

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de
Drenagem Fabricados em Concreto Permeável**

Gisele Santoro Lamb

Porto Alegre
2014

GISELE SANTORO LAMB

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE
ELEMENTOS DE DRENAGEM FABRICADOS EM
CONCRETO PERMEÁVEL**

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

Porto Alegre
2014

GISELE SANTORO LAMB

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS
ELEMENTOS DE DRENAGEM FABRICADOS EM
CONCRETO PERMEÁVEL**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 13 de janeiro de 2014

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Ph.D. pela University of Leeds
orientador

Prof. Armando Miguel Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Alexandre Lorenzi (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Profa. Paulete Fridman Schwetz (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Paulo Sérgio Lima Souza (UFPA)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Aos meus amados filhos, Priscila, Gabriel e Matheus, e ao Rogério, o grande amor da minha vida, pela paciência e pelo companheirismo.

Aos meus idolatrados pais, Sérgio e Gilka (*in memoriam*), pelo incentivo na batalha diária em busca de uma realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, pela oportunidade e por todo o apoio prestado durante o período do meu mestrado. Foram de extrema valia todos os conselhos, conversas e discussões. Agradeço-o, também, pela sua confiança e, acima de tudo, por acreditar no meu potencial. Agradeço à Profa. Alexandra Passuello pelas ajuda inestimável e disponibilidade constante em ajudar, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME), Diego, Bruno, Josué, Paulete, pelo apoio durante o desenvolvimento de minha pesquisa e, em especial, ao Alexandre Lorenzi.

Agradeço aos bolsistas do LEME, em especial ao Isaltino, que dedicou seu tempo, conhecimento, paciência e experiências ao me auxiliar no desenvolvimento de minha pesquisa. Também é digna de menção a ajuda prestada pelos Gabriel, Vitor, Michael, Lívia, Rafaela, Victor e tantos outros que já não fazem mais parte do laboratório, como os Vagner, Cássio e Antônio.

Agradeço aos funcionários do LEME, em especial aos técnicos de laboratório Edgar e Fontes, pelo auxílio durante a realização dos ensaios no laboratório, assim como ao apoio do auxiliar de serviços gerais José.

Meu agradecimento ao Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU) de Porto Alegre, pelas informações prestadas, assim como pelo fornecimento de alguns materiais para a pesquisa.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram, não só para a realização deste trabalho, como também para a minha formação pessoal e profissional.

Muito obrigada!

Se exponha aos seus medos mais profundos. Depois disso,
o medo não terá poder algum, e o medo da liberdade
encolhe e desaparece. Você é livre.

Jim Morrison

RESUMO

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Os diversos e indesejáveis problemas associados à ocorrência de inundações e de picos rápidos de cheia são comuns nos centros urbanos brasileiros, sendo agravados em decorrência da crescente impermeabilização das superfícies alavancada pelo crescimento das cidades. Uma das alternativas para reduzir esses problemas consiste no uso de pavimentações drenantes, que possibilitem a infiltração e colaborem com o retardo do escoamento das águas pluviais. Dentre as opções disponíveis, vem atraindo atenção, nos últimos anos, o denominado concreto permeável, material fabricado com uma composição granulométrica selecionada (sem agregado miúdo e com partículas de dimensões similares), de forma a gerar uma estrutura de grandes poros conectados, que permite uma rápida percolação de fluidos pelo seu interior, em grandes quantidades. Levando em consideração os diferentes desafios associados à drenagem urbana, as pesquisas no LEME voltaram-se para a investigação de uma nova possibilidade de utilização do concreto permeável, como material componente dos próprios elementos dos sistemas urbanos de drenagem pluvial. Sabe-se que um dos principais problemas de funcionamento desses sistemas consiste na obstrução de suas entradas por materiais diversos em conjunto com a diminuição da área de passagem de água nas galerias pelo acúmulo de material nas mesmas, gerando entupimento parcial ou total. Nesses casos, o uso de concreto permeável pode viabilizar a passagem de elevados fluxos, ao mesmo tempo em que constitui uma barreira à passagem de detritos e um filtro natural das águas, potencialmente evitando o ingresso de materiais, lixo e partículas sólidas no interior das galerias do sistema de drenagem. Buscando contribuir para a avaliação da ideia, o presente trabalho foi concebido tendo como foco o estudo da utilização do concreto permeável para fabricação de elementos tipo placa, em substituição às grelhas utilizadas atualmente. Para orientar tecnicamente o estudo, tomou-se como referência o Caderno de Encargos do Departamento de Esgotos Pluviais (DEP) da cidade de Porto Alegre, que estabelece as características dessas grelhas. Após um estudo preliminar para ajuste do traço e caracterização básica do concreto permeável, foram moldados seis protótipos de placas com um traço 1:4 (cimento:areia), com dimensões similares às grelhas do DEP, confeccionadas em concreto permeável. As placas foram testadas quanto à capacidade de flexão e à permeabilidade (sendo esses últimos efetuados em corpos de prova extraídos das placas). Para fins de comparação, foi ensaiada, também, uma grelha real fabricada e disponibilizada pelo DEP. Adicionalmente, foram criados, no LEME, dispositivos especiais para simular os efeitos de chuva e de passagem de água, carreando material em suspensão, para avaliar o desempenho em termos de colmatação desses elementos. Os resultados dos ensaios de resistência mecânica e de permeabilidade indicaram que os novos elementos apresentam desempenho superior às grelhas convencionais, indicando que os estudos na direção da produção de elementos drenantes em concreto permeável são promissores e devem ser continuados. Os resultados do teste de colmatação indicam, no entanto, que procedimentos de manutenção e limpeza podem ser necessários se material pulverulento bloquear os poros do concreto permeável.

Palavras-chave: *drenagem urbana; elementos de drenagem; concreto permeável.*

ABSTRACT

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Many undesirable problems associated with the occurrence of floods and rapid flood peaks are common in Brazilian urban centers and are intensified due to the increase of waterproofing of surfaces caused by the growth of cities. An alternative to mitigate these problems is the use of draining pavements that allow infiltration and collaborate with the delay of storm water runoff. Among the available options, pervious concrete has been attracting attention in recent years. This is a special concrete made with selected particle size distribution (without coarse aggregate and particles of similar dimensions) to generate a structure containing large connected pores, which would allow a fast and large percolation of fluids through the material. Taking into account the different challenges associated with urban drainage, the research group at LEME has been investigating a new possibility for the use of pervious concrete as a constituent material of urban stormwater drainage systems. It is well known that the major problem that affects this kind of systems is the obstruction of the openings by different materials, in addition to the decrease of water flow in the galleries because of the accumulation of material inside them, causing partial or total loss of flow capacity. The use of pervious concrete can enable the passage of high flow rates, while constituting a barrier to the passage of debris and a natural water filter, preventing the entry of potentially granular material and solid waste particles inside the galleries of the drainage system. Seeking to contribute to the evaluation of this idea, the present work was designed focusing on the study of the use of pervious concrete for the manufacture of plate elements, which could be used to replace the grilles that are currently in use in sewers. In order to guide the study, the requirements of the Rain Sewage Department (Departamento de Esgotos Pluviais - DEP) from Porto Alegre were taken as a reference. After a preliminary study made to adjust and characterize the mix of pervious concrete to be used, six plates prototypes were fabricated using a 1:4 (cement:sand) proportion, with similar dimensions to the DEP grilles. These were then tested to check flexural capacity and permeability (of specimens cored from the plates). Also, using special devices created at LEME, the effects of rain and the passage of water carrying fine material in suspension were simulated, and the performance in terms of clogging of these elements was roughly assessed. For comparison, a conventional grille currently made by DEP was also tested. The results from the mechanical strength and permeability tests indicated that the pervious plates had superior performance when compared to the conventional grilles, indicating that studies toward the production of drainage elements in pervious concrete are promising and should be continued. The results from the clogging test however indicate that cleaning strategies may be necessary on the long run if fine material accumulates in the pores of the pervious concrete.

Key-words: *elements of drainage; urban drainage; pervious concrete.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: etapas do ciclo hidrológico	27
Figura 2: inundação urbana devido a evento de chuva em Porto Alegre/RS	32
Figura 3: resíduos sólidos depositados próximos a córregos de água	34
Figura 4: posição das unidades de drenagem	42
Figura 5: tampa e espelho de boca de lobo	44
Figura 6: grelha Farroupilha	46
Figura 7: fábrica de artefatos de concretos do DEP	48
Figura 8: armaduras de reforço na confecção dos elementos fabricados no DEP	49
Figuras 9: concretagens realizadas de forma artesanal sobre o piso do DEP	49
Figuras 10: serviços de reconstrução e complementação pluvial	50
Figura 11: execução de piso experimental no LEME	54
Figura 12: Utilização de agregados naturais na confecção de concretos coloridos do <i>Torch Ceremony Plaza</i>	60
Figura 13: limpeza do entorno de via em concreto permeável	62
Figura 14: limpeza com água de alta pressão jorrada em pavimento piloto de concreto permeável	63
Figura 15: remoção de excesso de água após limpeza de pavimento de concreto permeável	64
Figura 16: fluxograma do delineamento da pesquisa	77
Figura 17: pedrisco utilizado na composição do concreto permeável	80
Figura 18: gráfico da distribuição granulométrica do agregado graúdo selecionado	81
Figura 19: avaliação táctil da mistura de concreto permeável pelo operador da betoneira	82
Figura 20: mistura de concreto permeável depositada na fôrma com auxílio de pá	82
Figura 21: compactação realizada com rolo de aço adaptado	83
Figura 22: placa de concreto permeável borrifada com água para sua cura	84
Figura 23: protótipo de concreto permeável embalado em filme plástico de polietileno	85

Figura 24: utilização de base de ferro para simulação de situação real	86
Figura 25: ensaio de flexão em protótipo de concreto permeável	86
Figura 26: ensaio de flexão em grelha de concreto convencional fornecida pelo DEP ..	87
Figura 27: gráfico dos resultados dos ensaios de flexão dos elementos da Etapa 1	88
Figura 28: indicação de marcação de limite em cano de PVC para ensaio de taxa de infiltração de água	89
Figura 29: etapa de pré-molhagem para ensaio de taxa de infiltração de água	90
Figura 30: gráfico dos resultados dos ensaios de taxa de infiltração de água	91
Figura 31: gráfico de comparação de custos dos materiais para cada elemento	93
Figura 32: fabricação de concreto permeável através da mistura na betoneira de, respectivamente, pedrisco, parte da água, cimento e o restante da água	95
Figura 33: moldagem de placa de concreto permeável com todo o material de uma betonada	96
Figura 34: compactação do material na fôrma com rolo de aço	96
Figura 35: avaliação da pasta através de teste táctil visual	97
Figura 36: protótipos de placas de concreto permeável cobertos com filme plástico de polietileno	98
Figura 37: molde metálico utilizado nos ensaios de flexão da Etapa 2	99
Figura 38: realização de ensaio de flexão em placa de concreto permeável da Etapa 2 .	100
Figura 39: gráfico dos resultados dos ensaios de flexão das seis placas produzidas em concreto permeável da Etapa 2	101
Figura 40: realização do ensaio de taxa de infiltração de água em placa de concreto permeável da Etapa 2	102
Figura 41: gráfico dos resultados dos ensaios de taxa de infiltração de água da Etapa 2	104
Figura 42: esquema do equipamento para ensaio de permeabilidade	108
Figura 43: equipamento utilizado para ensaio de permeabilidade	109
Figura 44: corpo de prova encamisado com uma membrana látex	110
Figura 45: introdução do corpo de prova encamisado no equipamento com inversão da membrana látex pela parte externa do tubo de PVC	111
Figura 46: abertura do registro	111

Figura 47: reservatório preenchido com água até a superfície	112
Figura 48: gráfico das médias dos resultados dos coeficientes de permeabilidade no topo e no fundo de cada placa	114
Figura 49: gráfico dos resultados dos tempos dos ensaios de permeabilidade por amostra de cada placa	115
Figura 50: corpos de prova extraídos das placas de concreto permeável	115
Figura 51: posição da extração dos corpos de prova nas placas de concreto permeável para ensaio de resistência à compressão axial	116
Figura 52: aparato para extração dos corpos de prova das placas de concreto permeável	116
Figura 53: ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova das placas de concreto permeável	117
Figura 54: gráfico dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial por amostra de cada placa	119
Figura 55: gráfico da média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial das amostras de cada placa	119
Figura 56: gráfico da síntese dos resultados dos valores médios da Etapa 2	123
Figura 57: vista superior de elementos em concretos permeável, acima à esquerda, e convencional, abaixo à esquerda e à direita	124
Figura 58: gráfico da comparação de custos totais para fabricação da grelha de concreto convencional e da placa de concreto permeável	125
Figura 59: Dispositivo 1 (água limpa), à esquerda, e Dispositivo 2 (água suja), à direita	126
Figura 60: esquema para a confecção do Dispositivo 1	126
Figura 61: conjunto de condutores ligados ao hidrômetro e à válvula	127
Figura 62: ligação entre os condutores para possibilitar a distribuição da água	128
Figura 63: conjunto de condutores com furação dos orifícios para simulação de chuva natural	128
Figura 64: instalação da placa de concreto permeável no Dispositivo 1	129
Figura 65: ensaio de permeabilidade em placa no Dispositivo 1	130
Figura 66: hidrômetro utilizado para medição da vazão de água do Dispositivo 1	131
Figura 67: esquema para a confecção do Dispositivo 2	132

Figura 68: partículas de resíduos sólidos adicionadas no Dispositivo 2	133
Figura 69: tubulações de PVC unidas em “L” do Dispositivo 2	133
Figura 70: aspecto da água com partículas de resíduos sólidos	134
Figura 71: teste da execução do ensaio de colmatção em placa	134
Figura 72: lâmina de água formada na superfície da placa	135
Figura 73: colmatção superficial na placa de concreto permeável	135
Figura 74: medições do tempo de escoamento e do volume de água retirado do reservatório	136
Figura 75: escalas de 0 cm a 10 cm fixadas nos cantos superiores esquerdo e direito dos, respectivamente, Dispositivo 2 e Dispositivo 1	137
Figura 76: ensaio com os dois dispositivos	137
Figura 77: substituição da placa colmatada pela do primeiro ensaio	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: precipitações em Porto Alegre/RS	47
Tabela 2: traços dos concretos permeáveis utilizados na Etapa 1	78
Tabela 3: características do cimento utilizado nas misturas de concreto permeável	79
Tabela 4: características do agregado utilizado nas moldagens dos corpos de prova	87
Tabela 5: resultados dos ensaios de flexão dos elementos da Etapa 1	91
Tabela 6: resultados dos ensaios de taxa de infiltração de água	91
Tabela 7: comparação de custos dos materiais para cada elemento	92
Tabela 8: síntese dos resultados da Etapa 1	93
Tabela 9: resultados dos ensaios de flexão das três grelhas produzidas em concreto convencional do DEP	100
Tabela 10: resultados dos ensaios de flexão das seis placas produzidas em concreto permeável da Etapa 2	101
Tabela 11: resultados dos ensaios de taxa de infiltração de água da Etapa 2	103
Tabela 12: dados reorganizados dos resultados dos ensaios de taxa de infiltração de água da Etapa 2	105
Tabela 13: dados das média, disparidade e variação por placas das taxas de infiltração de água	105
Tabela 14: dados das média, disparidade e variação por pontos das taxas de infiltração de água	105
Tabela 15: cálculos ANOVA fator único por placas das taxas de infiltração de água	106
Tabela 16: cálculos ANOVA entre e dentro dos grupos por placas das taxas de infiltração de água	106
Tabela 17: cálculos ANOVA fator único por pontos das taxas de infiltração de água	107
Tabela 18: cálculos ANOVA entre e dentro dos grupos por pontos das taxas de infiltração de água	107
Tabela 19: resultados dos ensaios de permeabilidade por amostra de cada placa	113
Tabela 20: resultados dos ensaios de resistência à compressão axial por amostra de cada placa da Etapa 2	117

Tabela 21: dados reorganizados dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial por amostra de cada placa da Etapa 2	120
Tabela 22: dados das média, disparidade e variação por placas das resistências à compressão axiais	120
Tabela 23: dados das média, disparidade e variação por pontos das resistências à compressão axiais	120
Tabela 24: cálculos <i>ANOVA</i> fator único por placas das resistências à compressão axiais.....	121
Tabela 25: cálculos <i>ANOVA</i> entre e dentro dos grupos por placas das resistências à compressão axiais	121
Tabela 26: cálculos <i>ANOVA</i> fator único por pontos das resistências à compressão axiais	121
Tabela 27: cálculos <i>ANOVA</i> entre e dentro dos grupos por pontos das resistências à compressão axiais	122
Tabela 28: síntese dos resultados dos valores médios da Etapa 2	123
Tabela 29: comparação de custos dos materiais para fabricação da grelha de concreto convencional e da placa de concreto permeável	124
Tabela 30: dados das leituras das medições das bomba nominal, Dispositivo 1 e Dispositivo 2	136
Tabela 31: vazões de água limpa das bomba nominal do Dispositivo 1, das placas do primeiro e do segundo ensaio	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: *American Concrete Institute*

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

BMPs: *Best Management Practices*

CCP: concreto de cimento Portland

CPC: cimento Portland convencional

CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo

CPTEC: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CRED: Centro de Investigação sobre Epidemiologia dos Desastres

CRMCA: *Carolinas Ready Mixed Concrete Association*

DATASUS: Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde

DEP: Departamento de Esgotos Pluviais

DMAE: Departamento Municipal de Água e Esgotos

DNOS: Departamento Nacional de Obras e Saneamento

EM-DAT: *International Disaster Database*

EPA: *Environmental Protection Agency (U.S.)*

EUA: Estados Unidos da América

FINEP: Financiadora de Estudos e Projetos

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS

LEME: Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

MI: Ministério da Integração Nacional

NBR: Norma Brasileira Registrada

NRMCA: *National Ready Mixed Concrete Association*

PDDrU: Plano Diretor de Drenagem Urbana do Município de Porto Alegre

PVC : Policloreto de Polivinila

SEDEC: Secretaria Nacional de Defesa Civil

SEMA: Secretária do Meio Ambiente

SLU: Serviço de Limpeza Urbana do Distrito Federal

SSHA: Scottish Special Housing Association Limited

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	19
1.2. OBJETIVOS	22
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2. DRENAGEM URBANA	25
2.1. AUMENTO DA URBANIZAÇÃO E SEUS IMPACTOS NA DRENAGEM URBANA	25
2.2. DESAFIO DAS INUNDAÇÕES URBANAS	31
2.2.1. Tipos de Inundações	31
2.2.2. Efeitos Negativos das Inundações	32
2.2.3. Mitigação das Inundações pelo Aumento das Superfícies Permeáveis	37
2.3. SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA PLUVIAL	38
2.3.1. Porto Alegre/RS e o sistema de drenagem urbana pluvial	40
2.3.2. Serviços de manutenção realizados pelo DEP	48
3. CONCRETOS PERMEÁVEIS	53
3.1. DEFINIÇÃO	53
3.2. EVOLUÇÃO	54
3.3. USO NA DRENAGEM URBANA	56
3.4. CARACTERÍSTICAS	57
3.5. APLICAÇÕES	61
3.6. MANUTENÇÃO	63
3.7. TENDÊNCIAS NO ESTUDO DE CONCRETOS PERMEÁVEIS	65

3.8. CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DE CONCRETOS PERMEÁVEIS NA REALIDADE BRASILEIRA	75
4. MÉTODO DE PESQUISA	77
4.1. ESTRATÉGIA DE PESQUISA	77
4.2. DELINEAMENTO DA PESQUISA	77
4.3. ETAPA 1: ESTUDOS PRELIMINARES	79
4.3.1. Caracterização dos Materiais	79
4.3.2. Método do Processo de Mistura para Confecção do Concreto Permeável	82
4.4. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS E RESULTADOS DA ETAPA DE ESTUDOS PRELIMINARES	86
4.4.1. Ensaio de Flexão	86
4.4.2. Ensaio de Taxa de Infiltração de Água	89
4.4.3. Comparação de Custos	93
5. ETAPA 2: ESTUDOS PRINCIPAIS	95
5.1. MÉTODOS UTILIZADOS	95
5.2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EMPREGADOS E DE SEUS RESULTADOS	99
5.2.1. Ensaio de Flexão	100
5.2.2. Resultados dos Ensaios de Flexão	101
5.2.3. Ensaio de Taxa de Infiltração de água	103
5.2.4. Resultados dos Ensaios de Taxa de Infiltração de Água	104
5.2.5. Ensaio de Permeabilidade	108
5.2.6. Resultados dos Ensaios de Permeabilidade	114
5.2.7. Ensaio de Resistência à Compressão Axial	117
5.2.8. Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão Axial	118
5.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA ETAPA DE ESTUDOS PRINCIPAIS	123
5.3.1. Massa e Principais Propriedades	123

5.3.2. Custos	124
5.4. ANÁLISE DA PERMEABILIDADE E POSSIBILIDADE DE COLMATAÇÃO	126
5.4.1. Montagem dos Dispositivos de Ensaio	127
5.4.2. Ensaio de Permeabilidade em Placa no Dispositivo 1	130
5.4.3. Ensaio de Colmatação em Placa no Dispositivo 2	132
6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	140
REFERÊNCIAS	143

1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem por objetivo apresentar o escopo e a estrutura da dissertação. No mesmo, discute-se o contexto no qual a pesquisa está inserida, explicitando as questões de pesquisa e os objetivos propostos, bem como as delimitações do trabalho.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os episódios de inundações causados por deficiências de drenagem urbana nas cidades brasileiras vêm repetindo-se, como registrado amplamente na mídia e vivenciado por grande parte da população de nosso país. Esse tipo de ocorrência afeta negativamente a qualidade de vida da população e acarreta prejuízos ao valor das propriedades afetadas.

Em parte, essa tendência pode ser associada a um processo acelerado e pouco planejado de desenvolvimento urbano, que, dentre outros comportamentos pouco recomendáveis, favorece a impermeabilização do solo, promove a retificação e canalização de corpos de água e não preserva as áreas de várzea e as calhas dos mesmos. Os efeitos negativos dessa urbanização não planejada sobre o escoamento das águas pluviais são amplos e têm sido registrados em inúmeras localidades. Dentre aspectos normalmente destacados incluem-se: aumentos na magnitude das vazões críticas e dos volumes escoados, com redução do tempo de retardo e com a tendência de incremento das vazões de pico. As consequências desse processo manifestam-se sob a forma de superação da capacidade das redes de drenagem e na ocorrência de um grande número de pontos de alagamento, que contribuem para as inundações urbanas e para os problemas de trânsito.

Tucci (2007) explica que a expansão da malha urbana, assim como a construção de grandes edificações e a pavimentação de vias públicas, ocasiona a diminuição da superfície de absorção. Com isso, ocorre a aceleração do escoamento das águas pluviais e estimula-se a ocorrência de inundações, que, quando intensas, podem resultar em graves perdas econômicas, danos às construções e problemas para a população. Como consequência disso, as cidades sofrem com os alagamentos em dias de chuvas intensas, as avenidas importantes são severamente atingidas, impossibilitando o tráfego e acarretando grandes

congestionamentos de veículos. Além das questões relacionadas com o tráfego, a transmissão de doenças é um passivo ambiental que estimula a adoção de medidas para a solução de tais problemas.

A fim de minimizar os efeitos dos alagamentos, sistemas de drenagem mais eficientes são necessários. Porém a execução de drenos com capacidade para vazões muito elevadas pode requerer a execução de obras complexas, muitas vezes com elevado custo. Nem sempre isso é possível técnica ou economicamente, o que explica a ineficiência de grande parte das redes pluviais existentes em lidar com eventos extremos e, em muitos casos, até com os corriqueiros.

Os colapsos dos sistemas pluviais registrados em muitas cidades podem ser associados à combinação de vários eventos, incluindo a impermeabilização do solo, a desordenada expansão urbana, o descaso com o meio ambiente e o aumento da intensidade das precipitações atmosféricas. Esses fenômenos, inevitavelmente, acabam contribuindo para o caráter crítico que a questão da drenagem urbana tem assumido nas grandes cidades.

A tendência, na área de drenagem urbana, é a busca da manutenção das condições de pré-desenvolvimento atuando na fonte da geração do mesmo. Para tanto, devem utilizar-se dispositivos de acréscimo de infiltração e do aumento de retardo do escoamento. Dentre os dispositivos que procuram devolver ao solo as condições originais de escoamento está inserido o concreto permeável. Com o intuito de dominar a técnica do concreto permeável, pesquisas têm sido feitas em diversos países, para avaliar seu comportamento, suas eficiência e durabilidade, sendo que, no Brasil, esse material ainda é pouco conhecido e aplicado.

Os concretos permeáveis contribuem na drenagem sub-superficial, servindo como reservatórios e permitindo a infiltração de água no subleito, sem provocar alagamentos. Tais estruturas, entretanto, não se destinam a suportar tráfego pesado e têm sido empregadas fundamentalmente em passeios urbanos e estacionamento de automóveis. Quando utilizado em áreas externas, captura a água da chuva e permite que ela infiltre diretamente no solo, permitindo a passagem de grandes volumes de água.

Para garantir a sua permeabilidade, Polastre e Santos (2006) mencionam que este tipo de concreto deve possuir um alto índice de vazios interligados, com pouca ou nenhuma porção de areia na sua composição, permitindo, assim, a percolação de altas quantidades de águas pluviais e a sua reintegração ao ambiente. Segundo os autores, consegue-se um índice de

vazios da ordem de 15 % a 35 % na estrutura e um escoamento de água de 200 l/m²/min. Quantidades controladas de água e cimento formam um espesso revestimento em torno das partículas agregadas, formando muitos vazios interligados, deixando a peça altamente permeável. Diante deste fato, a sua utilização permite abastecer os aquíferos subterrâneos através de águas pluviais, bem como reduzir a velocidade e a quantidade do escoamento superficial das mesmas. Além disso, proporciona uma utilização mais eficiente do solo, uma vez que minimiza, ou até dispensa, outras obras de micro drenagem local, como pontos de retenção de água, valas e outras. Os benefícios ambientais vão além do abastecimento dos lençóis freáticos e da prevenção de alagamentos; esse sistema funciona como um filtro (da mesma forma que a terra durante o processo natural) e retém na superfície as impurezas presentes na água.

Como alternativa tecnológica para amenizar os problemas de alagamentos dos centros urbanos e, conseqüentemente, melhorar a saúde e a qualidade de vida da população, propõe-se a utilização de elementos de micro drenagem, confeccionados com concreto permeável. Através de seu uso, além de ajudarem a diminuir as quantidades de água retidas na superfície dos elementos de drenagem convencionais, auxiliarão na redução dos problemas de drenagem pluvial urbana. Os principais elementos do sistema de micro drenagem confeccionados em concretos convencionais e utilizados pelo Departamento de Esgotos Pluviais de Porto Alegre (DEP) são os meios-fios, as sarjetas, as bocas de lobo, as grelhas, os poços de visita, as galerias, os tampões, as caixas de passagem e os condutos forçados. É sobre esse escopo que a equipe de pesquisa em concreto permeável do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) vem trabalhando. A mesma tem desenvolvido estudos sobre a aplicação do concreto permeável em pavimentos drenantes. Resultados positivos para esse tipo de utilização já foram obtidos por Höltz (2011), e ensaios em pistas experimentais indicaram que o material pode efetivamente ser útil para criar pavimentos permeáveis.

Levando em conta esses resultados positivos, as pesquisas no LEME voltaram-se para a investigação de uma nova possibilidade de utilização do concreto permeável, como material componente dos próprios elementos dos sistemas urbanos de drenagem pluvial. Essa ideia inovadora, que ocasionou um pedido de patente, consiste na substituição de elementos de drenagem usuais (tampas de bueiro, grelhas e bocas de lobo) por elementos de concreto permeável. O uso de concreto permeável, nesses casos, pode ter efeito bastante positivo ao viabilizar a passagem de elevados fluxos, ao mesmo tempo em que se constitui em uma

barreira à passagem de detritos e em um filtro natural das águas, potencialmente evitando o ingresso de materiais diversos carregados pelo fluxo de água, de lixo e de partículas sólidas no interior das galerias do sistema de drenagem.

Se for exitoso, como esperado, o desenvolvimento desse tipo de elemento pode ter repercussão importante na redução dos alagamentos. O presente estudo se insere nessa iniciativa, buscando contribuir para a implantação e avaliação da ideia. Para tanto, o objetivo proposto foi investigar a possibilidade de geração de placas de concreto permeável para utilização em substituição às grelhas convencionais de drenagem utilizadas pelo DEP da cidade de Porto Alegre/RS.

Para esse fim, como será descrito ao longo do trabalho, foi inicialmente necessário definir e caracterizar um traço de concreto permeável adequado ao uso pretendido. A partir da definição do traço padrão, foram produzidas placas experimentais em concreto permeável, com dimensões similares às das grelhas convencionais, que foram submetidas a ensaios de resistência mecânica, infiltração e colmatção, com o intuito de caracterizar o seu desempenho, sob diversos aspectos, e compará-lo com o das grelhas em concreto convencional vazadas produzidas pelo DEP.

1.2. OBJETIVOS

Com base nos aspectos mencionados anteriormente, este trabalho teve como objetivo principal a análise do desempenho dos elementos de drenagem confeccionados em concreto permeável, através de ensaios de flexão, de permeabilidade e de resistência à compressão axial, e sua comparação com os elementos do DEP fabricados com concreto convencional.

Como objetivos específicos foram definidos:

- a) estabelecimento de um traço padrão de concreto permeável para fabricação das placas;
- b) sistematização dos procedimentos de execução (compactação e cura) para produção dos protótipos em concreto permeável;

- c) caracterização do desempenho, em termos de resistência mecânica, permeabilidade e colmatação, dos protótipos de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável;
- d) comparação do desempenho, em termos de resistência mecânica, permeabilidade e colmatação, dos protótipos de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável com o desempenho de uma grelha convencional disponibilizada pelo DEP.

Existem algumas delimitações que devem ser consideradas nesta pesquisa. Inicialmente, tinha-se em mente realizar os ensaios em mais de um tipo de elementos de drenagem do Departamento de Esgotos Pluviais (DEP), confeccionados em concreto permeável. Porém, ao tomar ciência de que existem muitas ligações mistas na cidade, verificou-se que o uso do concreto permeável em elementos, como o da tampa da caixa da laje de visita e da caixa de ligação, não traria bons resultados em função do odor que exalaria no local. Desta maneira, esta pesquisa foi desenvolvida somente para as grelhas.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi organizado em 6 capítulos, como descrito a seguir.

O capítulo 1 apresenta o escopo desta dissertação. No mesmo, são explicados o contexto no qual a pesquisa está inserida, os objetivos propostos e as delimitações do trabalho.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão da literatura, focada nos problemas de drenagem urbana e em sua relação com a urbanização descontrolada. É exposta a problemática da situação atual e as possíveis soluções alternativas para a drenagem das águas pluviais em meio urbano, destacando o papel dos elementos de drenagem pluviais que se pretendem substituir por concreto permeável.

No capítulo 3, é realizada uma explanação referente aos aspectos gerais associados à utilização do concreto permeável, voltada para a realidade brasileira. São apresentadas as principais características do material, discutidas as tendências de desenvolvimento, tendo como base principal as experiências americanas, onde a tecnologia é utilizada há mais tempo.

No capítulo 4, é apresentado o delineamento dos experimentos realizados e os resultados dos ensaios preliminares executados para definição do traço a ser empregado no restante do trabalho.

O capítulo 5 contém a descrição dos ensaios em placas, com apresentação dos métodos experimentais empregados, inclusive aqueles criados especialmente para o trabalho, e a análise dos resultados obtidos.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e considerações finais.

2. DRENAGEM URBANA

Neste capítulo, é apresentada a problemática associada à situação atual no campo da drenagem urbana, destacando os inúmeros problemas decorrentes do grande número de pontos de alagamentos que se forma em áreas urbanas, devido à incapacidade de escoamento das águas da chuva. Além disso, abordam-se as possíveis alternativas para evitar ou minimizar estas ocorrências, destacando o papel dos elementos de drenagem pluviais e analisando a possível contribuição do uso do concreto permeável (em inglês, *Pervious Concrete*).

2.1. AUMENTO DA URBANIZAÇÃO E SEUS IMPACTOS NA DRENAGEM URBANA

No contexto atual de desenvolvimento do Brasil, que vivencia uma intensificação dos processos de urbanização, com todos os impactos hidrológicos e ambientais decorrentes, o desafio da drenagem urbana vem tornando-se cada vez maior e mais complexo, pois envolve aspectos ambientais, sanitários e paisagísticos, além dos puramente técnicos. A dinâmica de expansão urbana, nas últimas décadas, muitas vezes descontrolada, tem produzido grandes impactos negativos, de diferentes naturezas, principalmente nos países em desenvolvimento. Em grande parte, esses estão associados à ausência de infraestrutura adequada, que permita dar suporte a essa urbanização.

O processo de urbanização intensificou-se, primeiramente, nos países do continente europeu, com o surgimento e desenvolvimento das indústrias durante o século XVIII. A partir de 1950, esse processo tomou proporções em escala global, e as atividades industriais expandiram-se por vários países, atraindo cada vez mais pessoas para as cidades. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), o Brasil apresentou, ao longo das últimas décadas, um crescimento significativo da população urbana, com expansão das chamadas regiões metropolitanas. A taxa de pessoas morando em centros urbanos brasileiros, atualmente, é de 84,4 %, sendo que o processo de urbanização mais acelerado no país ocorreu depois da década de sessenta, quando a taxa de urbanização era de 45,1 %. A falta de

planejamento fez com que boa parte da população urbana vivesse praticamente sem infraestrutura adequada, problema que se agravou na década de oitenta, quando os investimentos públicos foram muito reduzidos.

O avanço econômico gerou o aumento da quantidade de edificações e a expansão dos grandes centros urbanos. Grandes áreas, antes predominantemente ocupadas por instalações rurais, foram transformando-se em centros residenciais, devido à crescente construção de loteamentos e condomínios. Mendonça (2004) faz reflexões sobre os impactos dessa dinâmica, analisando a relação entre a hiper-densificação de centros urbanos já consolidados e o alastramento de suas respectivas malhas urbanas para áreas circundantes, onde a ocorrência de impactos ambientais é frequente.

Tucci (2003) relata que, nestes últimos anos, o aumento da população urbana tem ocorrido principalmente na periferia das metrópoles, ocupando áreas de mananciais e de risco de inundação e de escorregamento. Além de acelerado, o processo de urbanização tem acontecido, em geral, de forma desordenada, sem o planejamento e a implementação de ações que conduzam de forma adequada à ocupação do solo.

Dentre os vários efeitos negativos associados à urbanização não planejada destacam-se os problemas associados à drenagem urbana, decorrentes de sistemas subdimensionados e obstruídos. Os impactos da urbanização sobre o sistema de drenagem urbana das cidades são variados, mas estão fundamentalmente relacionados aos processos do crescimento populacional desordenado, à ausência de uma adequada estratégia de ocupação do solo, ao deficiente planejamento urbano e a problemas de provisão de infraestrutura de serviços adequadamente dimensionada.

De acordo com Tucci (2003), o ciclo hidrológico, cujas etapas podem ser visualizadas na Figura 1, sofre fortes modificações nas áreas urbanas, devido, principalmente, à alteração da superfície e da canalização do escoamento em virtude da poluição causada pela contaminação do ar, das superfícies urbanas e do material sólido disposto pela população. Esse processo apresenta grave impacto nos países em desenvolvimento, onde a urbanização e as obras de drenagem são realizadas de forma totalmente insustentável, já tendo sido abandonadas pelos países desenvolvidos há muitos anos.

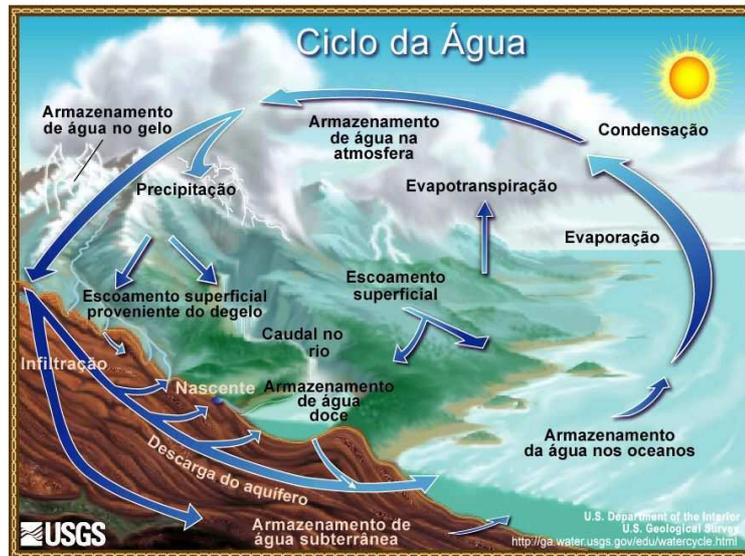


Figura 1: etapas do ciclo hidrológico (US GEOLOGICAL SURVEY, 2013)

Tucci (2003) ainda relata que, na proporção em que a cidade cresce, ocorrem consequências indesejadas para o sistema de drenagem urbana, tais como:

- a) aumento das vazões máximas, dos volumes escoados e a antecipação dos picos, devido a uma maior capacidade de escoamento através dos condutos e dos canais e à impermeabilização das superfícies;
- b) redução da evapotranspiração, do escoamento subterrâneo e do rebaixamento do lençol freático;
- c) aumento da produção de sedimentos, devido à desproteção das superfícies e à produção de resíduos sólidos;
- d) deterioração da qualidade da água, devido à lavagem das ruas, ao transporte de material sólido (principalmente no início das chuvas) e às ligações clandestinas de esgoto cloacal no pluvial.

Outra questão importante, salientada por Mendonça (2004), é que a concentração de população em grandes metrópoles propicia o aumento da poluição e da frequência das inundações em função da impermeabilização e da canalização de rios. Acioli (2005) elenca como principais danos resultantes do processo de urbanização: o aumento no volume do escoamento superficial e da frequência das inundações, assim como de sua intensidade; a

redução da umidade do solo, que leva a uma redução do lençol freático; a diminuição do escoamento de base de rios; a redução do armazenamento potencial, da capacidade de transporte dos vales dos rios e o aumento na carga de poluentes decorrente da rede pluvial ou do escoamento superficial. Desse modo, com o aumento da urbanização, nos moldes atuais, ocorre uma perda da capacidade de infiltração, e existe uma tendência de que os fluxos de água cheguem mais rapidamente e com mais energia aos corpos de água, aumentando as ondas de pico e gerando mais cheias.

Os impactos da urbanização são também significativos do ponto de vista ambiental. A carga de poluição das águas pluviais, até recentemente supostas limpas, mostra-se, na realidade, muitas vezes equivalente e, eventualmente, até mesmo superior às cargas poluentes dos esgotos sanitários (ELLIS e HVITED-JACOBSEN, 1996).

A transformação gradual da superfície, com perda da permeabilidade e favorecimento do escoamento superficial, gera demandas crescentes para o sistema de drenagem urbana. Um número crescente de obras, com porte cada vez maior, torna-se necessário para lidar com os grandes fluxos de água concentrados, e a situação vai agravando-se com o passar do tempo. Pior ainda, apesar dos enormes investimentos, muitas vezes o resultado efetivo das intervenções consiste, de fato, em transferir o problema para jusante.

Para agravar o problema, as extensas e precárias redes de drenagem das cidades brasileiras acabam comprometidas pelo acúmulo de sujeira e de detritos nas bocas de lobo, no interior das canalizações e nos corpos de água. São comuns as imagens de sacos de lixo obstruindo entradas da rede ou de detritos de natureza variada em riachos urbanos.

Tucci (2003) considera que um fator histórico que afeta as questões de drenagem urbana é o de muitas cidades terem sido fundadas em regiões próximas a rios de médio e grande portes, pois sua sustentação, no início, dependia do uso de transporte fluvial. Com o crescimento das cidades, houve uma natural ocupação de áreas de várzea, agravando os problemas com a drenagem. O autor ainda faz a associação de que a parcela do leito maior ocupada pela população pode ser, em muitos casos, devido à memória dos habitantes e à frequência de inundações, de modo que uma sequência de anos sem inundação estimula a ocupação do leito maior do rio.

Outra questão importante relacionada ao aumento da urbanização e a seus impactos na drenagem urbana é a relação entre a ocupação do solo e as áreas impermeabilizadas. Sobre isso, algumas considerações são apresentadas.

Devido às demandas naturais do desenvolvimento da sociedade, é inevitável ocasionar alterações no meio ambiente. Entretanto, se essas modificações não são realizadas com planejamento, podem gerar inúmeras situações indesejáveis, como é o caso da impermeabilização do solo através do asfalto ou concreto. Essa impermeabilização provoca a diminuição, às vezes por completo, da infiltração de substâncias e da água para o subsolo. Esses problemas estão fortemente ligados à questão da mudança da cobertura natural do solo em decorrência do processo de ocupação.

Polastre e Santos (2006) afirmam que o aumento das superfícies impermeáveis é um dos principais impactos que o desenvolvimento de uma área urbana provoca nos processos biológicos, pois a significativa alteração do escoamento natural da bacia hidrográfica, com o aumento do volume das águas pluviais escoadas superficialmente, incrementa as vazões de pico dos corpos d'água, a degradação da qualidade da água, assim como a geração de sedimentos, entre outros. A impermeabilização das áreas superficiais, principalmente de forma inadequada, é um dos principais fatores que mais gera impacto ambiental, pois provoca a alteração das características naturais do solo e aumenta a ocorrência de alagamentos.

Tucci e Genz (1995) relatam que há uma forte relação entre a forma de ocupação das áreas de uma bacia e os recursos hídricos. Segundo eles, onde antes as águas percolavam naturalmente no solo, agora existe concreto, aço e outras estruturas, aumentando o seu escoamento superficial, encaminhando-as para outras áreas mais baixas e provocando as enxurradas. Dessa forma, a bacia perde a sua funcionalidade, os pontos de detenção natural e a capacidade das plantas de ajudar a reter parte dessa água, de modo que há uma maior necessidade de tubulações, retificações de rios e revestimento de canais para o gerenciamento dessas águas.

Agra (2001) reforça que é a impermeabilização do solo a grande responsável pelo problema na drenagem urbana, pois gera impactos no fluxo das águas na bacia. Esses surgem quando não são oferecidas alternativas viáveis, ambiental e economicamente, para essas alterações. Por fim, a manutenção da qualidade da água também tem sua origem na conscientização da população e em investimentos sérios na gestão de redes de esgoto e abastecimento de água.

De acordo com Tucci (2003), o processo descontrolado de expansão urbana no Brasil atua diretamente sobre as inundações pela falta de infraestrutura e de capacidade do poder público para cobrar que a legislação seja respeitada. Além disso, atualmente, essa urbanização ocorre de forma mais intensa e, na maior parte dos casos, sem planejamento, em que áreas inteiras são ocupadas e loteadas, de forma clandestina ou não, contribuindo para os processos de erosão.

A urbanização desmesurada leva a população a ocupar áreas dos leitos de rios ou de mananciais. Tudo isso só faz agravar a problemática das enchentes nos grandes centros urbanos. As soluções encontradas para conter, da maneira que é possível, esses fenômenos naturais seguem uma linha imediatista na tentativa de alcançar a resolução do problema em um período curto de tempo. Dentre as ações adotadas destacam-se as obras de desassoreamento dos rios (retirada dos sedimentos depositados pela água) e, conseqüentemente, o aprofundamento do leito, com canalização e construção de reservatórios regularizadores de vazão (TUCCI, 2003).

A urbanização implica em alterações significativas nos processos hidrológicos relatados anteriormente. Observam-se tanto as reduções da interceptação, coma do armazenamento superficial e também da infiltração, em função do acréscimo de áreas impermeabilizadas, e o conseqüente aumento dos volumes de escoamento superficial nessas localidades afetadas. Além disso, a maior eficiência hidráulica da drenagem, associada aos condutos artificiais, conduz ao aumento da velocidade de escoamento e, portanto, da magnitude dos picos de cheia.

Para piorar esse quadro, durante muito tempo o conceito de drenagem urbana foi fundamentado simplesmente na execução de medidas estruturais baseadas em obras de engenharia, sob a perspectiva de remover os excessos de águas pluviais de forma mais eficiente para evitar transtornos e danos causados pelas inundações. Devido à supressão de cursos d'água pela urbanização, os projetos de engenharia acabavam optando por proporcionar a retificação dos canais. Com a diminuição das sinuosidades naturais e da rugosidade do leito, a velocidade dos fluxos de água aumenta, livrando a área localizada a montante de volumes de água, que, por sua vez, inundam os setores a jusante do canal (CANHOLI, 2005).

2.2. DESAFIO DAS INUNDAÇÕES URBANAS

Como descrito no item anterior, em um quadro marcado pela urbanização crescente, ocorreu uma obsolescência gradual e inexorável dos sistemas de drenagem, levando a inundações cada vez mais frequentes em áreas urbanas. Esses fenômenos naturais, que ocorrem quando a precipitação é elevada, ou seja, quando a chuva é intensa e constante, são causados por um aumento da quantidade de água nos corpos hídricos, que, sem escoamento suficiente, transbordam suas margens.

2.2.1. Tipos de Inundações

As inundações podem ser (TUCCI, 2007):

- a) ribeirinhas;
- b) devido à urbanização (associadas normalmente a deficiências na estrutura de drenagem urbana).

Inundações ribeirinhas são um processo natural, resultado da flutuação dos rios durante os períodos secos e chuvosos. Os problemas ocorrem devido à ocupação das áreas de risco pela população, como decorrência do ciclo hidrológico das águas. Sua principal causa é a ocupação do leito maior nos anos secos, geralmente pela população de baixa renda, o que ocasiona fortes prejuízos nos anos úmidos, quando essas áreas são inundadas. Dada a ocupação, quando chega uma inundação mais intensa, os impactos são enormes, com grandes prejuízos, gerando sérios problemas públicos (TUCCI, 2007). Alguns dados indicam que as enchentes naturais extravasam sua calha menor, em média, a cada dois anos, ocupando então o leito maior dos cursos d'água.

Inundações devido à urbanização (drenagem urbana) são as em que ocorre a ampliação das vazões, devido à canalização e à impermeabilização do solo em áreas urbanizadas, provocando o aumento da vazão máxima, geralmente em pequenas bacias. Resulta no aumento da carga de resíduos sólidos transportada pela drenagem, assim como no aumento da carga de poluentes e na redução da qualidade da água de jusante. Muitas vezes pode provocar a erosão e o escorregamento de encostas, devido à falta de drenagem e à existência de ocupações inadequadas, assim como favorecer as doenças de veiculação hídrica.

Os problemas que dizem respeito ao controle de inundações são decorrentes da elevação dos picos das cheias, ocasionada, tanto pela intensificação do volume do escoamento superficial direto (causado pelo aumento da densidade das construções e consequente impermeabilização da superfície), como pela diminuição dos tempos de concentração e de recessão. Essa diminuição é também oriunda do acréscimo na velocidade de escoamento devido à alteração do sistema de drenagem existente, exigida pelo aumento da densidade de construções (TUCCI, 2000).

De acordo com Tucci (2009), as inundações e a antecipação dos picos de cheias, provocadas pela impermeabilização da superfície, passaram a ocorrer mesmo em áreas que, em condições naturais, não apresentavam potencial para tais eventos..

2.2.2. Efeitos Negativos das Inundações

Inundações urbanas são cada vez mais frequentes, dificultando o cotidiano dos moradores, tornando o tráfego caótico e intransitável e inundando muitas casas durante os eventos de chuva. Como exemplo disso, segue a Figura 2 do ano anterior, em que, durante um evento de chuva em Porto Alegre/RS, a Avenida Padre Cacique encontrou-se totalmente inundada e quase sem possibilidade de trânsito.



Figura 2: inundação urbana devido a evento de chuva em Porto Alegre/RS

Dentre os efeitos mais graves das inundações, decorrentes da impermeabilização da superfície, destacam-se: maiores picos de vazão e maiores volumes, maiores picos a jusante, assoreamento de canais e de galerias, entupimento de bueiros, degradação da qualidade da água, doenças de veiculação hídrica, maiores custos de utilidades públicas e perdas e prejuízos às populações que sofrem com as inundações.

A situação é ainda mais grave para os habitantes ribeirinhos, que são forçados a deixar suas casas durante a estação chuvosa. Uma inundação no meio urbano é muito mais complexa do que o fluxo natural de um rio, pois suas causas têm múltiplas dimensões inerentes ao processo de urbanização, que formam um emaranhado significativo de inter-relações entre os fenômenos que causam inundações.

A tendência de controle das cheias urbanas devido à urbanização é que ele seja realizado, na maioria das vezes, através da canalização dos trechos críticos. Esse tipo de solução segue a visão particular de um trecho da bacia, sem que as consequências sejam previstas para o restante da mesma ou dentro de diferentes horizontes de ocupação urbana. A canalização dos pontos críticos acaba apenas transferindo a inundação de um lugar para outro na bacia. Esse processo, em geral, ocorre na seguinte sequência:

- a) estágio um, em que a bacia começa a ser urbanizada de forma distribuída, com maior densificação a jusante, aparecendo, no leito natural, os locais de inundação devido a estrangulamentos naturais ao longo do seu curso;
- b) estágio dois, em que as primeiras canalizações são executadas a jusante, com base na urbanização atual, de modo que o hidrograma a jusante aumenta, mas é ainda contido pelas áreas que inundam a montante e porque a bacia não está totalmente densificada;
- c) estágio três, em que, com a maior densificação, a pressão pública faz com que os administradores continuem o processo de canalização para montante.

Tucci (2007) especifica que, numa bacia hidrográfica rural, o fluxo de água acaba sendo retido pela presença de vegetação, ocasionando maior infiltração da mesma no solo. O restante da água escoar sobre a superfície de forma gradual, produzindo um hidrograma com variação lenta de vazão e picos de enchente moderados. Quando, durante o processo de urbanização, a vegetação é retirada, o solo é impermeabilizado e os canais de escoamento são

retificados, pode ter-se uma forte redução da infiltração e do tempo de escoamento, o que faz com que mais água chegue mais rapidamente aos leitos dos cursos de água maiores. Como os mesmos se encontram estrangulados pela ocupação das margens, as inundações tornam-se mais frequentes e intensas.

Um fator agravante é que, no Brasil, grande parte da população ainda não dispõe de sistemas de abastecimento de água e tratamento de efluentes, vivendo em condições subumanas. Essas pessoas utilizam água proveniente de fontes que podem não apresentar níveis aceitáveis de qualidade, podendo acarretar doenças, fazendo com que recursos sejam despendidos pelo sistema de saúde e que vidas sejam perdidas.

É interessante notar que o problema das inundações, muitas vezes, é resultado do bloqueio de córregos e de riachos que cruzam os bairros. Isto decorre de condutas inadequadas dos próprios moradores, que diariamente despejam quantidades exorbitantes de lixo doméstico nos corpos de água ou suas margens.

A situação no Brasil é muito preocupante, porque o que se constata, é que muitos Estados não possuem um bom sistema de coleta de lixo. Por outro lado, naqueles onde há sistema de coleta e transporte de resíduos, muitas vezes, estes não conseguem recolher toda a produção gerada. Deste modo, o que se observa, é que os resíduos sólidos são depositados em locais muito próximos a córregos de água, conforme ilustrado na Figura 3. Esses materiais acabam por obstruir os sistemas de drenagem, já bastante saturados com altas vazões de águas pluviais por conta da impermeabilização urbana, e por causar tanto inundações como problemas de saúde pública (NEVES, 2006).



Figura 3: resíduos sólidos depositados próximos a córregos de água

De acordo com Tucci (2003), pode considerar-se que o impacto sobre a qualidade da água é resultado de vários fatores, como: poluição existente no ar que se precipita junto com a água, lavagem das superfícies urbanas contaminadas com diferentes componentes orgânicos e metais, resíduos sólidos representados por sedimentos erodidos pelo aumento da vazão (velocidade do escoamento), lixo urbano depositado ou transportado para a drenagem e esgoto cloacal que não é coletado e escoado através da drenagem. A carga de contaminação dos três primeiros itens pode ser superior à resultante do esgoto cloacal sem tratamento. Deve-se considerar que 90 % da carga do escoamento pluvial ocorrem na fase inicial da precipitação (primeiros 25 mm).

Além da geração de resíduos sólidos e poluentes resultantes da lavagem das superfícies de telhados, passeios e vias públicas, grande parte do entulho jogada diretamente em bueiros e bocas de lobo, bem como o lixo lançado nas calçadas e valas, ou jogado de veículos em ruas e avenidas, causam entupimentos, alagamentos e outros transtornos, após ser arrastado pelas águas das chuvas, reduzindo a vazão do volume de água e provocando alagamentos. A grande maioria dos resíduos sólidos leva muito tempo para desaparecer na natureza e transporta poluentes agregados aos resíduos que contaminam os sistemas hídricos, os quais podem ocasionar as doenças de veiculação hídrica.

Essas doenças podem ser transmitidas diretamente pela água, provocadas pela ingestão de água contaminada por urina ou fezes, humanas ou de animais, contendo bactérias ou vírus

patogênicos. Podem ser causadas pela falta de limpeza e de higiene da água, provocadas por higiene pessoal deficiente ou pelo contato de água contaminada na pele ou nos olhos.

A contaminação por doenças de veiculação hídrica, como amebíase, cólera, febre amarela, tifóide, hepatites A e C, tétano, dengue, malária, poliomielite, salmonelose, teníase, leptospirose, intoxicações alimentares, infecções intestinais devido a outros microrganismos e infecções intestinais mal definidas, entre outras, constituem ainda hoje, importante causa de morbidade e mortalidade no Brasil e no mundo. Segundo dados do Datasus (BRASIL, 2003), essas doenças foram responsáveis por 5 % das internações hospitalares realizadas, além de 2 % dos óbitos. Entre essas, destaca-se a leptospirose, a qual é uma doença infecciosa causada por uma bactéria do gênero *Leptospira spp.*, que pode estar presente na urina de ratos contaminados presentes em esgotos e bueiros, cuja urina mistura-se, na enxurrada, à lama das enchentes.

Além das doenças de veiculação hídrica, como consequências ambientais resultantes desse aumento de sedimentos e de material sólido, Tucci (2002) aponta o assoreamento das seções canalizadas da rede, reduzindo a capacidade de escoamento de condutos, rios e lagos urbanos, e ainda cita o transporte de poluente agregado a esse material, contaminando as águas pluviais. Neves e Tucci (2003) listam os diversos lugares em que esses resíduos sólidos são despejados inadequadamente diariamente na superfície, atingindo as redes de drenagem urbana, como nas vizinhanças de *shopping centers*, estacionamentos, saídas de *fast-foods*, estações rodoviárias e ferroviárias, estradas, escolas, parques públicos e jardins, *contêineres*, locais de aterros e depósitos de reciclagem.

De acordo com Tucci (2007), o risco do acúmulo de lixo na drenagem tem sido um dos principais problemas para o funcionamento dos dispositivos de detenções na drenagem urbana. Tucci (2007) relata que cerca de 2 a 67 kg/ha/ano de resíduos sólidos chegam aos sistemas de drenagem, limitando o funcionamento de detenção. Esse material, que chega aos sistemas de drenagem dos centros urbanos, tem ligação direta com a eficiência desses serviços e de outros fatores como a frequência e cobertura da coleta de lixo, da limpeza das ruas, da reciclagem, da forma de disposição do lixo pela população e das precipitações.

Conforme relata Tucci (2000), à medida que a precipitação ocorre e a água não é infiltrada, esse aumento de volume, da ordem de seis vezes, escoar pelos condutos. Para transportar todo esse volume, é necessário ampliar a capacidade de condutos e de canais ao longo de todo o

seu trajeto dentro da cidade até um local onde o seu efeito de ampliação não atinge a população. A irracionalidade dos projetos leva a custos insustentáveis, podendo chegar a valores dez vezes maiores do que o custo de amortecer o pico dos hidrogramas e diminuir a vazão máxima para jusante através de uma detenção. Portanto o paradoxo é que países desenvolvidos verificaram que os custos de canalização e de condutos eram muito altos e abandonaram esse tipo de solução no início dos anos setenta, enquanto países subdesenvolvidos ainda adotam sistematicamente essas medidas, com custos muito maiores e mais prejuízos.

Batista e Nascimento (1996) estimaram um valor anual médio referente a despesas e prejuízos associados a inundações que alcança um montante superior a dois bilhões de dólares. Já Tucci (2000) estimaram valores da ordem de um bilhão de dólares por ano. Independentemente da variabilidade e incerteza desses valores, ambos são bastante significativos, permitindo perceber a magnitude que a questão representa, sobretudo no quadro de fortes restrições orçamentárias vigentes no Brasil.

Essa situação vai agravando-se cada vez mais, visto que, atualmente, as cidades médias apresentam grande crescimento populacional e reproduzem os problemas já consolidados nas grandes metrópoles. Dessa forma, são necessárias pesquisas sobre formas de mitigação das inundações, como através do aumento das superfícies permeáveis.

2.2.3. Mitigação das Inundações pelo Aumento das Superfícies Permeáveis

Dentro de uma percepção moderna, é reconhecido que a drenagem urbana não deve ser considerada apenas como um conjunto de ações isoladas, voltadas exclusivamente para a implantação de grandes obras de engenharia, com a finalidade de corrigir problemas já existentes de forma pontual, na tentativa de livrar-se rapidamente da água da chuva. De uma maneira geral, as águas decorrentes da chuva (coletadas nas vias públicas por meio de bocas de lobo e descarregadas em condutos subterrâneos) são lançadas em cursos d'água naturais, no oceano, em lagos ou, no caso de solos bastante permeáveis, esparramadas sobre o terreno por onde infiltram no subsolo. A introdução de redes de drenagem ocasiona uma diminuição considerável no tempo de concentração e maiores picos a jusante.

Novos modelos, já adotados em muitos países desenvolvidos, incorporam algumas técnicas inovadoras da engenharia como a construção de estacionamentos permeáveis e de canais abertos com vegetação a fim de atenuar as vazões de pico e reduzir a concentração de

poluentes das águas de chuva nas áreas urbanas. Princípios modernos da drenagem urbana pluvial orientam que novos desenvolvimentos não podem aumentar a vazão de pico das condições naturais (controle da vazão de saída), que o planejamento da bacia deve incluir controle do volume e que se deve evitar a transferência dos impactos para jusante. O controle da drenagem na fonte pode ser executado através de áreas de infiltração e de trincheiras, de pavimentos permeáveis ou de retenção. O princípio é manter a vazão preexistente, não transferindo o impacto do novo desenvolvimento para o sistema de drenagem (TUCCI, 2007).

Para mitigar os efeitos, é necessário resolver ou minimizar os problemas. Pesquisas indicam que o uso de concreto permeável pode ter um efeito importante nesse panorama. Em primeiro lugar, o concreto permeável pode ser usado para gerar pavimentos permeáveis e com capacidade de armazenamento, favorecendo a infiltração e o retardo do escoamento. Esse tipo de emprego é o mais comum e vem sendo estudado por vários pesquisadores como Kevern (2009), Haselbach (2010), Hölitz (2011) e outros. Essa foi a razão pela qual o concreto permeável foi incorporado à linha de estudos do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mas, além de ser usado como pavimento, vislumbrou-se a possibilidade de usar o concreto permeável também para fabricação de elementos do sistema de drenagem. Nesse caso, o concreto permeável passa a ter uma função importante, que é a de impedir o bloqueio dos sistemas e o ingresso de detritos nas tubulações e canalizações. O estudo apresentado neste trabalho foi proposto para investigar essa possibilidade.

2.3. SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA PLUVIAL

Os sistemas de drenagem urbana pluvial têm a função de direcionar e auxiliar o escoamento do volume de água não absorvido pelo solo após a ocorrência de precipitações atmosféricas, prevenindo, dessa forma, a formação de inundações. Eles vêm fazer parte do conjunto de melhoramentos públicos existentes em uma área urbana. O escoamento de águas pluviais sempre ocorrerá independente de existir ou não sistema de drenagem adequado. Os sistemas tradicionais de drenagem são constituídos, tipicamente, pela rede de transporte de escoamento, e as soluções, normalmente empregadas, consistem em galerias e condutores subterrâneos, responsáveis por transportar rapidamente os excessos de água para jusante. Atualmente tem-se observado uma grande ineficiência das redes pluviais, visto que a grande maioria dos sistemas existentes encontra-se ultrapassado, não atendendo mais as necessidades

dos atuais centros urbanos, que, naturalmente, cresceram e estenderam-se para além dos seus limites, comprometendo todo o fluxo das águas na bacia (ACIOLI, 2005).

Segundo relatado por Batista et al. (2011), outra abordagem para tratar o problema de drenagem, foi sendo construída. Trata-se do conceito de “tecnologias alternativas ou compensatórias de drenagem”, que buscam neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, com benefícios para a qualidade de vida e para a preservação ambiental. Eles defendem que essas tecnologias são alternativas em relação às soluções clássicas, porque considera os impactos da urbanização de forma global, tomando a bacia hidrográfica como base de estudo e buscando compensar, sistematicamente, os efeitos da urbanização. Essa compensação é efetuada pelo controle da produção de excedentes de água decorrentes da impermeabilização e evitando-se sua transferência rápida para jusante. As soluções mais adotadas, segundo os autores (BATISTA et al., 2011), são:

- a) bacias ou reservatórios de detenção, que podem ser utilizadas em diferentes escalas, desde pequenas até áreas grandes;
- b) estruturas para armazenamento temporário, implantadas por simples adequação de configuração topográfica em áreas de estacionamento, em terrenos esportivos e em áreas livres em geral;
- c) pavimentos porosos, destinados ao armazenamento temporário e/ou infiltração, em áreas de estacionamento e no sistema viário;
- d) estruturas que favorecem a infiltração e a percolação, tais como trincheiras, poços, valas, valetas e outras;
- e) canalizações de cursos d’água com técnicas que favorecem o escoamento lento ou mesmo a detenção temporária das águas;
- f) tratamento de fundos de vale, com zoneamento de planícies de inundação e com delimitação de áreas destinadas ao armazenamento temporário.

Essas técnicas que facilitam a infiltração das águas pluviais, além de contribuir para a redução dos volumes de escoamento superficial, ainda desempenham um papel na compensação das

perdas na recarga das reservas d'água subterrânea decorrentes dos processos de impermeabilização ligados ao desenvolvimento urbano.

2.3.1. Porto Alegre/RS e o sistema de drenagem urbana pluvial

Porto Alegre/RS, situada às margens do lago Guaíba, ocupa uma posição geograficamente estratégica, mas também de extrema vulnerabilidade em relação às inundações. No lago, deságuam os rios Jacuí, Caí, Sinos e Gravataí, em cujas nascentes ocorrem as maiores precipitações pluviométricas do Estado. Além disso, nos períodos de chuva intensa, as áreas baixas, situadas nas planícies pluviais do rio Gravataí e do arroio Dilúvio, ficam constantemente alagadas. Enquanto a inundação é a elevação do nível da água no lago, o alagamento é causado pelo não escoamento da água da chuva.

Segundo o Plano de Manejo da Reserva Biológica Estadual da Serra Geral (RIO GRANDE DO SUL, 2008) da Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA) do Rio Grande do Sul (RS), cerca de 35 % da área urbanizada de Porto Alegre situa-se nas terras baixas, com altitude inferior a 3 m, estando apenas 2 m acima do nível médio da lâmina d'água do lago Guaíba. Esse fato contribuiu significativamente para o histórico de cheias na cidade e, conseqüentemente, para a série de obras hidráulicas construídas para minimização do problema.

Aproximadamente 70 km de diques externos, internos e de uma cortina de proteção, conhecida como Muro Mauá, construído a partir dos anos setenta, fazem a proteção da cidade para novos eventos. A macrodrenagem é feita através de condutos forçados, a qual retira a água da superfície nos pontos altos (acima de 5 m) e canaliza-a até o rio, sem a necessidade de bombeamento. Nos pontos baixos, a água é recolhida pelas bocas de lobos e encaminhada por tubulações e galerias até as casas de bombas, de onde são lançadas no lago. Entupimentos nas bocas de lobo e chuvas de intensidade elevada são as causas geradoras dos alagamentos frequentemente vistos na cidade.

O arroio Dilúvio, importante córrego da cidade, possui grande importância no sistema de drenagem do município. Ele recebe, anualmente, cinquenta mil metros cúbicos de terra e de lixo em suas águas, equivalente a dez mil caminhões-caçamba cheios. Carrega, ainda, o esgoto cloacal de três bairros para o lago Guaíba. De toda a sua extensão, cerca de doze quilômetros necessitam de limpeza e de dragagem permanente, feitas pelos acessos laterais oferecidos pela Avenida Ipiranga. Devido à sua largura e à sua pequena profundidade, durante

as estiagens, tem sido aumentada a produção de sedimentos das bacias de montante. Como consequência disso, criou-se vegetação dentro do arroio Dilúvio, reduzindo sua capacidade para escoamento das enchentes. Durante esses fenômenos naturais, as substâncias existentes na água da lavagem das ruas podem agregar-se aos sedimentos.

Porto Alegre/RS foi a primeira capital brasileira a possuir um departamento municipal que trata especificamente das questões dos alagamentos, assim como a primeira cidade brasileira a iniciar a elaboração de um Plano Diretor de Drenagem Urbana (PORTO ALEGRE, 2005a) no país. Seu Departamento de Esgotos Pluviais (DEP) foi criado oficialmente em 17 de julho de 1973, com o intuito de planejar, construir e conservar as redes de drenagem urbana do município. O DEP passou a controlar totalmente o sistema de proteção contra as cheias em 1990, quando o governo federal extinguiu o Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS). Desde então, o departamento passou a gerenciar, além da rede de esgoto pluvial, também a situação dos arroios, diques e casas de bombas em Porto Alegre/RS. Hoje o órgão administra mais de 3 mil quilômetros de rede, com, aproximadamente, 75 mil pontos de captação (bocas de lobo e poços de visita), 70 quilômetros de canais e de condutos forçados, dezenas de arroios e de córregos, 68 quilômetros de diques de proteção, 19 casas de bombas e 2.647 metros de cortina de proteção, incluindo 14 novas comportas com acionamento hidráulico contra inundações na Avenida Mauá.

Em 2004, foi estabelecido o Decreto n° 14.786 (PORTO ALEGRE, 2004), que institui o Caderno de Encargos do Departamento de Esgotos Pluviais (PORTO ALEGRE, 2005b) para projetos, serviços, implantação, fiscalização e conservação das redes de drenagem pluvial urbana, o qual define os critérios de manutenção e conservação das casas de bombas e do Sistema de Proteção às Cheias do Município de Porto Alegre/RS. Nesse foram fixadas diretrizes de projeto para redes de equipamentos e métodos de avaliações quantitativas e qualitativas de serviços necessários para a implantação, fiscalização e conservação das redes de drenagens pluviais em geral do município. Estabeleceu-se, ainda, a competência única e exclusiva do DEP nas questões de drenagem pluvial urbana no âmbito do município, tanto para os órgãos públicos como para as empresas privadas. De acordo com o Caderno de Encargos do DEP de Porto Alegre (PORTO ALEGRE, 2005b), os sistemas de drenagem são definidos como:

- a) na fonte;

- b) microdrenagem;
- c) macrodrenagem.

Os denominados na fonte são definidos pelo escoamento que ocorre no lote, condomínio ou empreendimento individualizado, estacionamentos, área comercial, parques e passeios. As principais medidas sustentáveis na fonte têm sido a detenção de lote (pequeno reservatório), que controla apenas a vazão máxima, o uso de áreas de infiltração para receber a água de áreas impermeáveis e recuperar a capacidade de infiltração da bacia e os pavimentos permeáveis. Estas duas últimas medidas minimizam também os impactos da poluição.

A microdrenagem é definida pelo sistema de condutos pluviais ou de canais em um loteamento ou de rede primária urbana. Esse tipo de sistema de drenagem é projetado para atender a drenagem de precipitações com risco moderado. Também chamado de coletor de águas pluviais, pode-se dizer que é aquele composto pelos pavimentos das ruas, guias, sarjetas, bocas de lobo, galerias de águas pluviais e também canais de pequenas dimensões. O sistema de microdrenagem, conforme ilustrado na Figura 4, é dimensionado para o escoamento de águas pluviais, cuja ocorrência tem período de retorno variando entre 2 a 10 anos. Por sua vez, esse sistema pode ser dividido em duas partes, que são a drenagem superficial e a drenagem subterrânea. Considera-se como superficial a drenagem realizada pelas ruas, guias, sarjetas e sarjetões. Já a drenagem subterrânea, considera-se como aquela composta pelas galerias de águas pluviais que, por sua vez, são compostas pelas bocas de lobo, pelas tubulações, pelos poços de visita e pelas estruturas acessórias, sendo projetadas tendo em vista a condução das águas pluviais desde a sua captação, nas ruas, até a sua disposição, no sistema principal de drenagem. As galerias são necessárias somente quando o sistema inicial de drenagem, sem as mesmas, é insuficiente para conduzir as descargas que a ele afluem, conforme o Manual de Drenagem Urbana (PORTO ALEGRE, 2005c),.

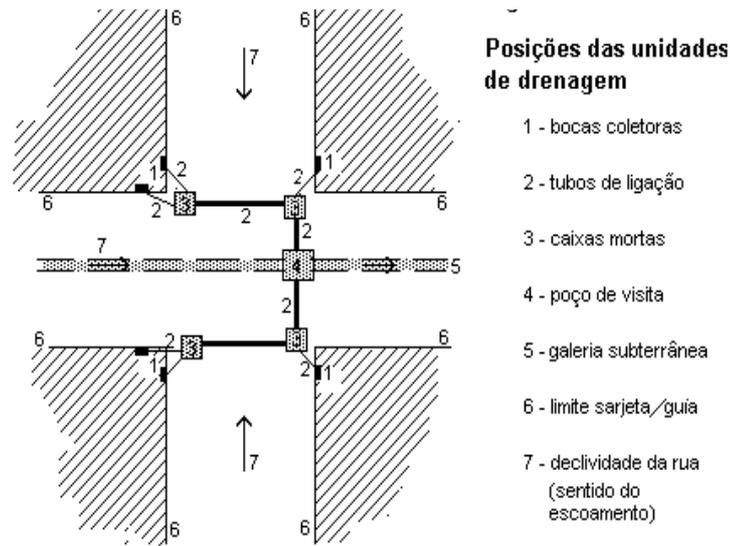


Figura 4: posição das unidades de drenagem (PORTO ALEGRE, 2005b)

A macrodrenagem envolve os sistemas coletores de diferentes sistemas de microdrenagem. É composto por cursos d'água, zonas de inundação natural, lagos permanentes, canais, bueiros, pontes, reservatórios de retenção e de detenção, extravasores e comportas. Quando é mencionado o sistema de macrodrenagem, as áreas envolvidas são de pelo menos 2 km² ou 200 ha. Estes valores não devem ser tomados como absolutos, porque a malha urbana pode possuir as mais diferentes configurações. O sistema de macrodrenagem deve ser projetado com capacidade superior ao de microdrenagem, com riscos de acordo com os prejuízos humanos e materiais potenciais.

As medidas de micro e macrodrenagem são as detenções e retenções. As detenções são reservatórios urbanos mantidos secos com uso do espaço integrado à paisagem urbana, enquanto que as retenções são reservatórios com lâmina de água utilizados não somente para controle do pico e do volume do escoamento, como também da qualidade da água. Atualmente a maior dificuldade nos projeto e implementação dos reservatórios é a quantidade de lixo transportada pela drenagem que obstrui a entrada dos reservatórios. Os volumes necessários para o amortecimento devido à urbanização (alta impermeabilização) são da ordem de 420 m³/ha a 470 m³/ha (Departamento de Esgotos Pluviais da PMPA, 2001). Além disso, considerando-se uma profundidade média de 1,5 m, a área necessária é da ordem de 3 % da área total da bacia de drenagem urbanizada.

De acordo com o Caderno de Encargos do Departamento de Esgotos Pluviais (PORTO ALEGRE, 2005b), os principais elementos da microdrenagem são:

- a) meios-fios;
- b) sarjetas;
- c) bocas de lobo;
- d) poços de visita;
- e) galerias;
- f) condutos forçados e estações de bombeamento;
- g) sarjetões;
- h) coletores;
- i) tubos de ligação;
- j) grelhas.

Os meios-fios são elementos utilizados entre a via pública e o passeio, dispostos paralelamente ao eixo da rua, com sua face superior nivelada com o passeio, formando uma faixa paralela ao eixo da via pública. São, geralmente, construídos de pedra ou de concreto e formam um conjunto com as sarjetas. A altura do meio fio é de, aproximadamente, 15 cm em relação ao nível superior da sarjeta. Uma altura maior dificultaria a abertura das portas dos automóveis, e uma altura menor diminuiria os benefícios da capacidade de conduzir as águas nas ruas.

As sarjetas são as faixas formadas pelo limite da via pública com os meios-fios, formando uma calha que coleta as águas pluviais oriundas da rua que incidem sobre as vias públicas.

As bocas de lobo são dispositivos localizados em pontos convenientes, nas sarjetas, para captação das águas pluviais, conforme ilustrado na Figura 5. A localização delas deve respeitar o critério de eficiência na condução das vazões superficiais para as galerias e que sejam situadas nos pontos mais baixos do sistema, com vistas a impedir alagamentos e águas paradas em zonas mortas. Essas devem ser ligadas apenas aos poços de visita, através de canalizações de diâmetro mínimo igual a 0,30 m.

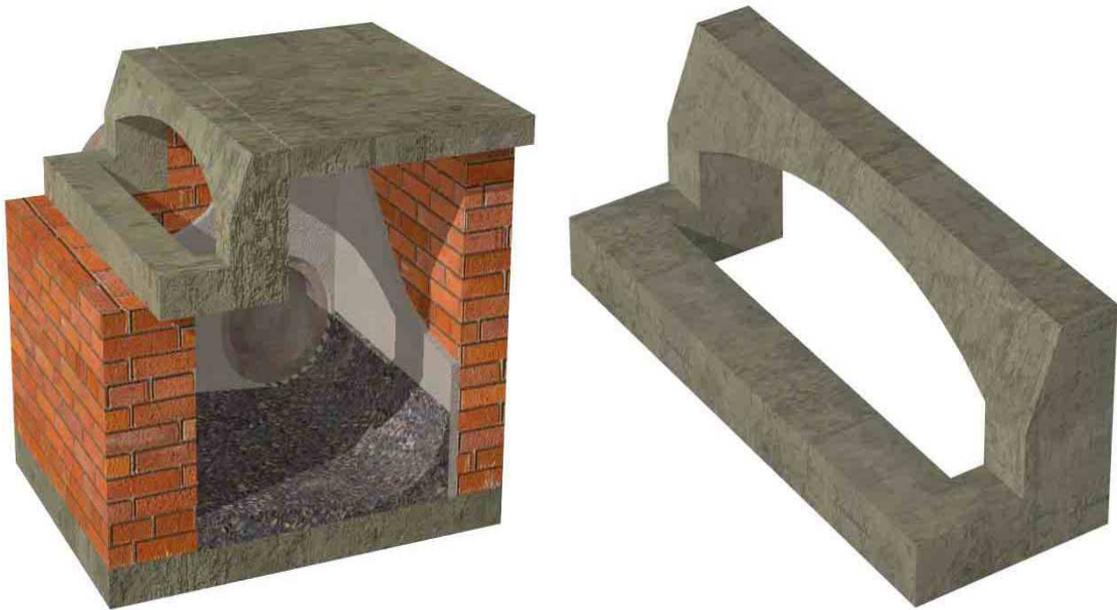


Figura 5: tampa e espelho de boca de lobo (PORTO ALEGRE, 2005b)

Os poços de visita são dispositivos colocados em pontos convenientes do sistema para permitir sua manutenção. A colocação dos poços de visita deve atender à necessidade de visita em mudanças de direção, de declividade e de diâmetro, ao entroncamento dos trechos e às bocas de lobo, devendo ser construídos nos pontos em que houver mudança dos primeiros três itens. O afastamento entre poços de visita consecutivos deve ser o máximo possível, por critérios econômicos.

As galerias são canalizações públicas destinadas a escoar as águas pluviais oriundas das ligações privadas e das bocas de lobo. O diâmetro mínimo das galerias circulares é de 30 cm.

Os condutos forçados e as estações de bombeamento são o conjunto de obras e de equipamentos destinados a transferir a água de um canal de drenagem, quando não mais houver condições de escoamento por gravidade, para outro canal em nível mais elevado ou receptor final da drenagem em estudo.

Os sarjetões são formados pela própria pavimentação nos cruzamentos das vias públicas, formando calhas que servem para orientar o fluxo das águas que escoam pelas sarjetas.

Os coletores compõem a rede coletora de águas pluviais, existindo duas hipóteses para a sua locação. Sob o meio-fio é a mais utilizada, e sob o eixo da via pública. O recobrimento mínimo deve ser de 1 m sobre a geratriz superior do tubo.

Os tubos de ligação são tubulações destinadas a conduzir as águas pluviais captadas nas bocas de lobo para as galerias ou poços de visita.

As grelhas são elementos de captação das águas superficiais, localizadas horizontalmente, junto ao meio-fio ou nas calhas de pavimento, onde não há a colocação deste anteparo. Segundo o Caderno de Encargos do Departamento de Esgotos Pluviais (PORTO ALEGRE, 2005b), em locais onde não houver tráfego pesado, como em ruas de atividade residencial, podem ser utilizadas as grelhas do tipo “Farroupilha”, conforme ilustra a Figura 6, padronizadas pelo DEP, feitas em concreto armado com dimensões de 1,00 x 0,40 x 0,07 m. As grelhas devem ser construídas sobre lastro de brita de 0,05 m e contrapiso de concreto, cuja resistência à compressão deve ser ≤ 15 MPa, com declividade de 0,002 m/m em direção à ligação da grelha ao poço de visita. Suas paredes devem ser feitas de alvenaria de tijolo maciço, com 0,25 m, rebocadas internamente com argamassa de cimento e areia, com traço 1:3, assim como o assentamento dos tijolos.

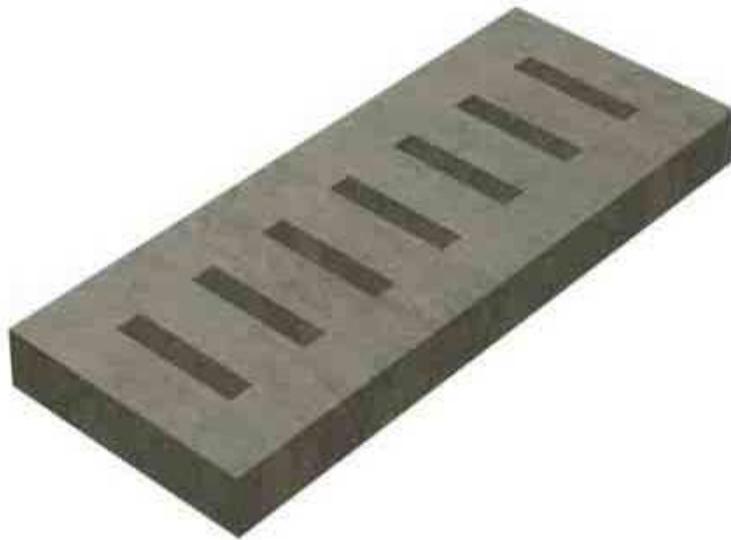


Figura 6: grelha Farroupilha (PORTO ALEGRE, 2005b)

Para a elaboração de um projeto de rede pluvial de microdrenagem, são necessárias plantas de situação e de localização dentro do Estado e planta de contribuição das bacias. No caso de não existir planta plani-altimétrica da bacia, deve ser considerado delimitador o divisor topográfico por poligonal nivelada. Também são necessárias a planta plani-altimétrica da área de projeto, com pontos cotados notáveis nas esquinas, um levantamento topográfico, o nivelamento geométrico em todas as esquinas, as mudanças de direção e de greides nas vias públicas, além do cadastro de redes de esgotos pluviais ou de outros serviços que possam

interferir na área de projeto. Além disso, também devem ser levados em consideração os elementos relativos à urbanização da bacia contribuinte, nas situações atual e previstas no plano direto (tipo de ocupação das áreas, porcentagem de ocupação dos lotes e ocupação e recobrimento do solo nas áreas não urbanizadas pertencentes à bacia). São necessários, ainda, dados relativos ao curso de água receptor, contendo informações do nível de água máxima do rio que irá receber o lançamento final.

Nos últimos anos, Porto Alegre/RS vem enfrentando, assim como outras grandes metrópoles, sérios problemas de drenagem urbana. Diante disso, foi elaborado o Manual de Drenagem Urbana, visando obter diretrizes técnicas e ambientais para a abordagem dos problemas de drenagem da cidade. Esse manual faz parte do Plano Diretor de Drenagem Urbana (PORTO ALEGRE, 2005a) de Porto Alegre/RS. Considerando-se que, na nova política de desenvolvimento, a drenagem urbana modifica as práticas existentes, esse manual é essencial para direcionar as novas condutas dos profissionais que atuam em drenagem e no planejamento de obras na cidade.

Pode tomar-se como um exemplo, o volume de chuva que atingiu a cidade, em um evento ocorrido em março de 2012. A precipitação em apenas doze horas praticamente atingiu a média histórica (série 1961-1990) de todo o mês de março de 104,4 mm (BRASIL, 2013). Na Tabela 1, podem verificar-se as informações fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), das precipitações acumuladas mensais normais climatológicas, referentes aos anos 2009, 2010, 2011 e 2012, na cidade de Porto Alegre/RS (BRASIL, 2013).

Tabela 1: precipitações em Porto Alegre/RS

Mês	Precipitação (mm)
agosto/2009	370
abril/2010	550
fevereiro/2011	340
abril/2012	450

(fonte: BRASIL, 2013)

Tucci (2007) explica que, quando, em uma região, chove 100 mm, significa que, em uma área de 1 V, a lâmina de água formada pela chuva que caiu apresenta uma altura de 100 mm. Esse

volume pode ser obtido calculando-se o volume de paralelepípedos de 1 m² de área da base e de 100 mm de altura, ou seja, 0,1 m, resultando em 0,1 m³, conforme a Equação 1:

$$V = B \times h \quad (1)$$

Onde:

- a) “V” é o volume do paralelepípedo, em “m³”;
- b) “B” é a área da base do paralelepípedo, sempre igual a 1 m²;
- c) “h” é a altura do paralelepípedo, correspondente à precipitação, em “mm”.

Esse volume pode ser determinado em litros, lembrando que 1 m³ corresponde a 1.000 l. Assim, uma chuva de 100 mm equivale a um volume, em litros, de 100 l. Segundo ele (TUCCI, 2007), isso implica dizer que, para cada metro quadrado da região, houve uma precipitação de 100 l.

2.3.2. Serviços de manutenção realizados pelo DEP

O DEP possui uma seção de fabricação de artefatos de concreto, como mostra a Figura 7, onde é confeccionada, armazenada e realizada a cura de diversos tipos de elementos de drenagem confeccionados em concreto convencional. Estes artefatos são distribuídos para serem utilizados pelas Seções de Conservação do DEP na recuperação e manutenção do sistema de drenagem da cidade.



Figura 7: fábrica de artefatos de concretos do DEP

Conforme o depoimento dos funcionários que atuam no local, esses elementos são confeccionados, há mais de trinta anos, sem que tenha sofrido alteração no sistema de confecção dos mesmos, ao longo do tempo. A fórmula para a sua confecção é repassada de um funcionário para outro e, devido ao alto ritmo de produção desses elementos, os mesmos são desmoldados logo após a realização da concretagem no solo. De acordo com as informações dos operadores, o volume de material utilizado para a confecção dos elementos costuma, geralmente, ser da seguinte maneira: um saco de cimento, dois carrinhos de areia e dois carrinhos de brita. O controle da quantidade de água utilizada na mistura costuma ser de três baldes de água, sendo um pouco menos quando chove e a brita já está molhada. Armaduras são utilizadas para reforço destes elementos, conforme ilustra a Figura 8. O material é colocado em fôrmas metálicas, onde é feita a vibração, através de um vibrador de imersão, ou seja, tipo agulha.



Figura 8: armaduras de reforço na confecção dos elementos fabricados no DEP

Após essas concretagens, que são realizadas de forma artesanal, conforme ilustrado na Figura 9, os elementos são manuseados para serem retirados do piso, através da utilização de uma empilhadeira. Os artefatos ficam aguardando sua saída da fábrica, que é controlada para que possam manter sempre um estoque no local, sendo que os elementos confeccionados costumam sair de quinze em quinze dias da fábrica.



Figura 9: concretagens realizadas de forma artesanal sobre o piso do DEP

Com o objetivo de melhoria do sistema de drenagem da cidade, grandes obras foram e continuam sendo executadas em Porto Alegre/RS, gerando a necessidade de investimentos vultosos. De acordo com os dados do Caderno de Encargos do Departamento de Esgotos Pluviais (PORTO ALEGRE, 2005b), somente na manutenção e conservação do sistema pluvial foi investida a quantia de R\$15,2 milhões no ano de 2011. O último pacote de novas obras contra alagamentos alcança a cifra de R\$67 milhões destinados à ampliação e qualificação do sistema pluvial. Uma das maiores obras de drenagem urbana na cidade foi a execução do Conduto Álvaro Chaves, a qual foi iniciada em maio de 2005 e entregue à cidade em março de 2008, com o intuito de controlar alagamentos em pontos críticos de nove bairros da cidade, gerando um investimento de R\$59 milhões.

Além da execução de inúmeras e vultosas obras, o DEP realiza a limpeza do sistema de esgotamento pluvial, visando à conservação e à garantia do perfeito funcionamento das canalizações, poços de visita e bocas de lobo. A substituição desses materiais é realizada quando há necessidade ou a cada doze meses, quando é realizada uma troca periódica dos mesmos. A desobstrução das canalizações costuma ser efetuada por processo clássico, que consiste na introdução, entre dois poços de visita, de varas com conexões metálicas ou de cabo de aço, que deve ser movimentado em ambas as extremidades por um guincho ou por outro processo mecânico, a critério da fiscalização. O material é retirado dos poços de visita com pás, baldes e outros equipamentos, sendo imediatamente removido, conforme Figura 10.



Figura 10: serviços de reconstrução e complementação pluvial (PORTO ALEGRE, 2005b)

Os serviços que são executados manualmente utilizam-se, também, de equipamentos para limpeza a vácuo de poços de visita e de bocas de lobo. Já os serviços de desobstrução de redes são executados por caminhão de hidro-jateamento à alta pressão de vácuo acoplado.

De acordo com informações do DEP, são gastos em torno de R\$3 milhões por ano para realizar a limpeza dos vinte e sete arroios existentes em Porto Alegre/RS e de seus afluentes. De março de 2009 até hoje, foram retiradas 283 mil toneladas de entulho do arroio Dilúvio, o maior arroio da cidade, que é dragado frequentemente.

Em dias de fortes chuvas, o prejuízo é ainda maior. Cada vez que um arroio transborda, as ruas ficam sujas, casas são alagadas, e as famílias perdem tudo, necessitando da ajuda urgente dos órgãos municipais. O serviço de limpeza e desassoreamento dos arroios é feito por uma empresa contratada, sendo que, no arroio Dilúvio, esse trabalho é permanente.

Com base em tudo que foi apresentado anteriormente sobre os problemas relacionados à drenagem urbana em Porto Alegre/RS, precisa-se buscar uma alternativa para combater isso, minimizando os altos custos relacionados às vultosas obras de drenagem construídas, que acabam por interferir no dia a dia da população. Por isso esta pesquisa propõe a utilização de placas fabricadas em concreto permeável, em substituição às grelhas de concreto armado, um dos elementos de drenagem urbana pluvial.

3. CONCRETOS PERMEÁVEIS

Neste capítulo, é apresentada uma breve análise do conhecimento atual sobre as natureza, fabricação e forma de aplicação de concretos permeáveis. Isso é feito a partir dos dados históricos de evolução dos concretos permeáveis no que se refere à sua aplicação na drenagem urbana e em pavimentos, assim como à sua manutenção, finalizando com uma abrangente descrição de trabalhos técnicos nacionais e, principalmente, internacionais sobre esse tipo de material, seguida das considerações sobre a utilização de concreto permeável na realidade brasileira

3.1. DEFINIÇÃO

Ainda não existe uma definição padrão do que é um concreto permeável. De forma geral, usa-se o termo para designar concretos caracterizados por uma grande presença de vazios interligados entre si, que permitem a fácil passagem de fluidos, resultando em elevada permeabilidade. Normalmente, para se obter essa configuração, não é empregada em sua moldagem, o agregado miúdo, sendo o material produzido apenas com água, cimento e agregado graúdo. Além disso, a relação agregado/pasta é bastante elevada, proporcionando economia de cimento e contato grão-grão. Dessa maneira, garante-se que o material obtido tenha um índice de vazios na faixa que varia de 15 a 25 % e uma capacidade de percolação na ordem de 200 l/m²/min (ACI, 2006). O grau de permeabilidade associado aos concretos permeáveis é suficiente para permitir a passagem de todo fluxo precipitado de grande parte dos eventos de precipitação, praticamente anulando o escoamento superficial.

Basicamente, pode dizer-se que o concreto permeável é um concreto com elevado percentual de vazios que são intencionalmente incorporados ao concreto, contrapondo-se aos concretos convencionais, cujo objetivo é o alcance da maior densidade possível, já que os concretos permeáveis devem conter poros para permitir a infiltração de água. O ponto principal, quanto à utilização do pavimento permeável, é a grande melhoria para os impactos vistos durante as enxurradas urbanas, permitindo a infiltração direta para o subsolo.

3.2. EVOLUÇÃO

Höltz (2011) fez uma revisão do histórico de desenvolvimento dos concretos permeáveis. Os primeiros registros de concretos com grandes quantidades de vazios e sem agregados miúdos são encontrados na Europa, no século XIX, cujo uso estava, possivelmente, associado às reduções de peso e de custos do que ao incremento da permeabilidade a fluidos. No Reino Unido, em 1852, duas casas foram construídas utilizando apenas cimento, brita e água. Conforme registros do ACI 522R-06 (ACI, 2006), o emprego desse tipo de concreto não é praticamente mencionado na literatura até 1923, cinco anos após o fim da Primeira Guerra Mundial, quando um grupo de 50 casas de dois pisos foi construído usando agregado à base de clínquer, em Edimburgo, na Escócia. Durante a década de 30, a *Scottish Special Housing Association (SSHA)* adotou o uso do concreto permeável para a construção de residências. Ainda, perto de 1942, o concreto permeável já tinha sido usado, no Reino Unido, para a construção de mais de 900 casas, devido às suas boas propriedades térmicas e ao baixo custo.

O uso de concretos dessa natureza intensificou-se após a Segunda Guerra Mundial, ou seja, após 1945. Dada a escassez de cimento e a abundância de restos de construção, o uso de um concreto com grande quantidade de vazios e pouca pasta era bastante atraente. Como os Estados Unidos da América (EUA) não sofreram o mesmo tipo de escassez de matérias primas que a Europa, o concreto permeável não se desenvolveu, nesse país, até 1970. O problema encontrado nos EUA era o de excessivo escoamento de água nas áreas recém-construídas, pois, com o desenvolvimento urbano, se aumentou a quantidade de áreas impermeáveis, resultando nesse elevado escoamento superficial, que causou as inundações. Isso teve impacto sobre o ambiente, causando a erosão e degradação da qualidade da água.

Embora o uso de concretos sem agregado miúdo e com grandes quantidades de vazios já tenha sido registrado, o emprego desse tipo de material com a função precípua de facilitar o fluxo de água só começou a ganhar relevância a partir do início do século XXI. No final de 1990 e início de 2000, o concreto permeável reapareceu como uma tecnologia para ajudar na drenagem, retendo a água na fonte, impedindo-a de fluir para córregos e reduzindo enchentes.

Com base nesse histórico, constata-se que o emprego de concretos permeáveis para fabricação de pavimentos e de elementos drenantes é uma tecnologia relativamente nova, sendo que ainda existem lacunas sobre o seu comportamento. A falta de *know-how* e a ausência de normas e de diretrizes para orientar a fabricação e certificação desse material dificultam sua

adoção em muitos locais, por isso o emprego de pavimentos de concreto permeável possui abrangência reduzida no Brasil, sendo mais comum nos EUA e na China. Dado seu uso primordialmente para algumas finalidades específicas e restritas, pode-se dizer que os concretos permeáveis ainda enquadram-se na categoria de concretos especiais. Sobre o uso geral desse material, os países onde a sua utilização está mais disseminada são EUA, França e Japão. Apesar de o concreto permeável ter sido largamente usado na Europa e na Austrália, especialmente nos últimos 60 anos, o seu uso como material de construção nas Américas, até o final do século XX, foi bastante limitado.

Em decorrência do descrito acima, há poucos trabalhos publicados e um número ainda menor de exemplos práticos de aplicação desse tipo de material no país. As poucas referências encontradas na literatura brasileira envolvem alguns projetos exploratórios do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS (ACIOLI, 2005), aplicações no Parque de Belo Horizonte (POLASTRE e SANTOS, 2006), alguns estudos efetuados na Universidade de São Paulo (USP) como os de Silveira (2010), as pesquisas realizadas no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS (HÖLTZ, 2011) e, ainda, a colaboração de Liv Haselbach, em meados do ano de 2012, na execução de piso experimental, no LEME/UFRGS, conforme ilustrado na Figura 11. Além disso, ainda não existem normas brasileiras para orientar a confecção ou o controle de qualidade do concreto permeável.



Figura 11: execução de piso experimental no LEME

Apesar de ser uma tecnologia ainda incipiente no Brasil, os concretos permeáveis começaram a despertar a atenção e foram adotados em alguns projetos demonstrativos. Já existem esforços de fabricantes associados à cadeia do cimento em introduzir o material como alternativo para atender ao que as legislações municipais pedem em relação à infiltração e à garantia de permeabilidade parcial durante o processo de pavimentação e ocupação de terrenos.

3.3.USO NA DRENAGEM URBANA

Até agora, a principal contribuição do concreto permeável na drenagem urbana esteve associada à sua capacidade como alternativa de pavimentação para auxiliar a reverter o grande impacto acarretado pela impermeabilização das áreas urbanas. Essa contribuição pode dar-se, tanto de forma direta, como de indireta, visto que, além de permitir uma maior infiltração da água pluvial, essa nova tecnologia favorece a redução da necessidade de custos às obras de infraestrutura de drenagem urbana ao reduzir os picos de cheia.

Quando usado em pavimentos, o concreto permeável permite que a água das chuvas passe através dele e seja armazenada nas camadas inferiores, base e sub-base, até ser conduzida ao lençol freático por meio do subleito ou, então, ser levada ao sistema de drenagem da cidade. Sem perder espaço de pavimentação, tem-se uma área pronta para absorver precipitações, evitando alagamentos e realimentando o aquífero subterrâneo.

Quando utilizado em áreas externas, o concreto permeável permite que a água da chuva infiltre diretamente no solo, diminuindo a vazão que segue para o sistema de drenagem urbano. Além disso, a sua adoção também contribui para a manutenção dos aquíferos subterrâneos e para a redução das velocidade e quantidade do escoamento superficial dessas águas, pois, ao permitir a infiltração natural das águas pluviais, o material acaba contribuindo também para um desenvolvimento mais sustentável.

A nova ideia, abordada nesta dissertação, é a utilização do concreto permeável na fabricação de elementos do sistema de drenagem urbana. Nesse caso, o fator limitante não é a capacidade de infiltração no solo, mas a capacidade de escoamento das galerias e das tubulações pluviais já existentes.

3.4. CARACTERÍSTICAS

Normalmente o concreto permeável possui uma resistência inferior à dos concretos armados, devido à sua alta porosidade. Em razão disso, seu uso é, muitas vezes, limitado a áreas de tráfego leve ou pouco intenso.

Segundo a norma americana ACI (2006), as misturas de concreto permeável tendem a desenvolver resistências mecânicas de compressão na faixa de 3,5 a 28 MPa, porém Polastre e Santos (2006) afirmam que a média dos concretos permeáveis, normalmente produzidos, está próxima a 25 MPa.

Recentemente os incrementos de pesquisas sobre o comportamento mecânico e hidráulico desse tipo de material se tornaram atrativos, uma vez que o concreto permeável pode apresentar bons desempenho e durabilidade quando utilizado como revestimento de pavimentos em áreas de veículos leves, o que, aliado à sua capacidade drenante, permite o seu emprego como equipamento urbano de mitigação dos níveis de impermeabilização intensificados pela urbanização das cidades.

Tennis et al. (2004) relatam que os concretos permeáveis são caracterizados por apresentarem uma textura superficial diferenciada quando comparados ao concreto convencional. Essa diferença está associada à pequena ou à nula quantidade de agregados miúdos na sua composição, o que proporciona uma superfície mais rugosa, elevando o coeficiente de atrito. Esse tipo de textura pode trazer benefícios relativos à segurança dos usuários, principalmente, em períodos chuvosos ou em ocorrências de neve e de gelo na pista, já que, além do maior coeficiente de atrito atribuído à estrutura mais rugosa, a condição permeável do concreto pode ser bastante efetiva na diminuição dos riscos de hidroplanagem. Isso ocorre, porque a água proveniente das intempéries percola pelo revestimento permeável do pavimento, não permanecendo na sua superfície, o que evita a formação de poças d'água e diminui a ocorrência do fenômeno de *spray*.

A massa específica e o índice de vazios característicos do concreto permeável variam em função da proporção relativa de cada material constituinte da mistura, bem como do procedimento de compactação empregado. A massa específica aparente do concreto permeável, no estado fresco, varia de 1.300 a 2.000 kg/m³ (TENNIS et al., 2004).

O valor elevado do índice de vazios afeta diretamente as características de resistência mecânica do material no estado endurecido. O material é considerado de baixa porosidade quando possui índice de vazios inferior a 15 %, enquanto que, um índice de vazios superior a 30 %, caracteriza um material altamente poroso. Tennis et al. (2004) sugerem que se utilizem índices de vazios na ordem de 20 % para garantir simultaneamente as boas características de resistência e de permeabilidade desse tipo de concreto.

A permeabilidade é uma das maiores características desse material, sendo que as taxas de fluxo típicas de passagem de água através do concreto permeável variam de 120 l/m²/min (2 mm/s) a 320 l/m²/min (5,4 mm/s), que são valores muito superiores à capacidade de infiltração da maioria dos solos. Porém, em solos pouco permeáveis, o uso do concreto permeável sobre uma camada de assentamento permite gerar uma capacidade de retenção e reduzir a quantidade de água que escoar superficialmente, especialmente, em eventos de chuvas intensas e de curta duração, que favorecem a ocorrência de inundações.

Esse material pode apresentar bom desempenho e durabilidade quando utilizado como revestimento de pavimentos em áreas de veículos leves, o que, aliado à sua capacidade drenante, permite o seu emprego como equipamento urbano de mitigação dos níveis de impermeabilização intensificados pela urbanização das cidades. Além disso, devido à sua alta porosidade e às suas boas propriedades acústicas, pode ser utilizado como material para isolamento térmico de paredes e, também, como para barreiras acústicas.

Para avaliarem suas propriedades acústicas, Kajio et al. (1998) compararam os níveis de ruído gerados em pavimentos com revestimentos em concretos permeáveis, contendo duas diferentes dimensões de agregados (6,3 mm e 12,5 mm), e em pavimentos asfálticos densos, considerando diferentes velocidades de veículos sobre a pista. Constataram que, para ambos os diâmetros de agregados utilizados, os níveis de ruído medidos foram de intensidade reduzida no pavimento de concreto permeável quando em comparação com o pavimento revestido com concreto asfáltico convencional. Além disso, notaram que a variação do diâmetro máximo dos agregados influi muito pouco na propagação do ruído, uma vez que os resultados obtidos na pesquisa são muito semelhantes para esses dois casos. Olek et al. (2003) relatam que a estrutura aberta do concreto permeável promove uma diferença no tempo de chegada e de reflexão das ondas sonoras provenientes da movimentação dos veículos sobre o pavimento. Essa diferença diminui o nível da intensidade do ruído, fazendo com que o revestimento absorva parte do ruído gerado pelo tráfego.

O concreto permeável é produzido com os mesmos materiais utilizados na composição do concreto de cimento Portland convencional (CCP), com a diferença de que a quantidade de agregados miúdos é muito reduzida ou, na grande maioria das vezes, nula (ACI, 2006; TENNIS et al., 2004). As proporções utilizadas nas misturas de concreto permeável são, geralmente, muito mais restritas em relação às misturas de CCP, sendo, normalmente, necessário haver um controle visual rigoroso na sua produção para que se consigam obter as características desejadas no produto final (TENNIS et al., 2004).

A relação água/cimento (a/c) deve ficar entre 0,27 e 0,30, chegando, no máximo, a 0,40, dependendo do uso de aditivos. A relação entre rigidez e quantidade de água no concreto permeável não é tão clara quanto em um concreto convencional, já que a presença dos vazios modifica a resistência geral da peça. A quantidade correta de água pode ser percebida quando a massa ganha certo brilho de umidade, sem ficar liquefeita (ACI, 2006).

O agregado miúdo é quase sempre eliminado no concreto permeável, enquanto o agregado graúdo tem como maior característica sua granulometria homogênea. Podem-se utilizar agregados graúdos com diâmetros variando de 0,5 a 20 mm, sendo que, quanto maior seu diâmetro, maior a rugosidade (TENNIS et al., 2004).

A quantidade de agregados graúdos, areia, cimento e água vão variar de acordo com a resistência que se busca ter no concreto. Quanto maior a resistência que se procura, menor será a permeabilidade. Para se obter mais permeabilidade, é necessário um maior volume de vazios e, portanto, haverá menos resistência. Conforme o ACI (2006) pode-se considerar que a relação cimento/agregado, assim como o procedimento de compactação ou adensamento a ser utilizado na produção de concretos permeáveis, são os dois fatores mais importantes da mistura, pois afetam diretamente as características mecânicas do material.

Os aditivos superplastificantes também podem ser empregados com a finalidade de melhorar as características de trabalhabilidade e de tempo de pega das misturas do concreto permeável. O principal ligante hidráulico utilizado como aglomerante em concretos permeáveis é o cimento Portland. Além desse, materiais suplementares, como cinza volante, escória granulada de alto forno moída e sílica ativa, são também empregados com a finalidade de melhorar as características mecânicas do produto final. Esses influenciam no desempenho do concreto, definindo tempo, taxa de desenvolvimento de força, porosidade e permeabilidade (ACI, 2006).

Cabe lembrar que as proporções com que esses aditivos são incorporados à mistura devem ser cuidadosamente observadas, uma vez que se deve garantir que o produto final possua vazios suficientes e boa condutividade hidráulica. Pela mesma razão que os aditivos químicos são empregados no concreto armado convencional, são também incorporados nas misturas para produção de concreto permeável. No caso dos aditivos retardadores de pega, são adicionados à mistura para controle do tempo de pega que, no caso do concreto permeável, ocorre muito rapidamente. Já os aditivos redutores de água são utilizados dependendo da relação a/c crequerida (PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2012).

Conforme relatado no ACI 522R-06 (ACI, 2006), o tempo disponibilizado para as operações de concretagem desse tipo de concreto deve ser menor que o normalmente adotado para concretos convencionais, devendo esse processo ser concluído até uma hora entre o tempo inicial de mistura e o término do trabalho. Isso se dá devido às características desse material, que favorece o aumento da taxa de evaporação, perdendo água com maior rapidez.

A estrutura porosa e a superfície relativamente áspera do concreto permeável expõem maior área de superfície de pasta de cimento à evaporação, fazendo a cura ainda mais necessária do que no concreto convencional. Por isso, ao final da concretagem, é recomendado cobri-la com uma lona plástica por, no mínimo, sete dias (ACI, 2006).

O concreto permeável é caracterizado por apresentar elevada consistência (baixa trabalhabilidade), quando comparado com o concreto convencional, em estado fresco. Os métodos mais empregados em sua produção são os ensaios de massa unitária e controle visual (ACI, 2006; TENNIS et al., 2004). A massa unitária desse material representa, em média, cerca de 70 % da massa unitária de concretos convencionais (PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2012).

A exposição colorida de concreto permeável é bastante utilizada na China, como pode ser observado na Figura 12. Nos pisos apresentados, foram utilizados vários tipos de agregados naturais na confecção do concreto permeável colorido.



Figura 12: utilização de agregados naturais na confecção de concretos coloridos do *Torch Ceremony Plaza* (Michael Hein)

Devido às suas características, os procedimentos padrão para a produção de corpos de prova e para a realização de ensaios em laboratório utilizados para o controle tecnológico do concreto convencional não se aplicariam, sem prova prévia, para o concreto permeável. No Brasil, não existem especificações ou métodos referentes ao estudo em laboratório desse material.

3.5. APLICAÇÕES

Os concretos permeáveis podem ser utilizados para um número surpreendente de aplicações. Entre elas, destacam-se as em calçadas, estacionamentos, ruas de baixo tráfego, parques, praças, pátios residenciais, quadras de tênis, campos de golfe, painéis de enchimento, *decks* de piscinas, estabilização de encostas, forros, estruturas hidráulicas, estufas de plantas, bases permeáveis abaixo de pavimentos de alta resistência (camadas-base), isolamento térmico de paredes (alta porosidade), como barreiras acústicas (possui boas propriedades acústicas) e em muros de arrimo.

Embora seja empregado, principalmente, para pavimentação nos EUA, o concreto permeável também tem sido usado como material de vedação, na Europa, há muitos anos. Aplicações práticas do concreto permeável são os painéis para paredes de grandes edifícios, acima de dez andares), rodovias e estacionamentos (National Ready Mixed Concrete Association, 2010).

O concreto permeável foi também utilizado extensivamente em prédios industriais, públicos e domésticos, onde se desejava ter um melhor isolamento térmico, sem grande acréscimo de peso. Devido a suas boas propriedades, foi empregado em áreas do Círculo Ártico, onde o uso de materiais tradicionais de construção mostrou-se impraticável devido aos altos custos no transporte dos tijolos, aos perigos de incêndios com a madeira e às baixas propriedades de isolamento térmico do concreto simples (MALHOTRA, 1976 apud ACI, 2006).

Em razão das baixas resistências à compressão dos elementos de concreto permeável, Araújo et al. (1999) sugerem que o uso desse tipo de pavimentação seja limitado a locais com tráfego leve ou pouco intenso, como estacionamentos. Isso acaba representando um ponto positivo para os donos de empresas, que precisam, por lei, destinar cerca de 20 % da área para a construção de tubulações de drenagem para as águas pluviais.

Os pavimentos permeáveis foram bastante estudados, na década de 1970, nos EUA, como uma forma de evitar a aquaplanagem, a redução de ruído, o ofuscamento do farol dos carros e o efeito de *spray*, mas acabaram abandonados. Depois eles ressurgiram para prevenir os problemas hidráulicos na esteira da recarga dos aquíferos e como solução complementar de drenagem.

O ponto principal, quanto à utilização do pavimento permeável, é a grande melhoria para os impactos vistos durante as enxurradas urbanas, permitindo a infiltração direta para o subsolo. Por outro lado, uma vez saturado o reservatório em grandes volumes de precipitação, este pavimento poderá apresentar uma redução da sua eficiência do que aquela observada durante as análises (ARAÚJO et al., 1999).

Pode considerar-se a utilização do concreto permeável como econômica, já que minimiza a necessidade de retentores de enxurradas, como piscinões, bombas, tubulação de drenagem e outros sistemas de drenagem urbana, resultando em redução dos custos de propriedade e aproveitando melhor a área útil do solo. Como demanda de empresas próximas para transporte e aplicação, assim como para uso de materiais locais, a escolha pelo concreto permeável é positiva para as economias locais. Outro fato a ser considerado é que há pouco desperdício, uma vez que ele é executado diretamente no local e de acordo com as necessidades do projeto, assim como pode ser reciclado ao chegar ao final do seu ciclo de vida.

Outras vantagens do concreto permeável estão associadas às suas propriedades térmicas e acústicas, podendo ser utilizado como isolante térmico em paredes de prédios e como barreiras à passagem do som (POLASTRE e SANTOS, 2006). Evidências coletadas pelos autores indicam que o uso desse material pode colaborar para reduzir os efeitos de ilha de calor, favorecer a vegetação, evitar acidentes por escorregamento em superfícies lisas com acúmulo de água, colaborar para a captura de gás carbônico (CO₂) e reduzir o consumo de agregados e de cimento comparativamente aos concretos convencionais.

3.6. MANUTENÇÃO

A maioria dos concretos permeáveis funciona bem com pouca ou nenhuma manutenção. Ela é, principalmente, constituída pela prevenção de entupimentos da estrutura de vazios. Na preparação do local onde vai ser executado, deve ser projetado o paisagismo circundante para impedir o fluxo de materiais na superfície.

Os problemas de obstrução podem ocorrer em função de que detritos (grama, folhas e outros) infiltram-se nos espaços vazios e impedem a permeabilidade, diminuindo a sua utilidade. Na Figura 13, pode visualizar-se o procedimento utilizado na prevenção de entupimentos com a execução de limpeza do entorno de via em concreto permeável.



Figura 13: limpeza do entorno de via em concreto permeável (PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2012)

Caso haja entupimento, a aspiração é necessária para remover os detritos que se alojarem sobre a superfície do concreto permeável. Outras opções de limpeza podem ser realizadas com lavagem sob pressão. Foram realizados estudos que indicam que a lavagem de alta pressão irá restaurar a porosidade do concreto permeável quase entupido e esse terá novas condições de uso. A lavagem sob pressão em concretos permeáveis entupidos tem resultado em uma permeabilidade com níveis de 80 % a 90 % em alguns casos, embora as práticas de manutenção para concretos permeáveis ainda estejam sendo desenvolvidas.

Balades et al. (1995) sugeriram, em sua pesquisa, que a profundidade do entupimento é limitada aos primeiros centímetros de calçada de concreto permeável, comparando quatro tipos de métodos de limpeza, que foram: umedecimento do local seguido por varrimento, varrimento com aspiração, aspiração apenas e água de alta pressão jorrada. Os resultados indicaram que os dois últimos métodos poderiam recuperar 100 % da taxa de infiltração inicial. As Figura 14 e Figura 15 ilustram a manutenção realizada, aplicando-se o último método sugerido por Balades et al. (1995), em um pavimento piloto de concreto permeável executado no Campus do Vale da UFRGS, pela equipe do Grupo de Pesquisa de Concreto Permeável do LEME, o qual teve sua permeabilidade aumentada em torno de 80 %.



Figura 14: limpeza com água de alta pressão jorrada em pavimento piloto de concreto permeável



Figura 15: remoção de excesso de água após limpeza de pavimento de concreto permeável

Segundo Kuang et al. (2007), a permeabilidade em pavimentos de concreto permeável desse tipo tende a diminuir com o passar do tempo, sendo que procedimentos de manutenção e de restauração da capacidade permeável devem ser executados com periodicidade máxima de seis meses. Ao se utilizar o sistema de limpeza de pavimentos a vácuo, por exemplo, consegue recuperar-se em torno de 80 % a 90 % da capacidade inicial de condutividade hidráulica do mesmo.

Sistemas de pavimentos permeáveis apresentam potencial de tratamento de até 90 % para separação de sólidos suspensos totais, de até 65 % para o fósforo total e de até 80 % para o nitrogênio total (PARK e TIA, 2004; TENG e SANSALONE, 2004). No entanto, os pavimentos permeáveis são suscetíveis ao entupimento através do avanço de metais ou de nutrientes, de modo que a manutenção é necessária para a sua recuperação.

3.7. TENDÊNCIAS NO ESTUDO DE CONCRETOS PERMEÁVEIS

Atualmente se encontram poucos trabalhos que abordam o concreto permeável como elemento estrutural na literatura. Existem associações americanas com sede em Washington que tratam dos assuntos referentes a tudo que é relacionado ao concreto permeável, como as *National Pervious Concret*, *Pervious Paviment* e *Pervious Concret Pavers*.

Dentre os especialistas mundiais no tema encontra-se a pesquisadora da Universidade de Washington, Profa. Liv Haselbach. A mesma integra o Comitê da *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, que gera as recomendações sobre o uso de concretos permeáveis. Segundo a mesma (HASELBACH, 2012), as principais normas, atualmente empregadas, para caracterizar esse material são:

- a) ASTM C1688/C1688M - 12 (ASTM, 2012a): *Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete*, que é o método de teste padrão para determinarem-se a densidade e o índice de vazios do concreto permeável no estado fresco;
- b) ASTM C1701/C1701M - 09 (ASTM, 2009): *Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete*, que é o método de teste padrão para determinar a infiltração no concreto permeável;
- c) ASTM C1747/C1747M - 11 (ASTM, 2011): *Standard test method for determining potential resistance to degradation of pervious concrete by impact and abrasion*, que é o método de teste padrão para determinar o potencial de resistência à degradação do concreto permeável por impacto e abrasão;
- d) ASTM C1754/C1754M - 12 (ASTM, 2012b): *Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete*, que é o método de teste padrão para determinarem-se a densidade e o índice de vazios do concreto permeável no estado endurecido.

Entre os trabalhos que abordam o concreto permeável como elemento estrutural na literatura, podem ser citados os a seguir. Ressalta-se que se agruparam essas pesquisas, preferencialmente, por ordem cronológica.

Montes et al.(2005) realizaram um estudo utilizando o concreto permeável como um material alternativo para ajudar a reduzir os problemas de poluição difusas de origem na pavimentação. Esse trabalho investigou um método para medir a porosidade do concreto permeável de campo obtido de núcleos por aplicação do Princípio de Arquimedes e usando equipamentos de laboratório de materiais padrão. O erro entre os diferentes operadores em distintas instalações de testes foi encontrado para ser em torno de 2,2 % de porosidade.

Pindado et al. (1999) avaliaram a variação da temperatura interna de amostras de concreto permeável durante ensaios de fadiga, concluindo que ela aumenta durante a aplicação dos ciclos de carga, apresentando registros maiores do que aqueles registrados nos concretos convencionais. Nesse estudo, foram empregadas diferentes proporções de agregados graúdos e miúdos, bem como aditivos superplastificantes. Foram empregados ligantes hidráulicos provenientes da Alemanha, da Holanda e da Espanha, pois instituições desses três países participaram da pesquisa. Os autores perceberam que a distribuição de temperatura não se mostrou constante ao longo da altura do corpo de prova, sendo que os maiores valores foram medidos no centro das amostras. Por fim, sugeriram que se devem realizar ensaios com menores frequências de aplicação de carga, com o intuito de evitarem-se os efeitos indesejados em função do aumento de temperatura nos ensaios de fadiga.

Schaefer et al. (2006) estudaram a variação da condutividade hidráulica de corpos de prova de concreto permeável em função do seu índice de vazios.

Haselbach et al. (2007) desenvolveram um procedimento com o objetivo de medir a porosidade de amostras tubulares em laboratório, utilizando o conceito de deslocamento de água (MONTES et al., 2005), para uma estimativa mais precisa do fator de porosidade. Concluíram que esse procedimento pode ser considerado.

Kuang et al. (2007) estudaram a capacidade de remoção de partículas existentes nas águas das chuvas, quando essas percolam por um sistema de pavimento permeável. Constatou-se que o valor total de fósforo existente no efluente teve uma redução de mais de 80 % em relação ao valor determinado para a água antes de entrar no sistema. O mesmo ocorreu em relação à turbidez do efluente, onde foram observadas reduções variando de 50 % a 90 %.

Com a finalidade de determinar a relação entre a microestrutura característica e a condição de durabilidade de amostras de concreto permeável, Vancura et al. (2011) realizaram uma pesquisa através do uso de análises microscópicas. Todas foram obtidos de pistas com tempo de serviço variando entre 1 e 5 anos, localizadas no estado de Minnesota, nos EUA, que é uma região de clima temperado e invernos rigorosos. Foram investigados três diferentes tipos de agregado para a sua composição: cascalho de rio, calcário dolomítico e granito britado. Os resultados mostraram que as fissuras propagaram-se através da pasta do agregado e na zona de transição entre a pasta e o agregado, sendo que as fissuras ocorreram em um ou mais dos meios citados e estão atreladas, principalmente, ao tipo de agregado utilizado nas misturas.

Vancura et al. (2011) pesquisaram a durabilidade e as condições de 29 pavimentos de concreto permeável construídos em um ambiente molhado e congelado. Foram coletadas e avaliadas 33 amostras. O estudo identificou algumas das dificuldades comuns observadas nas do núcleo do subsolo através de instrumentos de microscopia óptica. Nelas, as rachaduras passaram através do agregado, da pasta e da zona de transição interfacial. Essas rachaduras foram semelhantes às encontradas em concretos convencionais que se formam devido ao dano de congelamento/descongelamento. Além das rachaduras padrão, descobriu-se que nenhuma das trinta e três amostras de concreto permeável continha a quantidade ou o espaçamento recomendados de passagem de bolhas de ar, apesar de haver a adição de adjuvantes de ar de arrastamento em todas essas misturas. Por fim, não foi possível determinar se a ausência de passagem de bolhas de ar contribuiu para as rachaduras nos concretos permeáveis.

De acordo com Henderson (2008), os vazios existentes em uma estrutura de concreto permeável podem apresentar-se como locais passíveis de congelamento e de expansão da água, o que poderia acarretar uma posterior perda de agregados devido a possíveis rupturas da estrutura interna do concreto. Todavia, em função da sua elevada capacidade permeável, o concreto faz com que a existência de umidade na camada de revestimento seja mínima, uma vez que a água das intempéries tende a percolar rapidamente pelo revestimento permeável e ficar armazenada nas camadas subjacentes, diminuindo os riscos de ruptura da estrutura interna do revestimento por congelamento da água. Além disso, a estrutura aberta característica do concreto permeável pode ser considerada como benefício adicional visto que possui capacidade de diminuir com maiores velocidades as quantidades de gelo, de neve e de lama existentes na superfície dos pavimentos (HENDERSON, 2008). Nos países de clima temperado, onde é comum a existência de ciclos de gelo e de degelo, há um grande número de estudos caracterizando este mecanismo.

Bentz (2008) desenvolveu uma pesquisa utilizando um modelo computacional para tentar simular o uso do concreto permeável. Foram executados dois modelos, utilizando-se como parâmetros a percolação, condutividade e permeabilidade reais dos materiais. Esse trabalho mostrou-se bem sucedido, pois, finalmente, se comprovou que o concreto permeável tinha potencial, explorando-se suas durabilidade e resistência.

Kevern (2009) concluiu que os concretos permeáveis apresentavam boa resistência à compressão e baixa resistência à abrasão nessa pesquisa realizada. Nesse trabalho, também, realizou ensaios de flexão e de abrasão, utilizando doze tipos de cura.

Kevern et al. (2009) relataram que as misturas para produção de concreto permeável, basicamente compostas de agregado graúdo com distribuição granulométrica uniforme, apresentaram elevada condutividade hidráulica (em média, 0,6 cm/s). Porém, como consequência de seu elevado índice de vazios, o material apresentou, também, baixas resistências à compressão (entre 6,7 MPa e 17,5 MPa). Confirmando esses resultados, no final dos anos 90, a Environmental Protection Agency (EPA) relatou que, aproximadamente, 75 % dos sistemas de pavimentos porosos, ou seja, permeáveis, falharam no país, principalmente em função das suas baixas resistências causadas pelo elevado índice de vazios ou por práticas inadequadas de construção.

Kevern et al. (2009) estudaram a variação de temperatura em uma estrutura de pavimento com revestimento de concreto permeável. Para realização da pesquisa, foi construída uma pista experimental em um estacionamento localizado no campus da *Iowa State University*, nos EUA. Em metade de sua área, empregou-se revestimento de concreto convencional, e, na outra, revestimento de concreto permeável. Os resultados mostraram que a base granular da estrutura permeável dificulta a formação de camadas de gelo. Foi observado, também, que, nos casos em que ocorreu exposição direta de ambos os revestimentos à luz solar, a temperatura mostrou-se mais elevada para o revestimento de concreto permeável.

Os pavimentos permeáveis permanecem com aparência praticamente inalterada após a ocorrência de intempéries, ao contrário do que ocorre com os pavimentos impermeáveis, que apresentam aparência úmida por mais tempo. Esta característica comprova a questão do ganho relativo de segurança dos usuários devido à redução da quantidade de água sobre a superfície. Sobre isso, Houle et al. (2009) apresentaram resultados de um estudo realizado comparando revestimentos de concreto asfáltico poroso e de concreto permeável, avaliando-se as capacidade de infiltração, profundidade de congelamento, condições de temperatura e resistência a derrapagem. Para realização dessa pesquisa, foram construídas pistas experimentais em seis estacionamentos na Universidade de New Hampshire, no *Stormwater Center*, nos EUA. Os autores observaram que o pavimento de concreto asfáltico poroso apresentou um descongelamento total das camadas cerca de quatro semanas antes do pavimento revestido com concreto permeável. Isso pode ser explicado pelo fato de o revestimento asfáltico apresentar uma coloração escura e, por consequência, baixar a refletância, o que gera uma maior absorção de energia solar em relação ao pavimento com revestimento de concreto permeável, o qual possui uma coloração clara, refletindo grande parte da luz que incide sobre ele.

Estudos referentes às questões de utilização de pavimentos revestidos com concreto permeável para fins de urbanização foram realizados por Volder et al. (2009), cujos objetivos foram comparar e avaliar a capacidade desse tipo de sistema frente aos sistemas tradicionais de pavimentação, a fim de diminuir ou, até mesmo, de extinguir a necessidade de retirada de árvores em locais onde serão construídos novos pavimentos. Com base nos resultados, ao término dos estudos, os autores concluíram que a utilização de revestimentos de concreto permeável em pavimentos não gera nenhum benefício adicional que garanta o crescimento ou a sobrevivência de árvores pré-existentes.

Dellate et al. (2009) realizaram diferentes ensaios laboratoriais em corpos de prova extraídos de pistas em vinte diferentes locais revestidos com concreto permeável nos EUA. Observaram que a maioria dos revestimentos apresentou desagregação superficial com perda de agregados em pequena escala. Esse tipo de problema é comum quando a ligação entre o agregado e o ligante é quebrada, de modo que o agregado é desalojado da matriz do concreto. Além disso, observaram-se que seis das áreas estudadas apresentaram sinais de fissuração precoce.

Goede (2009) estudou o módulo de elasticidade estático e o coeficiente de Poisson em ensaios de compressão de amostras cilíndricas de concreto permeável moldadas utilizando agregado de diâmetro único de 12,5 mm e relação a/c variando de 0,27 a 0,28. Ele obteve resultados menores do que comumente são encontrados nos concretos convencionais, com valores de módulo de elasticidade variando entre 12.100 MPa e 15.100 MPa.

Haselbach et al. (2010) realizaram uma investigação sobre o desempenho de concretos permeáveis na utilização de painéis estruturais em locais escolhidos com exposição a um tráfego intenso. A amostra do concreto permeável com a espessura maior apresentou melhor desempenho estrutural, comparando-se aos demais resultados dessa pesquisa, indicando que a espessura tem o maior efeito sobre o concreto permeável quando é adequadamente dimensionado para durações de vida típicas, de vinte a trinta anos, apresentando um desempenho semelhante aos dos pavimentos estruturais tradicionais.

Haselbach (2010) pesquisou tecnologias de desenvolvimento de baixo impacto que podem ser integradas sem práticas do transporte de águas pluviais para os pontos do Pacífico Noroeste. Concluiu que os sistemas de pavimentos de concreto permeável devem ser considerados para uso em calçadas com base em critérios, como porosidade.

Huang et al. (2010) realizaram estudos referentes às condições de permeabilidade e de resistência de misturas de concreto permeável com adição de fibras e de látex. O trabalho teve como objetivo estudar o possível aumento da resistência dos concretos em diminuir a sua drenabilidade, com a finalidade de sua utilização em vias com tráfego muito pesado. Para tanto, além da utilização de agregado miúdo em pequenas quantidades, foram empregadas, também, fibras de polipropileno e de látex como material de reforço na produção de diferentes misturas desse material. Os resultados apresentados pelos mesmos indicam que não foi possível obter um concreto com níveis de permeabilidade e resistência aceitáveis para utilização em estradas caracterizadas por tráfego pesado, mesmo com a combinação de látex e areia na mistura.

Alam et al. (2012) simularam painéis de concreto permeável submetidos a carregamentos por eixo tandem de rodas duplas através de análises por elementos finitos. Foram consideradas posições das rodas no canto, centro e na borda das placas. As tensões críticas obtidas foram comparadas com resultados de resistência à tração na flexão (2 MPa) e compressão (21,3 MPa) em amostras retiradas de pistas experimentais, considerando diferentes espessuras de concreto permeável. O estudo mostrou que os painéis de concreto permeável projetados apresentam boas resistências para que pudessem suportar as cargas utilizadas nesse estudo.

Yang (2011) realizou um estudo utilizando o concreto permeável como um material de asfalto ecológico em estradas urbanas, para cuja finalidade tem sido amplamente utilizado. Nesse trabalho, foi desenvolvido um aparelho para realização de testes de permeabilidade para a detecção do seu valor em concretos permeáveis sob condições de chuva simulada. Os resultados mostraram que esse dispositivo refletiu com precisão a importância do uso do concreto permeável, pois se determinou uma taxa de infiltração constante maior do que a de precipitação nas condições de tempo simuladas e verificou-se uma porosidade acima de 22 %.

Yang (2011) estudou um método para mensuração da permeabilidade. Embora seja interessante, é em parte complexo, pois é mais eficaz para porosidades de até 22 %, sendo que os resultados desse método equivalem-se aos do permeâmetro. Nesse trabalho (*Virtual pervious concrete, microstructure, conductivity and permeability*), registra a investigação do desenvolvimento de um modelo computacional que possa prever a permeabilidade, porosidade e condutividade elétrica do concreto permeável.

Neithalath et al. (2010) investigaram a utilização de diferentes tamanhos de agregados em misturas de concreto permeável através de vários métodos para caracterizar a estrutura dos poros, com foco na permeabilidade do mesmo. Os valores de porosidade encontrados, através do método volumétrico e da análise de imagem das dimensões de poros determinados, demonstraram que a maximização do comportamento dos concretos permeáveis no transporte de água é melhor alcançada através do aumento do fator de conectividade dos poros. Os autores, também, analisaram comparativamente os métodos de caracterização aplicados, constatando-se que os resultados foram relativamente semelhantes, concluindo-se que, embora a permeabilidade possa ser maior, o aumento do tamanho dos poros resultaria na redução indesejável das propriedades mecânicas do material.

Neithalath et al. (2010) realizaram uma investigação utilizando as características dos poros abertos do concreto permeável na previsão da permeabilidade. Os valores de porosidade e das dimensões dos poros determinadas morfologicamente, juntamente com a fase de conectividade dos poros representada utilizando uma razão de condutividade elétrica, são utilizados numa relação de tipo Katz-Thompson para prever a permeabilidade do concreto permeável. Ao final, concluíram que a maximização do comportamento de transporte de água do concreto permeável é mais bem alcançada através do aumento do fator de conectividade dos poros.

Kayhanian et al. (2012) investigaram estacionamentos objetivando quantificar a fração de entupimento em amostras de concreto permeável dos mesmos. Através da observação de imagens, da análise e do processamento de núcleos representativos recuperados de vagas de estacionamento, habilitaram a relação qualitativa da porosidade com entupimento. Perfis de porosidade obtidos de imagens escaneadas por processamento de tomografia computadorizada foram utilizados para avaliar a natureza e extensão de entupimento. Valores de porosidade significativamente mais baixos foram computados para núcleos antigos em comparação com os mais novos. Observou-se, também, que as amostras manifestaram comportamento de entupimento devido ao alto conteúdo de pasta de cimento. Assim, as porosidades das amostras foram calculadas, sendo necessário, para a comparação entre um método gravimétrico e a fração de entupimento nos núcleos, o recálculo das mesmas quantificado por espécimes examinados após a aspiração. A tomografia computadorizada, através de raios-X, mostrou-se uma ferramenta útil para estudar o entupimento, sendo que a fração de entupimento variou de 1,48 % a 11,15 % entre duas amostras.

Kayhanian et al. (2012) desenvolveram um estudo que utilizou a medição da permeabilidade, das características físicas e das hidrológicas de 20 pavimentos de concreto permeável em estacionamentos em todo o estado da Califórnia, nos EUA. A permeabilidade foi avaliada em cinco locais: a entrada principal, uma área sem tráfego e três medidas distintas dentro de um espaço de estacionamento em cada vaga de estacionamento. Características hidrológicas e físicas do local, tais como fluxo de tráfego, erosão, cobertura vegetal, acúmulo de sedimentos, prática de manutenção, presença de rachaduras, chuvas e dados de temperatura também foram coletadas para cada estacionamento. Esses dados foram utilizados para realizar a análise estatística detalhada para determinar os fatores que influenciam as alterações na permeabilidade e, portanto, para avaliar a possível causa da sua obstrução. Além disso, sete amostras de núcleos representativos foram obtidas a partir de quatro estacionamentos diferentes, com permeabilidade variando de valores muito baixos a muito altos. Perfis de porosidade foram usados para avaliar as possíveis natureza e extensão do entupimento. Os resultados mostraram que há uma grande variação na permeabilidade dentro de cada vaga e entre as diferentes vagas de estacionamento. A análise estatística revelou que a massa de sedimentos finos (partículas inferiores a 38 mm) também é um importante fator de influência. Outros fatores de influência com menor importância foram o número de dias, com uma temperatura superior a 30 °C, e a quantidade de vegetação próxima ao estacionamento. A análise da imagem digitalizada, combinada ao perfil de porosidade dos núcleos, mostrou que a maioria dos entupimentos ocorreram próximo à superfície do pavimento. Embora uma menor porosidade seja limitada, geralmente, a 25 mm abaixo da superfície, a baixa porosidade, em algumas amostras de núcleo, foi encontrada até 100 mm abaixo da superfície.

Sata (2013) analisou o uso de agregados reciclados na confecção de concreto permeável geopolimérico. Amostras desse material foram preparadas a partir de cinzas de cálcio altamente voláteis, de solução de silicato de sódio (Na_2SiO_3), de solução de hidróxido de sódio (NaOH) e de dois tipos diferentes de tijolo de barro triturado, nas quais foram realizados ensaios mecânicos de resistência à compressão e à tração, além de seu coeficiente de permeabilidade à água também ter sido determinado. Os resultados gerais indicaram que é possível a utilização de agregados reciclados com alto teor de cálcio como ligante na confecção de concreto permeável geopolimérico com propriedades aceitáveis, embora a sua utilização resulte em perdas significativas de resistência em comparação com um concreto permeável normal.

Sonebi e Bassuoni (2013) realizaram um estudo para determinar o efeito da relação a/c, assim como do teor de cimento e de agregado graúdo, nas propriedades fundamentais (densidade, índice de vazios, taxa de infiltração de água e resistência à compressão) do concreto permeável. As misturas foram executadas com relações a/c entre 0,28 e 0,40, quantidade de cimento entre 350 kg/m³ e 415 kg/m³ e quantidade de agregado graúdo entre 1.200 kg/m³ e 1.400 kg/m³. Baseados nos resultados experimentais investigados por meio de modelagem estatística, os autores obtiveram o equilíbrio entre as variáveis de concepção da mistura, levando a proporções ideais de índice de vazios e de taxas de infiltração de água, mantendo, assim, adequada a resistência à compressão axial a um custo mínimo. Os resultados mostraram que os modelos estatísticos desenvolvidos nesse estudo podem facilitar a otimização das proporções das misturas do concreto permeável, reduzindo o número de lotes necessário para análise, sem afetar o desempenho das características desse tipo de material pesquisado.

Shen et al. (2012) investigaram o efeito fotocatalítico do dióxido de titânio (TiO₂), aplicado sobre pavimento de concreto permeável, para a remoção de alguns poluentes do ar, de modo que o pavimento de concreto permeável possa ser utilizado com duas aplicações sustentáveis: o manejo de águas pluviais e a remoção de poluentes do ar. O foto catalisador TiO₂ é ativado, com a radiação UV, para oxidar poluentes atmosféricos, como óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis. Os autores compararam diferentes métodos para aplicar TiO₂ sobre a superfície de concreto permeável e foram medidas a atividade fotocatalítica, as características de infiltração e a capacidade para suportar o impacto ambiental do concreto permeável. Altas reduções de poluentes foram constatadas utilizando-se os seguintes tipos de revestimentos: mistura de protetor, preparação comercial de TiO₂ com base em água, TiO₂ em água, pasta fluida de cimento e água com baixa concentração de cimento e o revestimento PURETI comercial. Verificou-se que o óxido de nitrogênio foi removido eficientemente com cada um desses tratamentos, enquanto que os compostos orgânicos voláteis apresentaram maior variabilidade na eficiência de remoção. Verificaram, também, que métodos de revestimento distintos podem causar diferentes graus de redução da taxa de infiltração de acordo com o *design* específico dos materiais de revestimento, enquanto que nenhum deles diminuiu as taxas de infiltração abaixo dos níveis aplicáveis para o projeto hidrológico padrão. Ainda, quando o concreto permeável foi comparado ao concreto tradicional, o concreto permeável apresentou uma maior redução de óxidos de nitrogênio.

Jabur et al. (2013) realizaram, recentemente, um estudo utilizando a norma ASTM C1701/C1701M (ASTM, 2009), buscando avaliar a infiltração de dois tipos de pavimentos, ambos instalados no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, sendo um de asfalto poroso e um de blocos vazados. Os resultados obtidos revelaram que ambos os pavimentos apresentaram colmatção devido ao seu uso como estacionamento de automóveis. A avaliação dos valores obtidos indicou que o asfalto poroso, no módulo experimental, foi o menos resistente em relação ao uso, pois, após nove anos, perdeu de modo significativo a sua capacidade de infiltração, ou seja, sofreu colmatção, diferentemente do pavimento de blocos vazados, que ainda apresentava uma infiltração superior à do primeiro. Segundo os autores, essa colmatção ocorreu pela falta de manutenção dos pavimentos, que foi propositalmente definida no princípio do experimento, de modo a avaliar as condições reais de utilização.

3.8. CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DE CONCRETOS PERMEÁVEIS NA REALIDADE BRASILEIRA

Após serem apresentados resumos dos principais trabalhos nacionais e internacionais sobre concretos permeáveis, pôde-se constatar que, por ser uma tecnologia relativamente nova, ainda não se tem um conhecimento mais amplo sobre o comportamento desse material ao longo do tempo. Além disso, os seus aspectos quanto ao projeto, à execução e à manutenção ainda não estão inteiramente dominados. Em outras palavras, há o risco de que, ao instalar-se essa tecnologia, ocorram problemas que comprometam o seu funcionamento, de sorte que haverá a necessidade de mais investimentos e, conseqüentemente, encarecendo todo esse novo sistema.

Os concretos permeáveis possuem características únicas, por isso necessitam de uma instalação mais adequada, principalmente quanto ao seu acabamento, pois eles não são esteticamente tão atraentes como o convencional, porém os seus pontos positivos são vários. Entre eles, destacam-se as capacidades de permitir a drenagem das águas pluviais no local, de aliviarem as ilhas de calor, combatendo o aquecimento global, de permitir a arborização nos centros urbanos e de absorver ruídos.

Existem, ainda, outros fatores para serem levados em consideração na produção desse concreto permeável. Dessa forma, os fatores condizentes com a realidade brasileira são:

- a) resistência da população para a utilização dessa tecnologia;
- b) descaso da população em relação aos resíduos sólidos;
- c) tendência a maior entupimento dos poros, comprometendo a permeabilidade, devido à pouca manutenção periódica de pavimentos no Brasil;
- d) necessidade de mão de obra especializada na construção de um pavimento permeável, sobretudo por conta das etapas que devem ser seguidas para sua execução.

Hoje em dia, há um novo pensamento quanto a construir, sobretudo no que se refere à gestão das águas pluviais, procurando uma melhor interação com a sociedade e com o meio ambiente, como o aproveitamento da água da chuva, as bacias de amortecimento e outras formas. Entre as novas tecnologias está esse concreto permeável, que pode ser utilizado auxiliando na drenagem urbana, beneficiando a sociedade e o meio ambiente e promovendo uma aproximação das condições de pré-urbanização. Desse modo, a adoção desse tipo de material impõe-se, caso seja levado em conta o quanto o processo de expansão e de impermeabilização das cidades tem impactado o meio ambiente.

4. MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo aborda o método adotado para o desenvolvimento desta pesquisa, iniciando pela descrição da estratégia de pesquisa escolhida. Em seguida, apresenta o delineamento do processo de pesquisa, sendo suas etapas descritas e detalhadas em relação aos métodos e técnicas utilizadas.

4.1. ESTRATÉGIA DE PESQUISA

O estudo foi iniciado tomando como base a recomendação da norma americana ACI 522R-06 (ACI, 2006) como referência de traços para os concretos permeáveis. Utilizando-se essas composições recomendadas, deu-se início ao desenvolvimento do processo de definição do melhor traço de forma incremental, já que há poucos trabalhos publicados e ainda não existem normas brasileiras para orientar a confecção ou o controle de qualidade do concreto permeável.

A primeira etapa do estudo exploratório foi baseada, usando-se como ponto de partida, as considerações relatadas por Hölitz (2011) em sua pesquisa. Nela, considerou-se o mais conveniente, para uma mistura apropriada do concreto permeável, a utilização dos traços entre 1:3 e 1:4, obtendo-se resistências mais elevadas, assim como o uso de agregado com um diâmetro menor, para que sejam favorecidos o empacotamento e a condução a traços com maior resistência e menor permeabilidade.

4.2. DELINEAMENTO DA PESQUISA

O delineamento da pesquisa, como demonstrado no fluxograma apresentado na Figura 16, é baseado no estudo exploratório da literatura existente, buscando um profundo embasamento. Desse modo, dividiu-se em duas partes:

- a) a Etapa 1 é a dos estudos preliminares, que envolveu a seleção de traços e a definição da forma de compactação do concreto permeável fresco;

- b) a Etapa 2 é a dos estudos principais da investigação, a qual será tratada no próximo capítulo, que envolveu os estudos principais para desenvolvimento das placas e para a realização de ensaios de desempenho mecânico, de permeabilidade e de colmatação, que foram comparados com os dados obtidos em testes de grelhas produzidas pelo Departamento de Esgotos Pluviais (DEP) em concreto convencional.



Figura 16: fluxograma do delineamento da pesquisa

4.3. ETAPA 1: ESTUDOS PRELIMINARES

A primeira etapa foi constituída de um estudo exploratório, que englobou uma série de concretagens experimentais realizadas com o objetivo de testar alguns traços de concreto permeável em elementos de drenagem. Optou-se, entre os comumente utilizados pelo DEP, por realizar os ensaios nos protótipos das grelhas para obter-se uma análise preliminar de traços, como demonstrados na Tabela 2, desenvolvidos com base nas recomendações da norma ACI 522R-06 (ACI, 2006). Para isso, buscou identificar-se qual a combinação que iria apresentar os resultados mais satisfatórios, em termos de resistência e de permeabilidade, para a definição do traço.

Tomando-se como base os parâmetros apresentados no ACI 522R-06 (ACI, 2006), decidiu-se trabalhar, nessa etapa preliminar, com a relação a/c 0,25 e com três relações 1:m (total de agregados), 1:3, 1:3,5 e 1:4, em massa. Quanto ao tamanho dos agregados, o Apêndice 6 do ACI 211.3R-02 (ACI, 2002) sugere que o agregado a ser usado na fabricação do concreto permeável deva ter dimensão reduzida, com diâmetro máximo ($d_{m\acute{a}x.}$) entre 2,4 mm e 9,5 mm, e que não é recomendável usar a fração mais fina dos agregados, ou seja, o agregado miúdo. Dessa forma, obtêm-se concretos permeáveis com massa específica da ordem de 1.700 kg/m^3 e volume de vazios em torno de 20 %. Decidiu-se que os traços seriam executados com brita 0 (zero), conhecida, popularmente, como pedrisco. Combinando as duas variáveis de estudo (m e a/c), foram gerados três traços, todos compatíveis com o ACI 211.3R-02 (ACI, 2002).

Tabela 2: traços dos concretos permeáveis utilizados na Etapa 1

Relação 1:m	Relação a/c	Cimento (kg)	Brita 0 (kg)	Água (kg)
1:3	0,25	14,84	44,52	3,71
1;3,5	0,25	12,50	43,74	3,12
1:4	0,25	11,50	46,01	2,87

4.3.1. Caracterização dos Materiais

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram usados materiais de construção tipicamente encontrados na Região Sul do país. Esses são descritos, conforme a seguir:

- a) cimento;

b) água;

c) agregado graúdo.

Como aglomerante, foi utilizado o cimento CP V – ARI, por ser um cimento mais puro e fino, que desenvolve resistência em um curto espaço de tempo, o que favorece a formação do conglomerado sem preenchimento dos poros. De acordo com Kihara e Centurione (2004), esse apresenta uma mistura diferente de outros cimentos por possuir uma dosagem única de calcário e argila, numa moagem bem fina. Com isso, ele atinge altas resistências num curto espaço de tempo ao reagir com a água. A Tabela 3 apresenta os principais dados das características do fabricante do cimento utilizado nesta pesquisa.

Tabela 3: características do cimento utilizado nas misturas de concreto permeável

Característica	Valor
Massa específica (g/cm ³), conforme NBR NM 23:2001 (ABNT, 2001)	3,09
Área específica (g/cm ³), conforme NBR NM 76:1998 (ABNT, 1998)	4,598
Resistência à compressão (MPa), conforme NBR 7215:1996 (ABNT, 1996)	28,1 (1 dia)
Resistência à compressão (MPa), conforme NBR 7215:1996 (ABNT, 1996)	41,1 (7 dias)
Resistência à compressão (MPa), conforme NBR 7215:1996 (ABNT, 1996)	45,1 (14 dias)
Resistência à compressão (MPa), conforme NBR 7215:1996 (ABNT, 1996)	54,0 (28 dias)
Tempo de pega (min), conforme NBR NM 65:2003 (ABNT, 2003)	195-257
Resíduo solúvel (%), conforme NBR NM 15:2004 (ABNT, 2004a)	0,98
Perda ao fogo – 1.000 °C (%), conforme NBR NM 18:2004 (ABNT, 2004b)	2,48

(fonte: fabricante)

Além dos motivos apresentados anteriormente, a opção por utilizar o CP V – ARI dá-se pelo seu tempo de cura reduzido e pela possibilidade de rápida desforma, proporcionando maior rotatividade no estoque, maior velocidade de fabricação das peças, redução de custo de mão de obra e economia. A rapidez na pega também é importante, em razão da elevada superfície que fica exposta ao ar, já que o concreto permeável costuma perder a água de mistura com muita velocidade.

A água utilizada é potável, fornecida pela rede de abastecimento local. Em Porto Alegre/RS, a sua distribuição é realizada pelo Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE).

Como agregado graúdo, fração que representa o maior volume do concreto permeável, foi utilizado o pedrisco, conforme ilustrado na Figura 17. Esse possuía $d_{máx.}$ de 9,5 mm e módulo de finura de 4,80, como recomendado pelo ACI 211.3R-02 (ACI, 2002). Optou-se pela inclusão do pedrisco na composição do concreto permeável adotado, seguindo a bibliografia pesquisada no Apêndice 6 do ACI 211.3R-02 (ACI, 2002), que menciona ser essa a brita ideal para a utilização na mistura desse tipo de concreto.



Figura 17: pedrisco utilizado na composição do concreto permeável

A análise granulométrica é apresentada na Tabela 4, na qual estão demonstradas as características da brita 0 empregada na composição da mistura, cujos valores foram obtidos através de ensaio realizado de acordo com a NBR 7217:87 (ABNT, 1987). O gráfico da Figura 18 representa a distribuição granulométrica desse material empregado na composição da mistura.

Tabela 4: características do agregado utilizado nas moldagens dos corpos de prova

Característica	Valor
Massa específica (g/cm ³)	2,90
Massa unitária (g/cm ³)	1,47
Módulo de finura	6,06
Dimensão máxima (mm)	12,5

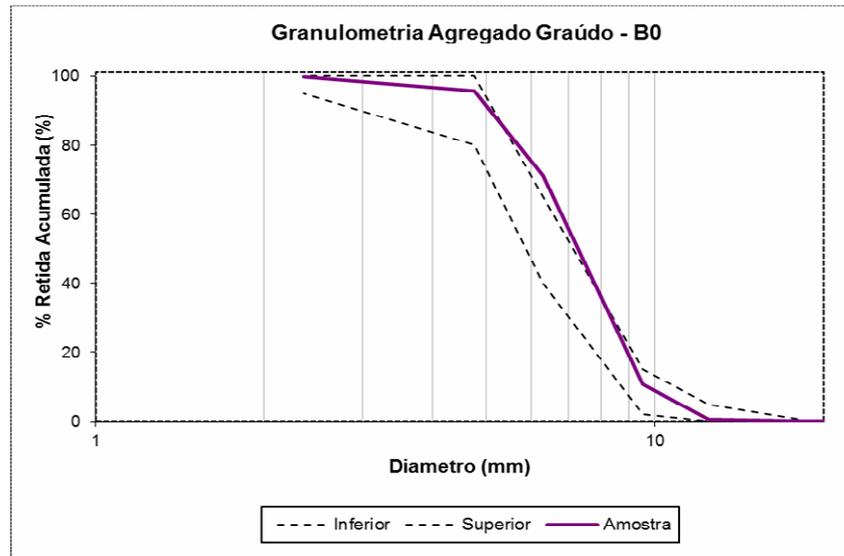


Figura 18: gráfico da distribuição granulométrica do agregado graúdo selecionado

4.3.2. Método do Processo de Mistura para Confeção do Concreto Permeável

Na realização das concretagens dos protótipos fabricados no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS, objetivando testar os traços de concreto permeável, determinando-se o a ser adotado na Etapa 2, ou seja, principal, desta dissertação, foram adicionados os materiais na betoneira, seguindo a seguinte ordem para a confecção das placas de traço de 1:4: 42,07 kg de pedrisco, parte da água, equivalente a, aproximadamente, 1,48 kg, 10,52 kg de cimento e o restante da água, equivalente a cerca de 1,15 kg, totalizando os 2,63 kg previstos. Finalizando esse procedimento de mistura dos constituintes do concreto permeável, foi realizada a avaliação táctil da pasta pelo operador da betoneira, conforme demonstrado na Figura 19.



Figura 19: avaliação tátil da mistura de concreto permeável pelo operador da betoneira

A mistura de concreto permeável foi depositada na fôrma e distribuída uniformemente com o auxílio de uma pá, conforme ilustrado na Figura 20. Essa fôrma, utilizada para a confecção das placas, foi confeccionada de acordo com o estabelecido no Caderno de Encargos do Departamento de Esgotos Pluviais (PORTO ALEGRE, 2005b) nas dimensões de 40 cm x 100 cm x 7 cm. Utilizou-se, na sua confecção, madeira de cedrinho, parafusos e porcas reforçadas.



Figura 20: mistura de concreto permeável depositada na fôrma com auxílio de pá

De acordo com Hölitz (2011), o que garante uma boa resistência ao concreto permeável é o método de adensamento, de forma que se buscou uma maneira de adensamento que garantisse uma distribuição de poros satisfatória e uma boa resistência. Desse modo, tomou-se como base a recomendação do ACI 522R-06 (ACI, 2006) de utilizar um rolo de aço, com peso de 90 kg/m, para a compactação dos protótipos, de modo que foi adaptado um rolo de aço, de 86 cm de comprimento, conforme mostra a Figura 21, no qual foram adicionadas mais algumas barras de aço, elevando a massa do conjunto de adensamento para um total maior que 80 kg.



Figura 21: compactação realizada com rolo de aço adaptado

Após o adensamento da mistura de concreto permeável na fôrma, observou-se que sua superfície estava com um brilho metálico, o que está de acordo com o ACI 522R-06 (ACI, 2006), o qual recomenda que a mistura ideal do concreto permeável é garantida quando apresenta esse aspecto superficial. Também, conforme recomendado pelo ACI 522R-06 (ACI, 2006), foi feita uma molhagem através de um borrifador no protótipo da grelha, conforme demonstrado na Figura 22, para aperfeiçoar o processo de cura, cujo tempo de cura adotado levou em conta que os elementos de drenagem em concreto permeável deverão ter uma alta rotatividade, semelhante ao que ocorre hoje na fábrica de artefatos do DEP, segundo recomendação do ACI 522R-06 (ACI, 2006).



Figura 22: placa de concreto permeável borrifada com água para sua cura

Höltz (2011) constatou, em sua dissertação, que a evolução da resistência à compressão para os traços com relações a/c de 0,26 e 0,30, entre os 7 e 28 dias, é muito pequena, ou melhor, praticamente nula, de modo que, devido a esse comportamento do material, as placas de concreto permeável, cuja relação a/c era fixa de 0,25, variando apenas os traços, foram mantidas por 14 dias em cura. Já nos traços com relação a/c de 0,35 e 0,45, no mesmo intervalo de dias, mostraram alguma tendência de evolução de resistência.

Após o desmolde, todos os três protótipos de concreto permeável, um de cada traço definido anteriormente, foram cobertos com um filme de polietileno, conforme ilustrado na Figura 23. Depois foram colocados em uma câmara úmida, com temperatura controlada de 240 °C, sendo mantidos na mesma por 14 dias em cura.



Figura 23: protótipo de concreto permeável embalado em filme plástico de polietileno

4.4. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS E RESULTADOS DA ETAPA DE ESTUDOS PRELIMINARES

Neste item, são apresentados os ensaios realizados nesta etapa preliminar, que são os de flexão e de taxa de infiltração de água. Também são registrados os resultados obtidos desses procedimentos, sendo que todos foram executados no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS no Campus do Vale.

4.4.1. Ensaio de Flexão

Com a finalidade de simular um exemplo real para a realização do ensaio, os protótipos de concreto permeável foram ensaiados de maneira a reproduzir o seu uso. Para isso, foi adaptada uma base, utilizando-se barras de ferro de 3 cm de largura, conforme ilustrado na Figura 24, para que essa apoiasse cada placa de concreto permeável no seu perímetro.



Figura 24: utilização de base de ferro para simulação de situação real

Após o protótipo de concreto permeável ser apoiado sobre a base de ferro, para realizar o ensaio de flexão, posicionou-se uma placa de neoprene quadrada de 10 cm e com espessura próxima a 2 cm sobre o centro geométrico do mesmo, sobre a qual foi feita a aplicação de carga a uma taxa de aplicação de 0,05 mm/s. Para a realização desse ensaio, repetido para as placas de concreto permeável confeccionadas com relação a/c de 0,25 nos três traços de composições 1:3, 1:3,5 e 1:4, utilizou-se uma prensa da marca Shimadzu, com capacidade de carga de 2.000 kN, conforme mostra a Figura 25.



Figura 25: ensaio de flexão em protótipo de concreto permeável

Assim como para os três protótipos de concreto permeável, o ensaio de flexão também foi realizado na única grelha de concreto convencional fornecida pelo DEP, cujo traço era 1:2:3 (cimento:areia:brita), nas mesmas condições referidas acima, como ilustrado na Figura 26. Dessa forma, a prensa e sua taxa de aplicação de carga foram as mesmas.



Figura 26: ensaio de flexão em grelha de concreto convencional fornecida pelo DEP

Na Tabela 5, apresentam-se os resultados das cargas de ruptura (P) e das massas específicas (γ), cuja determinação é apresentada a seguir, obtidos nesses ensaios de flexão descritos acima, realizados na prensa, da grelha em concreto convencional fornecida pelo DEP e dos três protótipos de concreto permeável da Etapa 1, organizados segundo a relação 1:m. Em seguida, para melhor comparar os resultados das cargas de ruptura desses elementos, é apresentado o gráfico da Figura 27.

Tabela 5: resultados dos ensaios de flexão dos elementos da Etapa 1

Elemento	Traço (1:m)	γ (kg/m ³)	P (kN)
Grelha de concreto convencional	1:5	-	8,4
Placa de concreto permeável	1:3	2.034,64	18,2
	1:3,5	1.849,29	11,6
	1:4	1.942,86	15,2

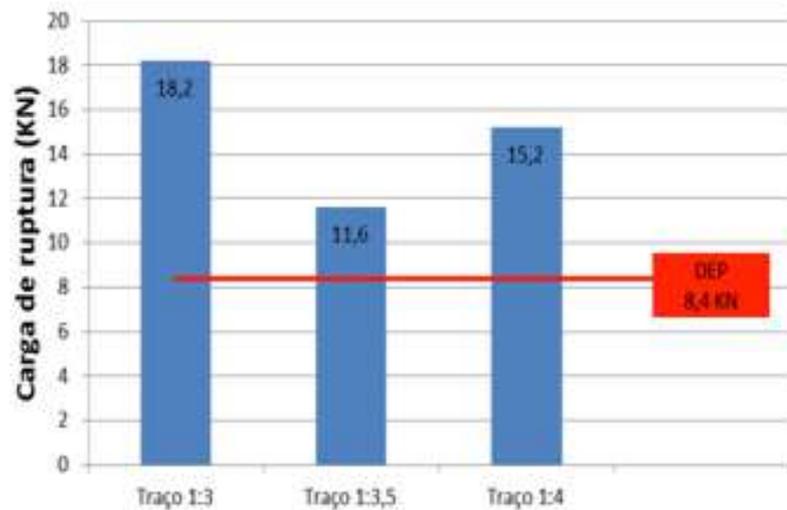


Figura 27: gráfico dos resultados dos ensaios de flexão dos elementos da Etapa 1

Para a determinação das massas específicas das placas de concreto permeável fabricadas, dividiu-se a massa aproximada de cada uma pelo volume da fôrma em que foram moldadas, que era $0,028 \text{ m}^3$. Desse modo, calculou-se uma massa específica de, aproximadamente, $2.034,64 \text{ kg/m}^3$ para o protótipo com traço 1:3, pois possuía uma massa aproximada de $56,97 \text{ kg}$. Já o protótipo com traço 1:3,5, que possuía uma massa aproximada de $51,74 \text{ kg}$, apresentou uma massa específica de, aproximadamente, $1.849,29 \text{ kg/m}^3$. Por fim, o protótipo com traço 1:4, que possuía uma massa aproximada de $54,40 \text{ kg}$ apresentou uma massa específica de, aproximadamente, $1.942,86 \text{ kg/m}^3$.

Quanto aos modos de ruptura dos elementos ensaiados nesta Etapa 1, não se constatou diferenças entre eles, de modo que se observou que, tanto para as placas em concreto permeável, como para a grelha do DEP, houve um esborcinamento das suas bordas, seguido de uma ruptura em forma de “X”.

4.4.2. Ensaios de Taxa de Infiltração de Água

A escolha do ensaio de taxa de infiltração de água foi adotada em virtude da dificuldade de realizar-se a extração dos corpos de prova nos elementos de concreto permeável. Além dessa razão, foi escolhido por ser prático, por ser um dos únicos referenciados para concretos permeáveis, cujo método de ensaio está recomendado na ASTM C1701/C1701M - 09 (ASTM, 2009), e por poder verificar-se se a compactação com rolo foi feita uniformemente.

O processo funciona após a superfície das placas de concreto permeável serem isoladas com uma tubulação de policloreto de polivinila (PVC) de diâmetro de 300 mm, através do assentamento de massa de vidro no seu contorno, garantindo a estanqueidade do processo, ou seja, evitando que parte da água utilizada infiltrasse além do cano. Esse anel de infiltração possui uma marcação de limite, conforme ilustrado na Figura 28, onde deve sempre permanecer uma lâmina de água, enquanto é realizado o ensaio.



Figura 28: indicação de marcação de limite em cano de PVC para ensaio de taxa de infiltração de água

Continuando-se esse ensaio, é feita uma pré-molhagem da placa de concreto permeável para obter-se conhecimento da quantidade de água que deverá ser utilizada no mesmo. Nessa etapa, despeja-se 3,6 kg de água, conforme ilustrado na Figura 29, medindo-se o tempo decorrido.



Figura 29: etapa de pré-molhagem para ensaio de taxa de infiltração de água

Definido o tempo de pré-molhagem (t), sabe-se a quantidade de água a ser utilizada no ensaio. Caso esse tempo para a água infiltrar seja menor do que 30 s, utiliza-se 18,0 kg de água para a realização do ensaio. Já no caso desse tempo ser maior do que 30 s, é utilizado novamente 3,6 kg de água.

Medindo o tempo de infiltração (T) e a massa de água infiltrada (M) utilizada no ensaio, determina-se a taxa de infiltração de água (I) em cada placa de concreto permeável, uma para cada um dos três traços analisados. Dessa forma, essa taxa é dada pela Equação 2 recomendada pela ASTM C1701/C1701M - 09 (ASTM, 2009):

$$I = K \times M / (D^2 \times T) \quad (2)$$

Onde:

- a) “I” é a taxa de infiltração de água, em “mm/h”;
- b) “K” é uma constante, no valor de 4.583.666.000;
- c) “M” é a massa de água infiltrada, em “kg”;
- d) “D” é o diâmetro do cano, igual a 300 mm;
- e) “T” é o tempo de infiltração da massa de água infiltrada, em “s”.

Em relação à permeabilidade das placas de concreto permeável ensaiadas, os resultados dos ensaios apresentaram valores de taxa de infiltração variando de 24.500,63 mm/h a 73.353,96 mm/h. Os valores mais elevados foram obtidos dos ensaios nos protótipos com traço 1:3,5, sendo que todos esses resultados estão demonstrados na Tabela 6. Com base nesses dados, gerou-se o gráfico da Figura 30 a seguir, relacionando-se os traços das placas de concreto permeável ensaiadas às suas respectivas taxas de infiltração de água.

Tabela 6: resultados dos ensaios de taxa de infiltração de água

Traço (1:m)	Identificação	Tempo de pré-lavagem(s)	M(kg)	T(s)	I(mm/h)
1:3	1	7,23	18,00	31,10	28.481,78
	2	7,87	18,00	36,20	24.500,63
	Fundo1	6,04	18,00	28,89	30.699,99
	Fundo 2	5,94	18,00	28,12	31.540,64
1:3,5	1	3,10	18,00	18,09	73.353,96
	2	3,40	18,00	13,37	66.302,07
	Fundo 1	4,00	18,00	13,62	65.109,58
	Fundo 2	3,60	18,00	12,29	72.148,60
1:4	1	5,10	18,00	31,10	28.610,41
	2	5,20	18,00	18,08	49.273,48
	Fundo 1	6,10	18,00	21,29	41.651,30
	Fundo 2	4,20	18,00	20,10	44.125,51

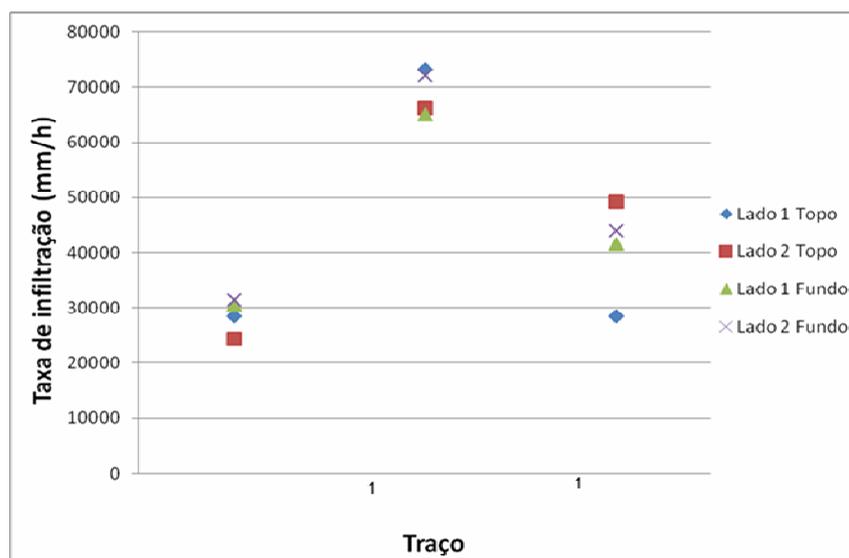


Figura 30: gráfico dos resultados dos ensaios de taxa de infiltração de água

4.4.3. Comparação de Custos

Para avaliar-se qual o traço a ser adotado na Etapa 2 desta pesquisa, definiu-se como critério o custo de confecção das placas de concreto permeável, uma vez que os protótipos de concreto permeável produzidos em cada um dos três traços apresentaram desempenho superior ao da grelha de concreto convencional fabricada pelo DEP quanto às cargas de ruptura e às taxas de infiltração de água obtidas dos seus respectivos ensaios apresentados nos dois itens anteriores. Desse modo, para obter-se uma comparação entre os custos do concreto convencional de traço 1:2:3, utilizado na grelha fabricada pelo DEP, e os dos concretos permeáveis nos traços 1:3, 1:3,5 e 1:4, foi realizada uma planilha, conforme ilustrado na Tabela 7. Para sua elaboração, utilizaram-se os valores das massas dos materiais indicadas na primeira tabela deste capítulo e as massas específicas do cimento e da brita 0, respectivamente, de 3.090 kg/m³ e de 2.900 kg/m³ utilizados na confecção dos protótipos de concreto permeável desta Etapa 1.

Tabela 7: comparação de custos dos materiais para cada elemento

Elemento	Custo (R\$/m ³)					
	Traço (1:m)	Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1	Total
Grelha de concreto convencional	1:5	210,87	33,74	-	43,59	288,20
Placa de concreto permeável	1:3	264,71	-	46,90	-	311,61
	1:3,5	236,84	-	55,95	-	292,79
	1:4	214,29	-	50,62	-	264,91

Esses resultados indicam que a placa confeccionada em concreto permeável no traço 1:4 é, aproximadamente, 8 % mais econômica que a grelha em concreto convencional do DEP, conforme pode ser visualizado no gráfico da Figura 31. Além disso, constata-se que os protótipos de concreto permeável nos dois traços restantes são mais onerosos que a grelha em concreto convencional.

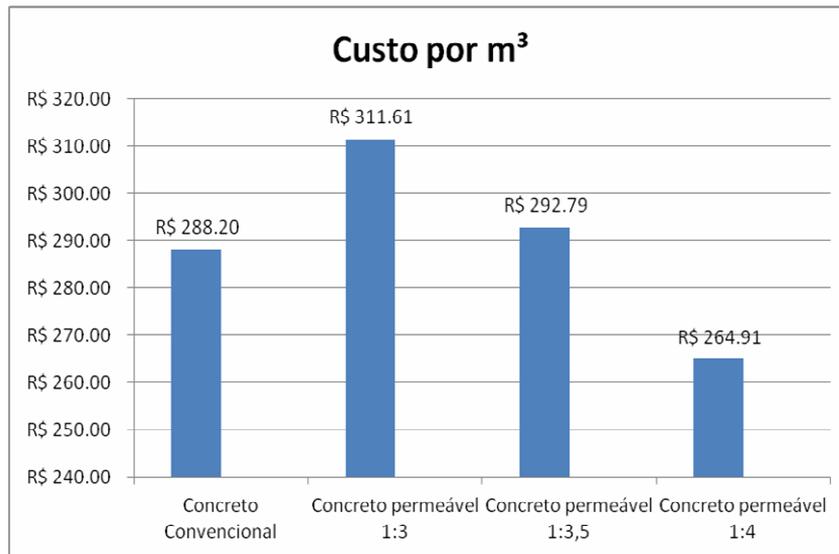


Figura 31: gráfico de comparação de custos dos materiais para cada elemento

Com base nos resultados dos ensaios de flexão, de taxa de infiltração de água e nos referentes aos custos dos materiais, conclui-se que, nesta Etapa 1 dos ensaios preliminares, os protótipos em concretos permeáveis apresentaram maior carga de ruptura à flexão que a grelha em concreto convencional do DEP. Quanto aos resultados dos ensaios de permeabilidade, os valores de taxa de infiltração foram bastante elevados. Por fim, em relação aos custos, os resultados indicaram que a grelha confeccionada em concreto permeável no traço 1:4 é, aproximadamente, 8 % mais econômica que a grelha em concreto convencional do DEP.

A Tabela 8 ilustrada abaixo representa uma síntese do que foi avaliado nesta Etapa 1. Nela estão organizados os resultados conforme os traços utilizados dos ensaios de taxa de infiltração de água, das massas específicas e das cargas de ruptura à flexão e, ainda, dos custos de produção. Dessa forma, analisando-se seu conteúdo, conclui-se que o traço de concreto permeável que apontou o melhor resultado, considerando-se os custos, foi o 1:4, o qual será adotado na Etapa 2 desenvolvida no capítulo seguinte.

Tabela 8: síntese dos resultados da Etapa 1

Elemento	Traço (1:m)	I (mm/h)	γ (kg/m³)	P (kN)	Custo (R\$/m³)
Grelha de concreto convencional	1:5	-	-	8,4	288,20
Placa de concreto permeável	1:3	28.805,77	2.034,64	18,2	311,61
	1:3,5	69.228,55	1.849,29	11,6	292,79
	1:4	40.915,18	1.942,86	15,2	264,91

5. ETAPA 2: ESTUDOS PRINCIPAIS

Este capítulo trata dos estudos principais para o desenvolvimento das placas e para a realização de ensaios de desempenho mecânico, de permeabilidade e de colmatação. Por fim, esses são comparados com os dados obtidos em testes de grelhas produzidas pelo Departamento de Esgotos Pluviais (DEP) em concreto convencional.

5.1. MÉTODOS UTILIZADOS

A definição do traço utilizado nesta segunda etapa da pesquisa tomou como base o estudo exploratório de amostras estudadas na etapa preliminar, confeccionadas com materiais locais, mas que foram produzidas seguindo as diretrizes propostas pela recomendação da norma americana ACI 522R-06 (ACI, 2006). O melhor resultado obtido na Etapa 1 desta pesquisa foi através do traço 1:4, de modo que o mesmo foi adotado para a produção das placas de concreto permeável desta Etapa 2, cujas concretagens também foram realizadas no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e cujos materiais utilizados foram os mesmos da primeira etapa desta pesquisa.

O aglomerante hidráulico utilizado foi o cimento CP V – ARI, justamente por ser caracterizado por uma maior finura e pureza, e a água adicionada à mistura foi obtida da rede de abastecimento local, mantendo-se uma relação a/c de 0,25. Quanto ao agregado graúdo adotado, escolheu-se a brita 0 (pedrisco), de diâmetro máximo 9,5 mm e módulo de finura 4,80, porque, conforme recomendado pelo ACI 211.3R-02 (ACI, 2002), essa fração granulométrica é a dimensão mais adequada para produção de concreto permeável.

Schaefer et al. (2006) estudaram diferentes processos de mistura para confecção de corpos de prova de concreto permeável em laboratório. Os autores concluíram que a ordem de mistura dos componentes pode alterar as características do produto final e, assim, estabeleceram um procedimento pelo qual foi obtido um material com melhores propriedades mecânicas e hidráulicas. Esse procedimento está apresentado a seguir (SCHAEFER et al., 2006):

- a) adiciona-se todo o agregado na betoneira com mais 5 % do peso total do cimento;

- b) mistura-se por 1 min;
- c) adicionam-se o restante dos materiais;
- d) mistura-se por 3 min;
- e) deixa-se a mistura em repouso por 3 min;
- f) mistura-se por mais 2 min.

O processo utilizado neste trabalho experimental foi semelhante ao utilizado na pesquisa de Schaefer et al. (2006), porém sofreu algumas adaptações. No adotado nesta Etapa 2, ou seja, principal, a mistura, conforme ilustrado na Figura 32, seguiu a seguinte ordem de adição dos componentes do concreto permeável na betoneira: 42,07 kg de pedrisco, parte da água, equivalente a, aproximadamente, 1,48 kg, 10,52 kg de cimento e o restante da água, equivalente a cerca de 1,15 kg, totalizando os 2,63 kg previstos. Ainda, o intervalo de tempo entre o carregamento dos materiais foi de um minuto, com exceção do tempo após a adição do cimento, que permaneceu dois minutos em movimento, antes que o restante da água fosse adicionada e misturada por mais dois minutos.



Figura 32: fabricação de concreto permeável através da mistura na betoneira de, respectivamente, pedrisco, parte da água, cimento e o restante da água

Cada betonada rendeu a moldagem de uma placa de concreto permeável no mesmo molde utilizado na Etapa 1, conforme ilustrado na Figura 33. Para sua compactação, tomou-se como base a recomendação do ACI 522R-06 (ACI,2006), que sugere a utilização de um rolo de aço com peso de 90 kg/m, de modo que a forma de compactação, bem como o rolo utilizado, são apresentados na Figura 34. Segundo essa norma, o concreto permeável deve ser compactado adequadamente para assegurar sua resistência e integridade estruturais após a retirada das fôrmas, porém não em demasia para não provocar um fechamento dos poros e comprometer a sua permeabilidade.



Figura 33: moldagem de placa de concreto permeável com todo o material de uma betonada



Figura 34: compactação do material na fôrma com rolo de aço

Foi realizada uma análise visual da mistura pronta, que é um dos métodos utilizados na prática para controle da produção do concreto permeável, na qual se observa, após o término do tempo de mistura, se as partículas estão inteiramente cobertas de argamassa e se a mistura apresenta um aspecto brilhoso. Além dessa verificação, foi realizado um teste tátil visual, ilustrado na Figura 35, também indicado pela literatura, que consiste em apertar uma porção da mistura com a mão e verificar se há a formação de uma pequena aglomeração de partículas.



Figura 35: avaliação da pasta através de teste tátil visual

O processo de cura, apresentado na Figura 36, foi realizado cobrindo-se a placa com um filme plástico de polietileno e transferindo a mesma para uma câmara de temperatura controlada de 24 °C. Os protótipos de placas foram mantidos neste ambiente por 14 dias e, após, transferidos para ambiente normal de laboratório. Este menor tempo de cura adotado, conforme já mencionado no capítulo anterior, seguiu as recomendações do ACI 522R-06 (ACI, 2006).



Figura 36: protótipos de placas de concreto permeável cobertos com filme plástico de polietileno

Em seguida, os corpos de prova desse concreto permeável foram identificados e armazenados em câmara úmida com umidade constante de 98 %, cujo procedimento de cura seguiu as instruções recomendadas na NBR 5738:1994 (ABNT, 1994). Dessa forma, para compatibilizar os requisitos de permeabilidade e resistência mecânica do concreto permeável, foram realizados ensaios, nessas amostras e nas placas de concreto permeável fabricadas, previstos em normas brasileiras e internacionais, os quais são descritos nos próximos itens.

5.2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EMPREGADOS E DE SEUS RESULTADOS

Foram realizados cinco tipos de ensaios nesta Etapa 2 para avaliarem-se as propriedades dos concretos permeáveis a fim de compararem-se seus resultados com os do concreto convencional adotado para fabricar as grelhas pelo Departamento de Esgotos Pluviais (DEP). Os quatro primeiros são listados a seguir, seguidos de suas descrições e de seus resultados:

- a) ensaio de flexão;
- b) ensaio de taxa de infiltração de água (ASTM, 2009);
- c) ensaio de permeabilidade (HÖLTZ, 2011);
- d) ensaio de resistência à compressão axial (ABNT, 1994).

Depois da análise comparativa desses resultados desses quatro ensaios citados, ainda realizaram-se os ensaios de permeabilidade e de colmatação em placa. Através desses, foi possível avaliar a possibilidade de colmatação dos poros do concreto permeável analisado.

5.2.1. Ensaio de Flexão

As grelhas utilizadas pelo DEP são projetadas considerando um apoio de 3 cm no seu contorno. Portanto, com a finalidade de simular o comportamento real dos esforços aplicados em uma grelha, o ensaio de flexão foi realizado utilizando-se um molde metálico retangular para apoio das suas extremidades, semelhante ao usado na etapa preliminar, conforme é possível visualizar na Figura 37, em forma de moldura de 3 cm de espessura.



Figura 37: molde metálico utilizado nos ensaios de flexão da Etapa 2

A carga foi aplicada, utilizando-se a mesma prensa da primeira etapa desta pesquisa, no centro geométrico marcado na face superior do protótipo de concreto permeável de traço 1:4, conforme Figura 38, utilizando as mesmas placa de neoprene e taxa de aplicação de carga de 0,05 mm/min da Etapa 1, cuja carga foi aplicada progressivamente e sem golpes até o momento da ruptura. Os ensaios de resistência à flexão foram realizados em seis placas produzidas em concreto permeável e em mais duas grelhas de concreto convencional fornecidas pelo DEP, confeccionadas de outra betonada, diferente da da primeira grelha ensaiada na Etapa 1.



Figura 38: realização de ensaio de flexão em placa de concreto permeável da Etapa 2

5.2.2. Resultados dos Ensaios de Flexão

O ensaio de flexão realizado na primeira grelha de concreto convencional, produzida e fornecida para a realização desta pesquisa experimental pelo Departamento de Esgotos Pluviais (DEP) de Porto Alegre/RS, na Etapa 1, ou seja, de estudos preliminares, atingiu uma carga de ruptura (F) de, apenas, 8,4 kN, enquanto que as duas outras grelhas ensaiadas, obtidas de betonada diferente, atingiram valores muito superiores, resultando em uma média de 34,75 kN, equivalente a pouco mais que o quádruplo do verificado para a primeira. Além disso, os resultados dos ensaios de flexão nas placas de concreto permeável indicaram uma média de 13,13 kN de carga de ruptura. Os resultados obtidos após os ensaios das três grelhas de concreto convencional do DEP e dos seis protótipos de placas produzidos em concreto permeável pelo corpo técnico do LEME da UFRGS são apresentados, respectivamente, nas Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9: resultados dos ensaios de flexão das três grelhas produzidas em concreto convencional do DEP

Grelha de concreto convencional	F (kN)
Grelha 1	8,4
Grelha 2	36,8
Grelha 3	32,7

Tabela 10: resultados dos ensaios de flexão das seis placas produzidas em concreto permeável da Etapa 2

Placa de concreto permeável	F (kN)
Placa 1	11,5
Placa 2	17,5
Placa 3	15,1
Placa 4	13,0
Placa 5	11,6
Placa 6	10,1

O gráfico da Figura 39 representa os resultados obtidos das cargas de ruptura após esses ensaios de flexão sobre os seis protótipos de concreto permeável produzidos em laboratório. Nela, também, são indicadas as médias das cargas de ruptura dessas amostras fabricados na Etapa 2, ou seja, principal, e da grelha de concreto convencional fornecida pelo DEP na primeira etapa. A partir da análise desses resultados, é possível perceber que todas as placas confeccionadas com concreto permeável romperam à flexão com cargas de ruptura superiores à da grelha de concreto convencional produzida pelo DEP na Etapa 1, sendo que o primeiro e os três últimos protótipos apresentaram valores inferiores à média das cargas de ruptura de 13,13 kN.

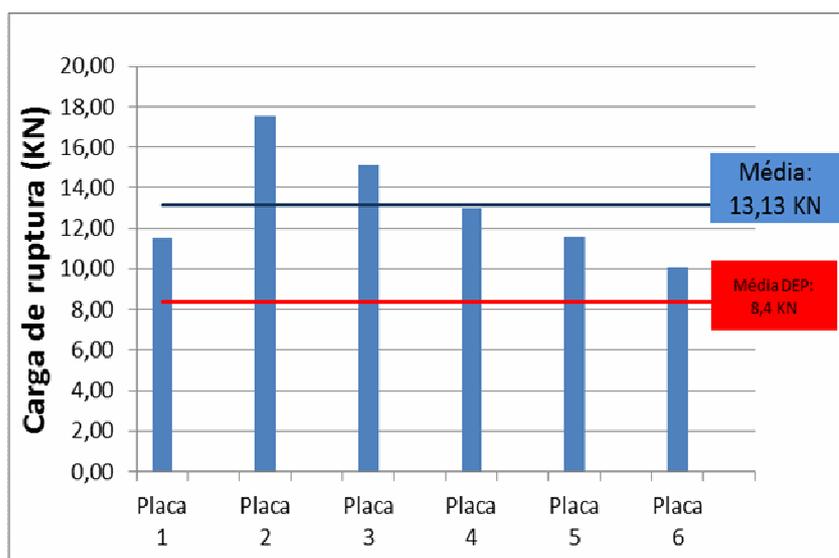


Figura 39: gráfico dos resultados dos ensaios de flexão das seis placas produzidas em concreto permeável da Etapa 2

5.2.3. Ensaio de Taxa de Infiltração de Água

Para a obtenção da taxa de infiltração de água, tomou-se como referência a norma ASTM C1701/C1701M - 09 (ASTM, 2009). A escolha desse método justificou-se por ser um dos únicos descritos em normas para concretos permeáveis, assim como para verificar se a compactação com a utilização do rolo foi realizada uniformemente, além de, principalmente, poderem avaliar-se as condições de uso da placa, que tem o escoamento de água livre em sua superfície inferior, diferente de um pavimento em concreto permeável, que possui a sua face inferior totalmente em contato com o solo, limitando o escoamento da água. Portanto os resultados desse ensaio possibilitam fornecer valores de coeficiente de permeabilidade mais confiáveis para as condições de uso das placas executadas em concreto permeável.

O ensaio foi realizado nas superfícies superiores e inferiores do Lado 1 e Lado 2, ensaiado simultaneamente em duas placas que ficavam apoiadas sobre cavaletes metálicos, conforme ilustrado na Figura 40. Foram instalados, nas superfícies das placas, dois anéis de PVC, nas dimensões de 300 mm de diâmetro e 70 mm de altura, sendo isolados com massa de vidro nas superfícies das placas de concreto permeável. Esse anel possui uma marcação de limite em sua parte inferior, onde devia permanecer uma lâmina de água constante durante o ensaio, cujo procedimento foi explicado no capítulo anterior. Medindo-se o tempo e a massa de água utilizada no ensaio, determina-se a taxa de infiltração de água (I) no concreto permeável, dada pela Equação 2, citada anteriormente.



Figura 40: realização do ensaio de taxa de infiltração de água em placa de concreto permeável da Etapa 2

5.2.4. Resultados dos Ensaios de Taxa de Infiltração de Água

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos com relação aos ensaios de taxa de infiltração de água. Nela estão apresentados os valores de taxa de infiltração de água (I) obtidos nos ensaios das seis placas em concreto permeável, para as superfícies superior (topo) e inferior (fundo) pelos Lado 1 e Lado 2. O gráfico da Figura 41, representado logo abaixo, demonstra esses resultados obtidos para as seis placas, através do qual é possível identificar que os valores decrescentes de taxa de infiltração de água foram verificados, respectivamente, nos Lado 1 Fundo, Lado 2 Fundo, Lado 1 Topo e Lado 2 Topo, nos ensaios de todas, exceto da primeira.

Tabela 11: resultados dos ensaios de taxa de infiltração de água da Etapa 2

Placa	Lado	I (cm/s)
Placa 1	Lado 1 Topo	0,9854697
	Lado 2 Topo	0,9990569
	Lado 1 Fundo	1,2966707
	Lado 2 Fundo	1,2318371
Placa 2	Lado 1 Topo	0,8320413
	Lado 2 Topo	0,7718278
	Lado 1 Fundo	1,2012064
	Lado 2 Fundo	1,1178195
Placa 3	Lado 1 Topo	0,9669051
	Lado 2 Topo	0,8454613
	Lado 1 Fundo	1,5198484
	Lado 2 Fundo	1,4699727
Placa4	Lado 1 Topo	1,1395348
	Lado 2 Topo	1,1306445
	Lado 1 Fundo	1,2367843
	Lado 2 Fundo	1,2082758
Placa 5	Lado 1 Topo	1,0002738
	Lado 2 Topo	0,7883253
	Lado 1 Fundo	1,3738982
	Lado 2 Fundo	1,2531405
Placa 6	Lado 1 Topo	1,2100561
	Lado 2 Topo	1,0805589
	Lado 1 Fundo	1,3566488
	Lado 2 Fundo	1,2544166

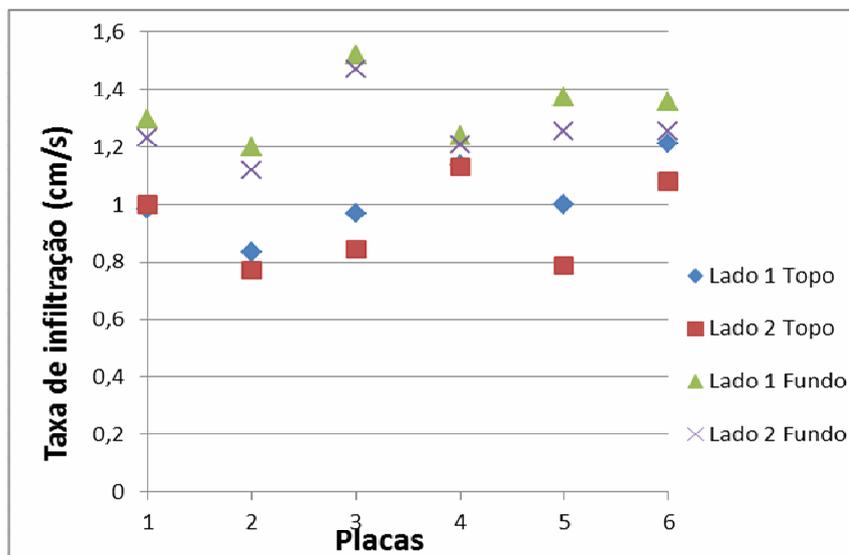


Figura 41: gráfico dos resultados dos ensaios de taxa de infiltração de água da Etapa 2

Buscando verificar a existência de uma diferença significativa entre as médias dos resultados desses ensaios, foi utilizado o teste de análise de variância (em inglês, *Analise of Variance*). Essa escolha foi adotada, pois esse é um teste estatístico amplamente difundido entre os analistas e, também, para poder verificar se os fatores exercem influência em alguma variável dependente, sendo que os fatores propostos podem ser de origem qualitativa ou quantitativa, mas a variável dependente, necessariamente, deve ser contínua. Além disso, existem inúmeros bons *softwares* estatísticos e planilhas eletrônicas com esse recurso disponível, não havendo aprofundamento desta técnica neste trabalho, de modo que se recomenda literatura especializada.

A principal aplicação da *Analise of Variance* (ANOVA) é a comparação de médias oriundas de grupos diferentes, também chamados tratamentos. Como exemplos, podem-se determinar médias históricas de questões de satisfação de empresas que operam simultaneamente com diferentes rendimentos e muitas outras.

Existem dois métodos para calcular-se a variância, que são dentro de grupos (MQG) e a variância das médias (MQR). Em uma ANOVA, calculam-se esses dois componentes de variância. Se a variância calculada usando a média (MQR) for maior do que a calculada usando os dados pertencentes a cada grupo individual (MQG), isso pode indicar que existe uma diferença significativa entre os grupos.

A seguir, para poder aplicar-se o teste de análise de variância ANOVA introduzido anteriormente, os dados dos resultados dos lados das placas de concreto permeável dos ensaios de taxa de infiltração de água são apresentados, na Tabela 12, reorganizados para esse método ser aplicado. Desse modo, nas Tabela 13 e Tabela 14, são apresentados os dados das média, disparidade e variação das taxas de infiltração de água (I), respectivamente, por placas e por pontos.

Tabela 12: dados reorganizados dos resultados dos ensaios de taxa de infiltração de água da Etapa 2

Grupo	I (cm/s)			
	Lado 1 Topo	Lado 2 Topo	Lado 1 Fundo	Lado 2 Fundo
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Placa 1	0,98547	0,999057	1,296671	1,231837
Placa 2	0,832041	0,771828	1,201206	1,11782
Placa 3	0,966905	0,845461	1,519848	1,469973
Placa 4	1,139535	1,130645	1,236784	1,208276
Placa 5	1,000274	0,788325	1,373898	1,253141
Placa 6	1,210056	1,080559	1,356649	1,254417

Tabela 13: dados das média, disparidade e variação por placas das taxas de infiltração de água

Resultado	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4	Placa 5	Placa 6
Média (cm/s)	1,128259	0,980724	1,200547	1,17881	1,103909	1,22542
Disparidade	0,159345	0,210675	0,344102	0,051935	0,261723	0,11443
Varição	0,025391	0,044384	0,118406	0,002697	0,068499	0,013094

Tabela 14: dados das média, disparidade e variação por pontos das taxas de infiltração de água

Resultado	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Média (cm/s)	1,02238	0,935979	1,330843	1,25591
Disparidade	0,134242	0,154737	0,114073	0,116405
Varição	0,018021	0,023944	0,013013	0,01355

Com base na penúltima tabela, geraram-se os resultados das Tabela 15 e Tabela 16, nas quais são apresentados os cálculos *ANOVA* das taxas de infiltração de água por placas, respectivamente, fator único e entre e dentro dos grupos. Analisando-se os dados obtidos na última, verificou-se uma exagerada discrepância entre os valores resultantes de $F = 8,413675$ e Valor-P = 0,0000458, de modo que se pode considerar que a técnica foi coerente, pois, nesse tipo de ensaio, é normal ocorrer essa dispersão de valores.

Tabela 15: cálculos *ANOVA* fator único por placas das taxas de infiltração de água

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Placa 1	6	69,53	11,58833	2,613817
Placa 2	6	111,63	18,605	16,08107
Placa 3	6	87,11	14,51833	21,64582
Placa 4	6	60,86	10,14333	6,482507
Placa 5	6	74,26	12,37667	2,351427
Placa 6	6	55,65	9,275	0,25963

Tabela 16: cálculos *ANOVA* entre e dentro dos grupos por placas das taxas de infiltração de água

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre os grupos	346,6032	5	69,32064	8,413675	0,0000458	2,533555
Dentro dos grupos	247,1713	30	8,239044	-	-	-
Total	593,7746	35	-	-	-	-

Com base na antepenúltima tabela apresentada logo acima, geraram-se os resultados estatísticos contidos nas Tabela 17 e Tabela 18, nas quais são apresentados os cálculos *ANOVA* das taxas de infiltração de água por pontos, respectivamente, fator único e entre e dentro dos grupos. Analisando-se os dados obtidos na última, verificou-se uma média discrepância entre os valores resultantes de $F = 12,28823$ e Valor-P = 8,84, de modo que se pode considerar que a técnica foi coerente e que esses valores não invalidam os resultados do trabalho.

Tabela 17: cálculos ANOVA fator único por pontos das taxas de infiltração de água

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ponto 1	6	6,134281	1,02238	0,018021
Ponto 2	6	5,615875	0,935979	0,023944
Ponto 3	6	7,985057	1,330843	0,013013
Ponto 4	6	7,535462	1,25591	0,01355

Tabela 18: cálculos ANOVA entre e dentro dos grupos por pontos das taxas de infiltração de água

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre os grupos	0,631558	3	0,210519	12,28823	8,84	3,098391
Dentro dos grupos	0,342636	20	0,017132	-	-	-
Total	0,974194	23	-	-	-	-

5.2.5. Ensaio de Permeabilidade

Para a realização do ensaio de permeabilidade, utilizou-se o método de Hóltz (2011), sendo que ele baseou-se na proposta de Neithalath (2003), a qual adaptou para a sua pesquisa, o qual se baseia em um conceito equivalente ao do permeâmetro de carga variável. Nele se coloca uma amostra de concreto permeável dentro de um tubo cilíndrico de acrílico transparente graduado, para poder acompanhar visualmente o fluxo de água, com diâmetro levemente superior ao do corpo de prova, garantindo-se um encaixe quase perfeito. Um segundo tubo de PVC é usado para formar um reservatório sob a amostra, de forma que o contato das paredes desse elemento inferior com ela seja selado de modo que se possa garantir que só haverá fluxo pela mesma. Para garantir essa selagem, ela é envolta em uma membrana látex impermeável, de sorte que o fluxo lateral é totalmente impedido, e a água percola apenas por ela. Finalizando-se o dispositivo de ensaio, na sua parte inferior é acoplado um terceiro tubo de PVC, ao qual se conecta um duto horizontal de PVC de 50 mm de diâmetro, com uma válvula, que, por sua vez, se conecta a um tubo vertical de PVC de 32 mm de diâmetro com altura ajustada para que se possa registrar o tempo de fim de ensaio, pois, quando é aberta, a água do reservatório começa a escoar através do concreto permeável, já saturado, até que todo o excesso seja drenado pelo tubo vertical, equalizando a altura da água exatamente 1 mm acima do topo do corpo de prova, conforme esquema da Figura 42 abaixo.

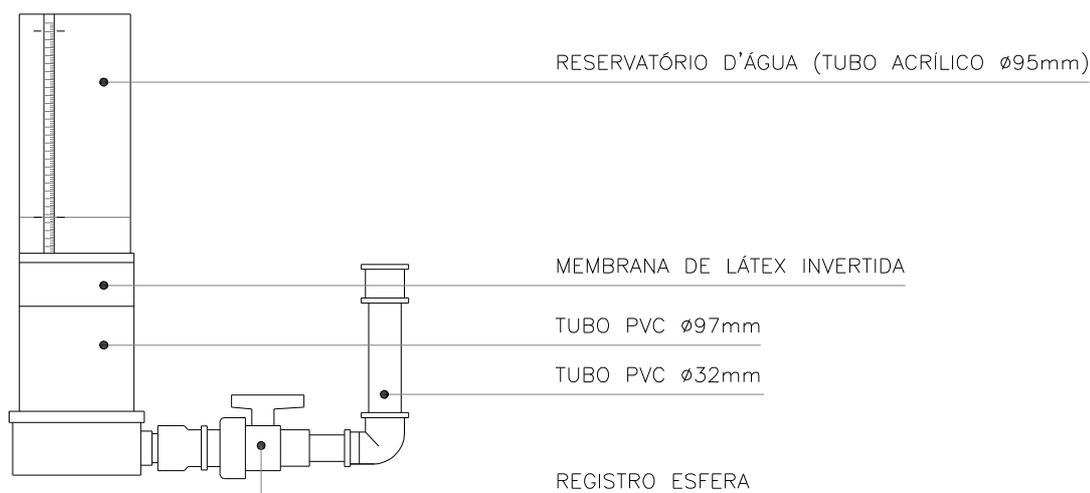


Figura 42: esquema do equipamento para ensaio de permeabilidade

Inicialmente, faz-se o encamisamento do corpo de prova com a membrana látex sobre a sua superfície lateral. Depois coloca-se o conjunto dentro do tubo intermediário de PVC de 97 mm de diâmetro, já conectado com o restante equipamento a jusante. Em seguida, inicia-se o ensaio, adicionando-se água até saturar a amostra e eliminar todo o ar que tenha permanecido dentro do conjunto. Posteriormente, encaixa-se o tubo cilíndrico de acrílico transparente graduado sobre o conjunto e adiciona-se a lâmina d'água prevista para o ensaio.

Durante o ensaio, deve ser controlado o tempo (t) despendido pela lâmina d'água para percolar pelo sistema, entre os pontos 290 mm (h_1) e 70 mm (h_2) do tubo de acrílico. Esse procedimento deve ser repetido três vezes para cada amostra, sendo o tempo médio usado como valor de “ t ” para o cálculo do coeficiente de permeabilidade (K), determinado a partir da Lei de Darcy, conforme Equação 3:

$$K = (A_1 \times l / (A_2 \times t)) \times \log(h_2/h_1) \quad (3)$$

Onde:

- a) “ K ” é o coeficiente de permeabilidade, em “cm/s”;
- b) “ A_1 ” é , no valor de;
- c) “ l ” é , igual a;
- d) “ A_2 ” é , no valor de;

- e) “t” é o tempo despendido pela lâmina d’água, em “s”;
- f) “h₂” é a altura da lâmina d’água final do ensaio, no valor de 70 mm;
- g) “h₁” é a altura da lâmina d’água inicial do ensaio, no valor de 290 mm.

Höltz (2011) seguiu os princípios genéricos descritos acima por Neithalath et al.(2003) para a execução do ensaio de permeabilidade. Para isso, entretanto, o equipamento foi montado de maneira diferente, conforme ilustrado na Figura 43, sendo dividido em três partes:



Figura 43: equipamento utilizado para ensaio de permeabilidade (baseado em NEITHALATH et al., 2003)

- a) como corpo principal, ou seja, no setor onde era inserida a amostra, utilizou-se um tubo de PVC rígido, com 97 mm de diâmetro interno e comprimento de 200 mm, com uma tampa na parte inferior, a qual vedava a saída de água por baixo e já servia para apoio do corpo de prova, garantindo seu posicionamento;
- b) como reservatório de água, recipiente o qual contém a coluna de água que gera a carga hidráulica que estimula o fluxo através da amostra, usou-se um tubo cilíndrico de acrílico transparente, graduado em “mm”, com diâmetro interno de 95 mm e 300 mm de comprimento, acoplado ao corpo principal do equipamento com um flange;

- c) como regulador da saída de água do reservatório principal, foi utilizado um cano de PVC com diâmetro interno de 32 mm e registro de esfera, com uma extensão vertical com altura suficiente para estabilizar a coluna de água em um nível de 10 mm acima do topo do corpo de prova.

Após a descrição das três partes do equipamento, registram-se os passos para o ensaio de cada corpo de prova extraído das seis placas de concreto permeável. Dessa forma, esses são os seguintes:

- a) corpo de prova é encamisado com uma membrana látex tipo tubo com dimensões de 80 mm de largura e 245 mm de comprimento, conforme ilustrado na Figura 44;



Figura 44: corpo de prova encamisado com uma membrana látex

- b) introdução do corpo de prova encamisado no corpo principal do equipamento, sendo que a parte restante da membrana látex foi invertida pela parte externa do tubo de PVC, conforme ilustrado na Figura 45;



Figura 45: introdução do corpo de prova encamisado no equipamento com inversão da membrana látex pela parte externa do tubo de PVC

- c) acoplamento do reservatório de água cilíndrico de acrílico transparente graduado sobre o corpo principal do equipamento;
- d) com o registro aberto no dreno, é despejada água até a saída do “ladrão”, conforme ilustrado na Figura 46;



Figura 46: abertura do registro

- e) com o registro fechado, o reservatório é preenchido com água por uma mangueira até a sua superfície para o início do ensaio, conforme ilustrado na Figura 47;



Figura 47: reservatório preenchido com água até a superfície

- f) após três minutos, tempo estimado para que ocorresse a saturação da amostra de concreto permeável, se necessário, completa-se o nível do reservatório de água até a superfície;
- g) abertura do registro, seguida do disparo do cronômetro quando o nível superior, de 290 mm, indicado com um traço azul no topo do tubo do reservatório, fosse atingido;
- h) pausa do cronômetro ao ser atingido o nível inferior, de 70 mm, indicado com um traço azul na base do tubo do reservatório, seguida da sua leitura e registro do tempo em uma tabela;
- i) repetição de todo esse procedimento mais duas vezes sem a retirada da amostra do equipamento, ou seja, a partir do antepenúltimo passo descrito acima, obtendo-se mais dois registros de tempo, os quais, somados ao primeiro e divididos por três, resultam na média a ser utilizada para o cálculo do coeficiente de permeabilidade “K”, segundo a Equação 3 indicada neste mesmo item acima.

5.2.6. Resultados dos Ensaios de Permeabilidade

Os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade dos seis corpos de prova extraídos de cada um dos seis protótipos das placas de concreto permeável de traço 1:4 encontram-se na Tabela 19. Nela estão indicados os coeficientes de permeabilidade no topo (p_t) e no fundo (p_f) de cada corpo de prova. Verificou-se que os resultados desse ensaios de permeabilidade foram valores bastante altos, sendo a maioria deles superior a 0,2 cm/s, embora tenha ocorrido uma variabilidade bastante elevada entre corpos de prova de mesma origem, ou melhor, da mesma placa, evidenciando que a distribuição de poros ao longo desse material pode variar bastante.

Tabela 19: resultados dos ensaios de permeabilidade por amostra de cada placa da Etapa 2 (continua)

Placa	Identificação	p_t (cm/s)	p_f (cm/s)
Placa 1	Amostra A	0,2566901	0,229365
	Amostra B	0,218917	0,2011288
	Amostra C	0,2119339	0,2191536
	Amostra D	0,2235189	0,2450511
	Amostra E	0,2513196	0,2512337
	Amostra F	0,2086179	0,2570548
Placa 2	Amostra A	0,2465409	0,2292398
	Amostra B	0,2107527	0,1763118
	Amostra C	0,1099065	0,1156342
	Amostra D	0,2210526	0,2395112
	Amostra E	0,1909091	0,1940594
	Amostra F	0,2385396	0,1699422
Placa 3	Amostra A	0,1918434	0,2096257
	Amostra B	0,2041667	0,1918434
	Amostra C	0,240216	0,2734884
	Amostra D	0,2715935	0,3086614
	Amostra E	0,2826923	0,306250
	Amostra F	0,2578947	0,2666667
Placa 4	Amostra A	0,2741259	0,2882353
	Amostra B	0,2636771	0,2214689
	Amostra C	0,2715935	0,2573304
	Amostra D	0,2270273	0,2380567
	Amostra E	0,2780142	0,2404908
	Amostra F	0,1298013	0,1232704

Tabela 19: resultados dos ensaios de permeabilidade por amostra de cada placa da Etapa 2 (conclusão)

Placa	Identificação	p_t (cm/s)	p_f (cm/s)
Placa 5	Amostra A	0,2031088	0,1737075
	Amostra B	0,2868293	0,2760563
	Amostra C	0,2328713	0,2868293
	Amostra D	0,1613169	0,1677603
	Amostra E	0,2370968	0,2055944
	Amostra F	0,2385396	0,2648649
Placa 6	Amostra A	0,2709677	0,2439834
	Amostra B	0,2003407	0,2925373
	Amostra C	0,2103698	0,2126582
	Amostra D	0,2562092	0,2550976
	Amostra E	0,2450258	0,2352012
	Amostra F	0,2760563	0,2470588

Para melhor visualizarem-se esses dados, geraram-se os gráficos das Figura 48 e Figura 49 dos resultados dos ensaios de permeabilidade. Desse modo, o primeiro indica as médias dos resultados dos coeficientes de permeabilidade no topo e no fundo de cada a partir dos valores calculados para cada uma das seis amostras por placa, e o segundo, os tempos dos ensaios de permeabilidade por amostra de cada placa.

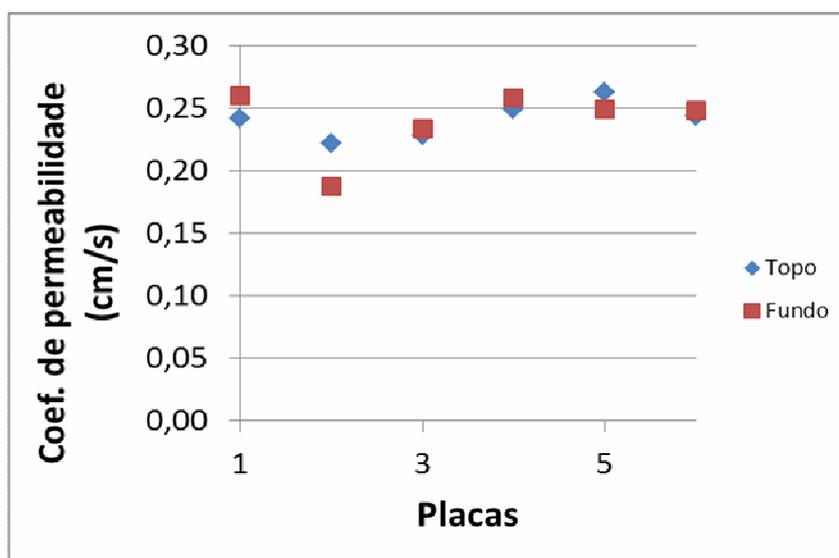


Figura 48: gráfico das médias dos resultados dos coeficientes de permeabilidade no topo e no fundo de cada placa

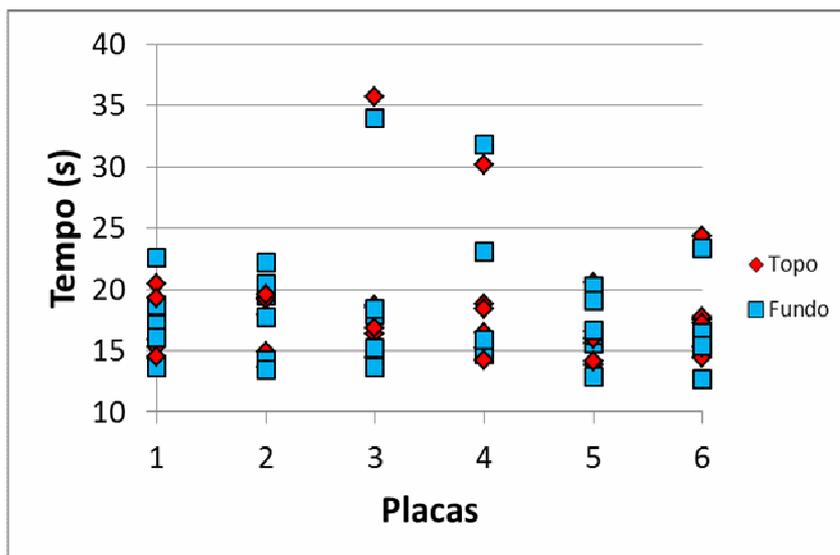


Figura 49: gráfico dos resultados dos tempos dos ensaios de permeabilidade por amostra de cada placa

Para permitir uma eventual análise da relação entre permeabilidade e a quantidade de vazios das placas de concreto permeável, efetuou-se, antes da realização dos ensaios de permeabilidade e após os ensaios de taxa de infiltração de água, a pesagem dos corpos de prova ilustrados na Figura 50. As medidas foram realizadas das amostras secas, de modo a determinar-se a massa representativa de cada espécime, cujos resultados e suas comparações estão apresentadas no item 5.3.1.



Figura 50: corpos de prova extraídos das placas de concreto permeável

5.2.7. Ensaio de Resistência à Compressão Axial

Para verificar a resistência mecânica dos corpos de prova extraídos dos protótipos de concreto permeável, foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, técnica tradicional empregada no controle tecnológico do concreto. Esses foram extraídos, quando já haviam sido rompidas as placas nos ensaios de flexão, para serem utilizados nos de permeabilidade e, posterior à secagem em estufa, ser realizada a sua pesagem a fim de compararem-se as massas obtidas, possibilitando a realização dos ensaios de resistência à compressão axial. Desse modo, a posição dos seis corpos de prova extraídos de cada uma das seis placas e o aparato montado para as extrações podem ser observados, respectivamente, nas Figura 51 e Figura 52.

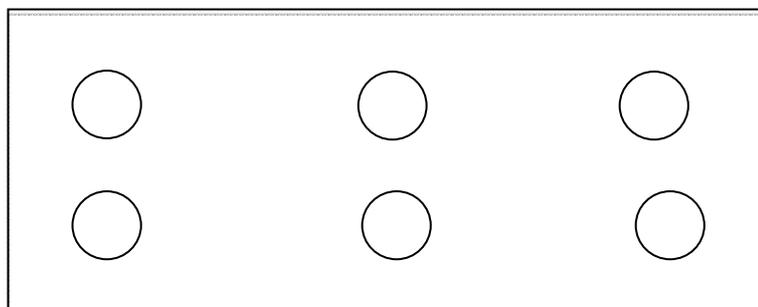


Figura 51: posição da extração dos corpos de prova nas placas de concreto permeável para ensaio de resistência à compressão axial



Figura 52: aparato para extração dos corpos de prova das placas de concreto permeável

Para a realização das extrações desses corpos de prova, utilizou-se a NBR 5739:1994 (ABNT, 1994). Seus ensaios de resistência à compressão axial, conforme ilustrado na Figura 53, foram realizados no LEME da UFRGS, através da mesma prensa citada anteriormente.



Figura 53: ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova das placas de concreto permeável

5.2.8. Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão Axial

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial (f_{cp}) dos corpos de prova das placas em concretos permeáveis mostraram-se favoráveis e são demonstrados na Tabela 20. Os gráficos das Figura 54 e Figura 55 representam esses dados, respectivamente, por amostra de cada placa e da média das amostras de cada placa.

Tabela 20: resultados dos ensaios de resistência à compressão axial por amostra de cada placa da Etapa 2 (continua)

Placa	Identificação	f_{cp} (MPa)
Placa 1	Amostra A	9,28
	Amostra B	12,73
	Amostra C	13,70
	Amostra D	10,39
	Amostra E	12,22
	Amostra F	11,21

Tabela 20: resultados dos ensaios de resistência à compressão axial por amostra de cada placa da Etapa 2 (conclusão)

Placa	Identificação	f_{cp} (MPa)
Placa 2	Amostra A	14,58
	Amostra B	22,16
	Amostra C	19,81
	Amostra D	12,69
	Amostra E	22,12
	Amostra F	20,27
Placa 3	Amostra A	18,86
	Amostra B	19,51
	Amostra C	11,02
	Amostra D	17,79
	Amostra E	10,13
	Amostra F	9,80
Placa 4	Amostra A	7,88
	Amostra B	11,52
	Amostra C	9,09
	Amostra D	9,83
	Amostra E	7,98
	Amostra F	14,56
Placa 5	Amostra A	15,01
	Amostra B	10,38
	Amostra C	11,55
	Amostra D	12,45
	Amostra E	12,70
	Amostra F	12,17
Placa 6	Amostra A	9,67
	Amostra B	8,77
	Amostra C	9,50
	Amostra D	9,24
	Amostra E	8,59
	Amostra F	9,88

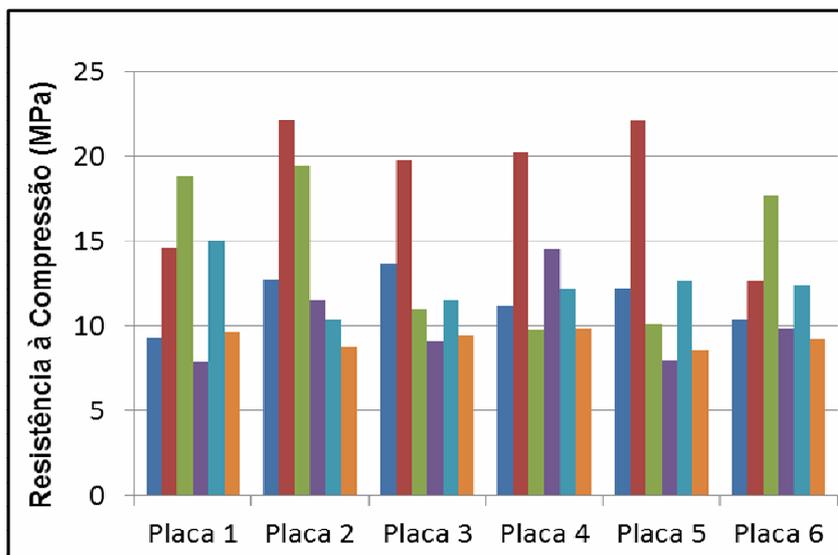


Figura 54: gráfico dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial por amostra de cada placa

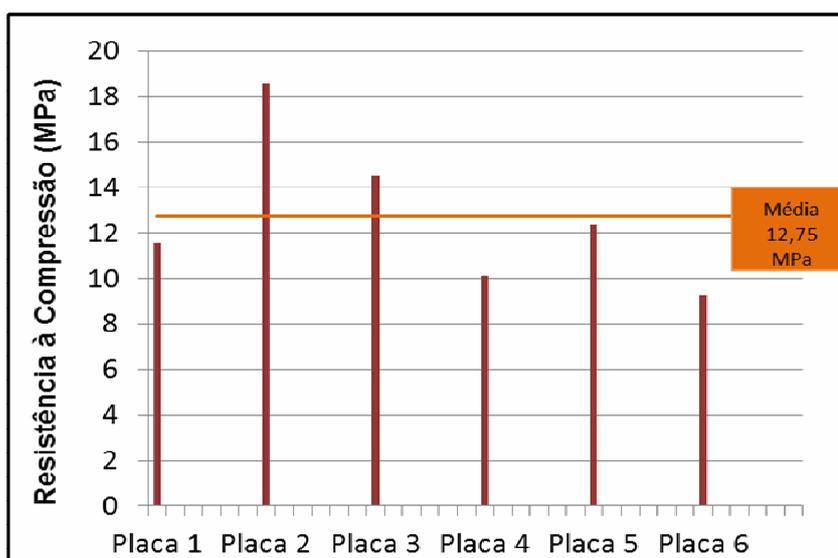


Figura 55: gráfico da média dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial das amostras de cada placa

Buscando verificar-se a existência de uma diferença significativa entre as médias dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, foi utilizado o teste *Análise of Variance (ANOVA)*. A seguir, para poder aplicar-se o teste de análise de variância ANOVA introduzido anteriormente, os dados dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial por amostra de cada placa são apresentados, na Tabela 21, reorganizados para esse método ser aplicado. Desse modo, nas Tabela 22 e Tabela 23, são apresentados os dados da média, dispersão e variação das resistências à compressão axial (f_{cp}), respectivamente, por placas e por pontos.

Tabela 21: dados reorganizados dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial por amostra de cada placa da Etapa 2

Grupo	fcp (MPa)					
	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Amostra D	Amostra E	Amostra F
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Placa 1	9,28	12,73	13,7	10,39	12,22	11,21
Placa 2	14,58	22,16	19,81	12,69	22,12	20,27
Placa 3	18,86	19,51	11,02	17,79	10,13	9,8
Placa 4	7,88	11,52	9,09	9,83	7,98	14,56
Placa 5	15,01	10,38	11,55	12,45	12,7	12,17
Placa 6	9,67	8,77	9,5	9,24	8,59	9,88

Tabela 22: dados das média, disparidade e variação por placas das resistências à compressão axiais

Resultado	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4	Placa 5	Placa 6
Média (MPa)	12,546	14,178	12,445	12,065	12,293	12,981
Disparidade	4,261	5,384	3,964	3,133	5,171	3,978
Variação	18,156	28,995	15,715	9,819	26,746	15,830

Tabela 23: dados das média, disparidade e variação por pontos das resistências à compressão axiais

Resultado	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6
Média (MPa)	11,58833	18,605	14,51833	10,14333	12,37667	9,275
Disparidade	1,61673	4,010121	4,652506	2,546077	1,533436	0,509539
Variação	2,613817	16,08107	21,64582	6,482507	2,351427	0,51926

Com base na penúltima tabela, geraram-se os resultados das Tabela 24 e Tabela 25, nas quais são apresentados os cálculos *ANOVA* das resistências à compressão axiais por placas, respectivamente, fator único e entre e dentro dos grupos. Analisando-se os dados obtidos na última, verificou-se uma baixa discrepância entre os valores resultantes de $F = 0,690478$ e $\text{Valor-P} = 0,637074$, de modo que se pode considerar que a técnica foi coerente, demonstrando que não há uma variação significativa na análise de várias médias de comparação das placas.

Tabela 24: cálculos ANOVA fator único por placas das resistências à compressão axiais

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Placa 1	4	4,513034	1,128259	0,025391
Placa 2	4	3,922895	0,980724	0,044384
Placa 3	4	4,802188	1,200547	0,118406
Placa 4	4	4,715239	1,17881	0,002697
Placa 5	4	4,415638	1,103909	0,068499
Placa 6	4	4,90168	1,22542	0,013094

Tabela 25: cálculos ANOVA entre e dentro dos grupos por placas das resistências à compressão axiais

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre os grupos	0,15678	5	0,031356	0,690478	0,637074	2,772853
Dentro dos	0,817415	18	0,045412	-	-	-
Total	0,974194	23	-	-	-	-

Com base na antepenúltima tabela apresentada logo acima, geraram-se os resultados estatísticos contidos nas Tabela 26 e Tabela 27, nas quais são apresentados os cálculos ANOVA das resistências à compressão axiais por pontos, respectivamente, fator único e entre e dentro dos grupos. Analisando-se os dados obtidos na última, verificou-se uma alta discrepância entre os valores resultantes de $F = 0,181711$ e $\text{Valor-P} = 0,967343$, de modo que se pode considerar que a técnica foi coerente, pois, nesse tipo de ensaio, é normal ocorrer essa dispersão de valores.

Tabela 26: cálculos ANOVA fator único por pontos das resistências à compressão axiais

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Ponto 1	6	75,28	12,54667	18,15695
Ponto 2	6	85,07	14,17833	28,9951
Ponto 3	6	74,67	12,445	15,71579
Ponto 4	6	72,39	12,065	9,81919
Ponto 5	6	73,74	12,29	26,74672
Ponto 6	6	77,89	12,98167	15,83038

Tabela 27: cálculos ANOVA entre e dentro dos grupos por pontos das resistências à compressão axiais

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre os grupos	17,45396	5	3,490791	0,181711	0,967343	2,533555
Dentro dos grupos	576,3206	30	19,21069	-	-	-
Total	593,7746	35	-	-	-	-

5.3. COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DA ETAPA DE ESTUDOS PRINCIPAIS

Neste item, são apresentadas as médias dos resultados obtidos da medição das massas e das principais propriedades analisadas provenientes, principalmente, dos ensaios de resistência à compressão axial e dos de permeabilidade, apresentados anteriormente, dos seis corpos de prova de cada uma dos seis protótipos de concreto permeável analisados nesta etapa principal da dissertação. Também é feita uma comparação dos custos totais dos materiais para fabricação da grelha de concreto convencional, fornecida pelo Departamento de Esgotos Pluviais (DEP), e das placas de concreto permeável produzidas no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

5.3.1 Massa e Principais Propriedades

Com o intuito de compararem-se os valores médios obtidos das massas (m_m), das médias das resistências à compressão axiais (f_{cpm}) e das médias dos coeficientes de permeabilidade superior (p_{tm}) e inferior (p_{fm}) dos corpos de prova dos protótipos de concreto permeável desta Etapa 2, foi elaborada a Tabela 28 de síntese desses resultados. Também gerou-se o gráfico da Figura 56 desses quatro valores médios referentes aos seis corpos de prova extraídos de cada uma das seis placas fabricadas em concreto permeável. Analisando-se esses resultados, pôde constatar-se que a Placa 2 apresentou os maiores valores das massa e resistências à compressão axial médias, porém indicou os menores coeficientes de permeabilidade superior e inferior, comprovando-se o que já era esperado, de que, quanto maiores as resistências à compressão axiais, menores as porosidades dos concretos e, conseqüentemente, menores os coeficientes de permeabilidade. Corroborando com isso, mas com resultados opostos, a Placa 5 apresentou os melhores resultados, ou seja, as menores massas e resistências à compressão axial médias, o maior coeficiente de permeabilidade superior e o terceiro maior inferior.

Tabela 28: síntese dos resultados dos valores médios da Etapa 2

Placa	m_m (g)	f_{cpm} (MPa)	p_{tm} (cm/s)	p_{fm} (cm/s)
Placa 1	942,60	18,72	0,241365	0,259423
Placa 2	972,33	21,09	0,221559	0,187450
Placa 3	959,38	10,04	0,228500	0,233831
Placa 4	943,78	11,70	0,248834	0,258336
Placa 5	937,10	9,26	0,262888	0,249116
Placa 6	940,10	9,28	0,243096	0,247756

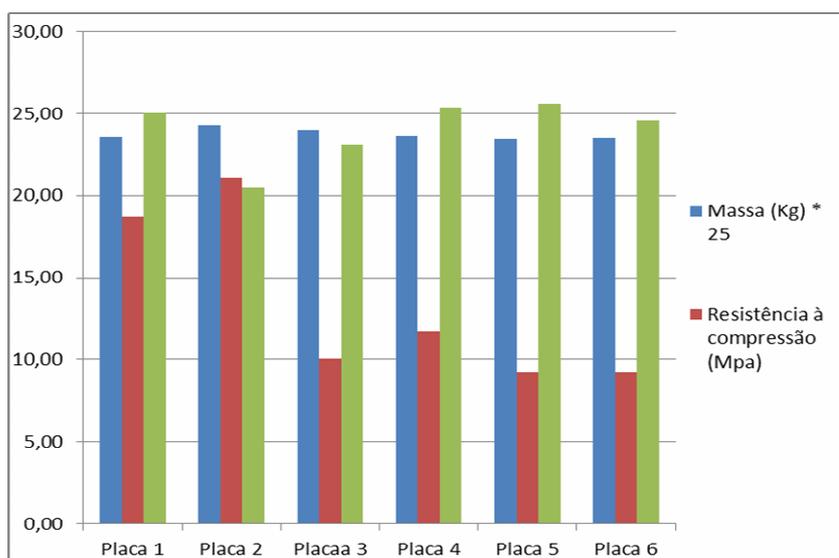


Figura 56: gráfico da síntese dos resultados dos valores médios da Etapa 2

5.3.2. Custos

Com o objetivo de realizar-se uma comparação da competitividade dos elementos de drenagem fabricados com os dois tipos de concreto, ou seja, permeável e convencional, buscou fazer-se uma análise simplificada de custos de cada um deles. Quanto à comparação visual entre elementos produzidos com esses dois materiais, a Figura 57 evidencia, através de uma vista superior das placa de concreto permeável e grelha em concreto convencional do DEP, a principal diferença entre eles, que é a maior porosidade e, conseqüentemente, permeabilidade do primeiro



Figura 57: vista superior de elementos em concretos permeável, acima à esquerda, e convencional, abaixo à esquerda e à direita

A Tabela 29 apresenta a comparação entre os custos dos materiais constituintes dos concretos convencional, utilizado nas grelhas do DEP de traço 1:2:3, e permeável, nas placas produzidas nesta pesquisa de traço 1:4. O cálculo dos custos de fabricação em “R\$/m³” dos concretos convencional e permeável considerou os consumos de cimento, respectivamente, teórico e real. Para visualizar-se a diferença entre os custos totais para fabricação de um elemento de cada tipo de concreto, preparou-se o gráfico apresentado na Figura 58. Esses resultados indicaram que o custo total de produção do concreto permeável é aproximadamente 8 % menor que o do convencional, reforçando, ainda mais, as vantagens relacionadas ao uso de concreto permeável em placas substitutivas das grelhas de concreto convencional, normalmente utilizadas pelo DEP.

Tabela 29: comparação de custos dos materiais para fabricação da grelha de concreto convencional e da placa de concreto permeável

Elemento	Custo (R\$/m ³)					
	Traço (1:m)	Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1	Total
Grelha de concreto convencional	1:5	210,87	33,74	-	43,59	288,20
Placa de concreto permeável	1:4	214,29	-	50,62	-	264,91

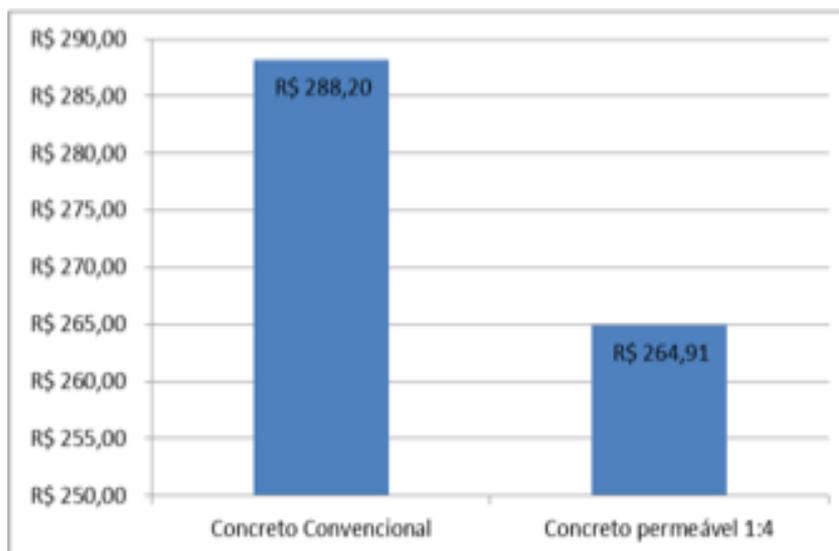


Figura 58: gráfico da comparação de custos totais para fabricação da grelha de concreto convencional e da placa de concreto permeável

5.4. ANÁLISE DA PERMEABILIDADE E POSSIBILIDADE DE COLMATAÇÃO

Um dos aspectos fundamentais para a análise do desempenho a longo prazo dos elementos drenantes de concreto permeável refere-se à possibilidade de colmatação dos poros, devido ao acúmulo de material nos mesmos. Para avaliar esse comportamento, desenvolveram-se dois dispositivos experimentais para simulação de longos períodos de infiltração de água carreando sedimentos.

Buscou-se, através da construção desses dois equipamentos, que eles pudessem, além de atuarem como expositores, demonstrando as características do concreto permeável, avaliar, para efeito de comparação, a intensidade de colmatação dos poros, assim como o tempo de vida útil de passagem de água dos protótipos de placas confeccionadas em concretos permeáveis. A Figura 59 representa os Dispositivo 1, para ensaio com água limpa, e Dispositivo 2, para ensaio com água suja, já concluídos com auxílio da equipe técnica do LEME, cujas etapas referentes às suas montagem e realização dos ensaios são descritas a seguir.



Figura 59: Dispositivo 1 (água limpa), à esquerda, e Dispositivo 2 (água suja), à direita

5.4.1. Montagem dos Dispositivos de Ensaio

Os dois dispositivos possuem forma de prisma de base retangular, tendo como medidas 1000 mm de largura, 400 mm de profundidade e 1.400 mm de altura, sendo concebidos para que se pudesse encaixar uma grelha padrão do DEP ou a placa de concreto permeável com dimensões semelhantes, e gerar um fluxo de água pelos elementos durante o teste. Desse modo, o esquema para a confecção do Dispositivo 1 pode ser visualizado na Figura 60.

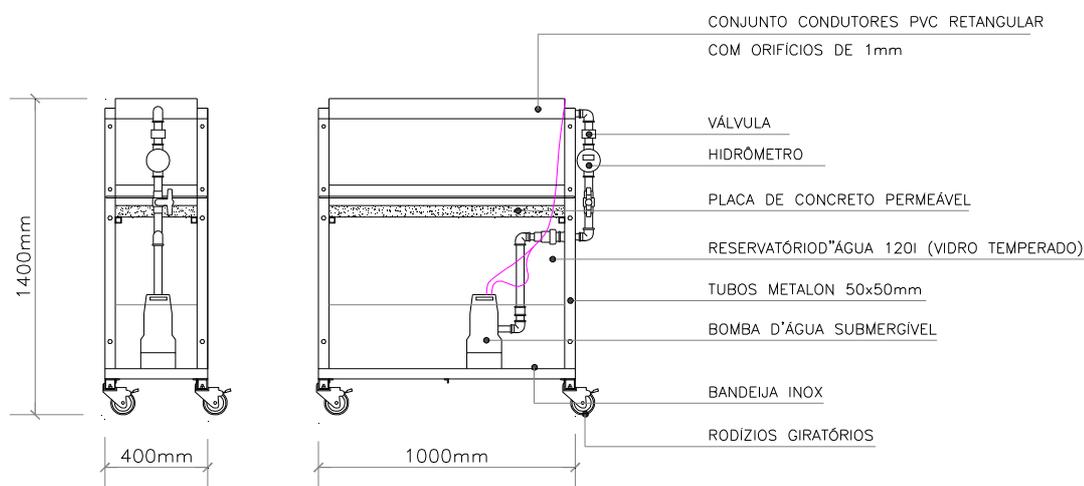


Figura 60: esquema para a confecção do Dispositivo 1

Para a montagem da estrutura de apoio, foram utilizados tubos de metalon com seção transversal de 50 mm x 50 mm, com 3 mm de espessura, os quais receberam acabamento em tinta esmalte sintético amarela, entre os quais foram fixadas quatro placas de vidro temperado. Nos quatro pés de apoio desse equipamento, foram utilizados rodízios giratórios, reforçados e com trava, com capacidade para 350 kg.

Na parte superior da estrutura, a 1.400 mm do piso e 330 mm dos elementos em teste, foi instalado um conjunto de descarga de água formado por cinco condutores retangulares de PVC tipo calha, com seção transversal de 100 mm x 70 mm e 1.000 mm de comprimento, conectados lado a lado e aderidos com solução adesiva e ligados ao hidrômetro e à válvula, segundo a Figura 61. Já na Figura 62, pode ser observada a ligação entre os condutores que possibilitava a distribuição da água em todo o interior do conjunto de descarga.



Figura 61: conjunto de condutores ligados ao hidrômetro e à válvula



Figura 62: ligação entre os condutores para possibilitar a distribuição da água

Foi realizada uma furação no conjunto de condutores, conforme ilustrado na Figura 63, onde foi realizado um total de 2.813 furos com diâmetro de 0,1 mm cada alinhados e espaçados por, aproximadamente, 20 mm. Esses pequeninos furos possibilitaram o fácil controle do volume e da uniformidade da água a sair pelas tubulações, simulando a chuva natural.



Figura 63: conjunto de condutores com furação dos orifícios para simulação de chuva natural

Com o auxílio de uma empilhadeira, a placa de concreto permeável era movimentada para ser instalada no equipamento sobre perfis metálicos, localizados na parte superior do reservatório de vidro. Assim, esse procedimento pode ser observado na Figura 64.



Figura 64: instalação da placa de concreto permeável no Dispositivo 1

5.4.2. Ensaio de Permeabilidade em Placa no Dispositivo 1

O Dispositivo 1 confeccionado para a realização do ensaio de permeabilidade em placa, foi fabricado visando simular o efeito da chuva sobre o protótipo de concreto permeável. Para que isso ocorresse, houve uma preocupação em modelar o fluxo de água ingressante buscando simular a precipitação natural que ocorreria ao longo de toda a placa, visto que, nesse ensaio, se utilizou água limpa, ou seja, sem sedimentos, de modo que foi possível empregar uma estrutura de distribuição com pequenos orifícios para que a água ingressante aproximasse-se de gotas de chuva.

O ingresso de água no sistema foi realizado com auxílio de uma mangueira de borracha laranja com uma das extremidades conectada na tubulação desse dispositivo e a outra diretamente em uma torneira. Assim, para cada ensaio, o Dispositivo 1 foi abastecido com 120 l de água.

O ensaio transcorreu em ciclo fechado, conforme ilustrado na Figura 65, através da utilização de uma bomba d'água submersa, com potência de 1 cv, ou seja, 736 W, e tensão de 220 V, instalada na parte inferior do dispositivo e apoiada em uma bandeja de aço inoxidável. À medida que a válvula era aberta, a água era bombeada para a área superior do dispositivo, levando o volume para o conjunto de condutores a uma vazão máxima de 1,5 m³/h limitada por um hidrômetro, que, através da passagem dela pelos furos, simulavam a água da chuva de uma precipitação em uma determinada área, percolando através da placa de concreto permeável e, finalmente, retornando ao reservatório inferior.



Figura 65: ensaio de permeabilidade em placa no Dispositivo 1

Cabe destacar que, através do hidrômetro instalado, como se pode observar na Figura 66, a vazão nominal da bomba submersa medida, após passar pelo circuito montado para a realização desse ensaio, foi de, aproximadamente, 9.000 l/h, sendo cerca de 30 % inferior à informada pelo fabricante, de 13.000 l/h. Para verificar a quantidade de volume de água que percolava na grelha de concreto permeável, foi realizada a medição da vazão, cuja leitura verificada com o registro aberto em sua capacidade mínima foi de 1 l/0,0037 s, enquanto que, com o registro totalmente aberto, teve uma percolação de 1,3 l/s.



Figura 66: hidrômetro utilizado para medição da vazão de água do Dispositivo 1

5.4.3. Ensaio de Colmatação em Placa no Dispositivo 2

A colmatação de uma estrutura, segundo considerações de Baptista e Nascimento (2005), possui, como causa básica, a deposição de material particulado de finos no interior da estrutura preenchendo os vazios do meio poroso, ou seja, do concreto permeável. As partículas maiores ficam retidas nas camadas superiores do material ao passo que as menores vão sendo carreadas para as partes mais profundas. De maneira geral, esse é o fenômeno que faz o meio poroso perder, ao longo do tempo, sua capacidade de condutividade hidráulica de maneira lenta e progressiva. Também pode ser associado ao processo de colmatação o desenvolvimento de algas, de plânctons, de fito-plânctons e de diversas bactérias, as quais podem, associadas ou não, contribuir para a diminuição da capacidade de infiltração da estrutura.

Esse fenômeno da colmatação contribui para a retenção de poluentes, uma vez que o meio poroso, quando passa a ter seus vazios preenchidos, torna a filtração mecânica mais eficaz. A superfície e o tempo de contato aumentam, e a retenção físico-química é então favorecida. Em longo prazo, a infiltração de águas pluviais na estrutura pode tornar-se nula, visto que o sistema perde sua função drenante e passa a comportar-se como estrutura impermeável ou de retenção sem exutório. Portanto a colmatação está diretamente ligada à vida útil do pavimento ou do meio poroso.

Para a realização do ensaio de colmatção em placa, em um protótipo de concreto permeável diferente, foi confeccionado o Dispositivo 2 para funcionar com água suja. Entretanto foi necessário alterar a forma de ingresso da água nesse, em relação à do Dispositivo 1, para possibilitar a passagem das partículas de resíduos sólidos evitando que os orifícios de simulação de gotas de chuva fossem bloqueados pela presença desses finos carregados pela água. Para isso ser possível, foram acrescentados mais alguns furos na canaleta de descarga central de condutores, sendo que esses possuíam 0,3 mm de diâmetro, de modo que o esquema para a confecção deste Dispositivo 2 pode ser visualizado na Figura 67.

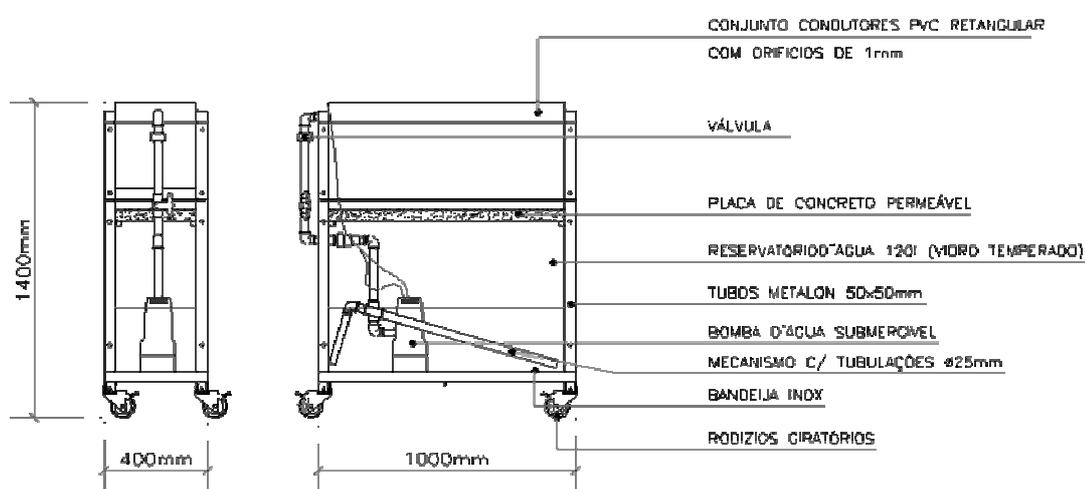


Figura 67: esquema para a confecção do Dispositivo 2

Buscando preservar o equipamento de medição, assim como propiciar o aumento da vazão de água, foi retirado o hidrômetro do sistema, que teve como propósito avaliar a colmatção da placa de concreto permeável. Foram adicionadas, no interior desse dispositivo, partículas de resíduos sólidos coletadas dos solos de vários locais do Campus do Vale da UFRGS. As amostras de material usadas para gerar os sólidos em suspensão possuíam granulometria comum em escoamentos superficiais e passaram pelo processo de peneira com uma malha de 0,6 mm, conforme ilustrado na Figura 68.



Figura 68: partículas de resíduos sólidos adicionadas no Dispositivo 2

Para possibilitar que a adição desse material peneirado ao sistema fosse distribuída e mantida de forma homogênea, adaptou-se um mecanismo construído com tubulações de PVC unidas em “L” com diâmetro de 25 mm, instaladas junto às que bombeavam a água para o conjunto de condutores, conforme Figura 69. Assim, baseado em Tucci (2007), o qual afirma que a concentração de sólidos solúveis totais presentes na rede pluvial de Porto Alegre/RS é cerca de 1,5 g/l, realizou-se a simulação desse valor no Dispositivo 2, adicionando-se 180 g de partículas sólidas nele, segundo a Figura 70, já que o reservatório possuía 120 litros de água,

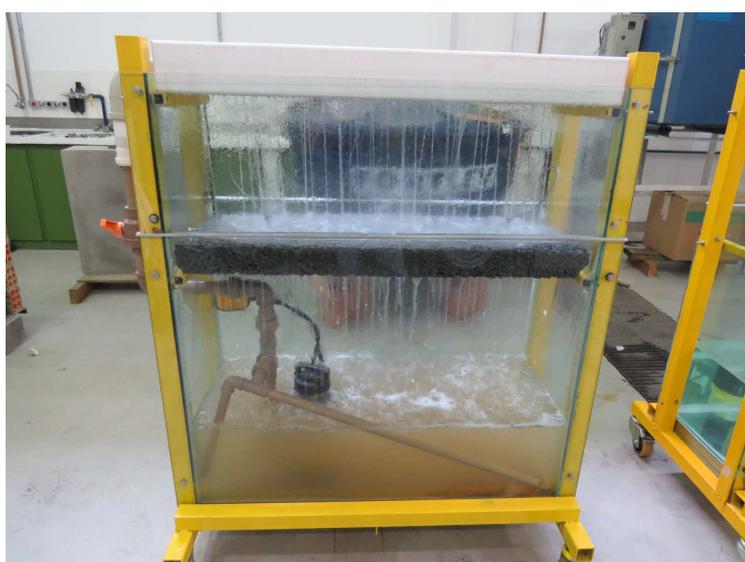


Figura 69: tubulações de PVC unidas em “L” do Dispositivo 2

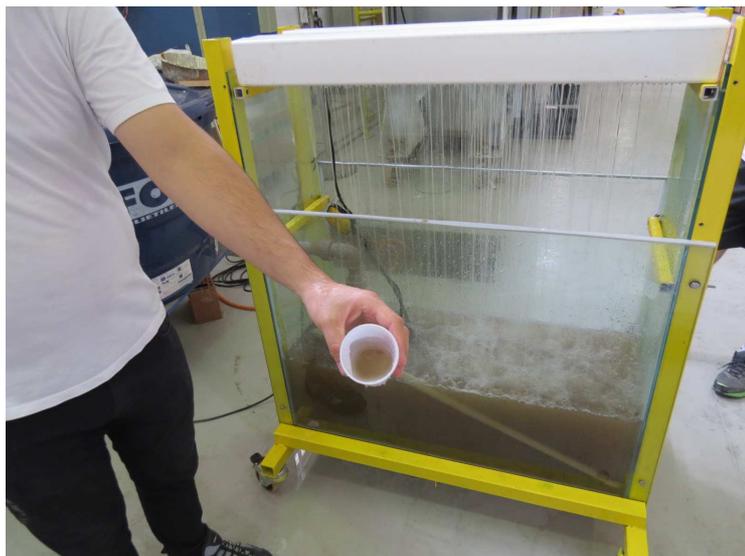


Figura 70: aspecto da água com partículas de resíduos sólidos

Na Figura 71, pode observar-se o teste realizado antes da execução do ensaio, constatando-se que as partículas de resíduos sólidos estavam realmente passando pelo conjunto de condutores, em que é possível visualizar essas acumuladas em um tecido branco. Os volumes de água que percolou pela placa de concreto permeável e que estava contido na área inferior do reservatório definiram os tempos do ensaio. Durante o mesmo, após o funcionamento do Dispositivo 2 pelo período de 3h30min, registrou-se a formação de uma lâmina de água na superfície da placa, conforme Figura 72, indicando que o fluxo havia sido reduzido em função das partículas terem ocasionado a sua obstrução.



Figura 71: teste da execução do ensaio de colmatação em placa



Figura 72: lâmina de água formada na superfície da placa

Segundo a Figura 73, pode constatar-se uma colmatação superficial mais concentrada na placa de concreto permeável nas áreas onde ocorria a saída de água com as partículas de resíduos sólidos, assim como nos condutos do simulador, devido à obstrução de alguns furos. Em virtude disso, como informado anteriormente, não se utilizou hidrômetro, de modo que a medição deste dispositivo da quantidade de água que percolava no protótipo de concreto permeável foi feita através da comparação do tempo de escoamento e do volume de água que foi retirado do reservatório, conforme ilustrado na Figura 74. As leituras dessas vazões com o registro aberto no mínimo e no máximo foram, respectivamente, de 0,006 l/s e de 2,6 l/s.



Figura 73: colmatação superficial na placa de concreto permeável



Figura 74: medições do tempo de escoamento e do volume de água retirado do reservatório

A Tabela 30 demonstra os dados de vazões obtidos nas leituras das medições das bomba nominal, Dispositivo 1 e Dispositivo 2. Analisando-se seus dados, constatou-se uma grande diferença de vazão a mais do Dispositivo 2, de água suja, em relação ao Dispositivo 1, de água limpa, atribuída pela perda ocasionada pelo mecanismo construído para atuar como misturador que provocou a permanência dentro do interior do reservatório.

Tabela 30: dados das leituras das medições das bomba nominal, Dispositivo 1 e Dispositivo 2

Equipamentos	Intensidade	Vazão (l/h)	Vazão (l/min)	Vazão (l/s)
Bomba nominal	-	13.000	200	3,3
Dispositivo 1	Máximo	4.680	78	1,3
	Mínimo	13,32	0,22	0,0037
Dispositivo 2	Máximo	9.360	156	2,6
	Mínimo	21,6	0,36	0,006

Como nos ensaios anteriores, os processos realizados nos dois dispositivos tiveram o funcionamento em ciclo fechado, de forma que não foi possível comparar as vazões dos volumes de água limpa ou suja que percolavam nas duas placas distintas ensaiadas. Para poder realizar-se essa comparação, realizou-se um terceiro ensaio, em que os Dispositivo 1 e Dispositivo 2 foram posicionados lado a lado com escalas com marcadores de 0 cm a 10 cm fixadas nas suas paredes externas próximos aos seus fundos, segundo a Figura 75.



Figura 75: escalas de 0 cm a 10 cm fixadas nos cantos superiores esquerdo e direito dos, respectivamente, Dispositivo 2 e Dispositivo 1

Imediatamente no instante de acionamento da bomba do Dispositivo 1, dispararam-se dois cronômetros simultaneamente, medindo o tempo que 70 mm de coluna d'água limpa, ou melhor, 28 l, controlada visualmente através da escala, demoraria para chegar no outro dispositivo, sendo que o primeiro registrou um tempo equivalente à vazão de 9,79 l/s. Com o segundo cronômetro ainda em funcionamento, verificou-se o surgimento de uma lâmina de água formada na face superior da placa, conforme Figura 76, e que a coluna de 70 mm de água atingiu um tempo de 31,50 s para percolar pela mesma, após o cronômetro ser parado, de forma que se calculou que a água percolou a uma vazão de 0,888 l/s pela placa colmatada.



Figura 76: ensaio com os dois dispositivos

Em um segundo momento, foi realizado um quarto ensaio para verificar o tempo de percolação do mesmo volume de 70 mm de coluna d'água sobre o protótipo utilizado no ensaio de permeabilidade em placa no Dispositivo 1. Esse procedimento foi semelhante ao do ensaio descrito anteriormente de colmatção em placa, porém, para a sua realização substituiu-se, no mesmo Dispositivo 2 do ensaio anterior, a placa colmatada pela do primeiro ensaio com água limpa, conforme é ilustrado na Figura 77.



Figura 77: substituição da placa colmatada pela do primeiro ensaio

Durante a realização desse ensaio, verificou-se que não ocorreu a formação de lâmina de água na superfície da placa, como na da do segundo ensaio. Observou-se, ainda, que um volume de 44 l percolou pelo protótipo em 15 s. Dividindo-se esses valores, calculou-se que o volume de água limpa percolou a uma vazão de 2,933 l/s pela placa de concreto permeável do primeiro ensaio, cujo valor dessa e das duas vazões medidas anteriormente estão registrados na Tabela 31, em que a vazão da placa do segundo ensaio foi 30,28 % da da do primeiro ensaio.

Tabela 31: vazões de água limpa das bomba do Dispositivo 1, das placas do primeiro e do segundo ensaio

Equipamentos	Vazão (l/s)
Bomba	9,79
Placa do primeiro ensaio	2,933
Placa do segundo ensaio	0,888

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho gerou dados experimentais obtidos através de ensaios de flexão, de permeabilidade, de taxa de infiltração de água, de resistência à compressão axial, de colmatação em placa e, também, de custos dos dois elementos analisados, ou seja, das placas em concreto permeável fabricadas no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) no Campus do Vale e das grelhas em concreto convencional fabricadas no Departamento de Esgotos Pluviais (DEP) de Porto Alegre/RS. A análise de seus resultados permite concluir, para os materiais utilizados nesta dissertação, que o concreto permeável é um material viável, tanto tecnicamente, quanto financeiramente, podendo vir a ser adotado na execução de elementos de drenagem em substituição às grelhas normalmente utilizadas.

Ressalta-se que os procedimentos de execução de compactação e de cura para a produção dos protótipos em concreto permeável foram sistematizados e baseados nas normas vigentes nacionais e internacionais. Além disso, todos os procedimentos dos ensaios foram realizados com auxílio dos funcionários da equipe técnica do laboratório, os quais têm ampla experiência na execução desses ensaios experimentais, garantindo resultados confiáveis, pois apresentaram pequenas variabilidades na sua realização, como se pôde constatar a partir dos valores contidos nesta dissertação.

Da Etapa 1, de estudos preliminares, após ensaios em placas de concreto permeável de três traços distintos com relação a/c fixa de 0,25, concluiu-se que o traço 1:4 apresentou o melhor resultado de custos comparativamente aos outros dois. Dessa forma, esse traço foi adotado como padrão para a produção das placas de concreto permeável na segunda etapa desta pesquisa.

Da Etapa 2, de estudos principais, após ensaios em seis placas de concreto permeável e em 36 corpos de prova extraídos delas, sendo seis de cada, concluiu-se que o concreto permeável é um material melhor para utilização como grelha para drenagem urbana. Para obter-se essa conclusão, analisaram-se comparativamente os resultados dos ensaios acima entre os protótipos de concreto permeável fabricados, registrando-se, principalmente, elevadas permeabilidades e resistências à compressão axiais.

Especificamente, nos ensaios de permeabilidade da Etapa 2, visualizou-se que as placas confeccionadas em concreto permeável apresentaram um coeficiente de permeabilidade na ordem de 0,25 cm/s, tornando possível seu uso como elemento de drenagem, no que diz respeito à capacidade de absorver uma carga d'água e direcioná-la para a rede pluvial. Além disso, os resultados dos ensaios de taxa de infiltração de água da Etapa 1 para o traço de 1:4 apresentaram uma média de 40.915,18 mm/h, ou melhor, 11,37 mm/s, corroborando com essa conclusão.

Em relação ao dispositivo para a avaliação da colmatação em placas de concreto permeável simuladas em laboratório, esse apontou a necessidade de uma manutenção caso haja entupimento dos furos dos condutores pelas partículas de resíduos sólidos em suspensão presentes na água suja simulada. Com a passar do tempo de uso do protótipo, inevitavelmente ocorrerá a obstrução dos poros através de agentes externos, constituindo-se no fenômeno de colmatação, o qual, conseqüentemente, resultará na redução da capacidade de infiltração da estrutura. Para evitar isso, a sua conservação, através de frequentes limpezas da superfície, ajudará a minimizar este problema. Entre essas formas de manutenção, a aspiração para remover os detritos que se alojarem sobre sua superfície, assim como a lavagem sob pressão, pode ser realizada na prevenção de entupimentos da estrutura de vazios, resultando em uma permeabilidade de 80 % a 90 % em alguns casos, segundo a bibliografia apresentada no terceiro capítulo.

Pode-se concluir que, em vista de todo esse processo de urbanização e expansão dos grandes centros urbanos, o concreto permeável insere-se como uma alternativa ecologicamente correta e viável, aproximando o ambiente urbano das condições de urbanização. A principal vantagem da utilização desse material está voltada para a redução das inundações, mas, além disso, sua utilização apresenta várias vantagens significativas, como:

- a) redução da infiltração de partículas de resíduos sólidos no solo, com o favorecimento da infiltração natural da água no subsolo, levando a manter o nível do lençol freático normal;
- b) evacuação das águas das chuvas consideravelmente reduzida, diminuindo o montante de investimentos em sistemas de drenagem;

- c) geração de uma melhor qualidade de vida para os habitantes de uma cidade, evitando, em razão da diminuição do acúmulo de águas nas superfícies em dias de chuvas intensas, inconvenientes aos pedestres quando recebem jatos de água na passagem de veículos em determinadas vias com volume de água acumulada e, ainda, melhor fluidez no trânsito, destacando-se que, em relação às doenças, essas poderão ser reduzidas, já que o contato das pessoas com as águas contaminadas pode ser evitado.

Conclui-se que a utilização do material mostrou-se adequada como alternativa tecnológica inovadora capaz de contribuir no sentido de amenizar o quadro de problemas ambientais e urbanos decorrentes da impermeabilização dos solos. O trabalho indica que a hipótese de emprego como elemento de drenagem é promissora e pode vir a contribuir significativamente na redução dos problemas relacionados às inundações urbanas.

Por fim, durante a realização do trabalho surgiram novas idéias para a realização de pesquisas futuras, as quais podem gerar ótimos resultados acerca do emprego de concretos permeáveis em drenagem urbana. Desse modo, seguem a seguir algumas sugestões para a continuação das pesquisas voltadas ao estudo do comportamento de elementos de drenagem:

- a) realização da moldagem de um maior número de placas, confeccionadas em concreto permeável, para poder avaliar melhor outros ensaios como, por exemplo, o de flexão, que obteve resultados bastante variáveis e, assim, adquirir um melhor entendimento em relação ao comportamento desse material frente a esse tipo de solicitação;
- b) confecção de outros elementos de drenagem do DEP, como bocas de lobo, meios-fios e tampas de poços de visita;
- c) aprimoramento do dispositivo de avaliação da colmatação em placas de concreto permeável, buscando evitar possíveis vazamentos;
- d) para confirmação das características apresentadas em laboratório, exposição das placas a precipitações reais, para análise do comportamento desse material.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, L.A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005.145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

AGRA, S.G. **Estudo experimental de micro-reservatórios para controle do escoamento superficial**. 2001.105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ALAM, M. A.; HASELBACH, L. M.; COFER, W. Validation of the performance of pervious concrete in a field application with finite element analysis. **ASTM International**, v. 9, Apr. 2012.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 211.3R-02**: guide for selecting proportions for no-slump. Farmington Hills, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-06**: pervious concrete. Farmington Hills, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1688/C1688M**: Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete. West Conshohocken, 2012a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1701/C1701M**: Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete. West Conshohocken, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1747/C1747M**: Standard test method for determining potential resistance to degradation of pervious concrete by impact and abrasion. West Conshohocken, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754/C1754M**: Standard test method for density and void content of hardened pervious concrete. West Conshohocken, 2012b.

ARAÚJO, P.R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J.A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, jul./set. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 15**: Cimento Portland: análise química: determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 18**: Cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: Cimento Portland: determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 76**: Cimento Portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F. N.; ALFAKIH, E. **Techniques alternatives en assainissement pluvial**. Paris: Technique et Documentation Lavoisier, 1994. 372 p.

BALADES, J. D.; LEGRET, M.; MADLEC, H. Permeable pavements: pollution management tools. **Water Science and Technology**: a Journal of the International Association on Water Pollution Research, v. 32, n. 1, p. 49-56, Jan. 1995.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O. Performance-costs evaluation for urban storm drainage. **Water Science and Technology**: a Journal of the International Association on Water Pollution Research, n. 51, p. 99-107, Feb. 2005.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O. Sustainable development and urban stormwater management in the context of a tropical developing country. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, 25., 1996, Ciudad de Mexico. **Anais...** Ciudad de Mexico: AIDIS, 1996. v. IV, p. 523-529.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. 2 ed. Porto Alegre: ABRH, 2011. 318 p.

BENTZ, D. P. Virtual pervious concrete: microstructure, percolation and permeability. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 3, Jan. 2008.

BRASIL. **Indicadores e dados básicos**. Brasília, DF, 2003.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. **Clima**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 13 mar. 2013.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

DELLATE, N.; MRKAJIC, A.; MILLER, D. I. Field and laboratory evaluation of pervious concrete pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, v. 2113, n. 1, p. 132-139, Nov. 2009.

ELLIS, J. B.; HVITED-JACOBSEN, T. Urban drainage impacts on receiving waters. **Journal of Hydraulic Research**: Association International des Recherché Hydrauliques, v. 34, n. 6, p. 771-784, Jun. 1996.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 7, n. 3, p. 183-191, 1995.

GOEDE, W. G. **Pervious concrete: investigation into structural performance and evaluation of the applicability of existing thickness design methods**. 2009, 198 f. Thesis (Ph.D. in Civil Engineering) - Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, Washington DC, 2009.

HASELBACH, L. M. Compliance Rates for Storm Water Detention Facility Installation. **ASCE Journal of Infrastructure Systems**, v. 11, n. 1, p. 61-63. Mar. 2005.

HASELBACH, L. M. Low impact development (LID) and transportation storm water practices. **Final Technical Report Associate Professor Washington State Univer**s, Dec. 2010.

HASELBACH, L. M. Potential for carbon absorption in concrete. **Journal of Environmental Engineering**, v. 135, p. 465-472, May. 2009.

HASELBACH, L. M. Potential for carbon adsorption on concrete: surface XPS analyses. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 14, p. 5329-5334, July 2008.

HASELBACH, L. M. Potential for clay clogging of pervious concrete under extreme conditions. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.15, n. 1, p. 67-69, Jan. 2010.

HASELBACH, L. M.; FREEMAN, L. Effectively estimating in situ porosity of pervious concrete from cores. **Journal of ASTM International**, v. 4, n. 7, Jul. 2007.

HASELBACH, L. M.; KEVERN, J.; SCHAEFER, V. Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, n. 2240, p.107-115, Dec. 2012.

HASELBACH, L. M.; LIU, L. Calcium hydroxide formation in thin cement paste exposed to air. **ACI Materials Journal**, v. 107, n. 4, p. 365-371, Aug. 2010.

HASELBACH, L. M.; NAVICKIS-BRASCH. Low impact development (LID) and transportation storm water practices: final technical report. **Washington State Department of Transportation**, Dec. 2010.

HASELBACH, L. M.; SHUGUOMA. Potential for carbon adsorption on concrete: surface XPS analyses. **University of South Carolina**, v. 42, n.14, p. 5329-5334, May 2008.

HASELBACH, L. M.; VALALA, S.; MONTES, F. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. **Journal of Environmental Management**, v. 81, n. 1, p. 42-49, Oct. 2006.

HENDERSON, V. Pervious concrete pavement: an integrated laboratory and field study. **University of Waterloo**, Ontario, v. 2095, p. 13-21, Nov. 2008.

HÖLTZ, F. da C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HOULE, K. M.; ROSEEN, R. M.; BALLESTERO, T. P.; BRIGGS, J. F.; HOULE, J. J. Examinations of pervious concrete and porous asphalt pavements performance for storm a water management in northern climates. In: **WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS**, 2009, Kansas City. **Proceedings...** 2009. v. 342, p. 1105–1122.

HUANG, B.; WU, H.; SHU, X.; BURDETTE, E. G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials Science Direct**, v. 24, n. 5, p. 818-823, May 2010.

HUFFMAN, D. Understanding pervious concrete. **The Construction Specifier**, v. 1, n. 4, p. 42–49, Dec. 2005.

HUHN, STECKER. Alternative stormwater management concept for urban and suburban areas. **Water Science and Technology**, v. 36, n. 8, p. 295 -300, mês. 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censos demográficos**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/calendario>>. Acesso em: 11 jun. 2012.

JABUR, A.; DORNELLES, F.; SILVEIRA, A.; GOLDENFUM, J.; CARDOSO, A.; OKAWA, C. Avaliação de pavimentos permeáveis com o uso da norma ASTM C1701. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS**, 20., Bento Gonçalves. **Anais...** 2013. Bento Gonçalves: ABRH, 2013. 8 p.

KAJIO, S.; TANAKA, S.; TOMITA, R.; NODA, E.; HASHIMOTO, S. Properties of porous concrete with high strength. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE ROADS, 8., Lisboa. **Proceedings...** 1998. 1998, p. 171-177.

KAYHANIAN, M. X-ray computed tomography and nondestructive evaluation of clogging in porous concrete field samples. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n.8, p.1103 - 1109, Aug. 2012.

KAYHANIAN, M., ANDERSON, M.; HARVEY, J.; JONES, D.; MUHUNTHAN, B. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. **Journal of Environmental Management**, v. 95, n.1, p. 114-123, Mar. 2012.

KEVERN, J. T. The effect of curing regime on pervious concrete abrasion resistance. **Journal of Testing and Evaluation**, West Conshohocken, v. 37, n. 4, p. 3-6, Jun. 2009.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O cimento Portland. In: ISAIA, G.C. **Concreto, ensino, pesquisa e realizações**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 295-322.

KOBIYAMA, M. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. 1 ed. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p.

KUANG, X.; KIM, J. Y.; GNECCO, I.; RAJE, S.; GAROFALO, G.; SANSALONE, J. J. Particle separation and hydrologic control by cementitious permeable pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, v. 2025, p. 111-117, Jan. 2007.

MALHOTRA, V. M. No-fines concrete: its properties and applications. **ACI Journal: Proceedings**, v.75, n. 11, p.628 - 644 , Nov. 1976.

MENDONÇA, F. Riscos, vulnerabilidade e abordagem sócio ambiental urbana: uma reflexão a partir da RCM e de Curitiba. **Desenvolvimento e meio ambiente**. Curitiba: UFPR. n. 10, p. 139-148. Oct. 2004.

MONTES, F.; VALAVALA, S.; HASELBACH, L.; Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. **Journal of environmental management**. v. 81, n. 1, p. 42-49, Oct. 2005.

MONTES, F.; HASELBACH, L. M. Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete. **Environmental Engineering Science**, v. 23, p. 960-969, 2006.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION (NRMCA), 2010. **Pervious Concrete**. Disponível em: <www.perviouspavement.org>. Acesso em: 12 jun. 2012.

NEITHALATH, N., OLEK, J., WEISS, J., MAROLF, A., SELL, E., THORNTON, W. Development of quiet and durable porous portland cement concrete paving materials. **Final Report: The Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways**. 179 p., Sep. 2003.

NEITHALATH, N., JAIN, J. A. Applications of electrical impedance methods in linking the structure of micro- and macro-porous concretes to their transport properties., ACI Special Proceedings in CD on Advances in Cement based Materials as part of the ACI Spring Convention, Chicago, v. 270, p. 33-50, Mar. 2010.

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **ScienceDirect**, n.61, p. 802-813, May 2010.

NEVES, M. G. F. P. **Quantificação de resíduos sólidos na drenagem urbana**. 2006. 227 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

NEVES, M.; TUCCI, C. E. M. Gerenciamento integrado em drenagem urbana: quantificação e controle de resíduos sólidos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15. **Anais...** 2003, 2003. 16 p.

OLEK, J.; WEISS, W. J.; NEITHALATH, N.; MAROLF, A.; SELL, E.; THORNTON, W. D. Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials. **Final Report**, SQDH 2003-5, ACBM, Purdue University, p. 8-72, Sep. 2003.

PARK, S.; TIA, M. An experimental study on the water-purification properties of porous concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 177-184, Mar. 2004.

PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT. **Applications, Benefits, Construction, Design, Engineering Properties, Inspection and Maintenance, Materials and Mix Design, Performance, Resources**. Disponível em: <<http://www.perviouspavement.org>>. Acesso em: Aug. 2012.

PINDADO, M. A; AGUADO, A.; JOSA, A. Fatigue behavior of polymer modified porous concretes. **Universitat Politècnica de Catalunya -School of Civil Engineering**. 11 p., 1999.

POLASTRE, B.; SANTOS, L.D. **Concreto Permeável**. São Paulo: Universidade de São Paulo. 2006.

PORTO ALEGRE. **Decreto n° 14.786, de 30 de dezembro de 2004**. Porto Alegre, dez. 2004.

PORTO ALEGRE. **Decreto n° 17.720, de 2 de abril de 2012**. Porto Alegre, abr. 2012.

PORTO ALEGRE. Departamento de Esgotos Pluviais da Prefeitura Municipal de Porto Alegre e Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Plano diretor de drenagem urbana de Porto Alegre: 1.ª fase**. Porto Alegre, 2001.

PORTO ALEGRE. Departamento de Esgotos Pluviais da Prefeitura Municipal de Porto Alegre e Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Plano diretor de drenagem urbana de Porto Alegre: manual de drenagem urbana. Porto Alegre, 2005c. v. 6, 159 p.

PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal. **Caderno de encargos do Departamento de Esgotos Pluviais.** Porto Alegre, 2005b.

PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal. Departamento de Esgotos Pluviais. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre.** Porto Alegre. 2005a.

PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Departamento de Esgotos Pluviais. **Drenagem Urbana:** sistema de proteção contra as cheias do município de Porto Alegre. Porto Alegre, 2005d.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Rio Grande do Sul. **Plano de Manejo da Reserva Biológica Estadual da Serra Geral.** Porto Alegre, 2008.

SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates. **Construction and Building Materials** n. 42, p. 33-39, Fev. 2013.

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. Mix design development for pervious concrete in cold weather climates. **Final Report:** Civil Engineering Iowa State University, v. 1, n. 7, p. 8-72, Fev. 2006.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, SEMA, **Serviços e informações.** 2008. Disponível em: <<http://sema.rs.gov.br>>. Acesso em: Apr. 2012.

SHEN, S.; BURTON, M.; JOBSON, B.; HASELBACH, L. Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment. **Construction and Building Materials**, n.35, p. 874 - 883, Jun. 2012.

SILVEIRA, A.M. Um asfalto antienchente. **Jornal Zero Hora**, Caderno Nosso Mundo Sustentável, Ano 1, no 41, p.1 e 4, Porto Alegre, Dez. 2010.

SONEBI, A; BASSUONI, M.T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. **Construction and Building Materials**, n.38, v. 38, n.4, p. 147-154, Jan. 2013.

TENG, Z.; SANSALONE, J. Particle Separation by In-Situ Partial Exfiltration of Rainfall-Runoff. **Best Management Practices Technology**, p. 1-9, 2004.

TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. **Pervious concrete pavements:** Portland cement association, Skokie, Illinois, 2004. 36 p.

TUCCI, C. E. M. Parâmetros dos hidrogramas para bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, 2002.

TUCCI, C. E. M.; GENZ, F. Controle do impacto da urbanização. **Drenagem urbana**, Porto Alegre. Coleção ABRH de recursos hídricos, v.5, Editora da Universidade, 1995.

TUCCI, C. E. M. Parâmetros dos hidrogramas unitário para bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n.2, p. 195-199, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2007. 352p.

TUCCI, C. E. M. **Coefficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas**, Porto Alegre: RBRH, v. 5, n. 1, p. 61-68, 2000.

TUCCI, C.E.M. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 5-12, Jul./Dez. 1997.

TUCCI, C. E. M e SILVEIRA, A. **Gerenciamento da Drenagem Urbana**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <www.iph.ufrgs.br/grad/disciplinas/dhh/iph01014/Gerdre.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2012.

TUCCI, C. E. M. **Crise da água e desafios reais**. Disponível em: <<http://blog.rhama.net/2009/06/28/crise-da-agua-e-desafios-reais>>. Acesso em: 5 maio 2012.

URBONAS, B.; STAHR, P. **Stormwater: Best Management Practices and Detention for Water Quality, Drainage and CSO Management**. PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, New, USA, 1993.

US GEOLOGICAL SURVEY. **Ciclo da água**. Disponível em: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>>. Acesso em: 23 ago. 2013.

VANCURA, M.; MACDONALD, K.; KHAZANOVICH, L. Microscopic analysis of paste and aggregate distresses in pervious concrete in a wet, hard freeze climate. **Cement & Concrete Composites**, n. 33, p. 1080-1085, Jul. 2011.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de Projeto e Execução de Pavimentos Permeáveis Visando Retenção e Amortecimento de Picos de Cheias**. 2009. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VOLDER, A.; WATSON, T.; VISWANATHAN, B. Potential use of pervious concrete for maintaining existing mature trees during and after urban development. **Science Direct**, United Kingdom, v. 8, n. 4, p. 249-256, Ago. 2009. 08 p.

YANG, Y. A new test method for pervious concrete permeability. **International Conference on Multimedia Technology**, District of Hangzhou, p. 950-953, Jul. 2011.