a estrutura é projetada para atender, simultaneamente, aos requisitos estruturais e de gerenciamento das águas pluviais, de acordo com os seguintes critérios:

- (i) espessura do revestimento com base no tráfego, vida útil do projeto e outras entradas estruturais;
- (ii) espessura necessária da sub-base/reservatório de acordo com o volume de água a ser processado pelo pavimento dentro do tempo máximo de detenção.

Como critérios de entrada, devem ser inseridas propriedades estruturais e as características hidrológicas do local de implantação. Quanto às características dos materiais, devem ser

adicionados o módulo resiliente do subleito, o módulo de elasticidade e a resistência à tração do concreto permeável. Em relação aos critérios hidráulicos, é necessário informar a área permeável, área de contribuição, porosidade das camadas e características pluviométricas da região. Além disso, deve ser definida a vida útil do pavimento e o tipo de tráfego. Para isso, o *software* propõe espectros de carga para quatro tipos de tráfego (residencial, coletor, arterial e acostamentos de vias arteriais), que são aplicações típicas do concreto permeável.

O *PerviousPave* assume que a fadiga seja o único critério de falha para o projeto estrutural. Como não há um modelo de fadiga específico para concreto permeável difundido na literatura, é utilizado o da PCA (1984), modelado para concretos convencionais. A espessura de revestimento determinada na etapa estrutural é mantida constante durante o dimensionamento hidrológico e, para garantir que os requisitos de gerenciamento das águas pluviais sejam atendidos, há o aumento da espessura da camada do reservatório estimada, ou se adiciona mais uma camada. Outra limitação do programa é dimensionar a camada granular apenas por critérios hidráulicos (ACPA, [s.d.]).

3 ESTUDOS LABORATORIAIS PRELIMINARES

Neste capítulo, inicialmente, é apresentado o planejamento experimental. Na sequência, nos itens 3.2 e 3.3, são apresentados os materiais e métodos de ensaios realizados nessa etapa da pesquisa. Ainda, nos itens 3.4 e 3.5, são descritos o método de dosagem e os procedimentos de produção do concreto adotados.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Buscando atingir os objetivos propostos, foi desenvolvido um planejamento experimental para avaliar as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas das misturas. Dessa forma, foram definidas as seguintes variáveis de resposta:

- porosidade (P);
- densidade no estado endurecido (D);
- taxa de infiltração (I);
- condutividade hidráulica (k);
- resistência à compressão uniaxial (RCS);
- resistência à tração na flexão (RTF);
- módulo elástico flexural (Mf);
- módulo elástico à compressão (E);
- coeficiente de *Poisson* (ν);
- abrasão superficial (A).

A etapa laboratorial dividiu-se em duas fases. A primeira destinou-se a avaliar o efeito da substituição de diferentes teores do agregado reciclado em relação aos resultados obtidos para o traço de referência, composto apenas por agregados naturais. Numa etapa posterior, verificou-se a influência da incorporação de aditivo e da redução da relação água/cimento nas variáveis de resposta. Nesse contexto, foram definidas como variáveis independentes:

- teores de substituição de agregado natural: a substituição dos agregados naturais por agregados de concreto variou entre 0% a 100%, onde os níveis de substituição em volume foram: 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%;
- tempo de cura: os ensaios físicos e hidráulicos ocorreram após 25 dias de cura. Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram realizados nas idades de 7 e 28 dias. Todos os demais ensaios mecânicos e o de abrasão superficial ocorreram após 28 dias de cura.
- relação aditivo/cimento: foi testado o efeito da incorporação de aditivo nas relações de 0,06 e 0,08;
- relação a/c: foram utilizadas as relações de 0,3 e 0,26.

Na Tabela 6 está apresentada a composição das misturas ensaiadas na primeira etapa laboratorial da pesquisa.

Tabela 6. Resumo das misturas estudadas

Traço	Agregado natural (%)	Agregado reciclado (%)	Relação aditivo/cimento	Relação água/cimento
1	100	-	-	0,30
2	80	20	-	0,30
3	60	40	-	0,30
4	40	60	-	0,30
5	20	80	-	0,30
6	-	100	-	0,30
7	100	-	0,06	0,26
8	100	-	0,06	0,30
9	100	-	0,08	0,30

Em cada concretagem, foram produzidos 9 corpos de prova cilíndricos, 3 vigotas e 1 prismático, conforme detalhado na Tabela 7.

A análise dos resultados foi feita por análise de variância (ANOVA). Quando houve diferença significativa (valor- $P < 0,05$), realizou-se a comparação múltipla de *Dunnnett*, teste que compara a média obtida para cada mistura estudada com o traço referência. Destaca-se que o traço que serviu como referência para a avaliação da influência dos diferentes teores de substituição pelo agregado reciclado, foi o traço com 100% de agregado natural. Posteriormente, para a avaliação

da influência do aditivo e da redução da relação a/c, a referência foi a amostra com 100% de agregados reciclados sem aditivo.

Tabela 7. Quantidade de corpos de prova por traço

Ensaio	Idade de cura (dias)	Amostras (unid.)	Molde (mm)
Taxa de infiltração	25	3*	Cilíndrico (100 x 200)
Condutividade hidráulica	25	3*	Cilíndrico (100 x 200)
Resistência à compressão uniaxial	7	3	Cilíndrico (100 x 200)
Resistência à tração na flexão e módulo elástico flexural	28	3	Vigota (100 x 100 x 400)
Módulo elasticidade e coeficiente de <i>Poisson</i>	28	3	Cilíndrico (100 x 200)
Abrasão superficial	28	1	Prismático (100 x 100 x 400)

* Reaproveitados nos ensaios mecânicos

3.2 MATERIAIS

Nesse item são apresentados os materiais utilizados nessa fase da pesquisa: o agregado natural, o agregado de concreto reciclado, o cimento de alta resistência inicial e o aditivo modificador de reologia.

3.2.1 Agregados

3.2.1.1 Natural

O agregado natural utilizado na pesquisa é de origem basáltica, comercialmente conhecido como pedrisco ou brita 0. Optou-se por usar uma composição granulométrica disponível na maioria das pedreiras do Brasil, uma vez que uso de faixas granulométricas especiais tende a dificultar e onerar a produção do concreto permeável. O material utilizado foi lavado para a retirada de impurezas e de material pulverulento e seco ao ar.

3.2.1.2 Reciclado

Foi utilizado o agregado reciclado de concreto (ARC), também conhecido como RCC cinza. O material foi obtido pela fragmentação de corpos de prova que seriam descartados após ensaios

de resistência. O resíduo foi coletado em uma obra de infraestrutura de Porto Alegre, na qual utilizou-se concreto com resistências de projeto entre 20 e 60 MPa.

O material foi triturado utilizando um britador de mandíbula com abertura de, aproximadamente, 19 mm. Após a britagem, o material passou por um peneirador mecânico, onde foi retirada a fração fina, com dimensão inferior a 2,4 mm. O procedimento de britagem pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8. Beneficiamento do agregado reciclado de concreto: (a) aspecto geral do britador; (b) britador de mandíbula parte externa; (c) britador de mandíbula parte interna e (d) coleta do material após passar pelo peneirador



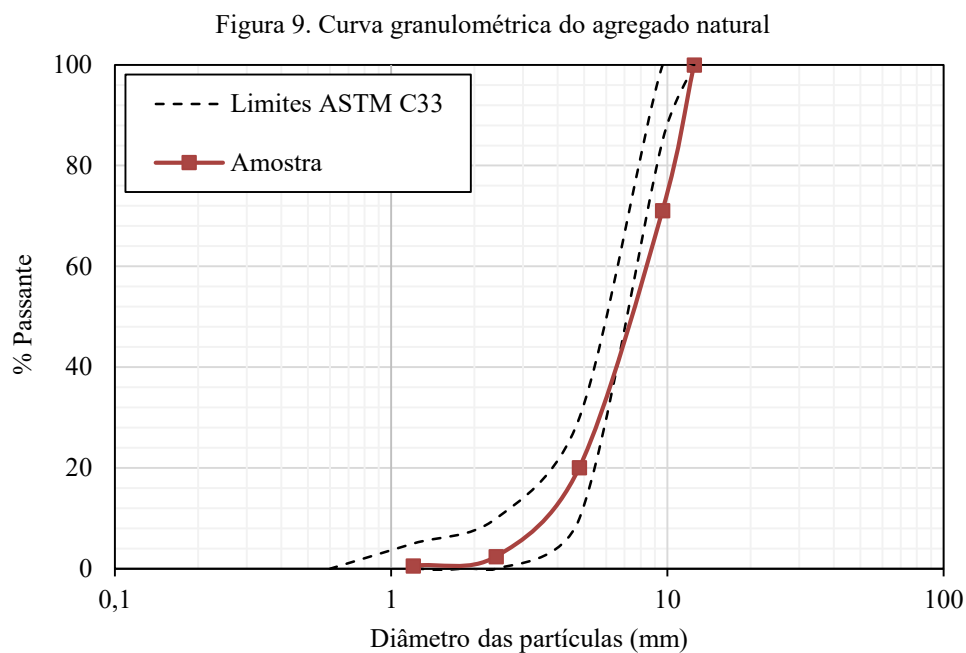
3.2.1.3 Caracterização dos agregados

A seguir, são apresentados os ensaios de caracterização dos agregados em estudo.

3.2.1.3.1 Composição granulométrica

A determinação da distribuição granulométrica do agregado natural foi feita de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), utilizando as peneiras da série normal.

A Figura 9 apresenta a curva granulométrica do material, bem como os limites da faixa 8 da ASTM C33 (2016), uma das faixas típicas para concreto permeável de acordo com a ACI 522R (2010).



Conforme pode ser verificado na Figura 9, o material possui curva granulométrica uniforme, com diâmetro máximo de 12,5 mm. A fração menor que 2,4 mm, que corresponde a 2,16%, foi retirada por peneiramento.

Como uma forma de manter a distribuição granulométrica constante, a substituição do agregado natural pelo reciclado foi feita nas mesmas proporções das peneiras. Dessa forma, o ARC foi peneirado nas peneiras da série normal da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e novamente misturado de acordo com as frações da curva granulométrica obtida para o agregado natural.

Dessa forma, o material a ser substituído era dosado de acordo com a Tabela 8. A Figura 10 mostra as três frações de material utilizadas na misturas.

Tabela 8. Frações granulométricas utilizadas na dosagem

Peneira (mm)	9,6	4,8	2,4
Retido (%)	29	51	20

Figura 10. Agregados retidos nas peneiras 9,6 mm, 4,8 mm e 2,4 mm



3.2.1.3.2 Massa específica

A determinação da massa específica (ρ) foi realizada de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009). A massa específica, que exclui os vazios permeáveis e os vazios entre os grãos, é utilizada na dosagem do concreto permeável. Os resultados dos ensaios de massa específica dos agregados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Valores de massa específica dos agregados em estudo

Agregado	ρ (kg/dm ³)
Natural	2,90
Concreto reciclado	2,62

3.2.1.3.3 Absorção

Em agregados naturais, geralmente, a taxa de absorção é baixa e sua influência nas misturas de concreto pode ser desconsiderada. No entanto, em agregados reciclados, a absorção é maior e merece atenção especial.

Leite (2001) sugere adicionar na mistura uma parte da água correspondente a absorção dos agregados reciclados. De acordo com a autora, compensar apenas parte dessa absorção é suficiente para não deixar a mistura muito fluída. Além disso, segundo a autora, a taxa de absorção do agregado diminui quando todos os materiais são misturados na betoneira, devido

ao revestimento do agregado com a pasta de cimento, o que contribui para impedir a absorção total.

Dessa forma, nesse trabalho optou-se por compensar a absorção referente à fração de agregados graúdos, que corresponde a 80% do total de agregados na mistura. Dessa forma, o ensaio de absorção foi realizado na fração graúda ($> 4,75$ mm), seguindo a NBR NM 53 (2009). A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos no ensaio.

O teor correspondente a absorção foi adicionada ao total de água referente a relação a/c adotada. Outro cuidado foi de pré-umedecer os agregados antes de adicionar o restante dos materiais na betoneira.

Tabela 10. Valores de taxa de absorção dos agregados em estudo

Agregado	Absorção (%)
Natural	0,29
Concreto reciclado	4,32

3.2.1.3.4 Abrasão Los Angeles

O ensaio de Abrasão Los Angeles foi realizado seguindo a NBR NM 51 (ABNT, 2001). O ensaio determina a resistência ao desgaste por choque e atrito das partículas, apresentando um indicativo da qualidade e durabilidade do agregado.

Conforme pode ser verificado na Figura 11 e, de acordo com os resultados apresentados na

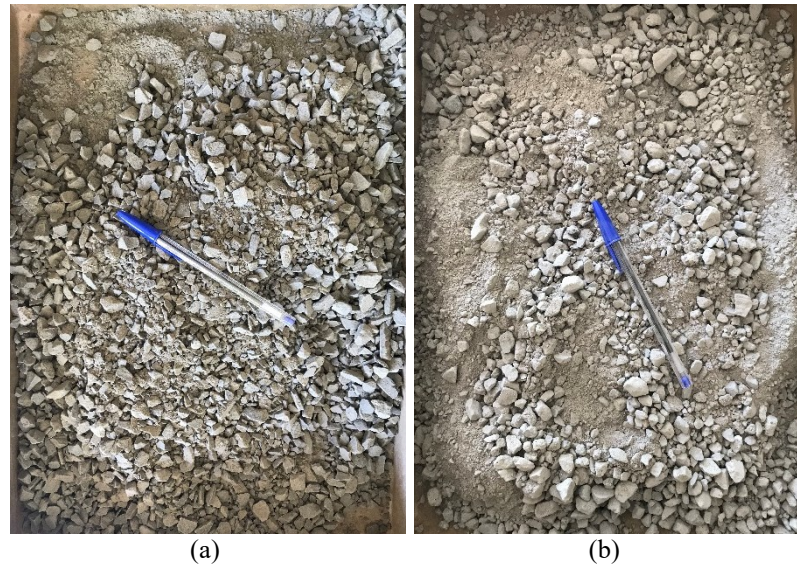
, o agregado reciclado apresenta menor resistência ao impacto e ao desgaste por abrasão que o agregado natural.

A NBR 7211 (ABNT, 2009) considera adequado o uso em concretos de agregados que apresentem índices de abrasão inferiores a 50% em massa. Nesse caso, o resultado para os agregados em estudo satisfaz o prescrito na norma.

Tabela 11. Valores de abrasão Los Angeles dos agregados em estudo

Agregado	LA (%)
Natural	17
Reciclado de concreto	42

Figura 11. Aspecto dos materiais após ensaio de abrasão Los Angeles: (a) agregado natural e (b) agregado de concreto



3.2.1.3.5 Índice de forma

A forma das partículas influi na trabalhabilidade, na suscetibilidade a quebras e na energia de compactação aplicada na moldagem. Em geral, partículas mais arredondadas melhoram a trabalhabilidade da mistura, enquanto agregados com formas mais angulares tendem a apresentar um melhor intertravamento quando compactados.

O ensaio foi realizado seguindo os procedimentos da DNER ME 086 (1994), com a configuração do ensaio mostrada na Figura 12. O índice de forma (f) varia de 1 (ótima cubicidade) a 0 (lamelar).

Figura 12. Caixa metálica para ensaio de índice de forma



Na Figura 13 pode ser observado o aspecto dos agregados natural (esquerda) e reciclado (direita). Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 12.

Figura 13. Aspecto dos agregados natural e reciclado



Tabela 12. Valores de índice de forma dos agregados em estudo

Agregado	f
Natural	0,76
Reciclado de concreto	0,80

3.2.2 Cimento

Foi utilizado o cimento de alta resistência inicial CP V-ARI MAX, cujas características estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13. Características do CP V-ARI MAX

Ensaio	Unid.	Valor	Exigência	Norma
Resíduo insolúvel (RI)	%	0,98	$\leq 3,5$	NBR NM 15
Perda ao fogo (PF)	%	3	$\leq 6,5$	NBR NM 18
Área específica (Blaine)	cm ² /g	4,445	NA	NBR 16372
Massa específica	cm ² /g	3,07	NA	NBR 16605
Início de pega	min	155	≥ 60	NBR 16607
Fim de pega	min	216	≤ 600	NBR 16607
Expansibilidade à quente	mm	0	≤ 5	NBR 11582
		29,7 (1 dia)	≥ 14	
		40,0 (3 dias)	≥ 24	
Resistência à compressão	MPa	46,8 (7 dias)	≥ 34	NBR 7215
		53,4 (28 dias)	NA	

Fonte: Cimento Nacional (2019)

O aglomerante atende às especificações da NBR 16697 (ABNT, 2020). Além disso, atinge elevada resistência já nos primeiros dias de cura, característica importante para cimentos aplicados na pavimentação, pois permite a rápida liberação ao tráfego.

3.2.3 Aditivo

Foi utilizado o V-MAR VSC 500. Esse aditivo é produzido especificamente para concreto permeável, visando melhorar a reologia da pasta e controlar a hidratação de materiais cimentícios. O uso recomendado pelo fabricante é de 455 ml a 980 ml a cada 100 kg de materiais cimentícios (GCP APPLIED TECHNOLOGIES, 2020).

3.3 MÉTODOS DE ENSAIOS

As misturas em estudo foram avaliadas através de ensaios físicos (porosidade e densidade), de parâmetros hidráulicos (taxa de infiltração e condutividade hidráulica), de propriedades mecânicas e de durabilidade (resistência à compressão e à flexão, módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson* e abrasão superficial). A seguir, serão apresentados os métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa

3.3.1 Porosidade e densidade

A porosidade e a densidade no estado endurecido foram determinadas seguindo a ASTM C1754 (2012) aos 25 dias de cura. Previamente ao ensaio, os corpos de prova foram secos em estufa a 38 ± 3 °C até a constância de massa, conforme procedimento estabelecido pela norma no caso de as amostras serem reaproveitadas para ensaios mecânicos.

A porosidade e a densidade de cada amostra foram calculadas utilizando as equações 1 e 2, respectivamente.

$$P (\%) = \left[1 - \frac{4 \cdot (W_1 - W_2)}{\rho_w \cdot \pi \cdot \varnothing^2 \cdot L_s} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

$$D (\text{kg/m}^3) = \frac{4 \cdot W_1}{\pi \cdot \varnothing^2 \cdot L_s} \quad (2)$$

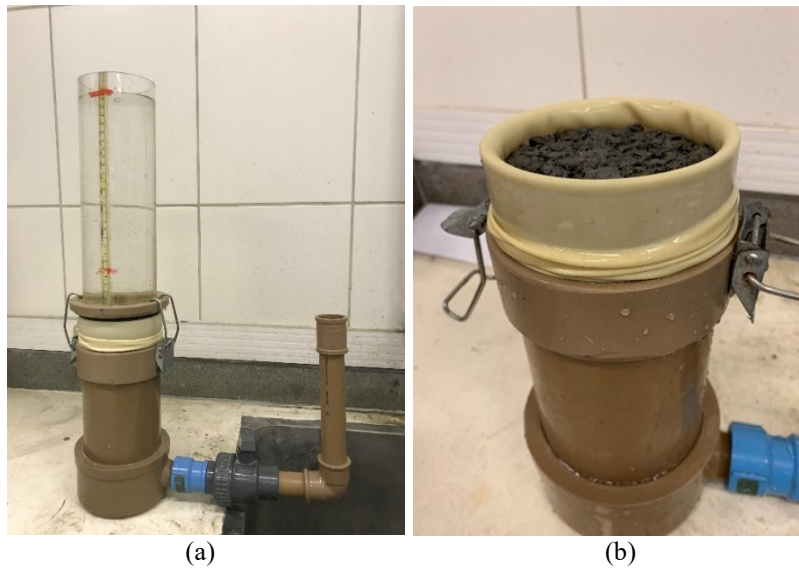
Nessas equações W_1 representa o peso seco em kg, W_2 é o peso da amostra submersa em água em kg, ϕ é o diâmetro da amostra em m, L_s representa a altura da amostra em m e ρ_w é a densidade da água a 25°C em kg/m³

3.3.2 Condutividade hidráulica

Seguindo as recomendações da ACI 522R (2010), a condutividade hidráulica foi determinada utilizando um permeâmetro de carga variável. O ensaio foi realizado seguindo a NBR 14545 (ABNT, 2000).

Para evitar que a água percolasse para as laterais, as amostras foram envolvidas por uma membrana, criando um fluxo unidirecional. Esse ensaio era realizado aos 25 dias de cura e, para cada traço, o procedimento foi realizado em três corpos de prova diferentes. A configuração do ensaio pode ser vista na Figura 14.

Figura 14. Ensaio de condutividade hidráulica: (a) permeâmetro; (b) posicionamento do corpo de prova com a membrana



Os valores de condutividade hidráulica (k) das amostras foram estimadas usando a Lei de Darcy, conforme a equação 3.

$$k \text{ (mm/s)} = \frac{\phi_1^2 \cdot L}{\phi_2^2 \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3)$$

Onde ϕ_1 é o diâmetro do tubo em mm, ϕ_2 é o diâmetro da amostra em mm, L é o comprimento da amostra em mm, h_1 é a distância da superfície da amostra e o nível inicial de

água, h_2 é a distância entre a superfície da amostra e o nível final de água e Δt é o tempo para a água chegar de h_1 a h_2 em s

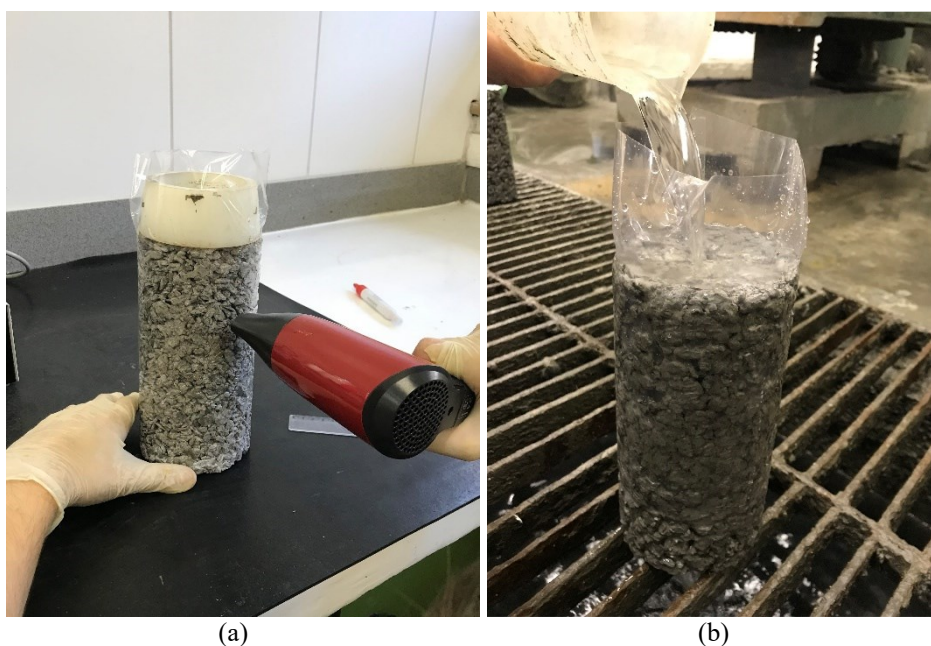
3.3.3 Taxa de infiltração

Para a determinação da taxa de infiltração, foi feita uma adaptação do procedimento de ensaio da ASTM C1701 (2017), que utiliza um anel padronizado de 300 ± 100 mm de diâmetro. Para a realização do ensaio conforme prevê a norma, seriam necessárias placas com arestas de, pelo menos, 350 mm, para permitir a acomodação do anel. Nesse estudo, visando a economia de material, optou-se por utilizar corpos de prova cilíndricos que, posteriormente, poderiam ser reaproveitados para os ensaios mecânicos.

Dessa forma, a quantidade de água foi adaptada para o diâmetro de 100 mm, dimensão do corpo de prova. A norma determina que, inicialmente, seja feita a pré-molhagem da amostra que, nesse caso, foi realizada com 1,2 kg de água. Como o tempo decorrido nessa etapa foi superior aos 30 s para todas as amostras, utilizou-se 1,2 kg de água. Caso esse tempo tivesse sido inferior aos 30 s, os ensaios teriam sido feitos com 6,0 kg de água.

O procedimento de ensaio é mostrado na Figura 15. Como pode ser visto, os corpos de prova foram envolvidos por um plástico termo ativado para evitar que a água percolasse pelas laterais.

Figura 15. Ensaio de taxa de infiltração: (a) preparação dos corpos de prova e (b) realização do ensaio



Para cada traço, o teste foi repetido em três amostras diferentes. A taxa de infiltração (I) foi obtida pela equação 4.

$$I \text{ (mm/h)} = \frac{K \cdot m}{D^2 \cdot t} \quad (4)$$

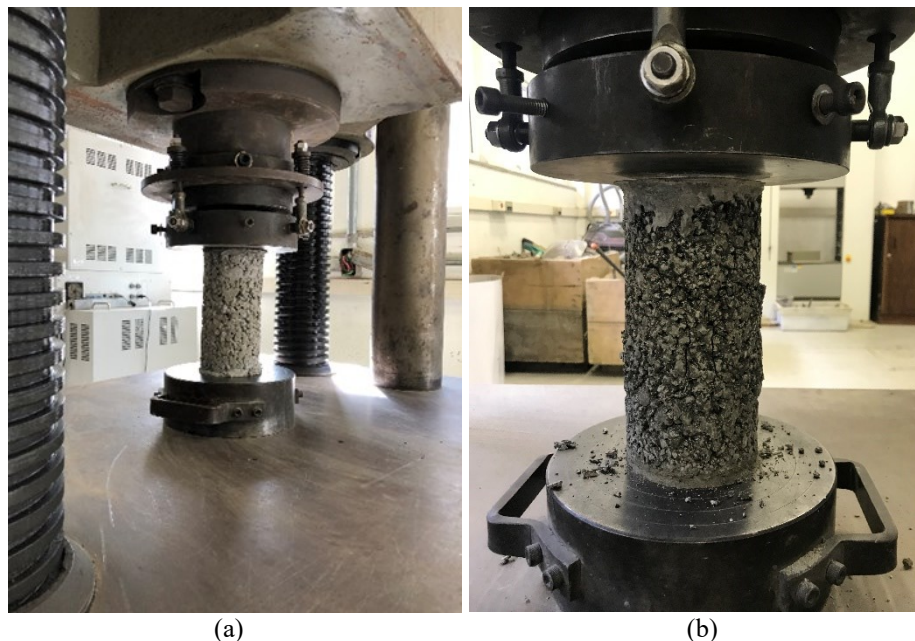
Onde m é a massa de água utilizada no ensaio em kg; D é o diâmetro da área de infiltração em mm, t é o tempo para a água infiltrar em s, e K é o valor para a conversão dos dados medidos, igual a 4583666000

3.3.4 Resistência à compressão uniaxial

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram realizados seguindo a NBR 5739 (ABNT, 2018). A prensa era operada com uma força axial de 0,45 MPa/s até a ruptura do corpo de prova e a resistência à compressão foi calculada dividindo-se a carga máxima aplicada pela seção transversal da amostra, considerando-se a média de três leituras obtidas com o auxílio de um paquímetro.

Os ensaios foram realizados em amostras cilíndricas com dimensões de 100 mm x 200 mm (diâmetro x altura) após 7 e 28 dias de cura. A configuração do ensaio pode ser vista na Figura 16.

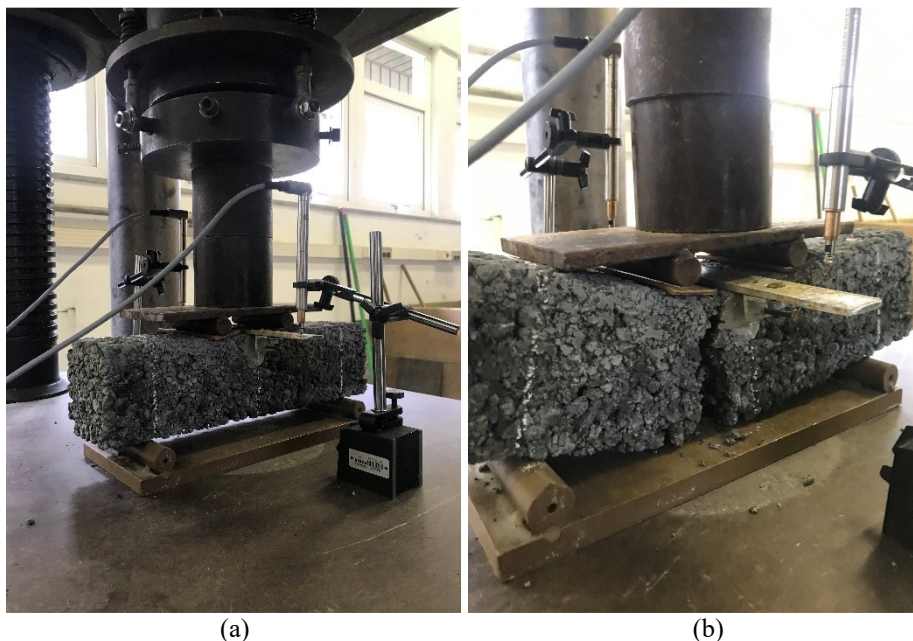
Figura 16. Ensaio de resistência à compressão uniaxial: (a) início do ensaio e (b) após a ruptura do corpo de prova



3.3.5 Resistência à tração na flexão

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), a resistência de tração na flexão é o principal parâmetro de resistência para concreto permeável moldado *in loco*. A mesma norma determina que o ensaio seja realizado em corpos de prova com dimensões 100 x 100 x 400 mm (altura x espessura x comprimento) seguindo a NBR 12142 (ABNT, 2010). A configuração do ensaio é apresentada na Figura 17.

Figura 17. Ensaio de resistência à tração na flexão: (a) início do ensaio e (b) após a ruptura do corpo de prova



De acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2010), a força deve ser continuamente aplicada a uma taxa constante de 1 MPa/min até a ruptura do corpo de prova. Adaptando-se esse carregamento para a geometria das amostras, resultou em uma taxa de 3,33 kN/min. Os ensaios ocorreram após 28 dias de cura.

3.3.5.1 Tensão de tração

A tensão de tração gerada por cada carga aplicada ao longo do ensaio é determinada pela equação 5, válida quando a ruptura acontece no terço médio da viga. A resistência à tração na flexão é o máximo valor obtido.

$$\sigma_t = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (5)$$

Onde σ_t é a tensão a tração na flexão em MPa, F é a carga de ruptura em N, l é a distância entre os apoios em mm, b e h são a largura e altura da amostra em mm.

Caso a ruptura ocorra fora do terço médio, com uma distância inferior a 5% de l, a equação 5 deve ser substituída pela equação 6, sendo "a" a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo.

$$\sigma_t = \frac{F \cdot a}{b \cdot h^2} \quad (6)$$

3.3.5.2 Deformação de tração

A equação 7 é usada para estimar as deformações da fibra inferior da viga, associadas aos estados de tensões σ_t , a partir do deslocamento no meio da viga registrado pelos LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*).

$$\varepsilon_t = \frac{108 \cdot f \cdot h}{23 \cdot l^2} \quad (7)$$

Onde ε_t é a deformação de tração, f é a flecha no meio do vão em mm, h é a altura do corpo de prova em mm e l é a dimensão do vão em mm

3.3.5.3 Módulo Estático Flexural

O módulo elástico flexural (Mf) pode ser estimado a partir das curvas tensão-deformação. Para esse fim, calcula-se a variação da tensão ($\Delta\sigma_t$) pela variação da deformação específica na zona linear do diagrama ($\Delta\varepsilon_t$), conforme a equação 8. Foram utilizados os valores obtidos no trecho correspondente a 30% e 60% da carga última, conforme indicado por Graeff (2011).

$$Mf = \frac{\Delta\sigma_t}{\Delta\varepsilon_t} \quad (8)$$

3.3.6 Módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*

Os ensaios para a determinação de módulo de elasticidade à compressão seguiram a Metodologia A da NBR 8522 (ABNT, 2017). Concomitantemente a cada ensaio, foi obtido o coeficiente de *Poisson*, que corresponde à relação entre a deformação transversal e a longitudinal ao sentido de aplicação da carga.

Os carregamentos e descarregamentos ocorreram a uma taxa de 0,45 MPa/s. Seguindo a NBR 8522 (ABNT, 2017), as amostras foram carregadas até 30% da média de valores obtida no ensaio de resistência à compressão para cada traço. Após o término das leituras de deformação, cada corpo de prova ensaiado foi carregado com a mesma taxa de velocidade até a sua ruptura. Caso a resistência à compressão atingida diferisse do valor médio considerado, o resultado dessa amostra deveria ser descartado.

Os ensaios foram realizados aos 28 dias de cura em amostras cilíndricas com dimensões de 100 mm x 200 mm (diâmetro x altura). A configuração do ensaio pode ser vista na Figura 18.

Figura 18. Ensaio de módulo de elasticidade estático e coeficiente de *Poisson*



3.3.7 Abrasão superficial

Os ensaios de abrasão avaliam a resistência do concreto a vários tipos de ações abrasivas que, em geral, ocorrem pela ação das rodas dos veículos e por partículas suspensas na água

(CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016). Nessa pesquisa, foi realizado o ensaio de abrasão superficial, seguindo o procedimento da norma ASTM C944 (1999).

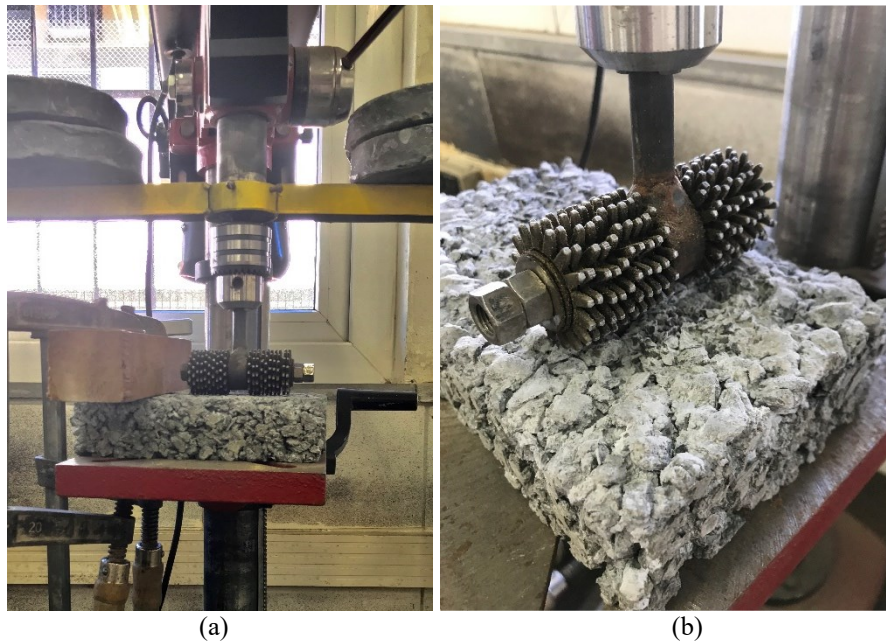
O método consiste em determinar a resistência à abrasão utilizando um cilindro cortante rotativo. O dispositivo foi configurado para girar com uma frequência de 200 rpm, exercendo uma força constante de 198 N, durante 2 minutos em três áreas diferentes da superfície. A abrasão foi calculada pela diferença entre os pesos inicial e após cada ciclo, conforme equação 9.

$$A (\%) = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100 \quad (9)$$

Onde P_i e P_f são os pesos inicial e final da amostra

A norma não define dimensões do corpo de prova. Nessa pesquisa, foram utilizadas amostras prismáticas de 200 mm x 120 mm x 45 mm (comprimento x largura x espessura) para facilitar o acomodamento no aparelho. A Figura 19 apresenta o procedimento de ensaio.

Figura 19. Ensaio de resistência à abrasão superficial: (a) realização do ensaio e (b) detalhe cilindro cortante rotativo



3.4 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM E PRODUÇÃO

Nesse item, inicialmente, são apresentados o método de dosagem e os resultados dos ensaios para o ajuste do traço referência. Na sequência, são apresentados os procedimentos de produção, compactação e capeamento dos corpos de prova.

3.4.1 Método de dosagem

Seguindo as recomendações da ACI 522R (2010), a produção do concreto permeável foi baseada na teoria do volume absoluto. Para tal, foi adaptada a fórmula utilizada para a dosagem do concreto convencional através do método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). Nesse caso, V_p representa a porosidade total da mistura, conforme a equação 10. Esse método foi escolhido pois, através dele, é possível obter o valor de densidade teórica da mistura, que é usada como uma variável de controle para a moldagem.

$$C_c = \frac{1000 - V_p}{1/\gamma_c + b/\gamma_b + a/c} \quad (10)$$

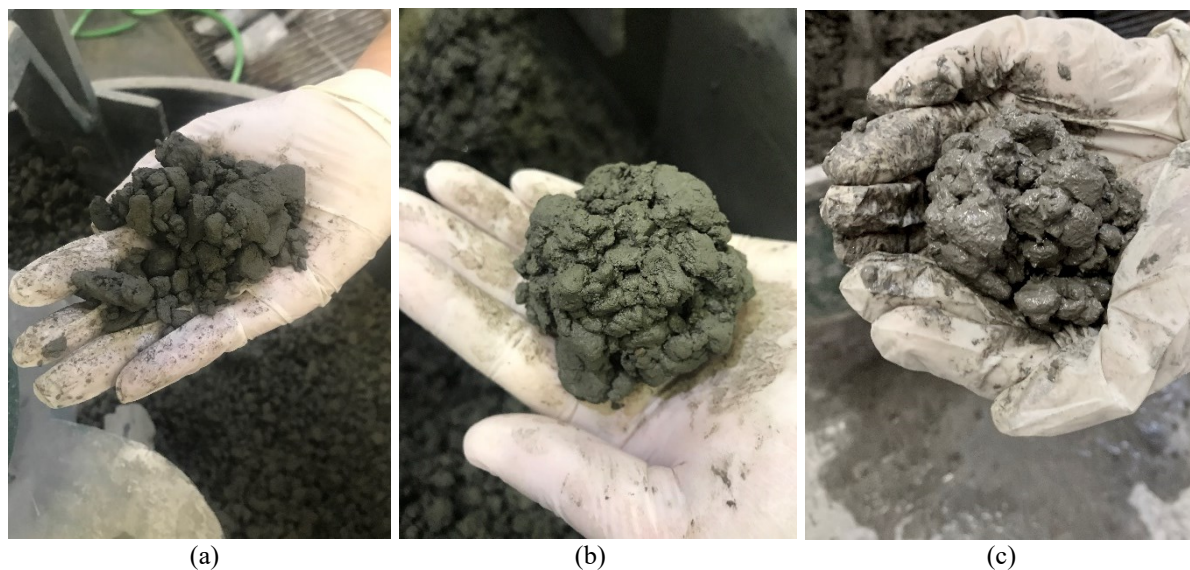
Onde C_c é o consumo de cimento em kg/m^3 de concreto, V_p é o volume de poros da mistura em dm^3/m^3 , γ_c é a massa específica do cimento em g/m^3 , b é a proporção de agregados, γ_b é a massa específica do agregado em g/m^3 e a/c é a relação água/cimento

3.4.2 Ajuste do traço referência

A definição de composição do concreto permeável foi realizada através de uma série de tentativas com o objetivo de alcançar o equilíbrio entre vazios, resistência mecânica, conteúdo de pasta e condutividade hidráulica. Além disso, objetivou-se cumprir aos requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015), de resistência à compressão característica superior a 20 MPa para a fabricação de peças de concreto permeável e resistência à tração na flexão maior que 2 MPa para concretos moldado no local.

Dessa forma, com base na revisão bibliográfica e em pesquisas desenvolvidas anteriormente no LEME, como ponto de partida, foi escolhido o traço 1:4 (cimento: agregados) em volume e 20% de porosidade. A quantidade de água foi ajustada para cada mistura em função da análise tátil-visual das misturas, conforme mostrado na Figura 20, chegando-se a uma relação ideal de 0,3.

Figura 20. Ajuste da consistência do concreto permeável: (a) seca, (b) ideal e (c) fluída



Também foram avaliados traços auxiliares com maior consumo de cimento: 1:2,3 e 1:3. Na Tabela 14 podem ser observadas as proporções de materiais para os três traços. Todos foram feitos com 100% de agregado natural e moldados com um compactador manual metálico com peso de 4,5 kg e altura de queda de, aproximadamente, 45 cm, em três camadas, aplicando-se 20 golpes por camada.

Tabela 14. Traços avaliados no estudo

Traço	Proporção			Cc (kg/m ³)	Consumo agregado (kg/m ³)	Relação pasta/agregado
	Cimento	Agregado	a/c			
1:4	1	4	0,3	400	1602	0,25
1:3	1	3	0,3	484	1452	0,33
1:2,3	1	2,3	0,3	567	1304	0,43

A Tabela 15 apresenta as médias e desvios-padrão (Sd) obtidos para os traços em estudo. A partir dos resultados apresentados, foi possível perceber que a porosidade ficou abaixo da projetada para todos os casos. Mesmo assim, o traço 1:4 não alcançou a resistência à compressão mínima exigida pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Tendo em vista que com o aumento da porosidade e da substituição do agregado natural pelo reciclado, há uma tendência de redução da resistência mecânica, optou-se pelo traço de 1:3.

Tabela 15. Resultados obtidos

Traço		P (%)	k (mm/s)	I (mm/s)	RC (MPa)	RTF (MPa)
1:4	Média	18,33	14,31	5,22	17,32	2,46
	Sd	1,60	8,15	1,77	3,47	0,34
1:3	Média	11,27	11,10	1,06	35,46	2,97
	Sd	0,69	2,92	0,30	2,07	0,34
1:2,3	Média	11,39	4,2	1,43	40,60	3,54
	Sd	0,53	2,38	0,02	3,13	0,39

3.4.3 Definição do método de compactação

De acordo com Costa (2019), a compactação dinâmica com golpes de um soquete é a mais indicada para o estudo laboratorial pois, com esse método, é possível ter um maior controle da densidade e, assim, gerar resultados com um menor desvio padrão. No entanto, de acordo com Chandrappa e Biligiri (2016), a compactação dinâmica causa uma distribuição heterogênea de porosidade vertical no concreto permeável. De acordo com os autores, o aumento no número de camadas de compactação favorece a distribuição da energia e pode reduzir a diferença de porosidade ao longo da profundidade.

Diante dessas considerações iniciais, optou-se por compactar as amostras com um soquete metálico de 4,5 kg, em três camadas com 20 golpes cada. Esse método, no entanto, gerou resultados de porosidade menores que os projetados, conforme pode ser verificado na Tabela 15, por isso, teve que ser ajustado.

Alternativamente, foi usada a metodologia ASTM *Subcommittee* C09.49, que sugere a compactação em duas camadas, com a aplicação de 20 golpes em cada. No entanto, através desse método, não foi possível atingir a densidade teórica, obtendo-se valores de porosidade superiores ao projetado. Conforme pode ser observado na Figura 21, também ficou evidente o gradiente de porosidade com a profundidade, ficando a parte superior menos compactada que a inferior.

Concluída a etapa exploratória, optou-se por compactar as amostras em três etapas, variando-se o número de golpes por camada, de forma que cada uma alcançasse 1/3 da altura do corpo de prova. A interface entre as camadas foi escarificada, criando ranhuras com o objetivo de aumentar a aderência entre elas.

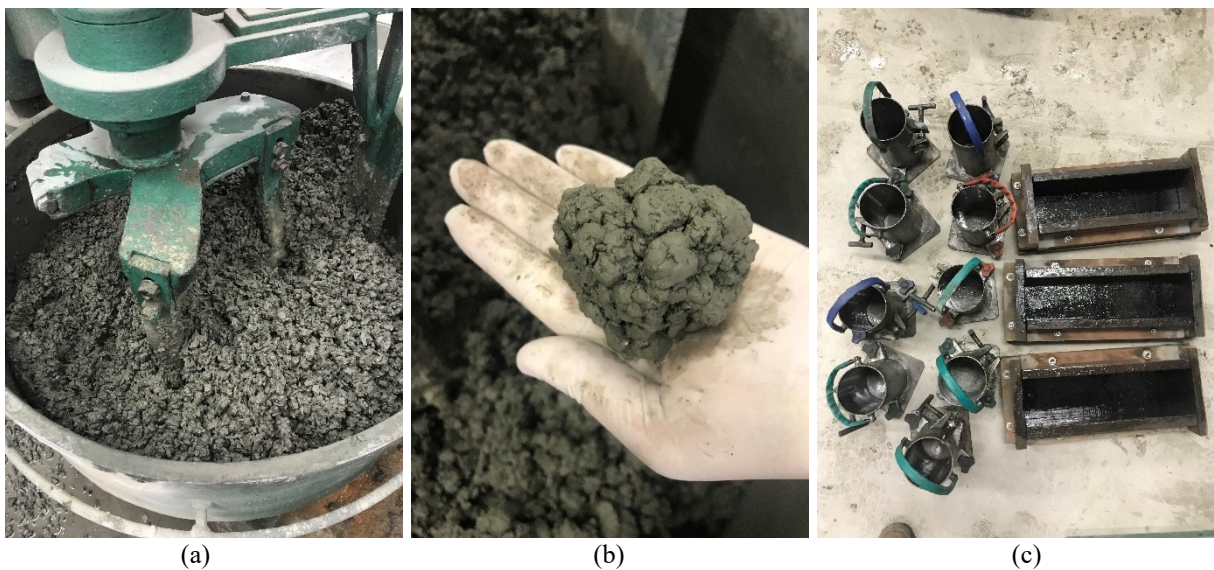
Figura 21. Aparência do corpo de prova compactado em duas camadas



3.4.4 Mistura, moldagem e cura

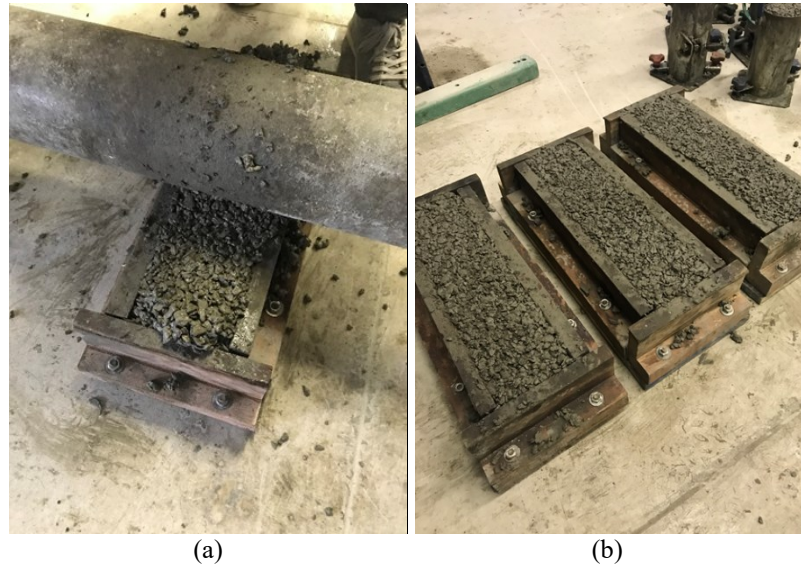
A preparação das misturas seguiu o procedimento descrito por Costa (2019). Nesse método, inicialmente, os agregados devem ser colocados na betoneira com parte da água e misturar por alguns minutos até umedecer a superfície do agregado. Na sequência, é acrescentado todo o cimento e o restante de água é adicionado aos poucos. Após todos os materiais serem colocados na betoneira, devem ser misturados por, aproximadamente, 3 minutos. O procedimento de moldagem pode ser visto na Figura 22.

Figura 22. Procedimento de moldagem: (a) mistura em betoneira; (b) inspeção tátil-visual e (c) preparação das formas



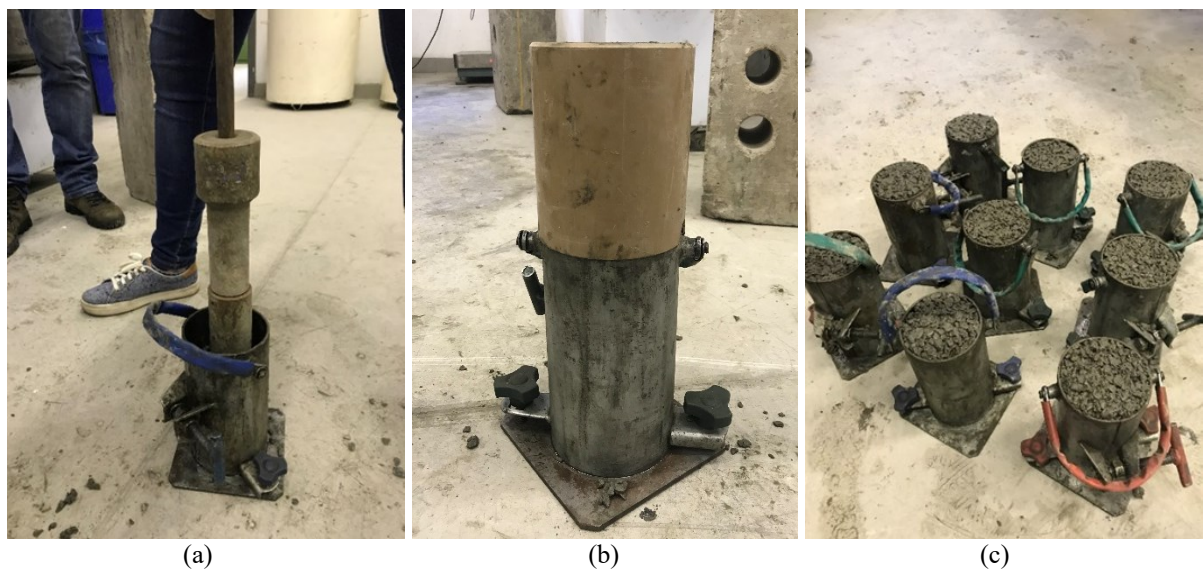
Foram utilizados moldes cilíndricos e prismáticos, os quais receberam uma fina camada de óleo mineral para auxiliar na desforma. Seguindo as recomendações da ACI 522R (2010), a compactação dos corpos de prova prismáticos foi realizada com o auxílio de um rolo de aço com peso de 48,80 kg por metro linear, em uma camada única, conforme Figura 23.

Figura 23. Procedimento de compactação dos corpos de prova prismáticos: (a) moldagem com rolo de aço adaptado e (b) aspecto das vigotas após a compactação



A compactação das amostras cilíndricas foi feita de acordo com o método descrito no item 3.4.3. O procedimento pode ser visto na Figura 24.

Figura 24. Procedimento de compactação dos cilindros: (a) compactação dinâmica; (b) anel complementar usado para a compactação da última camada e (c) aspecto dos corpos de prova após a compactação



Na compactação da última camada, foi usado um anel complementar para evitar a perda de material. As amostras foram desformadas entre 24 e 48 horas após a moldagem e, após isso, foram levados para a cura em câmara úmida. Os corpos de prova rompidos aos 7 dias ficaram, em média, 4 dias na câmara úmida e os demais até os 21 dias de cura, quando se iniciava o processo de secagem em estufa.

3.4.5 Capeamento

Vários autores recomendam a técnica do capeamento para a regularização da superfície dos corpos de prova submetidos a ensaios mecânicos, permitindo uma distribuição uniforme de tensões (SRIRAVINDRARAJAH *et al.* 2012; COSTA *et al.*, 2018).

Costa (2019) fez a comparação entre capeamentos com argamassa e com o uso de borracha neoprene e, de acordo com a autora, ambas as técnicas podem ser utilizadas para a regularização de superfícies de corpos de prova moldados. Além disso, a mesma autora não recomenda a retificação, técnica utilizada em corpos de prova de concreto convencional, pois pode gerar a quebra e o desprendimento dos agregados, influenciando negativamente nos resultados mecânicos.

Dessa forma, as amostras cilíndricas tiveram sua superfície regularizada com um capeamento de argamassa com o traço 1:1 (cimento: areia) e a/c 0,4. O aspecto do corpo de prova capeado pode ser visto na Figura 25.

Figura 25. Corpo de prova capeado com argamassa



4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos na etapa laboratorial. Inicialmente, será discutido o efeito da substituição do agregado natural pelo agregado de concreto reciclado e, na sequência, a influência da incorporação do aditivo modificador de reologia e da redução da relação a/c.

4.1 AVALIAÇÃO DO TEOR DE AGREGADO RECICLADO

Nessa seção será avaliado o efeito nas propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas produzido por diferentes teores do agregado reciclado em estudo em relação à mistura referência, composta unicamente por agregados naturais.

Na Tabela 16 estão apresentados os traços considerados, codificados em função das porcentagens de substituição pelo agregado reciclado. Por exemplo, o “ARC-20” representa uma mistura com 20% de agregado de concreto reciclado e 80% de agregado natural. O “ARC-0” é o traço usado como referência, composto por 100% de agregado natural.

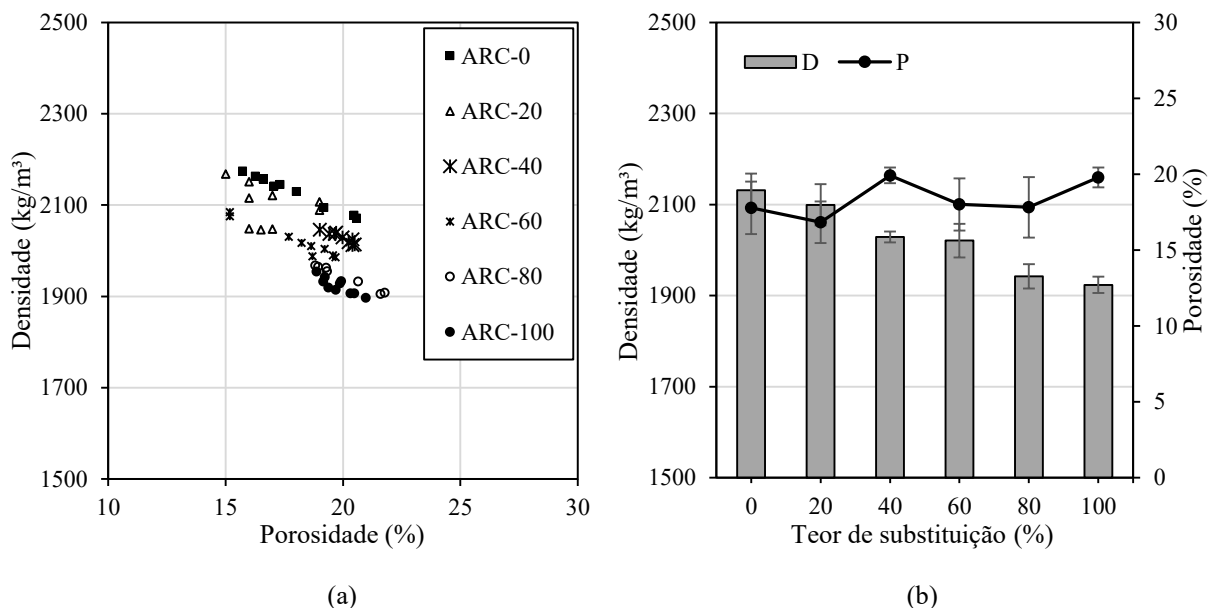
Tabela 16. Traços estudados

Código	Cimento (kg/m ³)	Agregado (kg/m ³)		Água (kg/m ³)
		Natural	Concreto	
ARC-0 (Ref.)	484	1452	-	145
ARC-20	478	1162	272	143
ARC-40	472	871	545	142
ARC-60	466	581	817	140
ARC-80	460	290	1090	138
ARC-100	454	-	1362	136

4.1.1 Porosidade e densidade real no estado endurecido

Na Figura 26 é possível observar a relação entre a densidade real no estado endurecido e a porosidade para todas as amostras ensaiadas.

Figura 26. Resultados dos ensaios de densidade real no estado endurecido: (a) valores em relação à porosidade e (b) valores médios por teor de substituição



Na Tabela 17 está apresentado um comparativo entre as densidades teóricas, obtidas através da dosagem, e as médias dos resultados obtidos de densidade real. Também são apresentados os valores de porosidade e o desvio padrão para cada teor de substituição estudado. Buscando avaliar a influência do método de compactação, as médias e desvios-padrão foram calculados separadamente entre amostras cilíndricas (compactação mecânica) e vigotas (compactação com cilindro metálico).

Tabela 17. Valores médios e desvios-padrão de densidades e porosidade para misturas com diferentes teores de agregado reciclado

Traço	Amostra	Densidade teórica (kg/m³)	Densidade real (kg/m³)	Sd (kg/m³)	Porosidade (%)	Sd (%)
ARC-0 (Ref.)	Cilíndrica	2081	2152,71	14,97	16,80	0,74
	Vigota		2081,29	11,96	20,08	0,77
ARC-20	Cilíndrica	2055	2125,51	29,14	17,00	1,67
	Vigota		2047,42	1,13	17,30*	0,50
ARC-40	Cilíndrica	2030	2035,89	7,55	19,70*	0,48
	Vigota		2015,46	3,38	20,38	0,13
ARC-60	Cilíndrica	2004	2037,24	34,64	17,36	1,76
	Vigota		1988,21	2,13	19,31	0,54
ARC-80	Cilíndrica	1978	1933,82	27,73	19,59*	0,94
	Vigota		1964,06	1,33	19,12	0,24
ARC-100	Cilíndrica	1952	1915,02	12,67	20,41*	0,45
	Vigota		1943,50	10,40	19,34	0,53

* significativamente diferente da referência

Conforme mostrado na Tabela 17, o aumento da substituição do agregado natural pelo reciclado resultou em uma redução proporcional da densidade teórica. Isso pode ser explicado devido à massa específica do agregado reciclado ($2,62 \text{ kg/dm}^3$) ser inferior à do agregado natural ($2,90 \text{ kg/dm}^3$).

Ainda é possível observar na Tabela 17 que, com o aumento do teor de ARC, a porosidade real ficou mais próxima à projetada (20%). Do ponto de vista prático, a adição de agregados reciclados reduziu a trabalhabilidade e dificultou a moldagem dos corpos de prova, o que levou ao aumento da porosidade total. Isso pode ser explicado devido às características de forma e textura do agregado reciclado, que diminui a fluidez da pasta, influenciando no adensamento e compactação das amostras. Também é possível que a forma angular e a textura superficial áspera da ARC tenham introduzido mais ar na mistura, o que influencia na porosidade e diminui a densidade no estado endurecido, conforme explicado por El-Hassan *et al.* (2019).

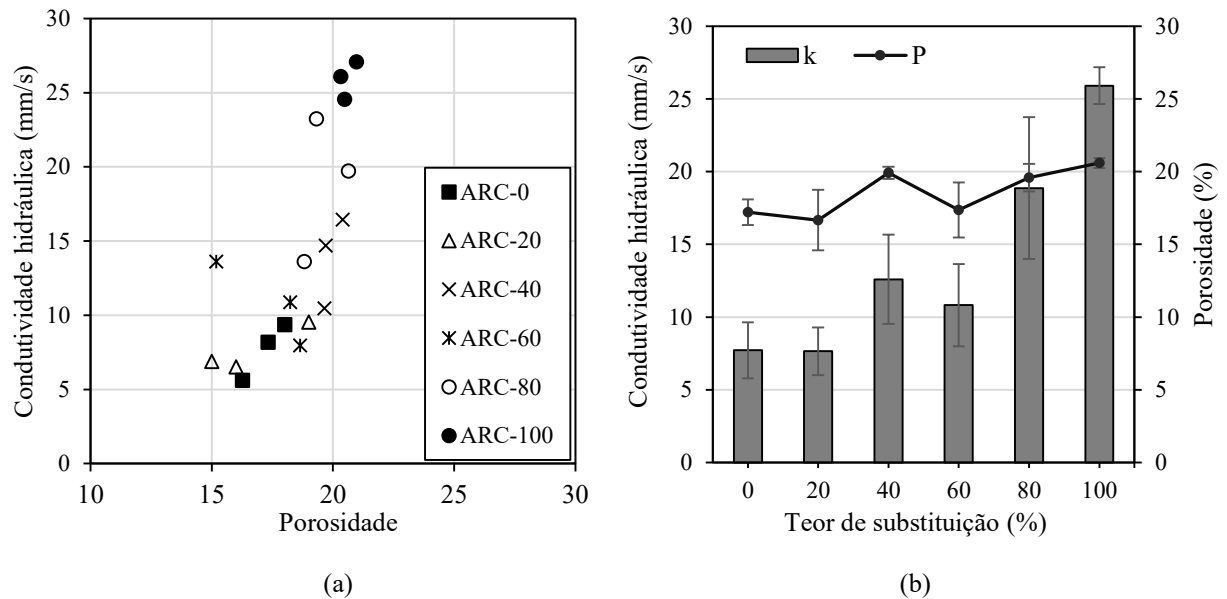
O método de compactação também interfere na densidade real e na porosidade das misturas. Algumas vezes, as amostras cilíndricas moldadas por compactação dinâmica ficaram um pouco abaixo da borda do molde. Deixar o corpo de prova com a altura inferior aos 200 mm, para a qual o peso de material foi estimado, ou completar o molde com material adicional, causam alterações tanto na porosidade, como na densidade projetada. Devido à maior dificuldade na moldagem, uma maior variabilidade nos resultados de densidade real pode ser constatada nas amostras cilíndricas, conforme pode ser observado na Tabela 17. Além disso, as amostras cilíndricas tiveram a maior diferença entre as densidades teórica e projetada, chegando a 3,3%; enquanto nas vigotas foi de 0,8%.

Através de análise de variância, conclui-se que o método de compactação é significativo (valor- $P < 0,05$). Ainda, pelo teste de comparações múltiplas de *Dunnett*, foi possível concluir que o valor médio de porosidade dos corpos de prova cilíndricos dos traços ARC-40, ARC-80 e ARC-100 diferem significativamente do valor médio do traço referência (ARC-0). Quanto aos resultados obtidos nas vigotas, apenas o traço ARC-20 diferiu significativamente da porosidade média do traço de controle, com valor- $P > 0,05$, como mostrado na Tabela 17.

4.1.2 Condutividade hidráulica

Os coeficientes de condutividade hidráulica das misturas em estudo são apresentados na Figura 27.

Figura 27. Resultados de ensaios de condutividade hidráulica: (a) valores para todos os corpos de prova em função da porosidade e (b) valores médios por teor de substituição



Os valores de condutividade hidráulica variaram entre 5,61 e 27,09 mm/s. Esses resultados são maiores que o limite inferior típico de 1,3 mm/s para concreto permeável (ACI 522-R, 2010) e o mínimo de 1 mm/s recomendado pela NBR 16.416 (ABNT, 2015). Além disso, esses valores estão de acordo com os resultados obtidos por outros autores que utilizaram permeâmetro de carga variável. El-Hassan *et al.* (2019), por exemplo, encontraram valores variando de 1,95 a 21,14 mm/s. Yap *et al.* (2018) obtiveram valores entre 14,2 e 26,4 mm/s.

Também foi possível verificar a tendência de aumento das médias de condutividade hidráulica com o aumento do teor de substituição e, conseqüentemente, de porosidade. No entanto, através do teste de *Dunnnett*, foi possível verificar que apenas as médias dos traços ARC-80 e ARC-100 diferem significativamente do traço referência, com valor- $P < 0,05$, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de condutividade hidráulica para misturas com diferentes teores de ARC

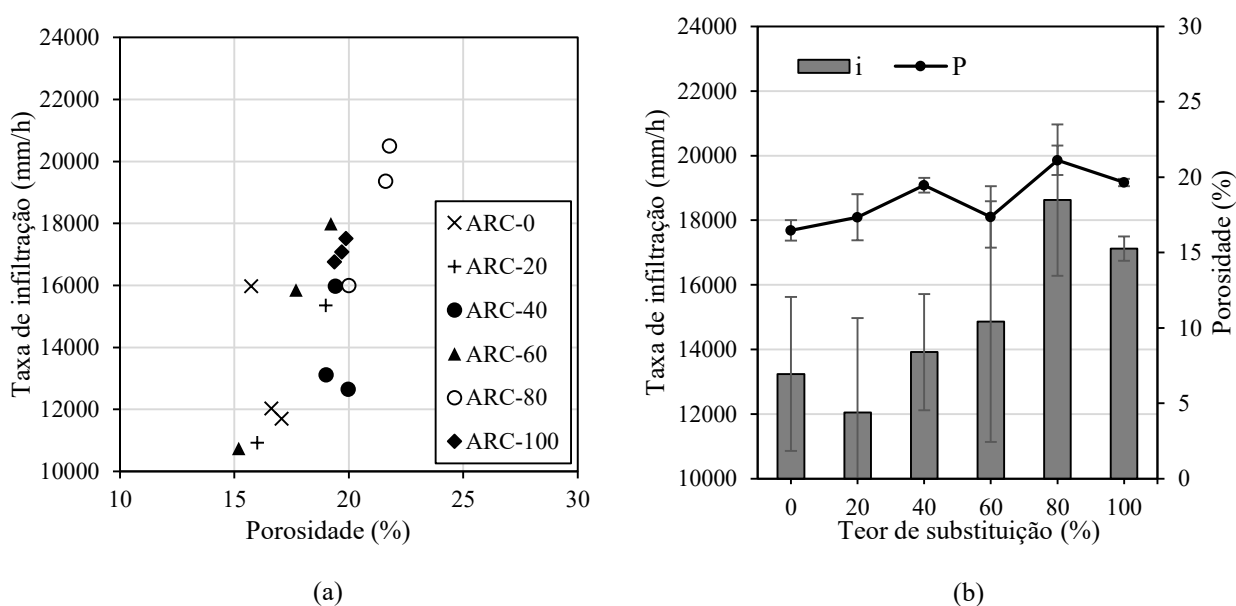
Teste / Mistura	Ref.	ARC-20	ARC-40	ARC-60	ARC-80	ARC-100
Média k (mm/s)	7,72	7,65	13,88	10,82	18,86*	25,91*
Sd (mm/s)	1,92	1,64	3,07	2,83	0,94	0,34
Valor-P	0,001					

* significativamente diferente da referência

4.1.3 Taxa de infiltração

Os resultados de taxa de infiltração das misturas de concreto permeável em estudo são mostradas na Figura 28.

Figura 28. Resultados de taxa de infiltração: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios e desvio padrão de taxa de infiltração e porosidade por teor de substituição



Os valores de taxa de infiltração variaram entre 9.857 e 20.505 mm/s. Foi possível observar que, assim como os resultados de condutividade hidráulica, existe uma tendência de aumento na taxa de infiltração conforme aumenta a substituição pelo agregado reciclado. O maior valor de taxa de infiltração para o teor de substituição de 80% pode ser explicado devido a maior porosidade em relação aos demais. Além disso, o elevado coeficiente de variação de ARC-60 indica que as amostras não são homogêneas.

Tabela 19. Valores médios, desvios-padrão, coeficiente de variação e análise estatística para taxa de infiltração para misturas com diferentes teores de ARC

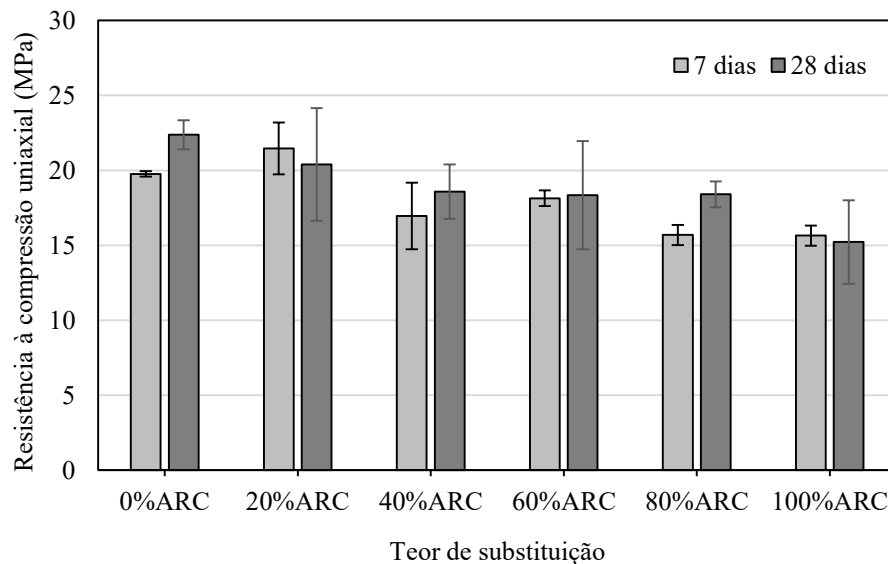
Teste / Mistura	ARC-0	ARC-20	ARC-40	ARC-60	ARC-80	ARC-100
Média I (mm/h)	13.239	12.050	13.918	14.867	18.624	17.122
Sd (mm/h)	2.383	2.919	1.801	3.724	2.343	3.755
CV	0,18	0,24	0,13	0,25	0,13	0,02
ANOVA (valor-P)	0,056					

Através de variâncias ANOVA, verificou-se que não há diferença significativa entre as médias obtidas para os traços em estudo (valor $P > 0,05$), conforme Tabela 19.

4.1.4 Resistência à compressão uniaxial

A Figura 29 mostra os resultados de resistência à compressão uniaxial de corpos de prova após 7 e 28 dias de cura de concretos permeáveis feitos com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado.

Figura 29. Valores médios de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias em função do teor de substituição

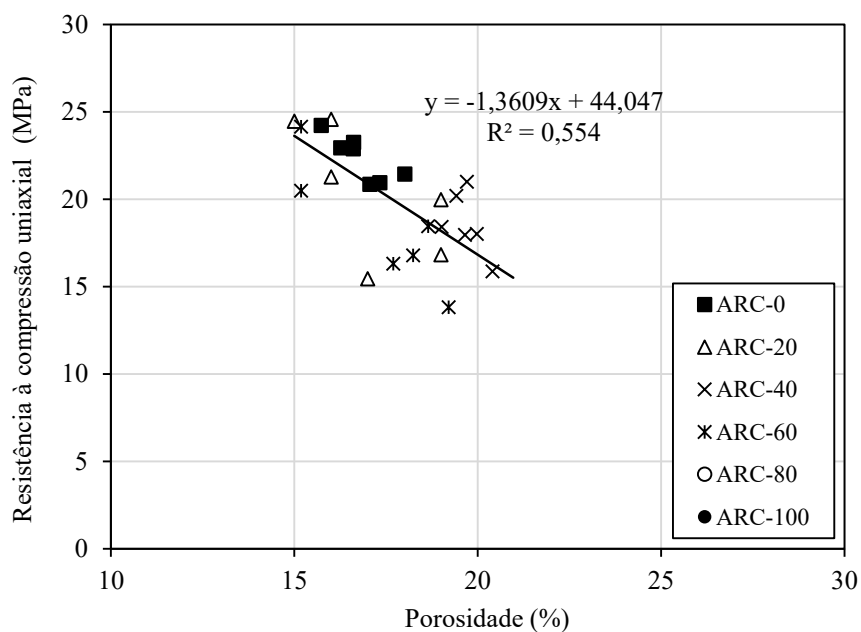


Pode ser observado que, em geral, à medida que a porcentagem de substituição pelo agregado reciclado aumentou, a resistência à compressão diminuiu. Para ARC-100 houve uma redução de 32% em relação à referência. Esse resultado é comparável ao relatado por Yap *et al.* (2018), que constataram uma redução de até 40% na resistência à compressão em amostras com 100% de agregado reciclado. Os resultados obtidos também estão alinhados com os resultados de densidade no estado endurecido e de porosidade, em que porcentagens mais altas de substituição de ARC criaram mais vazios e reduziram a densidade, levando a uma menor resistência à compressão. Também é possível que a maior abrasão do agregado reciclado (Tabela 11) tenha contribuído para a redução da resistência à compressão.

Através análise de variância, foi possível observar que não existe diferença significativa entre as médias obtidas aos 7 dias e aos 28 dias para todos os traços em estudo (valor- $P > 0,05$).

A Figura 30 mostra os resultados de resistência à compressão uniaxial os 28 dias em função da porosidade de todos os corpos de prova rompidos. Na literatura, é comum associar-se a redução da resistência à compressão ao aumento da porosidade, conforme mostrado na Figura 3. Nesse caso, a partir da regressão linear, o coeficiente de determinação obtido (R^2) foi de 0,55, o que demonstra que embora haja uma forte ligação entre resistência à compressão e porosidade, também há outros fatores intervindo na propriedade.

Figura 30. Resultados de resistência à compressão uniaxial em relação à porosidade de todas as amostras rompidas aos 28 dias



Os valores de resistência à compressão uniaxial obtidos ficaram entre 15,23 e 20,40 MPa, sendo que o traço referência atingiu resistência média de 22,38 MPa. Esses valores estão dentro da faixa de valores encontrados na literatura. Güneyisi *et al.* (2014) encontraram resistência à compressão simples aos 28 dias de 13,5 a 20 MPa e Zaetang *et al.* (2016) entre 13 a 17 MPa, respectivamente, em misturas com agregados de concreto. A Tabela 20 apresenta as médias, desvios-padrão e análise estatística para os resultados obtidos aos 7 e 28 dias para todos os teores de substituição.

Além disso, através do teste de comparações múltiplas de *Dunnnett*, pode-se concluir que a média dos traços de 40%, 60%, 80% e 100%, aos 28 dias de cura, diferem significativamente da resistência a compressão uniaxial média do traço referência. Já a resistência média de 20% não difere significativamente da média do traço referência, com valor- $P > 0,05$ a 1% de variabilidade. Isso quer dizer que para o teor de substituição de até 20% do agregado em estudo,

não há redução da resistência à compressão uniaxial em relação à mistura composta apenas por agregados naturais.

Tabela 20. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias para misturas analisadas

Teste / Mistura	ARC-0	ARC-20	ARC-40	ARC-60	ARC-80	ARC-100
Média RCS 7 dias (MPa)	19,76	21,47	17,47	18,14	15,69*	15,65*
Sd (MPa)	0,19	1,73	1,37	0,52	0,67	0,67
Média RCS 28 dias (MPa)	22,37	20,44	18,59*	18,35*	18,40*	15,23*
Sd (MPa)	1,29	3,80	1,82	3,61	0,87	2,78
ANOVA (valor-P)						
RCS (7 dias)	0,001					
RCS (28 dias)	0,001					

* significativamente diferente da referência

4.1.5 Resistência à tração na flexão e módulo elástico flexural

A Figura 31 apresenta os resultados de resistência à tração na flexão e de módulo elástico flexural. A Tabela 21 mostra os resultados médios, desvio padrão e análise de variância ANOVA para a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade flexural das amostras.

Figura 31. Resultados de resistência à tração na flexão: (a) valores para todos os corpos de prova em função da porosidade e (b) valores médios e desvio padrão por teor de substituição

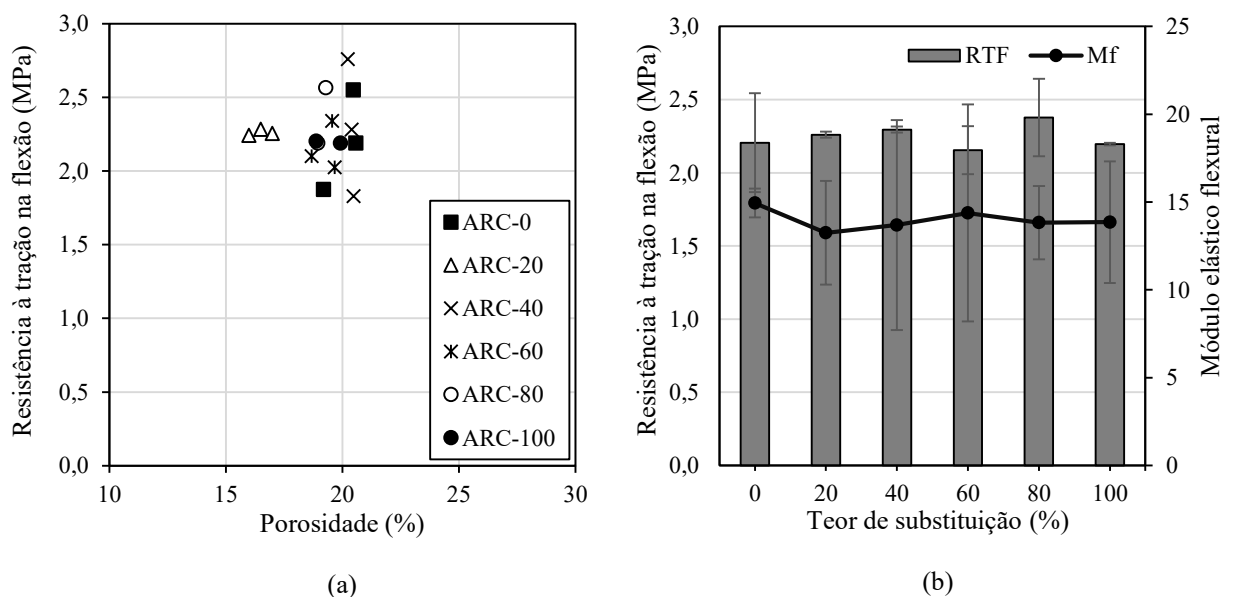


Tabela 21. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de tração na flexão e porosidade para misturas analisadas

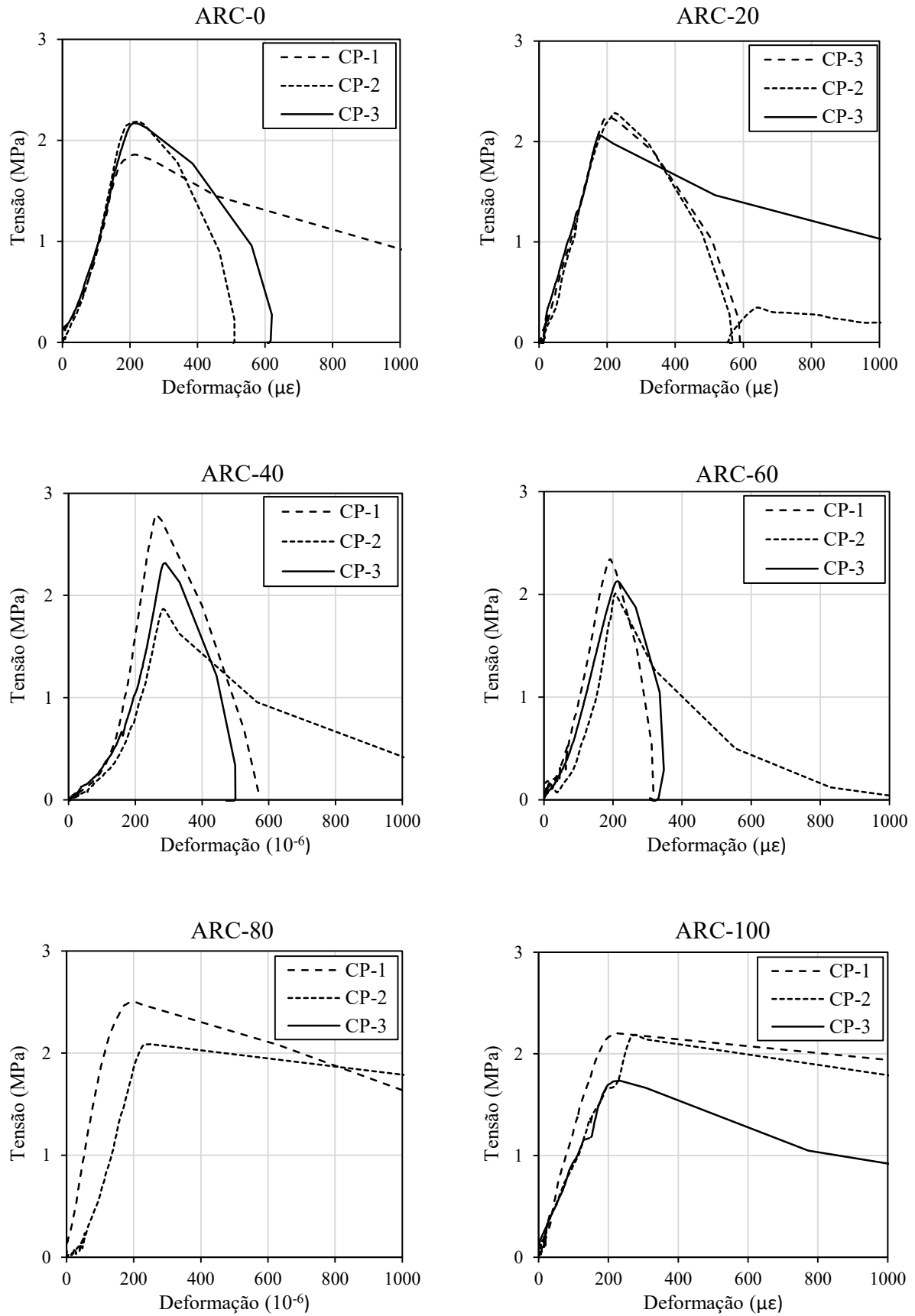
Teste / Mistura	ARC-0	ARC-20	ARC-40	ARC-60	ARC-80	ARC-100
Média RTF (MPa)	2,21	2,26	2,29	2,16	2,38	2,20
Sd (MPa)	0,34	0,02	0,47	0,16	0,26	0,01
Média Mf (GPa)	14,94	13,25	12,83	14,38	13,83	13,85
Sd (GPa)	0,82	2,95	1,73	1,87	2,08	3,47
ANOVA (valor-P)						
RTF	0,959					
Mf	0,894					

Os valores obtidos para resistência à tração na flexão ficaram entre 1,83 e 2,76 MPa. Esses valores estão dentro da faixa de valores encontrados na literatura. Por exemplo, Yap *et al.* (2018) encontraram valores entre 1,7 e 2,4 MPa e Bhutta *et al.* (2013), entre 1,9 e 3,2 MPa para misturas de concreto permeável com agregado de concreto. Os valores de módulo elástico flexural variaram entre 10,42 e 17,82 GPa.

De acordo com a análise estatística, as diferenças entre os resultados médios de resistência à tração na flexão e módulo elástico flexural das misturas com diferentes porcentagens de substituição do agregado natural pelo de concreto não é significativa (valor-P > 0,05), conforme pode ser observado na Tabela 21. Além disso, o maior desvio padrão obtido para o módulo elástico flexural pode ser explicado devido à dificuldade de posicionar os LVDTs na superfície irregular do concreto permeável.

A deformação de ruptura se manteve na faixa de 150 a 250 10^{-6} . Quanto ao modo de ruptura, é importante destacar que os corpos de prova romperam de forma frágil. A Figura 32 apresenta os gráficos da força *vs* o deslocamento (obtidos através dos LVDTs) para os traços em estudo.

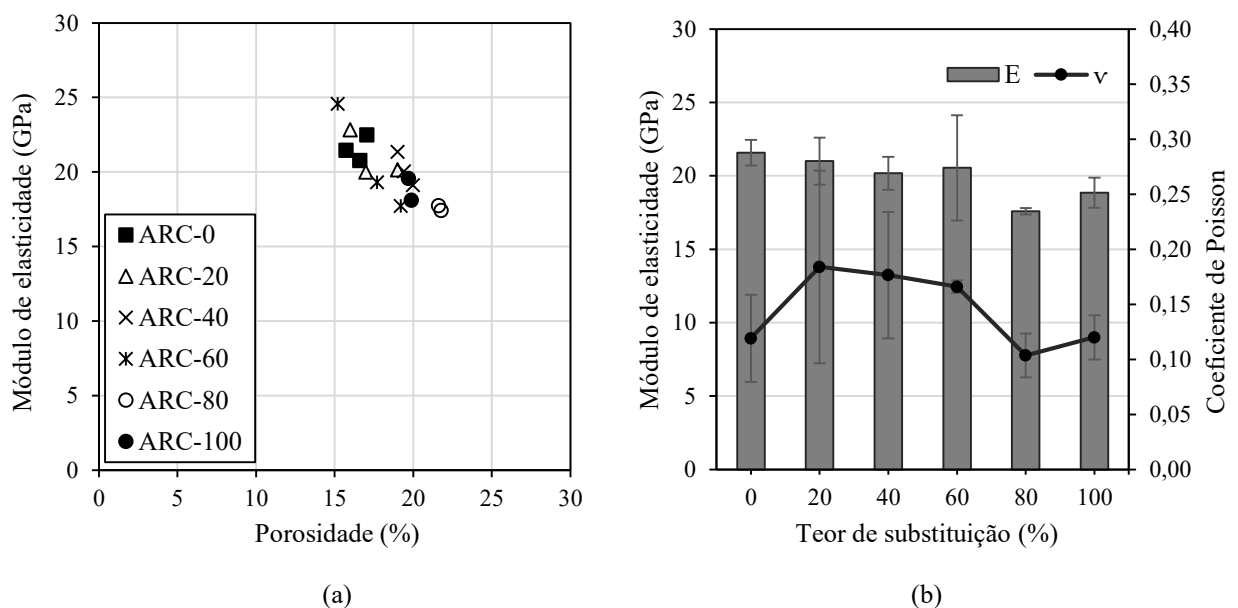
Figura 32. Ensaio de tração na flexão: gráfico de força vs deslocamento para todos os traços em estudo



4.1.6 Módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*

A Figura 33 (a) apresenta os resultados de módulo de elasticidade à compressão em função da porosidade e a Figura 33 (b) os resultados médios em função do tipo de mistura, além do coeficiente de *Poisson*. Na Tabela 22, estão os resultados médios, desvio padrão e análise de variância de ambas as propriedades.

Figura 33. Resultados de módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*: (a) valores de E para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios de E e ν por teor de substituição



Os valores variaram entre 17,42 e 24,58 GPa para módulo de elasticidade. De acordo com Tam *et al.* (2016), os valores de módulo elástico são influenciados pela porosidade do agregado e da mistura. Isso pode ser verificado na Figura 33 (a), que mostra a redução do módulo de elasticidade conforme aumenta a porosidade total. Esse resultado também pode ser explicado devido à redução da ligação entre agregado e pasta, conforme a substituição por ARC aumenta (YAP *et al.*, 2018).

Os valores de coeficiente de *Poisson* variaram entre 0,09 e 0,25. Chama-se a atenção ao fato de que coeficiente de *Poisson* reduziu com o aumento do teor de agregado reciclado, especialmente para os teores ARC-80 e ARC-100. Isso pode ser explicado uma vez que a matriz porosa do material consegue absorver a deformação longitudinal, sem transferir o efeito lateralmente.

De acordo com análise estatística, pode-se concluir que não houve diferença significativa entre todos os teores em estudo para ambas as propriedades (valor- $P > 0,05$), conforme pode ser observado na Tabela 22.

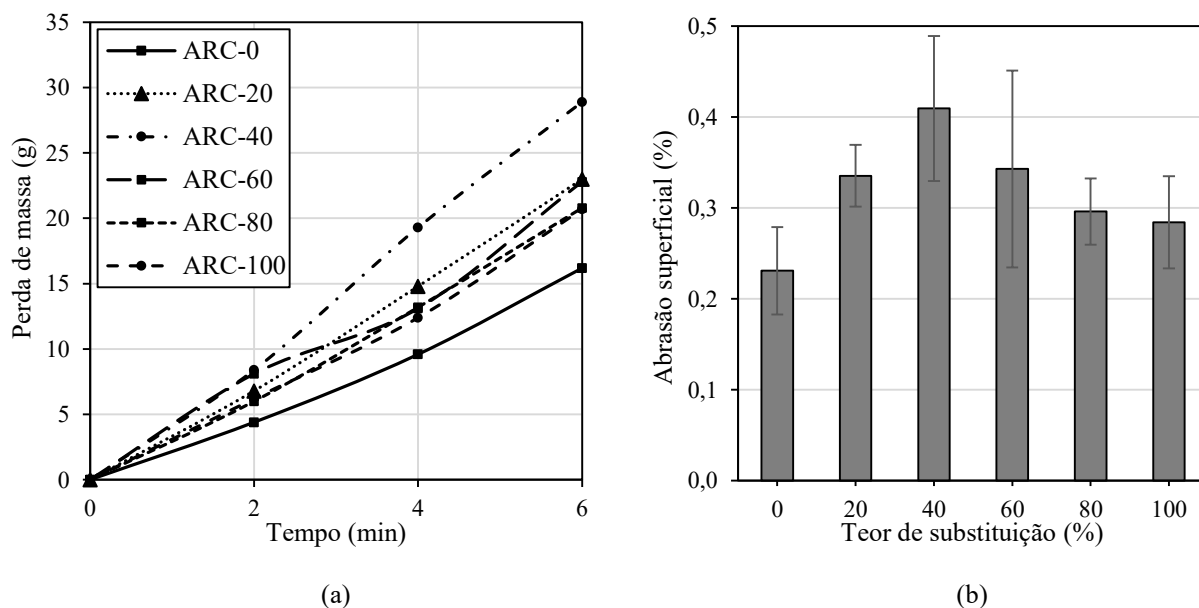
Tabela 22. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de módulo de elasticidade estático e coeficiente de *Poisson* para as misturas analisadas

Teste / Mistura	ARC-0	ARC-20	ARC-40	ARC-60	ARC-80	ARC-100
Média MOE (GPa)	21,58	21,00	20,17	20,55	17,58	18,85
Sd (GPa)	0,86	1,6	1,13	3,59	0,23	1,02
Média ν	0,12	0,18	0,18	0,17	0,10	0,12
Sd	0,04	0,09	0,06	0,07	0,01	0,01
ANOVA (valor-P)						
MOE	0,301					
ν	0,495					

4.1.7 Abrasão superficial

A Figura 34 apresenta os resultados da perda de massa e abrasão superficial para as misturas analisadas nessa etapa da pesquisa. Na Tabela 23 estão os resultados médios, desvio padrão, coeficiente de variação e da análise de variância ANOVA.

Figura 34. Resultados de abrasão superficial: (a) perda de peso pelo tempo de ensaio e (b) valores médios e desvio padrão de abrasão superficial por teor de substituição



Os resultados de abrasão superficial para as misturas em estudo ficaram entre 0,23 e 0,41%. Conforme pode ser observado na Figura 34, o traço ARC-40 foi o que obteve a maior perda de massa, cerca de 9,6 g em cada ciclo do ensaio. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por outros autores. Gaedicke *et al.* (2014), por exemplo, encontraram valores em torno de 0,3% para misturas com agregado reciclado. Zaetang *et al.* (2016), registraram perdas de peso entre 5,3 e 7,6 g para misturas com agregado de concreto reciclado.

Na Tabela 23 também pode ser observado o alto coeficiente de variação, chegando a 31,5% para a mistura ARC-60. Esse resultado coincide com outros autores, que concluíram que o ensaio pode não ter o nível de precisão necessário para o controle da qualidade da resistência à abrasão em concreto permeável. De acordo com Gaedicke *et al.* (2014), isso ocorre devido ao ensaio não avaliar uma área representativa. Ou seja, o ensaio padrão para o concreto convencional (ASTM C944) pode não ser adequado para misturas permeáveis.

Tabela 23. Valores médios, desvios-padrão, coeficiente de variação e análise estatística de abrasão superficial para as misturas analisadas

Teste / Mistura	ARC-0	ARC-20	ARC-40	ARC-60	ARC-80	ARC-100
Média Abrasão (%)	0,23	0,34	0,41	0,34	0,30	0,28
Sd (%)	0,048	0,034	0,08	0,108	0,036	0,051
CV (%)	20,83	10,16	19,49	31,54	12,26	17,81
ANOVA (valor-P)	0,08					

4.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ADITIVO

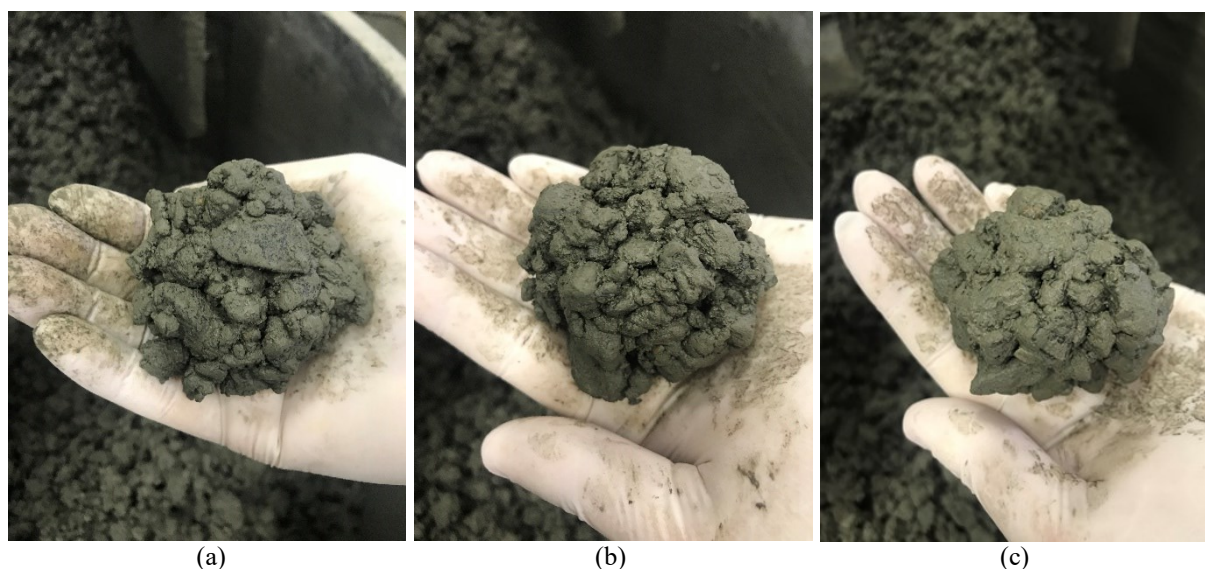
Nesse item buscou-se avaliar o efeito da incorporação do aditivo modificador de reologia e da redução da relação a/c nas propriedades físicas, hidráulicas e mecânicas do concreto permeável. As relações foram testadas em misturas com 100% de agregado reciclado. A Tabela 24 apresenta os traços que foram avaliados nessa etapa da pesquisa. Eles foram codificados em função da relação a/c empregada (0,30 ou 0,26) e do uso de aditivo (onde “SA” e “AD”, significa sem aditivo e com aditivo, respectivamente).

Tabela 24. Traços avaliados

Código	Cimento (kg/m ³)	Agregado (kg/m ³)		Água/ Cimento	Aditivo/ Cimento
		Natural	Concreto		
0,30-SA (Ref.)	454	-	1362	0,30	-
0,26-AD	454	-	1362	0,26	0,06
0,30-AD	454	-	1362	0,30	0,06
0,30-AD-0,08	454	-	1362	0,30	0,08

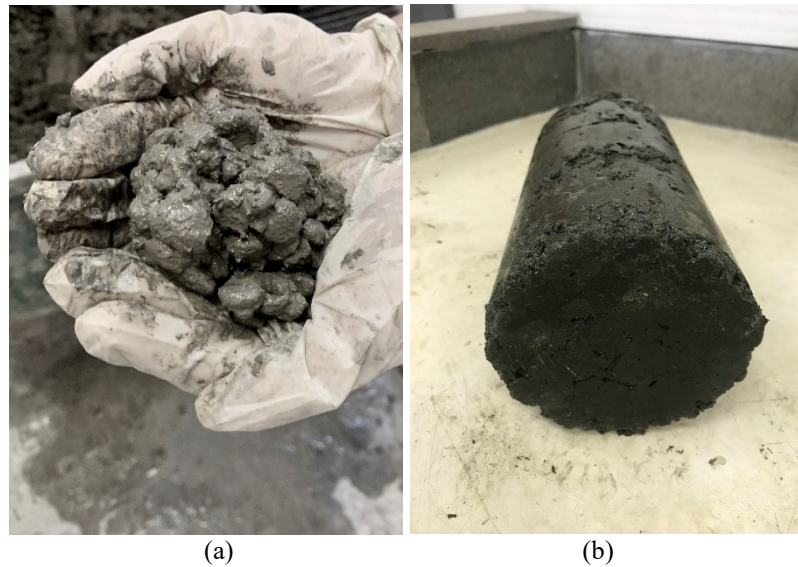
Inicialmente, optou-se em testar o uso de aditivo em uma mistura com a relação a/c de 0,26 (mínimo recomendado pela ACI 522R, 2010). O aditivo foi adicionado seguindo os limites estabelecidos pelo fabricante (455 a 980 ml a cada 100 kg de materiais cimentícios). Pelo teste de consistência, optou-se por utilizar a relação de 0,06 (aditivo/cimento). O aspecto da mistura pode ser visto na Figura 35.

Figura 35. Teste de consistência do traço 0,26-AD: (a) sem aditivo; (b) teor de 0,045 (c) teor de 0,06



Após isso, avaliou-se a relação a/c de 0,3, que vinha sendo utilizada, com os teores de aditivo de 0,06 e 0,08. Conforme pode ser verificado na Figura 36 (a), o teor de aditivo de 0,08 deixou a pasta muito fluida, ocasionando a precipitação e o fechamento dos poros, como pode ser verificado na Figura 36 (b). Assim, optou-se por descartar as amostras do traço 0,30-AD-0,08.

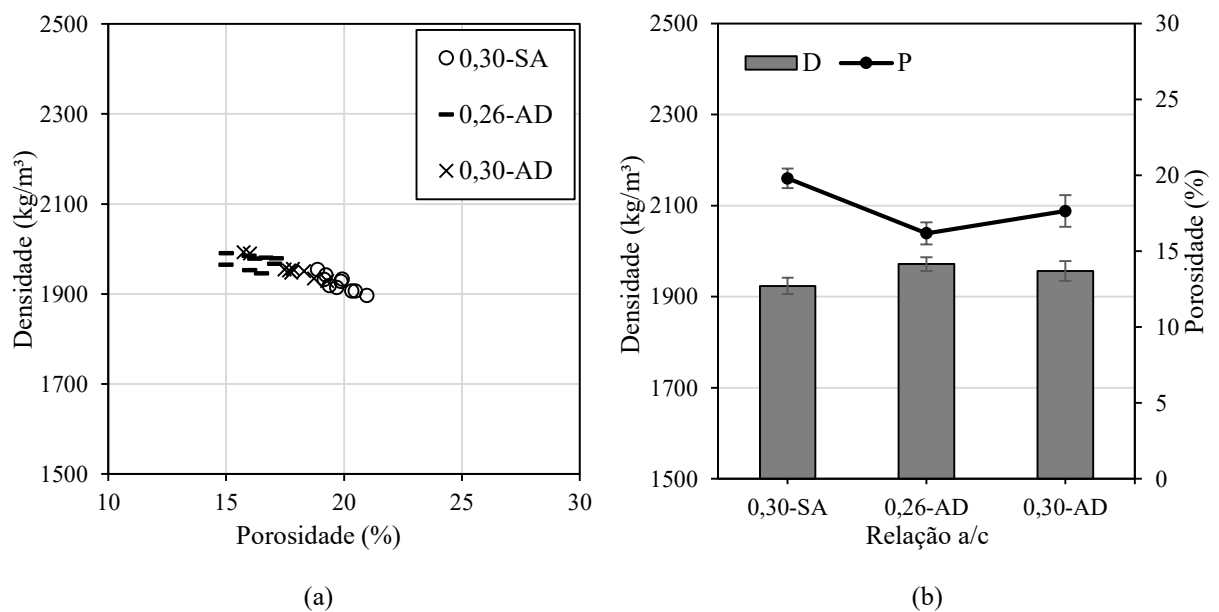
Figura 36. Traço 0,30-AD-0,08: (a) teste de consistência e (b) aspecto das amostras após desmoldagem



4.2.1 Porosidade e densidade real no estado endurecido

Na Figura 37 é possível observar a relação entre a densidade real no estado endurecido e a porosidade das amostras ensaiadas nessa etapa da pesquisa.

Figura 37. Resultados de densidade real no estado endurecido: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios e desvio padrão por traço



Nessa etapa da pesquisa foram evidenciados dois cenários distintos. Para o traço 0,30-AD, o uso de aditivo melhorou a trabalhabilidade da mistura, facilitando o adensamento e a compactação das amostras, independentemente do método de compactação utilizado. Por outro lado, para o traço 0,26-AD, como a mistura ficou com consistência mais seca, dificultou o adensamento das amostras, exigindo a aplicação de maior energia de compactação, o que pode ter ocasionado a quebra dos agregados. Além disso, após a desmoldagem dos corpos de prova, a mistura desagregava com certa facilidade, evidenciando a falta de aderência entre pasta e agregado.

Em ambos os casos, houve o aumento da densidade real em relação à teórica e, conseqüentemente, a redução da porosidade das misturas. A densificação da mistura com o uso de aditivo havia sido observada por Costa (2019), que verificou o aumento de até 0,5% na densidade real em relação à projetada. Na Tabela 25 estão relacionadas a densidade teórica e as médias dos resultados de densidade real e porosidade obtidas. Buscando avaliar a influência do método de compactação, as médias e desvios-padrão foram calculados separadamente entre amostras cilíndricas e as vigotas.

Tabela 25. Valores médios, desvios-padrão e análise de variância da porosidade para as misturas estudadas

Traço	Amostra	D-teórica (kg/m³)	D-real (kg/m³)	Sd (kg/m³)	Porosidade (%)	Sd (%)
0,30-SA	Cilíndrica	1952	1915	12,67	20,41	0,5
	Vigota		1944	10,4	19,34	0,5
0,26-AD	Cilíndrica	1952	1981	7,77	16,34*	0,8
	Vigota		1955	9,67	15,83*	0,8
0,30-AD	Cilíndrica	1952	1966	19,66	17,18*	1,1
	Vigota		1937	9,76	18,59	0,8
ANOVA (valor-P)						
Teste / Mistura		Porosidade cilíndricos		Porosidade vigotas		
0,30-SA vs. 0,26-AD		0,001		0,003		
0,30-SA vs. 0,30-AD		0,001		0,236		
0,26-AD vs. 0,30-AD		0,601		0,012		

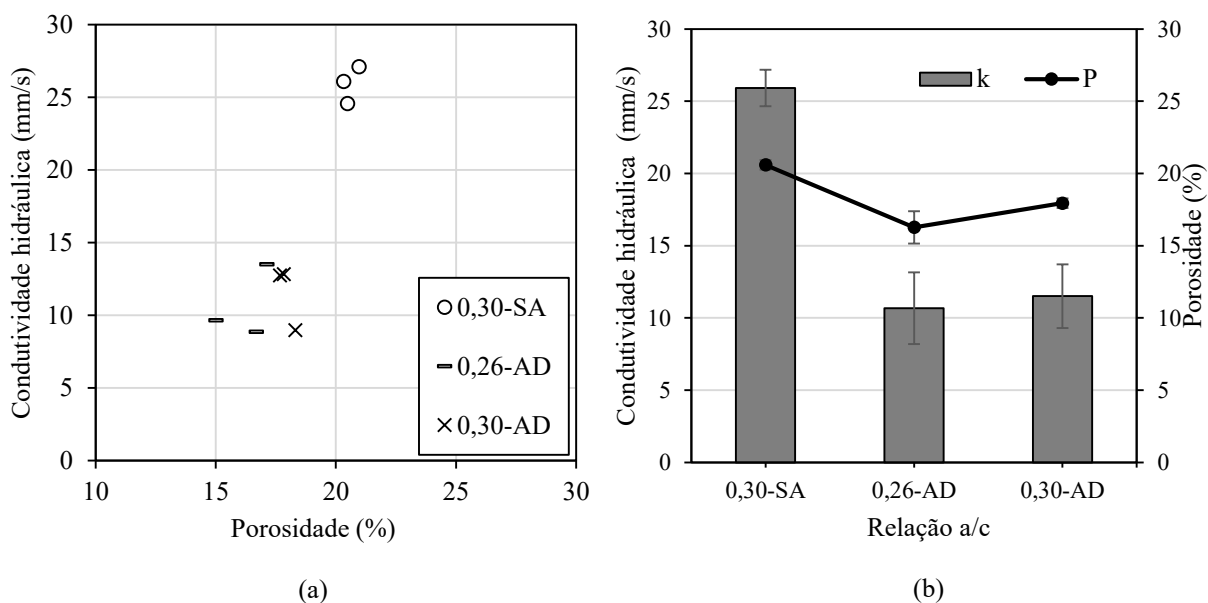
*Significativamente diferente da referência

Através de análise ANOVA, verificou-se que para as amostras cilíndricas, tanto na mistura 0,26-AD, quanto na 0,30-AD, a redução de porosidade diferiu significativamente em relação à referência. Em relação à porosidade das amostras prismáticas, apenas o traço de 0,26-AD foi significantemente diferente dos demais.

4.2.2 Condutividade hidráulica

Na Figura 37 é possível observar a relação entre condutividade hidráulica e porosidade das amostras ensaiadas e, ainda, os resultados médios e de desvio padrão.

Figura 38. Condutividade hidráulica: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios por teor de substituição



Conforme comentado no item anterior, o uso de aditivo reduziu a porosidade das misturas e isso, consequentemente, prejudicou as propriedades hidráulicas. No entanto, os valores das misturas com aditivo variaram entre 8,9 e 13,5 mm/s, todos acima do limite mínimo de 1 mm/s da NBR 16.416 (ABNT, 2015). Através de análise de variância, verificou-se que as médias de condutividade hidráulica obtidas para ambas as misturas com aditivo são significativamente inferiores em relação à mistura de referência (valor- $P < 0,05$), conforme Tabela 26.

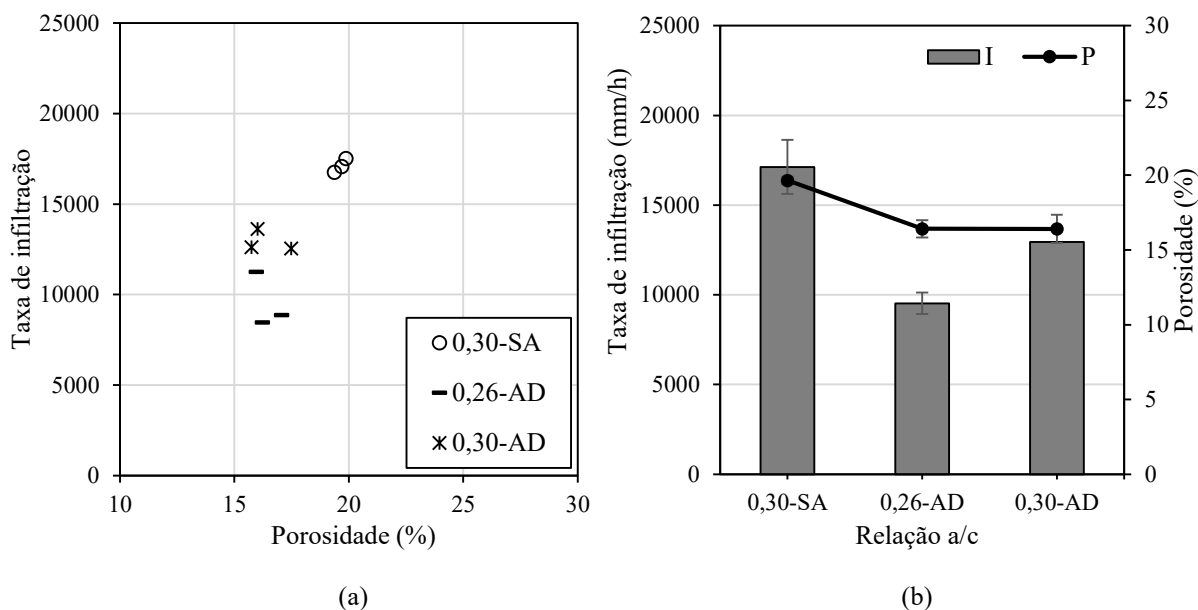
Tabela 26. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de condutividade hidráulica para as misturas estudadas

Teste / Mistura	ARC-100	0,26-AD	0,30-AD
Média k (mm/s)	25,91	10,67	11,51
Sd	1,27	2,49	2,21
ANOVA (valor-P)			
Teste / Mistura			
0,30-SA vs. 0,26-AD	0,001		
0,30-SA vs. 0,30-AD	0,001		
0,26-AD vs. 0,30-AD	0,683		

4.2.3 Taxa de infiltração

Os resultados de taxa de infiltração em relação à porosidade, bem como valores médios e desvios padrões das misturas em estudo são mostrados na Figura 39.

Figura 39. Taxa de infiltração: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios e desvio padrão de taxa de infiltração e porosidade por traço



Os valores de taxa de infiltração das misturas com aditivo variaram entre 8.462 e 13.635 mm/h. Assim como observado para a condutividade hidráulica, o uso de aditivo causou a redução de valores de taxa de infiltração. Através da análise de variâncias, verificou-se que as médias obtidas para os traços em estudo diferem significativamente do traço de referência (valor- $P > 0,05$), conforme Tabela 27.

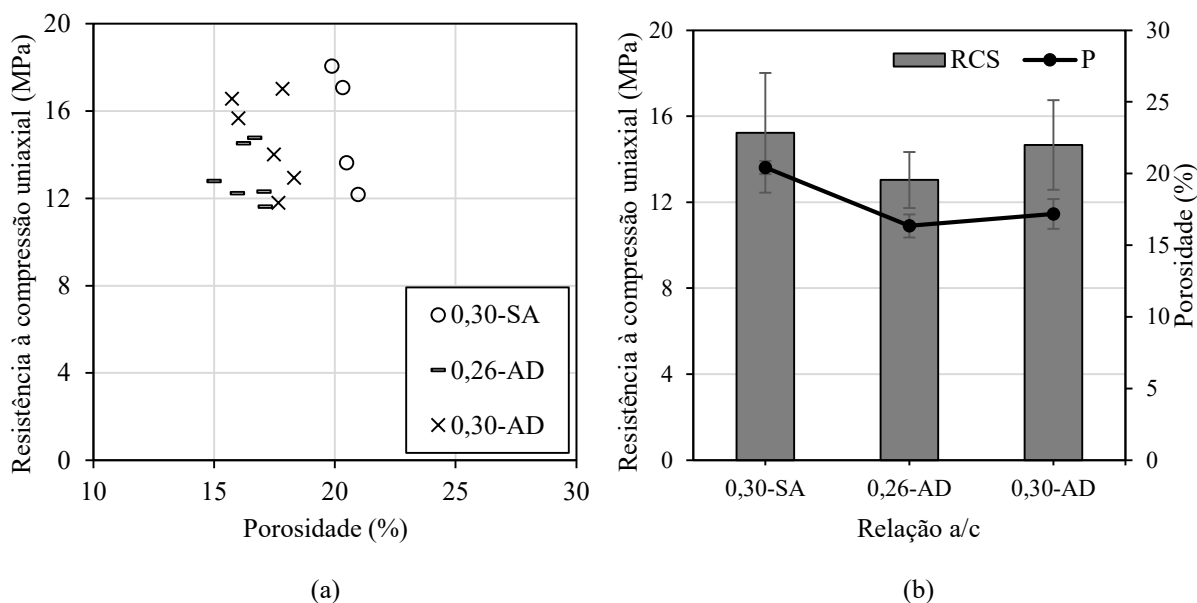
Tabela 27. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de condutividade hidráulica para as misturas em estudo

Teste / Mistura	0,30-SA	0,26-AD	0,30-AD
Média I (mm/h)	17.122	9.529	12.939
Sd	375	1508	603
ANOVA (valor-P)			
Teste / Mistura			
0,30-SA vs. 0,26-AD	0,001		
0,30-SA vs. 0,30-AD	0,001		
0,26-AD vs. 0,30-AD	0,022		

4.2.4 Resistência à compressão uniaxial

A Figura 40 mostra os resultados de resistência à compressão em relação à porosidade aos 28 dias de idade e os valores médios e desvio padrão por traço.

Figura 40. Resultados de resistência à compressão uniaxial: (a) valores em relação à porosidade e (b) valores médios, desvio padrão e porosidade por traço



Os valores de resistência à compressão obtidos variaram entre 11,61 e 17,01 MPa. Os menores valores foram obtidos para o traço 0,26-AD. Nessa mistura evidenciou-se a carência de pasta de cimento envolvendo os grãos, o que pode ser associado ao enfraquecimento da zona de transição, concentrando as tensões nos agregados. No entanto, verificou-se que não houve diferença significativa entre os resultados médios para os traços com aditivo em relação ao de referência, com valor- $P > 0,05$, conforme observado na Tabela 28.

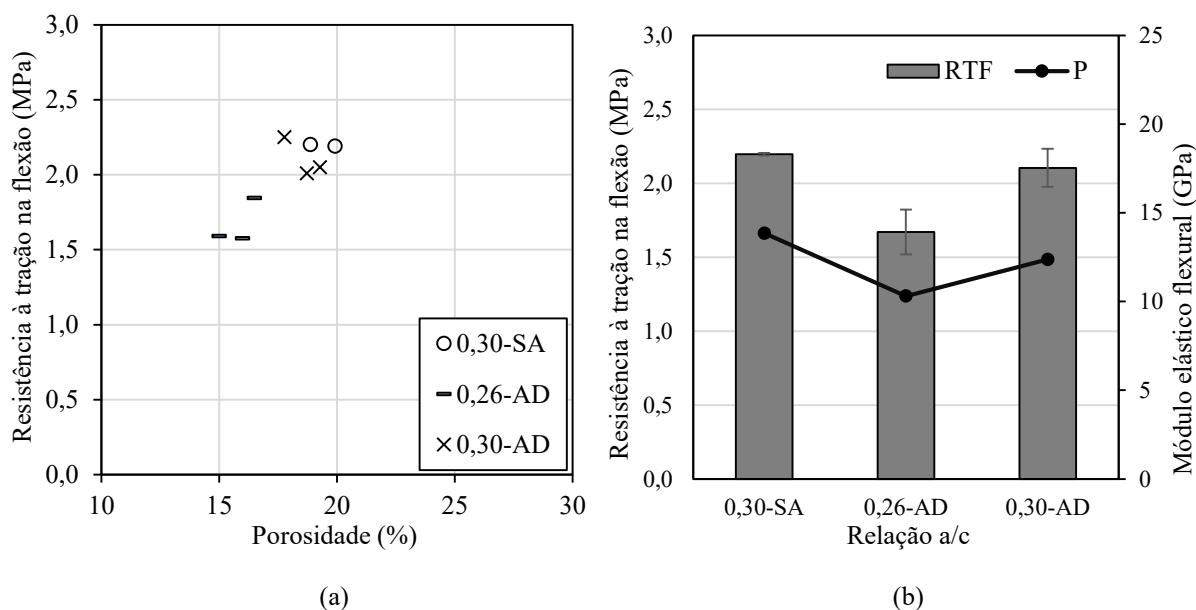
Tabela 28 . Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de resistência à compressão uniaxial para as misturas em estudo

Teste / Mistura	ARC-100	ARC-100-AD	0,26-AD
Média RCS (MPa)	15,65	14,66	14,46
Sd	0,67	2,09	2,09
ANOVA (valor-P)			
Teste / Mistura			
0,30-SA vs. 0,26-AD	0,093		
0,30-SA vs. 0,30-AD	0,895		
0,26-AD vs. 0,30-AD	0,065		

4.2.5 Resistência à tração na flexão e módulo elástico flexural

Os resultados de resistência à tração na flexão em relação à porosidade de todos os corpos de prova rompidos e os valores médios e desvio padrão por traço são mostrados na Figura 41.

Figura 41. Resultados de resistência à tração na flexão e módulo elástico flexural: (a) valores em relação à porosidade e (b) valores médios e desvio padrão por traço



Os valores obtidos para resistência à tração na flexão para as amostras com aditivo ficaram entre 1,58 e 2,25 MPa. Os valores de módulo flexural variaram entre 8,61 e 15,62 GPa. Mais uma vez, os menores valores ficaram para o traço 0,26-AD. Na Tabela 29 pode ser observado que não houve diferença significativa de resistência à tração na flexão entre os traços 0,30-AD e 0,30-AS e entre os valores de módulo elástico flexural para todos os traços em estudo.

Tabela 29. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de resistência à tração na flexão e módulo elástico flexural para as misturas em estudo

Teste / Mistura	030-SA	0,30-AD	0,26-AD
Média RTF (MPa)	2,2	2,1	1,67
Sd	0,01	0,13	0,15
Média E (GPa)	13,85	12,37	10,31
Sd	3,47	2,92	1,99
ANOVA (valor-P)			
Teste / Mistura	RTF	Mf	
0,30-SA vs. 0,26-AD	0,019	0,199	
0,30-SA vs. 0,30-AD	0,406	0,601	
0,26-AD vs. 0,30-AD	0,02	0,368	

4.2.6 Módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson*

A Figura 42 (a) apresenta os resultados de módulo de elasticidade à compressão em função da porosidade e a Figura 42 (b), os resultados médios de módulo de elasticidade e, ainda, dos valores de coeficiente de *Poisson*.

Figura 42. Resultados de módulo de elasticidade estático e *Poisson*: (a) valores de E para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios de traço

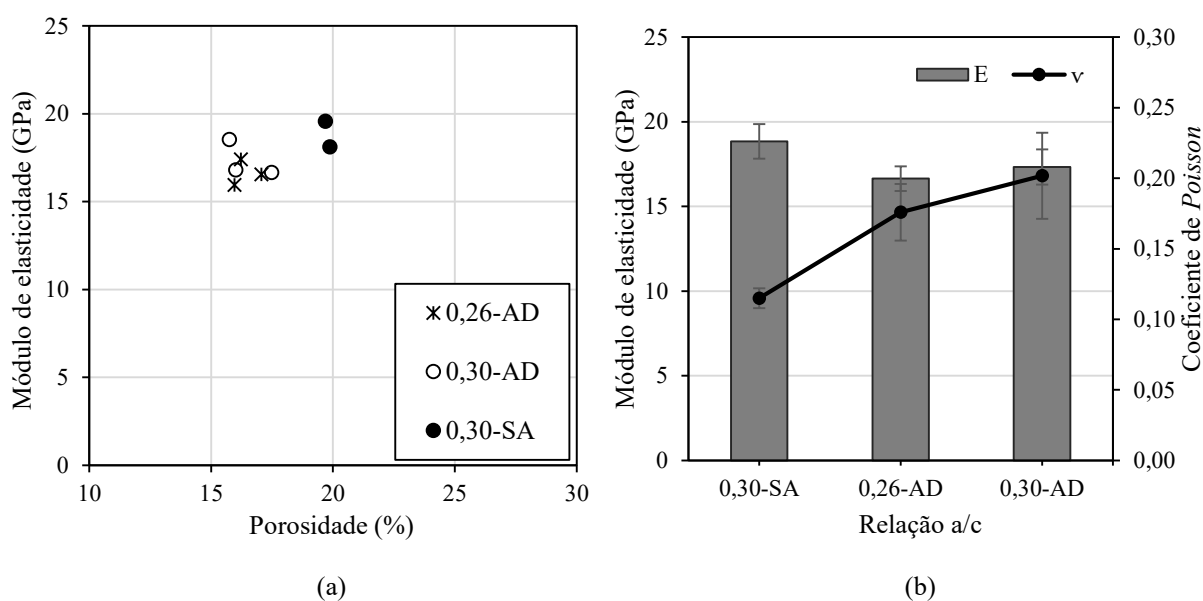


Tabela 30. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de módulo de elasticidade estático e coeficiente de *Poisson* para as misturas analisadas

Teste / Mistura	0,30-SA	0,30-AD	0,26-AD
Média MOE (GPa)	18,85	17,33	16,64
Sd	1,02	1,05	0,73
Média ν	0,12	0,2	0,18
Sd	0,02	0,03	0,02
ANOVA (valor-P)			
Teste / Mistura	E	ν	
0,30-SA vs. 0,26-AD	0,064	0,029	
0,30-SA vs. 0,30-AD	0,208	0,033	
0,26-AD vs. 0,30-AD	0,402	0,368	

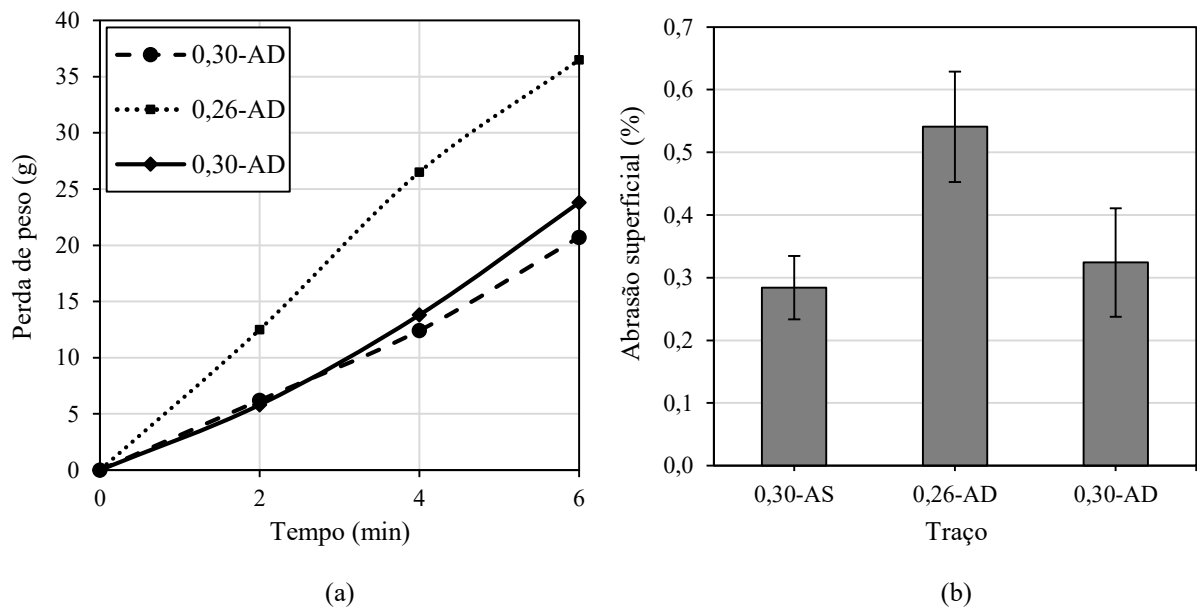
Os valores de módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* para as amostras com aditivo variaram entre 15,96 e 17,41 GPa e entre 0,15 e 0,24, respectivamente. Com base na análise estatística pode-se concluir que não houve diferença significativa entre as médias obtidas e os

valores correspondentes ao traço de referência (valor- $P > 0,05$), conforme pode ser verificado na Tabela 30.

4.2.7 Abrasão superficial

Os resultados de abrasão superficial são mostrados na Figura 43. Na Tabela 31 estão os resultados médios, assim como os desvios padrões, os coeficiente de variação e resultados da análise de variância.

Figura 43. Resultados de abrasão superficial: (a) perda de peso pelo tempo de ensaio e (b) valores médios e desvio padrão de abrasão superficial por teor de substituição



Conforme observado na Figura 43, o traço com maior abrasão foi o 0,26-AD, em média 7,9 g em cada ciclo do ensaio, o que representa uma perda de 0,32% do seu peso. Essa redução é significativamente diferente do valor correspondente à referência, com valor- $P < 0,05$, conforme pode ser verificado na Tabela 31. Tal resultado está alinhado com os menores valores de resistência mecânica obtidos para esse traço em relação aos demais.

Tabela 31. Resultados médios, desvio padrão, coeficiente de variação e análise estatística dos ensaios realizados

Teste / Mistura	0,30-SA	0,26-AD	0,30-AD
Média (%)	0,28	0,54	0,32
Sd (%)	0,05	0,09	0,09
CV (%)	17,81	16,29	26,75
ANOVA (valor-P)			
Teste / Mistura			
0,30-SA vs. 0,26-AD	0,012		
0,30-SA vs. 0,30-AD	0,334		
0,26-AD vs. 0,30-AD	0,064		

4.3 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Nessa etapa do estudo buscou-se avaliar a influência de diferentes teores de substituição do agregado natural pelo de concreto reciclado nos parâmetros físicos, mecânicos e hidráulicos das misturas. Além disso, avaliou-se o efeito da incorporação de aditivo modificador de reologia e da redução da relação a/c.

Pela análise dos resultados obtidos, uma consideração registrada foi de que o aumento do teor de agregado reciclado na mistura, em substituição ao agregado natural, aumentou a porosidade total. Além de o agregado reciclado ter uma porosidade mais elevada, esse fato também pode ser explicado devido ao agregado reciclado, britado em um britador de mandíbula, ser mais anguloso em relação ao natural, o que aumentou o atrito entre os agregados e dificulta o adensamento das amostras. Dessa forma, uma vez que a porosidade comanda as propriedades hidráulicas da mistura, o aumento do teor de agregado reciclado pode ser associado ao melhor desempenho hidráulico das misturas.

Quanto às propriedades mecânicas, com o aumento do teor de substituição por agregado reciclado, mantida a mesma relação a/c, foi verificada a redução da resistência à compressão, mas não houve diferença significativa para as demais propriedades mecânicas avaliadas (resistência à tração na flexão, módulo elástico e coeficiente de *Poisson*), ou seja, a mudança que o fator causa sobre a resposta é pequena demais comparada ao ruído experimental, não sendo possível diferenciar, sem dúvida, se é efeito do fator ou do erro experimental. Isso pode ser atribuído à alta variabilidade das amostras e do elevado desvio padrão dos resultados. Por isso, em pesquisas futuras, recomenda-se ensaiar um número maior de corpos de prova por traço.

Outra contribuição importante foi quanto ao método de compactação do concreto permeável. O *Subcommittee C09.49* recomenda o uso de compactação dinâmica com um número de golpes padrão, conforme item 2.1.2.3. No entanto, foi verificado que, por esse método, as amostras ficaram com a porosidade abaixo da projetada. Nesse sentido, foi provada a importância do controle da densidade. Ou seja, o controle da compactação não deve ser feito pelo número de golpes, e sim, da densidade. Para isso, o peso total de material foi dividido em três partes e compactada cada uma delas a 1/3 da altura do molde, variando o número de golpes por camada.

Também foi observado que o efeito da variação da relação a/c em um concreto permeável difere de um do concreto convencional. Nesse caso, a redução da quantidade de água não pode ser associada ao ganho de resistência mecânica. Foi observado que a baixa relação a/c influenciou na perda de trabalhabilidade, dificultando a compactação e, além disso, implicou no desprendimento dos agregados e, como consequência, na perda das propriedades mecânicas e no aumento da abrasão superficial. Além disso, o uso de aditivo não pode ser, necessariamente, associado ao ganho de resistência. No entanto, sua utilização melhorou as características das misturas no estado fresco, facilitando o adensamento e a compactação; por isso seu uso deve ser considerado.

Os resultados experimentais mostraram que todas as misturas propostas atenderam aos requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015). De acordo com a normativa, para o uso em revestimento de concreto permeável moldado no local, as misturas devem atingir, pelo menos, 2 MPa de resistência à tração na flexão. Dessa forma, seguindo a mesma norma, todos os teores de substituição estudados podem ser utilizados, com espessura mínima de 60 mm para o tráfego de pedestres e 100 mm para o tráfego leve. Do ponto de vista da condutividade hidráulica, em todas as misturas, o coeficiente de condutividade hidráulica mínimo foi excedido.

Dessa forma, optou-se por utilizar na concretagem da pista experimental o traço com 100% de agregado reciclado. A mistura com aditivo foi escolhida uma vez que melhora as propriedades no estado fresco e, ainda, estende o tempo de utilização, o que é essencial quando a concretagem é manual e, ainda, com temperaturas elevadas, que propiciam a rápida evaporação de água.

5 ETAPA DE CAMPO

Atendendo a um dos objetivos do trabalho, que é a verificação do desempenho do material em campo, foi construído um pavimento experimental com revestimento de concreto permeável moldado *in loco*, utilizando o traço definido na etapa de laboratório. Nesse capítulo são apresentados os procedimentos de projeto, execução da obra e ensaios referentes a essa etapa. Previamente à construção, analisou-se a viabilidade do local de implantação, após a qual realizaram-se a caracterização dos materiais e o dimensionamento da estrutura. A seguir, são mostrados todos esses procedimentos, assim como detalhes construtivos e, por fim, os ensaios realizados para avaliação de desempenho.

5.1 MATERIAIS

Nesse item são apresentadas as características do subleito do local de implantação do pavimento experimental e as propriedades dos agregados utilizados nessa etapa da pesquisa.

5.1.1 Subleito

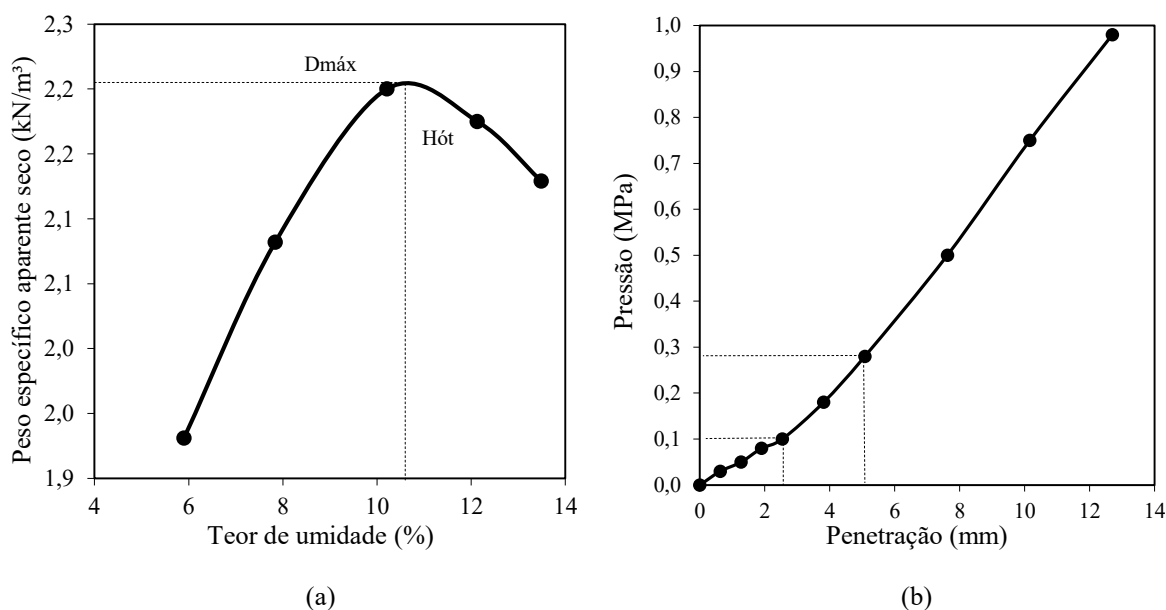
Buscando identificar os materiais existentes, assim como a possível existência de nível de água, foram realizados dois furos de sondagem a trado, próximos ao local de execução da obra. As prospecções foram feitas até a profundidade de 1,5 m, não sendo verificada a presença de nível de água, mesmo após período de chuva. A Figura 44 mostra o procedimento de sondagem.

Por classificação visual, o material existente é um solo residual jovem. Em laboratório, foi feito o ensaio de compactação na energia normal, conforme NBR7182 (ABNT, 2016), obtendo-se os parâmetros peso específico aparente seco do solo (2,205) e umidade ótima (10,6%). Também foi realizado o ensaio de Índice Suporte Califórnia (ISC ou CBR) na umidade ótima, conforme a NBR 9895 (ABNT, 2016), cujo resultado foi de 2,7%. O solo não apresentou nenhuma expansão. A Figura 45 apresenta as curvas obtidas em ambos os ensaios.

Figura 44. Sondagem a trado para a caracterização do solo



Figura 45. Ensaio de caracterização do subleito: (a) curva de compactação e (b) Índice Suporte Califórnia



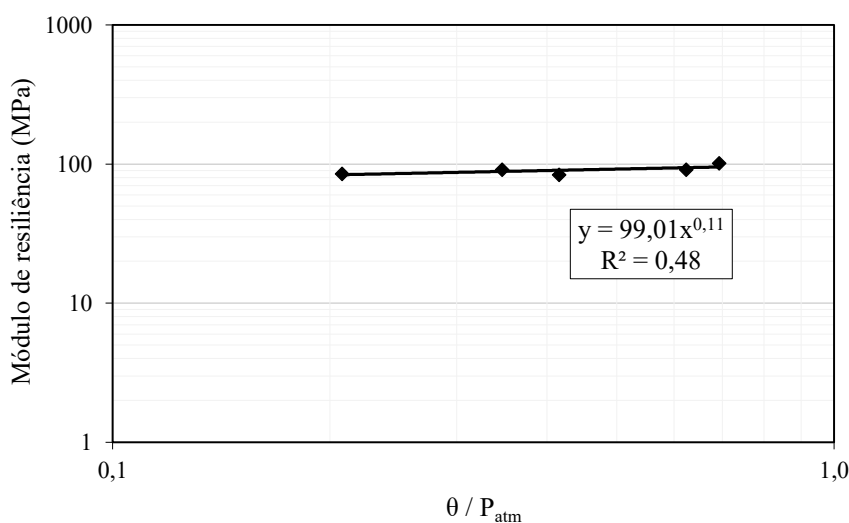
Também foi feito o ensaio de módulo de resiliência na umidade ótima, conforme procedimento padronizado pela norma DNIT 134 (2018). Esse parâmetro é de fundamental importância quando se dimensiona um pavimento. Na literatura são encontrados diversos modelos para a representação do comportamento resiliente de agregados granulares. Nessa pesquisa, modelo utilizado para o subleito é apresentado na equação 11. O *software Everstress 5.0*, utilizado no

dimensionamento estrutural, utiliza os parâmetros K_1 e K_2 como dados de entrada. O gráfico referente ao ensaio pode ser visto na Figura 46.

$$Mr = K_1 \cdot \left(\frac{\sigma_d}{P_{atm}} \right)^{K_2} \quad (11)$$

Onde σ_d é a tensão de desvio, P_{atm} a pressão atmosférica e K_1 e K_2 são parâmetros do modelo.

Figura 46. Comportamento resiliente do solo do subleito



5.1.2 Camada de reservatório granular

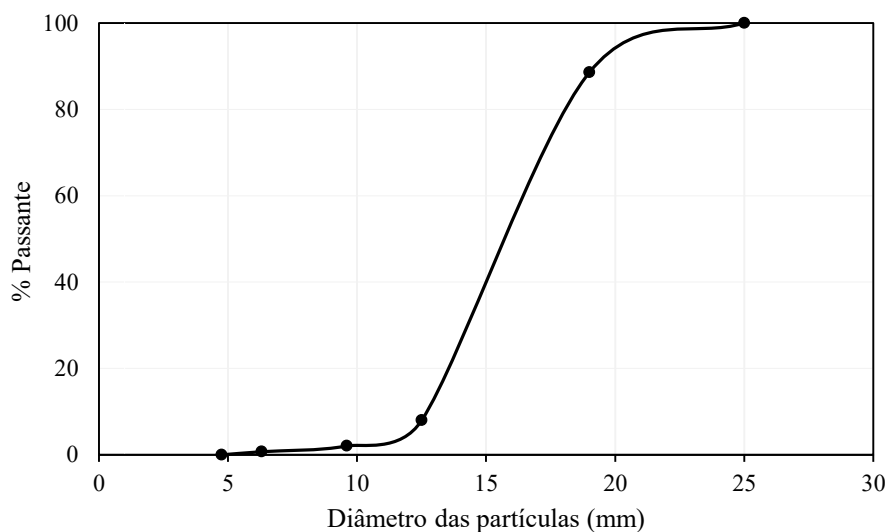
Para compor a camada de reservatório foi utilizado um agregado de granito com diâmetro máximo de 25 mm. O resumo dos resultados de caracterização do material é apresentado na Tabela 32 e a distribuição granulométrica é apresentada na Figura 47.

Tabela 32. Resumo das propriedades da brita do reservatório granular

Propriedade	Valor	Norma
Tamanho máximo (mm)	25	NBR NM 24
Material pulverulento (%)	2,20	NBR NM 24
Massa unitária (kg/dm³)	1,29	NBR NM 53
Massa específica real (kg/dm³)	2,62	NBR NM 53
Módulo de finura (%)	7,03	NBR NM 24

Fonte: Pedracon Mineração e Pavimentação.

Figura 47. Granulometria do agregado do reservatório



Fonte: Pedracon Mineração e Pavimentação.

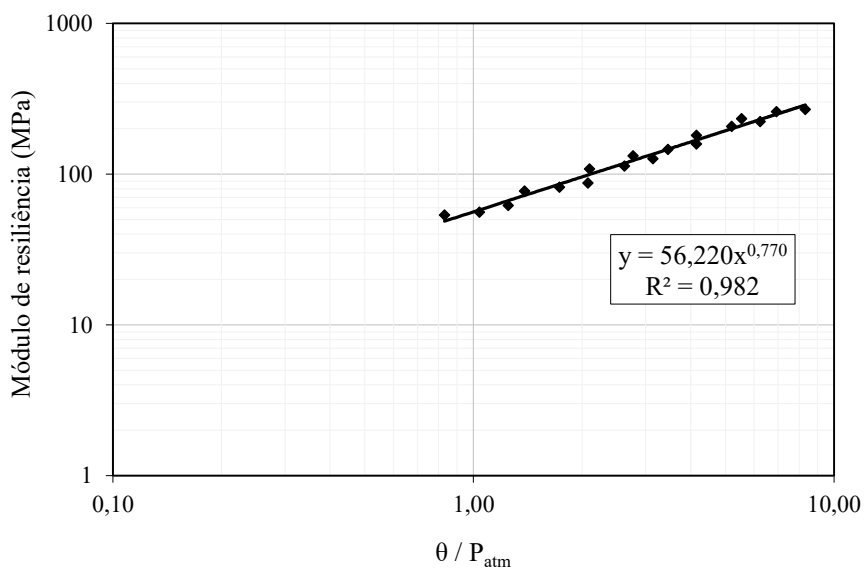
Para obter os parâmetros de entrada no *software* de dimensionamento estrutural, também foi feito o ensaio de módulo de resiliência desse material (DNIT 134, 2018). O modelo utilizado está apresentado nas equações 12 e 13. O resultado do ensaio pode ser visto na Figura 48.

$$Mr = K_1 \cdot \left(\frac{\theta}{P_{atm}} \right)^{K_2} \quad (12)$$

$$\theta = \sigma_D + 3\sigma_3 \quad (13)$$

Onde σ_3 é a tensão principal; σ_D é a tensão de desvio e P_{atm} é a pressão atmosférica

Figura 48. Ensaio de módulo de resiliência do agregado do reservatório

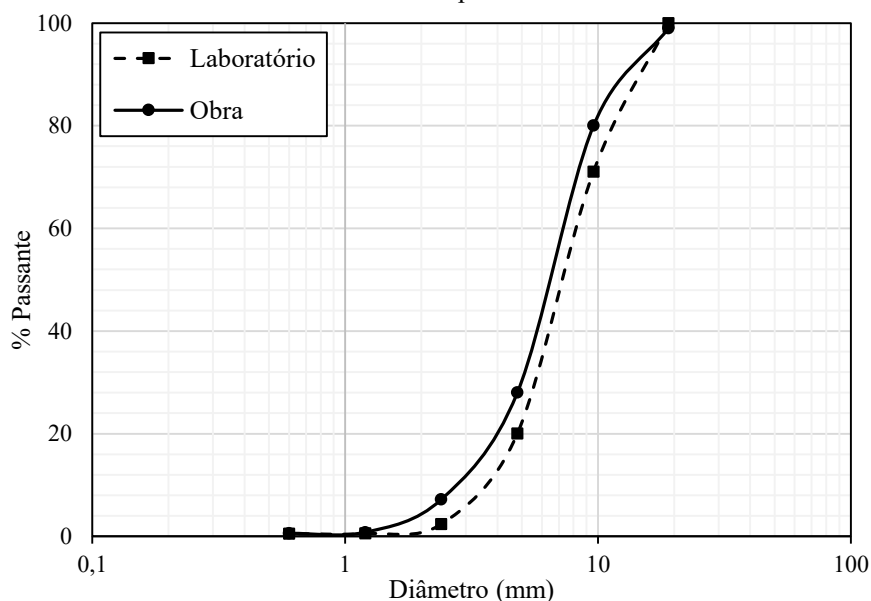


5.1.3 Revestimento em concreto permeável

Conforme mencionado no item 4.3, foi escolhido o traço de concreto permeável com 100% de agregado reciclado. Devido ao elevado volume do agregado reciclado necessário para a construção, foi necessário recorrer a outra fonte de agregado de concreto, além do material coletado para os ensaios laboratoriais.

O novo agregado de concreto reciclado foi proveniente da demolição de um contra piso de um estacionamento de veículos leves. O material foi britado no mesmo britador de mandíbula utilizado para obtenção do material para os ensaios laboratoriais. A recicladora fez a separação em “pedrisco” (fração entre 12 e 4,8 mm), “areia” (4,8 a 2,4 mm) e “pó de pedra” ($< 2,4$ mm). A Figura 49 apresenta a curva granulométrica “Obra”, resultante da mistura composta pelo agregado utilizado originalmente e o complementar coletado nas frações pedrisco e areia. Também é apresentada na Figura 49 a curva granulométrica “Laboratório”, utilizada na etapa laboratorial preliminar, que serviu como referência para compor a nova mistura.

Figura 49. Comparativo entre faixas granulométricas utilizadas na obra e nos ensaios laboratoriais preliminares



5.2 DIMENSIONAMENTO

Há diversos métodos disponíveis na literatura para o dimensionamento de um pavimento permeável. Nesse estudo, optou-se por dimensionar pelo *software PerviousPave*. Após isso, a espessura da camada granular foi verificada com base em critérios estruturais, utilizando o

Everstress 5.0 e os modelos de vida útil de acordo com o *South African Pavement Engineering Method*, desenvolvido pela *South African National Roads Agency LTD* (2013). Por fim, ainda é apresentado o dimensionamento do sistema de drenagem.

5.2.1 Utilização do *PerviousPave*

Como parâmetros de entrada no *software* de dimensionamento, foi considerado um período de projeto de 10 anos e a confiabilidade de 80%. O tráfego foi assumido como o de um “Estacionamento Residencial”, com um VDM de 400, composto em 5% por caminhões, conforme definição de tráfego leve da NBR 16.416, e crescimento anual de 1%.

Como propriedades do concreto permeável foram assumidos: 2 MPa e 12.500 MPa para a resistência à tração na flexão e o módulo de elasticidade, respectivamente. Foi adotado CBR de 2 para o subleito e, usando a calculadora do próprio programa, foi obtido coeficiente de recalque de 59,9 MPa/m.

Identificou-se na literatura um modelo Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para Porto Alegre. Assim, a partir da equação 14, para a estação pluviométrica do Posto 8º DISME, chegou-se a uma intensidade de 47,42 mm/h para um período de retorno de 10 anos e uma chuva intensa de 1 hora de duração (BRASIL, 2013).

$$i = \frac{4247,9 \cdot Tr^{0,2097}}{(t + 25,2)^{1,1199}} \quad (14)$$

Onde, Tr é o período de retorno (anos) e t é a duração da precipitação (min)

Além da área do pavimento (12,25 m²), também foi considerada uma superfície de contribuição de 50 m², cerca de quatro vezes a área permeável. O tempo máximo de retenção adotado foi de 48 horas. A porosidade do concreto permeável foi assumida como 20% e a do reservatório como 35%.

Uma limitação do *software* é considerar apenas sistemas com infiltração total, ou seja, que toda água escoe por infiltração no solo. Como no caso em estudo, não há infiltração para o solo, o *software* entende que a estrutura deve armazenar toda a água captada, gerando um reservatório muito espesso. Assim, optou-se por utilizar como dado de entrada no programa, uma taxa de

infiltração de 100 mm/h, similar a um solo arenoso como uma forma de considerar a influência dos drenos.

Além disso, inicialmente, deve ser estimada uma espessura de camada granular e, a partir dela, é feito o dimensionamento estrutural. A espessura escolhida foi de 200 mm e, com base nessas suposições, o *PerviousPave* calculou uma espessura do revestimento de concreto permeável de 177,80 mm. Complementarmente, com base no dimensionamento hidráulico realizado pelo *software*, estimou-se a espessura mínima da camada granular de 179,00 mm. No entanto, caso optasse por reduzir a espessura previamente estimada, seria necessário refazer a análise estrutural. A Figura 50 apresenta a tela de resultados exibida pelo *software*.

Figura 50. Tela com dados de saída do *PerviosPave*

The screenshot displays the PerviousPave software interface. The 'Design' tab is active, showing the results of a structural analysis. The '1. Run Structural Analysis' section includes the following data:

Parameter	Value	Unit
Anticipated Thickness of Reservoir Layer(s) used in Structural Design =	200	mm.
Composite k-value for the Subgrade and Reservoir Layer(s) =	59.9	MPa/m
Required Pervious Concrete Surface Course Thickness =	177.80	mm.

The '2. Run Hydrological Analysis' section shows:

Parameter	Value	Unit
Calculated Volume of Water Processed in the Hydrological Design =	1.8	m³

Recommendation
 The above volume of water represents the stormwater runoff needs of your facility. Your defined reservoir layer thickness is sufficient to process this volume of water within the specified detention time. You may choose to decrease your reservoir layer thickness. If you do, please re-run your structural analysis. The minimum reservoir layer thickness required is:

179	mm.	Slope Consideration
-----	-----	-------------------------------------

Nos casos em que há a inclinação da superfície, a altura máxima do reservatório é dada pela equação 15.

$$H' = H + i \cdot L \quad (15)$$

Onde i é a inclinação do terreno e L é o comprimento do reservatório na direção da mesma.

Adotando a declividade de 2% na direção transversal, com sentido às valas de infiltração, por esse método de dimensionamento, a altura mínima do reservatório deve ser de 183 mm.

5.2.2. Verificação Estrutural

Uma vez que o *PerviosPave* faz o dimensionamento da camada granular apenas por critérios hidráulicos, foi utilizado o programa computacional *Everstress 5.0* para o dimensionamento estrutural da camada. O *software* estima as tensões e deformações devido à aplicação de cargas na superfície. Como dados de entrada foram fornecidas espessura, módulo de resiliência e coeficiente de *Poisson* de cada camada, além dos valores relacionados ao carregamento, como número e localização (coordenadas dos centros) das cargas, pressão de inflação e carga por roda.

O modelo de módulo de resiliência para a camada granular foi apresentado no item 5.1.2, de onde são obtidos os valores 56,220 e 0,770 para K_1 e K_2 , respectivamente, dados informados ao *software*. Foi adotado o coeficiente de *Poisson* de 0,35. Da mesma forma, conforme apresentado no item 5.1.1, para o solo do subleito, foram obtidos valores de 99,012 para K_1 , 0,106 para K_2 e coeficiente de *Poisson* de 0,40 foi adotado. Na Tabela 33, são resumidas as características dos materiais e espessuras das camadas.

Tabela 33. Características dos materiais e espessura das camadas

Camada	e (mm)	ν	K_1	K_2	MR (MPa)
Revestimento	18	0,20	-	-	12.500
Sub-base	20	0,35	56,220	0,770	-
Subleito	-	0,40	99,012	0,106	-

Para o dimensionamento, foi utilizado a carga de “eixo-padrão”, considerando-se apenas o semieixo e carga de 20.500 N em cada roda. Para fins de cálculo, considerou-se esse carregamento como uniformemente distribuído sobre um círculo cujo diâmetro depende na pressão aplicada pelos pneus, que foi considerada como 560 kPa. A distância entre as rodas dos eixos foi considerada 30 cm. A avaliação das tensões, deflexões e deformações foi feita em pontos abaixo do centro da roda e no ponto intermediário entre os dois pneus, ou seja, 15 cm em relação ao centro das rodas.

A partir das informações de tensões e deformações obtidas no *Everstress 5.0*, foram estimados o comportamento e a vida útil para a estrutura a partir dos modelos propostos pela *South African*

National Roads Agency (2013). A camada granular foi verificada quanto a ruptura por cisalhamento da camada granular (CCG), que têm as tensões principais atuantes no meio dessa camada como parâmetros críticos de degradação, utilizando os modelos apresentados nas equações 16 e 17.

$$N = 10^{(\alpha F + \beta)} \quad (16)$$

$$F = \frac{\sigma_3 \phi_{term} + C_{term}}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (17)$$

Onde N é o número de carregamentos aplicados até a ruptura por cisalhamento da camada granular, σ_1 e σ_3 são as tensões principais maior e menor no centro da camada granular e α , β , ϕ_{term} e C_{term} são parâmetros do modelo.

Para α e β foram adotados os parâmetros referentes à confiabilidade de 80%, e para os valores de ϕ_{term} e C_{term} , considerou-se a condição saturada. A Tabela 34 apresenta os parâmetros utilizados e o resultado da verificação quanto ao cisalhamento da camada granular.

Tabela 34. Resultados do dimensionamento estrutural da camada granular

σ_1	σ_3	α	β	ϕ_{term}	C_{term}	F	N_{CCG}
16,410	2,580	2,605	3,983	1,760	64	4,956	7,8E+16

Para a avaliação da deformação permanente (DP) no topo do subleito, a resposta estrutural crítica é a deformação vertical, sendo considerado o modelo apresentado na equação 18.

$$N_{DP} = 10^{(a - 10 \log \epsilon_v)} \quad (18)$$

Onde N_{DP} é o número de carregamentos aplicados até a máxima DP admissível, a é parâmetro de acordo com o nível de confiabilidade e afundamento máximo aceito na rodovia e ϵ_v é a deformação de compressão vertical no topo do subleito.

Considerou-se uma rodovia de classe C, à qual corresponde confiabilidade de 80%, e deformação máxima admissível de 10 mm. A Tabela 35 apresenta o resultado da verificação quanto à deformação permanente no topo do subleito.

Tabela 35. Verificação da deformação permanente no topo do subleito

a	ϵ_v	N_{DP}
33,47	48,55	4,1E+16

5.2.3 Porosidade do reservatório

Para atingir a porosidade projetada em campo, foi determinado o peso específico (γ_d) da camada granular, através da equação 19. Multiplicando-se o peso específico obtido para uma porosidade de 35% pelo volume da camada do reservatório, determinou-se que o peso de brita necessário de 4.768 kg.

$$\gamma_d = (G_s \cdot \gamma_w) \cdot (1 - n) \quad (19)$$

Onde γ_d é o peso específico da camada, G_s é a densidade real dos grãos, γ_w é o peso específico da água e n é a porosidade

5.2.4 Tubos de drenagem

Sendo um sistema sem infiltração, toda a água que infiltra no pavimento deve escoar pelo sistema de drenagem. Assim, o dreno deve coletar toda a água da chuva, considerando a intensidade e o período de projeto, subtraindo-se a fração que escoa superficialmente. Para o dimensionamento dos drenos considerou-se o método racional, calculando-se a vazão por meio da equação 20.

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad (20)$$

Onde, Q é a vazão (m^3/s); C é o coeficiente de escoamento (adimensional); i é a intensidade média da chuva (m/s) e A é a área de contribuição (m^2)

Foram considerados como coeficientes de escoamento os valores de 0,5 para a área de contribuição e de 1,0 para a área permeável, ou seja, foi considerado que toda a água que incidir sobre o revestimento infiltre. Assim, chegou-se a vazões de $1,16 \text{ m}^3/\text{h}$ e $0,58 \text{ m}^3/\text{h}$ para a área de contribuição e para a área permeável, respectivamente. Tem-se, portanto, uma vazão total de $1,74 \text{ m}^3/\text{h}$, o que equivale a uma altura efetiva de água de chuva sobre o pavimento permeável de $0,14 \text{ m}$ ($1,74 \text{ m}^3/\text{h} / 12,25 \text{ m}^2$).

Para o dimensionamento do diâmetro necessário para os tubos de drenagem, foi utilizado Manning, conforme a equação 21.

$$D = \left(\frac{Q \cdot n}{0,312 \cdot I^{1/2}} \right)^{3/8} \quad (21)$$

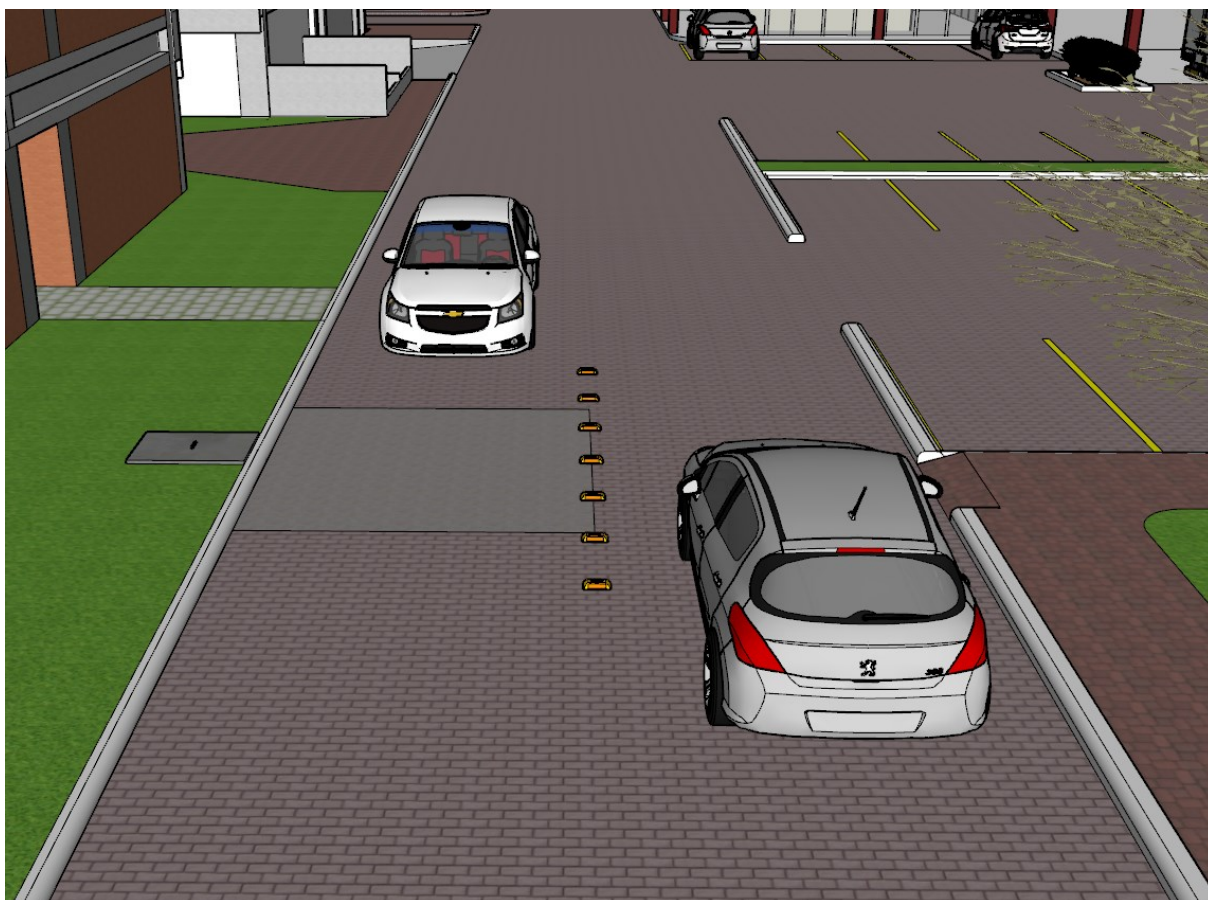
Onde D é o diâmetro em m; Q é a vazão em m^3/s ; n é o coeficiente de rugosidade de Manning e I é a declividade em m/m.

Considerando que cada um dos tubos conduza a metade da vazão calculada, um coeficiente de rugosidade de 0,025 para o tubo corrugado e a inclinação de 2%, o diâmetro necessário calculado foi de 35,60 mm para funcionamento a seção plena. A favor da segurança, optou-se por utilizar tubos corrugados com diâmetro de 100 mm.

5.3 PROJETO

Um módulo experimental de, aproximadamente, $12,5 \text{ m}^2$ foi construído em uma área de acesso a um estacionamento no Campus do Vale da UFRGS, conforme pode ser observado na Figura 51. O local foi escolhido por ser uma área de passagem de veículos leves, livre de interferências e de fácil acesso.

Figura 51. Local de implantação do módulo experimental

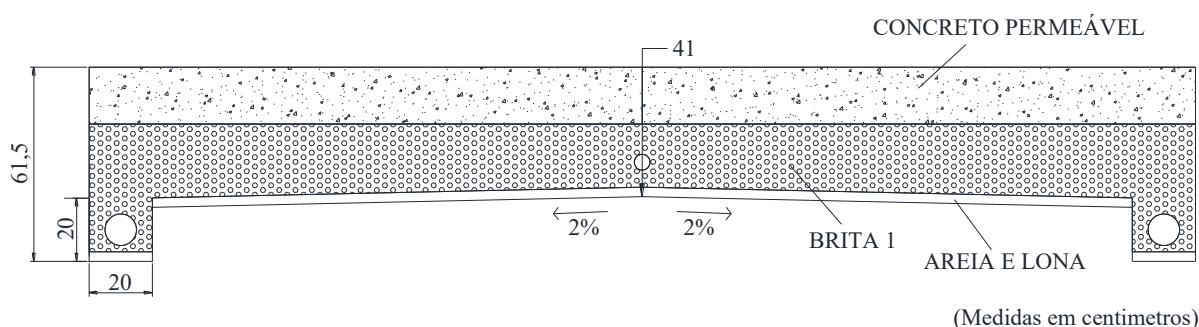


A estrutura executada tem camada granular com espessura média de 20 cm e revestimento de 18 cm. Uma manta foi instalada no fundo do reservatório com o objetivo de impermeabilizar o

subleito. A declividade da superfície inferior do reservatório (2%) conduz a água captada para o sistema de drenagem. A seção transversal do pavimento é apresentada na Figura 52.

O sistema sem infiltração foi escolhido uma vez que pesquisas recentes verificaram, através da avaliação do ciclo de vida de pavimentos permeáveis, que o maior ganho ambiental de aplicação de um pavimento permeável em relação a um revestimento convencional está associado à característica de infiltração e reaproveitamento da água (CALDAS *et al.*, 2017; LU *et al.* (2018). Dessa forma, além da experiência em relação ao método construtivo, outras vantagens podem ser associadas ao uso da manta impermeável, como evitar a instabilidade ou perda de resistência do solo em contato com a água e, também, evitar o bombeamento de finos do solo para as camadas superiores, provocando a colmatção.

Figura 52. Seção transversal do pavimento implantado



5.4 CONSTRUÇÃO

A seguir é apresentado detalhadamente o procedimento de execução do pavimento experimental, que foi construído em março de 2020. A análise crítica dessa etapa será apresentada no Capítulo 6.

5.4.1 Serviços preliminares

Previamente à realização da obra, o local foi isolado e sinalizado, conforme apresentado na Figura 53. Após isso, foi feita a limpeza e a retirada do revestimento existente.

Figura 53. Sinalização e limpeza do local da obra



5.4.2 Escavação e preparo do subleito

O procedimento de escavação e preparo do subleito pode ser visto na Figura 54.

Figura 54. Serviços de escavação e compactação do subleito



Após a área ser delimitada e sinalizada, foi realizada a escavação mecânica até a cota de projeto. A superfície escavada foi regularizada e compactada com o auxílio de uma mesa vibratória. Nessa etapa tomou-se o cuidado para garantir as declividades de 2% para cada extremidade, onde foram assentados os tubos corrugados para a drenagem da água infiltrada.

5.4.3 Instalação de manta impermeável

O fundo do reservatório foi impermeabilizado com uma lona de polietileno de 2 mm, instalada logo após a compactação do subleito. Previamente à instalação da manta impermeável, o subleito foi limpo para a retirada de pedregulho e materiais que poderiam danificá-la. A manta tem 2 m de largura e foi instalada com transpasses de cerca de 10 cm, com a utilização de fita *tape* nas emendas, conforme pode ser visto na Figura 55.

Inicialmente, havia sido projetada a fixação da manta por ancoragens em canaletas no contorno do pavimento, conforme descrito por Virgiliis (2009). No entanto, para evitar a colmatagem do concreto permeável com o material de assentamento das peças de concreto intertravado, assentadas no entorno da pista, optou-se por recortar a lona rente à parede lateral do revestimento.

Para garantir a integridade da membrana, cerca de 3 cm de areia foram espalhados acima dela. Dessa forma, reduz-se a possibilidade de ser perfurada pela camada de brita compactada sobre ela.

Figura 55. Instalação da manta sobre o subleito



5.4.4 Implantação dos dispositivos de drenagem e coleta de água

Projetou-se um sistema de drenagem da água infiltrada com tubos corrugados, com diâmetro de 100 mm. Os tubos foram assentados em valetas laterais nas cotas mais baixas do reservatório e envoltos por uma manta geotêxtil para evitar o entupimento com a entrada de finos. Esses tubos foram conectados a tubos lisos para levar a água até o sistema de drenagem existente.

Na parte central do pavimento, foi instalada uma tubulação auxiliar para coleta de água. Buscando preservar a qualidade da água, optou-se por colocar um reservatório de polietileno vedado com tampa dentro da caixa de coleta. Em geral, esse sistema ficará desativado até ocorrer algum estudo específico para avaliar a qualidade da água infiltrada. A instalação do sistema de drenagem e de coleta de água pode ser visto na Figura 56.

Figura 56. Sistema de drenagem e coleta de água



5.4.5 Execução da camada de reservatório

O material do reservatório granular foi espalhado manualmente e compactado em duas camadas de 10 cm com o auxílio de uma mesa vibratória. O procedimento pode ser visto na Figura 57.

Figura 57. Execução da camada granular



5.4.6 Preparo e aplicação do concreto permeável

A mistura foi feita em uma betoneira com capacidade de 400 l e os agregados foram dosados em caixas, correspondente a um saco de cimento de 40 kg. O método de controle de qualidade foi o mesmo utilizado em laboratório, através da verificação da consistência e da cobertura dos agregados. O procedimento de dosagem e mistura pode ser visto na Figura 58.

Duas grandes preocupações nessa etapa foram: o controle da densidade e o tempo de aplicação da mistura do concreto permeável. Dessa forma, optou-se em dividir a área a ser concretada, estimando a volume de material necessário por faixa. Com o objetivo de aproveitar o rolo de compactação utilizado em laboratório, com comprimento de 85 cm, optou-se por dividir a área em cinco faixas de 70 cm. Após a execução das formas, a concretagem foi feita em faixas alternadas, retirando a madeira lateral para concretar a faixa adjacente. Antes do lançamento do concreto, a camada de base foi umedecida para evitar que a água do concreto fosse removida muito rapidamente. Após a concretagem, foi borrifada água e a camada permaneceu coberta

com lona plástica durante o período de cura. O procedimento de execução do revestimento pode ser visto na Figura 59.

Figura 58. Dosagem e mistura: (a) dosagem em volume; (b) mistura em betoneiras e (c) controle da consistência



Figura 59. Execução do revestimento de concreto permeável



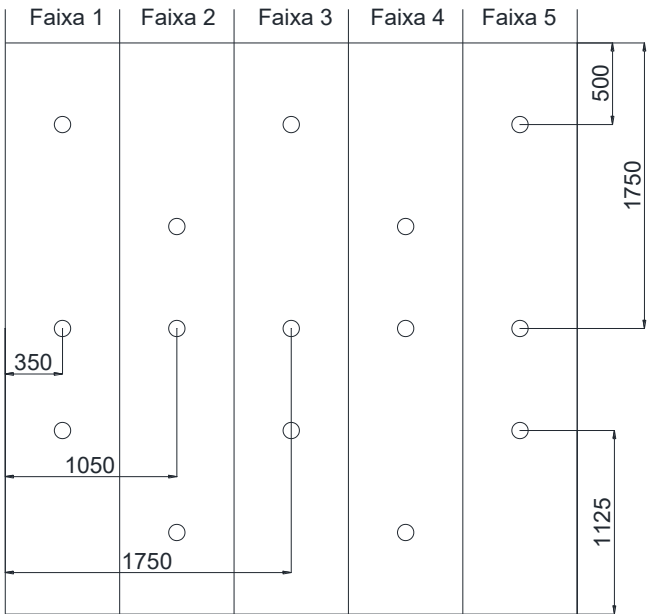
5.5 VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Para a avaliação do desempenho inicial do pavimento foram extraídos corpos de prova para a realização dos ensaios laboratoriais. Também foi verificada a taxa de infiltração *in situ* e o desempenho estrutural através da medida de deflexões superficiais.

5.5.1 Ensaios laboratoriais

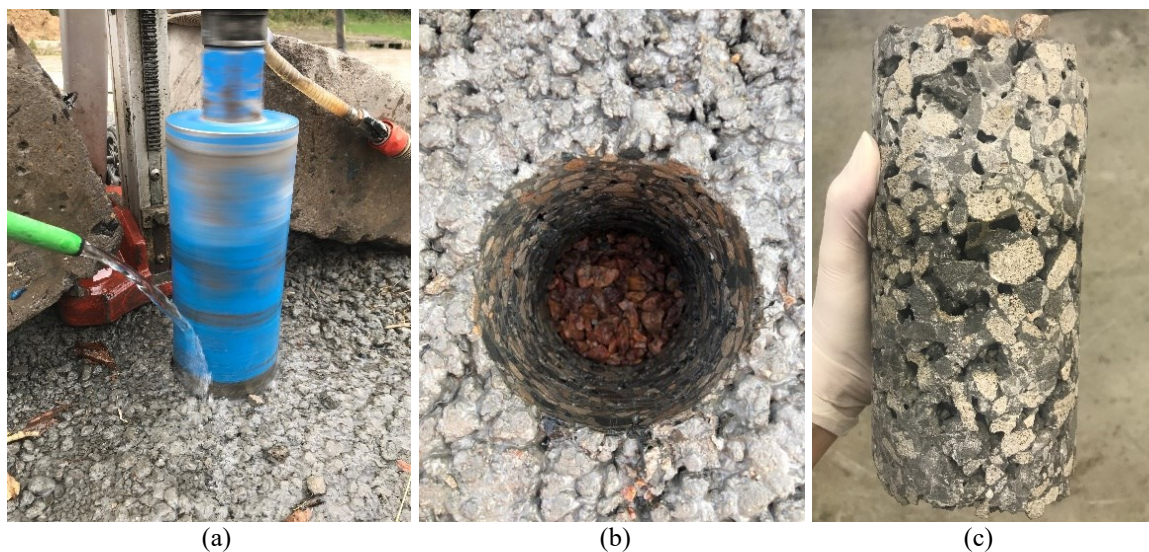
Foram realizados ensaios laboratoriais de porosidade, massa específica, condutividade hidráulica, taxa infiltração e resistência à compressão, conforme procedimentos apresentados na seção 3.3. Foram extraídos quinze corpos de prova, conforme croqui da Figura 60, cujas medidas estão em mm.

Figura 60. Croqui dos locais de extração dos corpos de prova



A extração dos corpos de prova foi realizada com o auxílio de uma serra copo, como pode ser visto na Figura 61.

Figura 61. Extração de corpos de prova: (a) equipamento de extração; (b) cavidade após a extração do corpo de prova e (c) aspecto de um corpo de prova extraído



5.5.2 Ensaios de campo

5.5.2.1 Taxa de infiltração *in situ*

Seguindo o procedimento de ensaio da ASTM C1701 (2017), foi utilizado um cilindro com diâmetro de 300 mm, que foi assentado sobre a superfície com o emprego de massa de calafetar. Foram realizados dois ensaios por faixa em locais escolhidos aleatoriamente. O procedimento de ensaio pode ser visto na Figura 62.

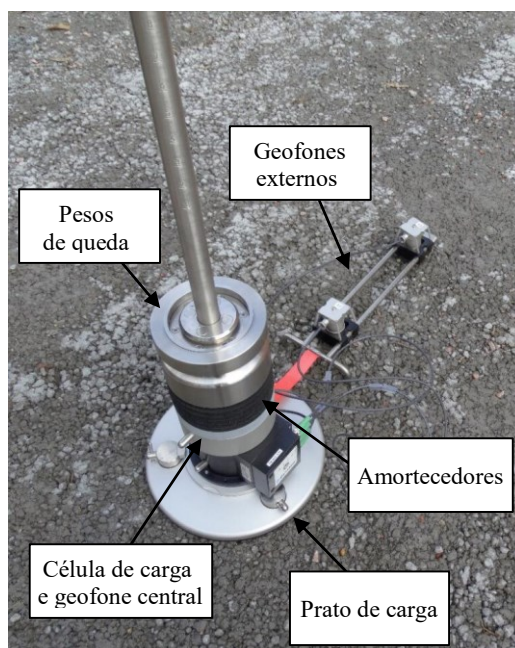
Figura 62. Ensaio de determinação da taxa de infiltração *in situ*



5.5.2.2 Avaliação estrutural

Foi realizada a análise da condição estrutural do pavimento com o uso de um LWD (*Light Weight Deflectometer*). O dispositivo mede, através de uma célula de carga de alta precisão, o valor máximo da força de impacto da queda de pesos, sendo os deslocamentos (deflexões) medidos em até três geofones acoplados. O modelo do equipamento utilizado é o *Dynatest 3032* LWD, cuja configuração é apresentada na Figura 63.

Figura 63. Configuração do Light Weight Deflectometer



Utilizando placas de carregamento de 300 e 150 mm de diâmetro, os testes foram repetidos com as massas de queda de 10, 15 e 20 kg, caindo de uma altura de cerca de 85 cm e produzindo forças máximas de 6,7; 9,6 e 12,2 kN, respectivamente. Além da deflexão sob o centro da placa de carga (D0), outros dois geofones foram colocados em espaçamentos 315 e 600 mm de distância em relação ao ponto de aplicação da carga, permitindo a medida das deflexões a essas distâncias.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CAMPO

Nesse capítulo serão discutidos os procedimentos de construção e os resultados dos ensaios de verificação de desempenho realizados.

6.1 AVALIAÇÃO DO PROCESSO CONSTRUTIVO

6.1.1 Reservatório granular

Após a compactação da camada granular, foi feita a verificação da densidade *in situ* pelo método do frasco de areia (DNER-ME 92, 1994), como mostrado na Figura 64. Pela análise dos resultados obtidos, apresentados na Tabela 36, verificou-se que a porosidade da camada ficou próxima à estimada no item 5.2.3, de 35%.

Figura 64. Execução do ensaio de cone de areia



Tabela 36. Porosidade da camada compactada

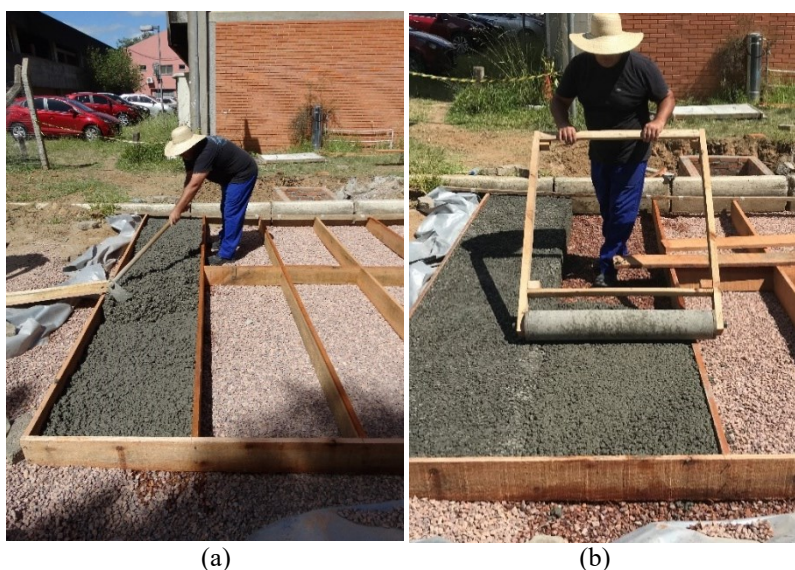
Propriedade	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
γ_d (g/cm ³)	1,82	1,61	1,66
G_s	2,62	2,62	2,62
$n_{atingida}$	0,31	0,39	0,37

6.1.2 Revestimento

Conforme comentado no item 5.2.5, o revestimento foi concretado em cinco etapas, visando o controle da densidade e do tempo de execução, uma vez que o procedimento de lançamento e compactação foi manual. É relevante comentar que a ideia inicial era executar a mistura com o auxílio de um caminhão betoneira. No entanto, as empresas locais se mostraram receosas em executar a mistura permeável devido a sua consistência. Outro problema apontado foi de substituir o agregado natural pelo reciclado, por uma questão de logística.

Para cada faixa, foram necessários 530 kg de concreto, correspondendo a três concretagens. Na primeira faixa, optou-se por espalhar o concreto em toda a extensão da forma e a quantidade complementar de concreto foi adicionada sobre essa, compactando com rolo apenas a última camada, após todo o concreto ter sido lançado (Figura 65-a). No entanto, foram identificados vários problemas nesse método de execução. O primeiro deles, foi que a quantidade de material estimada foi insuficiente para atingir a altura da forma, sendo necessário acrescentar mais, o que interfere na densidade. Além disso, verificou-se que o concreto ficou com a superfície muito exposta e, devido à elevada temperatura do dia (cerca de 30 °C), foi verificado o endurecimento superficial precoce. Também, devido a isso, o concreto adicionado para o acabamento, por não ter aderência ao concreto endurecido, acabou desprendendo. O tempo de execução dessa primeira faixa foi de 80 minutos, aproximadamente.

Figura 65. Procedimento de execução do revestimento: (a) faixa piloto e (b) etapas posteriores com adaptação do método de lançamento



Após a execução da faixa piloto, o processo foi suspenso para adaptar o método de lançamento e compactação. Assim, nas demais faixas, optou-se por lançar o concreto em camada única até cerca de 2 cm acima da borda. Imediatamente após ser lançada, a mistura era compactado com o rolo (Figura 65-b). Isso possibilitou um melhor controle da densidade, não sendo necessário adicionar material além do previsto, como ocorreu na primeira faixa concretada. Além disso, o tempo de concretagem e compactação foi reduzido para cerca de 40 minutos.

6.2 VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Esse item discute o desempenho da pista experimental através dos ensaios laboratoriais (porosidade, densidade no estado endurecido, condutividade hidráulica, taxa de infiltração, resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade), dos resultados de taxa de infiltração *in situ*, das deflexões obtidas e dos resultados da retroanálise.

6.2.1 Ensaios laboratoriais

Esse item discute os ensaios realizados em corpos de prova extraídos da pista experimental. São apresentados os resultados individuais e os valores médios para cada faixa concretada. Os resultados dessa etapa são comparados aos da fase laboratorial preliminar, correspondente ao traço 0,30-AD.

6.2.1.1 Porosidade e densidade no estado endurecido

Na Figura 66 é possível observar os resultados de porosidade e densidade real no estado endurecido para todas as amostras extraídas e as médias obtidas para cada faixa.

Na Tabela 37 podem ser observados os valores médios e desvio padrão por faixa concretada. O resultado médio de porosidade da pista experimental foi de 16,63%, cerca de 6% inferior à média dos corpos de prova moldados em laboratório (traço 0,30-AD). No entanto, usando-se a técnica de análise de variância, verificou-se que essa diferença não foi significativa. Em relação à densidade no estado endurecido, o valor médio da pista experimental ficou em 1836 kg/m³, cerca de 6,7% inferior ao valor médio do traço 0,30-AD. Os elevados valores de desvio padrão para as amostras extraídas da pista experimental evidenciam a variação de energia de compactação entre os locais analisados.

Figura 66. Resultados de densidade real no estado endurecido: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios por faixa concretada

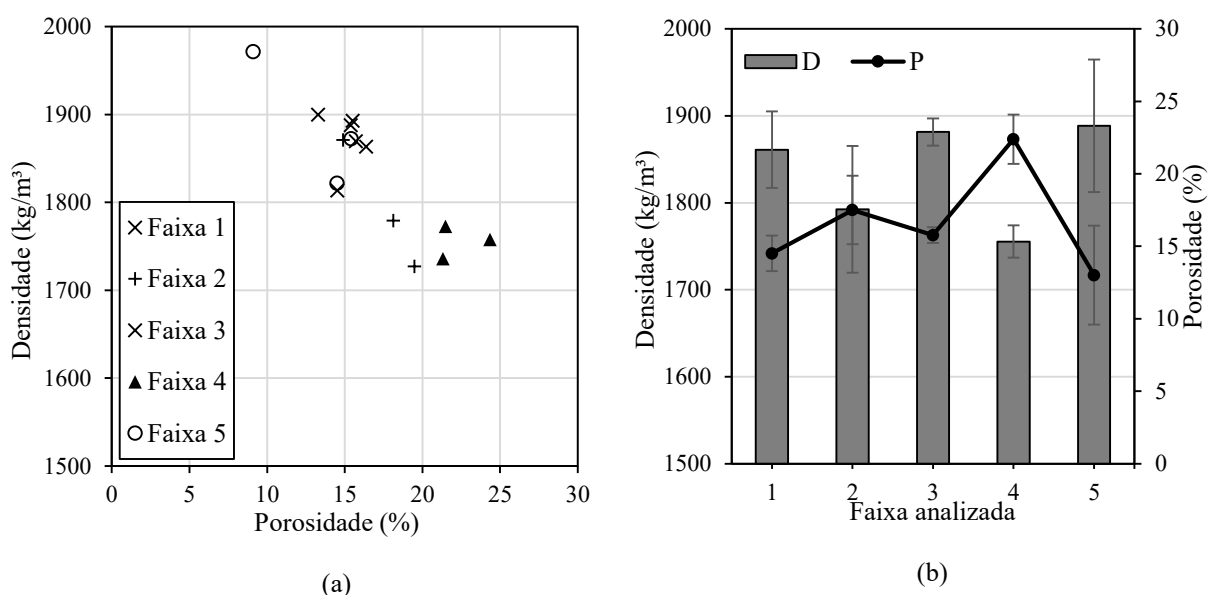


Tabela 37. Valores médios e desvios-padrão de densidades e porosidade de acordo com a faixa concretada

Teste / Mistura	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5
Média P (%)	14,51	17,50	15,76	22,39	13,01
Sd (%)	1,22	2,36	0,54	1,70	3,41
Média D (kg/m³)	1861	1792	1881	1755	1889
Sd (kg/m³)	44	73	16	19	76

6.2.1.2 Taxa de infiltração

Na Figura 67 é possível observar os resultados de porosidade e taxa de infiltração para todas as amostras extraídas, assim como os médias por faixa. Na Figura 67 (b) é possível observar que a faixa 4 apresentou uma taxa de infiltração média discrepante das demais, o que pode ser associado à elevada porosidade obtida naquele local. O resultado médio de taxa de infiltração obtido para a pista foi de 11.207 mm/h. Esse valor é cerca de 13,4% inferior à média dos valores obtidos na etapa laboratorial; entretanto, na análise de variância essa diferença não se mostrou significativa. Na Tabela 38 mostram-se os valores médios e desvio padrão por faixa concretada.

Figura 67. Taxa de infiltração: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios por faixa concretada

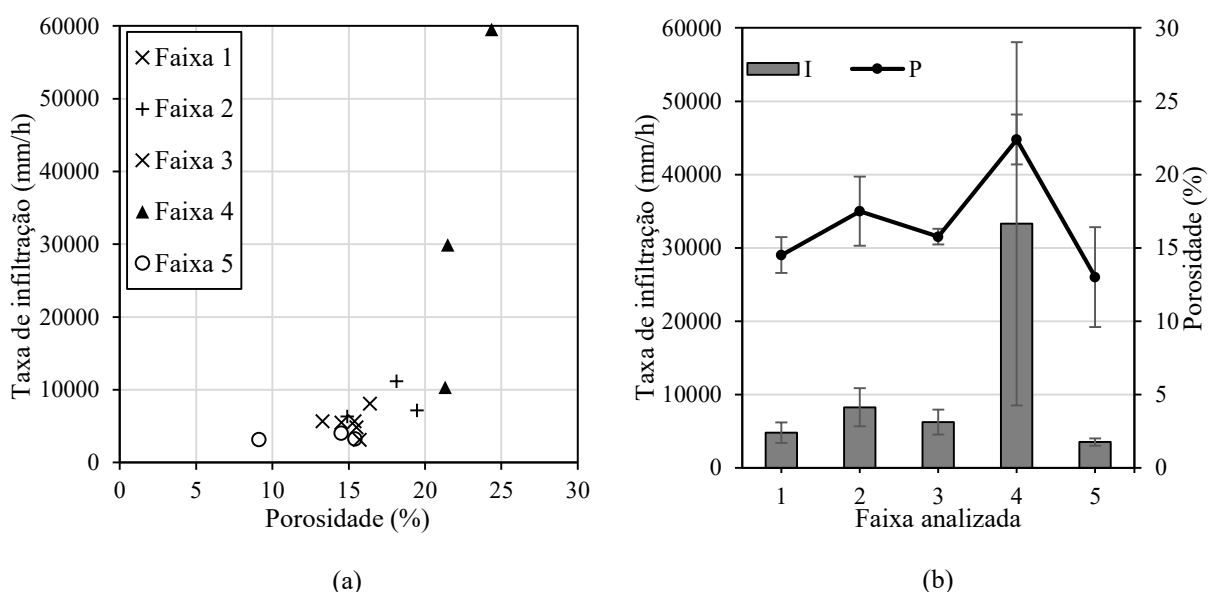


Tabela 38. Valores médios e desvios-padrão de taxa de infiltração e porosidade de acordo com a faixa concretada

Teste / Mistura	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5
Média I (mm/h)	4.777	8.252	6.221	33.281	3.504
Sd (mm/h)	1.403	2.592	1.706	24.768	492

6.2.1.3 Condutividade hidráulica

Na Figura 68 podem ser observados os resultados de porosidade e de condutividade hidráulica para todas as amostras extraídas, assim como os resultados médios por faixa. Os valores médios e desvio padrão por faixa concretada estão na Tabela 39.

Conforme pode ser verificado na Figura 68 (a), os resultados de dois corpos de prova ficaram abaixo de 1mm/h, mínimo recomendado pela NBR 16.416. Esses corpos de prova foram extraídos das faixas 2 e 4. No entanto, o resultado médio de condutividade hidráulica da pista ficou em 14,35 mm/s. Embora essa média seja cerca de 25% superior à obtida na etapa de laboratório, por análise de variância, essa diferença não pode ser considerada significativa (valor-P > 0,05).

Figura 68. Resultados de condutividade hidráulica: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios por faixa concretada e porosidade

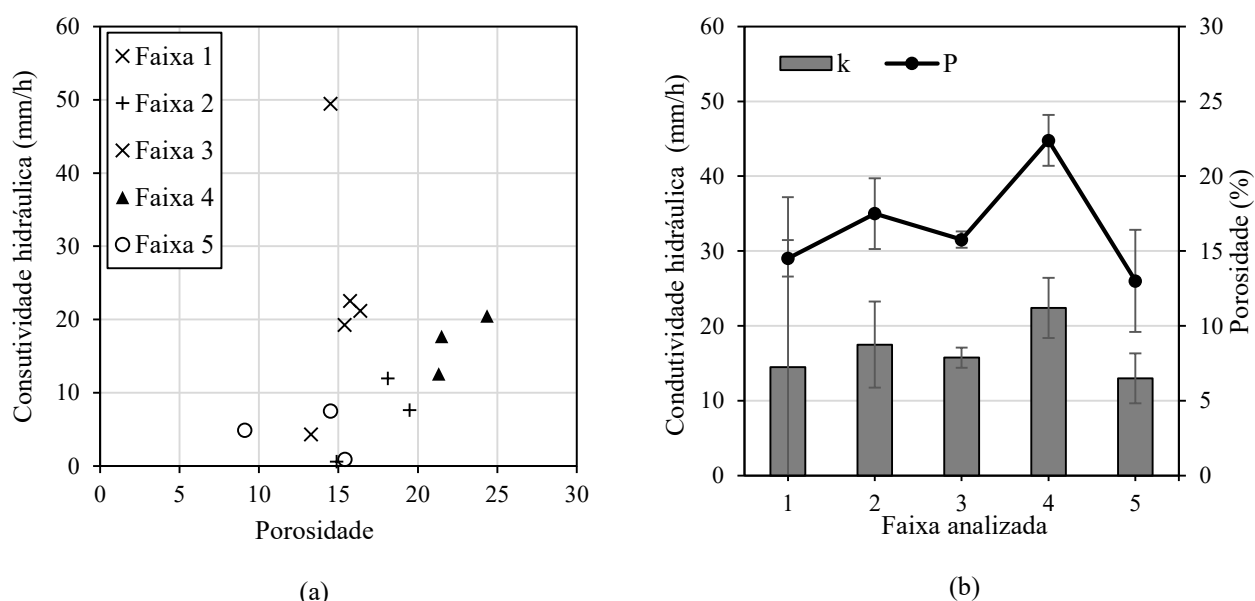


Tabela 39. Valores médios, desvios-padrão e análise estatística de condutividade hidráulica por faixa concretada

Teste / Mistura	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5
Média k (mm/s)	25,44	6,72	20,23	16,91	4,43
Sd (mm/s)	22,70	5,75	1,36	4,02	3,33

6.2.1.4 Resistência à compressão uniaxial

Na Figura 69 podem ser observados os resultados de porosidade e de resistência à compressão para todas as amostras extraídas, assim como os resultados médios por faixa. Na Tabela 40 apresentam-se os valores médios e desvio padrão por faixa concretada.

A média dos resultados de resistência a compressão da pista experimental foi 9,24 MPa, que corresponde a uma redução de 37% em relação ao valor de amostras moldadas em laboratório. Através da análise de variância, verificou-se que a diferença apresentada é significativa (valor-P de 0,001).

A diferença entre valores obtidos em amostras extraídas da pista e moldadas em laboratório pode ser explicada devido ao método de compactação: em laboratório ocorre a compactação com golpes de um soquete, enquanto em campo, é através de um rolo metálico. Além disso, algumas amostras extraídas podem ter sido danificadas durante a extração, gerando fissuras

(COSTA *et al.*, 2018). Conclusões semelhantes sobre a discrepância entre os valores de amostras de campo e preparadas em laboratório foram relatadas por Alshareedah *et al.* (2019).

Figura 69. Resultados de resistência à compressão: (a) valores para todos os corpos de prova em relação à porosidade e (b) valores médios por faixa concretada e porosidade

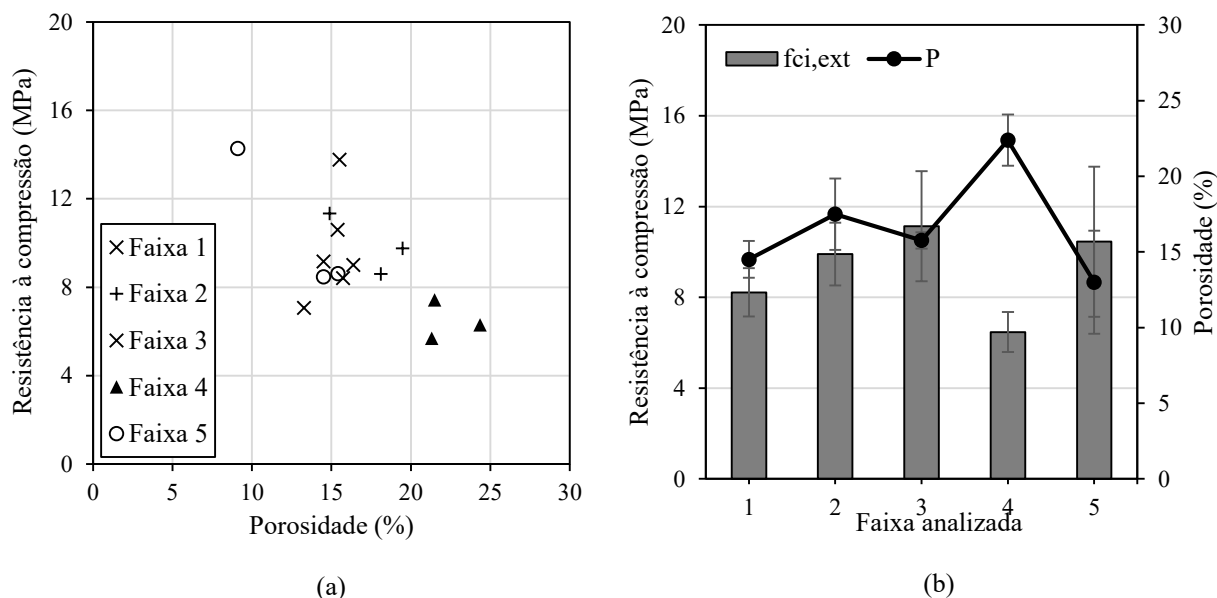


Tabela 40. Valores médios, desvios de resistência à compressão por faixa concretada

Teste / Mistura	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5
Média fci,ext (MPa)	8,22	9,91	11,13	6,47	10,46
Sd (MPa)	1,06	1,38	2,43	0,88	3,31

6.2.1.5 Módulo de elasticidade

Foram realizados ensaios de módulo de elasticidade à compressão em cinco corpos de prova, um por faixa concretada, a fim de obter um valor médio representativo de toda a pista experimental. Os resultados obtidos ficaram entre 9.801 e 18.930 MPa, onde a variação entre os valores pode ser explicada pela divergência entre a porosidade das amostras.

O resultado médio para a pista experimental ficou em torno de 13.600 MPa, cerca de 22% inferior aos resultados obtidos na etapa laboratorial. No entanto, através da análise de variância, verificou-se que essa diferença não é significativa.

6.2.2 Ensaios de campo

Nessa seção serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de infiltração *in situ*, as deflexões superficiais medidas campo e os módulos de elasticidade obtidos através da retroanálise.

6.2.2.1 Taxa de infiltração *in situ*

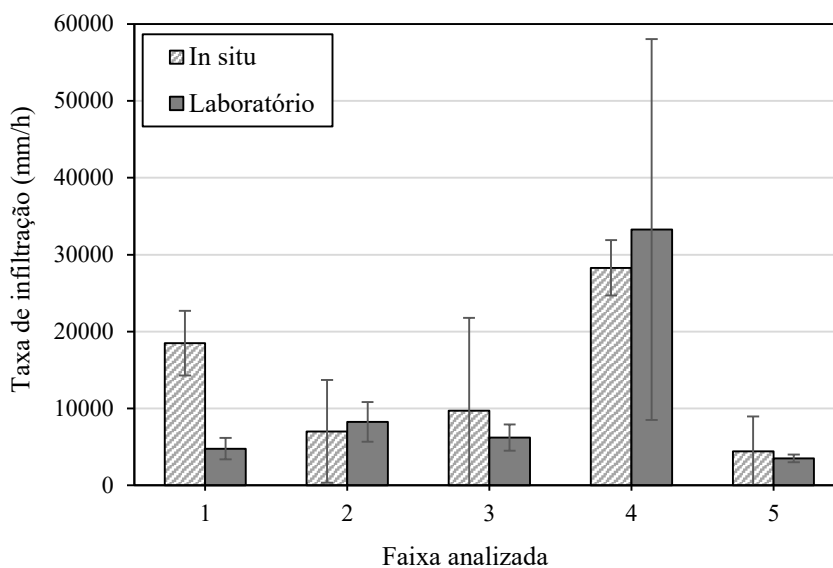
O ensaio foi feito em 29/03/2020, 25 dias após a concretagem da pista. Foram feitos dois ensaios por faixa e a taxa de infiltração foi calculada pela equação 4 (item 3.3.3). A Tabela 40 apresenta os resultados obtidos, assim como a média e o desvio padrão por faixa concretada.

Tabela 41. Resultados do ensaio de taxa de infiltração realizados na pista

Faixa	Ponto	I (mm/h)	Média	Sd
1	1	15.512	18.485	4.206
	2	21.459		
2	9	1.231	4.435	4.533
	4	7639		
3	3	2.292	7.022	6.690
	4	11.753		
4	7	30.835	28.286	3.605
	8	25.736		
5	5	18.236	9.721	12.042
	6	1.206		

Além disso, uma comparação entre os resultados médios obtidos nos ensaios de campo e de laboratório são apresentados Figura 70. As médias dos ensaios *in situ* foram cerca de 21% superiores às de laboratório. Essa diferença pode ser explicada uma vez que os ensaios na pista não ocorreram exatamente nos mesmos pontos onde as amostras foram extraídas. Além disso, em laboratório o fluxo de água é unidirecional, enquanto em campo, algumas vezes, a água escapou por pequenas frestas entre o equipamento e a superfície da pista. No entanto, através de análise estatística, esses resultados não são significativamente diferentes (valor-P = 0,667). Dessa forma, pode-se afirmar que o método de laboratório fornece uma boa estimativa dos valores de taxa de infiltração *in situ*.

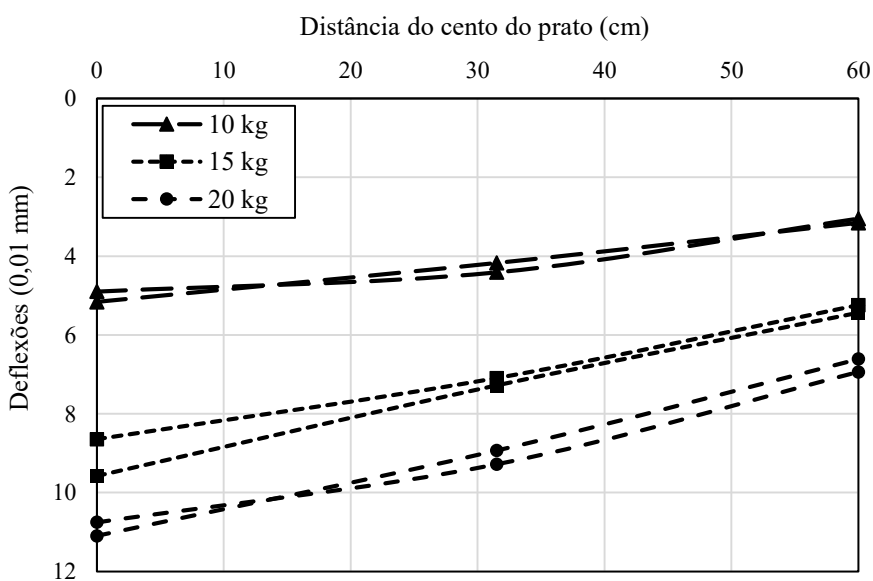
Figura 70. Valores médios e desvio padrão de taxa de infiltração *in situ* e obtidos em laboratório



6.2.2.2 Avaliação estrutural

A Figura 71 apresenta as bacias de deflexões obtidas através do ensaio de campo realizado com o auxílio de um LWD. Esses resultados representam a média de, pelo menos, cinco quedas para cada nível de carga.

Figura 71. Valores de deflexão obtidas com um LWD



Como esperado, as deflexões são maiores com o aumento da força aplicada. Além disso, um pico de deflexão ocorreu no centro da placa de carregamento (D0) e os resultados diminuíram com a distância do sensor em relação à placa de carregamento (D31,5 e D60).

As deflexões obtidas foram usadas para estimativa dos módulos de elasticidade *in situ*, através de retroanálise, empregando-se o *software BackMedina*. Como dados de entrada, foram fornecidas as informações da estrutura e estimados os módulos iniciais dos materiais. Os módulos de elasticidade retroanalizados para o revestimento em concreto permeável variaram entre 6.515 e 21.100 MPa, com valor médio em 13.432 MPa. Quanto os módulos obtidos para a camada granular e o subleito, os resultados médios obtidos foram de 328 MPa e 180 MPa, respectivamente.

Observa-se que valores obtidos para o revestimento são semelhantes aos resultados de estudos semelhantes em que as deflexões foram medidas com LWD. Por exemplo, Vancura *et al.* (2011) obtiveram valor médio de 18.000 MPa para uma revestimento de concreto permeável com 178 mm de espessura e Alshareedah e Nassiri (2019) relataram valores entre 13.800 a 21.400 MPa, em placas permeáveis de 152 a 305 mm de espessura.

6.3 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Nessa etapa do estudo foram feitos o projeto, a escolha dos materiais e o dimensionamento da estrutura permeável. Na sequência foi apresentado o procedimento de execução e os ensaios realizados para a verificação do desempenho do material em campo.

Inicialmente, optou-se por fazer o dimensionamento com o auxílio do programa computacional *PerviosPave*, que dimensiona o revestimento baseado em critérios hidráulicos e a camada de reservatório com base nos critérios hidrológicos. Assim, optou-se por fazer uma verificação estrutural da camada granular. Através dessa análise, observaram-se valores de vida útil exorbitantes, na ordem de grandeza de 10^6 . Isso pode ser explicado uma vez que os modelos da *South African Pavement Engineering* foram desenvolvidos e calibrados para camadas asfálticas delgadas, situação bem diferente à do revestimento em concreto permeável, que é uma camada espessa e rígida.

Além disso, a camada granular está superdimensionada quanto aos critérios mecânicos. Ou seja, a espessura necessária para gerenciar o fluxo hidrológico da região foi superior à espessura para

atender as cargas que atuam na superfície. Isso evidencia o conceito difundido na literatura de que são os critérios hidrológicos que devem comandar o seu dimensionamento.

Quando ao procedimento de execução, apesar do cuidado tomado para controlar a densidade, verificou-se um elevado desvio padrão nas propriedades físicas do concreto permeável (densidade no estado endurecido e porosidade), o que mostra a dificuldade de se obterem esses parâmetros em campo. Essa variabilidade influenciou nas demais propriedades do concreto permeável e em um elevado desvio padrão amostral. Os resultados mecânicos de resistência à compressão e módulo de elasticidade obtidos em campo foram inferiores aos resultados laboratoriais.

7 CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES

7.1 CONCLUSÕES

A pesquisa relatada nesta dissertação teve como objetivo geral avaliar o comportamento do concreto permeável com agregados de concreto reciclado, visando o emprego do material como revestimento de calçadas e pavimentos com tráfego leve. Após um extenso estudo laboratorial preliminar, houve a construção de um pavimento experimental. Além disso, os ensaios de campo verificaram a condição inicial do pavimento e serviram para a comparação com os resultados estimados em laboratório. A avaliação do desempenho do material ao longo do tempo será objeto de publicações futuras.

Globalmente, conclui-se que é possível empregar agregados reciclados de concreto na composição de concretos permeáveis substituindo, total ou parcialmente, agregados pétreos virgens. Os resultados de ensaios laboratoriais e de campo atestam que os concretos permeáveis com agregados reciclados atendem as exigências das normas brasileiras e internacionais.

Através dos resultados obtidos na pesquisa, chegou-se às seguintes conclusões específicas:

- (a) Quanto ao uso de agregados de concreto reciclado em revestimentos de concreto permeável

A partir dos resultados laboratoriais, verificou-se que as misturas com agregado de concreto, em todos os níveis de substituição, atenderam aos requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015), de condutividade hidráulica superior a 1 mm/s e resistência a tração na flexão maior que 2 MPa para concreto permeável moldado no local destinado ao tráfego leve.

Entretanto, chama-se a atenção para a grande variabilidade e o elevado desvio padrão nos resultados dos ensaios. Isso pode ser atribuído ao fato de que os mesmos são dependentes de vários fatores, como energia de compactação, relação a/c, curva granulométrica, absorção e resistência à abrasão dos agregados. Dessa forma, controlando essas propriedades, supõe-se que um concreto permeável composto por agregados reciclados pode apresentar comportamento semelhante ao de uma mistura apenas com agregado natural.

(b) Quanto ao método de compactação de corpos de prova cilíndricos

Sugere-se uma nova metodologia de moldagem de corpos de prova, baseada no controle da densidade obtida pelo método de dosagem IPT/EPUSP. A compactação dos corpos de prova cilíndricos deve ocorrer por compactação dinâmica em três etapas, controlando-se o número de golpes para que cada camada atinja 1/3 da altura do molde, escarificando-se a superfície entre as camadas para melhorar a aderência entre elas. No caso de misturas recicladas, deve-se atentar que aplicar golpes além do necessário pode causar a quebra dos agregados, que são menos resistentes que um agregado pétreo, modificando a curva granulométrica e, conseqüentemente, a porosidade das misturas.

(c) Quanto à influência do aditivo modificador de reologia e da redução da relação a/c

Não foi constatada a melhoria do comportamento mecânico das misturas com o uso do aditivo. Assim, o aditivo modificador de reologia deve ser utilizado visando, apenas, o controle das propriedades das misturas no estado fresco. Além disso, diferentemente de um concreto convencional, a redução da relação a/c não pode ser relacionada ao aumento da resistência mecânica. Além disso, por ser mais poroso e apresentar maior absorção do que um agregado natural, agregados reciclados podem absorver a água da mistura. Essa diminuição do teor de água reduz a espessura da pasta que envolve os grãos e, conseqüentemente, enfraquece a zona de transição, influenciando na distribuição de tensões. Isso pode ser associado à redução das resistências à compressão e à tração na flexão. Para minimizar esse efeito, indica-se compensar o teor de água absorvido pelos agregados reciclados e realizar a pré-molhagem antes de ser adicionado o cimento até ficarem na condição “saturado superfície seca”.

(d) Quanto ao processo de construção do pavimento

Foi construído um pavimento experimental em uma área de passagem de veículos leves, composto por uma estrutura com 18 cm de concreto permeável sobre uma camada granular com espessura média de 20 cm. O concreto permeável teve a dosagem de 1:3, composto exclusivamente por agregados de concreto reciclado, correspondendo ao traço 0,30-AD da etapa laboratorial.

A elevada variabilidade dos resultados de ensaios laboratoriais, realizados em amostras coletadas da pista experimental, e *in situ* evidenciam a dificuldade de se controlarem as propriedades físicas do material em campo. Também foi constatado o receio de empresas e

trabalhadores em utilizar concreto permeável, devido ao desconhecimento do material e das técnicas construtivas. Outra dificuldade encontrada na execução da pista foi quando ao curto tempo de pega. Dessa forma, sugere-se executar revestimentos de concreto permeável em dias de clima ameno (até 20 °C) buscando reduzir a rápida perda de água.

(e) Quanto ao método de ensaio laboratorial de taxa de infiltração

Houve uma boa aproximação entre os resultados de taxa de infiltração obtidos em campo, com o uso do anel normatizado pela ASTM C1701 (2017), e dos valores de laboratório, em amostras cilíndricas com diâmetro de 100 mm. Ou seja, a adaptação do método para o ensaio laboratorial em amostras cilíndricas mostrou-se adequada para estimar a taxa de infiltração do concreto permeável.

(f) Quanto à avaliação estrutural do pavimento com o uso do LWD e retroanálise de bacias defletométricas

Os módulos de elasticidade *in situ*, estimados por meio da retroanálise das deflexões superficiais através do *software BackMedina*, são comparáveis aos determinados em laboratório. Isso indica a correspondência entre as características elásticas do material moldado em laboratório e as respostas em campo com a aplicação de carregamentos dinâmicos provenientes do LWD.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Quanto a definição do traço, nessa pesquisa, tendo em vista que o uso de agregados reciclados reduz o desempenho mecânico, optou-se por usar um traço com um elevado teor de cimento. Esse foi um estudo inicial para avaliar a influência do uso de agregados reciclados no concreto permeável. A partir dos resultados obtidos, sugere-se avaliar outras relações agregado-cimento em pesquisas futuras, como 1:3,5 e 1:4.
- Considerar a utilização de materiais cimentantes alternativos, como escória de alto forno, para a redução do consumo de cimento.
- Verificar a influência de outros componentes tipicamente encontrados no RCC, como cerâmica, solo, plástico e madeira.

- Utilizar agregados com a granulometria original, sem a retirada da fração de finos.
- Verificar, com o auxílio de um microscópio eletrônico, se a linha de ruptura ocorre nos agregados reciclados ou na pasta.
- Considerando a grande dispersão de resultados evidenciada nessa pesquisa, sugere-se analisar os resultados através de medianas, uma vez que a média aritmética pode mascarar resultados e arrastar os valores obtidos em função de resultados discrepantes.
- Avaliar o desempenho do pavimento experimental ao longo do tempo quanto à colmatção através do ensaio de infiltração *in situ* e propor períodos e procedimentos de manutenção.
- Avaliar o comportamento estrutural, a abrasão e o desprendimento dos agregados ao longo do tempo.
- Verificar a qualidade da água infiltrada no pavimento, coletada através do dispositivo de análise instalado.
- Analisar o ciclo de vida de pavimentos de concreto permeável.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ALAM, A.; HASELBACH, L. Estimating the modulus of elasticity of pervious concrete based on porosity. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 3, 2014.

ALIABDO, A. A.; ABD ELMOATY, A. E. M.; FAWZY, A. M. Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 193, 2018.

ALSHAREEDAH, O.; NASSIRI, S.; CHEN, Z.; ENGLUND, K.; LI, H.; FAKRON, O. Field performance evaluation of pervious concrete pavement reinforced with novel discrete reinforcement. **Case Studies in Construction Materials**, 2019.

ALSHAREEDAH, O.; NASSIRI, S. Methodology for mechanistic design of pervious concrete pavements. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, v. 145, 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 211.3R**: Guide for Selecting Proportions for No - Slump Concrete Reported by ACI Committee 211, v. 2, 2009.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R**: Report on Pervious Concrete. West Conshohocken, PA, United States of America, 2010.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. **PerviousPave**: background, purpose, assumptions and equations. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.acpa.org/PerviousPave/About%20PerviousPave.pdf>>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C860**: Standard Practices for Determining and Measuring Consistency of Refractory. West Conshohocken, PA, United States of America, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C944**: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method. West Conshohocken, PA, United States of America, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1688**: Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete. West Conshohocken, PA, United States of America, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754**: Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. West Conshohocken, PA, United States of America, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1747**: Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion. West Conshohocken, PA, United States of America, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C33**: Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA, United States of America, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D1196**: Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. West Conshohocken, PA, United States of America, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1701**: Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. West Conshohocken, PA, United States of America, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C779**: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces. West Conshohocken, PA, United States of America, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1138**: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete. West Conshohocken, PA, United States of America, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C143**: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. West Conshohocken, PA, United States of America, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C418**: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting. West Conshohocken, PA, United States of America, 2020.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Permeable Pavements**. Permeable Pavement Task Committee of the Environmental e Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers, United States, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPESA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. São Paulo, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Metodo de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545**: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 51**: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 24**: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2002.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de Suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2020.

BAKKE, K. J. Abrasion resistance. In: Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials. **ASTM International**, 2006

BARNHOUSE, P. W.; SRUBAR, W. V. Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 110, 2016.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BATEZINI, R. **Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto permeável em pista experimental**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

BERRY, B. M.; SUOZZO M. J.; IAN, A. A; DEWOOLKAR. M. M. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregate. In: **TRB 2012 Annual Meeting**, 2012.

BHUTTA, M.; HASANAH, N.; FARHAYU, N.; HUSSIN, M. . T. M. M. . M. J. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**, v. 47, 2013.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 91, 2015.

BRASIL. CPRM-Serviço geológico. **Atlas pluviométrico do Brasil: equações intensidade-duração-frequência: município Porto Alegre, estação pluviográfica Porto Alegre, 03051011(ANA) e 83967(INMET)**, 2013. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/18700/1/Relatorio_idf_pa.pdf>.

CARDOSO, R.; SILVA V. R.; BRITO, J.; DHIR, R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: a literature review. **Waste Management**, v. 49, 2016.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111 , 2016.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pore Structure Characterization of Pervious Concrete Using X-Ray Microcomputed Tomography. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, 2018.

CHEN, Y.; WANG, K.; WANG, X.; ZHOU, W. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 42, 2013.

COSTA, F. B. P.; LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, L. C. P. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests Boas práticas para dosagem e testes laboratoriais. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 11, 2018.

COSTA, F. B. P. **Análise e desenvolvimento de misturas de concreto permeável para aplicação em pavimentação**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 8436, 2018.

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Permeability prediction and pore structure feature of pervious concrete using brick as aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 643–651, 2019.

DELONGUI, L.; MATUELLA, M.; NÚÑEZ, W. P.; FEDRIGO, W.; SILVA, L. C. F.; CERATTI, J. A. P. Construction and demolition waste parameters for rational pavement design. **Construction and Building Materials**, v. 168, 2018.

DEO, O.; NEITHALATH, N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities. **Construction and Building Materials**, v. 25, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 086**. Agregado - determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 092**: Solos - Determinação da massa específica aparente “*in situ*”, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 055/2004 - ME**: Pavimento rígido - Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134/2018**. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

EL-HASSAN, H.; KIANMEHR, P.; ZOUAOU, S. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 164–175, 2019.

EUROPEAN UNION. **Waste statistics, Eurostat, 2018**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Municipal_waste_statistics>.

GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F. Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 701–708, 2014.

GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F. A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 271–278, 2016.

GCP APPLIED TECHNOLOGIES. **V-MAR VSC Rheology-Modifying Admixture for Pervious Con-crete**. 2020. Disponível em: <<https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/v-mar-admixtures>>.

GRAEFF, A. G. **Long-Term Performance of Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete for**. Tese (Doutorado). University of Sheffield, Sheffield, 2011.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; KAREEM, Q.; İPEK, S. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. **Materials and Structures**, v. 49, 2014.

HASELBACH, L.; DUTRA, V. F. P.; SCHWETZ, P.; SILVA FILHO, L. C. P. Laboratory evaluations of long-term hydraulic performance and maintenance requirements for pervious

concrete mixes: a case study in southern Brazil. In: **International conference on transportation and development**, 2016.

HASELBACH, L.; WERNER, B.; DUTRA V.; SCHWETZ P.; SILVA FILHO L. P.; BATEZINI R.; CURVO R.; BALBO J. Estimating porosity of *in situ* pervious concrete using surface infiltration tests. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 45, n. 5, 2017.

HASELBACH, L. M.; FREEMAN, R. M. Vertical porosity distributions in pervious concrete pavement. **ACI Materials Journal**, v. 103, p. 452–458, 2006.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI, 1992.

HESAMI, S.; AHMADI, S.; NEMATZADEH, M. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 680–691, 2014.

HÖLTZ, F. C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

IBRAHIM, H. A.; RAZAK, H. A.; ABUTAHA, F. Strength and abrasion resistance of palm oil clinker pervious concrete under different curing method. **Construction and Building Materials**, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Perfil dos municípios brasileiros 2017**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/496bb4fbf305cca806a aa167aa4f6dc8.pdf>.

ISMAIL, S.; KWAN, W. H.; RAMLI, M. Mechanical strength and durability properties of concrete containing treated recycled concrete aggregates under different curing conditions. **Construction and Building Materials**, v. 155, 2017.

KEVERN, J. T.; FARNEY, C. Reducing Curing Requirements for Pervious Concrete with a Superabsorbent Polymer for Internal Curing. **Transportation Research Board**, n. 2290, 2015.

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

LANCIERI, F; MARRADI, A; MANNUCCI, S. C&D waste for road construction: long time performance of roads constructed using recycled aggregate for unbound pavement layers. v. 92, [s.d.].

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

LIU, T.; WANG Z.; ZOU, D.; ZHOU, A.; DU, J. Cement and Concrete Research Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method. **Cement and Concrete Research**, v. 122, 2019.

LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO L. C. P.; PESSUTTO, A. S.; BIDINOTTO, G. B. Thermal profiles in pervious concrete during summer rain simulations. **Revista Materia**, v. 23, 2018.

MARCHIONI, M. S.; OLIVEIRA, C. Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas. **Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)**, 2010.

MARTIN, W. D.; PUTMAN, B. J.; KAYE, N. B. Using image analysis to measure the porosity distribution of a porous pavement. **Construction and Building Materials**, v. 48, 2013.

MONTES, F.; HASELBACH, L. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete. **Environmental Engineering Science**, v. 23, 2006.

NATIONAL READY MIX CONCRETE ASSOCIATION. Concrete in Practice-38 (CIP-38). [s.d].

NÚÑEZ, W. P. SILVEIRA, A. L. L. S; MALYSZ, R.; ACIOLI, L. A.; CERATTI J. A.; GOLDENFUND J. A. Adoção de pavimentos permeáveis para reduzir alagamentos em vias urbanas - estudo de caso com monitoramento estrutural e hidráulico. [s.d.].

OESER, M.; SHACKEL, B.; LUZ, G. A pilot study of cement-treated basecourses for use in permeable interlocking concrete pavements. **9th International Conference on Concrete Block Paving**, Buenos Aires, 2009.

ONO, B. W.; BALBO, J. T.; CARGNIN, A. Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado. **Revista Transportes**, v. 25, 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>.

PERERA, G. G; GRAEFF, A. G.; BARBOSA, M. P.; FILHO, L. C. P. S. The use of construction and demolition residue in the production of pervious concrete pavements. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**. CBC2013-55CBC, 2013.

PIERALISI, R. **Characterization and modelling of pervious concrete**. Tese (Doutorado). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2016.

QIN, Y.; YANG, H.; DENG, Z.; HE, J. Water Permeability of Pervious Concrete Is Dependent on the Applied Pressure and Testing Methods. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, 2015.

RANGELOV, M.; NASSIRI, S.; HASELBACH, L.; ENGLUND, K. Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 126, 2016.

RIZVI, R; TIGHE, S; HENDERSON, V; NORRIS, J. Evaluating the use of recycled concrete aggregate in pervious concrete pavement. **Transportation Research Record**, n. 2164, 2010.

SANDOVAL, G F B; GALOVARDES, I; DIAS, C; CAMPOS, A; TORALLES, B. M. Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic properties. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 12, 2019.

SANDOVAL, G. F. B; CAMPOS, A; JUSTINI, E. I; ANDRELLO, A, C; TORALLES, B. M. Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging. **Construction and Building Materials**, v. 248, 2020.

SANGIORGI, C.; LANTIERI, CL.; DONDI, G. Construction and demolition waste recycling : an application for road construction. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 8436, 2015.

SCHOLZ, M. Water quality improvement performance of geotextiles within permeable pavement systems: A critical review. **Water (Switzerland)**, v. 5, 2013.

SHACKEL, B. The Design , Construction and Evaluation of Permeable Pavements, Australia. In: **24th ARRB Conference**, 2010.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, 2014.

SILVEIRA, A.; GOLDENFUM, J. Metodologia generalizada para pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, 2007.

SOUTH AFRICAN NATIONAL ROADS AGENCY LTD. **South african pavement engineering manual**: Chapter 10 – Pavement Design, 2 ed, Pretoria, 2014.

SRIRAVINDRARAJAH, R.; WANG, N. D. H.; ERVIN, L. J. W. Mix Design for Pervious Recycled Aggregate Concrete. **Concrete Structures and Materials**, v. 6, n. 4, 2012.

TAM, V. W.Y.; MAHFOOZ S.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, 2018.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious concrete pavements**. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 2004.

THOMAS, J.; THAICKAVIL, N.; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. v. 19, **Journal of Building Engineering**, 2018.

ULLOA-MAYORGA, V. A.; URIBE-GARCÉS, M. A.; PAZ-GÓMEZ, D. P.; ALVARADO, Y. A.; TORRES, B.; GASCH, I. Performance of pervious concrete containing combined recycled aggregates Desempeño del concreto permeable con agregados reciclados. **Ingeniería e Investigación**, v. 38, 2018.

VANCURA, M.; MACDONALD, K.; KHAZANOVICH, L. Structural analysis of pervious concrete pavement. **Transportation Research Record**, n. 2226, 2011.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimento de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando a retenção e amortecimento de picos de cheias**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

WU, HAO; LIU, ZHUO; SUN, BEIBEI; YIN, J. Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC). **Construction and Building Materials**, v. 117, 2016.

YAP, S. P.; CHEN, P. Z. C.; GOH, Y.; IBRAHIM, H. A.; MO, K. H.; YUEN, C. W. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, 2018.

YU, F.; SUN, D.; WANG, J.; HU, M. Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 209, 2019.

ZAETANG, Y.; SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, 2016.

ZAETANG Y.; WONGSA A.; SATA V.; CHINDAPRASIRT P. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. **Construction and Building Materials**. v 48, 2013.

ZHANG, J.; MA, G.; MING, R.; CUI, X.; LI, L.; XU, H. Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging. **Construction and Building Materials**, v. 161, 2018.

ZHANG, Z. ZHANG, Y.; YAN, C; LIU, Y. Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, 2017.

ZHOU, J.; ZHENG, M.; WANG, Q.; YANG, J.; LIN, T. Flexural fatigue behavior of polymer-modified pervious concrete with single sized aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 124, 2016.