

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

**USO DE CONCRETO PERMEÁVEL NA DRENAGEM
URBANA: ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E DO
IMPACTO AMBIENTAL**

FABIANO DA COSTA HÖLTZ

Porto Alegre
Setembro de 2011.

Fabiano da Costa Höltz

**USO DE CONCRETO PERMEÁVEL NA DRENAGEM
URBANA: ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E DO
IMPACTO AMBIENTAL**

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

2011

CIP - Catalogação na Publicação

Höltz, Fabiano da Costa

Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana:
Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto
Ambiental / Fabiano da Costa Höltz. -- 2011.
139 f.

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BRRS,
2011.

1. Concreto Permeável. 2. Drenagem Urbana. 3.
Permeabilidade à Água. 4. Concretos Especiais. I.
Filho, Luiz Carlos Pinto da Silva, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da
UFRGS com os dados fornecidos pelo autor

FABIANO DA COSTA HÖLTZ

**USO DE CONCRETO PERMEÁVEL NA DRENAGEM
URBANA: ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E DO
IMPACTO AMBIENTAL**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA 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, 16 de setembro de 2011

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

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Antônio Bressani
Ph.D., I.C.U.L/Grã Bretanha

Prof^ª. Christa Korzenowski
Dra. UFRGS/RS

Prof^ª. Alexandra Passuello
Dra. UNIVPM/Itália

Prof. Laurindo Antonio Guasselli
Dr. UFRGS/RS

DEDICATÓRIA

A meus pais, Nestor e Sandra, por todo o apoio e carinho durante essa jornada incrível, que ficará para sempre em meu coração, e por me mostrarem toda a força, todo o poder, que vem do aprendizado e do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço toda a ajuda, o carinho e a dedicação do professor Dr. Luiz Carlos da Silva Filho, na orientação da minha dissertação me apresentando um mundo completamente novo, que me apontou uma nova direção na minha carreira. Valeu professor!!

A todos os meus colegas de pós-graduação do LEME, que me ajudaram, me apoiaram e me incentivaram a seguir em frente, durante o desenvolvimento da minha pesquisa, cada um dando a sua contribuição, o que enriqueceu em muito o meu trabalho. Estela Garcez, Luciane Caetano, Luciani Lorenzi, Vânia, Uziel, Mara Bassi, Juliana Young, Maria da Graça, Tamara Baggio, Vitor Perrone, Paulete, Larissa, Bruno, Luiz, Valdite, Alexandra, Ângela, Christa, Flávio e Fernanda Ruschel. Em especial, agradeço imensamente ao Dr. Alexandre Lorenzi, que foi uma espécie de *anjo da guarda* durante o desenvolvimento da minha dissertação.

Aos bolsistas do LEME, que dedicaram o seu tempo, o seu conhecimento e a sua experiência ao me auxiliar no desenvolvimento da minha pesquisa. Em especial agradeço a Rose Shimomukay e ao Josué Chies, por terem sempre me auxiliado, sobretudo nas horas difíceis, no desenvolvimento da parte experimental. Também é digna de menção a ajuda prestada pelo Marcos, Joseane, Édina, Rafael, Wagner, Bruno, Vítor, Mariana, Isaltino, Roger, Matheus, Eduardo e Juliane. Muito, muito obrigado a todos vocês!!

Aos funcionários do LEME, pela paciência e auxílio durante a realização dos ensaios de laboratório. O meu muito obrigado aos Técnicos de Laboratório, Eurípedes Fontes e Edgar Wallace e, ao auxiliar de serviços gerais, Antônio. Às secretárias do laboratório, Priscila e Otaciana.

Ao pessoal que faz parte, e que já fez parte, da Secretaria do PPGEC, à minha grande amiga, Liliani Gaeversen, Ana Luíza, Carmen, Carol, Josiane, Rita e Aida.

Aos meus melhores amigos, Simone Ramires, Diego Guimarães e Marcelo Argenton pelo apoio e a ajuda inestimável não só durante a realização dessa pesquisa, mas também durante a minha permanência no curso, o que engrandeceu ainda mais essa experiência.

Aos meus amigos e colegas do NORIE, que estiveram comigo e me apoiaram, durante a minha breve estada como um Noriano. Obrigado a todos vocês pelo apoio e carinho.

E por fim ao CAPES por todo o incentivo e apoio.

“Qualquer que seja o seu desejo, o que quiser fazer na sua vida, se você o fizer com paixão, vontade e dedicação, o sucesso sempre o acompanhará.” *Steve Irwin, o Caçador de Crocodilos.*

RESUMO

HOLTZ, F.C. Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

Nos dias atuais todas as grandes metrópoles enfrentam inúmeros problemas devidos, muitas vezes, a um deficiente planejamento urbano onde se inclui certo descaso com a proteção do meio ambiente. Um aspecto importante é a desordenada expansão urbana, que têm crescido com o passar dos anos. Este fator poderá comprometer a saúde do meio ambiente. Menciona-se também o descaso da população com os recursos hídricos, o solo e a vegetação. Dentro deste enfoque, o tradicional sistema de drenagem, baseado em um rápido afastamento do excesso pluvial, contribui para um aumento nos volumes escoados e vazões de pico e uma redução no tempo do escoamento, fazendo com que os hidrogramas de cheia sejam mais críticos, aumentando-se, assim, a frequência e a gravidade das inundações. Pesquisas apontam uma grande relação entre os índices de permeabilidade com a densidade habitacional. Essencialmente, o concreto permeável é um pavimento de concreto estrutural, com um grande volume de vazios interconectados (15 a 35%). Como o concreto convencional, é feito de uma mistura de cimento, agregados graúdos e água. Contendo pouca ou nenhuma areia, resulta em uma estrutura celular porosa que permite que a água passe facilmente. Em países desenvolvidos houve um aumento de interesse na sua utilização, para um controle mais efetivo das águas do escoamento superficial. Dependendo das normas locais e das características do meio, o pavimento e sua sub-base podem ter capacidade suficiente de infiltração para eliminar a necessidade de outras obras de drenagem. O objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento de um concreto permeável para utilização em grandes áreas. Pretendeu-se englobar um entendimento de suas propriedades e um desenvolvimento de diversos traços. Para tanto se formularam e caracterizaram diferentes traços de concreto permeável, estudando as dificuldades para fabricação em campo e analisando as possibilidades de aplicação e as possíveis repercussões na drenagem. Os resultados de resistência à compressão foram, em média, de 8 MPa e os de permeabilidade, mais variados, ficaram numa faixa de 100 a 1000l/min./m². Para um uso eficaz desse concreto, deve-se avaliar a capacidade de percolação do solo abaixo do pavimento.

Palavras-chave: Concreto Permeável; Drenagem Urbana, Permeabilidade à Água, Concretos Especiais, Ensaios de Caracterização.

ABSTRACT

HOLTZ, FC. The usage os permeable concrete in urban drainage: an analysis of the technical feasibility and environmental impact (Master's in Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

Nowadays, all major cities often face many problems due to a poor town planning, which also includes certain disregard towards protecting the environment. Another important aspect is the disorderly urban expansion, which has grown over the years. This factor may compromise the health of the environment. It can also be mentioned the population's neglect with water, soil and vegetation. Within this approach, the traditional drainage system, based on a rapid removal of excess rain, contributes to an increase in drained volume and peak flow and a reduction in the time of the flow, causing the flood hydrographs to be more critical, increasing, thus, the frequency and severity of floods. Research indicates a strong relationship between rates of permeability with the density of housing. Essentially, the concrete is a permeable structural concrete pavement with a large volume of interconnected voids (15 to 35%). As conventional concrete, it is made from a mixture of cement, coarse aggregates and water. Containing little or no sand, it results in a sporous cell structure that allows water to pass easily. In developed countries there has been an increased interest in its use, in order to obtain a more effective control of the runoffs. Depending on local rules and characteristics of the environment, pavement and its sub-base may have enough capacity to eliminate infiltration which excludes the need for other drainage works. The aim of this paper is the development of a permeable concrete to be used in large areas. It aims to encompass an understanding of its properties and development of its various traits. Hence, have been formulated and characterized different traces of permeable concrete, studying the difficulties of manufacturing it in the field and analyzing its possible applications and its possible impact on drainage. The results of compressive strength were on average of 8 MPa and the permeability, more varied, were in the range of 100 to 1000l/min./m². For an efficient use of this concrete, we should evaluate the ability of soil percolation below the pavement.

Keywords: Permeable Concrete, Urban Drainage, Waterpermeability, Special Concrete and Characterizing Essay.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	01
1.2. JUSTIFICATIVA.....	09
1.3. OBJETIVOS.....	11
1.3.1. Objetivo Geral	11
1.3.2. Objetivos Específicos	11
1.4. LIMITAÇÕES.....	12
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	12
2.DRENAGEM URBANA	14
2.1. DESAFIO DA DRENAGEM URBANA E O PAPEL DO CONCRETO PERMEÁVEL	14
2.2. ASPECTOS NEGATIVOS RELACIONADOS À IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO.....	18
2.3. ALTERNATIVAS PARA O CONTROLE DOS ESCOAMENTOS.....	31
3. CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS	37
3.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCRETO PERMEÁVEL	37
3.2. CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	42
3.2.1. Vantagens Econômicas do Concreto Permeável	44
3.2.2. Benefícios Ambientais Relacionados ao Uso do Concreto Permeável	46
3.2.3. Outros Aspectos Sobre o Concreto Permeável	50
3.3. EXECUÇÃO DE PISOS DE CONCRETO PERMEÁVEL	52
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	57

4.1. ESTRATÉGIA DE PESQUISA	57
4.2. DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE ESTUDO	60
4.2.1. Primeira Etapa: Ensaios Preliminares	60
4.2.2. Segunda Etapa: Ensaios Complementares	62
4.2.3. Terceira Etapa: Análise do Efeito da Extração	66
4.2.4. Quarta Etapa: Ensaios de Permeabilidade	67
4.3. MATERIAIS UTILIZADOS	67
4.4. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	69
4.5. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EMPREGADOS.....	73
4.5.1. Resistência à Compressão Axial	73
4.5.2. Ensaio de Permeabilidade	74
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	78
5.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA	78
5.1.1. Resultados dos ensaios de compressão – Relação 1:5	78
5.1.2. Resultados dos ensaios de compressão – Relação 1:7	79
5.1.3. Resultados dos ensaios de compressão – Relação 1:9	81
5.1.4. Efeito da variação da idade de ensaio, teor de agregado <i>m</i> e relação <i>a/c</i>	82
5.1.5. Conclusões Gerais – 1 ^a . Etapa – Ensaios Preliminares	84
5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA	85
5.2.1. Efeito da Mudança do Tipo de Agregado	85
5.2.2. Efeito da Forma de Vibração	87
5.2.3. Efeitos da Direção de Extração	90
5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA	94
5.4. RESULTADOS DA 4 ^a . ETAPA: ENSAIOS DE PERMEABILIDA - DE	95
5.5. ANÁLISE RESUMIDA DO IMPACTO POTENCIAL DO USO DO CONCRETO PERMEÁVEL EM PAVIMENTAÇÃO DE ÁREAS URBANAS	103

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
6.2. CONCLUSÕES	111
6.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Área de várzea ocupada	04
Figura 1.2: Processo de drenagem de uma bacia	05
Figura 1.3: Resíduos sólidos prejudicando a drenagem urbana em São Paulo	07
Figura 2.1: Comparação entre o hidrograma antes e depois do processo de urbanização ..	19
Figura 3.1: Rolo compressor usado na pavimentação com concreto permeável	55
Figura 4.1: Fluxograma do Programa Experimental	59
Figura 4.2: Aspecto da argamassa do concreto de um traço com relação a/c de 0,26	62
Figura 4.3: Aspecto de corpo-de-prova de um traço com relação a/c de 0,45, mostrando poros obstruídos	63
Figura 4.4: Fôrma nas dimensões 30 X 45 X 15 cm.	64
Figura 4.5: Aspecto visual de corpo-de-prova extraído de bloco de concreto	65
Figura 4.6: Aspecto visual de corpo-de-prova moldado	65
Figura 4.7: Mesa vibratória testada na 2 ^a . etapa da pesquisa	66
Figura 4.8: Vibração com vibrador do tipo agulha com diâmetro de 25mm	66
Figura 4.9: Vista do aparelho proposto para medição da condutividade hidráulica de co- cretos permeáveis	74
Figura 4.10: Aparelho construído para medição da condutividade hidráulica das amos- tras de concreto permeável	76
Figura 4.11: Corpo-de-prova encamisado com faixa látex	77
Figura 5.1: Evolução da resistência com a idade para traços da 1 ^a . Etapa	82
Figura 5.2: Variação da resistência em função da quantidade de agregado (m) aos 7 dias	83
Figura 5.3: Variação da resistência em função da quantidade de agregado (m) aos 28 dias	84
Figura 5.4: Variação da resistência média em função do tipo de agregado: brita 1 (B1); brita 0 (B0) e brita 1 com 7% de areia (B1 + A), aos 14 dias	86

Figura 5.5: Variação da resistência média em função do tipo de vibração em corpos de prova com brita 1 (B1) e brita com 7% de areia (B1 + A), aos 14 dias	88
Figura 5.6: Variação da resistência média em função do tipo de vibração em corpos de prova com brita 0, aos 14 dias	89
Figura 5.7: Corpo-de-prova extraído com defeito na borda devido ao processo de extração	90
Figura 5.8: Comparação de resultados para traços com m:4 e m:5	92
Figura 5.9: Aplicação de vibração com uma vibroacabadora sobre uma pavimentação	92
Figura 5.10: Efeitos da forma de vibração na resistência à compressão de traços com m:4 e brita 1 com adição de 7% de areia	94
Figura 5.11: Variação da permeabilidade com o tipo de agregado e forma de produção dos corpos de prova, de traço com m:4	98
Figura 5.12: Comparação entre o acomodamento da brita entre um cp moldado e um extraído	99
Figura 5.13: Variação da permeabilidade com o tipo de agregado e forma de produção dos corpos de prova, de traços com m:5	102
Figura 5.14: Comparação com os resultados de permeabilidade com os de resistência à compressão para o traço de m:4	102
Figura 5.15: Comparação com os resultados de permeabilidade com os de resistência à compressão para o traço de m:5	103
Figura 5.16: Simulação de por concretagens em m ³	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1.: Principais fontes de metais pesados transportados pelas redes de drenagem de águas pluviais	27
Tabela 2.1: Relações entre as fontes, alterações e conseqüências das águas pluviais nas grandes cidades	31
Tabela 3.1: Capacidade reflectiva (albedo) de algumas superfícies da Terra	48
Tabela 4.3.1: Características de agregado graúdo tipo Brita 1 usado nos ensaios	68
Tabela 4.3.2: Características do agregado graúdo tipo Brita 0 (pedrisco) usado nos ensaios	68
Tabela 4.3.3: Características do agregado miúdo tipo areia silicosa usado nos ensaios	69
Tabela 4.4.1: Traços dos concretos usados na Etapa I do trabalho	70
Tabela 4.4.2: Traços dos concretos usados na Etapa II	72
Tabela 5.1: Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1 e m:5, em várias idades	79
Tabela 5.2: Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1 e relação 1:7, em várias idades	80
Tabela 5.3: Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1 e relação 1:9, em várias idades	81
Tabela 5.4: Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1, brita 0 e brita mais 7% de areia	86
Tabela 5.5: Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1, brita 0 e brita com areia sujeitos a diferentes tipos de vibração....	88
Tabela 5.6: Resultados da 2 ^a . série de concretagens da 2 ^a . etapa, com distintos tipos e quantidades de agregado, sem vibração	91
Tabela 5.7: Análise dos efeitos de vibração no traço com m:4, fabricado com brita 1 com 7% de areia	93
Tabela 5.8: Resultados da série com m:4 e adensamento com vibrador agulha, molda –	

dos e extraídos	95
Tabela 5.9: Permeabilidade de corpos de prova extraídos, de concreto com traço 1:4, confeccionado com brita 1 e 7% de areia	96
Tabela 5.10: Permeabilidade de corpos de prova extraídos e moldados, de concreto com traço 1:4, adensados com vibrador agulha	97
Tabela 5.11: Permeabilidade de corpos de prova extraídos e moldados, de concreto com traço 1:5, adensados com vibrador de agulha	100
Tabela 5.12: Simulações do uso do concreto permeável com exemplos práticos	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP	Corpo-de-Prova
hab	Habitante
ha	Hectare
ACI	American Concrete Institute
AI	Área Impermeável
DH	Densidade Habitacional
PET	Politereftalato de etileno
Av	Avenida
USP	Universidade de São Paulo
MG	Minas Gerais
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
FIEMG	Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais
SEBRAE	Serviços Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
526B	Traço <i>m:5, a/c 026</i> , Brita 1
530B	Traço <i>m:5, a/c 030</i> , Brita 1
535B	Traço <i>m:5, a/c 035</i> , Brita 1
545B	Traço <i>m:5, a/c 045</i> , Brita 1
726B	Traço <i>m:7, a/c 026</i> , Brita 1
730B	Traço <i>m:7, a/c 030</i> , Brita 1
735B	Traço <i>m:7, a/c 035</i> , Brita 1
745B	Traço <i>m:7, a/c 045</i> , Brita 1
926B	Traço <i>m:9, a/c 026</i> , Brita 1
930B	Traço <i>m:9, a/c 030</i> , Brita 1
935B	Traço <i>m:9, a/c 035</i> , Brita 1

945B	Traço $m:9$, a/c 045, Brita 1
430VB	Traço $m:4$, a/c 0,30, Fôrma Vertical, Brita1
430HB	Traço $m:4$, a/c 0,30, Fôrma Horizontal, Brita1
430VBA	Traço $m:4$, a/c 0,30, Fôrma Vertical, Brita1 + Areia
430HBA	Traço $m:4$, a/c 0,30, Fôrma Horizontal, Brita1 + Areia
430VP	Traço $m:4$, a/c 0,30, Fôrma Vertical, Pedrisco
430HP	Traço $m:4$, a/c 0,30, Fôrma Horizontal, Pedrisco
530HB	Traço $m:5$, a/c 0,30, Fôrma Horizontal, Brita1
530HBA	Traço $m:5$, a/c 0,30, Fôrma Horizontal, Brita1 + Areia
530HP	Traço $m:5$, a/c 0,30, Fôrma Horizontal, Pedrisco
Vert	Vertical
Hor	Horizontal
fci	Resistência à compressão individual
fcm	Resistência à compressão média
CV	Coefficiente de Variação

LISTA DE SÍMBOLOS

MPa	Megapascal
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetros
cm	Centímetro
h1	Altura Um
h2	Altura Dois
km ²	Quilômetro quadrado
kg	Quilograma
min	Minutos
<i>a/c</i>	Fator água / cimento
%	Porcentagem
US\$	Dólar
R\$	Real
°C	Graus Celsius
mg	Miligramas
l	Litro
Ad-hoc	“Para Isto”
In	Polegada
kgf	Quilograma-força
<i>m</i>	Total de Agregados
<i>l:m</i>	Relação cimento/materiais secos
d _{max}	Diâmetro Máximo
CP V - ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial

PVC	Cloreto de Polivinila
t	Tempo
s	Segundos
t_{med}	Tempo Médio
kN	Quilonewton
B1	Brita 1
B0	Brita Zero
B1 + A	Brita 1 com Areia
k	Permeabilidade

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo inicial será apresentada e justificada a escolha do tema de pesquisa, além de descritos os objetivos, hipóteses e limitações estabelecidas para o desenvolvimento desta dissertação.

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde o princípio da civilização o homem passou a interferir na natureza, para garantir a sua subsistência e segurança. Essa atuação acarretou em diversos e diferentes impactos ambientais, que em muitos casos alteraram o meio ambiente e prejudicaram, em maior ou menor escala, outros seres vivos, componentes da fauna e/ou da flora.

Conforme a população humana crescia e avançava tecnologicamente, a mesma passou a ocupar uma parcela cada vez maior dos territórios. O uso dessas áreas para atividades produtivas e para geração de núcleos urbanos ocasionou mudanças no solo, alterações em cursos d'água e derrubadas de matas e florestas. Como consequência do processo de desenvolvimento, ao longo dos séculos, a ação humana acabou por moldar e alterar o meio ambiente de forma marcante. Isso permitiu grandes avanços civilizatórios, mas também perturbou, sob diferentes aspectos, o equilíbrio natural.

Hoje em dia esse equilíbrio se encontra perturbado, ocasionando efeitos negativos como o esgotamento de recursos naturais, a extinção de espécies, a ocorrência de mudanças climáticas e a escassez de água. Embora tenham sido registrados vários sinais de que esses processos deletérios estavam se desenvolvendo nas últimas décadas, a pressão das sociedades modernas pelo avanço no padrão de consumo da população estimulou a adoção de políticas desbalanceadas, voltadas para benefícios de curto prazo, sem preocupação com o passivo ambiental gerado.

No modelo vigente, para prover sua população de bens materiais e boas condições de vida os países pobres ou em desenvolvimento priorizam o crescimento econômico,

independentemente do custo ambiental. Esse modelo gera pressões que superam a capacidade de regeneração e de fornecimento de recursos do meio ambiente. Em sua ânsia pelo desenvolvimento econômico de curto prazo, os governos frequentemente ignoram que o passivo ambiental gera problemas de difícil resolução em médio e longo prazo, afetando de maneira negativa a qualidade de vida futura da população.

O grande desafio moderno consiste justamente em equilibrar as demandas de desenvolvimento com uma visão de sustentabilidade. O que complica o problema é que muitas atividades humanas ocasionam um conjunto complexo de impactos, que envolvem desde a alteração do solo até a contaminação dos corpos hídricos por efluentes industriais e esgoto doméstico. A ausência de um maior conhecimento sobre as interrelações de certos fenômenos, aliada à falta de uma visão de desenvolvimento sustentável para guiar as intervenções, já resultaram em sérias tragédias ambientais.

Um problema particular causado pelo desenvolvimento, que assola as grandes cidades, são as inundações urbanas, causadas pela gestão deficiente dos escoamentos pluviais.

Com o aumento da urbanização, dentro do modelo de desenvolvimento vigente, ocorreu uma gradual impermeabilização do solo, devido à construção de edifícios com calçadas impermeáveis, ligados por ruas pavimentadas. O crescimento urbano e a demanda por vias de tráfego asfaltadas e planas levaram à ocupação de grande parte da superfície das cidades com materiais impermeáveis, como o concreto asfáltico e o concreto de cimento Portland.

Essa alteração reduz seriamente a área de contato da água com o solo, dificultando ou impedindo a infiltração e aumentando os volumes do escoamento superficial das águas pluviais, o que se torna em um desafio cada vez maior para as redes de drenagens pluviais.

A vazão das águas pluviais escoada superficialmente aumenta a cada nova residência ou prédio comercial, ou industrial, construído, e com cada rua asfaltada. Além disso, a impermeabilização faz com que essa vazão seja transportada para a rede pública e para os grandes corpos de água que cortam as cidades num tempo bem menor do que ocorria anteriormente, incrementando o pico de cheia.

O incremento do volume e da velocidade do fluxo faz com que ocorra a sobrecarga do sistema de drenagem, provocando os alagamentos e as enxurradas (quantidade de água substancial proveniente das chuvas torrenciais) urbanas. Isso afeta, por conta de um efeito sinérgico, diferentes pontos da rede de drenagem.

Tentando mitigar o problema, o poder público, em muitos locais, acabou adotando a estratégia de aumentar a capacidade da rede de drenagem. O problema é que os métodos tradicionalmente usados para escoar as águas pluviais, tais como calhas, sarjetas, bocas de lobo e tubulações enterradas, não colaboram para uma gestão eficaz da questão das cheias, pois não resolvem a questão da falta de infiltração e terminam simplesmente transferindo o problema para jusante (foz/baixadas). Algumas obras podem, inclusive, especialmente quando envolvem a retificação de calhas de riachos e córregos, incrementar o pico de cheia e colaborar para acelerar o escoamento dessas águas.

Como destaca Canholi (2005), a drenagem urbana é fundamentalmente um problema de “alocação de espaços”, pois a ocupação e supressão das várzeas que eram utilizadas como áreas de escape pelos rios e córregos na ocasião das cheias acabam requerendo uma área equivalente ou até maior à jusante.

Infelizmente, como destacam Polastre e Santos (2006), houve um planejamento deficiente do uso do solo, por conta da forma de criação das cidades associada à explosão demográfica e à escassez de políticas governamentais adequadas para regular o desenvolvimento urbano nas grandes cidades. Por razões históricas e pela falta de regulação, as áreas de várzea, necessárias para o equilíbrio de grandes corpos hídricos, foram ocupadas indiscriminadamente, provocando uma alteração significativa nos regimes fluviais, conforme ilustra a Figura 1.1.

Paralelo a essa ocupação, houve uma retirada da cobertura vegetal, necessária para evitar o assoreamento dos rios, bem como a impermeabilização do solo em toda a área da bacia. Isso acabou resultando na perda da capacidade natural de infiltração do solo, levando a um maior escoamento superficial. Conseqüentemente, com o aumento do pico das cheias, o tempo de chegada das águas aos rios é reduzido. Esse aumento do escoamento superficial, combinado com a ocupação das margens de rios e córregos, agravou o problema das enchentes (transbordamento de água de corpos hídricos) urbanas.



Figura 1.1: Área de várzea ocupada (Fonte: <http://1.bp.blogspot.com>)

Ao se defrontar com esses problemas, uma falha crônica de visão do poder público é a atuação pontual, sem consideração da totalidade de cada bacia. Segundo Tucci (2007), isso leva à construção de obras de drenagem em trechos, negligenciando a visão global do problema. O mesmo propõe um modelo que evidencia como se agravam os problemas, conforme Figura 1.2. Como indicado na figura, um núcleo urbano frequentemente tem zonas de inundação. Para enfrentamento do problema é comum que se construam canais de drenagem (estágio 1), o que aumenta a vazão máxima no corpo de água principal. Porém, com a crescente urbanização para montante (nascentes/lugares mais altos) (estágio 2), mais canais são construídos para resolver problemas locais, provocando um aumento da vazão máxima na saída da bacia. No estágio 3 se intensifica a urbanização e são construídos trechos de canais para evitar os alagamentos de montante, aumentando novamente a vazão máxima em jusante, retornando os alagamentos nos trechos inferiores. Esse tipo de evolução acaba transferindo as inundações para outro ponto das cidades (em geral, zonas de jusante), sem que o problema seja efetivamente resolvido. Quem acaba sofrendo com isso tudo é a população, que perde duas vezes, seja quando financia altos investimentos para aumento da rede (ao invés da adoção de obras sustentáveis, com preço mais em conta) seja pelo aumento cíclico das inundações.

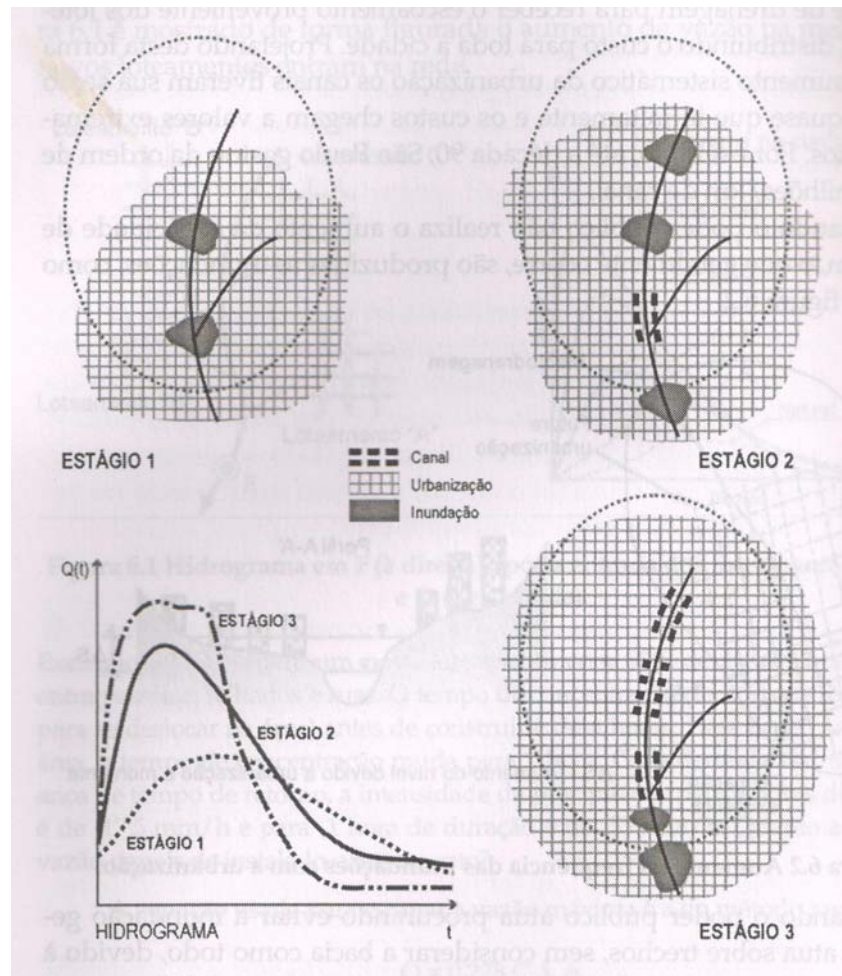


Figura 1.2: Processo de drenagem de uma bacia (Fonte: Tucci, 2007)

Uma questão importante, que demanda atenção do poder público, é que população que reside à montante, e que é responsável pelos impactos à jusante, não sente seus efeitos e muitas vezes não está disposta a pagar pelas obras de mitigação do problema.

Conforme Tucci (2007), para evitar agravar essa problemática, os órgãos públicos devem atentar para os impactos globais na drenagem quando liberam novos projetos, sob pena de criar problemas para a população à jusante e, inclusive, em última instância, serem responsabilizados judicialmente pelas perdas e danos associados. Algo que chama a atenção nesse contexto é que projetos de drenagem e urbanização não são levados em consideração para Estudo de Impacto Ambiental, por parte dos órgãos públicos responsáveis pela emissão desses pareceres, provavelmente por falta de conhecimento. A origem desses impactos acaba tendo duas vertentes, a ocupação das áreas de suscetíveis e a impermeabilização do solo,

ambas ligadas a um desenvolvimento urbano extremamente problemático. Com isso, ocorre a aceleração do escoamento das águas pluviais e inundações, resultando em danos estruturais nas construções e em graves problemas para a população.

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.

O exame das realidades das grandes cidades mostra que a alteração dos rios urbanos, com retificação e transformação em condutos fechados ou em canais abertos, acabou sendo uma escolha equivocada. Embora essas ações resolvam inicialmente alguns problemas de drenagem, as mesmas acabam por aprisionar e acelerar o fluxo desses tributários, colaborando para agravar o problema sistêmico. Em muitos casos as administrações municipais cobrem os canais, para esconder a geração de esgoto doméstico e de resíduos sólidos na cidade, ou para criar artérias de tráfego. Esta atitude pode produzir vários problemas (Tucci, 2007):

- Por conta da liberação dos gases do esgoto a estrutura que cobre o canal acaba se degradando rapidamente e, se não tiver manutenção, pode colapsar, em função da corrosão da armadura ou do concreto, resultando em problemas para a população;
- Como resultado da má educação da população e da alta geração de resíduos sólidos, estes acabam fechando os condutos com o tempo e a água passa a escoar pelas ruas, esclerosando o sistema de drenagem. Além do aumento das inundações, já que estas não passam mais pela tubulação, há também o risco da proliferação de doenças como a leptospirose.

O fato é que muitas cidades se desenvolveram ao longo dos rios, e o processo de urbanização se consolidou nas áreas ribeirinhas, que foram urbanizadas ou usadas, eventualmente, para abrigar redes arteriais de trânsito. A integração urbana através de avenidas de fundo de vale, associada à canalização dos rios urbanos, é uma estratégia perniciososa, pois destrói o sistema natural, estrangula o rio e desobedece a legislação florestal eliminando a área de proteção dos rios. Isto no final acaba comprometendo a qualidade de vida da população.

O problema se agrava pela deficiência na gestão da coleta e deposição final dos resíduos sólidos, questão crítica em áreas densamente povoadas. O lixo residencial em muitas cidades é depositado nas calçadas e fica aguardando a coleta. Se ocorrer uma chuva, o mesmo é carregado e bloqueia o sistema de drenagem conforme ilustra a Figura 1.3. O mesmo acontece com muitos materiais soltos, como papéis e garrafas plásticas, que são arremessados nas ruas pela população. Todos esses resíduos acabam sendo levados pelas águas pluviais para as tubulações de drenagem, prejudicando o escoamento do esgoto pluvial.



Figura 1.3: Resíduos sólidos prejudicando a drenagem urbana em São Paulo
(Fonte: <http://4.bp.blogspot.com>)

Em muitas cidades, o problema da drenagem se agrava devido ao uso de sistemas mistos, com interligação de condutos pluviais e sistemas de esgoto. Isso ocasiona problemas ambientais sérios e aumenta os custos de tratamento das águas servidas, pois é gerada uma maior vazão de esgoto que deve ser tratado adequadamente.

Os desafios da drenagem afetam diretamente as grandes metrópoles, mas não se limitam a elas. Os mesmos estão se agravando nas cidades de médias, onde se concentra o crescimento populacional brasileiro nos últimos anos.

Como explicam Netto *et al.* (2005), o crescimento acelerado ao longo do século XX no Brasil ocasionou o surgimento de grandes cidades na maior parte das Unidades da Federação. O processo de formação dessas grandes metrópoles se deu a partir de um núcleo principal

consolidado, que se estendeu para outras regiões circunvizinhas. Nos últimos anos, todavia, ocorreu um processo de redução nas taxas de urbanização em grande parte das principais metrópoles do Brasil. Verifica-se uma tendência de diminuição do crescimento da cidade principal de uma área metropolitana, com aumento da densidade populacional em regiões de periferia e crescimento do índice populacional em cidades de médias, consideradas pólos regionais de crescimento econômico.

O resultado desse processo todo tem feito com que cidades com população acima de um milhão de habitantes crescessem, em média, a 0,9% por ano. Por outro lado, em núcleos regionais, com população entre 100 e 500 mil habitantes observam-se um índice de crescimento médio de 4,8%. Diante disso o processo de urbanização que antes estava em grandes Regiões Metropolitanas do país, hoje se encontra em cidades de médio porte. Conseqüentemente, os problemas com drenagem estão se espalhando pelo país.

O problema é que as soluções até agora usadas para solucionar o quadro de sobrecarga das redes de escoamento pluvial não têm se mostrado eficientes, basicamente por que as ações corretivas que envolvem aumento da capacidade da rede de drenagem são muito dispendiosas para serem postas em prática ou apenas transferem o problema das águas pluviais de um ponto para outro, localizado à jusante, ou em outra bacia.

Para tanto é necessário desenvolver pesquisas voltadas para a busca de alternativas mais eficientes para controle dos escoamentos, evitando ou reduzindo as enchentes e alagamentos, e favorecendo o processo de infiltração. Segundo Agra (2001), isso implica, resumidamente, em tomar medidas para evitar que seja ampliada a cheia natural existente antes da ocupação da bacia e/ou para controlar as fontes de escoamento que geram o problema.

Para que se obtenha êxito no processo de gerenciamento das águas pluviais, especialistas como o professor Carlos Tucci, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, reforçam que o papel do município é fundamental, através da criação de leis e atitudes preventivas, bem como pela fiscalização no cumprimento dessas normas. Apesar do papel do município ser vital para que estas mudanças aconteçam, Tucci (2007) destaca que existem alternativas ao alcance de qualquer morador da cidade, como o uso de pavimentos permeáveis, calhas que

despejam a água da chuva em jardins, coberturas permeáveis e outras mais. O mesmo enfatiza que o principal objetivo deve ser a recuperação da capacidade de infiltração do solo.

A proposta de trabalho dessa dissertação é justamente avaliar a possibilidade de mitigação do problema através do uso de uma nova tecnologia de pavimentos permeáveis de concreto. Considera-se que esse é uma abordagem justificada pela natureza do problema, como discutido a seguir.

1.2. JUSTIFICATIVA

Devido à preocupação cada vez maior com o desenvolvimento sustentável e a preservação da qualidade ambiental, a mitigação dos impactos provocados pela ação antrópica se torna uma prioridade. Essa é uma obrigação de todas as áreas de conhecimento, mas tem eco especial na engenharia civil, que está associada aos grandes processos de transformação da natureza e produz a infraestrutura necessária para sustentar o desenvolvimento urbano.

É cada vez mais necessário buscar soluções inovadoras para manter o equilíbrio e usufruir dos recursos naturais e dos benefícios da civilização, reduzindo a agressão ao meio ambiente e os conseqüentes impactos na qualidade de vida nas cidades.

O problema de drenagem afeta principalmente países em desenvolvimento, como o Brasil, onde a expansão urbana ainda é muito forte. Por isso se observa que o interesse em estudos voltados para a avaliação da eficiência e a aplicabilidade das medidas para o amortecimento das cheias é maior nesses países. Já nos países onde a ocupação urbana está mais consolidada os desafios envolvem a questão da qualidade da água, e as várias aplicações práticas para conseguir esse objetivo.

Como o Brasil vai necessitar ainda crescer consideravelmente para abarcar sua população, o problema precisa ser enfrentado. A rápida urbanização e a concentração do volume de chuvas em algumas regiões fazem com que o problema ganhe importância e é fundamental investigar alternativas ecologicamente e economicamente viáveis para atacá-lo.

Diante do quadro discutido no item anterior considera-se fundamental buscar novas formas de encarar o desafio da drenagem. As estratégias e obras de drenagens correntes são, em grande

parte, remanescentes do tempo em que se buscava simplesmente se livrar das águas pluviais o mais breve possível, para evitar seu acúmulo nas cidades.

Como destaca Canholi (2005), esse modelo de transferência de vazão foi satisfatório em certos momentos históricos, mas certamente não é eficiente na realidade global atual, especialmente nas grandes aglomerações urbanas.

Além de não solucionarem o problema, as obras de drenagem tradicionais frequentemente envolvem altos custos e transtornos à população. Estima-se, por exemplo, que até a década de 90, a administração de São Paulo tenha gasto na ordem de US\$ 50 milhões por quilômetro de canal implantado (Tucci, 2007).

Infelizmente, a visão de resolução do problema por um simples processo de aumento da vazão pela canalização ainda persiste no Brasil, embora já tenha sido registrado, nos países desenvolvidos, que essa estratégia é insustentável economicamente, além de provocar danos ao meio ambiente e transferência de responsabilidade dentro dos centros urbanos.

Ou seja, até agora a resposta ao crescimento do fluxo das águas pluviais, problema cada vez mais importante em médias e grandes cidades, em muitos casos foi simplesmente promover obras para efetuar o transporte desses grandes volumes para redes de escoamento, sem recuperação das funções naturais de infiltração e armazenamento do solo. Isso gera um alívio temporário, pois o contínuo crescimento das cidades no Brasil acaba agravando novamente o problema. Dessa forma, a estratégia atual acaba gerando um aumento de custos em dois momentos. Primeiramente, quando são desenvolvidos projetos inadequados de drenagem urbana; e segundo, quando é preciso investir mais dinheiro para recuperar áreas inundadas por conta de más decisões de gerenciamento.

Cabe enfrentar esse problema, pois os prejuízos associados a enxurradas são muito elevados. Pode-se tomar como exemplo a enxurrada que atingiu o município de São Leopoldo, no Rio Grande do Sul, em 2011. Segundo Bertinelli (2011), a administração local estimou que fossem necessários cerca de R\$ 1,7 milhão para amenizar os estragos causados pela chuva. Esses gastos envolvem apenas a aquisição de cestas básicas, eletrodomésticos, reparação de danos no Hospital Centenário e locação de casas para a acomodação das famílias atingidas, não contabilizando os prejuízos e perdas privados.

Por tudo isso se considera fundamental estudar alternativas para ajudar a gerenciar a questão da drenagem urbana, mitigando o problema das enxurradas e alagamentos urbanos. Como enfatiza Canholi (2005), a frequência e gravidade das inundações evidenciam a necessidade de procurar soluções alternativas estruturais e não estruturais; e mesmo de conhecer melhor a fenomenologia climatológica, ambiental, hidrológica e hidráulica do problema, além de seus componentes sociais com relação à habitação, saúde, saneamento e aspectos político-institucionais.

O desafio é grande e multidisciplinar. Buscando colaborar, fornecendo subsídios para seu enfrentamento, esse trabalho se propôs a investigar uma alternativa para redução do problema da falta de infiltração, através do estudo e caracterização de traços de concretos permeáveis, que poderiam ser usados em pavimentos e elementos de drenagem.

Como será discutido em maior detalhe no capítulo 3, o concreto permeável tem sido utilizado em uma larga escala nos EUA e Europa, para os mais diversos fins. Entretanto, a sua utilização aqui no Brasil é muito pouco difundida, havendo poucos trabalhos publicados e nenhuma norma nacional.

1.3 OBJETIVOS

A seguir apresentam-se os objetivos propostos para o trabalho.

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa foi o desenvolvimento e a avaliação do desempenho ambiental de um traço de concreto permeável, tecnicamente adequado e economicamente viável, para uso em sistemas de drenagem urbanos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- a) realização de ensaios (resistência mecânica e permeabilidade) para caracterizar e permitir a seleção de um traço padrão para o concreto permeável;

- b) analisar os aspectos positivos do concreto permeável em relação ao concreto convencional;
- c) integração dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório com os aspectos ambientais e os custos de produção do concreto permeável;

1.4. LIMITAÇÕES

Devido às limitações de tempo e escopo naturais de uma dissertação, o presente trabalho só abordou alguns traços de concreto permeável com um tipo de agregado.

Os traços foram caracterizados somente pela resistência à compressão e permeabilidade, não sendo efetuados estudos de desgaste superficial ou tamponamento (*clogging*), fundamentais para que se pudesse avaliar a vida útil de pavimentos permeáveis.

Por fim, as análises dos impactos foram limitadas a situações simples, especialmente análise de possibilidade de infiltração se o concreto permeável fosse empregado em áreas de estacionamento ou de trânsito de veículos leves de grande dimensão.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho de pesquisa foi estruturado em 6 capítulos. O capítulo 1 mostra uma caracterização do problema onde se insere esta pesquisa justificando e apresentando o tema, bem como os seus objetivos e as limitações.

Em seguida, o capítulo 2, detalha a questão da drenagem urbana, a sua situação atual, as conseqüências de tomadas de atitudes errôneas quanto a esta e a sua necessidade de mudanças, sobretudo quanto à impermeabilização do solo.

O capítulo 3 explica as principais características da fabricação de concretos permeáveis tendo como base, principalmente, dados extraídos da literatura.

Quanto ao capítulo 4, esse detalha o programa experimental desenvolvido para atingir os objetivos propostos, os traços, e ensaios, utilizados nesta pesquisa e outras informações pertinentes sobre o desenvolvimento da mesma.

No capítulo 5 se apresentam e discutem os resultados obtidos, relativos em particular à permeabilidade do concreto permeável obtido com os traços e procedimentos adotados. Além disso, traz algumas simulações efetuadas para analisar os eventuais benefícios técnicos e ambientais advindos do uso desse tipo de concreto, ainda pouco conhecido no Brasil.

O capítulo 6 contém as conclusões que podem ser extraídas do presente trabalho, assim como recomendações para o prosseguimento dos estudos na área.

Capítulo 2 – DRENAGEM URBANA

Este capítulo apresenta uma revisão dos problemas e desafios associados à gestão das águas pluviais, com foco nos problemas associados à drenagem urbana, destacando as consequências do processo gradual de impermeabilização do solo.

2.1 O DESAFIO DA DRENAGEM URBANA E O PAPEL DO CONCRETO PERMEÁVEL

Desde que o homem começou a se organizar em núcleos urbanos, a gestão das águas pluviais passou a ser um dos desafios a serem enfrentados pela administração pública. Quando as cidades tinham menor porte esse desafio tinha menor grandeza, especialmente porque grande parte dos núcleos urbanos mais antigos surgiram à beira de corpos de água, que eram receptáculos naturais do fluxo de águas pluviais, e, em muitos casos, eram usados como meio para retirada dos dejetos, auxiliando no saneamento urbano.

Todavia, com o crescimento das cidades, o desafio começou a se avolumar, pois os volumes de águas pluviais se tornaram muito maiores e as redes de escoamento se tornaram mais longas e complexas. Em muitos casos, passou a ser necessário bombear a água para que a mesma atingisse os canais naturais de drenagem.

O processo natural na drenagem urbana normalmente envolve a movimentação das águas precipitadas das chuvas no sentido de montante (nascentes/lugares mais altos) para jusante (foz/baixadas), conforme as características do relevo.

Como explica Tucci (1997), vários fatores trazem consequências indesejadas para o sistema de drenagem urbana quando as cidades crescem, tais como:

- a) aumento das vazões máximas, dos volumes escoados e antecipação dos picos devido a uma maior capacidade de escoamento através dos condutos e canais e impermeabilização das superfícies;

- b) redução da evapo-transpiração, do escoamento subterrâneo e 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, transporte de material sólido (principalmente no início das chuvas) e às ligações clandestinas de esgoto cloacal no pluvial.

Ao longo do tempo, na grande maioria dos casos, a solução adotada para lidar com o desafio da drenagem envolveu a construção de sistemas de drenagem cada vez maiores, para tentar escoar os crescentes volumes de águas pluviais ingressantes no mesmo da maneira mais rápida possível da área de origem para outras à jusante.

Contudo, dada a incapacidade do poder público de construir sistemas adequados na mesma proporção que a ocupação urbana avança, grandes porções das cidades modernas são dotadas de sistemas de macro-drenagem deficientes, o que acarreta riscos elevados de ocorrência de inundações, que podem ser agravadas pelas enchentes dos corpos de água, ocasionando sérias consequências em termos de perdas sociais e econômicas.

Ciria (1996, apud Acioli, 2005, p.3) cita, como principais danos resultantes do processo de urbanização, os seguintes:

- a) aumento no volume do escoamento superficial;
- b) aumento da frequência das inundações, assim como de sua intensidade;
- c) redução da umidade do solo, que leva a uma redução do lençol freático;
- d) diminuição do escoamento de base de rios;
- e) redução do armazenamento potencial, e da capacidade de transporte dos vales dos rios;
- f) aumento na carga de poluentes decorrente da rede pluvial ou do escoamento superficial.

As águas pluviais provenientes de loteamentos, assentamentos e ocupações irregulares ou mal concebidas sobrecarregam os sistemas existentes e colocam o sistema em condições de colapso, fazendo com que cada chuva mais intensa seja um prenúncio de desastres.

A sobrecarga da drenagem secundária (condutos) gera alagamentos disseminados no tecido urbano, afetando as vias de tráfego. A rápida descarga dos sistemas pluviais nos corpos de água, por sua vez, faz com que haja a sobrecarga dos elementos de macro-drenagem (riachos e canais), que são os grandes responsáveis pelo escoamento da água de grande parte das áreas metropolitanas. Se os corpos de água principais tiverem tendência para formação de enchentes, o problema pode assumir grandes dimensões, como se observa de forma recorrente em São Paulo, onde as inundações do rio Tietê e, em menor escala, do rio Pinheiros, geram grandes transtornos à população.

É interessante notar que as áreas localizadas a montante podem contribuir fortemente para esse quadro, mas não são muito afetadas, enquanto aquelas localizadas a jusante sofrem diretamente os efeitos do mesmo, mesmo quando dotadas de redes de escoamento mais antigas e que haviam sido bem dimensionadas, na época de sua implantação.

Apesar da frequência e gravidade do problema, e da sua visibilidade, verifica-se que muitas cidades de médio e grande porte do Brasil não investem na solução do mesmo ou adotam estratégias errôneas e inadequadas acerca da implantação dos sistemas de drenagem.

Como explica Canholi (2005), a estratégia de construir sistemas de drenagem cada vez maiores não é sustentável. Ao contrário, o paradigma atual faz com que seja despendido um elevado montante de recursos para a construção de sistemas de grande porte (tais como dutos forçados, canalizações de elevadas dimensões, diques com bombeamentos, reversões e barragens), que demandam fortes intervenções no tecido urbano estruturado para sua instalação e que não conseguem, isoladamente, resolver o problema.

Um sério problema com essa abordagem, além dos elevados custos para a população e para o poder público, é que, ao não promover uma política de redução dos volumes escoados, todas as intervenções acabam se tornando obsoletas. Com o crescimento e impermeabilização das cidades, os volumes de água que necessitam ser escoados vão se tornando gradualmente maiores, eventualmente superando a capacidade instalada.

A principal preocupação, nesse quadro, é fazer com que as águas pluviais sejam canalizadas e retiradas, o mais breve possível, dos trechos críticos. Ao mover grandes fluxos para outros locais, no entanto, simplesmente se acaba, em muitos casos, transferindo o problema de uma área para outra.

Encarar o desafio é fundamental, pois os problemas de drenagem urbana acabam acarretando diversas consequências danosas, incluindo inundações, escassez hídrica e problemas de saneamento e saúde pública devido ao contato da população com água contaminada durante as inundações.

O problema nas grandes metrópoles está assumindo tal dimensão que acaba provocando uma retomada de condições sanitárias similares às prevalentes antes da Revolução Industrial, o que possibilita o retorno de uma série de doenças endêmicas que se considerava superadas. Netto *et al.* (2005) registram que já há uma incidência preocupante de casos de leptospirose e disenterias associados a más condições de drenagem urbana.

Além disso, podem surgir outros problemas, tal como a proliferação de algas tóxicas em açudes, represas, lagos e áreas costeiras, por conta da sobrecarga de nutrientes que chega a estes locais devido ao escoamento de grandes volumes de águas pluviais contaminadas e poluídas.

Para superar o desafio da drenagem urbana, vários autores, tal como Canholi (2005) e Tucci (2007) consideram que é necessário mudar o paradigma e começar a adotar, nos estudos de macrodrenagem, uma visão mais holística de gestão das águas, que considere toda a bacia envolvida e busque promover um equilíbrio entre a quantidade de água escoada e infiltrada.

Nessa nova abordagem o uso de pavimentos permeáveis acaba sendo uma importante contribuição. Os concretos permeáveis são um tipo de pavimento altamente eficiente, que não só podem ajudar na infiltração, mas também atuar como reservatórios temporários de um considerável volume de água. Por isso, considera-se que os mesmos podem ter um papel fundamental na gestão de águas pluviais. Dada a ausência de estudos sobre o tema no Brasil considera-se fundamental começar uma linha de pesquisa na área.

2.2 ASPECTOS NEGATIVOS RELACIONADOS À IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO

Parkinson e colaboradores (2003) mencionam que quando não há um planejamento adequado do solo, sem qualquer fiscalização, ocorrem grandes problemas. Onde há a ocupação de áreas de várzea pela população de baixa renda, esta, além de estar sujeita a muitos problemas, como as inundações, acabam prejudicando o sistema natural de drenagem de grande corpos hídricos. E levando-se em conta que esta é uma prática comum em todo o País, isto compromete seriamente os sistemas de drenagem urbana.

Agra (2001) defende a idéia de que o fator determinante que agrava a questão da drenagem urbana é a impermeabilização do solo associada à ocupação urbana. A criação de casas, associada à pavimentação de jardins e ruas, de fato gera uma camada impermeável contínua e de grande extensão, que direciona toda a água precipitada, rapidamente, para o sistema de escoamento ou para os corpos de água existentes na região.

Tucci (1993b) reitera essa idéia, afirmando que o principal fator que afeta o escoamento superficial das águas é a urbanização sem qualquer controle que se observa em diversas cidades do País.

O processo de impermeabilização do solo faz com que este perca a sua capacidade natural de infiltração. Onde antes as águas percolavam naturalmente no solo, são instalados elementos impermeáveis, tais como lajotas de basalto, concreto asfáltico ou concreto portland. Isso aumenta o volume de escoamento superficial e favorece o rápido transporte das águas para as áreas mais baixas, favorecendo a ocorrência de inundações.

Conforme avança o processo de impermeabilização do solo, nota-se que os impactos sobre o ciclo hidrológico das regiões afetadas vão se agravando. Uma das consequências é a redução do nível do lençol freático, que deixa de ser reabastecido pelas chuvas. Lerner (1990), fala numa perda de 10 a 50% nas redes de abastecimento de águas, nos grandes centros urbanos. Esse volume, que escoas das redes urbanas, juntamente com a precipitação, acaba recarregando os aquíferos, que recebem vazões entre 100 e 300mm/ano. Outra é a alteração da movimentação do fluxo de água na bacia.

Tucci (1995) explica que, com a crescente impermeabilização, a bacia perde a sua funcionalidade, pois os pontos de detenção natural e a capacidade das plantas de ajudar a reter parte dessa água também se perdem com essas alterações. Dessa forma, há uma maior necessidade de tubulações, retificações de rios e revestimento de canais, para o gerenciamento dessas águas.

Essas alterações acarretam um aumento do hidrograma. Onde antes as águas pluviais percolavam naturalmente no solo, agora isso não ocorre, fazendo com que estas permaneçam em alguns locais mais baixos, provocando muitos transtornos, conforme ilustra a Figura 2.1.

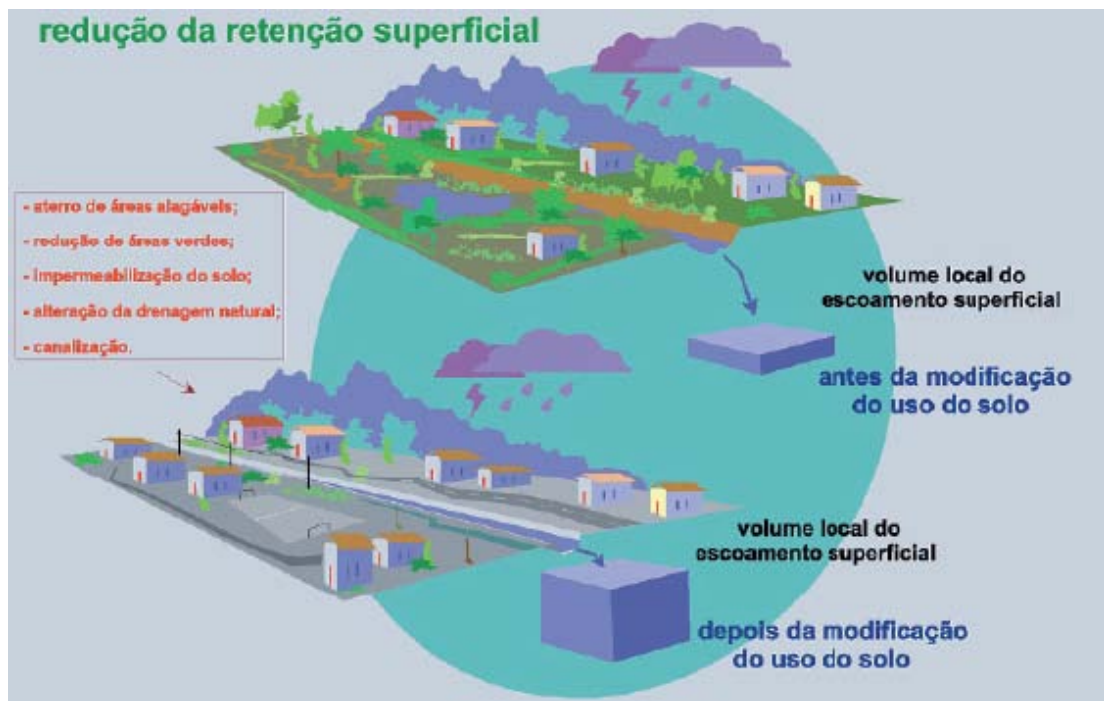


Figura 2.1: Comparação entre o hidrograma antes e depois do processo de urbanização (Fonte: Polastre e Santos, 2006)

Para tentar prever as consequências da impermeabilização crescente do solo, e convencer as autoridades da importância de reverter essa tendência, autores como Mota Jr. e Tucci (1984) e Campana e Tucci (1994) realizaram simulações, tomando como base pesquisas censitárias e cruzando os dados com os de densidade populacional, considerando diferentes cenários de crescimento da população.

Buscando contribuir para estudos do impacto da densificação populacional, Mota Jr. e Tucci (1984) ajustaram uma equação de regressão múltipla, correlacionando a área impermeável a parcelas da bacia com diferentes tipos de densidade populacional, sendo os dados obtidos a partir da análise de aerofotos da região da bacia do Arroio Dilúvio, na cidade de Porto Alegre. Os autores evidenciam que, em termos de índices populacionais, pode existir uma vantagem para a ocupação com edifícios, visto que a densidade habitacional é superior à registrada em casas, para quantidades semelhantes de área impermeável.

Posteriormente, Tucci *et al.* (1989) analisaram informações de 11 bacias urbanas das áreas metropolitanas de São Paulo e de Porto Alegre. Os mesmos chegaram à conclusão que existem semelhanças e fizeram ajustes para que se obtivesse uma curva média nos dois municípios.

Campana e Tucci (1994) coletaram dados de São Paulo, Curitiba e Porto Alegre, efetuando uma nova correlação entre áreas densamente povoadas e valor percentual de impermeabilização do solo. Os mesmos concluíram que, para áreas com densidades populacionais menores que 120 hab/ha, a relação é praticamente uniforme e pode ser representada pela equação: $AI = 0,489.DH$ (onde AI é o percentual de área impermeável e DH é a densidade habitacional, em habitantes por hectare). Já em regiões com densidades populacionais maiores que 120 hab/ha, os autores consideram que existe uma tendência de estabilização da quantidade de área impermeável num valor que se situa por volta de 65% da área plana total.

Com a retirada da vegetação e a alteração do ambiente, além da perda de capacidade de infiltração no solo, ocorre também uma importante redução da evapotranspiração. Como explica Tucci (2007), com a ausência de cobertura vegetal, que retém água no seu interior, as superfícies impermeáveis acabam não desempenhando essa importante função. Consequentemente, o equilíbrio térmico é impactado. Nas grandes cidades, onde existem muitos telhados, asfaltos e construções semelhantes, ocorre retenção de calor, sendo que, em dias mais quentes, esse fenômeno é abrandado pela evapotranspiração. Quando o solo está seco, essa compensação não ocorre.

Ide (1984) realizou uma medição na temperatura da água em um canal pluvial, e constatou valores aproximados de 30°C, numa zona próxima do centro de Porto Alegre, em dias mais quentes. Entretanto, como o fluxo das águas pluviais, em áreas com impermeabilização, é rápido, muitas vezes, não há chance dessa água ficar retida pelo solo, provocando uma redução de evapotranspiração, em algumas áreas urbanas. Como explica Tucci (2007), isso acaba contribuindo para o problema do aquecimento global.

Outro ponto importante associado à questão da falta de gerenciamento das águas pluviais, com incremento do escoamento superficial, envolve o carreamento de resíduos sólidos. Neves (2006) aponta que, em conjunto com a urbanização descontrolada das grandes cidades e da impermeabilização do solo por concreto e asfalto, existe uma tendência de incremento da geração de resíduos sólidos, que ficam muitas vezes armazenados nas ruas, à espera de coletas, e são carreados pelas enxurradas, obstruindo as canalizações e aumentando os problemas de drenagem. Além dos problemas de drenagem, o carreamento dos resíduos sólidos provoca uma deterioração da qualidade da água, o que pode ameaçar os sistemas de abastecimento de água.

Como explica Porto (2001), as enxurradas, com fluxos de alta velocidade, carregam muito material solto ou solúvel para os corpos hídricos, que passam a receber cargas absurdas de poluentes, comprometendo a sua qualidade. Esse fluxo de água é aumentado por conta da impermeabilização de grandes áreas urbanas e se torna uma importante fonte de degradação da qualidade de água em rios, lagos e estuários localizados próximos a aglomerações urbanas. Hoje em dia, nesses ambientes, já são encontrados vários poluentes nocivos, inclusive metais pesados, que comprometem o equilíbrio ecológico da natureza de tal maneira que para reverter essa situação são necessários altos investimentos.

Os problemas causados pelo fluxo excessivo, ou contaminado, de águas pluviais para corpos de água podem ser classificados em dois grupos: (a) modificações hidrológicas e morfológicas; (b) perda da qualidade e perturbação da ecologia aquática. Os mesmos podem tomar várias formas, tais como erosões e mudanças de morfologia, lavagem de material acumulado no solo, aumento da turbidez, enriquecimento de nutrientes com proliferação de algas, contaminação bacteriológica, perda de oxigenação devido à recepção de grandes cargas de matéria orgânica, presença de metais pesados e materiais tóxicos, aumento de temperatura

e disseminação de detritos e resíduos sólidos. Além de comprometer a qualidade da água, esses problemas ocasionam a diminuição da diversidade de peixes e/ou a redução das fontes alimentares destes (insetos e outros invertebrados), devido a mudanças na temperatura da água, nos níveis de oxigênio ou no desequilíbrio populacional de espécies. (SCHUELER, 1987 apud Neves, 2006, p.4).

A situação em países em desenvolvimento, como o Brasil, é muito preocupante porque o que se constata é que muitos Estados não possuem um bom sistema de coleta. Por outro lado, naqueles onde há sistema de coleta e transporte de resíduos, muitas vezes, estes não conseguem coletar 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. Este material acaba obstruindo sistemas de drenagem, já bastante saturados com altas vazões de águas pluviais, por conta da impermeabilização urbana (Neves, 2006).

São freqüentes os exemplos de problemas dessa natureza citados na literatura. Porto (2001) destaca a situação da África do Sul, onde grande parte da produção gerada acaba tendo como destino as redes de drenagem. Nas mesmas é comum encontrar diversos materiais, como sacolas de plástico, latas, garrafas de vidro, papelão, garrafas PET e muitos outros. Marques (2011a), analisando as enxurradas que ocorreram na Região da Grande Porto Alegre no início de 2011, destaca a contribuição da grande quantidade de resíduos sólidos presentes no Arroio João Corrêa, em São Leopoldo, que prejudicou o funcionamento da casa de bombas, represando a água e parando os serviços por cerca de duas horas. Para reverter essa situação, foi necessário remover manualmente o material acumulado. Já Marques & Stieler (2011b) relatam o caso do Arroio Kruse, em São Leopoldo, que foi afetado pelo acúmulo de resíduos sólidos durante o período com grande volume de chuvas que castigou a região no início de 2011, resultando num transbordamento que afetou dezenas de famílias que residem nas imediações desse corpo de água. Para remediar a situação foi necessário efetuar uma limpeza dos locais de acúmulo, durante a qual se encontrou uma grande variedade de materiais descartados, tais como garrafas PET, brinquedos, peças de carro, pneus e até cobertores.

Silveira (2001) estimou que aproximadamente 2% do total de resíduos sólidos produzido em Bangkok, Tailândia, alcançava rios e canais, destacando que, numa cidade com cinco milhões de habitantes, 25% dos resíduos sólidos não têm destinação adequada. Armitage e Roseboom

(2000) estimaram que cerca de 24 toneladas, ou 18% do total encontrado nas ruas, chega, por dia, ao sistema de drenagem urbana em Cape Town, na África do Sul.

Tucci (2001) destaca que, lamentavelmente, outro fator que acaba contribuindo com o aumento do volume de resíduos sólidos no sistema de drenagem urbano, é que, em países em desenvolvimento, como o Brasil, as pessoas conscientemente usam os corpos de água, o sistema de drenagem e os córregos para descarte de materiais inservíveis e lixo.

Um ponto positivo, que tem auxiliado o poder público para tentar reverter essa situação, é o destaque dado ao assunto em anos recentes pelos meios de comunicação. No Brasil, a exposição desse problema nos principais meios de comunicação tem crescido com o passar dos anos, sobretudo por causa da conscientização ambiental. Contudo, menciona-se que pelo menos 5%, ou 600 toneladas de resíduos sólidos, produzidos por mês, em Cuiabá, caem no solo e, sem coleta, quase sempre acabam no rio Cuiabá (Saneamento Básico-a, 2002 apud Neves, 2006, p.16). Os canais, lagoas e rios que cortam a região da Barra da Tijuca, Japareaguá e Recreio dos Bandeirantes são obstruídos frequentemente com a ocorrência de chuvas (Saneamento Básico-b, 2002 apud Neves, 2006, p.16). O rio Capibaribe, em Recife, recebe continuamente resíduos de uma população estimada de 430.000 habitantes em seu retorno (Figueiredo et.al., 2002). Em São Paulo, capital, estima-se que, a cada final de semana, 60 toneladas de resíduos sólidos sejam retirados das marginais dos rios Tietê e Pinheiros e das grandes avenidas, como a Rebouças e a Av. 23 de maio. Do leito do Tietê, em quase dois anos, foram dragadas 11mil toneladas de material (Folha, 2004 apud Neves, 2006, p.16). Esses, dentre muitos outros exemplos, indicam que a coleta desse material ainda é extremamente deficitária no nosso país. São poucos os municípios que possuem um adequado sistema integrado de coleta, transporte e destinação desses materiais.

O impacto representado pela geração de resíduos sólidos é bastante significativo, porque a sua produção é altíssima. Deve-se levar em consideração o que é coletado em residências, na indústria e comércio, mais o total coletado nas ruas e o que termina no sistema de drenagem. E, conforme previamente mencionado, adicionado a essa equação há a questão de que o sistema de coleta desses resíduos é limitado, assim, estes acabam no sistema de drenagem obstruindo, ou no meio ambiente, degradando-o. O material sólido urbano não coletado representa subsídio ambiental recebido pela sociedade que polui este sistema.

A quantidade de material que acaba nos sistemas de drenagem dos centros urbanos, tem ligação direta com a eficiência destes serviços e outros fatores como: frequência e cobertura da coleta de lixo, frequência da limpeza das ruas, reciclagem, forma de disposição do lixo pela população e a frequência da precipitação. Descobriu-se que cerca de 2 a 67kg/ha/ano de resíduos sólidos chegam aos sistemas de drenagem (Neves, 2006).

O tipo de material que acaba na drenagem urbana, obstruindo esses sistemas e comprometendo a qualidade dos serviços, depende do tipo de urbanização que existe no local. Ou seja, quanto maior o desenvolvimento de determinada sociedade, maior o consumo e, conseqüentemente, maior a geração de resíduos sólidos. Outra questão é quanto à existência ou não de um bom sistema de coleta e disposição desses materiais. Nas últimas décadas houve uma explosão de vendas de materiais plásticos, substituindo embalagens de vidro. O plástico é um material que não se degrada facilmente e, em alguns casos, tem baixo índice de reciclagem. Com isso, esse material permanece nos corpos hídricos, prejudicando toda a biota existente nesses ambientes.

Outra questão pertinente é que o Brasil enfrenta um ciclo de crescimento e já foi constatado que, quanto mais rica e desenvolvida for determinado tipo de sociedade, maior o consumo de produtos e, conseqüentemente, maior a geração de resíduos.

Neves (2005, apud Tucci, 2007, p. 112), na sua pesquisa, tentou classificar os resíduos sólidos que terminam no sistema de drenagem e aqueles que saem à jusante, numa bacia com área de cerca de 1 km², na cidade de Porto Alegre. O mesmo constatou que 70% do material sólido acaba no sistema de drenagem, sendo que 36% desse volume corresponde a resíduos de papel, que termina diluído na canalização do sistema. Dessa forma, aproximadamente 34% desses resíduos acabam permanecendo na drenagem.

Guedes (2011) menciona, que, de acordo com Silvio Klein, presidente do Comitêsinsos, um dos Comitês de Gestão de Bacias do Rio Grande do Sul, o problema do descarte de resíduos sólidos é um problema cultural, pois grande parte da população não dá destino correto aos seus resíduos, despejando-os nas vias públicas, o que agrava os problemas de drenagem. Outro ponto importante é a falta de planejamento do poder público, que não leva em

consideração os efeitos da combinação de urbanização de várzeas com ocorrência de chuvas torrenciais na elaboração de planos diretores de ocupação urbana.

Guedes (2011) reforça que é preciso uma reeducação por parte da população acerca do descarte correto dos seus resíduos. Ele cita como bom exemplo a cidade de Canoas, pertencente à Grande Porto Alegre, onde iniciativas educacionais da administração pública procuram conscientizar catadores para evitar que os mesmos rasguem os sacos plásticos, deixando o material solto para ser levado até os corpos hídricos pelas enxurradas. Outras ações foram implantadas, como autorizar a colocação dos detritos nas vias somente próximo ao horário de coleta e proibir o descarte de materiais próximo a arroios, rios e córregos, pois estes acabam por ingressar nos corpos d'água, causando problemas.

Para reverter esse quadro é preciso contar com a colaboração de todos. Um dos pontos principais para se tentar alterar o cenário é, sem dúvida, a conscientização da população, que frequentemente acaba descartando seus resíduos em locais inadequados. Mas a redução da impermeabilização do solo, assim como um sistema eficiente de coleta de resíduos sólidos, também são fatores positivos e que podem ajudar a mitigar o problema. Nesse âmbito, o uso do concreto permeável é visto como uma alternativa que pode ajudar a reduzir os fluxos de escoamento superficial e melhorar o desempenho da rede de drenagem.

Porto (2001) salienta que a melhoria da drenagem é um aspecto que merece e necessita ser mais bem explorado. Existe uma preocupação intensa com a poluição originada do esgoto sanitário, que realmente tem participação importante no processo de degradação da qualidade da água. Entretanto, para melhorar a qualidade dos corpos de água urbanos é preciso, também, cuidar das águas pluviais provenientes do rápido escoamento das chuvas, resultado da impermeabilização do solo, pois estas se contaminam ao passar por locais como áreas em construção, depósitos de resíduos sólidos, industriais, de saúde e outros.

Esse tipo de poluente gera uma grande preocupação por parte de especialistas e entidades que lidam com esse tipo de impacto ambiental, o que ocasionou o desenvolvimento de muitos trabalhos, como a pesquisa de Neves (2006), para estudar e mitigar seus efeitos, inclusive na região de Porto Alegre.

Uma das grandes preocupações é o excesso de nutrientes, que causa sérios desequilíbrios na fauna e flora aquáticas. Segundo Schueler (1987, apud Neves, 2006, p.11), em um estudo a maior quantidade de nutrientes foi encontrada em locais com superfícies impermeáveis. O autor destaca, em particular, a questão do fósforo, que pode ser transportado na forma dissolvido e que é facilmente assimilado pela natureza.

Quando grandes volumes de nutrientes chegam aos corpos hídricos, ocorre o processo de eutrofização nessas águas, sobretudo em áreas à jusante. Em situações, em que o tempo de residência excede em duas a três semanas, as chances aumentam exponencialmente.

Wong et. al. (2000) destacam que um sistema de esgotamento velho e com manutenção deficiente, contaminado com matéria vegetal, resíduos sólidos orgânicos, fertilizantes, resíduos de cozinhas e óxidos nitrosos originados de veículos automotores pode ter um papel determinante no aumento da quantidade de nutrientes nos corpos de água de centros urbanos. Entretanto, salientam que esse quadro pode ser revertido com a adoção de melhores técnicas de gestão (*Best Management Practices – BMP*), que promovam mudanças no design das estruturas de gestão de águas pluviais e auxiliem a implementar outras medidas remediadoras.

A ação de agentes bactericidas também tem se mostrado um fator importante quanto à questão da poluição das águas pluviais, devendo ser levada em consideração em estudos dessa natureza. Schueler (1987, apud Neves, 2006, p.12) menciona que um ambiente urbano produz uma alta carga de bactérias, sobretudo nas áreas mais antigas. Em locais extremamente saturados, no que se refere a sistemas de drenagem urbana, essa se torna uma questão de maior peso. Wong et. al. (2000) afirmam que nas águas de drenagem dessas áreas é grande a chance de serem encontrados coliformes fecais e patogênicos como a *Salmonella*, tendo como fonte principal o esgoto sanitário e fezes de animais. Esses vetores acabam não só afetando a saúde da população, mas, também, degradando o meio ambiente. No seu trabalho de pesquisa, Ide (1984) encontrou valores pelo menos 10.000 vezes maiores que o admissível de coliformes fecais em alguns pontos do lago Guaíba. Uma alternativa para enfrentar esse problema seria a adoção de biorretenção, onde se usam biofilmes, ou seja, espécies vegetais, para a absorção desses poluentes.

A perda da oxigenação quando os volumes de água trazidos pela rede de drenagem atingem os corpos de água é outro problema sério. Para Schueler (1987, apud Neves, 2006, p.12) a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) pode exceder 10 ou 20 mg/L durante os “pulsos” das tormentas, o que gera condições anaeróbicas. A perda do oxigênio dissolvido diminui a qualidade de vida de ambientes aquáticos, ocasionando, muitas vezes a mortandade de peixes. Ide (1984), durante o seu trabalho, encontrou valores de DBO entre 1,3 e 97,9 mg/L, com uma média de 31,8 mg/L, numa série de eventos. Consequentemente, logo após o início do escoamento houve sempre diminuição no oxigênio dissolvido, sendo que em geral a condição inicial foi recuperada após cerca de 30 minutos.

Schueler (1987, apud Neves, 2006, p.12) destaca que foram observados altos valores de DBO em áreas densamente povoadas com grande quantidade de superfícies impermeáveis, esgotamento obsoleto e muitas populações de animais domésticos. Por outro lado, em áreas suburbanas, com boa preservação de áreas verdes e baixo número de habitantes, esse quadro não se constituiu, sendo possível manter um meio ambiente equilibrado, propício para a ocorrência de muitas espécies de plantas e animais, não apenas de peixes.

Outra questão alarmante é a presença de metais pesados nas águas de drenagem pluvial, além de materiais orgânicos e entulhos. São encontrados nas águas pluviais materiais tóxicos que acabam impactando o lençol freático, por conterem altas concentrações de arsênico, berilo, cádmio, cromo, cobre, mercúrio, níquel, chumbo, selênio e zinco. Os contaminantes mais comumente encontrados em corpos de água urbanos, e algumas de suas principais fontes de origem, são citados na Tabela 2.2.1.

Tabela 2.2.1.: Principais fontes de metais pesados transportados pelas redes de drenagem de águas pluviais. (Fonte: Wong et. al., 2000)

Fonte	Cádmio (Cd)	Cromo (Cr)	Cobre (Cu)	Níquel (Ni)	Chumbo (Pb)	Zinco (Zn)
Desgaste de pneus de veículos e pastilhas de freio	X		X			X
Corrosão de objetos de metal						X

Tabela 2.2.1.(cont.): Principais fontes de metais pesados transportados pelas redes de drenagem de águas pluviais. (Fonte: Wong et. al., 2000)

Fonte	Cádmio (Cd)	Cromo (Cr)	Cobre (Cu)	Níquel (Ni)	Chumbo (Pb)	Zinco (Zn)
Aditivos de petróleo					X	
Óleo de lubrificação	X					
Produtos domésticos e de indústria metálica	X	X	X	X		
Pesticidas, fertilizantes e produtos químicos industriais	X	X				
Tintas e corantes		X				
Partes de motores		X				
Papel		X				

Ainda sobre esse tema, é importante lembrar que parte dos metais permanecem na atmosfera e se armazenam em telhados e outras superfícies, sendo “lavados” durante as chuvas. Chebbo et. al. (2001) encontraram, durante o desenvolvimento do seu projeto em Paris, na França, que analisava a produção e o transporte de poluentes para a rede de esgoto, altas concentrações de zinco e chumbo na águas, durante um período seco, porém numa proporção 20 a 30 vezes inferior do que a registrada nos escoamentos de telhados e 10 vezes menor que a concentração média registrada nas canalizações de esgoto.

Outra questão relacionada ao aumento do fluxo de escoamento superficial diz respeito à erosão e carreamento de partículas, que provoca turbidez e assoreamento dos corpos de água. Segundo Tucci (2001), isso está associado a um processo de desenvolvimento urbano não controlado, que faz com que o solo fique desprotegido, produzindo uma grande erosão e aumentando a quantidade de sedimentos.

Em áreas de desenvolvimento, os processos de movimentação de terra associados à construção e urbanização de lotes contribuem decisivamente para esse fluxo. Já em áreas com

o desenvolvimento estabilizado, os sedimentos tendem a se originar em áreas das bacias afetadas pela ausência de controle contra assoreamentos e erosão, devido à perda de vegetação ou características geomorfológicas, como explica Schueler (1987, apud Neves, 2006).

Ide (1984) constatou que um dos principais motivos pelo qual é encontrada uma enorme quantidade de resíduos na rede de drenagem, é a carência de limpeza das ruas. Na bacia urbana de Porto Alegre, em uma área com um tráfego médio de veículos, os programas de varrição e seus equipamentos não eram eficientes, sendo capazes, no máximo, de realizar um trabalho de resultado estético no local. Isso acaba representando um problema, porque, conforme visto anteriormente, grande parte do material remanescente acaba se dirigindo para o sistema de drenagem, causando sérios danos ao seu funcionamento. O autor observa que, na bacia onde foi efetuado o estudo, que é cortada por uma avenida principal, a frequência de varrição era baixíssima. Após uma chuva intensa, a quantidade de material arenoso carregada pelo escoamento superficial e depositada nessa avenida, que foi recolhida emergencialmente para evitar prejuízos ao tráfego de veículos, chegou a 12 carrinhos com 100 litros cada.

Um bom exemplo de varrição em centros urbanos foi registrado por Chebbo et. al. (2001), no centro histórico de Paris. O mesmo relata concentrações muito baixas de sólidos suspensos na bacia de Marais, fato associado a práticas de limpeza intensas. Nessa região as sarjetas são varridas todos os dias, e, juntamente com as calçadas, são lavadas entre duas e cinco vezes por semana. Aspiradores móveis de pó são utilizados na maioria das ruas da região cinco dias por semana. Dessa forma, os poluentes são reduzidos, facilitando a drenagem, que também é favorecida pela considerável quantidade de área permeável existente na região.

Essa experiência demonstra que a combinação de medidas de controle de deposição de particulados e resíduos sólidos nas ruas, associada à melhoria da drenagem pela redução da impermeabilização do solo, pode ter efeito efetivo na redução dos problemas sentidos por muitas cidades hoje em dia.

Outro ponto importante quanto ao transporte de sedimentos, é que boa parte desse material, quando atinge os condutos, canais e cursos d'água urbanos, segue por esses corpos d'água até acabarem em rios maiores, lagoas naturais ou artificiais, e no mar. Antes de escoarem para

esses corpos hídricos maiores, grande parte desses resíduos sólidos pode ser retida pela vegetação espalhada ao longo dos cursos de água.

Se a água estiver contaminada ou contiver detritos, com o passar do tempo isso pode acabar se configurando em um grave problema, pois esses resíduos acabam “escondidos” pela vegetação como destacam Armitage et. al. (1998). Isso acaba causando um impacto ao meio ambiente e aos seres vivos, que muitas vezes confundem alguns tipos de resíduos com seu alimento natural, levando o animal à morte. Esse tipo de ocorrência já foi observado diversas vezes. Por exemplo, foi realizada uma necropsia no estômago de uma ave marinha morta, sendo encontradas dezenas de tampas de refrigerante. Em outra ocasião, foi constatado que golfinhos estavam se alimentando de sacolas plásticas, porque se enganavam achando que fossem águas-vivas, fonte de seu alimento.

Diversos são os impactos dos resíduos sobre os sistemas hídricos, como citam os trabalhos de Armitage e Roseboom (2000) e Armitage et.al., (1998): eles não são esteticamente atrativos; há um risco potencial à saúde humana associado com, por exemplo, conteúdo de garrafas e latões em putrefação, ou organismos patogênicos anexados de agulhas hipodérmicas descartadas; a fauna aquática corre risco de ingestão de resíduos; organismos patogênicos ou toxinas, como os metais pesados, podem ser absorvidos na cadeia alimentar da vida aquática, atingindo mais tarde os próprios seres humanos. Além disso, os mesmos podem acarretar custos significativos para as autoridades locais, quando são necessárias operações de limpeza.

Esses vários problemas se agravam com o crescimento das cidades, pois há necessidade de atender a uma população crescente, que demanda transporte, comunicação, fornecimento de água e sistemas de saneamento básico. A provisão desses serviços acarreta impactos variados, como a liberação de gases para a atmosfera, a produção de esgoto e a perda de área vegetada e permeável.

A implantação de uma gestão ambiental, eficiente para a minimização desse quadro de agressões ao meio ambiente, como destaca Tucci (2007). Para tanto, têm se procurado estudar a relação causa-efeito dos processos de desenvolvimento urbano, com o objetivo de relacionar ações com a pressão que as mesmas exercem sobre o sistema, através de avaliações de impactos ambientais. A Tabela 2.2.2 apresenta uma síntese do estudo relativo à questão das

águas pluviais nas grandes cidades, levando em consideração os principais tipos de uso do solo urbano.

Tabela 2.2.2. Relações entre as fontes, alterações e consequências das águas pluviais nas grandes cidades. (Fonte: Tucci, 2007)

Fontes	Alterações	Principais consequências
Ocupação, residencial e comercial	Desmatamento, impermeabilização, condutos e canais, depósitos, etc.	Inundações urbanas; erosão do solo e material sólido, contaminação da qualidade da água superficial, contaminação dos aquíferos e alteração da biodiversidade.
Infra-estrutura urbana: ruas, parques, passeios, comunicação, etc.	Desmatamento, impermeabilização dos espaços, condutos e canais.	Inundações urbanas; erosão do solo e material sólido, contaminação da qualidade da água superficial.
Serviços: comércio, transporte, água e esgoto, postos de gasolina	Emissão de gases, vazamento, depósitos de produtos químicos e usos de produtos nos serviços, efluentes de esgoto.	Contaminação de aquíferos, da qualidade da água superficial devido à poluição aérea e dos esgotos, alteração na biodiversidade.
Ocupação e produção industrial	Efluentes industriais, emissão de gases, impermeabilização e condutos.	Inundações, contaminação superficial e subterrânea, alteração da biodiversidade com componentes químicos.

2.3. ALTERNATIVAS PARA O CONTROLE DOS ESCOAMENTOS

O processo de urbanização acaba degradando o meio ambiente, inclusive o solo onde são construídas residências, prédios e demais edificações. O desenvolvimento de núcleos urbanos de grandes dimensões contribui para uma gradual e intensa impermeabilização do solo. Isso resulta numa alteração da capacidade de infiltração das águas pluviais, reduzindo a recarga dos aquíferos e elevando o escoamento superficial com potenciais inundações em áreas mais baixas.

Para piorar o problema, Acioli (2005) afirma que os atuais sistemas de drenagem se encontram ultrapassados, não atendendo mais as necessidades dos centros urbanos, que, claramente, se estenderam para além dos seus limites, comprometendo todo o fluxo das águas na bacia. O seu funcionamento tem base no rápido afastamento do excedente pluvial, que, simplesmente encaminha o problema de um ponto da cidade (montante) a outro (jusante). As consequências disso são: aumento das vazões de pico, aumento do volume escoado, redução do tempo de escoamento e ocorrência de cheias e enxurradas. Todos esses fatores acabam por elevar a gravidade das inundações, devido a uma gama enorme de consequências, desde danos estruturais até problemas de saúde pública.

Tucci (2001) entende que, durante o processo de urbanização das grandes cidades, onde o solo natural foi substituído por concreto e asfalto, houve uma perda da infiltração natural das águas pluviais nesse solo. Para permitir o escoamento dessas águas foram construídos canais e tubulações, resultando em altos custos e em um considerável impacto sobre o meio ambiente. As dimensões necessárias para a drenagem dessas águas têm relação direta com a vazão e, conseqüentemente, há um alto custo nessas instalações, que aumenta à medida que o processo de impermeabilização continua. Para tentar reduzir esses custos, e evitar todos os impactos associados a essa questão, a melhor opção seria a criação de sistemas que permitissem que as águas pluviais se infiltrassem novamente no solo, conforme ocorria antes do processo de urbanização e impermeabilização.

Suderhsa (2002, apud Acioli, 2005, p.3) afirma que, para se tentar reverter o quadro de problemas de drenagem, além da modernização da drenagem urbana, devem-se gerenciar as águas pluviais na fonte da geração do escoamento superficial, não mais encaminhando o problema para outro setor da cidade. Esse autor divide as alternativas para melhoria dos sistemas de drenagem em dois grupos, tendo como base dois princípios básicos:

- a) o incremento da infiltração da água no solo, quando possível, para reduzir o escoamento superficial à jusante (dispositivos de infiltração);
- b) o armazenamento provisório da água pluvial, para controlar o escoamento superficial, e limitar a poluição a jusante (dispositivos de retenção e detenção).

Segundo Urbonas e Stahre (1993, apud Tucci, 2007, p. 196) existem vantagens e desvantagens associadas à implementação de sistemas que permitam uma maior infiltração e percolação das águas pluviais na fonte de geração:

- a) aumento da recarga; redução de ocupação em áreas com lençol freático baixo; preservação da vegetação natural; redução da poluição transportada para os rios; redução das vazões máximas à jusante; redução do tamanho dos condutos;
- b) os solos de algumas áreas podem ficar impermeáveis com o tempo; falta de manutenção; aumento do nível do lençol freático, atingindo construções em subsolo;
- c) a água infiltrada não deve estar seriamente contaminada, para não comprometer a qualidade dos aquíferos.

O ponto principal desses novos dispositivos é manter, dentro do possível, as condições hidrológicas do ambiente, combinando os processos de infiltração, interceptação e amortecimento com o objetivo de reconstituir, na medida do possível, as condições pré-ocupação. Dependendo de sua natureza, as novas tecnologias podem reduzir os volumes escoados, favorecendo a infiltração das águas drenadas, ou colaborar na retenção dos poluentes presentes nas enxurradas urbanas.

Os principais dispositivos de infiltração são (Tucci e Genz, 1995):

- a) Planos de infiltração;
- b) Valas de infiltração;
- c) Bacias de percolação;
- d) Entradas permeáveis na rede de drenagem;
- e) Trincheiras ou valas permeáveis;
- f) Meio-fio permeável;

g) Pavimentos permeáveis;

Dentre as estratégias para promover uma maior infiltração destacam-se o uso de pavimentos permeáveis. Até hoje, no Brasil, os pavimentos permeáveis foram confeccionados com elementos modulares (bloquetes ou placas), vazados ou não. Além disso, se tem registro de estudos sobre concretos asfálticos porosos como o de Acioli (2005).

A vantagem do concreto permeável, em relação às outras formas de implantação de pavimentos permeáveis, é que o mesmo não só permite a infiltração, como pode atuar como reservatório. Dado o grande índice de vazios, o material, em conjunto com uma base de brita, pode armazenar uma grande quantidade de água, colaborando para a redução do pico inicial de muitos eventos de enxurradas (Concrete Network, 2011), como será discutido em maior detalhe no Capítulo 3 desse trabalho.

Isso é uma característica importante, pois a eficiência da maioria dos demais pavimentos permeáveis depende da capacidade de infiltração do solo sobre o qual foi construído o pavimento.

A infiltração é o processo de transferência do fluxo de água da superfície para o interior do solo segundo Pinto (2006). Para proporcionar uma boa infiltração é preciso considerar vários aspectos do solo, como a granulometria e o estado de umidade da camada superior do solo, também chamada de zona não saturada.

A capacidade de percolação, no caso dos sistemas de drenagem, é uma variável fundamental, que determina a velocidade com que as águas pluviais passam através da camada de solo, até alcançar o lençol freático, ou seja, a zona saturada. O estado de umidade da camada superior do solo e o tipo de solo também influenciam no processo de percolação das águas pluviais. Existem alguns tipos de solos, mais argilosos, onde a percolação das águas se processa com maior dificuldade.

Para garantir um bom processo de percolação das águas, é preciso que se tenha um solo adequado. A baixa permeabilidade do solo vai dificultar a infiltração, reduzindo a possibilidade de usar essa estratégia para controlar o escoamento superficial.

Mesmo solos argilosos, quando secos, podem permitir bons índices de percolação. Mas, quando úmidos, os valores diminuem fortemente. Em solos arenosos, as chances de conseguir bons índices de percolação aumentam consideravelmente, se tornando a melhor opção para a instalação de dispositivos de infiltração.

Alguns solos têm pequeno volume de armazenamento e mantêm níveis de água altos por muito tempo na superfície. Dessa forma não são capazes de ajudar na redução do volume final do hidrograma.

Discutindo novas alternativas para as tradicionais técnicas de drenagem, Azzout et. al. (1994) também destacam a possibilidade de uso de pavimentos permeáveis, e apontam algumas vantagens dessa estratégia, tais como:

- a) as condições de pré-urbanização desses ambientes serão mantidas, no que se refere ao escoamento superficial;
- b) com relação aos custos de implantação, os sistemas alternativos terão custos inferiores em comparação aos sistemas tradicionais, ou oferecerão uma proteção superior contra o risco de inundações, por um custo equivalente;
- c) os ambientes que adotarem essas técnicas poderão ser mais valorizados, por conta de uma integração estética.

Apesar dessas novas tecnologias de gerenciamento de águas pluviais já estarem sendo usadas, sobretudo em países do Primeiro Mundo, como o Japão e os EUA, estas ainda possuem uma baixa abrangência, principalmente em países em desenvolvimento. Azzout *et al* (1994) levantam algumas razões que podem estar emperrando sua adoção em maior escala:

- a) por serem tecnologias relativamente novas, ainda não se tem um conhecimento amplo sobre o seu comportamento ao longo do tempo, e aspectos relacionados ao projeto, execução e manutenção ainda não são inteiramente dominados pelos projetistas e executores de pavimentos. Em outras palavras, há uma percepção de que, ao instalar essas tecnologias, corre-se o risco de se ter problemas que comprometam o seu funcionamento, acarretando a necessidade de investimentos para correção dos mesmos;

- b) alguns projetos podem modificar bastante a sistemática de funcionamento dos sistemas de drenagem, demandando ajustes culturais e organizacionais que podem ser complexos;
- c) o projeto, a execução, a manutenção e o funcionamento dos sistemas de infiltração dependem do ambiente no qual estão inseridos os dispositivos, do ponto de vista físico, social e institucional. Dito de outra forma, não serão todos os locais em que essas tecnologias poderão ser implementadas com sucesso, limitando a sua difusão.

Um importante equívoco alegado pelos autores acima quanto a esses novos dispositivos para a gestão de águas pluviais na fonte é a idéia de que os mesmos possuem uma implementação bastante onerosa e um retorno financeiro bastante abaixo do esperado. A questão não é bem essa. Esses novos dispositivos podem ser mais onerosos na sua instalação, mas eles se pagam com o passar dos anos, sobretudo pela diminuição da necessidade de construção de obras de drenagem como drenos e tubulações.

Esse panorama começa a mudar e a opção por usar pavimentos permeáveis está se tornando cada vez mais atraente para autoridades municipais, pois seu uso favorece a percolação das águas pluviais para o solo, recarregando os lençóis subterrâneos e diminuindo a necessidade de sistemas de drenagem de grande capacidade, tais como piscinões, bombas e tubulações de drenagem. Desta forma se pode gerar uma redução do pico das cheias, diminuindo a ocorrência de inundações e, conseqüentemente, dos transtornos aos veículos e à população.

É neste contexto que esse trabalho de pesquisa pretende se inserir, contribuindo com a análise da problemática, envolvendo questões ambientais, sociais, econômicas e estruturais. Para fundamentar a discussão, no próximo capítulo se discute a tecnologia do concreto permeável, uma alternativa moderna para a construção de pavimentos e elementos de drenagem permeáveis, ainda pouco usada e investigada no país, que é foco de interesse do trabalho.

3 – CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS PERMEÁVEIS

Uma alternativa para reverter o grande impacto ambiental que a impermeabilização urbana acarreta ao meio ambiente, tanto direta como indiretamente, seria a adoção de tecnologias mais limpas, que permitissem uma maior infiltração da água pluvial, tal como os pavimentos de concreto permeável. Este capítulo apresenta uma revisão dos aspectos gerais sobre a utilização do concreto permeável, voltada para a realidade brasileira.

3.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONCRETO PERMEÁVEL

Segundo Francis (1965, apud ACI, 2006, p.3), o concreto permeável não é uma tecnologia nova, pois já tem sido usado no processo de construção desde a metade do século 19. De fato, diversos países europeus já o usaram, de diversas maneiras: em casas, edifícios, painéis pré-fabricados e blocos curados.

O boletim ACI 522R (ACI, 2006) faz uma útil coletânea e análise dos trabalhos sobre o tema. Segundo o mesmo, o primeiro registro do uso de concreto poroso ocorreu em 1852, quando o mesmo foi utilizado na construção de duas casas do Reino Unido. Segundo os registros, esse tipo de concreto consistia apenas de agregado graúdo e cimento e não foi novamente mencionado na literatura até 1923, 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 Limited*” adotou o uso do concreto permeável para a construção de residências, nas paredes por ser um concreto leve para o isolamento térmico. Por volta 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 baixo custo.

A Segunda Guerra Mundial, entre 1939 e 1945, gerou outra onda de uso de concreto permeável, pois deixou quase toda a Europa com uma grande necessidade de moradias, o que encorajou o emprego de métodos de construção simples e de baixo custo, que nunca tinham sido antes usados. Dentre estes métodos destacou-se o uso do concreto permeável. Malhotra (1976, apud ACI522R, 2006, p.3), argumenta que a principal vantagem associada ao uso desse material era o menor consumo de cimento, em relação ao concreto convencional,

associado a eventuais vantagens no custo de execução, quando a mão-de-obra era escassa e dispendiosa.

Segundo o boletim ACI 522R (ACI, 2006), após a Segunda Guerra mundial, a grande demanda por tijolos e matéria-prima para reconstrução da infra-estrutura dos países afetados, associada com a inabilidade da indústria em produzir tijolos com a rapidez necessária, levou à adoção do concreto permeável como material de construção. Isto ocorreu, principalmente, devido à grande disponibilidade de agregados graúdos e à ausência de bons tijolos.

Ao longo dos anos, o concreto permeável contribuiu substancialmente para a produção de casas no Reino Unido, Alemanha, Holanda, França, Bélgica, Escócia, Espanha, Hungria, Venezuela, Oeste da África, meio Leste, Austrália e Rússia (ACI, 2006).

É interessante destacar que, antes da Segunda Guerra Mundial, a produção do concreto permeável estava confinada a casas de até dois pisos. Após 1946, com o aumento na altura das edificações, resultante de avanços nos processos de projeto de edificações e produção de concreto, o concreto permeável passou a ser utilizado numa gama muito maior de aplicações e chegou, de acordo com Francis (1965, apud ACI, 2006, p.3), a ser utilizado até na confecção de prédios com mais de 10 andares.

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 se mostrou 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 ACI522R, 2006, p.3).

Apesar de o concreto permeável ter sido largamente usado na Europa e Austrália, especialmente nos últimos 60 anos, o seu uso como material de construção nas Américas, até o final do século XX foi bastante limitado. Uma possível razão para esse cenário é que a América não experimentou a escassez de materiais vivida pela Europa após a Segunda Guerra Mundial, como explica Ghafoori (1995).

No Canadá, o concreto permeável foi primeiramente utilizado no ano de 1960, na construção de algumas casas, em Toronto. Esse tipo de material foi também usado como base não-estrutural do “*Federal Building*”, localizado em Ottawa (ACI, 2006). Segundo Ghafoori (1995), os EUA só passaram a usar o concreto permeável na década de 70.

O interessante é que nesses casos o concreto permeável foi usado não para reduzir custos ou poupar materiais, nem pelas suas propriedades térmicas, mas por causa de suas características de elevada permeabilidade. De fato, o uso nos Estados Unidos foi desencadeado pela tentativa de minimizar as consequências das inundações que começaram a ocorrer com frequência cada vez maior em áreas impermeáveis recém construídas. À medida que o desenvolvimento urbano avançava, maior era a impermeabilização do solo. Isto acabou promovendo um aumento na intensidade das enxurradas urbanas e, conseqüentemente, um incremento no número e gravidade das inundações.

Segundo Mulligan (2005), o concreto permeável começou a ser utilizado nos EUA, com a finalidade de incrementar a permeabilidade de zonas urbanizadas, nos Estados da Flórida, Utah e Novo México. Mas os bons resultados obtidos fizeram com que a tecnologia rapidamente se espalhasse para outros Estados, tais como a Califórnia, Illinois, Oklahoma, e Winsconsin. O crescente interesse resultou na disseminação de pequenos fornecedores do material e na fundação de uma associação, a NPCA (National Pervious Concrete Association). O American Concrete Institute (ACI) instituiu uma competição anual na qual estimula estudantes de graduação a produzir concretos permeáveis, simples ou com adição de fibras, buscando disseminar a tecnologia.

A alta permeabilidade é, portanto, a principal razão porque esse material está sendo investigado e produzido nos dias atuais. Quando o concreto permeável é utilizado em pavimentação externa, a água da chuva pode infiltrar 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 à redução da velocidade e da quantidade do escoamento superficial dessas águas. E, por permitir a infiltração natural das águas pluviais, ele acaba contribuindo para um uso mais eficiente do solo, pois não são mais necessárias obras de drenagem, como pontos de retenção, valas, tubulações e outros mais.

Além disso, o concreto permeável possui outros pontos positivos, tais como:

Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental

- proporcionar um menor custo durante o seu ciclo de vida;
- absorver menos radiação solar e facilitar a sobrevivência da arborização em áreas pavimentadas, por permitir a chegada de água e ar até as raízes;
- colaborar para reduzir o problema das enxurradas urbanas, que acabam levando uma enorme quantidade de resíduos e poluentes aos corpos de água.

Dadas essas vantagens, verifica-se que o interesse por pavimentos permeáveis em geral, e pelo concreto permeável, em particular, está se disseminando. De acordo com Polastre e Santos (2006), já existem registros de experiências recentes em vários países, como o Japão e no Chile. Nos últimos anos a comunidade científica internacional passou a estudar de maneira mais aprofundada este material, com o objetivo de caracterizá-lo e normalizá-lo de maneira mais adequada. Pode-se, por exemplo, citar os estudos desenvolvidos por Haselbach. É fundamental que o Brasil acompanhe e contribua para esse desenvolvimento. Todavia, segundo, ainda são escassas as pesquisas e as referências sobre concreto permeável no Brasil. Embora se saiba que esse tipo de concreto já é empregado há algumas décadas na Europa e Estados Unidos, têm-se conhecimento apenas de algumas raras citações do mesmo em trabalhos brasileiros, todos relacionados à drenagem urbana e provenientes, especialmente, do grupo de estudos do Prof Tucci, da UFRGS. Maior atenção tem sido dada a pavimentos permeáveis de concreto asfáltico ou bloquetes de concreto. Acredita-se que essa é uma lacuna que necessita ser sanada, pois o concreto permeável pode ter um papel relevante na melhoria da drenagem das cidades, mitigando os problemas de inundações e colaborando para aumentar a sustentabilidade e reduzir o impacto ambiental.

Um ponto positivo e que demonstra o interesse é que o concreto permeável já começou a ser usado em alguns projetos-piloto e demonstrativos. Em abril de 2006, em Belo Horizonte (MG), começou a ser construído o Parque Tecnológico de Belo Horizonte (BH-Tec), que funciona próximo ao campus Pampulha da UFMG, um empreendimento viabilizado a partir da parceria entre a UFMG, o Governo do Estado de Minas Gerais, a Prefeitura da cidade de Belo Horizonte, a FIEMG e o SEBRAE. Segundo o coordenador de obras, Eduardo Roscoe, o projeto foi concebido para ser executado de forma ecologicamente correta e têm caráter inédito na América Latina. A pavimentação do espaço é de concreto permeável, o que diminui os riscos de inundações e alimenta as nascentes do Parque (Polastre e Santos, 2006).

Em São Paulo, por volta de junho de 2006, a Secretaria de Coordenação das Subprefeituras, em conjunto com entidades e empresas privadas, divulgou que seriam testados novos métodos para a recuperação de algumas áreas degradadas. Para essa empreitada, a CASA COR, uma empresa de arquitetura, contribuiria com testes com a calçada viva, utilizando, entre outras inovações, o concreto permeável, por auxiliar na manutenção dos aquíferos subterrâneos. (Polastre e Santos, 2006).

A experiência com pavimentos de concreto asfáltico permeável é um pouco mais ampla do que a disponível sobre concreto permeável. Em São Paulo, um grupo de engenheiros da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP) decidiu aperfeiçoar modelos de pavimento permeável. Dessa forma, no Centro Tecnológico de Hidráulica da USP, cerca de 800 metros de estacionamento foram convertidos em um asfalto drenante, e em outra área, foram colocados blocos pré-moldados porosos, para fins de comparação. Após a análise dos primeiros dados coletados, houve um consenso entre os engenheiros de que o asfalto drenante e os blocos pré-moldados deveriam ser usados conjuntamente, para obter melhores resultados (Silveira, 2010).

Para os concretos permeáveis com matriz cimentícia. Neste Caso, o desafio é grande, pois praticamente não se tem estudos científicos desse porte sobre o tema, aqui no Brasil. É necessário desenvolver procedimentos de dosagem, moldagem, avaliação e caracterização sistemática para este material. Existe uma carência, também, de estudos que avaliem os eventuais benefícios ambientais e econômicos. Este trabalho busca colaborar neste sentido, averiguando se é possível desenvolver um concreto tecnicamente adequado, economicamente viável e ambientalmente correto.

Adicionalmente, existe uma grande lacuna na questão referente à normalização. Para garantir a qualidade desse novo material é necessário e fundamental dispor de testes adequados para caracterizar um concreto permeável. Reconhecendo essa lacuna, a International Standardisation Organization (ISO) decidiu, em junho de 2011, criar um grupo ad-hoc, com especialistas do Brasil, Coréia, China, Estados Unidos e Japão para discutir a formulação de normas para esse material. Essa é uma tarefa urgente para viabilizar o uso do concreto permeável, com segurança, para as novas atribuições que o mesmo está sendo proposto. O

presente trabalho também busca colaborar nesse sentido, ao usar e avaliar um método de teste de permeabilidade projetado especificamente para concretos permeáveis.

3.2 CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO PERMEÁVEL

Para garantir a permeabilidade do concreto, Polastre e Santos (2006) mencionam que o concreto deve possuir um alto índice de vazios interligados, com pouca ou nenhuma porção de areia na sua composição, para permitir a percolação de grande quantidade de águas pluviais. Quando o material é dimensionado adequadamente, o seu grau de permeabilidade é suficiente para permitir a passagem de todo o fluxo precipitado na maioria dos eventos de chuva, praticamente anulando o escoamento superficial. Devido à elevada porosidade do concreto permeável, o mesmo pode permitir a passagem de uma quantidade de água que chega a 5080 mm/h por $0,09 \text{ m}^2$, o que se traduz em 11,4 a 19 l/min (Huffman, 2005).

Para a produção do concreto permeável é muito importante que se formem vazios interligados, fato fundamental para garantir a permeabilidade às águas pluviais. Por essa razão, na maioria das misturas, não se utiliza agregado miúdo (areia), sendo o concreto confeccionado apenas com água, cimento e agregado graúdo. Dessa forma se tem um material conglomerado, formado por partículas de agregado graúdo recobertas com uma camada razoavelmente espessa de cimento e água. Em alguns casos usam-se pequenas quantidades de areia para aumentar o volume da camada de recobrimento, sem aumentar o custo. Com essa estratégia geralmente se obtém um material com um índice de vazios entre 15 a 25%, e capacidade de percolação na ordem de $200 \text{ l/m}^2/\text{min}$ (ACI, 2006). Uma porosidade inferior pode comprometer as suas propriedades hidráulicas (Montes e Haselbach, 2006). Porém, devido à sua alta porosidade, a resistência desse concreto pode ser mais reduzida, quando comparada ao concreto convencional. Por isso seu uso é muitas vezes limitado a áreas de tráfego leve ou pouco intenso.

Conforme mencionado anteriormente, o concreto permeável não é uma tecnologia nova, com o seu uso datando desde a Segunda Guerra Mundial, quando a Europa precisou de material para reconstruir locais devastados por anos de guerra. Contudo, ele recebeu um renovado interesse por conta de legislações de controle de qualidade da água resultante do escoamento

superficial. Há possibilidade de que, ao optar pela utilização do concreto permeável, seja eliminada a necessidade de grandes obras de drenagem por causa da capacidade desse concreto em infiltrar as águas pluviais diretamente no solo. Em um ambiente urbano, isso representa um ganho ambiental e econômico, elevando o valor da terra.

Huffman (2005) considera que um concreto permeável adequadamente dosado deve apresentar baixa densidade, ser incrivelmente permeável e apresentar boa capacidade estrutural.

O concreto permeável tem a sua densidade influenciada, diretamente, pelas propriedades e proporções dos materiais utilizados e na metodologia de compactação usada na sua aplicação. Em geral, encontram-se densidades na ordem de 1600 kg/m^3 a 2000 kg/m^3 e índices de vazios de 15 a 25%.

Quanto à permeabilidade, cabe destacar as pesquisas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, reportadas por Araújo et. al. (1999), que avaliaram a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. Percebeu-se nos testes que as superfícies impermeáveis tipicamente usadas na pavimentação urbana, com uso de asfalto, placas de concreto e pedras, acabaram gerando um escoamento superficial 44% maior que outras superfícies, como o solo compactado. Já nas áreas semipermeáveis, formadas por pavimentos permeáveis com bloquetes e paralelepípedos, foi registrado um nível de escoamento inferior ao das áreas impermeáveis, mas ainda 11 a 22% superior ao verificado em solos compactados. Quando se usou o concreto permeável praticamente não ocorreu escoamento superficial. Isso demonstra que essa nova tecnologia pode de fato ajudar a mitigar as enxurradas, revertendo, pelo menos em parte, o quadro problemático associado com a alta impermeabilização do solo.

Isso acontece porque as taxas de fluxo típicas de passagem de água através do concreto permeável são da ordem de $120 \text{ l/m}^2/\text{min}$ (2 mm/s) a $320 \text{ l/m}^2/\text{min}$ ($5,4 \text{ mm/s}$), valores muito superiores à capacidade de infiltração da maioria dos solos. Por isso, a efetiva capacidade de infiltração vai ser dada pelo solo. Mas mesmo em solos pouco permeáveis, o uso do concreto permeável, sobre uma camada de assentamento de brita, permite gerar uma capacidade de retenção e reduzir a quantidade de água que escoar superficialmente, especialmente em eventos de chuva intensa e de curta duração, que favorecem a ocorrência de inundações. Se

necessário, um grande sistema de bacias de armazenamento de águas pluviais pode ser desenvolvido, fazendo uso do concreto permeável, de forma a reduzir ou retardar a onda de cheia.

Segundo o ACI (2006), as misturas de concreto permeável normalmente tendem a desenvolver resistências de compressão na escala de 3,5 MPa a 28 MPa. Em média se obtém resistências da ordem de 25 MPa, segundo Polastre e Santos (2006). Ou seja, apesar do elevado índice de vazios, o contato entre os agregados graúdos que compõem o esqueleto do concreto permeável garante uma resistência razoável. A pasta ou argamassa de cimento, usada em pequenas quantidades, garante que os agregados permaneçam unidos, evitando o desmoronamento e dificultando a perda de material por abrasão.

3.2.1 Vantagens Econômicas do Concreto Permeável

O emprego do concreto permeável nos Estados Unidos está ganhando um forte impulso porque diversas agências governamentais, como a *EPA (US Environmental Protection Agency)*, têm estimulado os construtores e proprietários de obras a considerar o uso do concreto permeável em elementos de diversas magnitudes. Essa ampliação de mercado influi diretamente nos custos, pois estimula um aumento da oferta de mão-de-obra e uma redução do custo unitário de execução (National Ready Mixed Concrete Association, 2010).

Exemplificando essa tendência, a Agência de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency - EPA*) dos Estados Unidos, requer que os proprietários de novos pátios, ou de pátios recém reconstruídos, com 0,4 hectares ou maiores, tenham um sistema para tratamento de toda a água pluvial, antes que esta deixe o pátio da empresa por escoamento. Para viabilizar essa medida, cerca de 10 a 20% da área dos pátios são destinadas para a construção de estruturas de retenção/detenção das águas pluviais.

O uso do concreto permeável reduz a necessidade de criar grandes poços de detenção, uma vez que o pavimento propriamente dito já age como uma área de detenção. Tal fato leva a custos menores de mão-de-obra, construção e manutenção, pois evita a necessidade de poços de detenção, encanamentos, drenos, e outros sistemas de drenagem de águas pluviais. Além

disso, ao permitir o reabastecimento hídrico, o uso do concreto permeável ajuda a dispensar ou reduzir consideravelmente os sistemas de irrigação.

Em contrapartida ao alto investimento, em termos de espaço e custos, da implementação de sistemas de tratamento de águas pluviais, os pavimentos de concreto permeável podem ser utilizados tanto como elementos de pavimentação quanto de drenagem, o que aumenta seu valor econômico.

Essa equação pode se tornar ainda mais favorável caso, como já acontece nos Estados Unidos de forma experimental, o poder público comece a implementar taxas de cobrança sobre a geração de águas pluviais, calculadas em função do total de área impermeabilizadas. Na medida em que as regulamentações e custos associados à gestão de águas pluviais crescerem, as soluções podem se tornar muito dispendiosas para os proprietários, seja pela cobrança de taxas, seja pelos altos custos de instalação de estruturas de retenção e drenagem de larga escala. O concreto permeável pode ajudar a reduzir esses custos (Huffman, 2005).

Uma vantagem econômica da produção de concreto permeável é que o mesmo tem baixa densidade (incorporando muitos vazios) e pode ser executado *in loco*, com materiais locais, evitando custos de transporte elevados. Além disso, cabe salientar que o concreto permeável pode ser fabricado com baixa tecnologia e mão-de-obra não especializada, se a mesma receber um treinamento básico adequado. Ou seja, ao optar pelo concreto permeável há a possibilidade de auxiliar economias locais ao usar mão-de-obra e materiais da região.

Por outro lado, esse material não necessita de grandes cuidados de cura e tem tempo de início de pega reduzido. Portanto, o seu uso em construções não acarreta grande tempo de execução ou consumo de energia.

Ademais, os pavimentos de concreto permeável podem ter um custo ao longo da vida útil menor que os pavimentos asfálticos tradicionais. Apesar dos custos iniciais de instalação do concreto permeável ser relativamente altos, o mesmo compensa o investimento ao longo do tempo, devido à sua maior durabilidade. Os pavimentos de concreto requerem poucos reparos, em relação ao asfalto, e possuem uma longevidade relativamente alta (National Ready Mixed Concrete Association, 2010).

3.2.2 Benefícios Ambientais Relacionados ao Uso do Concreto Permeável

Um importante aspecto que favorece o uso do concreto permeável, sob o ponto de vista da sustentabilidade, é que a *EPA (US Environmental Protection Agency)*, classificou o mesmo como uma prática apropriada de gestão (*Best Management Practice – BMP*). Assim, sua utilização pode ajudar um projeto a conquistar a certificação *LEED (US Green Building Council Leadership in Energy and Environmental Design)*.

Para fins da avaliação *LEED*, a sustentabilidade do concreto permeável advém de três características básicas:

- a) auxilia na redução do aquecimento terrestre, por permitir a troca de calor entre o subsolo e a superfície;
- b) é um material reciclável, podendo ser reaproveitado após o seu ciclo de vida;
- c) pode ser confeccionado com materiais locais.

National Ready Mixed Concrete Association (2010) confirma essa tendência, afirmando que o concreto permeável voltou a ganhar atenção devido ao aumento de diretrizes rigorosas de gerenciamento de águas pluviais, e da qualificação desse produto como um material de construção sustentável.

O problema é que estacionamentos impermeáveis, rodovias e telhados colaboram fortemente para a ocorrência de enxurradas e alagamentos, gerando, muitas vezes, fluxos elevados de água contaminada com diversos poluentes, como discutido no Capítulo 2.

O concreto permeável demonstra potencial para modificar essa realidade, reduzindo o impacto ambiental em alguns desses lugares, de modo seguro e econômico. Por isso, o mesmo já vem sendo usados em projetos que variam desde simples calçadas, entradas de veículos e pátios, a grandes prédios comerciais e grandes áreas de estacionamentos.

Não apenas existe uma preocupação com a chegada de poluentes químicos aos corpos de água e para a cadeia alimentar, mas também com o fato de que as enxurradas tendem a aumentar a

temperatura das águas pluviais, afetando negativamente a vida da vegetação, dos peixes e de outras formas de vida aquática (Huffman, 2005).

Em termos de efeitos térmicos, cabe ressaltar que outra vantagem ambiental atribuída ao uso dos concretos permeáveis consiste justamente em minimizar os efeitos de ilha de calor dos centros urbanos, ao substituir a pavimentação asfáltica escura por um material mais claro e que armazena água.

Outro atributo positivo do pavimento de concreto permeável é a sua capacidade de filtragem. Quando chove sobre o concreto permeável, a água percola através do pavimento e parte das impurezas é retida, melhorando a qualidade da água. Segundo algumas pesquisas, tal fato pode ajudar a reduzir os efeitos negativos dos materiais baseados em hidrocarbonos que seriam carregados durante uma enxurrada para os corpos d'água, pois a matriz de agregados do concreto permeável captura e degrada aerobicamente o resíduo de hidrocarbonos e os poluentes são convertidos por microbactérias. O calor do sol colabora por aquecer os componentes voláteis que se aderem aos agregados e o carbono remanescente é absorvido pelo solo nativo onde é digerido por plantas, fungos ou micróbios (Huffman, 2005). Kwiatkowski e colaboradores (2007) realizaram medições, quanto a capacidade de infiltração e tratamento de poluentes, no campus da Villanova University, localizada em Villanova, Pensilvânia, utilizando o concreto permeável. Os pesquisadores constataram que os poluentes presentes nas águas pluviais não afetam os lençóis subterrâneos.

É importante salientar, ainda, que o processo natural de infiltração permite que a água e o oxigênio cheguem às raízes de árvores de tal modo que seria impossível em pavimentos convencionais. Tal fato colabora com a manutenção da qualidade da vegetação em áreas urbanas. Ainda quanto à questão da vegetação, a National Ready Mixed Concrete Association (2010) menciona que árvores plantadas em estacionamentos e em calçadas oferecem sombra e produzem um efeito de resfriamento, reduzindo a sensação de aquecimento nas cidades. O concreto permeável é ideal para proteger as árvores em um ambiente pavimentado (muitas plantas têm dificuldades de crescer em áreas pavimentadas impermeáveis como calçadas e outros locais, uma vez que o ar e a água têm dificuldade para chegar às raízes).

Segundo Huffman (2005), outros benefícios ambientais associados ao uso do concreto permeável são similares aos benefícios ambientais do concreto convencional. Com um

cimento Portland cinza como material ligante, o concreto tem uma significativa vantagem refletiva sobre produtos asfálticos, que são muito escuros. O concreto tem um albedo muito alto, o que lhe dá vantagem sobre outros produtos quanto à mitigação do efeito do aquecimento global. Sabe-se que o albedo é a capacidade reflectiva da radiação solar da superfície (EOEARTH, 2011). A Tabela 3.1. mostra o albedo de algumas superfícies. Ele também oferece a possibilidade de diminuir a quantidade de postes de iluminação à noite, gerando uma economia em energia e investimentos. Além dos seus benefícios de reflexão, a grande quantidade de espaços vazios no concreto permeável e a sua baixa densidade significam que este absorve menos calor solar e resfria mais rapidamente em ambientes quentes.

Tabela 3.1. Capacidade reflectiva (albedo) de algumas superfícies da Terra. (Fonte: EOEARTH, 2011)

Superfície	Detalhes	Albedo (%)
Solo	Escuro e úmido	5
	Claro e seco	40
Areia	_____	Entre 15 e 45
Tundra	_____	Entre 18 e 25
Plantações	_____	Entre 18 e 25
Neve	Velha	40
	Nova	95

Esta característica é de grande importância para o combate ao aquecimento global, sobretudo levando-se em conta, que os centros urbanos possuem altas temperaturas por causa da impermeabilização do solo, que retém o calor no subsolo, produzindo ilhas de calor, em áreas com asfalto e concreto, responsáveis pela absorção da energia solar. O asfalto é a superfície

que mais absorve essa energia uma vez que o seu albedo é menor em relação a outras superfícies naturais como o gelo e a areia de praia. É importante ressaltar, entretanto, que o concreto, à medida que envelhece, acaba escurecendo, reduzindo o seu albedo e absorvendo energia solar.

À medida que a absorção de radiação solar aumenta, aumenta também a emissão de radiação térmica de volta ao ambiente, provocando o efeito estufa e impactando negativamente o meio ambiente. Por conta desse quadro preocupante, se constatarem diferenças de temperatura entre os centros urbanos e a periferia que variam entre 2 e 5^oC (Tucci, 2007).

Esse aumento de temperatura também acaba elevando os níveis de precipitação ao criar condições de movimento de ar ascendente. Um exemplo é apontado por Silveira (1999) apud Tucci (2007, p.92) que observou na zona central de Porto Alegre um maior índice pluviométrico em relação à periferia, por causa do processo de urbanização. Na zona urbana, as precipitações críticas são mais intensas, mas de curta duração, contudo isso acaba contribuindo para as enxurradas urbanas.

O efeito da urbanização sobre as precipitações é, ainda, um fator indefinido, por ser algo que depende de uma série de questões e de informações estatísticas que muitas vezes inviabilizam análises mais conclusivas. Burian e Sheperd (2005) realizaram um estudo onde compararam o período de pré-urbanização da época de 40 a 58 com a da pós-urbanização de 84 a 99 em Houston, EUA, e observaram uma elevação de 25% do volume de chuvas na zona urbana e uma diminuição de 8% na rural durante o período quente do ano, sendo que esse aumento foi constatado na parte da tarde. Os autores tentaram determinar se os constantes processos de urbanização eram responsáveis pelas mudanças dos ciclos de chuvas, sobretudo quanto a aspectos relacionados a gerenciamento de água, planejamentos urbanos e outros mais. Essas alterações foram observadas entre quatro horas da tarde e oito horas da noite.

O processo de urbanização também acaba influenciando os corpos hídricos com relação à temperatura. Foi constatada, por Galli (1990), uma relação entre o aumento médio na temperatura da água dos rios e a área impermeável, levando em consideração um estudo feito em cinco rios, cada um com características distintas quando à impermeabilização do solo em Mariland, EUA. Esse aumento de temperatura ocorre no verão, por conta do aquecimento das superfícies impermeáveis. Estas, ao receberem a precipitação, aquecem as águas pluviais que

acabam por impactar os corpos hídricos. Isso acaba modificando as biotas existentes nesses corpos d'água, ocorrendo a perda de insetos, peixes e plantas. Conseqüentemente, esses danos terminam por prejudicar a própria sociedade que depende diretamente desses ambientes aquáticos para a sua subsistência. Isto explica a necessidade de um monitoramento dos impactos termais dos sistemas de gerenciamento de águas pluviais.

Tucci e Porto (2001) apud Tucci (2007, p.93) mostraram que as condições climáticas podem produzir importantes variações na curva de probabilidade de precipitação máxima. Foram comparados os valores de intensidade de chuva para o mesmo risco e duração da região de trópicos úmidos (próximo ao Equador) e de locais com latitude superior a 20⁰ S no Brasil e observaram-se precipitações 25% maiores nos trópicos para a mesma duração e probabilidade.

3.2.3 Outros Aspectos Sobre o Concreto Permeável

Quanto aos benefícios estruturais, a National Ready Mixed Concrete Association (2010) menciona que o concreto permeável, por apresentar pouca ou nenhuma quantidade de agregados miúdos, possui uma textura única na superfície. O concreto permeável é composto de agregados angulares e circulares, como o cascalho e a brita, e uma vez que os mesmos encontram-se expostos, acabam por melhorar o poder de tração dos veículos e prevenir derrapagens. Essa superfície de textura é especialmente importante durante as condições mais severas e perigosas, como chuva e neve.

A permeabilidade desse concreto também contribui para a segurança dos motoristas, sobretudo em condições de grande umidade. A chuva cai e passa através do concreto, não permanecendo na sua superfície, eliminando problemas de empossamento e outros relacionados às enxurradas. Isto, subseqüentemente, reduz os clarões noturnos para os motoristas e diminui os riscos de derrapagem.

Após uma chuva, há diferenças significativas entre o concreto permeável e o pavimento asfaltado. Enquanto que o asfalto se mantém escorregadio com a água da chuva, a superfície do concreto permeável se mantém inalterada.

A alta porosidade do concreto permeável também é vantajosa em outras situações que não para pavimentos. O concreto permeável também pode ser utilizado como isolante térmico (em paredes de prédios) e para melhorar as propriedades acústicas (como barreiras de som).

Apesar de ser usado, principalmente, para pavimentação, como calçadas e estacionamentos, nos EUA, o concreto permeável também tem sido utilizado como material estrutural na Europa por muitos anos. Aplicações práticas do concreto permeável incluem painéis para parede de grandes edifícios (com mais de dez andares), rodovias e estacionamentos (National Ready Mixed Concrete Association, 2010).

O tempo de concretagem é tipicamente reduzido para o concreto permeável, que normalmente acontece em uma hora entre a mistura e o término da concretagem, porque ele é um concreto que perde água com muita rapidez. Entretanto, isto pode ser controlado usando retardadores e estabilizadores de hidratação que estendem a concretagem em 1,5 horas, dependendo da dosagem utilizada (Polastre e Santos, 2006).

A densidade do concreto permeável depende das propriedades e das proporções dos materiais usados e também dos procedimentos de compactação. Densidades locais na ordem dos 1600 kg/m³ a 2000 kg/m³ são comuns, e figuram no alto índice dos concretos mais leves. Um pavimento com 125 mm e 20% de espaços vazios poderá estocar 25 mm de água pluvial nos seus espaços vazios, o que cobre a grande maioria dos eventos chuvosos dos EUA. Quando usado um pavimento de 150 mm de cascalho ou de brita, a capacidade de estocagem aumenta em 75 mm de precipitação. O índice de permeabilidade do concreto permeável depende dos materiais e das operações de concretagem (National Ready Mixed Concrete Association, 2010).

O concreto permeável não é tão afetado quanto o concreto convencional com relação à secagem e retração. Os valores de retração dependem do traço e dos seus materiais constituintes, mas valores da ordem de metade da retração observada nas misturas convencionais foram reportados (National Ready Mixed Concrete Association, 2010). A baixa quantidade de pasta ou argamassa (quando se usa uma pequena parcela de areia na mistura) é a principal explicação para tal fato.

É interessante notar que aproximadamente 50% a 80% da retração verificada no concreto permeável ocorre nos primeiros 10 dias, comparado com um montante de 20% a 30% no mesmo período, para o concreto convencional. Por causa da baixa retração e da textura irregular, muitos concretos permeáveis são feitos sem controle de juntas, o que não é recomendado, pois podem acontecer fissurações aleatórias (National Ready Mixed Concrete Association, 2010).

Por causa 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.

Por outro lado, ao optar por superfícies permeáveis, há uma redução semelhante à encontrada em condições de pré-desenvolvimento.

As limitações identificadas quanto ao uso do concreto permeável para pavimentos foram quanto ao maior custo inicial por m², comparado ao pavimento asfáltico. O aumento do custo específico pode ser compensado pela redução da drenagem resultante da área, já que grande parte do volume de águas se infiltrará (Araújo *et al.*, 1999). Por outro lado, Polastre e Santos (2006), mencionam um custo de R\$ 26,41/m², sem custo significativo no pavimento, com economia da drenagem. A manutenção teria um custo de R\$ 1,44/m² e a vida útil no material seria de até 15 anos.

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 àquela observada durante as análises (Araújo *et al.*, 1999).

3.3 EXECUÇÃO DE PISOS DE CONCRETO PERMEÁVEL

Segundo a norma ACI 522R-06, “*Pervious Concrete*”, a construção de um pavimento de concreto permeável deve ser realizada de acordo com os planos e especificações de projeto,

que por sua vez devem ser detalhados e adequados para produzir um produto acabado de acordo com as necessidades do dono e as regulamentações locais. As construções devem iniciar com um planejamento completo. Uma conferência de pré-construção e a construção de seções teste são recomendadas para tratar de questões como:

- a) Determinação da sequência de construção;
- b) Planejamento da entrega de uma quantidade certa de concreto;
- c) Planejamento da logística de acesso adequado para caminhões de concreto no local da construção;
- d) Seleção do equipamento ideal para o tamanho do projeto;
- e) Coordenação dos testes e inspeções de controle de qualidade;
- f) Testes para verificação se as misturas propostas funcionam como o esperado;
- g) Qualificação do construtor.

Com relação à preparação da sub-base, esta deverá estar numa correta elevação, uniforme e bem preparada, para garantir a qualidade do pavimento. O topo da sub-base, que deve ter cerca de 150 mm (6 in.), deve ser composto de material granular, com não mais que uma quantidade moderada (10%) de silte ou argila. A sub-base não deve estar suja, saturada ou congelada quando a pavimentação inicia.

O solo da camada de sub-base deve ser misturado antes da pavimentação com o concreto permeável. Caso haja falha em providenciar a mistura na sub-base, poderá ocorrer uma redução da resistência, levando à falha prematura no concreto. Para assegurar uma compactação uniforme, sulcos de rodas devem ser recompactados antes das operações de pavimentação. Se as propriedades do solo de sub-base requerem que uma recarga de agregado seja incorporada ao sistema de drenagem do local de construção, esta deve ser colocada sobre a camada de sub-base preparada, compactada, e colocada na elevação correta.

Uma estrutura do projeto de construção bem planejada deve facilitar a operação de construções, permitindo o uso eficiente dos equipamentos de pavimentação e proporcionando acesso fácil para os caminhões de descarga do concreto permeável. O empreiteiro e o designer devem concordar sobre o layout e os métodos de construção, antes que a construção

propriamente dita seja iniciada. As localizações de objetos fixos devem ser estabelecidas previamente, para que possam ser consideradas no planejamento de juntas e definição do método de construção.

A colocação do concreto permeável deve ser feita o mais rápido possível, pois, como mencionado anteriormente, o concreto permeável tem pouco excesso de água na sua mistura. Durante o tempo que a mistura fica exposta no ar a mesma está perdendo água necessária para a cura. A secagem da pasta do cimento pode levar a uma falha na superfície do pavimento. Todas as operações de lançamento devem ser planejadas e todos os equipamentos necessários devem estar disponíveis para que se possa fazer uma rápida aplicação e compactação, sendo iniciada imediatamente a cura do pavimento.

As fôrmas usadas na pavimentação podem ser feitas de madeira, plástico, ou aço e devem ter a profundidade do pavimento. Elas devem ter uma boa resistência e estabilidade para suportar equipamentos mecânicos. O solo de sub-base abaixo das fôrmas deve ser compactado de acordo com as recomendações do designer e nivelado para suportar o rolo de metal utilizado no pavimento. Pinos ou estacas devem ser usados para dar suporte às laterais das fôrmas. Todas as fôrmas devem ser limpas e óleo deve ser passado quando necessário.

O lançamento do concreto deve ser feita próximo ao local de lançamento final, por uma questão de praticidade. Isto é comumente feito por uma descarga direta da rampa do caminhão de concretagem na sub-base. Para disposições onde o misturador não alcança a forma, ou para minimizar as chances de comprometer a concretagem da sub-base, uma esteira pode ser utilizada. Como o concreto permeável é tipicamente seco, com zero slump, o bombeamento não é recomendado. Após a deposição, o concreto permeável deve ser espalhado com um ancinho, ou com qualquer outra ferramenta de mão.

Para o processo de cura, o pavimento precisa ser coberto com uma manta de polietileno para evitar a perda de água, comprometendo os seus processos de hidratação. O tempo de cura do concreto permeável, sem que qualquer veículo passe sobre ele, deve ser de, no mínimo sete dias. Entretanto, para que o concreto permeável atinja o máximo de resistência à compressão, é necessário um período de até 28 dias (Pervious Concrete, 2011).

Segundo o ACI, o concreto permeável deve ser bem compactado para assegurar sua resistência e integridade estrutural após a retirada das fôrmas, mas não muito para não comprometer a sua permeabilidade.

Assim que o concreto é colocado dentro da forma no pavimento, este é compactado com um rolo compressor. O rolo compressor é usado para compactar, criando uma forte ligação entre a pasta e o agregado e provendo uma aceitável maciez na superfície, como mostra a Figura 3.1. Esse rolo compressor deve ter uma largura adequada para passar sobre o concreto.

Um rolo compressor pequeno, ou “customizado”, pode ser utilizado para acabamento em áreas mais estreitas. Rolos compressores muito pequenos, todavia, não são recomendados para grandes áreas, pois a operação vai demandar um grande tempo, podendo comprometer a eficiência de compactação do pavimento.

Uma espécie de “socador de mão” é normalmente utilizado para dar acabamento nas bordas do pavimento, facilitando a compactação do concreto nesses locais. Durante essa operação, o “socador” deve ser mantido junto à fôrma para garantir que o concreto não seja socado em um nível abaixo do nível da fôrma.



Figura 3.1: Rolo compressor usado na pavimentação com concreto permeável (Fonte:Norma do ACI 522R-06)

Em áreas pequenas ou em corpos de prova moldados de pequena dimensão a compactação é consideravelmente mais difícil, o que pode favorecer o desenvolvimento de defeitos, e

resultar no acúmulo de pasta devido ao efeito parede que naturalmente acontece junto à superfície da forma. E ainda, durante o ensaio à compressão, pode ocorrer uma concentração de cargas em alguns agregados que ficaram mais projetados na superfície do corpo de prova na moldagem. No programa experimental se tentou superar essa dificuldade usando corpos de prova extraídos de blocos maiores, como discutidos no Capítulo 5.

CAPÍTULO 4 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo são apresentadas as estratégias que foram adotadas para alcançar os objetivos propostos para essa pesquisa. Para cada etapa do trabalho são detalhados os procedimentos escolhidos, os traços utilizados, assim como listadas as justificativas para a evolução dos ensaios e qualquer outra informação pertinente referente aos mesmos.

4.1. ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Como ressaltado na revisão bibliográfica apresentada no capítulo 3, o uso do concreto permeável ainda se encontra em estágio embrionário no Brasil, havendo poucos trabalhos publicados e um número ainda menor de exemplos práticos de aplicação desse tipo de material. As únicas referências encontradas na literatura envolvem a aplicação no Parque de Belo Horizonte (Polastre e Santos, 2006); alguns projetos exploratórios do professor Tucci, do Instituto de Pesquisa Hidráulicas da UFRGS, e alguns estudos efetuados na USP (Silveira, 2010), citados no capítulo anterior. Além disso, ainda não existem normas brasileiras para orientar a confecção ou o controle de qualidade do concreto permeável.

Dada a escassez de estudos e conhecimento na área, a estratégia experimental adotada teve um caráter fortemente exploratório. Dessa forma, o estudo foi iniciado tomando por base as poucas referências de traços disponíveis na literatura e o desenvolvimento foi efetuado de forma incremental, ou seja, os resultados de cada etapa de trabalho influenciaram o formato e o escopo das etapas seguintes.

Dessa forma, a primeira etapa foi constituída de um estudo exploratório, que englobou uma série de concretagens experimentais realizadas com o objetivo de testar alguns traços, elaborados com materiais locais, mas formulados de acordo com as diretrizes propostas pela recomendação 522R-06: “*Pervious Concrete*”, uma coletânea do conhecimento sobre Pervious Concrete, publicada pelo American Concrete Institute (ACI, 2006). Tomando como base os parâmetros apresentados no ACI 522R-06 decidiu-se trabalhar nessa etapa preliminar com 12 traços, resultantes da combinação de 4 relações a/c (0,26; 0,30; 0,35; 0,45) com três relações $l : m$ (total de agregados), de 1:5, 1:7 e 1:9.

Um exemplo relevante desse comportamento consistiu na mudança da forma de produção dos corpos de prova usados nos ensaios de compressão e permeabilidade. Inicialmente, quando se estudaram os primeiros traços, foram moldados corpos de prova da maneira tradicional, empregando os mesmos procedimentos utilizados para a moldagem de corpos de prova de concreto convencional. Após a desforma e durante o ensaio, todavia, constatou-se que a moldagem em formas cilíndricas de dimensões reduzidas dificultava a adequada compactação do material, gerando defeitos de borda, e que a vibração desse volume reduzido de concreto induzia variações na quantidade de argamassa ao longo da altura da amostra.

Por isso, em etapas subsequentes, decidiu-se estudar o efeito de vibração e mudar a forma de obtenção dos corpos de prova para os ensaios de resistência mecânica e permeabilidade. Ao invés de moldar o corpo de prova em uma forma metálica padrão 10x20cm, se decidiu concretar blocos e extrair dos mesmos os corpos de prova cilíndricos, para garantir que sua estrutura fosse mais homogênea e mais representativa do material. Cabe salientar que um dos usos principais do concreto permeável consiste na fabricação de pavimentos, caso em que são efetuadas concretagens de grande volume, com uso de rolos vibratórios, em camadas de espessura reduzida. Portanto, é fundamental tentar, na medida do possível, considerar aspectos como volume de concretagem e forma de vibração quando se investiga esse material.

Outro ajuste efetuado ao longo do trabalho consistiu no aumento da faixa de análise da relação $I:m$. Inicialmente, decidiu-se estudar traços com m variando de 5 a 9, pois se desejava ter concretos econômicos. Como os resultados mais satisfatórios foram obtidos com as amostras com $m = 5$, decidiu-se explorar parcialmente, através de ensaios complementares, a relação $I:m = 1:4$, para averiguar como evoluiria a resistência do material na fronteira inferior do intervalo.

Todas essas mudanças são discutidas no item 4.2, que descreve as variáveis usadas em cada uma das 4 etapas do estudo. Essas etapas corresponderam a séries de ensaios destinadas a investigar diferentes aspectos do comportamento ou forma de produção dos concretos permeáveis. A Figura 4.1 ilustra de forma gráfica a evolução das diferentes etapas do programa experimental que acabou sendo empregado para buscar atingir os objetivos propostos para o trabalho.

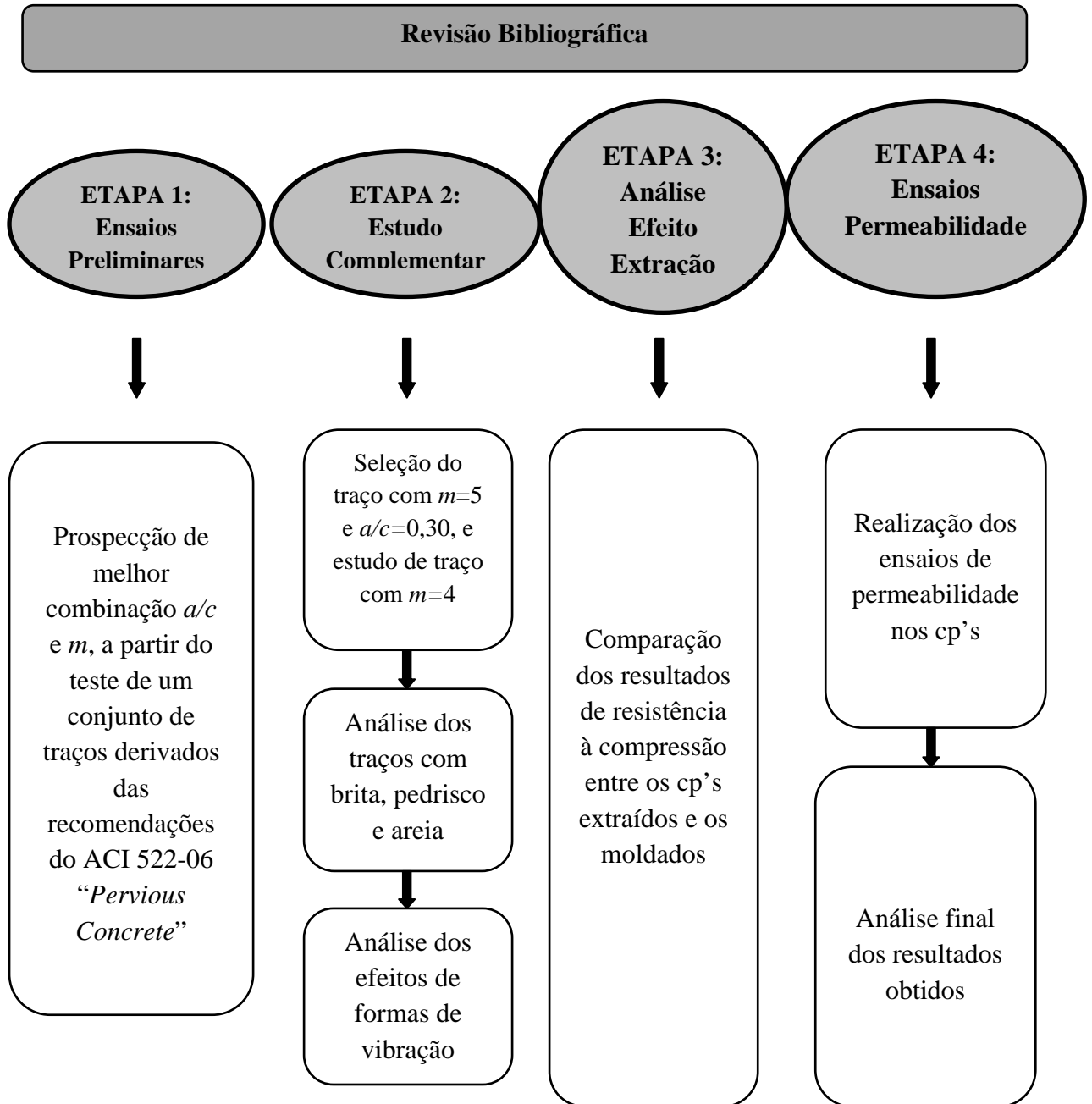


Figura 4.1: Fluxograma do Programa Experimental

Em resumo, a *Primeira Etapa* consistiu numa análise preliminar de traços desenvolvidos com base nas recomendações da norma 522R-06 "Pervious Concrete" do ACI, variando a relação cimento/materiais secos ($I:m$) e a relação água/cimento (a/c). Buscou-se identificar qual a combinação que iria apresentar os resultados mais satisfatórios, em termos de resistência à compressão, para definição do traço que serviria de base para os ensaios de permeabilidade.

Na *Segunda Etapa*, tendo-se constatado que os melhores resultados, em termos de resistência à compressão, foram obtidos para a relação 1:5 e *a/c* de 0,30, optou-se por investigar melhor esse traço, conjuntamente com um traço mais rico de 1:4, para averiguar se seria possível obter ganhos maiores em termos de resistência à compressão, aumentando o teor de pasta. Além disso, nessa etapa também foram analisados os efeitos de diferentes formas de vibração e do uso de agregados com granulometria variada, sendo testada a incorporação de uma pequena parcela de areia (7%) no traço, para se ter 30% do total de agregados finos (20%) que podem ser usados na mistura.

Para a *Terceira Etapa*, realizou-se uma comparação entre os resultados obtidos em corpos de prova moldados e extraídos, pois se acredita que os corpos de prova extraídos de blocos maiores representam melhor as condições em que o material seria produzido na vida real.

Concluídas as etapas de estudos de traços, foi estabelecido como seriam moldados e extraídos os corpos de prova e definidos os traços a serem usados para fabricação do concreto a ser submetido aos ensaios de permeabilidade, na *Quarta Etapa*. Cabe salientar que, para realização dos ensaios de permeabilidade foi necessário adaptar e testar um equipamento de ensaio especial, recomendado pela ACI 522R-06, e que foi desenvolvido com base no princípio de um permeômetro, como explicam Neithalath *et al.* (2003). A descrição completa do equipamento fabricado para esse ensaio é dada no item 4.5.2.

Nos itens a seguir se apresentam as variáveis estudadas, os materiais utilizados e os procedimentos experimentais adotados em cada uma das etapas do estudo.

4.2. DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE ESTUDO

Nesse item se descreve como foram estabelecidas as variáveis de estudo adotadas em cada uma das etapas da pesquisa.

4.2.1 Primeira Etapa: Ensaio Preliminares

A principal definição necessária na primeira etapa do trabalho foi relativa à quais seriam as variáveis a serem estudadas inicialmente e qual a faixa de investigação das mesmas.

Considerando que o concreto permeável é um material novo e pouco conhecido no Brasil, decidiu-se trabalhar com duas variáveis básicas e necessárias para orientar a dosagem de traços de concreto: a relação água/cimento (a/c) e o teor de agregados m .

Para definição da faixa inicial de investigação dessas variáveis tomou-se como referência a recomendação ACI 522R-06, que faz uma análise do estado da arte de produção de concretos permeáveis nos Estados Unidos e Europa (ACI, 2006). O ACI 522R-06 menciona que a faixa de relação água/cimento (a/c) apropriada para geração de concretos permeáveis varia entre 0,26 a 0,45. Decidiu-se que essa seria, portanto, a faixa investigada nesse estudo. Para fins do estudo foram estabelecidos quatro níveis que seriam adotados para a variável relação a/c : nível mínimo (0,26); nível máximo (0,45) e dois intermediários (0,30 e 0,35). É interessante ressaltar que, como mencionado no ACI 522R-06, embora a relação a/c de um concreto permeável seja importante para o desenvolvimento da resistência à compressão e da sua estrutura de vazios, a relação entre a a/c e a resistência à compressão de um concreto permeável não é tão bem definida quanto no caso de concretos convencionais. Uma relação a/c elevada pode resultar em uma pasta muito fluida, que “escorre” do agregado, preenchendo os vazios do concreto permeável. Já uma relação a/c muito baixa pode resultar em uma adesão reduzida entre as partículas de agregado, acarretando problemas para a formação do conglomerado. Segundo o ACI 522R-06, a experiência acumulada tem evidenciado que uma relação a/c entre 0,26 e 0,45 é capaz de associar uma boa capacidade de percolação com uma capacidade de adesão que garanta a estabilidade de forma do material.

Para a variável quantidade de agregados, decidiu-se iniciar o estudo com três níveis ($m = 5$, $m = 7$ e $m = 9$), equivalentes a consumos de cimento menores. Buscava-se, assim, tentar avaliar se existiria uma combinação que fosse econômica, resistente e suficientemente permeável.

Combinando as duas variáveis de estudo (m e a/c), em seus vários níveis, foram gerados 12 traços, todos compatíveis com as informações contidas no Apêndice 6 (*Pervious Concrete Mixture Proportioning*) da recomendação 211.3R-02 do ACI, *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete* (ACI, 2002).

Em relação ao tamanho dos agregados, o Apêndice 6 do ACI 211.3R-02 sugere que o agregado a ser usado na fabricação do concreto permeável deve ter dimensão reduzida, com d_{\max} entre 9,5 e 2,4mm, e que não é recomendável usar a fração mais fina dos agregados.

Dessa forma se obtém concretos permeáveis com massa específica da ordem de 1.700 kg/m^3 e volume de vazios em torno de 20%. Como o pedrisco necessita de maior energia de britagem e é frequentemente mais caro, decidiu-se que os primeiros traços seriam executados com brita 1, com diâmetro máximo de 19mm. Nas etapas subseqüentes se trabalhou com as distribuições granulométricas de cada agregado utilizado são dadas no item 3 desse capítulo.

4.2.2 Segunda etapa: ensaios complementares

Após os ensaios dos corpos de prova da 1ª etapa, os resultados foram analisados e se verificou que o traço que obteve melhor resultado, em termos de resistência e reologia, foi o que tinha $m = 5$ e $a/c = 0,30$. Dessa forma, decidiu-se prosseguir os estudos com os traços com $m=5$, avaliando, porém, os efeitos da adição de brita 0 (pedrisco) e de pequenas quantidades de areia, em substituição à brita 1.

A relação a/c foi fixada em 0,30, pois, na série de concretagens da primeira fase, se observou que, quando a relação a/c era de 0,26, as misturas tendiam a ficar muito secas, como se vê na Figura 4.2, o que resultava num material facilmente desagregável.



Figura 4.2: Aspecto da massa do concreto de um traço com relação a/c de 0,26. (Fonte: Arquivo do Pesquisador).

Por outro lado, nos traços com relação a/c de 0,45, a pasta acabava escorrendo e entupindo os poros do concreto, comprometendo a sua permeabilidade, como pode ser visto na Figura 4.3.



Figura 4.3: Aspecto de corpo de prova de um traço com relação a/c de 0,45, mostrando poros obstruídos (Fonte: Arquivo do Pesquisador)

Além do traço padrão (com $m=5$ e $a/c = 0,30$), com diferentes tipos de agregado, decidiu-se, em linha com o espírito exploratório que orientou o estudo, estudar o efeito de alguns parâmetros de produção dos corpos de prova nessa nova etapa de investigação.

Em primeiro lugar se decidiu estudar traços com relação pasta:materiais secos 1:4, para tentar alcançar resultados melhores de resistência à compressão. As outras análises efetuadas foram derivadas da constatação, feita durante a primeira fase, que os resultados obtidos com o uso de fôrmas cilíndricas não eram satisfatórios, pois a moldagem e o adensamento, por vibração, de pequenos volumes de concreto acabava resultando numa variação da distribuição da pasta ao longo do corpo de prova, com concentração nas faces e no fundo da forma. Isso prejudicava a resistência à compressão e a integridade de algumas amostras, causando inclusive a obstrução de parte da porosidade. Por isso, na segunda fase se decidiu estudar formas de vibração e formas de obtenção dos corpos de prova diferentes das usadas na primeira fase.

Em primeiro lugar se decidiu que, diferentemente de como havia sido feito na primeira etapa, os corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão seriam extraídos de blocos e não mais moldados diretamente nas fôrmas cilíndricas. Optou-se pela extração, porque, conforme a bibliografia pesquisada, o concreto permeável é moldado sempre em grandes

Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental

pavimentações, onde a brita possui um espaço maior para se alojar, se colocando de uma melhor forma e garantindo, assim, uma associação entre uma boa permeabilidade e, uma maior resistência à compressão. Com isso, ao extraí-los de um bloco com dimensões maiores, ter-se-ia amostras com um “comportamento” mais próximo à de um exemplo real.

A Figura 4.4 mostra um desses blocos sendo concretados. Cabe salientar que duas geometrias de blocos foram testadas, com alturas ou espessuras maiores. Por isso, alguns corpos de prova foram extraídos na vertical (lateral do bloco com maior altura) e outras na horizontal (do centro de blocos com menor altura e maior área transversal).



Figura 4.4: Fôrma nas dimensões 30 X 45 X 15 cm.
(Fonte: Arquivo do Pesquisador)

Os resultados obtidos nessa etapa indicaram que, de fato, a brita tende a se acomodar melhor dentro das fôrmas maiores, conforme mostrado nas Figuras 4.5 e 4.6, que mostram cps extraídos e moldados, respectivamente.



Figura 4.5: Aspecto visual de corpo de prova extraído de bloco de concreto. (Fonte: Arquivo do Pesquisador)



Figura 4.6: Aspecto visual de corpo de prova moldado. (Fonte: Arquivo do Pesquisador)

Em relação à vibração foram testadas 3 situações diferentes: vibração muito intensa com a mesa vibratória (vide Figura 4.7), vibração normal com vibrador do tipo agulha com diâmetro de 25mm (vide Figura 4.8) e ausência de vibração.



Figura 4.7: Mesa vibratória testada na 2ª. etapa da pesquisa.
(Fonte: Arquivo do Pesquisador)



Figura 4.8: Vibração com vibrador do tipo agulha com diâmetro de 25mm. (Fonte: Arquivo do Pesquisador)

4.2.3. Terceira etapa: Análise do efeito da extração

A bibliografia menciona que o concreto permeável sempre é confeccionado em grandes áreas de pavimentação, onde a brita possui um grande espaço para se alojar, permitindo um melhor empacotamento dos grãos e garantindo uma associação entre uma boa permeabilidade e boa resistência à compressão desse concreto. As concretagens da segunda etapa foram planejadas

com o intuito de tentar superar essa questão, sendo os corpos de prova para os ensaios extraídos de blocos de concreto de maior dimensão, nos quais se esperava que a brita se adensasse melhor. Isso resultou em melhores resultados de resistência à compressão.

Entretanto, como os métodos de controle tecnológico do concreto acabam usando cilindros, na terceira etapa se decidiu efetuar um estudo específico buscando estabelecer uma comparação entre resultados obtidos de cps extraídos e de cps moldados. Essa comparação entre cps extraídos e moldados se estendeu aos ensaios de permeabilidade, onde se pode observar melhor o efeito do acomodamento mais adequado da brita dentro das fôrmas maiores e a remoção do efeito parede.

4.2.4. Quarta Etapa: Ensaio de Permeabilidade

Na quarta etapa foram efetuados os ensaios de permeabilidade, usando o método de ensaio descrito por Neithalath *et al.* (2003), descrito em maior detalhe no item 4.5.2. Foram testados apenas corpos de prova com relação a/c de 0,30; mas com valores de $m = 4$ e $m = 5$; extraídos e moldados; fabricados somente com brita 1, somente com brita 0, ou com brita 1 e 7% de adição de areia; adensados com vibrador ou manualmente.

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foram usados materiais de construção tipicamente encontrados na Região Sul do País. O aglomerante usado foi 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), este apresenta uma mistura diferente de outros cimentos por 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 rapidez na pega é importante também porque, devido à elevada superfície exposta ao ar, o concreto permeável pode perder a água de mistura com muita rapidez. Já a água usada foi obtida da rede de abastecimento local.

Como agregados graúdos, fração que representa o maior volume do concreto permeável, foram usadas duas britas basálticas, de granulometrias diferentes: uma brita 1, com um diâmetro máximo de 19 mm e módulo de finura de 6,74, e uma brita 0, conhecida como pedrisco, com um diâmetro máximo de 9,5 mm e módulo de finura de 4,80. As distribuições granulométricas de cada um desses agregados são dadas nas Tabelas 4.3.1 e 4.3.2.

Tabela 4.3.1 – Características do agregado graúdo tipo Brita 1 usado nos ensaios.

Abertura da malha (mm)	% Média retida	% Média Retida Acumulada
19	2%	2%
12,5	56%	58%
9,5	26%	84%
6,3	11%	95%
4,8	2%	97%
2,4	1%	98%
1,2	0%	98%
0,6	0%	98%
0,3	0%	99%
0,15	0%	99%
0,075	0%	99%
Fundo	1%	100%
Dmax (mm)		19,1
Módulo de Finura		6,74

Tabela 4.3.2 – Características do agregado graúdo tipo brita 0 (pedrisco) usado nos ensaios.

Abertura da malha (mm)	% Média Retida	% Média Retida Acumulada
19	-	-
9,5	0,4	0,4
4,75	81,16	81,56
2,36	17,17	98,725
1,18	0,94	99,665
600µm	0,06	99,72
<600µm	0,28	100
Dmax (mm)		9,5
Módulo de Finura		4,80

Em alguns traços, a partir da segunda etapa, foi usada uma porção de agregado miúdo. Essa fração era constituída de areia silicosa, extraída do Rio Jacuí, localizado na região metropolitana de Porto Alegre/RS, com diâmetro máximo de 4,8 mm e módulo de finura de 2,59. A Tabela 4.3.3 mostra a distribuição granulométrica da mesma.

Tabela 4.3.3 – Características do agregado miúdo tipo areia silicosa usado nos ensaios.

Abertura da malha (mm)	% Média Retida	% Média Retida Acumulada
4,8	0%	0%
2,4	7%	7%
1,2	16%	23%
0,6	20%	44%
0,3	41%	85%
0,15	14%	99%
0,075	1%	100%
Fundo	0%	100%
Dmax (mm)	4,8	
Módulo de Finura	2,59	

4.4. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Neste capítulo serão descritos os traços selecionados e os procedimentos experimentais adotados para produção dos corpos de prova nas diferentes etapas.

Como já discutido no item anterior, os traços para essa pesquisa não foram obtidos através dos métodos convencionais de dosagem. Optou-se por seguir recomendações da bibliografia sobre faixas de relações a/c e valores de m adequados para fabricação de concreto permeável (ACI 522R-06). Foram estudadas 12 combinações, visando averiguar qual delas apresentaria boa reologia e bons resultados de resistência à compressão, com o intuito de selecionar traços para os ensaios de permeabilidade.

A Tabela 4.4.1 detalha todos os traços usados na primeira etapa. Para cada um deles foram moldados 9 corpos de prova cilíndricos, usados para os ensaios de resistência à compressão, e 3 placas retangulares, com 40cm de lado e 15 cm de espessura, nas quais se previa estudar a estrutura de poros, mas que foram usadas somente para analisar a capacidade de preenchimento e adensamento do concreto, nessa primeira fase.

Tabela 4.4.1. Traços dos concretos usados na Etapa 1 do trabalho.

Traço	Relação $l:m$	Relação a/c	Quant. Cimento (kgf)	Quant. Brita 1 (kgf)	Quant. água (kgf)
I-a (526B)	1:5	0,26	5,9	29,24	1,53
I-b (530B)		0,30	5,9	29,24	1,77
I-c (535B)		0,35	5,9	29,24	2,06
I-d (545B)		0,45	5,9	29,24	2,65
I-e (726B)	1:7	0,26	4,42	30,96	1,15
I-f (730B)		0,30	4,42	30,96	1,33
I-g (735B)		0,35	4,42	30,96	1,55
I-h (745B)		0,45	4,42	30,96	1,99
I-i (926B)	1:9	0,26	3,54	31,85	0,92
I-j (930B)		0,30	3,54	31,85	1,06
I-k (935B)		0,35	3,54	31,85	1,24
I-l (945B)		0,45	3,54	31,85	1,59

Durante as concretagens da primeira etapa notou-se que ocorreram alguns problemas com a coesão do traço com relação $m = 5$ e $a/c = 0,45$, pois o uso de um teor maior de cimento associado a uma relação a/c elevada acabou por causar um excesso de pasta, que obstruiu os poros. Dessa forma, esse traço foi considerado inadequado tecnologicamente, mas decidiu-se

que os dados referentes ao mesmo seriam coletados de qualquer forma, para fins de possibilitar a análise dos efeitos nos diferentes níveis. Nos traços com menor consumo de cimento, ou seja, com m igual a 7 e 9, esse problema não ocorreu, sendo possível obter traços adequados, mesmo com a relação a/c de 0.45.

Como já comentado, após a realização dos ensaios com os diversos traços da primeira etapa do trabalho, selecionou-se o traço com $m = 5$ e relação a/c de 0,30 como o mais promissor, dentro da faixa citada na norma 522R-06 do ACI. Decidiu-se, ao mesmo tempo, abandonar os traços com $m = 7$ e $m = 9$, que não apresentaram bons resultados para uso em pavimentos com tráfego de veículos. Além disso, como havia interesse em averiguar se seria possível obter resistências ainda maiores associadas a bons resultados de permeabilidade, optou-se por investigar também a relação $m = 4$, na segunda etapa.

Além de um ajuste na faixa de variação do m , decidiu-se testar, na segunda etapa, a influência do uso do pedrisco ao invés da Brita 1, como recomendado pelo ACI (2002). Optou-se pela inclusão do pedrisco nos ensaios, porque a bibliografia pesquisada o menciona como a brita ideal para a utilização no concreto permeável. Ademais, em alguns traços, se decidiu incorporar uma pequena porcentagem de agregado fino (areia), visando verificar se essa adição seria capaz de proporcionar maior capacidade de adesão e resistência ao material, sem comprometer a permeabilidade.

Por fim, decidiu-se que todos os corpos de prova na 2ª etapa seriam extraídos de blocos maiores, pois se verificou que a moldagem em formas metálicas de pequena dimensão não era uma técnica adequada, devido à influência do efeito parede. Em um primeiro momento, foram usadas fôrmas com dimensões maiores na vertical, sendo extraídos na horizontal (Hor) três cps da parte superior do bloco e três da parte inferior. Todavia, durante os ensaios verificou-se que a resistência desses dois grupos variava, especialmente se fosse usada uma vibração intensa. Decidiu-se, então, para eliminar essa variante, usar fôrmas com as mesmas dimensões, porém com altura menor, passando a extrair os corpos de prova na vertical (Vert).

Os traços usados na etapa 2, com essas combinações, são apresentados na Tabela 4.4.2. Na etapa 4 foram usados os mesmos traços, sendo limitada a forma de extração para a obtenção dos corpos de prova somente para a vertical.

Tabela 4.4.2 - Traços dos concretos usados na Etapa II.

Traço	Relação pasta / materiais secos (1:m)	Relação água/cimento (a/c)	Forma de Extração	Percentual de Brita 1	Percentual de Pedrisco	Percentual de Areia
II-a (430VB)	1:4	0,30	Vert	100%	-	-
II-b (430HB)			Hor	100%	-	-
II-c (430VBA)			Vert	93%	-	7%
II-d (430HBA)			Hor	93%	-	7%
II-e (430VP)			Vert	-	100%	-
II-f (430HP)			Hor	-	100%%	-
II-g (530HB)			1:5		Hor	100%
II-h (530HBA)	93%	7%				-
II-i (530HP)	-	-				100%

Adicionalmente, se efetuou um estudo, ainda na segunda etapa, sobre os efeitos de vibração, usando 3 tipos de vibração: mesa de vibração, imersão de vibrador do tipo agulha com 25 mm de diâmetro e adensamento manual. Verificou-se que, quando se utilizou a mesa vibratória, houve escorrimento de pasta, fechando os poros. Por isso, essa técnica foi deixada de lado nas etapas seguintes, sendo os corpos de prova fabricados com uso somente do vibrador ou adensamento manual.

Todos os corpos de prova cilíndricos moldados, após o desmolde a 1 dia, foram colocados em uma câmara úmida, a uma temperatura de 23⁰C e umidade relativa superior a 95%, onde foram mantidos até serem rompidos, aos 7, 14 e 28 dias. No caso dos blocos de concreto, estes permaneciam na câmara úmida até uma semana antes do rompimento, quando eram retirados da câmara para a extração. Após a identificação, os mesmos retornavam à câmara, sendo retirados somente antes do rompimento, aos 7, 14 e 28 dias.

4.5. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EMPREGADOS

Neste capítulo estão descritos, de forma sucinta, os ensaios utilizados durante essa pesquisa, bem como possíveis contribuições, desafios e outras questões pertinentes quanto à análise da viabilidade técnica e ambiental dos concretos com um alto índice de porosidade.

4.5.1. Resistência à Compressão Axial

Como o concreto permeável é um concreto muito poroso, há a necessidade de verificar a resistência mecânica deste concreto para averiguar onde ele pode ser utilizado, baseando-se nos seus resultados. Para tanto se usaram ensaios de resistência à compressão axial, técnica tradicional empregada no controle tecnológico do concreto.

Os ensaios foram realizados, no máximo, 24 horas após a retirada dos corpos de prova da câmara úmida, em uma prensa hidráulica SHIMADZU, monitorada por computador, com capacidade de 2000kN aos 7, 14 e 28 dias. Todos os cp's foram capeados com enxofre. Para a realização dos procedimentos, tomou-se como base a norma da NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos cilíndricos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994). Após

a coleta dos dados foram realizados os cálculos de resistência à compressão, com a média de três corpos de prova com o mesmo traço.

4.5.2. Ensaio de Permeabilidade

Para realização do ensaio de permeabilidade utilizou-se um método baseado numa proposta originalmente apresentada em trabalho de Neithalath *et al.* (2003), que se baseia num conceito equivalente ao de um permeâmetro de carga variável (*falling head*).

Como mostrado na Figura 4.9, o método de ensaio concebido Neithalath *et al.* (2003) envolve a colocação de uma amostra de concreto permeável, com 150mm de altura, dentro de um tubo de acrílico (transparente para que se possa acompanhar visualmente o fluxo de água) com diâmetro levemente superior ao do corpo de prova, buscando garantir um encaixe praticamente perfeito. Outro tubo é usado para formar um reservatório sobre o corpo de prova. O contato das paredes do tubo superior com a amostra deve ser selado de tal modo que se possa garantir que só haverá fluxo pelo próprio concreto. A amostra de concreto permeável é envolta em uma manga ou faixa látex, para evitar o fluxo lateral ao longo de sua altura.



Figura 4.9: Vista do aparelho proposto para medição da condutividade hidráulica de concretos permeáveis (Fonte: Neithalath *et al.*, 2003).

Na parte inferior do equipamento se acopla um terceiro tubo, ao qual se conecta um duto de PVC de 50 mm de diâmetro, com uma válvula, que por sua vez se conecta a um tubo vertical, com altura ajustada para que se possa registrar o tempo de fim de ensaio, pois quando a válvula 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.

O ensaio começa com a colocação da faixa látex no corpo de prova, que é então colocado dentro do tubo intermediário, já conectado com o restante do conjunto a jusante. Em seguida se adiciona água, até saturar a amostra e eliminar todo o ar que tenha permanecido dentro do conjunto. Posteriormente, se coloca o tubo de acrílico graduado superior e se adiciona a lâmina d'água para o ensaio. Durante o ensaio, deve ser controlado o tempo (t) que a lâmina d'água demora para percolar pelo sistema, entre o ponto 290 mm (h1) e 70 mm (h2) do tubo de acrílico.

Este procedimento deve ser repetido três vezes, sendo o tempo médio t_{med} usado como valor do tempo t para cálculo do valor do coeficiente de permeabilidade (k), determinado a partir da lei de Darcy:

$$K = \frac{A_1 l}{A_2 t} \log \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad \text{Equação 4.1}$$

Para a presente pesquisa foi desenvolvido um equipamento similar, com algumas adaptações visando simplificar o processo de ensaio. O ensaio de permeabilidade usado, portanto, seguiu os princípios genéricos descritos acima, entretanto o equipamento usado, mostrado na Figura 4.10, foi montado de maneira diferente, sendo dividido em três partes:

- a) Corpo Principal: como corpo principal, ou seja, setor onde se inseria a amostra, se usou um tubo de PVC rígido, com 97mm de diâmetro interno e comprimento de 200mm, com uma tampa na parte inferior, que vedava a saída por baixo e já servia para apoio do corpo de prova, garantindo seu posicionamento;



Figura 4.10: Aparelho construído para medição da condutividade hidráulica das amostras de concreto permeável. (Fonte: Arquivo do pesquisador)

- b) Reservatório de Água: como reservatório de água, que contém a coluna de água que gera a carga hidráulica que estimula o fluxo através da amostra, se usou um tubo de acrílico transparente, graduado em mm, com diâmetro interno de 95mm e 300mm de comprimento, acoplado ao corpo principal do equipamento com um flange;
- c) Dreno: para regular a saída de água do reservatório principal foi usado um cano com diâmetro interno de 32mm e registro de esfera, com uma extensão vertical com altura suficiente para gerar estabilizar a coluna de água num nível 10mm mais alto que o topo do corpo de prova.

A execução do ensaio obedeceu aos seguintes passos:

- a) Encamisou-se o corpo de prova com uma faixa látex tipo tubo com 80mm de diâmetro por 245mm de comprimento, como mostrado na Figura 4.11;



Figura 4.11: Corpo de prova encamisado com faixa látex.
(Fonte: Arquivo do pesquisador)

- b) Introduziu-se o cp, já encamisado, no corpo principal do equipamento e a parte restante da faixa látex foi invertida pela parte externa do reservatório;
- c) Acoplou-se o reservatório de água ao corpo principal do equipamento;
- d) Com o registro aberto no dreno, foi colocada água até a saída do “ladão”;
- e) Fechou-se o registro e o reservatório de água foi preenchido até completar o nível desejado para início do ensaio;
- f) Aguardaram-se três minutos para que ocorresse a saturação do cp de concreto permeável, completando-se o nível do reservatório de água se necessário;
- g) Abriu-se o registro com um movimento só e, no momento em que água estava no nível 290mm(h1), foi disparado o cronômetro, tendo sido travado o mesmo no ponto 70mm(h2) do reservatório.
- h) Fez-se a leitura e repetiu-se o processo por três vezes, para o cálculo da média.

Com o tempo médio foi realizado o cálculo para descobrir o coeficiente de permeabilidade.

CAPÍTULO 5- ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados experimentais obtidos durante a pesquisa.

5.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

Como discutido no capítulo 4, a primeira etapa do estudo envolveu o estudo de 12 traços, com variações na relação a/c e teor total de agregados (m), elaborados com base nas recomendações de outros autores e informações extraídas da literatura.

Buscou-se fabricar amostras de concreto permeável com diferentes características, de forma a entender como variações na constituição, traço e condição de moldagem afetavam a morfologia e reologia do concreto gerado.

A seguir se apresentam os resultados, organizados segundo a relação $1:m$. Ressalta-se que, nessa fase, foram analisadas somente amostras contendo Brita 1, moldadas em formas metálicas 9,5x19mm.

Cabe ressaltar que, para cada traço, foram rompidos 3 corpos de prova, de acordo como descrito no Capítulo 4. As tabelas apresentam os resultados individuais (f_{ci}), a média dos resultados individuais (f_{cm}) e o coeficiente de variação (CV), expresso em percentagem. Alguns corpos de prova apresentaram muitos defeitos, como falhas nas bordas e perda de agregado graúdo, e foram descartados. Além disso, nos raros casos em que o coeficiente de variação (CV) era superior a 25% foi efetuada uma análise do conjunto de 3 dados coletados para cada traço, sendo eliminados dados espúrios.

Depois da apresentação dos dados tabelados, são efetuadas algumas análises comparativas, com construção de gráficos adequados para esclarecer quais os efeitos associados à variação de m , a/c ou idade de ensaio.

5.1.1 Resultados dos ensaios de compressão – Relação 1:5

A Tabela 5.1 resume os resultados obtidos, expressos em termos da resistência à compressão axial, nos traços com $m = 5$. Não são mostrados os dados relativos à relação a/c 0,45 pois o concreto resultante não se configurou em um concreto permeável, como já foi discutido.

Tabela 5.1 Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1 e $m=5$, em várias idades.

Relação 1:m	Relação a/c	7 dias		14 dias		28 dias	
		fci (MPa)	fcm (CV)	fci (MPa)	fcm (CV)	fci (MPa)	fcm (CV)
1:5	0,26	3,95	3,78 (13%)	4,09	3,85 (14%)	3,17	4,11 (21%)
		4,16		4,23		4,30	
		3,24		3,24		4,87	
	0,30	-	6,67 (10%)	7,55	7,03 (9%)	7,97	6,84 (15%)
		6,21		7,27		6,07	
		7,12		6,28		6,49	
	0,35	6,42	6,96 (7%)	8,32	8,22 (2%)	9,10	9,05 (1%)
		7,34		-		9,10	
		7,12		8,11		8,96	

Analisando a tabela se verifica que os traços com relação a/c menores tendem a ter maior variabilidade, o que certamente está associado a problemas de moldagem decorrentes da menor trabalhabilidade, aspecto notável durante a fabricação dos corpos de prova. Defeitos e problemas decorrentes da falta de trabalhabilidade são a única explicação encontrada para justificar o comportamento observado em termos de variação da resistência com o aumento da relação a/c . Ao contrário do que seria esperado, com base no conhecimento acumulado com concreto convencional, houve um aumento da resistência com o aumento da relação a/c . Esse efeito será discutido com maior detalhe no item 5.1.5.

5.1.2 Resultados dos ensaios de compressão – Relação 1:7

A Tabela 5.2 resume os resultados obtidos, expressos em termos da resistência à compressão axial, nos traços com $m = 7$. Os dados referentes aos 14 dias foram descartados devido a problemas experimentais.

Tabela 5.2 Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1 e relação 1:7, em várias idades.

Relação 1:m	Relação a/c	7 dias		28 dias	
		fci (MPa)	fcm (CV)	fci (MPa)	fcm (CV)
1:7	0,26	1,39	1,635 (18%)	1,54	2,24 (22%)
		1,54		1,96	
		1,96		2,80	
	0,30	6,46	6,03 (7%)	6,58	6,17 (7%)
		5,61		6,17	
		6,03		5,75	
	0,35	5,89	6,13 (4%)	6,88	6,74 (5%)
		6,32		6,32	
		6,17		7,02	
	0,45	4,06	4,91 (19%)	6,60	6,32 (4%)
		4,77		6,17	
		5,9		6,20	

De forma similar ao que ocorreu com os traços com $m=5$, para os traços com $m=7$ a variabilidade se mostrou mais elevada nos extremos da faixa analisada, onde se tinha pouca ou muita água. Nota-se que a resistência é praticamente a mesma nos traços com relação a/c acima de 0,30, aos 28 dias, evidenciando que a maturidade da pasta não está influenciando muito no comportamento do traço.

5.1.3 Resultados dos ensaios de compressão – Relação 1:9

A Tabela 5.3 resume os resultados obtidos, expressos em termos da resistência à compressão axial, nos traços com $m = 9$.

Tabela 5.3 Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1 e relação 1:9, em várias idades.

Relação 1:m	Relação a/c	7 dias		14 dias		28 dias	
		fci (MPa)	fcm (CV)	fci (MPa)	fcm (CV)	fci (MPa)	fcm (CV)
1:9	0,26	3,39	3,25 (6%)	2,75	2,56 (7%)	2,33	2,61 (14%)
		-		2,40		2,47	
		3,10		2,54		3,03	
	0,30	2,40	2,42 (2%)	2,75	3,03 (13%)	2,47	2,33 (8%)
		2,47		3,32		2,19	
		2,40		-		-	
	0,35	4,80	4,76 (1%)	3,67	4,02 (8%)	5,50	4,80 (21%)
		4,73		4,23		-	
		-		4,16		4,09	
	0,45	5,36	4,91 (9%)	5,29	6,56 (18%)	7,12	6,84 (6%)
		4,51		6,77		6,56	
		4,87		7,62		-	

Dada a alta quantidade de agregado e pequeno teor de pasta, muitos dos corpos de prova praticamente se desagregavam ao toque, não apresentando coesão. Em geral, os valores de resistência à compressão são menores que os obtidos para quantidades $m = 5$ ou 7 , para a mesma relação a/c , como esperado, mas a tendência de incremento da resistência com o aumento da relação a/c persistiu.

5.1.4 Efeito da variação da idade de ensaio, teor de agregado m e relação a/c

Os gráficos mostrados na Figura 5.1 ilustram a evolução da resistência à compressão com a idade de ensaio, para cada um dos traços, em função da variação de m e a/c .

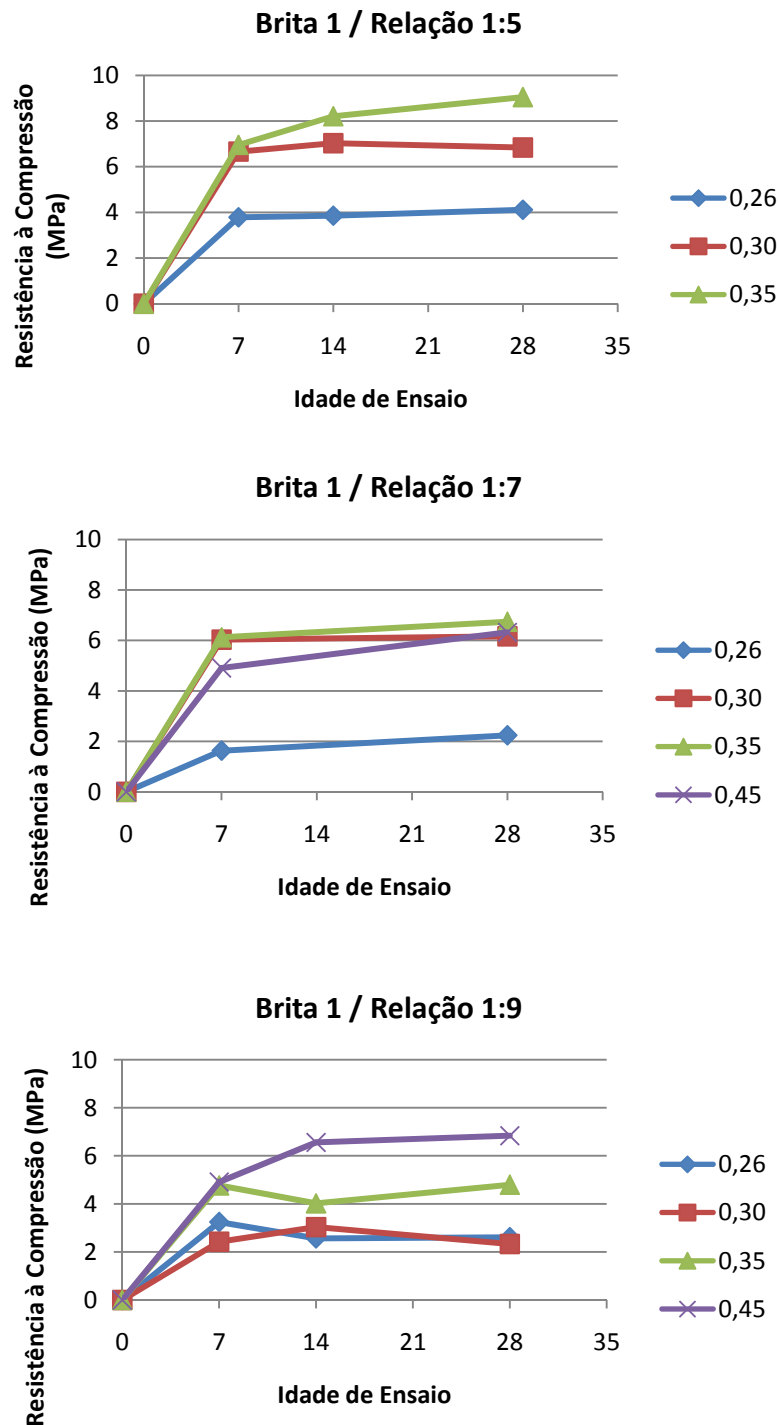


Figura 5.1 – Evolução da resistência com a idade para os traços da 1ª. Etapa.

Analisando a figura nota-se que, para os traços com relações a/c de 0,26 e 0,30, a evolução da resistência à compressão entre os 7 e 28 dias é muito pequena, praticamente nula. Já os traços com relação a/c 0,35 e 0,45 mostram alguma tendência de evolução de resistência, especialmente no último caso.

Em geral, pode-se concluir que se confirma a informação do ACI 522R (ACI, 2006), que relata que, no caso do concreto permeável, a hidratação da pasta não é o fator principal que governa a resistência. Nos traços com relação a/c mais elevada (0,35 e 0,45), que mostraram mais sensibilidade à idade de ensaio, a pasta escorreu e obstruiu parte da porosidade, aproximando o material de um concreto convencional.

Considera-se que este comportamento pode ser atribuído, em grande parte, ao fato de que, neste tipo de concreto, a resistência à compressão é dominada pelo contato direto entre as partículas de agregado graúdo. A contribuição para a resistência à compressão de um eventual aumento da resistência da pasta ao longo do tempo é muito pequena e fica mascarada, pois a mesma atua, primordialmente, como um elemento de amalgamação do conjunto.

Os gráficos das Figuras 5.2 e 5.3 mostram a variação da resistência à compressão axial com o aumento do teor de agregado (m), aos 7 e 28 dias, respectivamente. Analisando as figuras observa-se que, em ambos os casos, o aumento na quantidade de agregados (com respectiva redução da quantidade de pasta) causa a queda de resistência.

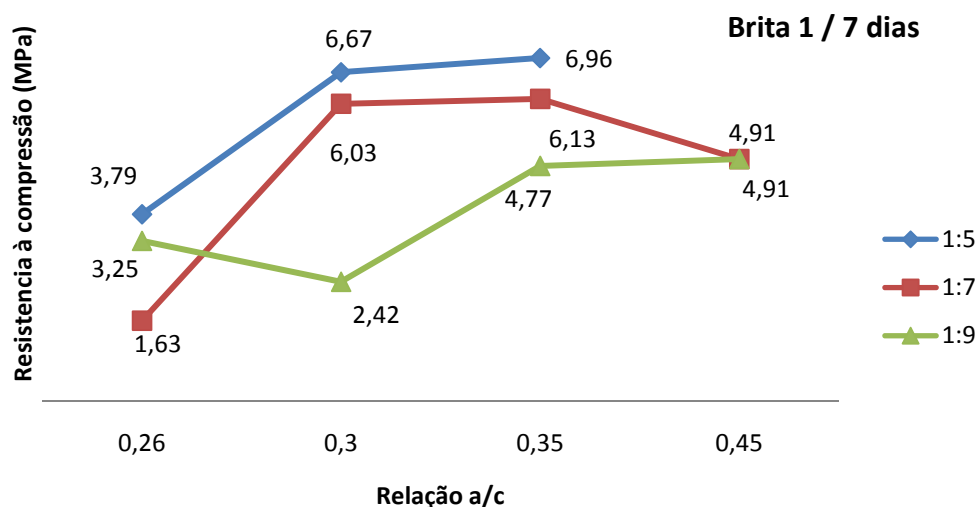


Figura 5.2 – Variação da resistência em função da quantidade de agregado (m) aos 7 dias.

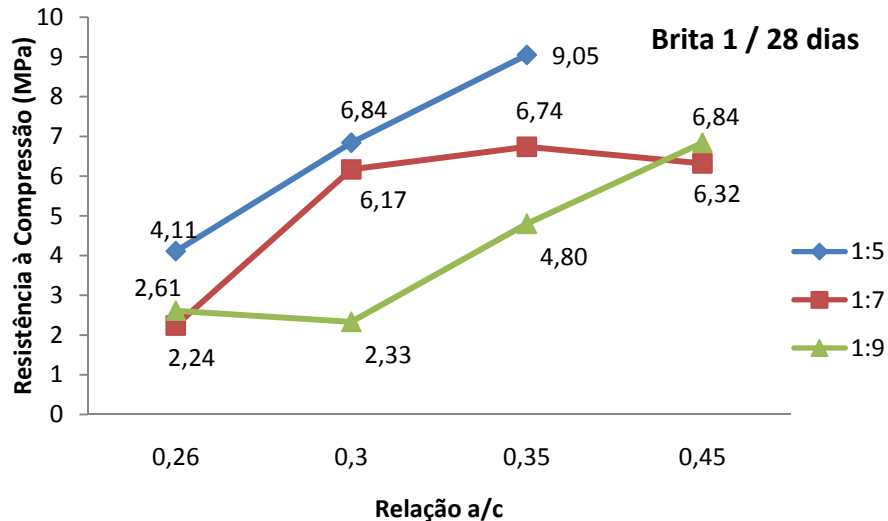


Figura 5.3 – Variação da resistência em função da quantidade de agregado (m) aos 28 dias.

Além disso, as figuras mostram claramente que o aumento da relação a/c , dentro da faixa testada, tende a favorecer o incremento da resistência, ao contrário do que se esperaria.

5.1.5 Conclusões Gerais – 1ª. Etapa – Ensaios Preliminares

Constatou-se, no estudo preliminar efetuado na 1ª. etapa, que a resistência à compressão e a morfologia do corpo de prova varia bastante em função de m e a/c .

Ao contrário do esperado, a resistência à compressão não se mostrou governada pela relação a/c , ao contrário do esperado em concretos convencionais. Os traços com maior relação a/c tenderam a desenvolver maiores valores de resistência, especialmente na faixa de 0,30 a 0,35. Acredita-se que isso decorre do fato de que, com uma maior relação a/c , a mistura ganha trabalhabilidade e a pasta consegue lubrificar melhor a mistura, permitindo uma melhor acomodação dos agregados, que ficam mais bem envoltos pela pasta.

Pela mesma razão, nos traços com maior relação a/c foi mais sensível o efeito de ganho de resistência com a idade. O problema nesses corpos de prova é que, embora a resistência fosse boa, não se obteve um adequado fluxo de água através do material. Embora nessa etapa ainda não tenham sido realizados os ensaios de permeabilidade, os testes de passagem de água

efetuados em todos os corpos de prova indicaram que, nos corpos de prova com mais água, a pasta mais fluida havia escorrido e obstruído parte da porosidade entre os agregados. Ao contrário, nos traços com relação a/c 0,26 e 0,30, a ligação se dá mais pelo atrito direto entre os agregados e menos pela presença de pasta. A resistência à compressão obtida é menor e não se nota variação marcante da mesma com a idade, após os 7 dias. Mas a permeabilidade é maior.

Diante dessas constatações decidiu-se, na segunda etapa, investigar alguns parâmetros de produção, buscando avançar na obtenção de um traço que combinasse bons resultados de resistência com uma porosidade aberta e interconectada, que favorecesse uma alta permeabilidade da água.

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

Na segunda etapa partiu-se para um planejamento revisado, com definição de novos traços, utilizando somente brita 0 (pedrisco) ou brita 1 com uma pequena porcentagem de agregado fino (areia). Além disso, se estudou o efeito da vibração e os benefícios de obter os corpos de prova através da extração de amostras de blocos maiores de concreto, ao invés de resultantes da moldagem em formas de dimensões reduzidas.

Para permitir os avanços dos estudos, sem tornar o programa experimental demasiadamente grande, foi necessário fixar valores para as variáveis estudadas na primeira etapa da presente pesquisa. Dessa forma, decidiu-se que voltariam a ser estudados na segunda etapa somente traços com relação $a/c = 0,30$, pois essa quantidade de água resultou em corpos de prova com boa resistência e porosidade aberta. Como o efeito de crescimento da resistência com o avanço da idade de ensaio foi muito suave, alguns ensaios foram realizados aos 14 dias, para acelerar o estudo. Além disso, decidiu-se usar traços com $m = 4$, no intuito de averiguar se seria possível incrementar ainda mais a resistência do concreto permeável.

5.2.1 Efeito da Mudança do Tipo de Agregado

Nessa série de ensaios se usou um traço com $m = 4$ e relação $a/c = 0,30$. O traço foi variado usando brita 0 (pedrisco) e brita 1 com uma pequena porcentagem (7%) de agregado fino, de

Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental

forma a dar mais estrutura para a pasta sem aumentar muito seu volume, buscando evitar que essa preenchesse os poros, comprometendo a permeabilidade do concreto. Todos os ensaios foram realizados aos 14 dias, em corpos de prova extraídos de blocos maiores com dimensões de 44 x 30 x 20 cm, adensados com auxílio de vibrador de agulha encostado à forma.

A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos. Novamente, foram excluídos dados espúrios quando o CV ficou acima de 25%. Os dados foram graficados na Figura 5.4.

Tabela 5.4 - Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1, brita 0 e brita 1 mais 7% de areia.

	Brita 1 (B1)	Brita 0 (B0)	Brita 1 + 7% Areia
CP1	-	7,9	5,7
CP2	4,1	-	3,5
CP3	4,0	7,9	3,2
CP4	3,2	8,5	4,0
CP5	2,5	9,6	4,9
CP6	3,5	8,8	3,2
Média	3,46	8,54	4,08
CV (%)	19%	8%	25%

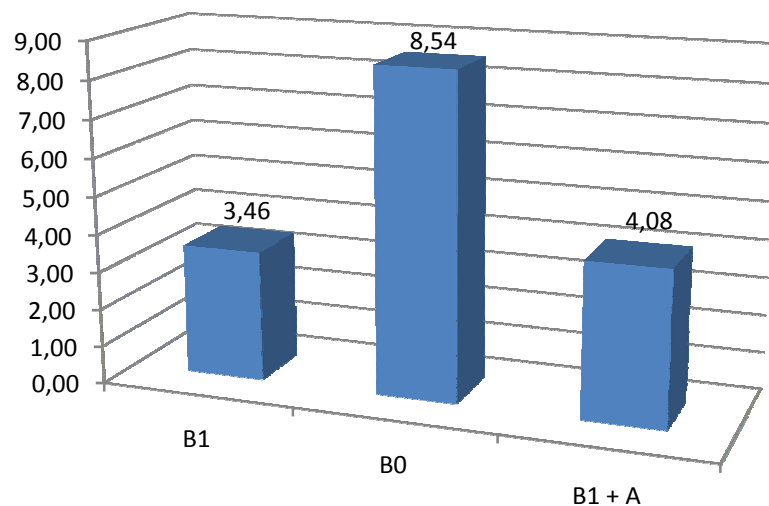


Figura 5.4 – Variação da resistência média em função do tipo de agregado: brita 1 (B1); brita 0 (B0) e brita 1 com 7% de areia (B1+A), aos 14 dias.

Analisando a figura, nota-se claramente que o uso da brita 0 favoreceu o aumento de resistência à compressão, pois aumenta o empacotamento e o contato entre agregados. Esse resultado está de acordo com o descrito pelo ACI (2006), que cita que a brita com diâmetro máximo de 9,5 mm é ideal para a produção do concreto permeável. Na primeira etapa se estudou o uso da brita 1, que é mais comum e, muitas vezes, mais barata na realidade brasileira. O uso de uma pequena parcela de areia (nesse caso, 7%), recomendação citada em alguns estudos, (Apêndice 6, *Pervious Concrete Mixture Proportioning*, da norma 211.3R-02 do ACI, *Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*) também se mostrou como levemente favorável.

5.2.2 Efeito da Forma de Vibração

Para analisar os efeitos da forma de vibração completou-se a série de ensaios da segunda fase reproduzindo os mesmos traços com $m = 4$, relação $a/c = 0,30$ estudadas no item anterior, mas com formas de vibração diferenciadas.

Para os traços com brita 1 e brita 1 com areia se decidiu tentar moldar o bloco sem adensamento com vibração, sendo usada apenas uma espátula para pressionar o material na forma.

No caso da mistura com pedrisco, que demanda uma melhor compactação, foi usada uma vibração intensa, com auxílio de mesa vibratória.

Todos os ensaios foram realizados aos 14 dias, em corpos de prova extraídos de blocos maiores. A Tabela 5.5 mostra os resultados obtidos. Novamente, foram excluídos dados espúrios quando o CV ficou acima de 25%. Os dados referentes aos traços com brita 1 foram graficados na Figura 5.5, enquanto os relativos à brita 0 são mostrados na Figura 5.6.

Tabela 5.5 - Resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova moldados com brita 1, brita 0 e brita 1 com areia sujeitos a diferentes tipos de vibração.

	Brita 1 (B1)	Brita 0 (B0)	Brita 1 + 7% Areia
TIPO DE VIBRAÇÃO	Sem vibração	Mesa vibratória	Sem vibração
CP1	9,2	16,2	3,2
CP2	7,8	19,1	3,5
CP3	7,3	15,2	4,3
CP4	-	20,3	5,5
CP5	-	17,4	5
CP6	-	20,1	4,9
Média	8,10	18,05	4,40
CV (%)	12%	12%	21%

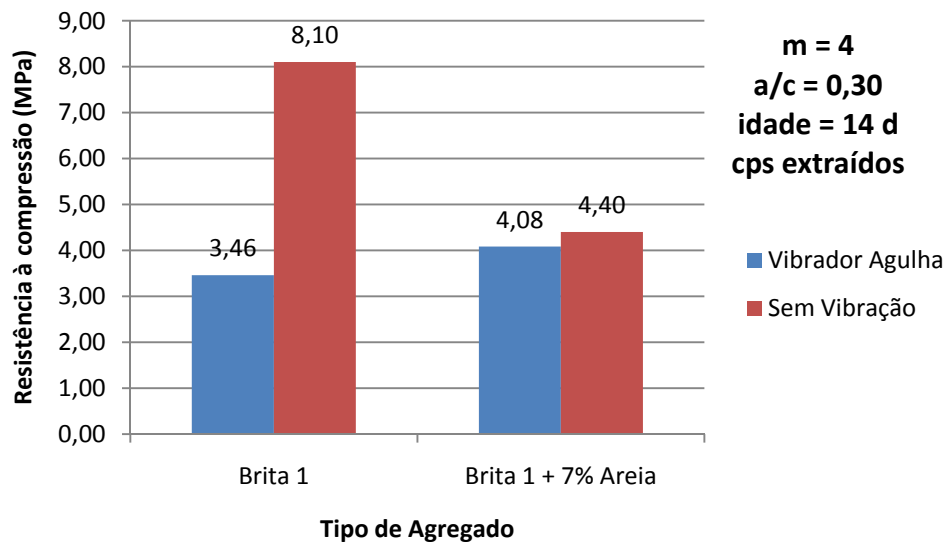


Figura 5.5 – Variação da resistência média em função do tipo de vibração em corpos de prova com brita 1 (B1) e brita 1 com 7% de areia (B1+A), aos 14 dias.

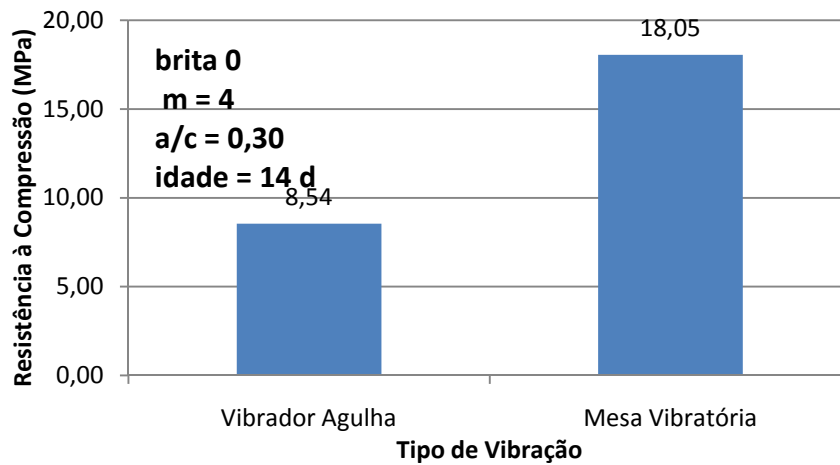


Figura 5.6 – Variação da resistência média em função do tipo de vibração em corpos de prova com brita 0, aos 14 dias.

Nota-se que ambas as alternativas estudadas resultaram em melhorias da resistência. No caso dos traços com Brita 1, sem vibração, acredita-se que o uso de adensamento manual fez com que a pasta não escorresse do agregado. Já no caso do traço com pedrisco (brita 0), onde a mistura fica naturalmente mais seca, o uso da mesa vibratório favoreceu o empacotamento, resultando num marcante incremento de resistência. Infelizmente, conforme observações visuais, isso causou certa obstrução dos poros, o que fez com que essa alternativa fosse descartada.

Apesar dos problemas de segregação da pasta, os excelentes resultados obtidos, com base na faixa apresentada em ACI 522R-06, em termos de resistência, indicam que pode ser possível associar uma boa resistência à compressão com um bom grau de permeabilidade, se a vibração for realizada adequadamente.

Nota-se que os resultados apresentam uma considerável dose de variabilidade. Isso é parcialmente atribuído às dificuldades de manter a integridade e capear adequadamente os corpos de prova extraídos. A energia de extração causou a perda de parte dos agregados, em alguns traços, conforme mostrado na Figura 5.7.



Figura 5.7: Corpo-de-prova extraído com defeito na borda devido ao processo de extração. (Fonte: Arquivo do pesquisador)

Além disso, houve alguns problemas de nivelamento dos blocos durante o processo de extração, o que causou a obtenção de corpos de prova com faces não niveladas. Levando em consideração o aprendizado obtido nessa primeira série de ensaios com corpos de prova extraídos, decidiu-se efetuar uma segunda série, buscando melhorar os resultados dos ensaios, pelo melhor controle do nivelamento dos blocos de concreto no momento da extração. Para isso, foram construídas novas fôrmas, nas quais a extração aconteceria na horizontal.

5.2.3 Efeito da Direção de Extração

No segundo conjunto de concretagens, destinado a estudar uma nova forma de extração, foi mantido o traço 1:4 e retomado o traço 1:5. Foram usados duas dimensões de agregado (brita 0 e brita 1) e uma combinação (brita 1 com 7% de areia). A Tabela 5.6 mostra os resultados obtidos de corpos de prova sem vibração, extraídos horizontalmente. Os mesmos foram comparados aos dados das Tabelas 5.4 e 5.5, obtidos de extração na vertical, como mostrado na Figura 5.8. Analisando a tabela e o gráfico nota-se que o traço mais rico, como esperado,

resulta em uma resistência levemente maior. Porém, a nova forma de moldagem e de extração aparentemente causou perdas de resistência. Isso foi atribuído, em grande parte, à incapacidade de efetuar um bom adensamento sem vibração, o que afetou principalmente o traço com brita 0 (pedrisco).

Tabela 5.6. Resultados da 2ª. série de concretagens da 2ª etapa, com distintos tipos e quantidades de agregado, sem vibração.

Composição do Agregado	Traço	Resistência à compressão (MPa)	Resistência média à compressão (MPa)	CV (%)
Brita 1	1:4	3,65	3,35	13%
		3,05		
		-		
	1:5	3,72	3,04	20%
		2,81		
		2,60		
Brita 0 (Pedrisco)	1:4	1,69	1,76	8%
		1,66		
		1,92		
	1:5	-	1,02	-
		0,80		
		1,23		
Brita 1 + 7% de areia	1:4	5,02	4,82	7%
		4,45		
		4,99		
	1:5	3,23	2,87	19%
		3,14		
		2,24		

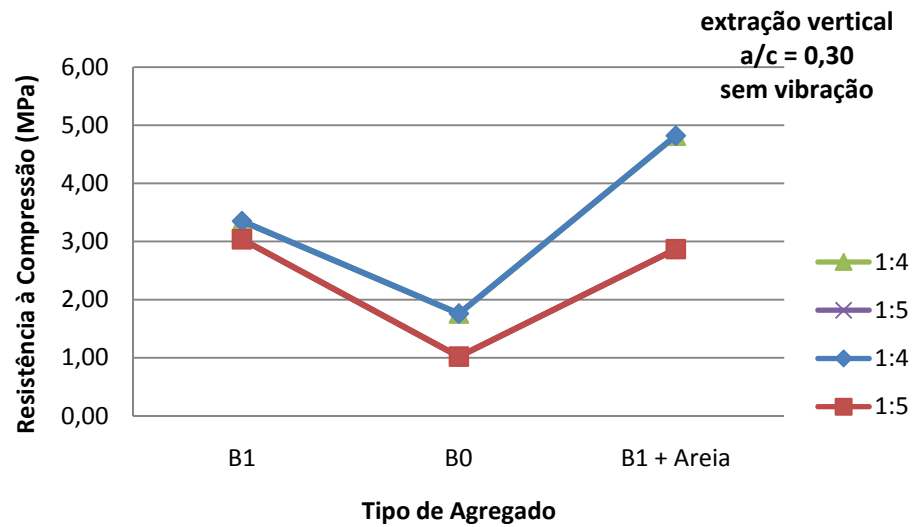


Figura 5.8: Comparação de resultados para traços com $m=4$ e $m=5$.
(Fonte: Arquivo do pesquisador)

Essa constatação reforça a informação encontrada na bibliografia pesquisada, de que a aplicação de vibração sobre a pavimentação, normalmente efetuada com uma vibroacabadora, conforme ilustra a Figura 5.9, tem um papel fundamental no acabamento do projeto e na garantia de uma boa resistência à compressão. O traço deve ser ajustado e a vibração não deve ser excessiva para evitar comprometer a permeabilidade.



Figura 5.9: Aplicação de vibração com uma vibroacabadora sobre uma pavimentação. (Fonte: ACI, 2006)

Outra possível causa associada à resistência reduzida dos corpos de prova com brita 0 pode estar associada à perda de agregado durante a extração, o que impacta a resistência à compressão. Esse tipo de incidente, não foi observado na extração dos corpos de prova com brita 1, que se mantiveram intactos.

Fica evidente, portanto, a necessidade de estudos adicionais para avaliar melhor qual o agregado mais adequado para pavimentação permeável. O ponto positivo é os dados coletados indicam que tanto a brita zero como a brita 1 podem ser utilizadas numa pavimentação com o concreto permeável, sendo que brita 1 apresentou resultados melhores quando associada com uma pequena parcela de areia. Acredita-se que isso se deve ao aumento da superfície específica, que favorece a retenção de água, ajudando na hidratação, com impacto positivo na resistência à compressão. Além disso, com o uso do agregado fino e aplicação de vibração, pode ocorrer um melhor acomodamento dos agregados.

Para averiguar essa hipótese testou-se um dos traços, com $m = 4$ e fabricado com brita 1 com areia, com os 3 tipos de vibração. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.7. Os mesmos foram representados graficamente na Figura 5.10. Analisando os mesmos verifica-se que, de fato, a intensificação da vibração é positiva, desde que não ocorra escorrimento da pasta, causando uma concentração diferenciada da mesma ao longo do corpo de prova.

Tabela 5.7. Análise dos efeitos de vibração no traço com $m = 4$, fabricado com brita 1 com 7% de areia.

Vibração	Resistência à compressão (MPa)	Resistência média à compressão (em MPa)	CV (%)
Sem vibração	5,02	4,82	7%
	4,45		
	4,99		
Imersão de vibrador do tipo agulha com diâmetro de 25mm	5,87	5,26	17%
	4,26		
	5,66		
Adensamento em mesa vibradora (10 segundos para cada camada)	7,29	6,99	8%
	7,33		
	6,34		

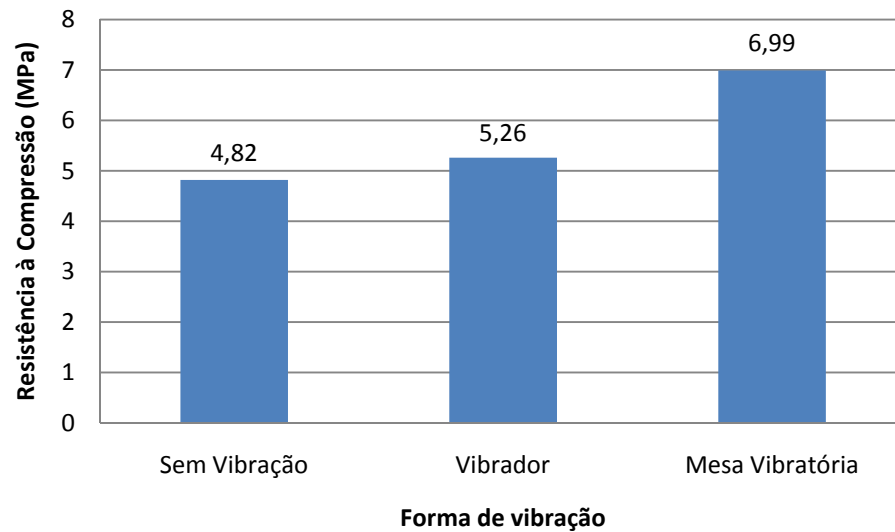


Figura 5.10: Efeitos da forma de vibração na resistência à compressão de traços com $m=4$ e brita 1 com adição de 7% de areia.

5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA

Na terceira etapa se buscou efetuar uma comparação entre resultados de corpos de prova extraídos e moldados, visto que, na segunda etapa se constatou que a extração podia danificar alguns corpos de prova, dificultando seu capeamento e afetando sua resistência à compressão.

Por outro lado, na primeira etapa, se verificou que a moldagem em fôrmas cilíndricas, além de não representar adequadamente a situação de um pavimento permeável real, causava problemas de acomodação da brita e favorecia o efeito parede.

Uma série de ensaios foram então realizados para investigar esse aspecto. Os dados coletados foram reunidos na Tabela 5.8. Os mesmos se referem a traços com $m = 4$ e adensamento por imersão de vibrador.

Analisando a tabela constata-se que, de fato, para o traço com pedrisco, a extração parece ser um processo danoso, que danifica o corpo de prova e reduz a resistência. Já para brita 1 a extração é favorável, possivelmente porque o uso de uma brita maior dificulta a adequada moldagem nas formas cilíndricas. Mas esse efeito desaparece quando se usa um pouco de areia, sendo que as maiores resistências foram obtidas nos corpos de prova moldados com esse traço. O uso da brita 1 sozinha resultou nas resistências mais baixas.

Tabela 5.8. Resultados da série com $m = 4$ e adensamento com vibrador de agulha, moldados e extraídos.

	Forma de obtenção do corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)	Resistência média à compressão (em MPa)	CV (%)
Brita 1 + 7% de Areia	Extração	5,87	5,04	13%
		4,26		
		5,66		
		5,02		
		4,45		
		4,99		
	Moldagem	9,11	8,40	12%
		8,04		
		9,03		
		9,06		
6,74				
Brita 1	Extração	3,22	3,68	19%
		4,86		
		3,60		
		3,65		
		3,05		
		6,24		
	Moldagem	1,51	1,99	21%
		2,23		
		2,22		
	Pedrisco	Extração	4,24	3,66
2,83				
3,90				
Moldagem		4,49	4,22	9%
		3,95		
		6,18		

5.4. RESULTADOS DA 4ª ETAPA: ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão foram modestos, sendo que os corpos de prova apresentaram, em geral, resistências abaixo de 10 MPa, com exceção de um traço de pedrisco adensado na mesa vibratória.

Apesar dos valores obtidos estarem dentro da faixa mencionada pelo ACI (2006) de resistência de concretos permeáveis, que varia entre 2,8 e 28 MPa, os mesmos são muito baixos para permitir que o concreto seja usado em locais de trânsito de veículos pesados. A

norma NBR 9781:87 – Peças de Concreto para Pavimentação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987), menciona que a resistência deve ser maior ou igual a 35 MPa para veículos comerciais ou de linha e igual ou superior a 50 MPa para tráfego de veículos especiais ou capazes de produzir efeitos de abrasão.

Mais estudos são necessários para melhorar a resistência. Mas a principal característica desejada de um concreto permeável é sua habilidade de deixar passar água.

O problema é que se verificou que os traços com maior resistência estavam normalmente associados a um bloqueio da rede de poros, pela penetração de argamassa. Para averiguar qual o traço que resulta na melhor combinação resistência x permeabilidade é necessário medir de forma sistemática a permeabilidade dos conglomerados gerados.

Para tanto amostras de vários dos traços estudados foram submetidas a um ensaio de permeabilidade, seguindo o procedimento discutido no Capítulo 5. Esses resultados são apresentados a seguir. Nas Tabelas 5.9 a 5.11 contém os dados dos traços com $m=4$ e $m=5$.

Na Tabela 5.9 se comparam corpos de prova de Brita 1 com 7% de areia, moldados em mesa vibratória e adensados com vibrador de agulha. Nota-se que o uso da mesa vibratória de fato reduz bastante a permeabilidade, que fica na ordem de 200 l/min/m², valor de referência usado para representar a média de permeabilidade de um concreto poroso. Já nos corpos de prova adensados com vibrador de agulha a resistência é menor, mas a permeabilidade mais que dobra, subindo a 497 l/min/m².

Tabela 5.9. Permeabilidade de corpos de prova extraídos, de concreto com traço 1:4, confeccionado com brita 1 e 7% de areia.

Traço	Forma de Vibração	K (cm/s)	K (m/s)	Fluxo (l/min./m ²)	Fluxo Médio (l/min./m ²)
Brita 1 com 7% de areia	Mesa vibradora (10 segundos em cada camada)	0,57568	0,00576	338	196
		0,2442	0,00244	143	
		0,18491	0,00185	108	

Tabela 5.9.(cont.) Permeabilidade de corpos de prova extraídos, de concreto com traço 1:4, confeccionado com brita 1 e 7% de areia.

Traço	Forma de Vibração	K (cm/s)	K (m/s)	Fluxo (l/min./m ²)	Fluxo Médio (l/min./m ²)
Brita 1 com 7% de areia	Vibrador do tipo agulha c/diâmetro de 25mm	0,90679	0,00907	544	497
		0,80711	0,00807	484	
		0,77591	0,00776	465	

Já na Tabela 5.10 se observa uma comparação entre corpos de prova extraídos e moldados com diferentes materiais, adensados com vibrador de agulha (método que deu melhor resultado na análise anterior). A Figura 5.11 ilustra graficamente os resultados obtidos.

Tabela 5.10. Permeabilidade de corpos de prova extraídos e moldados, de concreto com traço 1:4, adensados com vibrador de agulha.

Tipo de Agregado	Forma de Vibração	K (cm/s)	K (m/s)	Fluxo (l/min./m ²)	Fluxo Médio (l/min./m ²)
BRITA 1 com 7% de Areia	EXTRAÇÃO	0,48799	0,00488	287	307
		0,58366	0,00584	343	
		0,48635	0,00486	292	
	MOLDAGEM	0,43131	0,00431	259	251
		0,32533	0,00325	191	
		0,51801	0,00518	304	
BRITA 1	EXTRAÇÃO	0,8973	0,00897	521	526
		0,8899	0,0089	516	
		0,93268	0,00933	541	

Tabela 5.10. (cont.) Permeabilidade de corpos de prova extraídos e moldados, de concreto com traço 1:4, adensados com vibrador de agulha.

Tipo de Agregado	Forma de Vibração	K (cm/s)	K (m/s)	Fluxo (l/min./m ²)	Fluxo Médio (l/min./m ²)
BRITA 1	MOLDAGEM	1,28108	0,01281	767	869
		1,65414	0,01654	992	
		1,41339	0,01413	848	
BRITA 0	EXTRAÇÃO	0,79662	0,00797	468	379
		0,5691	0,00569	341	
		0,54737	0,00547	328	
	MOLDAGEM	1,1579	0,01158	694	537
		0,63513	0,00635	381	

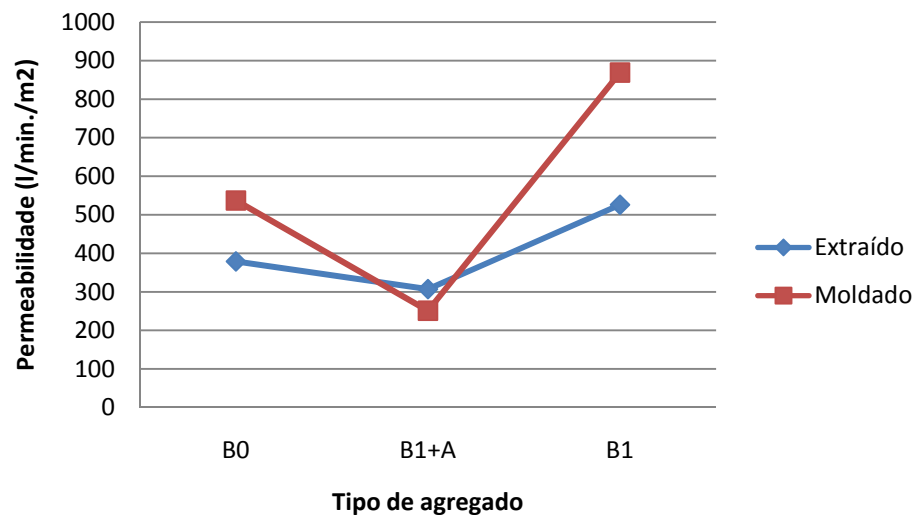


Figura 5.11: Variação da permeabilidade com o tipo de agregado e forma de produção dos corpos de prova, de traços com m=4.

Analisando a tabela e a figura nota-se que a produção de corpos de prova através de moldagem direta nas formas metálicas acaba resultando numa permeabilidade bem maior do que a registrada nos corpos de prova extraídos, para os traços com brita 1 e brita 0. Já no caso do traço com brita 1 mais 7% de areia a diferença não é muito grande e a maior permeabilidade é obtida nos corpos de prova extraídos.

Esses resultados parecem indicar que, se de fato ocorreu visualmente um acúmulo de pasta nas laterais do corpo de prova devido ao efeito parede, isso não afetou de modo significativo a permeabilidade do material, ao contrário do esperado. Os resultados parecem indicar que, na verdade, o empacotamento menos eficiente conseguido na forma metálica acabou deixando mais vazios, incrementando a permeabilidade, quando não se usou areia.

Esse tipo de fenômeno pode ser observado melhor na Figura 5.12, que mostra exemplares extraídos e moldados. Verifica-se, examinando a mesma, que, de fato, o adensamento ou acomodamento do agregado parece ser maior no corpo de prova extraído, o que leva a um maior empacotamento e reduz os vazios. Se esse resultado for confirmado em outras pesquisas ele pode ser relevância para o dimensionamento e controle da qualidade de pavimentos de concretos permeáveis, pois evidencia que o controle da permeabilidade através de corpos de prova cilíndricos moldados pode superestimar a permeabilidade do material.



Figura 5.12: Comparação entre o acomodamento da brita entre um cp moldado e um extraído (Fonte: Arquivo do Pesquisador).

A Tabela 5.11 mostra a mesma comparação entre corpos de prova extraídos e moldados com diferentes materiais, para traços com $m=5$. Só que nessa série se decidiu não vibrar os corpos de prova. Os dados são graficados na Figura 5.13.

Nota-se, analisando a tabela e a figura, que as permeabilidades são muito maiores nesses traços de $m=5$ sem vibração do que nos traços de $m=4$ com adensamento através de vibrador de agulha. Novamente, os corpos de prova moldados acabaram tendendo a apresentar permeabilidades maiores, com exceção do caso do traço com pedrisco, onde a permeabilidade foi similar nos dois tipos.

Esse resultado diferenciado foi atribuído à ausência de vibração. Ou seja, a hipótese levantada é de que, no caso do traço com pedrisco, sem vibração, o adensamento foi similar nos concretos moldados em formas metálicas pequenas e nas formas maiores, resultando em permeabilidades parecidas.

Tabela 5.11. Permeabilidade de corpos de prova extraídos e moldados, de concreto com traço 1:5, adensados sem vibração.

Tipo de Agregado	Tipo de CP	K (cm/s)	K (m/s)	Fluxo (l/min./m ²)	Fluxo Médio (l/min./m ²)
BRITA 1 com 7% de Areia	EXTRAÇÃO	1,03059	0,01031	605	627
		1,10808	0,01108	651	
		1,08463	0,01085	624	
	MOLDAGEM	1,53515	0,01535	902	890
		1,49619	0,01496	879	

Tabela 5.11. (cont.) Permeabilidade de corpos de prova extraídos e moldados, de concreto com traço 1:5, adensados sem vibração.

Tipo de Agregado	Tipo de CP	K (cm/s)	K (m/s)	Fluxo (l/min./m ²)	Fluxo Médio (l/min./m ²)
BRITA 1	EXTRAÇÃO	1,14469	0,01145	689	678
		1,06025	0,0106	623	
		1,23326	0,01233	724	
	MOLDAGEM	2,2807	0,02281	1368	1343
		2,19747	0,02197	1318	
BRITA 0	EXTRAÇÃO	1,36458	0,01365	801	817
		1,3838	0,01384	812	
		1,43082	0,01431	840	
	MOLDAGEM	1,30326	0,01303	782	747
		1,18525	0,01185	711	

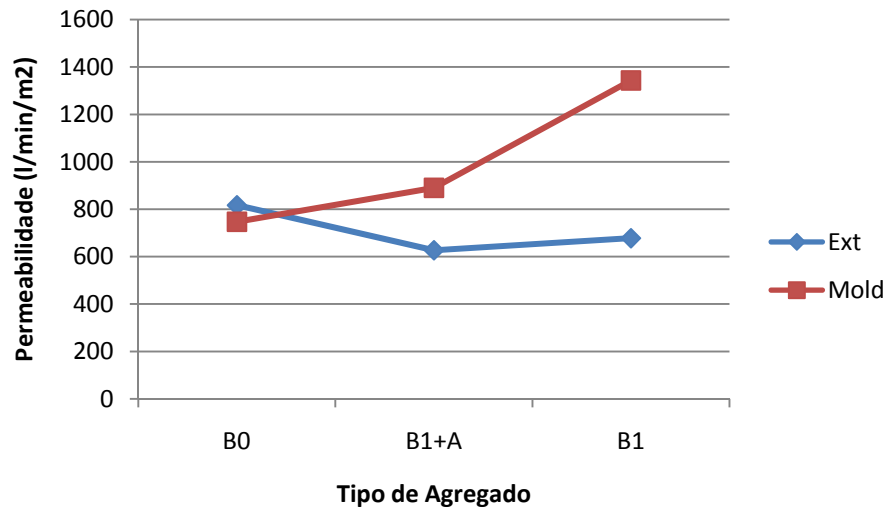


Figura 5.13: Variação da permeabilidade com o tipo de agregado e forma de produção dos corpos de prova, de traços com $m=5$.

Realizando uma correlação entre a permeabilidade e os resultados de resistência à compressão (MPa), percebe-se, claramente, no traço 1:4, que à medida que a permeabilidade aumenta a resistência diminui, conforme ilustra a Figura 5.14. E, no caso do traço 1:5, os resultados se mostraram bastante variados, conforme mostra a Figura 5.15, mais uma vez mostrando a importância da vibração em um pavimento permeável para promover um bom acomodamento da brita, sem que haja a perda da permeabilidade.

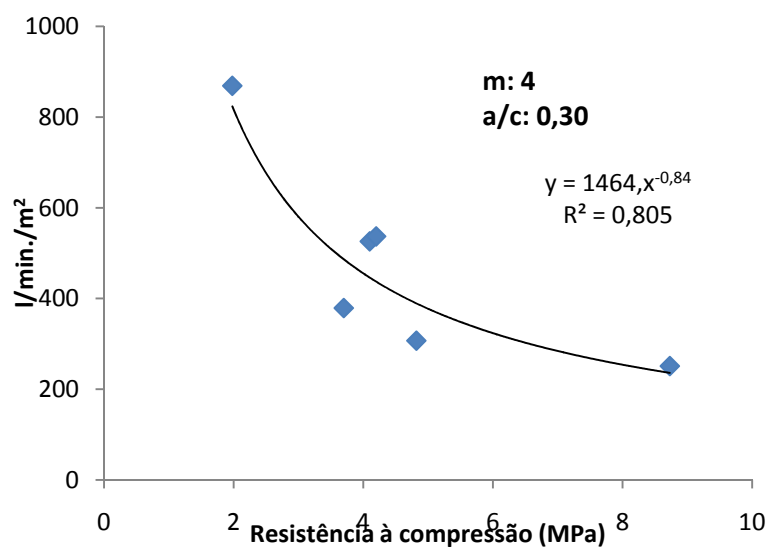


Figura 5.14: Comparação dos resultados de permeabilidade com os de resistência à compressão para o traço de $m:4$.

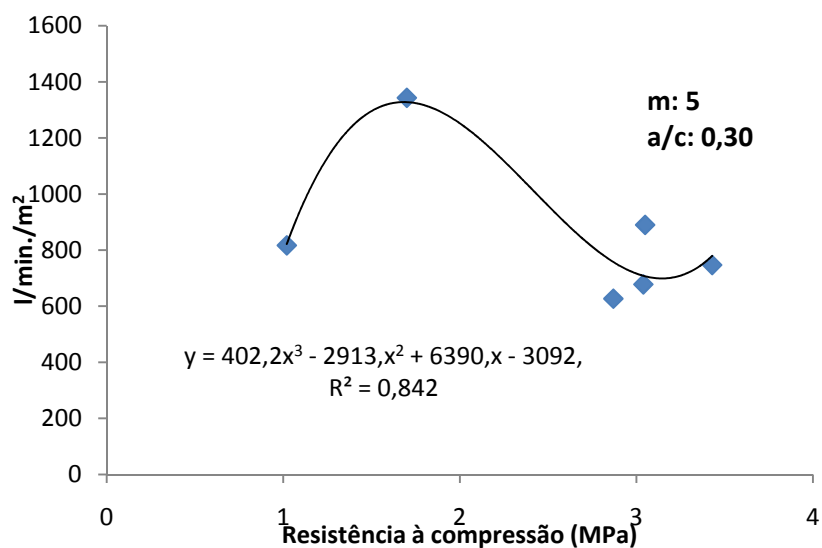


Figura 5.15: Comparação dos resultados de permeabilidade com os de resistência à compressão para o traço com m:5.

5.5. ANÁLISE RESUMIDA DO IMPACTO POTENCIAL DO USO DO CONCRETO PERMEAVEL EM PAVIMENTAÇÃO DE ÁREA URBANAS

Nesse item se buscou, com base nos resultados obtidos, efetuar uma breve análise do potencial de uso do concreto permeável, buscando apresentar como sua utilização pode afetar os sistemas de drenagem urbanos.

A utilização do concreto permeável como uma alternativa às superfícies impermeabilizadas com o concreto convencional e o asfalto se mostra uma proposta válida em vista da problemática urbana, representada, sobretudo, pelas grandes enxurradas e alagamentos.

As enxurradas, conforme mencionado previamente, causam danos estruturais nas construções, transtornos à população, proliferação de doenças como a leptospirose e a cólera, agressão aos corpos hídricos e ao meio ambiente, de modo geral, sobretudo por causa da perda da porosidade natural do solo. Onde antes as águas pluviais percolavam naturalmente no solo, agora existem sistemas de drenagem que, na sua grande maioria, não estão atendendo a demanda necessária para os grandes volumes de chuvas, ou acabam se entupindo devido ao carreamento de lixo.

Por outro lado, quando estes sistemas de drenagem conseguem atender essa demanda, eles acabam por comprometer a saúde dos corpos hídricos, que recebem uma vazão de águas poluídas por enxofre, cobre e outros metais pesados provenientes dos veículos automotores, poluição atmosférica e de outras fontes. Isso prejudica a qualidade da água não só para a sociedade, mas também para outros seres vivos, que também necessitam de água potável para sobreviver, como plantas e animais.

Visto isso e diante deste cenário atual preocupante, causado pela deterioração dos grandes centros urbanos e, conseqüentemente, do meio ambiente existe a necessidade de aprimorar-se sistemas de gestão de águas pluviais, de forma a diminuir a vazão que segue pelos mesmos. Uma alternativa para essa diminuição de vazão é a substituição, em alguns pontos, do concreto convencional pelo concreto permeável.

Huffman (2005), por sua vez, afirma que, em vista de todas as novas diretrizes rigorosas de águas pluviais, o concreto permeável voltou a ganhar destaque por ser um material de construção sustentável e de fácil instalação em locais como entradas de garagens, estacionamentos, meios-fios e calçadas. É um concreto que tira vantagem da sua alta porosidade, permitindo a percolação das águas através dele, aliviando o problema das enxurradas urbanas e reabastecendo o lençol freático. Este último fator é de grande importância devido ao problema de escassez de água potável no mundo.

Outro ponto positivo, segundo Huffman (2005), é que donos de grandes empresas poderiam fazer uso do concreto permeável para a percolação natural das águas pluviais ao invés de ter que destinar parte da área dos seus pátios para a construção de sistemas de coleta e tratamento dessas águas. Dessa forma, os grandes gastos que seriam revertidos para a construção de tubulações de drenagem e tratamento de águas pluviais poderiam ser economizados ao adotar a pavimentação por concreto permeável. A filtragem das águas pelo concreto permeável poderia auxiliar no tratamento das águas que percolam através deste, preservando os lençóis freáticos e garantindo o abastecimento com água potável.

Além de Polastre & Santos (2006) e Huffman (2005), outros autores como o professor Carlos Tucci (2007) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, reforçam a viabilidade do

concreto permeável como uma alternativa ambientalmente correta e viável para o caos urbano provocado pelas enxurradas.

Pavers também permitem a permeabilidade das águas pluviais, com a vantagem de que eles podem ser reaproveitados após o seu ciclo de vida e de atingir valores de resistência à compressão na faixa de 35 MPa (Pavimenti, 2010, e Itaporanga, 2010). Todavia, os pavers não obtêm índices de permeabilidade tão elevados como o do concreto permeável. Alguns autores, como Silveira (2010), mencionam que o melhor caminho seria o uso de ambos (pavers e concreto permeável) no ambiente urbano, de forma a contribuir para um desenvolvimento sustentável.

Ainda existem alguns pontos a ser estudados, como a questão da manutenção do concreto permeável, pois os poros podem entupir e a sua manutenção teria um alto custo. Além disso, a norma internacional 522R-06 “*Pervious Concrete*”, do ACI (2006), menciona que para a instalação do concreto permeável haveria a necessidade de todo um aparato para que isto ocorra do modo correto. Também se deve levar em conta que, devido à ausência de agregado miúdo, o concreto permeável perde água com muita facilidade. Desta forma deve-se ter cuidado na etapa de produção do mesmo, devendo tomar o cuidado para que a concretagem seja o mais rápida possível, incluindo o uso de retardadores em alguns casos específicos.

Mesmo com essas questões a serem aprimoradas, o concreto permeável possui muitos pontos positivos:

- 1) por ser um concreto que perde água com muita facilidade, a sua instalação deve ser próxima ao local de mistura, privilegiando empresas locais;
- 2) os poros no concreto auxiliam no combate ao aquecimento global, por permitir a troca de calor entre a camada no subsolo e a exposta do concreto;
- 3) o concreto poder ser fabricado com uma cor aumentando o albedo e diminuindo o efeito estufa;
- 4) o uso de concreto permeável permite uma economia de água na rega de plantas e árvores nos grandes centros urbanos.

As vantagens listadas acima são questões que devem ser consideradas, além do fato de que o concreto permeável auxilia na diminuição das enxurradas. A Tabela 5.12 mostra resultados de simulações feitas em determinados locais, sendo que em alguns destes locais seria substituído 20% da área total de concreto convencional pelo concreto permeável.

Apesar de a capacidade de percolação no solo abaixo da pavimentação permeável ser um fator decisivo na eficiência do concreto permeável, o quadro geral é bastante positivo. Os resultados obtidos nas simulações ilustram a capacidade de percolação do concreto permeável, quando este for utilizado na construção de calçadas e meios-fios. Outra questão positiva, é a quase inexistente diferença entre o custo de produção do concreto permeável e o concreto convencional, conforme ilustra a Figura 5.16.

Tabela 5.12. Simulações do uso do concreto permeável com exemplos práticos

Local	Área ou comprimento total	Área considerada para implantação do concreto permeável	Total de água drenada, com taxa de 200l/min./m ² (em litros/min)
Estacionamento Shopping Iguatemi (Porto Alegre)	35.000 m ²	7.000 m ² (20 % da área)	1.400.000
Terminal de Carga do Aeroporto Internacional Salgado Filho (Porto Alegre)*	9.500 m ²	100% da área	1.900.000
Parque da Redenção/Parque Farroupilha (Porto Alegre)*****	370.000 m ²	74.000 m ² (20% da área)	14.800.000
Avenida Ipiranga (Porto Alegre)***	10 km	45.000 m ²	9.000.000
Avenida UNISINOS (São Leopoldo)****	2,5 km	15.000 m ²	3.000.000

Fonte: *Infraero, (2010), **Pontos Br, (2010), ***Skyscrapercity, (2010)., ****Wikipedia, (2010) e *****Hotel Continental Porto Alegre, (2010)

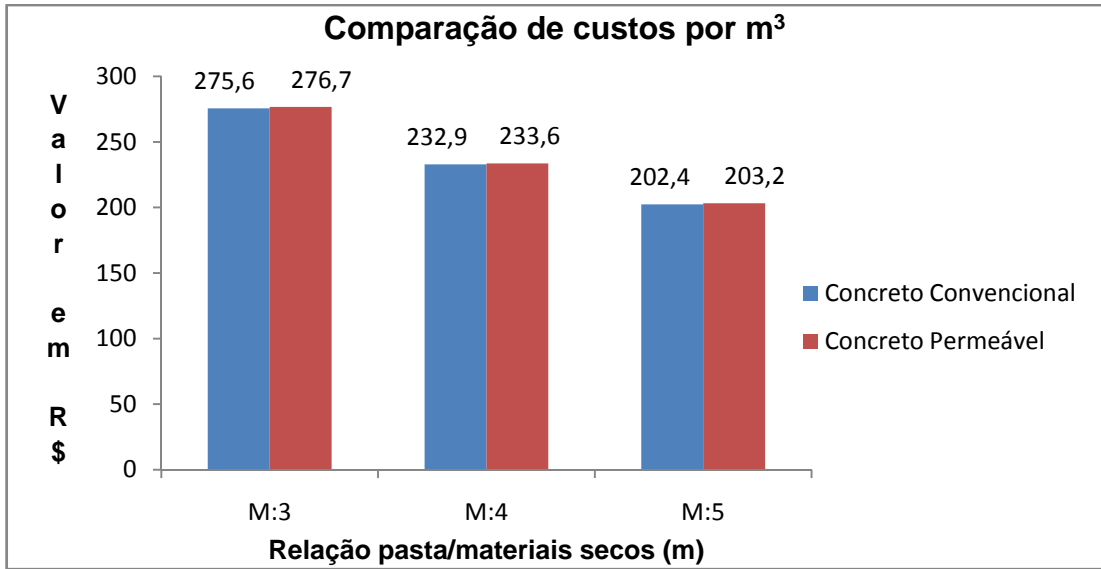


Figura 5.16: Simulação de custos por concretagens em m³

Mesmo com alguns pontos para serem aprimorados, tais como a intensidade da vibração, o aumento da resistência à compressão e uma melhor aceitação por parte da população, perante uma nova tecnologia, a adoção do concreto permeável é viável. Os exemplos citados neste capítulo reforçam, ainda mais, esse cenário.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo se apresentam as considerações finais do autor sobre o tema e as principais conclusões do trabalho, assim como algumas sugestões de trabalhos futuros.

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi-se o tempo da Revolução Industrial, onde a principal preocupação da sociedade era produzir, obter o lucro com um total descaso com o meio ambiente. Havia a idéia de que os nossos recursos naturais poderiam ser explorados indefinidamente, que sempre haveria matéria-prima para explorar e produzir os nossos produtos e serviços. Mais do que isso, tinha-se a idéia de que poderíamos dispor os nossos resíduos, efluentes industriais e outros produtos igualmente danosos à natureza, sem que isso nos afetasse. Algo que se provou o contrário com o passar dos anos e a evolução de uma consciência ecológica.

Mudanças foram feitas e a sociedade passou a prestar mais atenção no que fazia com o meio ambiente. Entretanto, os problemas continuaram acontecendo, dentre eles estava à expansão das grandes cidades, a construção de residências, edifícios, pavimentação de ruas, estradas e outros mais.

Associado a esse quadro, a população continuou produzindo resíduos sólidos, emitindo poluentes atmosféricos e a natureza mudou, em vista de todos esses impactos e alterações. O que se observa, hoje, são estações do ano bastante indefinidas, com mudanças bruscas de temperatura em questão de dias, assim como grandes alterações no ciclo de chuvas por todo o planeta.

Essa necessidade de expansão dos limites das cidades, a sua conseqüente geração de resíduos conjuntamente com as mudanças climáticas, têm provocado danos severos aos centros urbanos e muitos transtornos à população, principalmente por conta de todo um processo de impermeabilização urbana. É preciso construir para dar condições à população, mas não tem se levado em consideração esses fatores e esse problema se apresenta na forma da geração de grandes enxurradas urbanas.

Todavia, hoje, há um novo pensamento quanto a construir, sobretudo no que se refere à gestão dessas águas pluviais, procurando uma melhor interação sociedade/meio ambiente.

O descobrimento deste concreto, data do século 18, tendo sido muito utilizado na Segunda Guerra Mundial e, atualmente, este possui uma utilização em larga escala na Europa, EUA e Japão, sendo que existem empresas especializadas na construção desse concreto. Entretanto, no Brasil, o uso desse concreto não alcançou uma alta distribuição, tendo pouquíssimos exemplos práticos e nenhuma norma nacional.

Esta pesquisa procurou mostrar a eficácia do concreto permeável, trabalhando com um traço ideal com o objetivo de encontrar o equilíbrio entre uma boa resistência à compressão e boa permeabilidade. Os resultados encontrados ainda precisam ser mais trabalhados, sobretudo os de resistência à compressão para que este concreto tenha uso numa pavimentação como calçada e estacionamentos. E os resultados de permeabilidade, apesar de serem excelentes, ainda precisam estar de acordo com a capacidade de permeabilidade do solo onde vai ser instalada a pavimentação e há a necessidade do estudo da capacidade pluviométrica da região.

Ainda há outros fatores para serem levados em consideração na produção desse concreto, fatores condizentes com a realidade brasileira, como: a resistência da população; o descaso desta com os seus resíduos sólidos, o que poderá entupir os poros, comprometendo a permeabilidade; e, a necessidade de mão-de-obra já orientada quanto à construção de um pavimento permeável, sobretudo por conta das etapas a seguir na sua construção.

O concreto permeável é um concreto com características únicas, que precisa de uma instalação mais adequada, ele não é esteticamente atraente como o convencional, mas os seus pontos positivos são muitos. Além de permitir a drenagem das águas pluviais no local, ele alivia as ilhas de calor, combate o aquecimento global, permite a arborização nos centros urbanos e absorve ruídos.

Assim, ainda há muito a ser feito para que este concreto possa ser usado em exemplos reais, auxiliando na drenagem urbana, beneficiando não só a sociedade, mas o meio ambiente, promovendo uma aproximação das condições de pré-urbanização. E, levando em conta no quanto esse contínuo processo de expansão e impermeabilização das cidades tem impactado o meio ambiente, a adoção deste tipo de concreto torna-se imperativa.

Nesse trabalho se estudaram diversos traços de concretos permeáveis, confeccionados com base nas recomendações do ACI (2006). Em geral, foram obtidos concretos com resistências baixas a moderadas (na faixa de 2 a 16 MPa), mas com altos índices de permeabilidade, superiores às dos solos naturais (de acordo com Pinto (2006), o máximo de permeabilidade encontrada em um solo arenoso, graúdo, foi de 600l/min/m²).

Os traços já obtidos são adequados para uso em pavimentos com tráfego de pedestres ou veículos leves. Para viabilizar a possibilidade de uso do material em estacionamentos e vias de tráfego mais intenso ou composto de veículos pesados, será necessário desenvolver traços de maior resistência. Aqueles com pedrisco, intensamente adensados na mesa vibratória, resultaram nas resistências mais elevadas, da ordem de 16 MPa. Porém, nos mesmos a permeabilidade caiu para cerca de 190 l/min/m².

Outra questão pertinente é que a percolação efetiva é controlada pelo solo existente abaixo do pavimento permeável. Pouco adianta ter um concreto altamente permeável, como se obteve durante os ensaios (alguns traços apresentaram índice de permeabilidade superior a 1000l/min./m²), se o solo abaixo infiltrar apenas 200l/min/m². É verdade que o próprio concreto permeável e a camada de brita que se coloca sob o mesmo, também servem de reservatório, o que faz com que os primeiros milímetros de chuva não escorram, mas sejam aprisionados. Nesse cenário o problema das enxurradas urbanas pode não ser totalmente resolvido, mas o pico de cheia seria claramente atenuado. Esse é um efeito que deve ser testado em ensaios de campo.

O desafio das pesquisas na área de concretos permeáveis será encontrar traços capazes de satisfazer adequadamente ambas as demandas (permeabilidade x resistência) para cada uso específico, que tenham boa durabilidade e resistência à abrasão.

Segundo os dados obtidos, um caminho que se apresenta para a concretização desse objetivo parece ser a utilização moderada e correta da vibração, o que induz a brita a se acomodar melhor, aumentando a resistência à compressão. Contudo essa técnica deve ser utilizada com muito cuidado, pois se o concreto for vibrado em excesso, os poros são preenchidos, eliminando a sua principal característica que é a permeabilidade das águas pluviais.

Em vistas destas constatações, reforça-se a necessidade do desenvolvimento de novas pesquisas para o estudo da intensidade da vibração durante a moldagem de corpos de prova de concreto permeável. Apesar dos concretos estudados ainda não terem resistência suficiente para aplicação em vias públicas, os índices de permeabilidade alcançados comprovam o potencial de uso que uma pavimentação permeável pode ter em relação a todos os problemas causados pelas enxurradas urbanas, tanto para a sociedade como para o meio ambiente.

6.2. CONCLUSÕES

Com base nos ensaios e análise realizados podem-se tirar as seguintes conclusões, derivadas do programa experimental desenvolvido no presente trabalho:

- As taxas de infiltração dos concretos permeáveis, fabricados no trabalho, foram elevadas, superiores na maioria dos casos as de solos arenosos;
- O uso de relações água-cimento nos extremos da faixa recomendada pelo ACI (2006) ocasionou problemas de trabalhabilidade e/ou resistência;
- Para se ter resistências adequadas deve-se usar traços com m entre 4 e 5;
- O uso de agregado de menor diâmetro (brita 0) favoreceu o empacotamento e conduziu a traços com maior resistência e menor permeabilidade;
- Os custos de produção do concreto permeável são baixos e o mesmo é uma alternativa viável para produção de pavimentos permeáveis.

Naturalmente essas conclusões precisam ser confirmadas e ampliadas em estudos complementares e independentes. Cabe destacar, ainda, que os dados coletados não representam, adequadamente, o comportamento de estruturas de maior porte ou de superfícies pavimentadas, potenciais alvos para a utilização do concreto permeável. Isso, porque, para a pavimentação, um grande volume de concreto é lançado e compactado, usando um rolo compressor ou uma vibroacabadora.

Em geral, todavia, considera-se que o presente estudo exploratório foi exitoso, pois se atingiu o objetivo principal do programa experimental, que era a definição de um traço que associasse uma boa resistência à compressão (o que indiretamente afeta a resistência à abrasão) com uma boa permeabilidade, combinação adequada para geração de pavimentos em locais com tráfego leve ou pouco intenso. Esse traço, de a/c de 0,30 e m (pasta + materiais secos) de 4, foi obtido

e hoje está sendo usado em outros programas experimentais do Grupo de Pesquisa LEME, que estão desenvolvendo aplicações práticas de concreto permeável. Dada a escassez de conhecimento, o trabalho se focou na obtenção de dados básicos necessários para que se pudessem gerar concretos permeáveis adequados para o uso pretendido. Apesar dessa limitação, o trabalho contribuiu de forma decisiva para o acúmulo de conhecimento sobre os processos de fabricação, adensamento e teste de concretos permeáveis, qualificando o Grupo de Pesquisa para desenvolvimento de estudos mais avançados na área.

6.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dando prosseguimento ao andamento das pesquisas com o concreto permeável, sugere-se que sejam desenvolvidos os seguintes trabalhos:

- a) Teste de novos traços, incluindo mais ricos, como 1:3, para que se possa verificar quais os valores limite de resistência e permeabilidade do concreto permeável;
- b) Estudo detalhado da influência do teor de agregado miúdo na resistência à compressão;
- c) Teste do uso de agregado fino junto com a brita zero (pedrisco);
- d) Análise da intensidade de vibração necessária para promover um melhor acomodamento do agregado graúdo;
- e) Teste *in loco* de pavimentos permeáveis;
- f) Estudos de resistência á abrasão;
- g) Análises do efeito de tamponamento (clogging).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 522R-06 – Pervious Concrete
- ACI 211.3R-02 - Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete
- ACIOLI, L.A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte.** Porto Alegre, UFRGS: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Março/2005. 162p.
- AGRA, S.G. **Estudo Experimental de Microrreervatórios para Controle do Escoamento Superficial.** Porto Alegre, UFRGS: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 2001. 105p.
- ARAÚJO, P.R. *et al.* 1999. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial.** Disponível em: <http://www.iph.ufrgs.br/corpodocente/tucci/publicações>. Acesso em: Maio de 2009.
- ARMITAGE, N. *et al.* 1998. **The removal of urban litter from stormwater conduits and streams.** Water Research Commission. Report No. TT 95/98, Pretoria.
- ARMITAGE, N. e ROOSEBOOM, A. 2000. **The removal of urban litter from stormwater conduits and streams:** paper 1 – The quantities involved and catchment litter management options. Water SA. No.2. Vol.26. Disponível em: www.wrc.org.za
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781:87** – Peças de de Concreto para Pavimentação. Rio de Janeiro: 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaios de Compressão para Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro: 1994.
- AZZOUT, Y. *et al.* 1994. **Techniques alternatives en assainissement pluvial.** Paris: Technique et Documentation – Lavoisier. 372p.
- BERTTINELLI, S. Estragos da chuva vão custar R\$ 1,7 milhão. **Jornal Vale do Sinos.** 10 de fev. de 2011. Caderno Comunidade, nº 9.883, p.6.
- BURIAN, S.; SHEPERD, J.M., 2005. Effect of Urbanization on the diurnal rainfall pattern in Houston. **Hydrological Processes,** Vol 19, N.5 pp 1089 – 1103.
- CAMPANA, N.A., TUCCI, C.E.M. 1994. Estimativa de área impermeável de macro-bacias urbanas. **RBE:** Revista Brasileira de Engenharia. Caderno de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, v.12, n.2, p. 79 – 94, Dez.
- CANHOLI, A.P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental

- CHEBBO, G. *et al.* 2001. Production and transport of urban wet weather pollution in combined sewer systems: the “Marais” experimental urban catchment in Paris. *Urban Water*. v.3. Issues 1 – 2. p3 – 15.
- CIRIA, 1996. **Infiltration drainage – Manual of good practice**. CIRIA-Construction Industry Research and Information Association – Report 156.
- CONTI, J.B. **Considerações sobre mudanças climáticas globais**. *Revista do Departamento de Geografia*, n.16. 2005. p. 70 – 75.
- CONCRETE NETWORK. 2011. Disponível em: www.concretenetwork.com. Acesso em: Julho de 2011.
- EEROLA, T.T., 2003. Mudanças climáticas globais: passado, presente e futuro. **Fórum de Ecologia**. Florianópolis: UDESC. 10 P.
- EOEARTH. 2011. Disponível em: www.eoearth.org. Acesso em: Julho de 2011.
- FAULKNER, B. 1999. **The control of surface water runoff from new development – UK national ‘policy’ in need of review**. Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/urbwat>. Acesso em: Novembro de 2009.
- FIGUEIREDO, E.C. de. *et al.* (2002). Limpeza do rio Capibaribe no município do Recife. **VI Seminário Nacional de Resíduos Sólidos: R.S.U. especiais**. Gramado: ABES.
- FOLHA DE SÃO PAULO. (2004). Cotidiano. Edição de 08/02/2004.
- FRANCIS, A.M. **Early Concrete Buildings in Britain**. *Concrete and Constructional Engineering*, Londres, V.60, N°2, Fev./1965. P.73 – 75.
- GALLI, J. 1990. **Thermal impacts associated with urbanization and stormwater management best management practices**. Metro. Wash. Counc. Gov. Maryland Dep. Environ. Washington D.C. 198p.
- GHAFOORI, N. **Development of No-Fines Concrete Pavement Applications**, *Journal of Transportation Engineering*, May/June 1995, Vol.126, N°3, p. 283 – 288.
- GUEDES, G. Como ajudar a reduzir os alagamentos?. **Jornal ABC**. 13 de fev. de 2011. n°794, p. 8 e 9.
- HOTEL CONTINENTAL PORTO ALEGRE. 2010. Disponível em: www.hoteiscontinental.com.br. Acesso em: Maio de 2010.
- <http://4.bp.blogspot.com> <acesso em novembro de 2010>
- <http://1.bp.blogspot.com> <acesso em novembro de 2010>
- HUFFMAN, D. Understanding Pervious Concrete. In: **The Construction Specifier**.

- Dez./ 2005. p.42 – 49.
- IDE, C.N. 1984. **Qualidade da drenagem pluvial urbana.** Porto Alegre: UFRGS – Curso de Pós-Graduação Recursos Hídricos e Saneamento. Dissertação (Mestrado Engenharia).
- INFRAERO – AEROPORTOS. 2010. Disponível em: www.infraero.gov.br Acesso em: Março de 2010.
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET/8º Distrito – Porto Alegre. Março/2010.
- ITAPORANGA – BLOCOS E PAVERS. 2010. Disponível em: www.itaporanga.com.br. Acesso em: Julho de 2010.
- KIHARA, Y; CENTURIONE, S.L. O Cimento Portland. In: ISAIA, G.C. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. v.2. p.295 – 322.
- KWIATKOWSKI, M. *et al.* 2007. Evaluation of an infiltration best management practice utilizing pervious concrete. **Journal of the American Water Resources Association.** Middleburg, Virgínia, v.43,n.5, p. 1208 – 1222, Out.
- MOTA Jr., JOSÉ, C., TUCCI, C. 1984. Simulation of the urbanization effect in flow. **Hydrological Sciences Journal.** Oxford, v.29, n.2, p. 131 – 147, Jun.
- LERNER, D.N., 1990. Groundwater Recharge in Urban Areas in: Duisberg Symposium 1988. **Hydrology for urban planning – A guide book on the Hydrologic effects of urban land use.** USGS circ. 554. 18p.
- LUCA, S. & Vásquez, S. **Qualidade do ar e das chuvas na região metropolitana de Porto Alegre.** Qualidade do Ar em Porto Alegre. Porto Alegre: Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 2000. 53p. – 60p.
- MAITELLI, G. *et al.* 2004. **Intensidade da ilha de calor em Cuiabá/MT, na estação chuvosa.** UFMT. 14p. Disponível em: <http://www.cbmet.com>. Acesso em: Janeiro de 2011.
- MALHOTRA, V.M., **A Low-Cost Concrete Building.** *Engineering News Record.* 1969. p.62-63
- MALHOTRA, V.M. **No-fines Concrete – Its Properties and Applications.** ACI Journal, *Proceedings* V.73, N° 11, Nov./1976. p.628 – 644.
- MANSUR, A. *et al.* Fomos nós que fizemos a chuva. **Revista Época.** 21 de fev. de 2011. Caderno Ciência & Tecnologia Clima, Ed. 666. p. 62 – 66.
- MARQUES, A. Lixo prejudicou casa de bombas do Sema. **Jornal Vale do Sinos.** 8 de fev. de 2011a. Caderno Comunidade, n° 9.881, p.8.
- Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental

- MARQUES, A. & STIELER, A. Muito Lixo. **Jornal Vale dos Sinos**. 11 de fev. de 2011b. Caderno Comunidade, nº 9.884 , p.4.
- MONTES, F. & HASELBACH, L. 2006 Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious ConCrete. **Environmental Engineering Science**. University of South Carolina, Columbia, v.23, n.6, p. 960 – 969.
- MOTA Jr., JOSÉ, C., TUCCI, C. 1984. Simulation of the urbanization effect in flow. **Hydrological Sciences Journal**, Oxford, v.29, n.2, p. 131 – 147, Jun.
- MULLIGAN, A.N., 2005. **Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems**. University Orlando, Florida. 145p.
- NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION, 2010. **Pervious Concrete**. Disponível em: www.perviouspavement.org. Acesso em: Abril de 2009.
- NEITHALATH, N, *et. al.* **Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials**. Final Report, The Institute for Safe, Quiet, and Durable Higways, 2003, 179 p. (available online at the National Transportation Libraries website (<http://www.ntl.bts.gov/lib/24000/24600/24636/SQDH2003-5.cfm>))
- NETTO, O.C. *et. al.* Águas pluviais: questões para planejamento de sistemas de drenagem. In: ANDREOLI, C.V.; WILLER, M. (Eds) **Gerenciamento do Saneamento em Comunidades Planejadas**. Série Cadernos Técnicos Alphaville, 1. São Paulo: Alphaville Urbanismo S.A., p.102 – 115, 2005
- NEVES, M. 2005. **Avaliação da quantidade de resíduos sólidos na drenagem**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS.
- NEVES, M.G.F. **Quantificação de resíduos sólidos na drenagem urbana**. UFRGS: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre. 2006. 228p.
- PARKINSON, J. *et. al.* Drenagem Urbana Sustentável no Brasil. In: **Relatório do Workshop em Goiânia-GO**, 2003. Goiânia: UFG, 2003.
- PAVIMENTI – Blocos e Pavers Ltda. 2010. Disponível em: <http://pavimenti.ceicom.com.br>. Acesso em: Julho de 2010.
- PERVIOUS CONCRETE. 2011. Disponível em: <http://www.perviousconcrete.com>. Acesso em: Outubro de 2011.
- PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos: com exercícios resolvidos : em 16 aulas**. 3ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 355p.
- POLASTRE, B. e SANTOS, L.D. 2006. **Concreto Permeável**. Disponível em: <http://www.usp.br>. Acesso em: Março de 2009.

- PONTOS BR. 2010. Disponível em: www.pontosbr.com. Acesso em: Abril de 2010.
- PORTO, M.F.A. 2001. Water quality of overland flow in urban areas. In: Tucci, C.E. M. **Urban drainage specific climates**: urban drainage in humid tropics. Paris: UNESCO. IHP-V. Technical Documents in Hydrology. No.40. v.I. cap.4, p 103 – 124.
- PORTO, M.F.A. e MASINI, L.S.2001.Avaliação preliminar da carga difusa na bacia do rio Cabuçu de baixo. **I seminário de drenagem urbana do MERCOSUL/V seminário nacional de drenagem urbana**: soluções para a drenagem urbana em países da América Latina. Livro de resumos. Porto Alegre: IPH/ABRH.
- WIKIPEDIA. 2010. Disponível em: pt.wikipedia.org. Acesso em: Maio de 2010.
- SANEAMENTO BASICO.COM.BR. 2002-a. **MT: 600 t de lixo não coletadas vão direto para mananciais**. Disponível em: www.saneamentobasico.com.br/noticias/imprimir.asp?Id_Noticias=11958
- SANEAMENTO BASICO.COM.BR. 2002-b. **Rio: lixo e esgoto ameaçam a Barra da Tijuca**. Disponível em: www.saneamentobasico.com.br/noticias/imprimir.asp?Id_Noticias=11703
- SCHUELLER, T. 1987.Controlling Urban Ronoff: **a Pratical Manual for Planning and Designing Urban BMPs**. Washington: Metropolitan Washington Council of Governments. 229p.
- SCHUELLER, T.; GALLI, J. **Environmental Impacts of Stormwater Ponds**. In: Watershed Restoration SourceBook. Anacostia Restoration Teram. Metro. Washington Council Governm. 1992.
- SILVEIRA, A.L.L., 1999. Impactos Hidrológicos da Urbanização em Porto Alegre. Anais **4ºSeminário de Hidrologia Urbana e Drenagem**. Belo Horizonte ABRH.
- SILVEIRA, A.L.L. 2001. Problems of urban drainage in developing countries. In: **International Conference on Innovative Technologies in Urban Storm Drainage**, 1, 2001, Lyon. Novatech, p. 143 – 150.
- SILVEIRA, A.M. Um asfalto antienchente. **Jornal Zero Hora**, Porto Alegre, 6 dez. 2010. Caderno Nosso Mundo Sustentável, Ano 1, n° 41, p.1 e 4.
- SKYSCRAPERCITY. 2010. Disponível em: www.skyscrapercity.com. Acesso em: Abril de 2010.
- SOUZA, A. & MASSSAMBI, O. **Ilha de calor urbana na região metropolitana de São Paulo**. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. São Paulo. 20p. Disponível em: <http://www.cbmet.com>. Acesso em: Janeiro de 2011.

- SOUZA, C.F. **Mecanismos Técnico-Institucionais para a Sustentabilidade da Drenagem Urbana**. Porto Alegre, UFRGS: IPH, 2005. 174p.
- SUDERHSA. 2002. **Manual de drenagem urbana – Região metropolitana de Curitiba/PR**. SUDERHSA – Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Versão para revisão final. Não publicado.
- TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. **Pervious Concrete Pavement**. Portland Cement Association, 2004. 32p.
- TUCCI, C.E.M. *et. al.* 1989. Avaliação do Impacto da urbanização nas cheias urbanas. **RBE**: Revista Brasileira de Engenharia. Caderno de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, v.7, n.1, p.77 – 101, Jun.
- TUCCI, C.E.M. 1993b. Controle de enchentes. In: TUCCI, C.E.M. (Org) **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS:ABRH: EDUSP. Cap.16, p.621 – 658.
- TUCCI, C.E.M.; GENZ, F. 1995. Controle do Impacto da Urbanização. In: TUCCI, C.E.M., PORTO, R.L.; BARROS, M.T. (organizadores) **Drenagem Urbana**. ABRH. Editorada Universidade. UFRGS. Porto Alegre.
- TUCCI, C.E.M. 1997. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **RBRH**: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.2, n.2, p. 5 – 12, Jul/Dez.
- TUCCI, C.E.M. 2001. Urban drainage issues in developing countries. In: TUCCI, C.E.M. **Urban drainage specific climates**: urban drainage in humid tropics. Paris: UNESCO. IHP-V. Technical Documents in Hydrology. No.40. v.I. cap.1, p23 – 40.
- TUCCI, C. 2007. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, Vol.11. 393p.
- URBONAS, B.; STAHR, P. **Stormwater Best Management Practices and Detention**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993. 450p.
- WALKER, T. A. *et. al.* 1999. **Removal of Suspended Solids and Associated Pollutants by a CDS Gross Pollutant Trap**. Industry Report for Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology 99/2
- WONG, T.; BREEN, P.; LLOYD, S. 2000. **Water sensitive road design options for improving stormwater quality of road runoff**. Technical Report for Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology 00/1.