

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Larissa Caroline Vogt

**ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL DE ALTA RESISTÊNCIA
PARA PAVIMENTAÇÃO**

Santa Cruz do Sul
2019

Larissa Caroline Vogt

**ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL DE ALTA RESISTÊNCIA
PARA PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ms. Marco Antonio Pozzobon

Santa Cruz do Sul

2019

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela saúde e luz que me proporcionou.

Aos meus pais, Paulo e Luciane, por me incentivarem incansavelmente nesta caminhada e a ir em busca dos meus sonhos e objetivos.

Ao meu namorado, Lucas, pela paciência, preocupação e por me acompanhar durante toda esta trajetória acadêmica, me auxiliando e acompanhando em todos os momentos que precisei.

Ao meu orientador Prof. Ms. Marco Antonio Pozzobon, por todos os ensinamentos, assessoramentos, paciência e dedicação no desenvolvimento desta pesquisa. Seus ensinamentos foram essenciais para a construção e realização deste trabalho.

A todos os mestres que colaboraram na minha formação, em especial ao coordenador do curso de Engenharia Civil, Prof. Dr. Leandro Olivio Nervis, por me incentivar a participar de projetos de iniciação científica, despertando o interesse pela área da pesquisa dentro da engenharia.

Aos colegas e amigos que fiz durante a minha trajetória, por todo o apoio.

À universidade, laboratoristas, bolsistas e funcionários que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

À empresa Conpasul, pela doação do material utilizado no estudo, especialmente ao Jaime e ao Flávio pela atenção e auxílio prestado.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O processo de urbanização e desenvolvimento urbano acelerado vem causando diversos e diferentes impactos ambientais, dentre eles encontra-se o crescimento das áreas com superfície impermeável e o conseqüente impacto nos processos hidrológicos. A impermeabilização do solo é uma das responsáveis pela ocorrência de picos de cheias e enchentes nos centros urbanos, então como medida para amenizar o escoamento da água e provocar a infiltração, surgem os pavimentos permeáveis. O presente trabalho buscou definir um procedimento de dosagem de concreto permeável para utilização em vias com tráfego de veículos pesados, a partir do estudo de diferentes misturas. Primeiramente, foram moldados corpos de prova com diferentes proporções de teores de agregado miúdo no traço, sendo eles 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, buscando a melhor relação entre permeabilidade e resistência. A partir dos ensaios de caracterização do concreto chegou-se à conclusão de que a mistura com 20% de agregado miúdo apresentou os resultados mais satisfatórios para continuar a pesquisa. A partir dela então, criou-se mais quatro traços, desta vez com variações apenas no consumo de cimento, a fim de comparar somente os parâmetros de resistência mecânica e definir um traço que atendesse às resistências mínimas para utilização em pavimentos. Foram moldados corpos de prova para os traços com a relação cimento:agregado de 1:5,0, 1:4,5, 1:4,0 e 1:3,5. Quanto à resistência à compressão axial todos foram satisfatórios e se mostraram acima do mínimo prescrito na normalização brasileira, já quanto à resistência à tração na flexão apenas o traço 1:3,5 não apresentou resultado satisfatório para utilização como pavimento rígido de concreto em áreas de tráfego pesado. Chegou-se à conclusão de que o procedimento de dosagem é válido e se houverem boas condições de compactação é possível a execução de um pavimento permeável de concreto que atenda os parâmetros mínimos de permeabilidade e resistência para o tráfego de veículos leves e pesados.

Palavras-chave: Concreto permeável. Dosagem. Resistência. Permeabilidade.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Inundações em grandes centros urbanos no Brasil	14
Figura 2 –	Hidrograma - Bacias de área urbanizada e área não urbanizada	16
Figura 3 –	Concreto permeável	21
Figura 4 –	Curvas granulométricas possíveis de utilizar em misturas de concreto permeável	25
Figura 5 –	Resistência à compressão (dividido por 10) e resistência à tração na flexão em função da variação do índice de vazios	31
Figura 6 –	Estrutura de um pavimento permeável	33
Figura 7 –	Execução de pavimento em concreto permeável com compactação por rolo metálico	38
Figura 8 –	Execução de junta por corte das placas	38
Figura 9 –	Consistência ideal para a mistura de concreto permeável	48
Figura 10 –	Corpos de prova cilíndricos após a moldagem	49
Figura 11 –	Corpos de prova prismáticos após a moldagem	50
Figura 12 –	Corpos de prova prismáticos embalados em filme plástico	50
Figura 13 –	Placas para ensaio de permeabilidade	51
Figura 14 –	Equipamento para medição da massa seca, submersa e saturada	53
Figura 15 –	Ensaio de resistência à compressão axial	54
Figura 16 –	Disposição do corpo de prova	55
Figura 17 –	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	56
Figura 18 –	Posicionamento do corpo de prova no equipamento	57
Figura 19 –	Ensaio de resistência à tração na flexão	57
Figura 20 –	Esquema para medição do coeficiente de permeabilidade	59
Figura 21 –	Placas e cilindros posicionados para o ensaio de permeabilidade	60
Figura 22 –	Curva granulométrica da brita 0	61
Figura 23 –	Curva granulométrica da areia natural	62
Figura 24 –	Curva granulométrica da areia industrial	63
Figura 25 –	Resultados dos ensaios químicos do cimento	64
Figura 26 –	Resultados dos ensaios físicos do cimento	64

Figura 27 – Resultados obtidos para o índice de vazios	66
Figura 28 – Gráfico de resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade, em cm/s	67
Figura 29 – Relação entre coeficiente de permeabilidade e índice de vazios	68
Figura 30 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à compressão axial, em MPa	69
Figura 31 – Resistência à compressão axial X Índice de vazios	70
Figura 32 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, em MPa	71
Figura 33 – Resistência à tração por compressão diametral X Índice de vazios	72
Figura 34 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, em MPa	73
Figura 35 – Resistência à tração na flexão X Índice de vazios	74
Figura 36 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à compressão axial do estudo definitivo, em MPa	75
Figura 37 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral do estudo definitivo, em MPa	77
Figura 38 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à tração na flexão do estudo definitivo, em MPa	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Causas e efeitos da urbanização	15
Tabela 2 –	Valores de coeficiente de escoamento adotados pela Prefeitura Municipal de São Paulo	19
Tabela 3 –	Coeficiente de escoamento para superfícies impermeáveis	20
Tabela 4 –	Proporções típicas de materiais utilizados nas dosagens de concreto permeável	23
Tabela 5 –	Traços utilizados no estudo comparativo de permeabilidade	46
Tabela 6 –	Traços utilizados no estudo comparativo de resistência	47
Tabela 7 –	Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo	62
Tabela 8 –	Propriedades químicas da cinza mineral leve	65
Tabela 9 –	Propriedades físicas da cinza mineral leve	65
Tabela 10 –	Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade	67
Tabela 11 –	Resultados do ensaio de resistência à compressão axial, em MPa	69
Tabela 12 –	Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, em MPa	71
Tabela 13 –	Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão, em MPa	73
Tabela 14 –	Resultados do ensaio de resistência à compressão axial do estudo definitivo, em MPa	75
Tabela 15 –	Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral do estudo definitivo, em MPa	76
Tabela 16 –	Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão do estudo definitivo, em MPa	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
cm	Centímetros
cm/s	Centímetros por segundo
cm ² /g	Centímetros quadrados por grama
CP II-F	Cimento Portland Composto com Fíler
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EUA	Estados Unidos da América
g/cm ³	Gramas por centímetros cúbicos
kg	Quilograma
kg/m ³	Quilogramas por metro cúbico
km ²	Quilômetros quadrados
kN	Quilonewton
l/m ² /min	Litros por metro quadrado por minuto
m/s	Metros por segundo
m ³	Metros cúbicos
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
mm	Milímetros
mm/h	Milímetros por hora
MPa	Megapascal
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
NPCA	National Pervious Concrete Association
PVC	Policloreto de Vinil
s	Segundos
UNISC	Universidade de Santa Cruz do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Área e limitação do tema	12
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo geral	12
1.2.2	Objetivos específicos	12
1.3	Justificativa	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Drenagem urbana	14
2.1.1	Coeficiente de escoamento	17
2.2	Concreto permeável	20
2.2.1	Materiais que compõem o concreto permeável	22
2.2.1.1	Aglomerantes	24
2.2.1.2	Agregados	24
2.2.1.3	Aditivos	26
2.2.2	Características do concreto permeável	26
2.2.2.1	Massa específica e índice de vazios	27
2.2.2.2	Textura	27
2.2.2.3	Permeabilidade	28
2.2.2.4	Resistência	29
2.2.2.5	Durabilidade	32
2.3	Métodos de construção de pavimentos de concreto permeável ...32	
2.3.1	Preparação do subleito	35
2.3.2	Dosagem e mistura	36
2.3.3	Transporte	36
2.3.4	Lançamento e consolidação	37
2.3.5	Acabamento superficial	39
2.4	Métodos de dosagem de pavimentos permeáveis	39
3	METODOLOGIA	42
3.1	Caracterização da pesquisa	42
3.2	Materiais utilizados	42

3.2.1	Agregados	42
3.2.1.1	Agregado graúdo	43
3.2.1.2	Agregado miúdo.....	44
3.2.2	Cimento Portland	44
3.2.3	Material pozolânico	44
3.2.4	Água	45
3.2.5	Aditivos	45
3.3	Dosagem	45
3.3.1	Estudo preliminar – comparativo de permeabilidade	45
3.3.2	Estudo definitivo – comparativo de resistência	46
3.4	Moldagem dos corpos de prova	47
3.5	Propriedades do concreto no estado endurecido.....	51
3.5.1	Ensaio de massa específica aparente seca e índice de vazios.....	52
3.5.2	Ensaio de resistência à compressão axial.....	53
3.5.3	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	54
3.5.4	Ensaio de resistência à tração na flexão	56
3.5.5	Ensaio de permeabilidade	58
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	61
4.1	Caracterização dos materiais constituintes do concreto	61
4.1.1	Brita 0.....	61
4.1.2	Areia natural	62
4.1.3	Areia industrial	63
4.1.4	Cimento Portland	63
4.1.5	Material pozolânico.....	64
4.2	Caracterização do concreto moldado no estudo preliminar	65
4.2.1	Massa específica aparente seca e índice de vazios	65
4.2.2	Permeabilidade.....	67
4.2.3	Resistência à compressão axial	69
4.2.4	Resistência à tração por compressão diametral.....	71
4.2.5	Resistência à tração na flexão	72
4.3	Caracterização do concreto moldado no estudo definitivo	74
4.3.1	Resistência à compressão axial	75
4.3.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	76

4.3.3	Resistência à tração na flexão	77
5	CONCLUSÕES	79
5.1	Conclusão do trabalho	79
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	80
	REFERÊNCIAS	81
	ANEXO A - Resultados dos ensaios realizados no estudo	85

1 INTRODUÇÃO

Desde o princípio da civilização o homem interfere na natureza a fim de garantir subsistência e segurança, causando diversos e diferentes impactos ambientais. Com o passar dos anos e com os avanços tecnológicos a população passou a ocupar uma parcela maior dos territórios, transformando-os em grandes núcleos urbanos e conseqüentemente ocasionando mudanças no solo, alterações em cursos d'água e desmatamento. As alterações e moldagens do meio ambiente permitiram o desenvolvimento, mas em conseqüência perturbaram em diversos aspectos o equilíbrio natural (HÖLTZ, 2011).

Este desenvolvimento urbano acelerado tem causado diversos impactos nos processos hidrológicos, sendo que um dos principais está relacionado ao crescimento das áreas com superfícies impermeáveis, juntamente à ocupação inadequada das margens de rios e córregos. Tais fatores contribuem para o aumento da ocorrência de picos de cheias, agravando assim os problemas relativos às enchentes dos rios e inundações nas cidades (BATEZINI, 2013).

Conforme Tucci (2005), as inundações resultantes da urbanização ocorrem devido à impermeabilização do solo, canalização do escoamento ou obstrução ao escoamento, por meio de aterros, pontes, drenagens inadequadas e assoreamento. Problemas decorrentes da geração de resíduos sólidos também influenciam, uma vez que o lixo gerado pela população chega aos dispositivos de drenagem e impede o escoamento da água precipitada.

É necessário que novos dispositivos de drenagem sejam desenvolvidos e medidas sejam tomadas para facilitar que a água seja conduzida e escoe sem causar perturbações como enchentes e alagamentos em áreas urbanas. Desta forma, o uso de pavimentos em concreto permeável pode contribuir significativamente para o acréscimo de infiltração e retardo do escoamento.

Os concretos permeáveis, segundo cita Lamb (2014), atuam como reservatórios e permitem a infiltração de água no subleito, contribuindo na drenagem subsuperficial e evitando alagamentos. Trata-se de um material com elevado percentual de vazios, que permitem a infiltração da água, diferenciando-se dos concretos convencionais, onde o objetivo é alcançar a maior densidade possível e manter-se impermeável.

Ainda conforme o autor, pouco se aplica este material no Brasil, enquanto em outros países várias pesquisas têm sido feitas para avaliar o seu comportamento,

eficiência e durabilidade. O grande foco de utilização no Brasil é o concreto permeável destinado ao tráfego de pedestres e veículos leves, sendo utilizado em calçadas, passeios e estacionamentos de automóveis.

O uso destes concretos para pavimentação de vias de tráfego de veículos foi pouco desenvolvido e conforme Batezini (2013), o número de publicações encontradas sobre este tema é escasso. Trata-se de um material com vantagens ambientais para utilização como revestimento de pavimentos, que necessita de pesquisas mais detalhadas em âmbito nacional.

1.1 Área e limitação do tema

O trabalho foi desenvolvido na área de materiais de construção civil, em concreto permeável, tendo por finalidade o estudo de dosagem de concretos permeáveis de alta resistência para pavimentação de vias com tráfego pesado.

1.2 Objetivos

Neste item são abordados os principais objetivos a serem alcançados com o desenvolvimento do presente trabalho. De maneira geral, o item 1.2.1 descreve os objetivos vislumbrados com a conclusão do trabalho, enquanto o item 1.2.2, trata os objetivos de uma forma detalhada e específica, demonstrando os itens a serem pesquisados e mensurados no desenvolvimento do trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é definir um procedimento de dosagem de concreto permeável para uso em pavimentação de vias com tráfego de veículos pesados, que atenda aos parâmetros de permeabilidade e resistência prescritos na normalização brasileira.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar diferentes teores de argamassa para que a composição de um concreto estrutural para pavimentação seja permeável;

- Determinar características mecânicas a partir de ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão das diferentes misturas;
- Determinar as características de índices de vazios e permeabilidade dos traços de concreto permeável; e
- Avaliar os resultados obtidos nos ensaios, validando o procedimento adotado para dosagem.

1.3 Justificativa

O estudo de dosagem de concreto permeável, com o objetivo de atingir elevadas resistências e possibilitar a pavimentação de vias com tráfego de veículos pesados, tem grande importância por se tratar de uma área pouco explorada no Brasil. Atualmente, o uso desta tecnologia se dá principalmente para pavimentação de áreas com tráfego de pessoas, como calçadas, praças, parques e estacionamento de veículos leves, apresentando boa permeabilidade, porém baixa resistência.

A sua utilização para pavimentação de vias com grandes fluxos de veículos em áreas urbanas pode reduzir o problema de enchentes e alagamentos, frequentes nos municípios brasileiros, já que praticamente toda a água precipitada infiltra no pavimento ao invés de escoar. A partir de dispositivos de drenagem adequados, a água pode ser conduzida a locais específicos pela base do pavimento, permitindo a sua reutilização e abastecimento do lençol freático. Assim, evita-se o acúmulo de água sobre a pista, reduzindo as vazões de pico e conseqüentemente as inundações.

Para ser considerado um concreto drenante, é necessário que este seja poroso, ou seja, tenha um elevado índice de vazios, permitindo que a água percole por sua estrutura. Ao mesmo tempo, necessita de compactação e resistência adequadas para utilização em pavimentos, logo, é necessário que haja uma dosagem correta dos materiais que o integram, de modo a torná-lo satisfatoriamente resistente e permeável.

Desta forma, o trabalho propõe uma investigação através do estudo de um procedimento de dosagem para construção de um pavimento permeável que atenda aos requisitos de permeabilidade e resistência, possibilitando o tráfego de veículos pesados. Por meio desse, busca-se uma alternativa sustentável para amenizar problemas gerados a partir da urbanização, colaborando com as pesquisas desenvolvidas nesta área no país.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os itens necessários para fundamentar a pesquisa, apresentando a teoria base para o conhecimento do tema proposto.

2.1 Drenagem urbana

Com o desenvolvimento acelerado após a segunda metade do século vinte, a população concentrou-se em pequenos espaços, impactando os ecossistemas e a própria população com inundações, doenças e perda de qualidade de vida. Tais problemas são oriundos da falta de controle do espaço urbano, que por sua vez, afeta a infraestrutura e a drenagem urbana das cidades (TUCCI, 2005).

Conforme Tucci (2005), o processo de crescimento urbano nos países desenvolvidos tem sido realizado de forma insustentável, deteriorando o meio ambiente e a qualidade de vida. Na América Latina, o problema mostra-se muito significativo, onde existem cidades com população superior a um milhão de habitantes, estando quatro cidades brasileiras entre as nove maiores desta região.

Ainda conforme o autor, dentre os problemas gerados pela urbanização encontram-se as frequentes inundações, ocasionadas por drenagem urbana inadequada, ocupação desordenada do solo e aumento da impermeabilização. Na Figura 1 é possível observar o problema, frequente em diversos municípios brasileiros.

Figura 1 – Inundações em grandes centros urbanos no Brasil



Fonte: Disponível em: www.azevedoambiental.com.br

Com relação à urbanização, Spin (1995) afirma que em conjunto as atividades urbanas, a forma como são desenvolvidas e os materiais que as constituem, bem como a sua relação com a drenagem natural, o projeto dos sistemas de drenagem e os descontroles das enchentes, produzem um regime hídrico característico. Onde o escoamento superficial excessivo e rápido de temporais e chuvas fortes, resulta em vazões de água muito altas durante e logo após as chuvas.

Os problemas resultantes dessas atividades são em decorrência do mau uso e aproveitamento dos recursos hídricos, controle da poluição e principalmente falta de planejamento urbano e estrutural das cidades, que crescem de forma desordenada. Tucci *et al.* (1993), exemplifica na Tabela 1 as atividades urbanas que interferem no sistema de drenagem e a relação entre a causa e o efeito das mesmas.

Tabela 1 – Causas e efeitos da urbanização

CAUSAS	EFEITOS
Impermeabilização	Maiores picos e vazões.
Redes de drenagem	Maiores picos a jusante.
Lixos	Degradação da qualidade da água; Entupimento de bueiros e galerias.
Redes de esgoto deficientes	Degradação da qualidade da água; Moléstias de veiculação hídrica; Inundações: Consequências mais sérias.
Desmatamento e desenvolvimento indisciplinado	Maiores picos e volumes; Mais erosão; Assoreamento em canais e galerias.
Ocupação das várzeas	Maiores prejuízos; Maiores picos; Maiores custos de utilidades públicas.

Fonte: Autor (2019). Adaptado de Tucci *et al.* (1993).

Ciria (1996, *apud* ACIOLI, 2005, p.3) também cita algumas das principais consequências dos processos de urbanização, dentre eles:

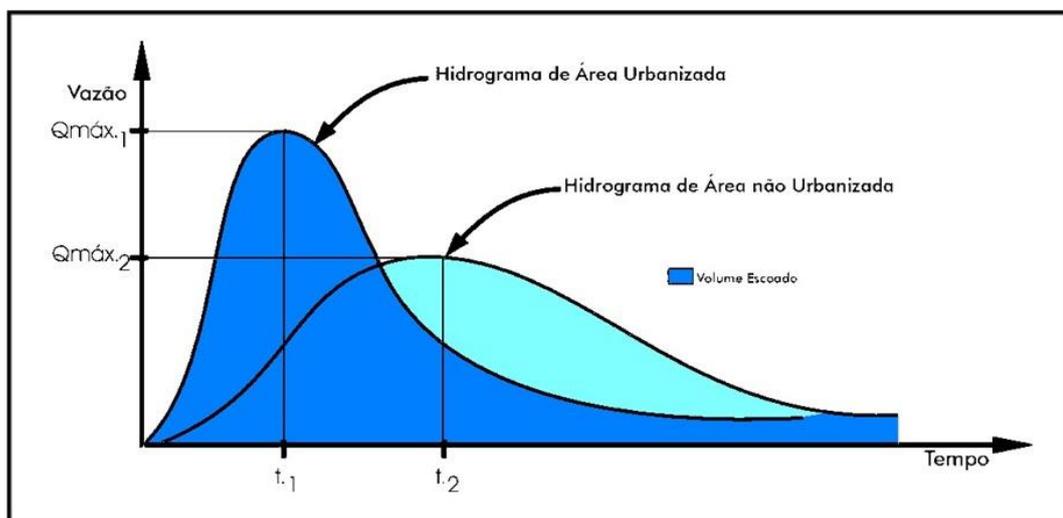
- Aumento no volume do escoamento superficial;
- Aumento da frequência de inundações, assim como de sua intensidade;
- Redução da umidade do solo, que leva a uma redução do lençol freático;
- Diminuição do escoamento de base de rios;
- Redução do armazenamento potencial, e da capacidade de transporte dos vales dos rios; e

- Aumento na carga de poluentes decorrente da rede pluvial ou do escoamento superficial.

Para Pinto (2011), a impermeabilização do solo se encontra diretamente ligada à urbanização e de acordo com o autor, está presente nas vias pavimentadas, nos estacionamentos e em telhados, causando a diminuição da infiltração de água no solo e da evapotranspiração. Ao chover, a contribuição se transforma em escoamento superficial e em consequência, aumentam os volumes escoados, as vazões de pico e a redução do tempo de concentração da bacia, elevando os picos dos hidrogramas de cheias.

O hidrograma apresentado na Figura 2 compara o escoamento em bacias não urbanizadas e bacias urbanizadas, em função da vazão e do tempo de concentração, mostrando que a vazão de pico ocorre mais cedo em uma bacia urbanizada, onde a quantidade de água escoada é significativamente maior. Isto ocorre, pois onde antes as águas pluviais percolavam naturalmente no solo, há uma nova superfície impermeável, causando transtornos em alguns locais mais baixos (HÖLTZ, 2011).

Figura 2 – Hidrograma - Bacias de área urbanizada e área não urbanizada



Fonte: Disponível em: www.fontehidrica.blogspot.com

Os pontos de detenção natural e a capacidade das plantas de ajudar a reter parte da água percolada perdem a sua função com a crescente impermeabilização das bacias, sendo necessário o uso de tubulações, retificações de rios e revestimento de canais para o gerenciamento das águas (TUCCI, 1995).

De acordo com Hölitz (2011), a sobrecarga da drenagem secundária, ou seja, dos condutos, gera alagamentos e afeta as vias de tráfego. Por outro lado, a rápida descarga das águas pluviais em riachos e canais, responsáveis por escoar grande parte das áreas metropolitanas, também pode se tornar um problema caso estes tenham tendência para a formação de enchentes.

Assim, como medida para reduzir o impacto gerado pela população urbana e garantir um melhor funcionamento do sistema de drenagem das cidades, está o controle na fonte da geração do escoamento superficial, que pode se dar por medidas estruturais ou não estruturais. Suderhsa (2002) sugere algumas medidas de controle estruturais que podem ser tomadas a fim de alterar o resultado do hidrograma das áreas urbanizadas, dentre elas está a infiltração e percolação, utilizando o armazenamento e o fluxo subterrâneo para retardar o escoamento superficial.

Os principais dispositivos para criar maior infiltração são os planos de infiltração, ou seja, áreas gramadas que recebem águas pluviais oriundas de áreas impermeabilizadas e as valas de infiltração, dispositivos de drenagem lateral, utilizadas paralelamente às ruas. Ainda, estradas, estacionamentos e os pavimentos permeáveis, utilizados principalmente em passeios, estacionamentos, quadras esportivas e ruas de pouco tráfego (SUDERHSA, 2002).

Estas alternativas de infiltração, detenção e retenção, procuram minimizar as consequências da alteração dos processos hidrológicos durante a urbanização, buscando compensar tais efeitos antes que a água chegue à rede de drenagem. Conforme Acioli (2005), tais estruturas de infiltração colaboram na redução das vazões máximas e dos volumes escoados, podendo ainda colaborar com a remoção e controle de poluentes no escoamento superficial, recuperando de forma mais efetiva as condições de pré-ocupação.

2.1.1 Coeficiente de escoamento

O comportamento natural da água quanto as suas ocorrências, transformações e relações com a vida humana é bem caracterizado através do conceito de ciclo hidrológico, que inicia com a evaporação da água dos oceanos, conforme explicam Villela e Mattos (1975, p.1):

O vapor resultante é transportado pelo movimento das massas de ar. Sob determinadas condições, o vapor é condensado, formando as nuvens que por sua vez podem resultar em precipitação. A precipitação que ocorre sobre a terra é dispersada de várias formas. A maior parte fica temporariamente retida no solo próximo de onde caiu e finalmente retorna à atmosfera por evaporação e transpiração das plantas. Uma parte da água restante escoar sobre a superfície do solo, ou através do solo para os rios, enquanto que a outra parte, penetrando profundamente no solo, vai suprir o lençol d'água subterrâneo.

O escoamento superficial é o segmento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento da água na superfície da terra, e conforme Villela e Mattos (1975), tem origem nas precipitações, constituindo a fase mais importante deste ciclo.

Para que se possa dimensionar um sistema de drenagem, é necessária uma variável chamada de coeficiente de escoamento ou *runoff*, utilizada no cálculo da vazão máxima de contribuição de uma bacia através do Método Racional.

De acordo com Nunes (2007), o Método Racional é um dos mais consagrados de estimativa de vazão máxima, através da transformação da chuva em vazão, englobando todos os processos em apenas um coeficiente. É um método amplamente utilizado para bacias hidrográficas pequenas e de pouca complexidade, onde a vazão é determinada a partir da Equação 1, em função da precipitação e das características do recobrimento da bacia.

$$Q_p = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad (1)$$

Onde:

Q_p = vazão de pico, em m³/s;

i = intensidade máxima da chuva, para tempo de duração igual ao tempo de concentração da bacia, em mm/h;

C = coeficiente de escoamento superficial ou de deflúvio, adimensional;

A = área da bacia, em km².

Para bacias maiores é recomendando que se adote a equação sugerida por Euclides e Piccolo (1987 *apud* NUNES, 2007, p.17), onde introduziu-se um coeficiente, denominado coeficiente de retardo, que reflete o efeito de armazenamento da bacia. Tal parâmetro procura compensar o fato do escoamento superficial sofrer um retardo em relação ao início da chuva, o que não é levado em consideração no

Método Racional apresentado anteriormente. O coeficiente é utilizado na Equação 2 e obtido a partir da Equação 3.

$$Qp = \frac{C . i . A . \varphi}{3,6} \quad (2)$$

$$\varphi = 0,278 - 0,00034 . A \quad (3)$$

Onde:

φ = coeficiente de retardamento, adimensional.

De acordo com Tucci (2000), o coeficiente de escoamento de uma bacia representa a quantidade de água de escoamento gerada pela bacia em eventos chuvosos, variando à medida que ocorre a urbanização da mesma. Este coeficiente varia com a intensidade da precipitação, pois à medida que o volume de chuva aumenta, a capacidade de infiltração é atendida, resultando em um aumento do escoamento superficial.

Este coeficiente de escoamento superficial pode ser obtido através de tabelas encontradas na literatura, que relacionam o coeficiente com as diversas zonas encontradas em uma bacia e dependem de características como: tipo de solo, cobertura, tipo de ocupação, tempo de retorno e intensidade da precipitação. Alguns valores de referência são apresentados na Tabela 2, elaborada para a cidade de São Paulo e reproduzidos por Tucci *et al* (1995):

Tabela 2 – Valores de coeficiente de escoamento adotados pela Prefeitura Municipal de São Paulo

ZONAS	COEFICIENTE DE ESCOAMENTO
De edificação muito densa: partes centrais, densamente construídas, cidades com ruas e calçadas pavimentadas.	0,70 - 0,95
De edificação não muito densa: partes adjacentes ao centro, de menor densidade de habitação, mas com ruas e calçadas pavimentadas.	0,60 - 0,70
De edificações com poucas superfícies livres: partes residenciais com ruas pavimentadas.	0,50 - 0,60
De edificações com muitas superfícies livres: partes residenciais com ruas pavimentadas.	0,25 - 0,50
De subúrbios com alguma edificação: subúrbios com pequena densidade de construção	0,10 - 0,25
De matas, parques e campos de esporte: partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas, parques com jardins e campos de esporte não pavimentados.	0,05 - 0,20

Fonte: Autor (2019). Adaptado de Tucci *et al* (1995).

Tucci (2000), estudou a relação do coeficiente de escoamento de bacias urbanas brasileiras em função da área impermeável e a vazão máxima correspondente, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficiente de escoamento para superfícies impermeáveis

TIPO DE SUPERFÍCIE	COEFICIENTE DE ESCOAMENTO
Cimento e asfalto	0,90 - 0,95
Paralelepípedo	0,58 - 0,81
Blockets	0,70 - 0,89
Concreto e asfalto poroso	0,05
Solo compacto	0,59 - 0,79

Fonte: Autor (2019). Adaptado de Tucci (2000).

Os coeficientes de escoamento apresentados nas Tabelas 2 e 3 mostram que em áreas urbanizadas, 95% da água da chuva irá gerar escoamento superficial, enquanto áreas pouco edificadas podem apresentar apenas 10% de escoamento da água total precipitada. Os pavimentos permeáveis, conforme Tucci (2000), podem apresentar um coeficiente igual ou inferior ao de matas e parques, e mantém a área útil do local, sendo este o principal objetivo deste tipo de pavimento: reduzir o coeficiente de escoamento.

2.2 Concreto permeável

O concreto permeável, concreto drenante ou concreto poroso, é caracterizado por possuir propriedades como porosidade e boa drenabilidade, dependendo de sua composição. Através de sua estrutura porosa, permite que a água percole por seus vazios e quando bem dimensionado e projetado, pode influenciar significativamente nas vazões de pico que ocorrem durante as chuvas intensas (BATEZINI, 2013).

É um concreto com elevado percentual de vazios interligados entre si, que permitem a fácil passagem de fluidos, proporcionando elevada permeabilidade. A mistura é composta por água, cimento e agregado graúdo, sendo empregado muito pouco ou nada de agregado miúdo, o que resulta em um material com índice de vazios na ordem de 18% a 35%. Sua capacidade de percolação irá variar conforme o tamanho do agregado e a densidade da mistura, ficando geralmente na ordem de 200

l/m²/min, enquanto a resistência à compressão pode variar de 2,8 a 28 MPa (ACI, 2006).

Ferguson (2005) define pavimento permeável como aquele onde há espaços livres em sua estrutura por onde a água possa escoar, infiltrando no solo ou sendo conduzida através de sistemas de drenagem. É um tipo de pavimento que busca reduzir o volume de água escoada, e conseqüentemente, reduzir a solicitação do sistema de drenagem urbana. Ainda de acordo com o autor, este tipo de pavimento melhora a qualidade da água, por carrear menos poluição difusa.

Pode-se observar um exemplo de concreto permeável na Figura 3.

Figura 3 – Concreto permeável



Fonte: Disponível em: www.archdaily.com

De acordo com a revisão do histórico de desenvolvimento e aplicações do concreto com elevado número de vazios feita por Höltz (2011), os primeiros registros de utilização de um concreto poroso datam do século XIX, na Europa. O material consistia apenas em agregado graúdo e cimento e foi utilizado para a construção de duas casas no Reino Unido. Após, o mesmo só voltou a ser mencionado por volta de 1923, quando cinquenta casas foram construídas com agregado à base de clínquer na Escócia.

Nas décadas de 30 e 40, o concreto poroso foi amplamente utilizado para a construção de residências, sendo empregado nas paredes por se tratar de um material leve, com eficiente isolamento térmico e baixo custo. Com o caos gerado pela Segunda Guerra Mundial, de 1939 a 1945, a Europa necessitou de um grande número

de reconstrução de habitações, incentivando o desenvolvimento de novos métodos de construção civil. Aliado à escassez de materiais de construção, como por exemplo os tijolos, o uso do concreto poroso destacou-se dentre os métodos que surgiram neste período (ACI, 2006).

Nos Estados Unidos da América (EUA), não houve problemas de escassez de matéria prima para construção e por isso os primeiros usos do concreto permeável foram registrados por volta de 1970. O problema encontrado neste país era em relação ao excessivo escoamento de água nas áreas recém construídas, devido à impermeabilização e o desenvolvimento urbano, resultando em um elevado escoamento superficial (LAMB, 2014).

Conforme Mulligan (2005, *apud* HÖLTZ, 2011, p.39), nos EUA os primeiros usos de concreto permeável como material drenante foram nos estados da Flórida, Utah e Novo México, fazendo com que a tecnologia se espalhasse pelo país após resultados satisfatórios. O crescente interesse pelo assunto resultou na fundação de uma associação, a *National Pervious Concrete Association* (NPCA), enquanto 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.

De acordo com Lamb (2014), embora o uso de concretos sem agregado miúdo e com grandes quantidades de vazios já tenha os primeiros registros datando do século XIX, o seu emprego como material para auxiliar na drenagem urbana, retendo água na fonte e reduzindo enchentes, ainda é recente. Os EUA, Japão e França são os países onde a sua utilização é mais disseminada e em decorrência disso, há poucos trabalhos publicados e poucos exemplos práticos de sua aplicação no Brasil.

2.2.1 Materiais que compõem o concreto permeável

Segundo Dellate e Clearly (2006, *apud* BATEZINI, 2013, p.26), existem três tipos de concretos permeáveis que podem ser caracterizados pelo nível de resistência e drenabilidade. O primeiro consiste em um material de baixa resistência e alta permeabilidade, é conhecido por concreto permeável hidráulico e utilizado para aplicações não estruturais. O segundo caracteriza-se por possuir resistência e permeabilidade intermediárias e pode ser utilizado para pavimentação de estacionamentos e calçadas, sendo conhecido por concreto permeável normal. Por

fim, existe o concreto permeável estrutural, caracterizado pela adição de materiais de granulometria reduzida. Este possui elevada resistência mecânica, porém baixa permeabilidade e pode ser utilizado em estacionamentos e pavimentação de ruas e avenidas que possuam tráfego de veículos pesados.

De acordo com o ACI (2006), o concreto permeável é composto principalmente de cimento Portland, agregado graúdo de tamanho uniforme e água. Esta combinação forma uma aglomeração de agregados graúdos envoltos por uma camada de pasta de cimento endurecida, resultando em grandes vazios entre os agregados e permitindo que a água infiltre por entre eles.

Assim, com o propósito de se obter uma pasta que forme uma capa espessa ao redor das partículas dos agregados, as quantidades de água e ligante hidráulico empregados na composição do material devem ser cuidadosamente controlados. O alto índice de vazios, que confere a permeabilidade, ocorre pela ausência ou por pequenas quantidades de agregado miúdo na mistura (BATEZINI, 2013).

A dosagem correta da mistura e o emprego dos materiais adequados conferem as propriedades necessárias ao concreto em seu estado endurecido, porém resultam em uma mistura que requer muita atenção durante o processo construtivo. Em fatores como compactação, adensamento e cura, por exemplo, há necessidade de um controle rígido de todos os materiais presentes para que se obtenha o resultado desejado (TENNIS *et al.*, 2004).

Tennis *et al.* (2004), apresenta na Tabela 4 faixas típicas de consumo e proporções de materiais utilizados nas misturas de concreto permeável, sendo que tais proporções podem variar conforme os insumos disponíveis em cada região.

Tabela 4 – Proporções típicas de materiais utilizados nas dosagens de concreto permeável

MATERIAIS	CONSUMO/PROPORÇÃO
Ligante hidráulico (kg/m ³)	270 a 415
Agregado graúdo (kg/m ³)	1.190 a 1.700
Relação água/cimento (a/c) em massa	0,27 a 0,34
Relação cimento/agregado em massa	1:4 a 1:4,5
Relação agregado miúdo/agregado graúdo em massa	0 a 1:1

Fonte: Autor (2019). Adaptado de Tennis *et al.* (2004).

As quantidades de agregado graúdo, areia, cimento e água variam conforme a resistência que se busca alcançar no concreto, logo quanto maior a resistência, menor

será a permeabilidade. Para maior permeabilidade, menor o número de vazios e, portanto, menos resistência (LAMB, 2014).

A resistência à compressão, permeabilidade e porosidade de um concreto permeável, são diretamente afetadas pela graduação, tamanho das partículas e pela relação massa de agregados por massa de cimento (HUANG *et al.*, 2009). Entretanto, segundo o ACI (2006), a relação água/cimento (a/c) em conjunto com a energia de compactação na moldagem do corpo de prova são os fatores que mais interferem na resistência mecânica do material, pois afetam diretamente as suas características.

2.2.1.1 Aglomerantes

Assim como nos concretos convencionais o Cimento Portland é o principal aglomerante utilizado na confecção de um concreto permeável. Cinza volante, escória granulada de alto forno moída e sílica ativa, também são materiais que podem ser usados, entretanto é recomendado que estes sejam previamente ensaiados em laboratório. A partir dos ensaios, propriedades que possam ser importantes ao desempenho da mistura, como resistência, porosidade, permeabilidade, entre outras, podem ser determinadas, possibilitando a dosagem adequada do material (ACI, 2006; BATEZINI, 2013; TENNIS *et al.*, 2004).

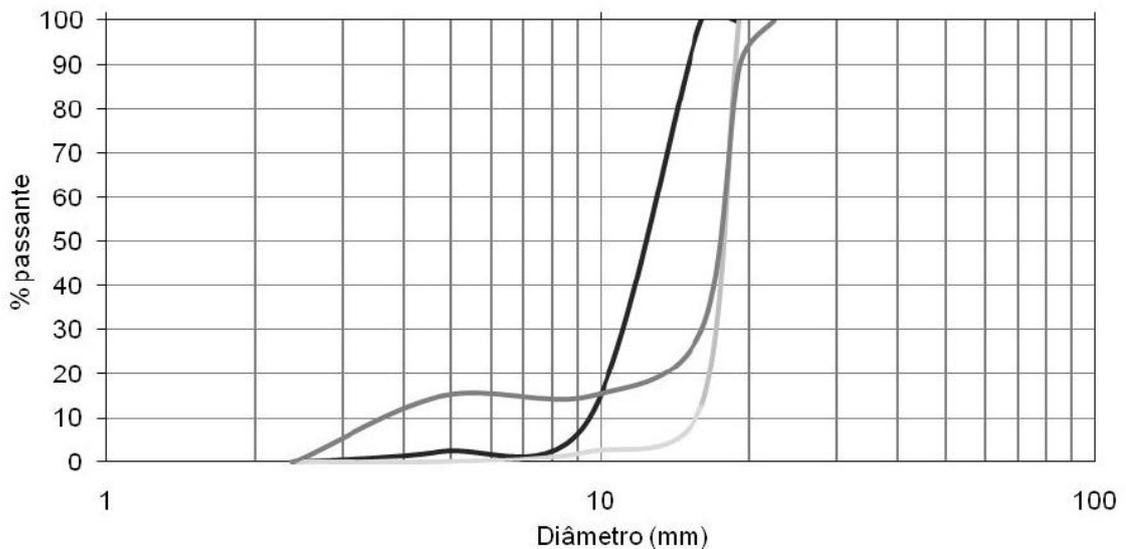
2.2.1.2 Agregados

A granulometria influencia tanto a resistência quanto a permeabilidade do concreto endurecido. O agregado é responsável por exercer grande influência nas propriedades do concreto, como massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto, sendo que essas propriedades dependem principalmente da densidade e resistência do agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Tennis *et al.* (2004) afirmam que as curvas granulométricas de agregados utilizadas nas misturas são normalmente uniformes, ou seja, possuem um único diâmetro, onde o máximo utilizado é de 19 mm. Para curvas descontínuas, onde há variação do diâmetro do agregado, as graduações variam de 19 mm a 4,8 mm, 9,5 mm a 2,4 mm e 9,5 mm a 1,2 mm.

Li (2009, *apud* BATEZINI, 2013, p.29), apresenta três curvas granulométricas com o diâmetro máximo de agregado empregado igual a 19 mm. Tais curvas já foram empregadas na produção de concretos permeáveis e são apresentadas na Figura 4.

Figura 4 – Curvas granulométricas possíveis de utilizar em misturas de concreto permeável



Fonte: Li (2009, *apud* BATEZINI, 2013, p.29)

Uma graduação estreita é uma interessante característica a ser observada, de acordo com Tennis *et al.* (2004), pois agregados maiores fornecem uma superfície mais áspera. Como o concreto permeável vem sendo amplamente utilizado em estacionamentos, pavimentos e passarelas de pedestres, recomenda-se procurar o menor agregado possível por razões estéticas e de conforto dos usuários.

Ainda conforme os autores, melhores resistências são alcançadas com agregados arredondados, embora agregados angulares também sejam utilizados. Assim como no concreto convencional, o concreto permeável exige que os agregados estejam perto de uma condição de superfície seca ou monitoramento rigoroso da umidade. O controle da água é importante em tais misturas, pois a água absorvida da mistura pelos agregados que são muito secos pode levar a misturas com dificuldades de compactação.

Apesar de ser conhecido como um concreto sem finos, a presença do agregado fino na mistura é importante, pois aumenta a resistência na zona da interface entre o agregado graúdo e a pasta. De acordo com Yang *et al.* (2008, *apud* MONTEIRO, 2010, p.14), ao aumentar a quantidade de finos, consequentemente há um aumento da

resistência a compressão, devido ao preenchimento dos espaços entre os agregados graúdos e a pasta de cimento, melhorando a ligação entre os agregados. Entretanto, ao aumentar a quantidade de material fino, diminui-se os vazios e a permeabilidade, principal característica desse material.

2.2.1.3 Aditivos

As adições minerais são eficazes para aumentar a resistência à compressão e tração no concreto, enquanto as químicas modificam resistências de pega e endurecimento da pasta, influenciando na taxa de hidratação do cimento (METHA e MONTEIRO, 2008).

Assim como no concreto convencional, os aditivos químicos são utilizados na dosagem do concreto permeável a fim de se obter características especiais. Devido ao tempo de pega que, no caso do concreto permeável ocorre rápido, retardadores ou aditivos estabilizadores de hidratação são comumente utilizados (PERVIOUS PAVEMENT, 2011)

A utilização de plastificantes segundo Ferguson (2005), pode reduzir a água de amassamento com ganho na trabalhabilidade e aumentar o abatimento sem causar perda da pasta de cimento do agregado. Por esta razão, aditivos retardadores são utilizados durante o transporte de concretos porosos moldados *in loco*, atrasando o tempo de pega do cimento e evitando a necessidade de um alto fator a/c.

De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2005) o uso de aditivos nos concretos destinados à pavimentação é recomendável, sendo geralmente empregados aditivos dos tipos redutor de água e incorporador de ar.

2.2.2 Características do concreto permeável

O concreto permeável possui características em seu estado fresco e em seu estado endurecido. Pode-se citar no estado fresco elevada consistência, ou seja, baixa trabalhabilidade, ao se comparar com o concreto convencional, sendo o abatimento da mistura, normalmente, menos que 20 mm (ACI, 2006). Sendo assim, o ACI (2008), sugere que o tempo de trabalho útil após o processo de mistura não

ultrapasse 60 minutos para misturas sem o uso de aditivos, e 90 minutos para misturas com aditivos retardadores de pega.

No estado endurecido as principais propriedades deste tipo de concreto dizem respeito a massa específica, índice de vazios, textura, permeabilidade, resistência e durabilidade.

2.2.2.1 Massa específica e índice de vazios

A massa específica e o índice de vazios dependem das propriedades e proporções dos materiais utilizados na mistura e do grau de compactação utilizado no processo de moldagem. As massas específicas aparentes variam de 1600 kg/m³ a 2000 kg/m³, para o concreto poroso no estado fresco (TENNIS *et al.*, 2004).

O índice de vazios é a porcentagem de ar existente na mistura, sendo diretamente relacionado à massa específica de uma determinada mistura de concreto permeável. Depende de fatores como: agregados, granulometria, porcentagem de material cimentício e compactação (ACI, 2006).

Batezini (2013), afirma que o índice de vazios afeta diretamente as características de resistência mecânica. Entende-se que o material possui baixa porosidade quando possui índice de vazios menor que 15%, sendo necessário que se obtenha no mínimo 30% para que o concreto seja considerado de alta porosidade. Para Tennis *et al.* (2004), pode-se adotar valores na ordem de 20% para o índice de vazios, garantindo assim que o material possua boa resistência em conjunto com a permeabilidade. Para os autores quando o concreto estiver curado o índice de vazios varia entre 15% e 25% e o fluxo de água gira em torno de 200 l/m²/min.

2.2.2.2 Textura

Com relação à textura do concreto permeável, de acordo com Batezini (2013, p.31):

O concreto permeável é caracterizado por apresentar uma textura superficial diferenciada quando comparado ao concreto convencional. Esta diferença está associada a pequena ou nula quantidade de agregados miúdos na sua composição, o que proporciona uma superfície mais rugosa, elevando o coeficiente de atrito. Este tipo de textura pode trazer benefícios relativos à segurança do usuário, principalmente em períodos chuvosos ou em

ocorrências de neve e gelo na pista, uma vez que, além do maior coeficiente de atrito atribuído à estrutura mais rugosa, a condição permeável do concreto pode ser bastante efetiva na diminuição dos riscos de hidroplanagem. Isso ocorre porque a água proveniente das intempéries percola pelo revestimento permeável do pavimento não permanecendo na sua superfície, o que evita a formação de poças d'água e diminui a ocorrência do fenômeno de *spray*.

De acordo com a *American Concrete Pavement Association* (2006), devido à textura do concreto, este pode ser utilizado como material de revestimento, pois reduz a aquaplanagem e minimiza o ruído dos pneus no pavimento.

2.2.2.3 Permeabilidade

A condutividade hidráulica, também conhecida como coeficiente de permeabilidade, é um dos parâmetros mais importantes do concreto permeável e pode ser definida como a taxa de infiltração de água através de sua estrutura. Conforme Tennis *et al.* (2004), são considerados valores típicos de coeficiente de permeabilidade a variação entre 0,21 cm/s e 0,54 cm/s, valores relativamente superiores à capacidade de infiltração da maioria dos solos (LAMB, 2014). De acordo com Bean *et al.* (2007, *apud* BATEZINI, 2013, p.31), valores em campo podem variar de 0,07 cm/s a 0,77 cm/s.

O coeficiente de permeabilidade indica a velocidade de infiltração de água no solo (PINTO, 2002). Esta informação é importante para o dimensionamento do sistema na fase de projeto e também após a execução, possibilitando o acompanhamento do pavimento ao longo da sua vida útil (MARCHIONI e SILVA, 2013).

De acordo com Marchioni e Silva (2013), o coeficiente de permeabilidade pode ser determinado em laboratório por meio de permeômetros de carga constante ou variável, a depender do tipo de material. Batezini (2013) observa que este tipo de ensaio é utilizado em laboratório devido à sua praticidade, mas que é possível determinar o parâmetro de condutividade hidráulica de diversas maneiras.

Segundo a Norma Brasileira (NBR) 16416 (ABNT,2015), que trata quanto aos requisitos mínimos exigíveis ao projeto, especificação, execução e manutenção dos pavimentos permeáveis, o pavimento permeável, independentemente do tipo de revestimento adotado, deve apresentar, quando recém construído, coeficiente de permeabilidade maior que 10^{-3} m/s. A avaliação do coeficiente em laboratório serve

apenas para a aprovação preliminar dos materiais de revestimento e simulação das condições de permeabilidade do pavimento, a aprovação final deve ser realizada em campo, após a execução da estrutura.

Desta forma, a avaliação do coeficiente de permeabilidade deve ser feita também em pavimentos permeáveis já executados, e em placas de concreto permeável de pistas experimentais. Nesse processo é apoiado um cilindro de policloreto de vinil (PVC) sobre a superfície da placa e adicionado água, com o objetivo de avaliar a infiltração. Tal procedimento reduz discrepâncias de resultados que possam ocorrer nos ensaios de corpos de prova cilíndricos executados em laboratório, servindo ainda, para aprovação do pavimento após a sua execução e no monitoramento ao longo da utilização do pavimento. A necessidade de manutenção e limpeza do pavimento também pode ser avaliada a partir deste ensaio (BATEZINI, 2013; MARCHIONI E SILVA, 2013).

Como um dos principais problemas encontrados com relação à drenabilidade deste tipo de pavimento está a selagem da superfície da camada de revestimento.

Esse tipo de situação é comum quando há excesso de compactação da superfície durante as etapas do processo construtivo. Quando a superfície está selada, os vazios ficam entupidos e, conseqüentemente, toda a camada de revestimento se torna impermeável. Esta condição pode ser determinada por meio de uma avaliação visual de condição de superfície do pavimento acabado, quando se verifica a existência de poças d'água, por exemplo. A permeabilidade pode ser alterada ao longo do tempo, geralmente decorrente da incrustação de partículas de areia ou solo nos poros do revestimento de concreto permeável. (HENDERSON *et al.*, 2009 *apud* BATEZINI, 2013, p.33).

2.2.2.4 Resistência

As misturas de concreto permeável de acordo com a norma americana ACI (2006), tendem a desenvolver resistências a compressão entre 2,8 e 28 MPa. Entretanto, Polastre e Santos (2006) afirmam que em média, os concretos produzidos possuem resistência de aproximadamente 25 MPa. Assim, Höltz (2011) garante que apesar da tendência ser a alta porosidade diminuir a resistência da mistura, se bem dosado, o concreto pode garantir uma boa resistência.

Assim como nos concretos convencionais, as propriedades e proporções dos materiais utilizados na mistura, bem como as técnicas de execução e as condições ambientais em que o pavimento é executado irão influenciar no valor da resistência (TENNIS *et al.*, 2004).

Para que o concreto permeável possa ser utilizado como pavimento, algumas características de comportamento estrutural são importantes, como a resistência mecânica, principalmente de tração na flexão e as propriedades elásticas. Estas características podem ser influenciadas por diversos fatores, por isso deve-se dar atenção especial principalmente ao índice de vazios da mistura.

Em função da irregularidade observada nos corpos de prova, a execução deste tipo de ensaio em laboratório torna-se difícil, e devido a isso, o que se observa é uma escassez de resultados quanto a estes parâmetros. Assim, o mais comum são estudos referentes a resistência à compressão e às condições de permeabilidade das misturas (BATEZINI, 2013).

Kevern *et al.* (2009, *apud* BATEZINI, 2013, p.38), em sua revisão bibliográfica, observou que as misturas de concretos permeáveis compostas basicamente de agregado graúdo com distribuição granulométrica uniforme, e elevada condutividade hidráulica, apresentavam baixas resistências à compressão (6,5 MPa e 17,5 MPa). Em consequência, ao final da década de 90, 75% dos pavimentos porosos dos EUA apresentavam problemas, em função das baixas resistências e elevado índice de vazios.

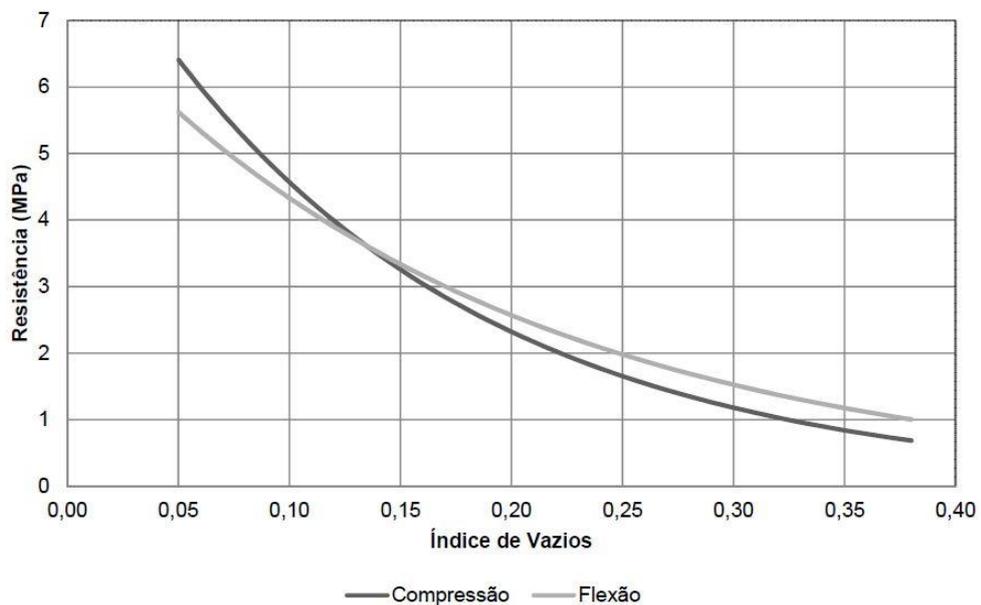
Comparando os dados dos EUA à outras regiões do mundo, Beeldens (2001), afirma que em países como Japão, Austrália e na Europa, as misturas de concreto permeável conseguiam chegar a resistências à compressão na ordem de 32 MPa, porém com taxas de infiltração menores quando comparadas aos traços americanos.

Os efeitos da energia de compactação, observados por Schaefer *et al.* (2006), onde o autor testou resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral, demonstram que em geral, os resultados obtidos para compactação regular se correlacionam melhor do que os resultados obtidos para energia de compactação baixa. O que permite afirmar que, quanto menor a energia de compactação maior será a dispersão dos resultados para estes parâmetros.

Devido à estas discrepâncias de resultados percebe-se a necessidade de aprofundar os estudos para melhor compreensão da relação entre permeabilidade e resistência, uma vez que o material precisa das duas características funcionando juntas para permitir o tráfego e a percolação das águas pluviais. Somente assim, pode-se definir as proporções e os tipos de materiais adequados a serem utilizados no processo de dosagem (BATEZINI, 2013).

Dellate *et al.* (2009 *apud* BATEZINI, 2013, p.39), observou e ensaiou corpos de prova retirados de vinte pistas diferentes revestidas com concreto permeável nos EUA. Com os ensaios, percebeu que as resistências à compressão e à tração na flexão, são inversamente proporcionais ao volume de vazios existente, ou seja, quanto maior o volume de vazios, menor a resistência mecânica. Tais resultados podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 – Resistência à compressão (dividido por 10) e resistência à tração na flexão em função da variação do índice de vazios



Fonte: Batezini (2013). Adaptado de Dellate *et al.* (2009)

A NBR 16416 (ABNT,2015) estabelece que para pavimentos de concreto permeável moldados *in loco* a resistência à tração na flexão deve atingir no mínimo 1,0 MPa e 2,0 MPa para que este possa ser utilizado para tráfego de pedestres e de veículos leves, respectivamente. O recomendado, segundo Batezini (2013), é que o concreto permeável atinja resistência média à tração entre 4,0 MPa e 5,0 MPa para ser utilizado em tráfego de veículos pesados.

De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), o concreto empregado na execução de pavimentos deve apresentar a resistência característica à tração na flexão na ordem de 4,5 MPa, sendo este o principal resultado para o dimensionamento do pavimento. Já a resistência característica à compressão axial deve se manter em torno de 35 MPa para pavimentos rígidos de concreto simples.

2.2.2.5 Durabilidade

A durabilidade do pavimento de concreto permeável refere-se à vida útil sob determinadas condições ambientais. Efeitos físicos, como temperaturas extremas e efeitos químicos, como ataques de sulfatos e ácidos, influenciam negativamente a durabilidade do concreto (ACI, 2006).

Com relação à durabilidade dos pavimentos de concreto permeável, Tennis *et al.* (2004) exemplifica alguns dos fatores que podem reduzir a durabilidade do pavimento, sendo eles:

- Resistência ao sulfato: Produtos agressivos presentes no solo ou na água tais como ácidos e sulfatos, são prejudiciais para o concreto permeável, assim como para o concreto convencional. No entanto, devido à estrutura aberta do concreto permeável, este se torna mais suscetível a ataques, os quais ocorrem em uma área relativamente maior. Desta forma, o pavimento pode ser usado em solos com alto teor de sulfatos, desde que possua isolamento e a camada de base seja dimensionada adequadamente; e
- Resistência à abrasão: Devido à sua estrutura aberta e a textura mais áspera, a abrasão pode ser um problema neste tipo de pavimento. Desta forma, é importante que seja executado um acabamento superficial antes da abertura para o tráfego, assim como compactação e cura adequadas durante a execução. Assim, evita-se que os agregados se soltem do pavimento devido às cargas do tráfego.

Em geral, a manutenção do pavimento consiste em evitar que os poros fiquem obstruídos, para isso é fundamental que sejam tomados os devidos cuidados nas etapas de construção, evitando problemas futuros e garantindo maior durabilidade à estrutura.

2.3 Métodos de construção de pavimentos de concreto permeável

Conforme mencionado anteriormente, o concreto permeável é composto de Cimento Portland, agregado graúdo, pouco ou nada de agregado miúdo, água e pode ou não possuir aditivos. O revestimento deve permitir a passagem rápida da água, garantindo que 100% da água superficial infiltre e fique armazenada na estrutura do

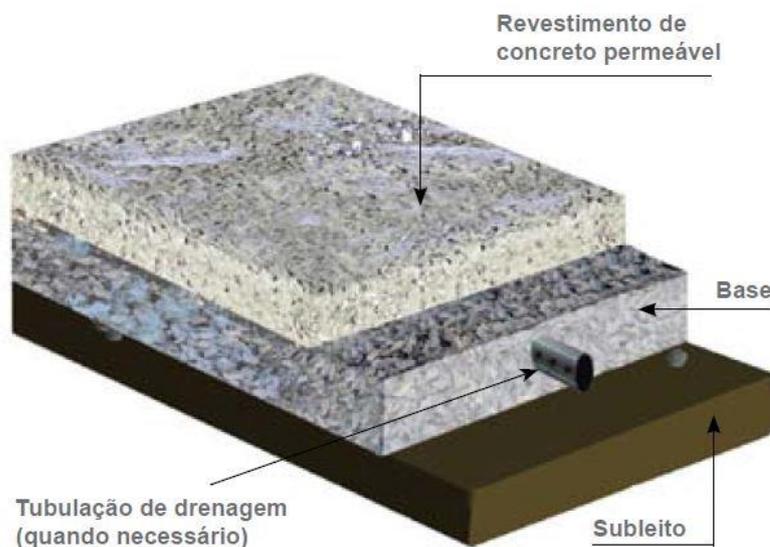
pavimento até escoar, funcionando como uma caixa de retardo (MARCHIONI E SILVA, 2013).

A estrutura do pavimento, conforme Marchioni e Silva (2013), deve ser dimensionada considerando-se a precipitação do local e as características do subleito, além das condições de tráfego às quais o pavimento estará sujeito. Deve-se ter atenção aos materiais utilizados na camada de base, onde o volume de vazios dos agregados deve ser superior a 30%.

Com relação aos critérios de projeto, dois fatores determinam a espessura dos pavimentos permeáveis: as propriedades hidráulicas, como permeabilidade e número de vazios, e as propriedades mecânicas, como resistência e rigidez. O concreto da camada superior deve ser projetado para suportar as cargas provenientes do tráfego e ao mesmo tempo contribuir positivamente no gerenciamento das águas pluviais. Logo, o projetista deve analisar as duas condições separadamente e determinar a espessura do pavimento conforme a pior situação de projeto (PERVIOUS PAVEMENT, 2011).

A estrutura típica de um pavimento permeável pode ser observada na Figura 6. A primeira camada é composta pelo revestimento, utilizando concreto permeável, em seguida tem-se uma camada de base apoiada no subleito, composta de agregados e que servirá de reservatório de acumulação de água. A tubulação de drenagem pode ser adicionada a camada de base, conforme a necessidade.

Figura 6 – Estrutura de um pavimento permeável



Fonte: Marchioni e Silva (2013)

De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), os pavimentos permeáveis podem ser classificados em três tipos: os pavimentos de infiltração total, onde toda a água precipitada chega ao subleito e se infiltra; de infiltração parcial, onde parte da água precipitada alcança o subleito e se infiltra e outra parte fica armazenada temporariamente na estrutura, sendo depois removida pelo dreno; e sem infiltração, onde toda a água precipitada fica temporariamente armazenada na estrutura, sem infiltrar no subleito, sendo depois removida pelo dreno.

De acordo com Batezini (2013), os procedimentos de dosagem, controle tecnológico em obra e produção do revestimento em concreto permeável, ainda são realizados empiricamente, uma vez que as definições metodológicas e técnicas para a realização dos serviços de dosagem e execução ainda estão sendo estudadas e adaptadas.

Segundo a *American Concrete Pavement Association* (2006), há cinco passos fundamentais que precisam ser seguidos na concepção de um pavimento permeável, sendo eles:

- Pré-tratamento: Em pavimentos de concreto permeável, o próprio pavimento atua como um pré-tratamento da água para o reservatório de acumulação;
- Tratamento: O reservatório de pedra drenante abaixo da superfície do pavimento deve ser dimensionado para atenuar fluxos de tempestade, armazenando a água precipitada nos vazios gerados entre os agregados graúdos na camada de base;
- Transporte: A água precipitada chega ao reservatório através da superfície do pavimento e se infiltra no subleito. É indicado que sejam utilizadas mantas geotêxteis entre o solo e o reservatório, para evitar a exsudação do solo. Outra forma de transportar a água acumulada no reservatório é por meio de dispositivos de drenagem, que desviam o fluxo de água para áreas de captação ou redes de drenagem;
- Redução de manutenção: Para que o sistema funcione adequadamente é necessário que se façam as devidas manutenções. Para isso, é recomendado que sejam feitas periodicamente aspirações ou lavagem sob pressão para limpeza dos poros; e

- Paisagismo: É importante que sejam tomados os devidos cuidados com relação ao entorno do pavimento permeável, como por exemplo, evitar que hajam materiais em zonas mais altas que possam vir a sedimentar sobre o pavimento e causar o entupimento dos poros, fazendo com que o sistema perca sua funcionalidade.

A seguir são apresentadas as principais fases de execução de um pavimento permeável segundo Batezini (2013), sendo elas: preparação do subleito, mistura, transporte, lançamento e acabamento superficial.

2.3.1 Preparação do subleito

A uniformidade do subleito é extremamente importante para a execução do pavimento permeável. O subleito deve ser adequadamente compactado após a remoção de irregularidades para que possa absorver os esforços gerados pelo tráfego dos veículos. O grau de compactação sugerido por Tennis *et al.* (2004), varia de 90% a 95% com relação a massa específica aparente seca teórica de laboratório.

Devido ao elevado número de vazios e baixa relação a/c do concreto permeável, deve-se tomar cuidado para que não ocorra a perda de água prematura do pavimento. Dessa maneira, Batezini (2013) recomenda que,

o subleito necessita estar pré-umedecido (evitando excesso de água) para que a água da superfície inferior do concreto não seja removida rapidamente de sua estrutura, prejudicando o processo de hidratação do cimento (consideração para quando o concreto for apoiado diretamente sobre o subleito). Este procedimento é considerado importante quando da execução de pavimentos convencionais, porém é ainda mais importante para o caso do concreto permeável, uma vez que este possui índice de vazios elevado, facilitando a fuga da água através de sua estrutura porosa, o que pode causar redução de sua resistência mecânica e durabilidade.

De acordo com o ACI (2006), além da uniformidade é importante que o subleito não apresente formação de lama e nem esteja saturado para o início da concretagem. Recomenda-se ainda, que acima do subleito seja executada uma camada de material granular, com no mínimo 15 cm de espessura e sem a presença de material fino.

2.3.2 Dosagem e mistura

Conforme Tennis *et al.* (2004), o controle dos materiais utilizados na dosagem e a água na preparação da mistura são fundamentais para definir as propriedades do concreto. A água deve ser adicionada em um intervalo estreito para que a resistência e a permeabilidade sejam adequadas e não ocorra o desprendimento dos agregados da pasta, evitando assim, a obstrução dos poros.

O nível de umidade do agregado deve ser cuidadosamente monitorado, já que tanto a água absorvida por ele, quanto o excesso de umidade fornecido pelo agregado, podem ser prejudiciais para a mistura. Em algumas ocasiões, pequenos ajustes no teor de água da mistura podem ser necessários para obter a consistência adequada. No entanto, tal alteração deve ser rigorosamente controlada, pois adições de água no local de trabalho podem ser difíceis de controlar (PERVIOUS PAVEMENT, 2011).

Ainda de acordo com o *Pervious Pavement* (2011), é necessário que seja feito um ensaio de peso unitário para garantir que os materiais estejam nas proporções corretas. Se este estiver entre 1600 kg/m^3 e 2000 kg/m^3 é provável que a mistura tenha sido feita corretamente. As proporções de agregado e cimento utilizados na mistura devem ser estabelecidas por meio de testes e pela experiência com os materiais disponíveis próximo ao local de aplicação.

2.3.3 Transporte

Devido à baixa quantidade de água na mistura deve-se ter cuidado especial com relação ao transporte do concreto permeável à obra, quando este for industrializado, devendo ser completamente descarregado em no máximo uma hora após o início do processo de mistura, evitando assim alterações em sua consistência. Consegue-se prolongar este tempo de transporte utilizando aditivos retardadores de pega. Outro cuidado importante diz respeito ao tempo útil de utilização da mistura em locais que possuam temperaturas ambientais altas e velocidade do vento elevadas, já que a mistura pode secar precocemente (BATEZINI, 2013).

2.3.4 Lançamento e consolidação

Assim como na construção de pavimentos convencionais de concreto, há uma variedade de técnicas que podem ser utilizadas, as quais são desenvolvidas para se adequarem às condições específicas do canteiro de obras (PERVIOUS PAVEMENT, 2011).

De acordo com Batezini (2013), o método mais comum para lançamento de concreto permeável é manual, com instalação de formas laterais. Devem ser previstos os acessos de caminhões até a pista de lançamento, uma vez que este tipo de material não pode ser bombeado e necessita ser descarregado próximo ao local de aplicação. Após descarregado, o material pode ser espalhado manualmente no interior das formas.

O lançamento do concreto deve ocorrer de forma bastante rápida, já que pode ocorrer a secagem da fina camada da pasta de cimento, resultando num efeito negativo de perda de resistência (BROOK, 1982).

Como método de controle, todas as cargas de concreto permeável devem ser inspecionadas visualmente para verificação de consistência e da condição de abertura dos agregados. Para este tipo de material o ensaio de abatimento de cone, usualmente empregado para controle tecnológico de concretos convencionais, não é empregável, devido à baixa relação *a/c* do concreto permeável. (BATEZINI, 2013).

Como método de compactação podem ser utilizadas placas espaçadoras de 2,5 a 5,0 cm no topo das formas e realizar o nivelamento do concreto com régua vibratória. Após, remove-se a placa e compacta-se a superfície com um rolo de metal leve, conforme demonstra a Figura 7. O rolo de metal compacta a superfície até o nível das formas, sendo recomendado que o procedimento seja realizado em até 15 minutos, devido ao rápido endurecimento, altas taxas de evaporação e atrasos na consolidação, que podem causar problemas no pavimento (BATEZINI, 2013; PERVIOUS PAVEMENT, 2011; TENNIS *et al.*, 2004).

Após todo o processo de lançamento, compactação e nivelamento do pavimento, é necessário que sejam feitas juntas de dilatação, assim como no concreto convencional. Entretanto, como a retração no concreto permeável é menor do que no concreto convencional, a distância entre as juntas pode ser maior, sendo recomendado espaçamento entre juntas de 6 metros (TENNIS *et al.*, 2004).

Na Figura 8 observa-se a execução da junta logo após a consolidação, utilizando o procedimento de corte das placas, que deve ser realizado antes do início de pega.

Figura 7 – Execução de pavimento em concreto permeável com compactação por rolo metálico



Fonte: www.perviouspavement.org

Figura 8 – Execução de junta por corte das placas



Fonte: Batezini (2013). Adaptado de Youngs (2005)

Outra maneira de executar a junta é pelo posicionamento de formas previamente ao lançamento do concreto, sendo esta a opção preferida por evitar possíveis quebras nas juntas que podem vir a ocorrer durante o processo de corte (BATEZINI, 2013).

O processo de cura do concreto permeável é maior do que o tempo de cura do concreto convencional, sendo recomendado ao fim da concretagem cobrir o material com uma lona plástica pelo período de sete dias. A lona auxilia no processo de cura e evita que ocorra perda de água da mistura por evaporação. Após o período de sete dias, o pavimento pode ser aberto ao tráfego (ACI, 2006; TENNIS *et al.*, 2004).

2.3.5 Acabamento superficial

Tennis *et al.* (2004) afirmam que normalmente os pavimentos de concreto permeável não possuem o mesmo acabamento superficial dado aos pavimentos de concreto convencionais, já que tais procedimentos podem vir a fechar os poros do concreto, fazendo-o perder sua funcionalidade.

Assim, o concreto permeável recebe o acabamento por meio de compactação, deixando a superfície mais áspera, porém melhorando a tração e não prejudicando o tráfego. Algumas técnicas recentes compactam o material e deixam sua superfície mais lisa, evitando o desconforto do usuário ao trafegar pelo pavimento.

2.4 Métodos de dosagem de pavimentos permeáveis

O processo de dosagem do concreto permeável ainda é feito de forma empírica no Brasil, pois não há uma norma específica que recomende os parâmetros de dosagem adequados, como ocorre com os concretos convencionais. Sabe-se que, para o concreto possuir permeabilidade é necessário que haja uma porcentagem adequada de vazios na mistura, permitindo a percolação da água.

Sendo assim, para que tal propriedade seja eficiente, é necessário que não haja a presença de agregado miúdo na mistura, ou que este seja adicionado em pequenas proporções. Entretanto, quanto maior for o índice de vazios, menor será a resistência da mistura, resultando em um material mais frágil.

De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005) o concreto utilizado para pavimentação deve apresentar baixa variação volumétrica, trabalhabilidade compatível com o equipamento que irá espalhar a mistura,

adensamento e acabamento que garantam maior durabilidade e um consumo de cimento maior ou igual a 320 kg/m³.

Para que tais condições sejam alcançadas, é necessário estudar cuidadosamente o traço do concreto, levando em conta o tipo e a eficiência do cimento, conteúdo de água, temperatura do concreto e dos materiais, tipos de aditivos e métodos de cura, devendo ao fim do processo ser verificadas as propriedades do concreto.

Höltz (2011) realizou um estudo com diferentes traços de concreto permeável, onde desenvolveu estudos de resistência e permeabilidade. Primeiramente o autor utilizou 12 traços, variando a proporção cimento/agregado e a relação a/c e usando brita 1 e Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI) na mistura.

A maior resistência à compressão encontrada para os traços testados nesta etapa foi de 9,05 MPa, com o traço 1:5 (cimento:agregado) e a relação a/c igual a 0,35. Para dar continuidade a sua pesquisa, Höltz (2011) decidiu verificar a influência da adição de brita 0 e areia na mistura utilizando o traço 1:4 e relação a/c de 0,30.

Através dos resultados obtidos pelo autor em suas diferentes misturas, constata-se que a areia favoreceu a resistência dos traços com brita 1, entretanto os traços com brita 0 se mostraram mais resistentes devido ao melhor encaixe dos agregados.

Com relação ao tipo de vibração, o referido autor verificou a sua interferência em três formas de compactação: sem vibrar, com uso de vibrador tipo agulha com diâmetro de 25 mm e com mesa vibratória (10 segundos por camada). De acordo com os resultados, o meio de compactação que se mostrou mais eficiente foi por mesa vibratória, onde é empregado um tempo de vibração pequeno para que não haja segregação dos materiais presentes no concreto.

Batezini (2013) realizou seu estudo com o foco voltado para a influência do tamanho dos agregados utilizados na mistura, verificando que para uma proporção cimento/agregado de 1:4,44 e relação a/c de 0,30, não há muita variação nos resultados de resistência à compressão dos corpos de prova ao variar proporções de agregados com tamanhos entre 4,8 mm e 9,5 mm.

As amostras estudadas foram compactadas conforme sugestão de Suleiman *et al.* (2006), onde os autores verificaram melhoras na resistência mecânica do material após a cura e sem comprometer a sua condutividade hidráulica. Para tal, as amostras foram moldadas com 15 golpes de bastão metálico em cada uma das três camadas do corpo de prova cilíndrico e posterior vibração por 10 segundos em mesa vibratória.

Os corpos de prova prismáticos foram compactados em duas camadas iguais, com 25 golpes de bastão por camada e posterior vibração igual à utilizada para os corpos de prova cilíndricos.

O autor verificou ainda que para o traço estudado as misturas apresentaram boas propriedades drenantes, sugerindo que para tal traço a adição de certa quantidade de agregado miúdo, bem como de aditivos, pode melhorar sua resistência mecânica, mantendo a condutividade hidráulica compatível com aquelas utilizadas na prática. Conforme descrito anteriormente, segundo o autor o recomendado seria uma resistência média a tração entre 4,0 e 5,0 MPa para o tráfego de veículos pesados.

Rison *et al* (2018), também avaliou a influência da distribuição granulométrica do agregado graúdo nas propriedades do concreto permeável, utilizando seis granulometrias distintas de agregado, 9,5, 12,5 e 19,0 mm, contínua e descontínua. Foram avaliadas várias propriedades e concluiu-se que com o uso da menor granulometria foi obtida a maior resistência à compressão e flexão, para o traço 1:3,26, devido a melhor acomodação dos grãos e menor índice de vazios na mistura.

O autor observou ainda que, com relação a granulometria, houve uma variação significativa do índice de vazios, sendo que a contínua apresentou menores valores que a descontínua. Já com relação à resistência à compressão e flexão, a granulometria contínua apresentou valores superiores aos da granulometria descontínua.

Segundo estudo realizado por Lian e Zhuge (2010), onde os autores avaliaram a resistência à compressão e a permeabilidade para diferentes tipos de agregados e graduações, o uso do agregado de um único tamanho favoreceu a permeabilidade. O agregado com partículas variando entre 9,5 mm e 4,8 mm produziu um aumento da resistência à compressão e diminuiu a permeabilidade, enquanto o agregado bem graduado causou a diminuição da resistência à compressão axial e tração na flexão do concreto poroso.

A utilização de outros materiais na mistura, como sílica ativa em conjunto com superplastificantes leva a um aumento da resistência à compressão, conforme Lian e Zhuge (2010). Isto se deve ao fato de as partículas de sílica ativa serem distribuídas uniformemente e preencherem os capilares da pasta de cimento sem perda da permeabilidade. Entretanto, foi verificado que para ser eficiente, a proporção de sílica ativa deve ser de 7%, utilizada em conjunto com o superplastificante na proporção de 0,8%.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia seguida na pesquisa, indicando os procedimentos adotados na realização do trabalho, por meio da descrição dos estudos preliminares e definitivos, caracterização dos materiais a serem utilizados na mistura, métodos de dosagem, moldagem dos corpos de prova e ensaios realizados.

3.1 Caracterização da pesquisa

A presente pesquisa teve o objetivo de estudar a dosagem e definir um traço de concreto permeável de alta resistência para utilização em pavimentos com tráfego de veículos pesados, que atendesse simultaneamente aos parâmetros de resistência e permeabilidade exigidos na normalização brasileira. Para tanto, buscou-se primeiramente analisar os materiais constituintes dos traços estudados, definindo as proporções a serem utilizadas na mistura, bem como as características e propriedades resultantes da união de tais materiais, a partir de ensaios de caracterização e de resistência mecânica. Desta forma, a pesquisa pode ser classificada como descritiva, de caráter quantitativo, englobando coleta de dados, análise e interpretação de resultados e comparando-os por meio de cálculos a uma base de referência.

3.2 Materiais utilizados

Foram desenvolvidos diferentes traços de concreto permeável com o objetivo de criar uma curva de resistência em função da compactação e permeabilidade, buscando definir um traço que atingisse alta resistência e fosse permeável. Para a moldagem dos corpos de prova ensaiados foram utilizados: agregado graúdo, agregado miúdo, Cimento Portland, material pozolânico, água e aditivos.

3.2.1 Agregados

Como ensaios de caracterização foram realizadas as análises granulométricas dos agregados miúdos e graúdos e o ensaio de massa específica dos agregados miúdos.

O ensaio especificado pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) tem como objetivo a determinação da curva granulométrica dos agregados graúdos e miúdos utilizados no concreto. Tal ensaio consiste basicamente no peneiramento de uma determinada amostra representativa seguindo os procedimentos descritos na norma.

3.2.1.1 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na dosagem do concreto permeável foi rocha basáltica, classificada como brita 0. Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), define-se como agregado graúdo os grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

Para a execução do ensaio, a brita foi primeiramente seca em estufa e em seguida foram pesadas duas amostras de material, as quais passou-se separadamente nas peneiras de malha 25 mm a 1,18 mm. Optou-se por utilizar as peneiras de malha 2,4 mm e 1,18 mm além das peneiras especificadas em norma, a fim de obter-se uma curva granulométrica mais precisa. As peneiras foram encaixadas com abertura de malhas em ordem crescente da base ao topo e em seguida agitadas manualmente por tempo superior a 2 minutos.

Após, o material retido em cada uma das peneiras foi pesado utilizando uma balança digital para determinação da massa do mesmo. Com os valores da massa, obtiveram-se as porcentagens retidas em cada peneira e a curva granulométrica do agregado.

O módulo de finura do agregado e a dimensão máxima característica foram determinadas conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009). O módulo de finura corresponde a soma das porcentagens retidas acumuladas do agregado em cada uma das peneiras da série normal, sendo esta dividida por 100, enquanto a dimensão máxima característica corresponde a dimensão da abertura da peneira da série normal ou intermediária na qual fica retida acumulada uma porcentagem igual ou imediatamente inferior a 5% da massa total do agregado.

A massa específica do agregado graúdo foi obtida conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009) e o teor de material pulverulento pela norma NBR NM 46 (ABNT, 2003).

3.2.1.2 Agregado miúdo

Os agregados miúdos utilizados na dosagem do concreto poroso foram a areia natural média e a areia industrial média grossa, obtida a partir da britagem de rochas basálticas. Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009), agregado miúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de malha 0,15 mm. O procedimento de ensaio segue o mesmo processo apresentado no ensaio de agregados graúdos, porém neste ensaio utilizaram-se as peneiras de malha 4,75 mm até 0,15 mm, já que por definição o agregado miúdo tem partículas menores que 4,75 mm.

Após a realização do procedimento traçou-se a curva granulométrica dos dois tipos de areia e determinou-se o módulo de finura e a dimensão máxima característica. O ensaio de massa específica dos agregados miúdos foi realizado conforme os procedimentos descritos na NBR NM 52 (ABNT, 2009) e o ensaio para definir o teor de material pulverulento conforme NBR NM 46 (ABNT, 2003).

3.2.2 Cimento Portland

O cimento utilizado nos ensaios foi fornecido pela empresa Conpasul, localizada na cidade de Santa Cruz do Sul, sendo coletado diretamente no silo de armazenamento da empresa e transportado em tonéis plásticos devidamente vedados, evitando a entrada de umidade. O cimento existente na empresa é do tipo Cimento Portland Composto com Fíler (CP II F-40), da marca Itambé e os resultados dos ensaios químicos e físicos do material foram fornecidos pela empresa que doou o cimento para a pesquisa.

3.2.3 Material pozolânico

Na dosagem do concreto permeável foi realizada adição de material pozolânico sendo este uma cinza mineral leve. A cinza também foi fornecida para o estudo pela empresa Conpasul na forma a granel, coletada diretamente no silo de armazenagem e transportada em tonéis plásticos vedados a fim de se manter a amostra em estado seco. Os ensaios de determinação das propriedades físicas e químicas deste material foram realizados pela própria empresa e fornecidos para o presente estudo.

3.2.4 Água

A água utilizada para a moldagem do concreto foi proveniente da rede de abastecimento da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC).

3.2.5 Aditivos

O aditivo utilizado durante a execução do trabalho foi o aditivo Eucon® DC 56 da empresa Viapol. Este produto, conforme o fabricante, é um aditivo híbrido composto por poliacrilatos de altíssimo desempenho e outros componentes que atuam proporcionando maior eficiência para produção de concreto semi-seco. Ele auxilia na compactação e incorpora ar na mistura, melhora o acabamento das bordas e quinas das peças, reduzindo falhas e é compatível com todos os tipos de cimento Portland.

O Eucon® DC 56 atende aos requisitos da NBR 11768 (ABNT, 2011) e possui algumas vantagens, como:

- Maior facilidade de extrusão e moldagem;
- Aumenta a coesão do concreto, reduzindo “desmoronamentos” dos alvéolos;
- Altíssima resistência mecânica inicial e alta resistência mecânica final;
- Baixa manutenção de trabalhabilidade (tempo de pega acelerado);
- Alta redução da água de amassamento;
- Redução do potencial de retração e a formação de fissuras;
- Aumento da durabilidade das peças concretadas; e
- Aumento da vida útil.

3.3 Dosagem

3.3.1 Estudo preliminar – comparativo de permeabilidade

O processo de dosagem ocorreu em duas etapas, o estudo preliminar consistiu na elaboração de seis traços de concreto permeável, variando as proporções de agregado miúdo na mistura. Nesta etapa, o foco foi realizar um comparativo de

permeabilidade do material em função das adições de agregado miúdo e correlacionar com a resistência mecânica, a fim de definir qual dos traços possuía melhores características mecânicas em conjunto com a porosidade.

No primeiro traço 100% do agregado utilizado no concreto foi o graúdo, sendo este apenas a brita 0. A partir deste, aumentou-se a proporção de agregado miúdo, sendo eles a areia natural média e a areia industrial média grossa. A proporção de agregado miúdo utilizada nos traços seguintes foi de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, do total de agregado utilizado no concreto, sendo tal proporção dividida entre os dois tipos de areia.

Foi mantido nos traços um teor de aglomerantes, ou seja, cimento e material pozolânico, de 425 kg/m³, sendo que o aditivo foi dosado em 0,3% sobre a massa de aglomerantes. Os seis traços utilizados nesta etapa encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Traços utilizados no estudo comparativo de permeabilidade

TRAÇO	CIMENTO	POZOLANA	AREIA INDUSTRIAL GROSSA	AREIA NATURAL MÉDIA	BRITA 0	FATOR A/C	TEOR DE ARGAMASSA (%)
T0	0,905	0,095	-	-	4,813	0,398	17,2
T5	0,905	0,095	0,118	0,118	4,513	0,350	21,5
T10	0,905	0,095	0,235	0,235	4,215	0,385	25,9
T15	0,905	0,095	0,353	0,353	3,915	0,390	30,4
T20	0,905	0,095	0,471	0,471	3,615	0,380	35,0
T25	0,905	0,095	0,588	0,588	3,318	0,430	39,6

Fonte: Autor (2019).

Houveram variações no fator a/c conforme o traço, tendo este se mantido entre 0,35 e 0,43. Iniciou-se a moldagem com o fator a/c igual 0,30, porém constatou-se a necessidade de a água ser ajustada a fim de alcançar a consistência ideal da mistura, conforme demonstra a Figura 9. A verificação da trabalhabilidade pelo ensaio de abatimento de tronco de cone, *slump-test* não se aplica para este tipo de concreto.

3.3.2 Estudo definitivo – comparativo de resistência

Após a realização dos ensaios de caracterização apresentados posteriormente no item 3.5 escolheu-se a composição com comportamento de permeabilidade e resistência satisfatórios para dar continuidade aos estudos, onde o foco então, foi

realizar um comparativo de resistência, variando dentro do mesmo traço apenas o consumo de cimento.

A partir deste, foram elaborados mais quatro traços, porém nesta etapa variou-se o teor de agregados para os aglomerantes (M), variando em busca de se criar uma curva de dosagem, ou seja, um traço com diferentes consumos de cimento e pozolana. Para tal, manteve-se o teor de aditivo em 0,3% sobre a massa de aglomerantes e o teor de argamassa fixou-se em 35%, correspondente ao traço T20 do estudo preliminar, teor que se mostrou adequado na etapa de verificação da permeabilidade.

Os quatro traços elaborados para o estudo comparativo de resistência encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Traços utilizados no estudo comparativo de resistência

TRAÇO (1:M)	CIMENTO	POZOLANA	AREIA INDUSTRIAL GROSSA	AREIA NATURAL MÉDIA	BRITA 0	FATOR A/C	CONSUMO DE CIMENTO (kg/m ³)	TEOR DE ARGAMASSA (%)
1:5,0	0,900	0,100	0,550	0,550	3,900	0,420	392	35,0
1:4,5	0,900	0,100	0,463	0,463	3,575	0,385	438	
1:4,0	0,900	0,100	0,375	0,375	3,250	0,350	471	
1:3,5	0,900	0,100	0,288	0,288	2,925	0,315	524	

Fonte: Autor (2019).

3.4 Moldagem dos corpos de prova

O processo de mistura para a moldagem dos corpos de prova ensaiados seguiu o utilizado por Batezini (2013) e criado por Schaefer *et al.* (2006). Segundo os estudos, a ordem de mistura dos componentes altera as características do produto final, assim, tal procedimento gera um ganho de resistência mecânica e condutividade hidráulica ao material. O procedimento de mistura adotado foi como o apresentado a seguir:

- Adicionou-se todo o agregado na betoneira com mais 5% do peso total do cimento;
- Misturou-se por 1 minuto;
- Adicionou-se o restante dos materiais;
- Misturou-se por 3 minutos;
- Deixou-se a mistura em repouso por 3 minutos;
- Misturou-se por mais 2 minutos.

O controle da mistura foi por análise tátil-visual, onde a quantidade de água ideal foi acertada aos poucos. Iniciou-se com determinada quantidade de água estimada e foi-se adicionando água gradualmente até que os materiais estivessem envoltos em uma pasta de cimento brilhosa (Figura 9). A consistência ideal foi alcançada quando ao pegar o concreto na mão, este formou uma bola, sem desmoronar nem fluir pelos vazios, conforme recomendado por Tennis *et al.* (2004).

Figura 9 – Consistência ideal para a mistura de concreto permeável



Fonte: Autor (2019).

Os corpos de prova cilíndricos moldados para os ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral, seguiram o estabelecido pela NBR 5738 (ABNT, 2016) no que diz respeito às dimensões das amostras. Desta forma, para tais amostras foram utilizadas as dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, respeitando-se com isso a relação altura/diâmetro de 2.

A compactação do concreto permeável nos moldes cilíndricos ocorreu em três camadas, onde cada camada foi compactada com 15 golpes utilizando o soquete Marshall. Este método para compactação e adensamento dos corpos de prova, de acordo com a bibliografia, proporciona melhores resultados de resistência mecânica após a cura, sem comprometer a condutividade hidráulica do material. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e permaneceram em processo de cura úmida por imersão em água até a idade dos ensaios.

Na etapa de estudo preliminar, para cada um dos seis traços, foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos, sendo 4 destes para o ensaio de resistência à compressão axial e 4 para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Já na segunda etapa, de determinação dos traços que compõem a curva de resistência, foram moldados 12 corpos de prova para cada um dos quatro traços, com 6 destinados a cada ensaio. Ao todo, foram moldados um total de 96 corpos de prova cilíndricos iguais aos apresentados na Figura 10.

Figura 10 – Corpos de prova cilíndricos após a moldagem



Fonte: Autor (2019).

Os corpos de prova prismáticos utilizados para o ensaio de resistência à tração na flexão foram moldados conforme recomendações da NBR 16416 (ABNT, 2015), que estabelece as dimensões dos prismas de 100 mm x 100 mm x 400 mm. Foram moldados 4 corpos de prova prismáticos para cada traço estudado, em ambas etapas do estudo, resultando em um total de 40 corpos de prova.

O adensamento foi feito de modo a simular o adensamento previsto em campo, buscando atingir em laboratório um índice de vazios e massa específica próximos aos valores reais obtidos em campo. Para tal simulação, as amostras foram moldadas em duas camadas com 25 golpes por camada, utilizando o soquete Marshall assim como nos moldes cilíndricos.

Nas formas os corpos de prova foram cobertos com lona plástica por 24 horas (Figura 11) e após a desforma permaneceram em processo de cura úmida até a idade do ensaio. A fim de simular a cura em campo, os mesmos foram embalados em filme plástico, conforme Figura 12.

Figura 11 – Corpos de prova prismáticos após a moldagem



Fonte: Autor (2019).

Figura 12 – Corpos de prova prismáticos embalados em filme plástico



Fonte: Autor (2019).

As placas utilizadas para o ensaio de permeabilidade foram moldadas com dimensões de 400 mm x 400 mm x 60 mm, definidas em função da espessura mínima

prevista na NBR 16416 (ABNT, 2015). Moldou-se uma placa para cada traço ensaiado no estudo preliminar, onde a compactação ocorreu em duas camadas, com 25 golpes por camada utilizando o soquete Marshall, assim como nos corpos de prova moldados para o ensaio de resistência à tração na flexão. Ao todo foram moldadas 6 placas para o ensaio de permeabilidade.

Optou-se pela compactação da placa com o soquete, simulando a compactação de campo feita com rolo metálico, conforme prescreve a norma americana 522R-06 (ACI, 2006) e sugere a bibliografia. As 6 placas moldadas para o ensaio de permeabilidade encontram-se na Figura 13.

Figura 13 – Placas para ensaio de permeabilidade



Fonte: Autor (2019).

3.5 Propriedades do concreto no estado endurecido

Os ensaios realizados para verificar as propriedades dos concretos elaborados para o presente estudo no estado endurecido foram: determinação do índice de vazios e massa específica, ensaio de resistência à compressão axial, ensaio de resistência à tração por compressão diametral, ensaio de resistência à tração na flexão e ensaio de permeabilidade. Todos os ensaios descritos seguiram recomendações das normas brasileiras e foram executados no laboratório do curso de Engenharia Civil da UNISC.

3.5.1 Ensaio de massa específica aparente seca e índice de vazios

O índice de vazios dos corpos de prova foi determinado em laboratório a partir da obtenção da massa seca e da massa submersa das amostras, conforme Equação 4, enquanto a massa específica aparente seca foi determinada conforme Equação 5.

$$V_r = 1 - \left(\frac{m_s - m_{sub}}{\rho_w \cdot vol} \right) \quad (4)$$

Onde:

V_r = índice de vazios;

m_s = massa seca (kg);

m_{sub} = massa submersa (kg);

Vol = volume da amostra (m³);

ρ_w = massa específica da água (kg/m³).

$$\rho_s = \left(\frac{m_s}{m_{sat} - m_{sub}} \right) \quad (5)$$

Onde:

ρ_s = massa específica aparente seca (kg/m³);

m_s = massa seca (kg);

m_{sub} = massa submersa (kg);

m_{sat} = massa saturada (kg);

No ensaio as amostras foram pesadas secas, saturadas e submersas para a obtenção dos valores utilizados nos cálculos. Foi tomado o devido cuidado no manuseio das amostras, pois os corpos de prova de concreto permeável tendem a perder agregados facilmente de sua superfície, principalmente nas bordas. Por este motivo, Batezini (2013) recomenda que se deve considerar a possibilidade de dispersão dos resultados de índice de vazios e da massa específica aparente seca, já que tais parâmetros dependem tanto do volume quanto da massa de cada amostra.

O equipamento utilizado para a obtenção das massas dos corpos de prova pode ser visto na Figura 14, onde estava sendo feita a leitura da massa submersa.

Figura 14 – Equipamento para medição da massa seca, submersa e saturada



Fonte: Autor (2019).

3.5.2 Ensaio de resistência à compressão axial

A partir do ensaio de resistência à compressão axial obtêm-se a resistência à compressão da amostra de concreto, mediante aplicação de uma carga axial. O ensaio foi executado conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2018), que estabelece o método pelo qual devem ser ensaiados os corpos de prova cilíndricos de concreto.

Os corpos de prova permaneceram no molde por 24 horas e após em processo de cura úmida. Foram ensaiados 2 corpos de prova para cada traço do estudo preliminar, nas idades de 7 e 14 dias, para os traços executados posteriormente foram ensaiados 3 corpos de prova para cada idade, sendo elas 7 e 28 dias.

Antes da realização do ensaio as faces de aplicação de carga dos corpos de prova foram devidamente capeadas com pasta de cimento e retificadas, com o objetivo de regularizar a superfície de aplicação de carga. Para a execução do ensaio o corpo de prova foi posicionado corretamente na prensa e verificaram-se as faces dos pratos de carga e do corpo de prova, a fim de assegurar que estas se encontravam limpas e secas antes do início do ensaio.

A Figura 15 demonstra a realização do ensaio de resistência à compressão axial, executado em uma prensa da marca Emic modelo DL30000N com capacidade de carga de compressão de 2000 kN.

Figura 15 – Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Autor (2019).

Posteriormente ao ensaio, pode-se calcular a tensão de ruptura a partir da Equação 6:

$$f_c = \frac{F}{\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)} \quad (6)$$

Onde:

f_c = tensão de ruptura à compressão (MPa);

F = carga de ruptura (N);

D = diâmetro do corpo de prova (mm).

3.5.3 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral seguiu os procedimentos prescritos na NBR 7222 (ABNT, 2011), que estabelece os métodos de execução do ensaio.

Assim como para o ensaio de resistência à compressão, foram ensaiados 2 corpos de prova para cada traço do estudo preliminar, nas idades de 7 e 14 dias. Na segunda etapa do estudo foram ensaiados 3 corpos de prova para as idades de 7 e 28 dias. Os corpos de prova permaneceram em processo de cura úmida por imersão em água, desde o período de desmolda até a idade de ruptura.

Para o procedimento de ensaio, a norma recomenda que sejam posicionadas chapas de madeira entre a amostra e a prensa, para uma melhor distribuição das forças ao longo do corpo de prova, facilitando assim o posicionamento deste no aparelho utilizado, conforme observa-se nas Figuras 16 e 17.

Após o ensaio, a resistência à tração por compressão diametral pode ser calculada a partir da Equação 7:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (7)$$

Onde:

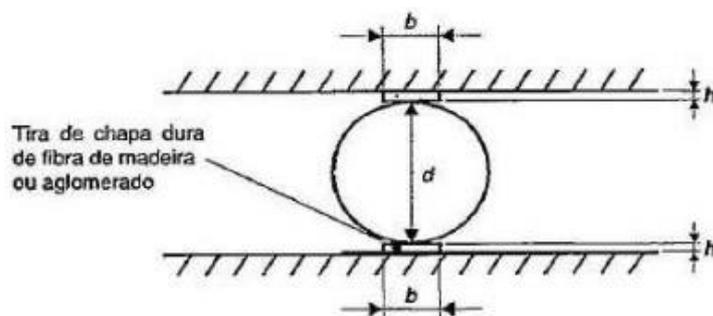
$f_{ct,sp}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = carga de ruptura (N);

D = diâmetro do corpo de prova (mm);

L = altura média do corpo de prova (mm).

Figura 16 – Disposição do corpo de prova



Legenda:

d = diâmetro do corpo de prova, em mm

$b = (0,15 \pm 0,01) d$, em mm

$h = (3,5 \pm 0,5)$, em mm

Figura 17 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Autor (2019).

3.5.4 Ensaio de resistência à tração na flexão

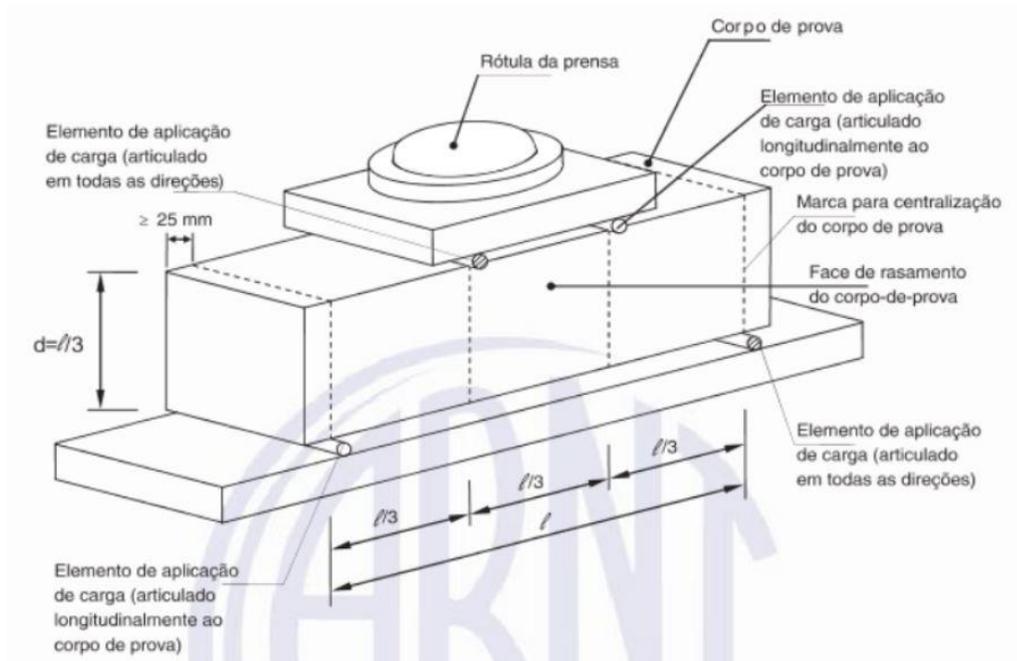
Ao considerar o concreto permeável como sendo utilizado para pavimentação, o ensaio de resistência à tração na flexão torna-se indispensável, uma vez que a NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece valores mínimos de resistência para utilização do material.

Desta forma, foram ensaiados 2 corpos de prova para cada traço elaborado no estudo e seus resultados correlacionados com os resultados obtidos para o índice de vazios do concreto. Os corpos de prova do estudo preliminar foram ensaiados após 7 e 14 dias em processo de cura úmida e os corpos de prova executados posteriormente foram ensaiados aos 7 e 28 dias.

Como sugere a NBR 16416 (ABNT, 2015), o ensaio de resistência à tração na flexão deve seguir o prescrito na NBR 12142 (ABNT, 2010). O ensaio consiste em um corpo de prova de seção prismática submetido à flexão, com carregamento em duas seções simétricas, até a ruptura. Para o procedimento, coloca-se o corpo de prova com seu lado maior paralelo ao seu eixo longitudinal, centralizado sobre os apoios, sendo que as faces laterais com relação à posição de moldagem devem ficar em

contato com os elementos de aplicação de força e os apoios, conforme Figuras 18 e 19.

Figura 18 – Posicionamento do corpo de prova no equipamento



Fonte: NBR 12142 (ABNT, 2010)

Figura 19 – Ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Autor (2019).

Após a realização do ensaio, mediu-se o corpo de prova em sua seção de ruptura para determinação da largura e altura médias, com precisão de 1 mm. Estas medidas foram o resultado da média de três determinações. Com tais valores, pode-se calcular a resistência à tração na flexão pela Equação 8.

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (8)$$

Onde:

$f_{ct,f}$ = resistência à tração na flexão (MPa);

F = carga de ruptura (N);

d = altura média do corpo de prova (mm);

l = dimensão do vão entre apoios (mm);

b = largura média do corpo de prova (mm).

3.5.5 Ensaio de permeabilidade

Após a moldagem das placas, estas foram cobertas com lona plástica, em temperatura ambiente. Após 24h elas puderam ser desmoldadas e permaneceram em processo de cura úmida por 14 dias.

O ensaio de permeabilidade seguiu o procedimento prescrito na NBR 16416 (ABNT, 2015). O método utiliza um cilindro com diâmetro de 30 cm que deve ser posicionado na superfície do pavimento permeável. As laterais do cilindro foram fechadas com massa de calafetar para evitar a perda de água.

O ensaio consistiu em molhar a placa previamente com $3,6 \text{ kg} \pm 0,05 \text{ kg}$ de água, caso o tempo de molhagem fosse inferior a 30 segundos, utilizava-se $18 \text{ kg} \pm 0,05 \text{ kg}$ de água no ensaio, ou então, $3,6 \text{ kg} \pm 0,05 \text{ kg}$ de água se o tempo fosse superior a 30 segundos.

O volume de água de pré-molhagem despejado no interior do anel de infiltração permaneceu com velocidade suficiente para manter o nível da água entre as duas marcações feitas no anel, 10 mm e 15 mm. Marcou-se o intervalo de tempo acionando o cronômetro assim que a água atingiu a superfície do pavimento permeável e parou-se o cronômetro quando não havia mais água na superfície do mesmo, registrando o tempo com precisão de 0,1 segundos.

Utilizou-se 18 kg de água para as seis placas, pois em todas o tempo de molhagem foi inferior aos 30 segundos indicados na norma.

Após definido o tempo de pré-molhagem e o volume de água a ser utilizado, o ensaio iniciou em até 2 minutos, repetindo-se o procedimento anterior, conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 20 – Esquema para medição do coeficiente de permeabilidade

- 1 Acione o cronômetro assim que a água atingir o pavimento



- 2 Durante o ensaio mantenha o nível de água uniforme de acordo com a marcação do cilindro



- 3 Pare o cronômetro quando toda a água foi infiltrada no pavimento



Fonte: Marchioni e Silva (2013)

A Figura 21 demonstra as placas utilizadas para o ensaio com os cilindros posicionados e perfeitamente vedados, antes da execução do ensaio.

Figura 21 – Placas e cilindros posicionados para o ensaio de permeabilidade



Fonte: Autor (2019).

Após o ensaio pode-se obter o coeficiente de permeabilidade (k) a partir da Equação 9.

$$k = \frac{C \cdot m}{(d^2 \cdot t)} \quad (9)$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade (mm/h);

m = massa de água infiltrada (kg);

d = diâmetro interno do cilindro de infiltração (mm);

t = tempo necessário para toda a água percolar (s);

c = fator de conversão de unidades do Sistema Internacional, com valor igual a 4.583.666.000

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

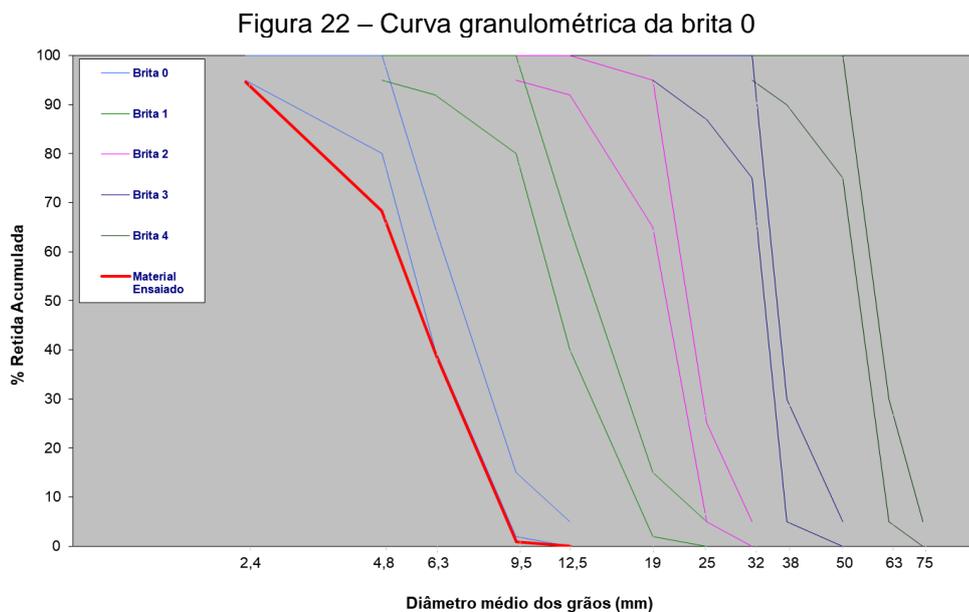
A seguir são apresentados todos os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais empregados na composição do traço dos concretos permeáveis estudados e os resultados dos ensaios de caracterização dos concretos resultantes do procedimento de dosagem do estudo preliminar e do estudo definitivo.

4.1 Caracterização dos materiais constituintes do concreto

4.1.1 Brita 0

Com o ensaio de granulometria foi possível traçar a curva granulométrica indicada na Figura 22. Observou-se que a concentração dos grãos ficou muito próxima da zona de classificação da brita 0, predominando a granulometria entre 9,50 mm e 4,75 mm. O módulo de finura obtido foi igual a 5,56% e a dimensão máxima característica foi igual a 9,50 mm.

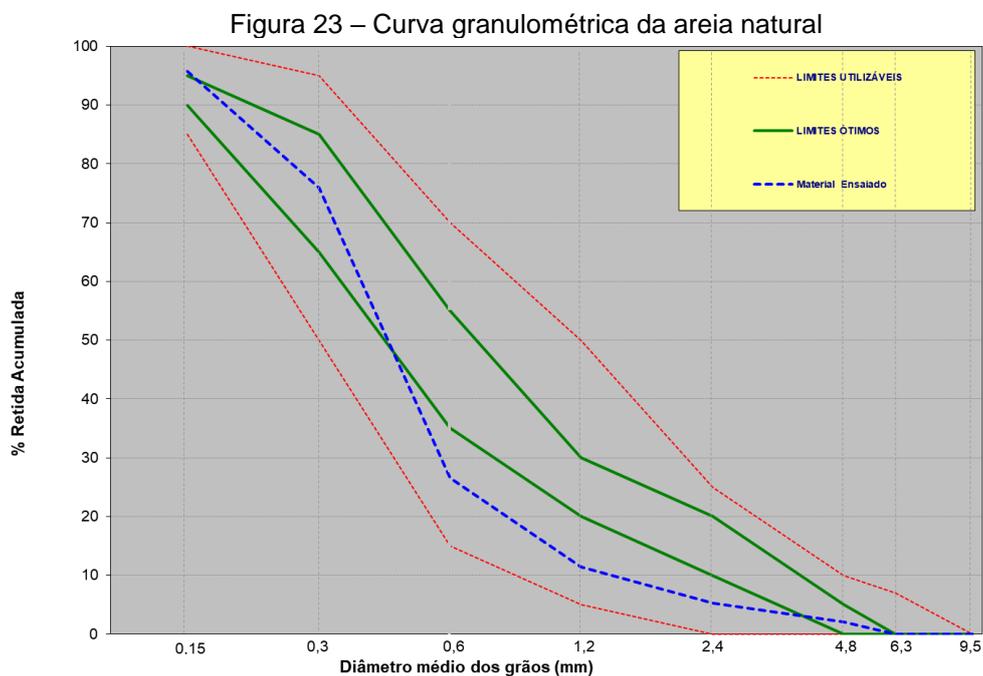
A massa específica obtida para a brita 0 foi de 2,50 g/cm³ e o teor de material pulverulento foi de 0,9%.



Fonte: Autor (2019).

4.1.2 Areia natural

A partir do ensaio de granulometria traçou-se a curva para a areia natural, que pode ser classificada como areia natural média (Figura 23), ficando na zona dos limites utilizáveis, conforme Tabela 7, apresentada pela NBR 7211 (ABNT, 2009) e podendo então ser utilizada na dosagem do concreto. O módulo de finura obtido foi de 2,17%, a dimensão máxima característica foi de 4,75 mm, a massa específica encontrada com o ensaio foi de 2,63 g/cm³ e o teor de material pulverulento foi de 1,3%.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 7 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 μm	15	35	55	70
300 μm	50	65	85	95
150 μm	85	90	95	100

NOTAS

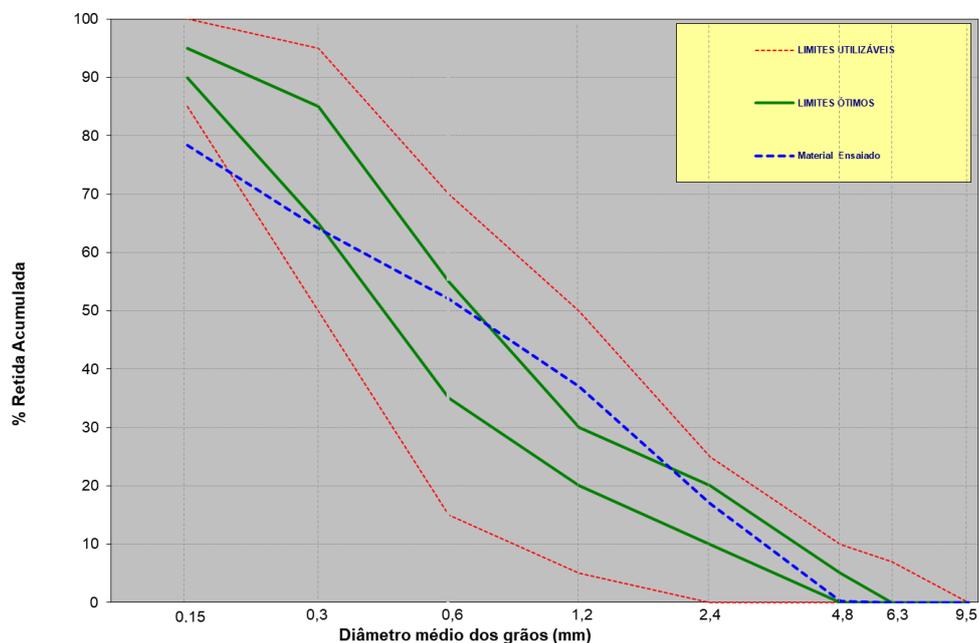
- O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
- O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009)

4.1.3 Areia industrial

A partir do ensaio de granulometria traçou-se a curva para a areia industrial, que pode ser classificada como areia industrial média grossa (Figura 24), permanecendo na zona utilizável, conforme Tabela 7. O módulo de finura obtido foi de 2,49%, a dimensão máxima característica foi de 4,75 mm, a massa específica encontrada com o ensaio foi de 2,79 g/cm³ e o teor de material pulverulento foi de 12,9%.

Figura 24 – Curva granulométrica da areia industrial



Fonte: Autor (2019).

4.1.4 Cimento Portland

Os resultados de ensaio do cimento utilizado na dosagem dos corpos de prova foram realizados pelo fabricante do material e fornecidos pela empresa que o doou, estes são referentes ao mês de março do ano de 2019 e encontram-se nas Figuras 25 e 26. A Figura 25 apresenta os resultados dos ensaios químicos do cimento, enquanto a Figura 26 apresenta os resultados dos ensaios físicos.

Figura 25 – Resultados dos ensaios químicos do cimento

Data	Químicos									
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
01	4,39	18,44	3,12	60,74	2,53	3,05	6,26	0,87	1,15	0,66
06	4,25	18,21	2,96	61,33	2,27	3,18	6,29	1,07	0,80	0,66
08	4,32	18,22	2,90	60,52	2,50	3,12	6,40	0,98	0,87	0,64
12	4,10	17,46	2,71	61,54	2,92	3,04	6,13	0,79	0,79	0,63
14	4,42	17,43	2,64	61,32	3,05	3,11	6,23	1,21	0,98	0,63
18	4,18	18,03	2,79	60,93	2,74	3,21	6,06	0,84	0,97	0,66
20	4,15	18,25	2,73	61,45	2,58	3,20	6,01	1,12	0,90	0,63
22	4,26	18,07	2,85	60,83	2,77	3,15	6,02	0,95	1,03	0,63
26	4,21	18,28	2,82	61,47	3,01	3,08	5,86	0,95	0,91	0,65
28	4,15	18,25	2,81	61,29	3,19	3,13	6,05	0,70	1,02	0,62
Média	4,24	18,06	2,83	61,14	2,76	3,13	6,13	0,95	0,94	0,64
Sd	0,11	0,34	0,14	0,36	0,29	0,06	0,16	0,16	0,11	0,02
Min	4,10	17,43	2,64	60,52	2,27	3,04	5,86	0,70	0,79	0,62
Max	4,42	18,44	3,12	61,54	3,19	3,21	6,40	1,21	1,15	0,66

Fonte: Itambé (2019).

Figura 26 – Resultados dos ensaios físicos do cimento

Data	Físicos										
	Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
		Início	Fim					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
	mm	min	min	%	cm ² /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
01	1,00	195	240	30,4	4.560	0,05	0,20	25,7	40,1	45,0	52,6
06	0,00	190	240	30,1	4.420	0,08	0,20	24,6	39,2	44,7	52,8
08	0,50	165	210	30,4	4.480	0,04	0,10	25,1	39,6	45,9	51,9
12	0,50	180	225	30,2	4.430	0,04	0,30	23,6	38,6	44,2	51,9
14	0,00	185	225	30,2	4.460	0,04	0,20	22,7	38,5	44,9	51,1
18	0,00	170	210	30,0	4.550	0,05	0,20	21,9	38,6	44,7	53,2
20	0,50	200	240	30,3	4.450	0,03	0,30	22,1	38,1	44,8	53,3
22	1,00	190	240	30,6	4.500	0,02	0,30	24,0	38,5	45,7	53,4
26	0,50	190	240	30,7	4.470	0,02	0,20	24,5	39,1	44,7	53,1
28	0,00	200	240	30,7	4.500	0,04	0,20	22,3	38,4	45,0	53,7
Média	0,40	187	231	30,4	4.482	0,04	0,22	23,7	38,9	44,9	52,7
Sd	0,39	12	13	0,2	46,62	0,02	0,06	1,3	0,6	0,5	0,8
Min	0,00	165	210	30,0	4.420	0,02	0,10	21,9	38,1	44,2	51,1
Max	1,00	200	240	30,7	4.560	0,08	0,30	25,7	40,1	45,9	53,7

Fonte: Itambé (2019).

4.1.5 Material pozolânico

Os resultados dos ensaios de propriedade químicas e físicas da cinza mineral leve foram fornecidas pela empresa que doou o material e encontram-se nas Tabelas 8 e 9, respectivamente.

Tabela 8 – Propriedades químicas da cinza mineral leve

DETERMINAÇÃO	%
Óxido de silício (SiO ₂)	59,93
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	27,77
Óxido de cálcio (CaO)	4,28
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	3,00
Óxido de potássio (K ₂ O)	1,16
Óxido de magnésio (MgO)	0,50
Óxido de fósforo (P ₂ O ₅)	<0,03
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,17
Óxido de titânio (TiO ₂)	1,02
Óxido de enxofre (SO ₃)	0,34

Fonte: Autor (2019). Adaptado dos dados fornecidos pela Conpasul.

Tabela 9 – Propriedades físicas da cinza mineral leve

PROPRIEDADES FÍSICAS	
Massa específica	2,25 g/cm ³
Superfície específica "Blaine"	5260 cm ² /g
Índice de pozolanicidade com Cal	8,28 MPa
Perda ao fogo	1,80%

Fonte: Autor (2019). Adaptado dos dados fornecidos pela Conpasul.

4.2 Caracterização do concreto moldado no estudo preliminar

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos com os ensaios de caracterização do concreto no estado endurecido para os seis traços executados no estudo preliminar. Nesta etapa realizaram-se os ensaios de determinação de índice de vazios e massa específica, ensaio de permeabilidade, ensaio de resistência à compressão axial, ensaio de resistência à tração por compressão diametral e ensaio de resistência à tração na flexão.

4.2.1 Massa específica aparente seca e índice de vazios

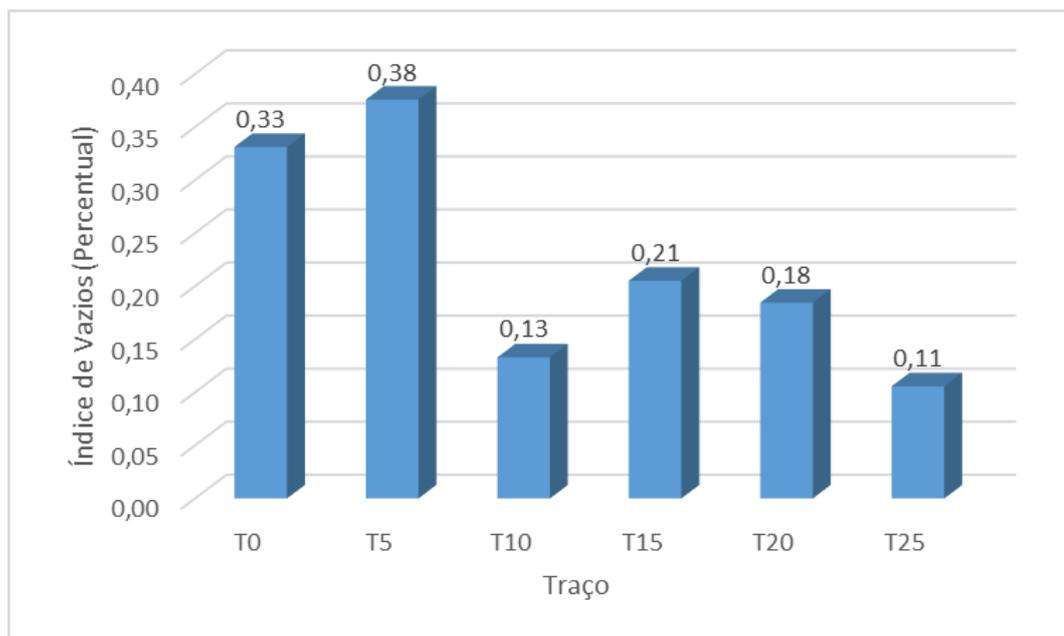
Os resultados para a massa específica aparente seca dos corpos de prova moldados se mantiveram em uma média de aproximadamente 2200 kg/m³, ficando acima do usual citado na bibliografia. O procedimento de compactação com o soquete

Marshall confere maior adensamento, portanto está diretamente ligado ao aumento de densidade do material.

Com os resultados de índice de vazios apresentados na Figura 27 é possível concluir que o traço que apresentou o maior índice de vazios é o que corresponde à adição de 5% de agregado miúdo (traço T5), mostrando que a adição nessa proporção favoreceu a ligação e acomodou os materiais de forma a proporcionar um aumento de vazios quando comparado ao traço que possui somente agregados graúdos.

Do traço T10 ao traço T25 houve redução do número de vazios quando comparado aos dois primeiros, comprovando o apresentado na bibliografia e mostrando que ao aumentar a proporção de agregados miúdos da mistura, reduz-se a quantidade de vazios no concreto, diminuindo assim a sua porosidade.

Figura 27 – Resultados obtidos para o índice de vazios



Fonte: Autor (2019).

Conforme a bibliografia, o concreto para ser considerado permeável precisa apresentar um índice de vazios acima de 0,15, deste modo, os traços T10 e T25 não seriam considerados permeáveis por este critério, enquanto os demais se mantiveram acima do valor limite.

Tanto o índice de vazios quanto a massa específica aparente seca do concreto, podem variar conforme os tipos de materiais utilizados na mistura e o procedimento empregado para compactação e adensamento. Dessa forma, o baixo índice de vazios

obtido para o traço T10 pode estar relacionado principalmente ao procedimento de compactação na moldagem dos corpos de prova e não diretamente à adição de 10% de agregado miúdo.

4.2.2 Permeabilidade

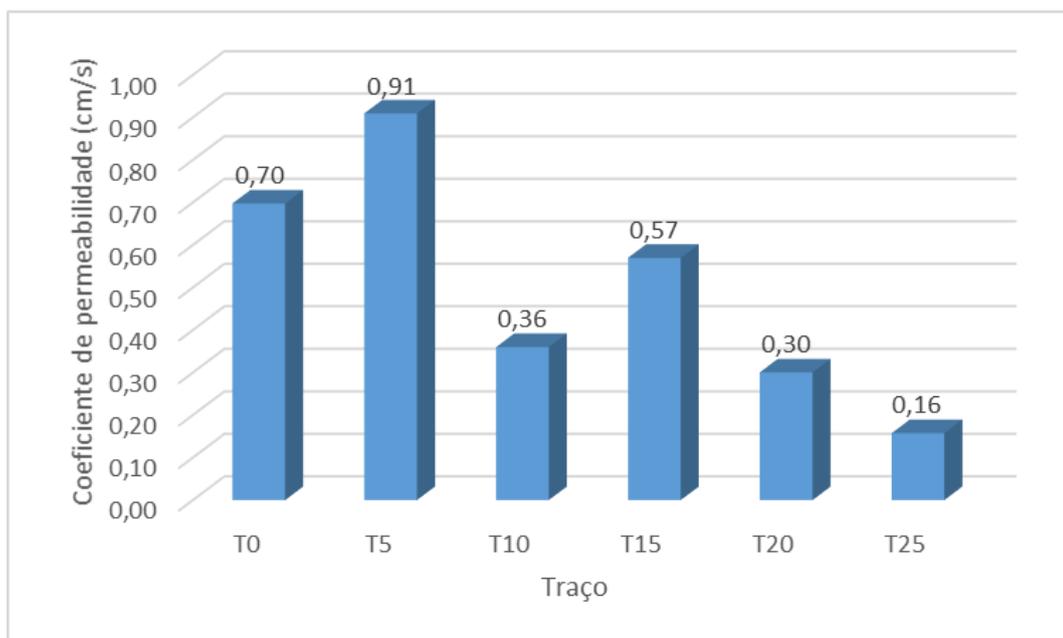
Os resultados obtidos no ensaio de permeabilidade das placas para os traços estudados no trabalho, encontram-se na Tabela 10 e na Figura 28, onde estão apresentados o tempo necessário para a água infiltrar totalmente no pavimento e os respectivos coeficientes de permeabilidade (k), em mm/h e em cm/s.

Tabela 10 – Resultados obtidos no ensaio de permeabilidade

TRAÇO	ÁGUA (kg)	TEMPO DE MOLHAGEM (s)	k (mm/h)	k(cm/s)
T0	18	36,5	25109	0,70
T5	18	28,0	32740	0,91
T10	18	70,7	12959	0,36
T15	18	44,7	20513	0,57
T20	18	84,8	10812	0,30
T25	18	161,7	5670	0,16

Fonte: Autor (2019).

Figura 28 – Gráfico de resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade, em cm/s



Fonte: Autor (2019).

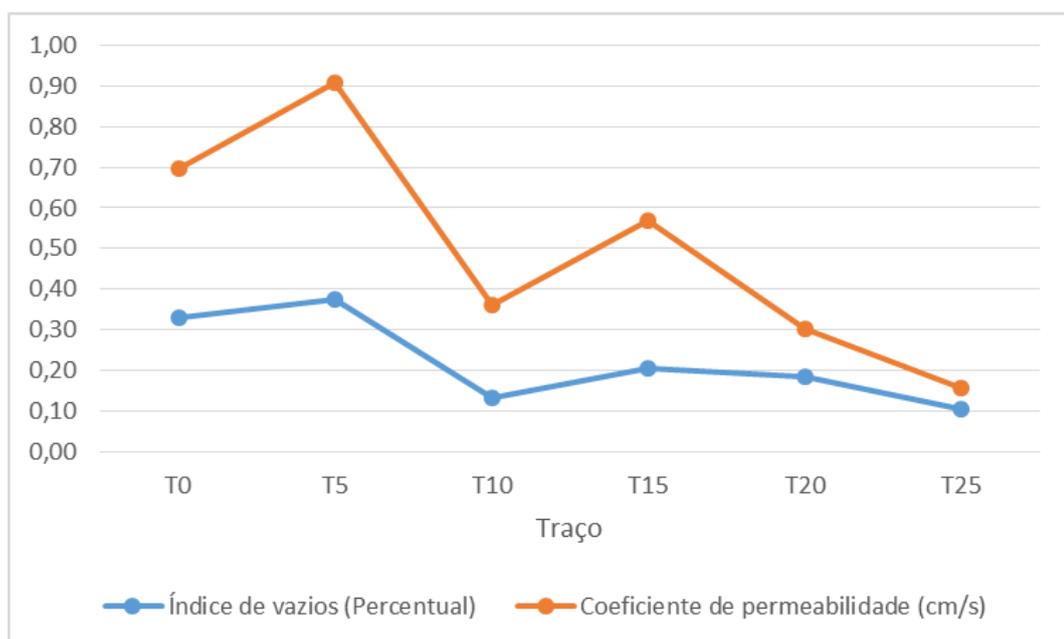
Para a análise do coeficiente de permeabilidade realizou-se um comparativo entre o valor mínimo estabelecido em norma para que o pavimento seja considerado permeável e os valores resultantes do ensaio realizado.

A partir dos resultados de coeficiente de permeabilidade verificou-se que todos ficaram acima do limite estabelecido pela NBR 16416 (ABNT,2015), que é de 0,1 cm/s. Desta forma, pelos critérios da norma os seis traços apresentaram resultados satisfatórios para utilização como pavimentos permeáveis.

Analisando individualmente cada traço, verificou-se que a adição de 5% de agregado miúdo favoreceu a permeabilidade em relação ao traço composto apenas por agregado graúdo, proporcionando uma melhor interface entre os agregados e a pasta de cimento na placa moldada, enquanto a adição de 10% (traço T10) diminuiu consideravelmente a permeabilidade em relação ao traço T5. Tais relações ocorreram também na análise do índice de vazios, provando assim que a permeabilidade está diretamente relacionada aos vazios existentes no material, conforme demonstra a Figura 29.

Os traços T20 e T25, com adição de 20% e 25% de agregado miúdo, respectivamente, foram os traços que apresentaram as menores permeabilidades com relação aos demais, mas ainda assim, foram considerados permeáveis pelos critérios da norma.

Figura 29 – Relação entre coeficiente de permeabilidade e índice de vazios



Fonte: Autor (2019).

4.2.3 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram feitos em 7 e 14 dias após a moldagem dos corpos de prova. Optou-se por romper os corpos de prova com 14 dias, pois devido ao tipo de cimento utilizado, CP II F-40, já se conseguiria ter uma previsão de qual das misturas apresentaria os melhores resultados aos 28 dias.

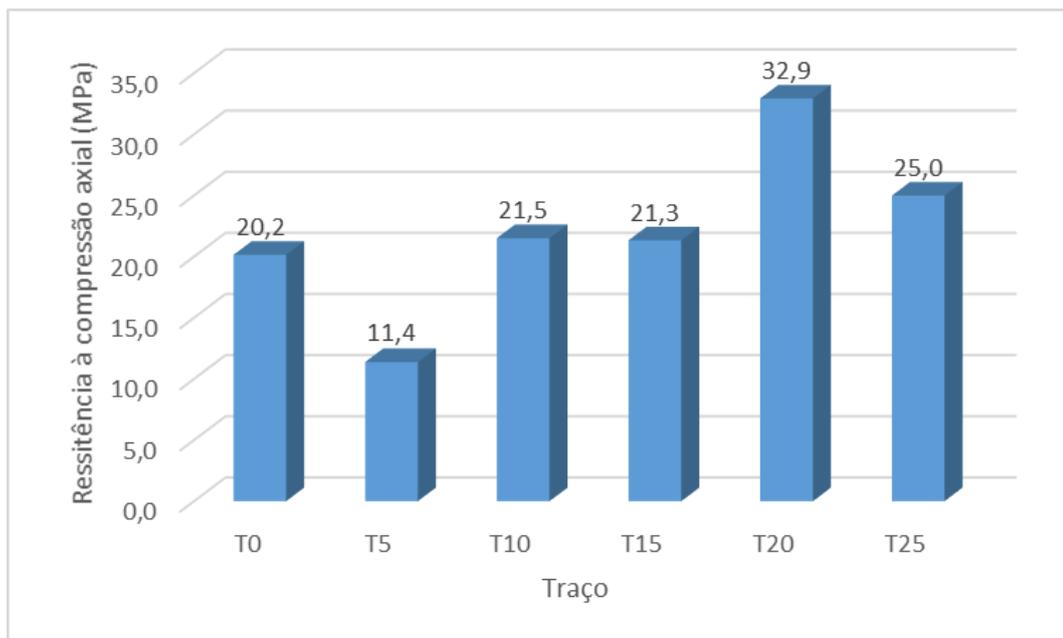
Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial para os seis primeiros traços estudados no trabalho, rompidos aos 14 dias encontram-se na Tabela 11, extraída do Anexo A, onde constam todos os resultados do estudo, e na Figura 30.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial, em MPa

TRAÇO	14 DIAS
T0	20,2
T5	11,4
T10	21,5
T15	21,3
T20	32,9
T25	25,0

Fonte: Autor (2019).

Figura 30 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à compressão axial, em MPa



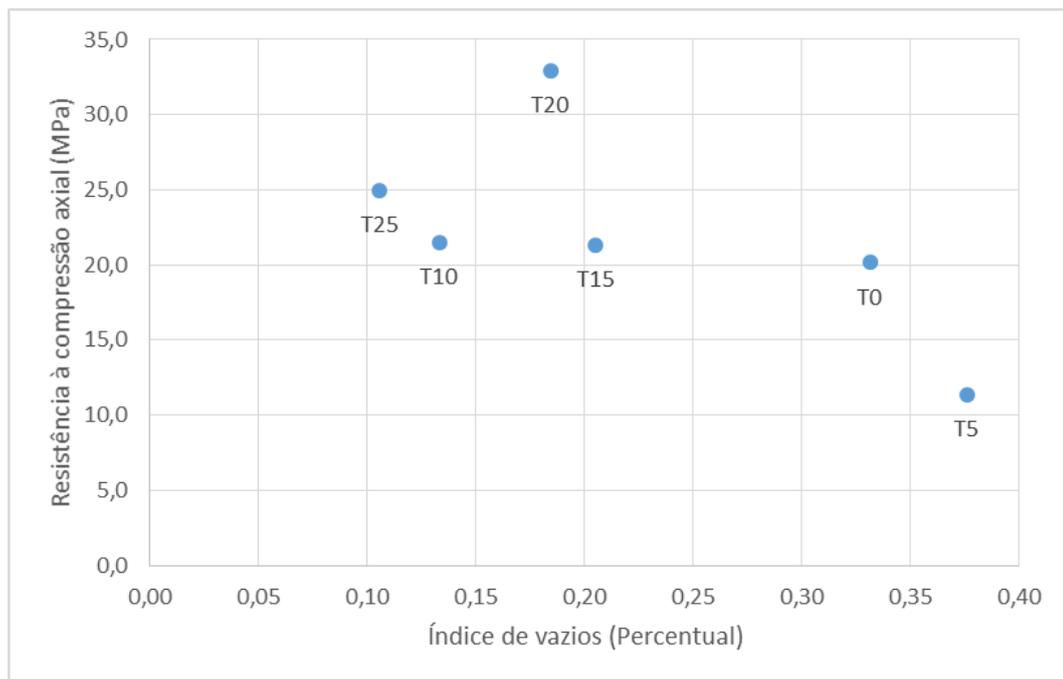
Fonte: Autor (2019).

Analisando os resultados percebe-se que a adição do agregado miúdo resultou em um aumento da resistência à compressão do concreto. O traço que apresentou a maior permeabilidade (traço T5) também apresentou a menor resistência à compressão, o que confirma o citado anteriormente na bibliografia, de que quanto maior o número de vazios, menor a resistência mecânica.

O traço que apresentou a melhor resistência à compressão foi o traço T20, atingindo 32,9 MPa em 14 dias e chegando próximo ao valor de 35 MPa recomendado como resistência mínima para pavimentos rígidos de concreto simples que receberão tráfego de veículos pesados.

Na Figura 31 correlacionou-se os resultados do ensaio de resistência à compressão axial com os resultados de índice de vazios, chegando-se a conclusão de que quanto maior o índice de vazios, menor é a resistência à compressão axial.

Figura 31 – Resistência à compressão axial X Índice de vazios



Fonte: Autor (2019).

Nota-se que o traço T20 não se comporta como os demais, nesse caso há a possibilidade de a compactação ter resultado em um arranjo dos aglomerantes e agregados que favoreceu o crescimento da resistência, apesar do índice de vazios elevado.

4.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

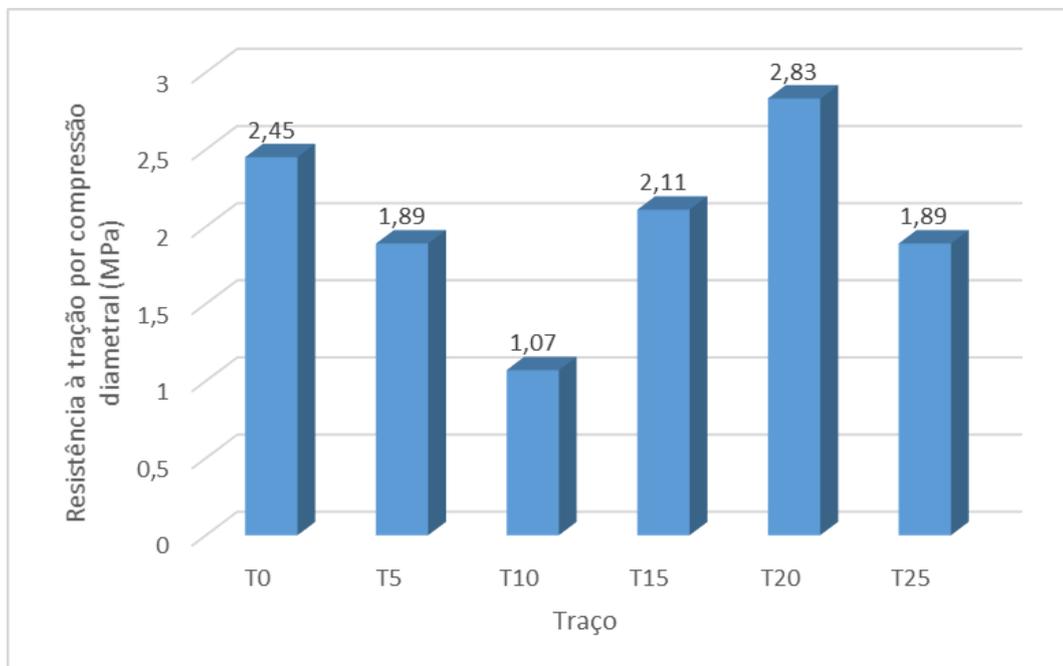
Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral também foram realizados em 7 e 14 dias após a moldagem dos corpos de prova. Os resultados obtidos no ensaio aos 14 dias, para os seis primeiros traços estudados no trabalho, encontram-se na Tabela 12, extraída do Anexo A, e na Figura 32.

Tabela 12 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, em MPa

TRAÇO	14 DIAS
T0	2,45
T5	1,89
T10	1,07
T15	2,11
T20	2,83
T25	1,89

Fonte: Autor (2019).

Figura 32 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, em MPa

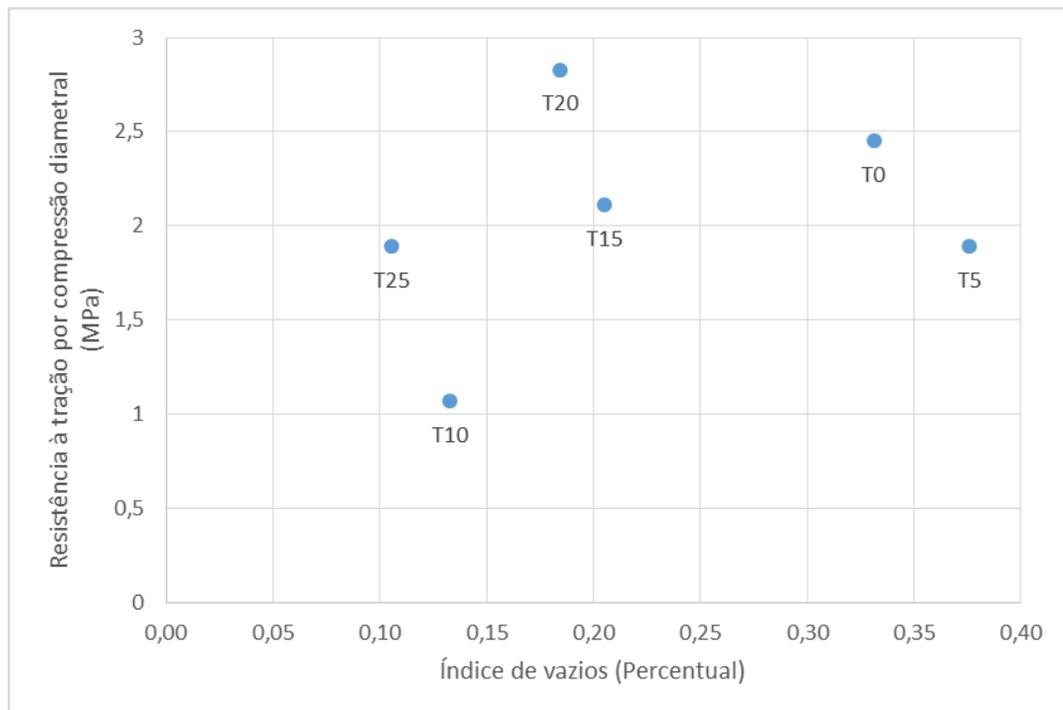


Fonte: Autor (2019).

Os corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral se comportaram da mesma forma que os rompidos na compressão axial,

com exceção do traço T10, que teve uma resistência inferior ao traço T5. Esta baixa resistência pode estar relacionada com alguma falha no processo de moldagem ou de compactação deste corpo de prova em especial. A Figura 33 demonstra a relação entre o índice de vazios e a resistência à tração por compressão diametral obtida com os ensaios, mostrando que com exceção do traço T10, os demais seguem o mesmo comportamento observado na Figura 31.

Figura 33 – Resistência à tração por compressão diametral X Índice de vazios



Fonte: Autor (2019).

4.2.5 Resistência à tração na flexão

Os corpos de prova prismáticos ensaiados para definição da resistência à tração na flexão também foram rompidos com 7 e 14 dias após a data de moldagem. Os resultados obtidos no ensaio para os seis primeiros traços estudados no trabalho, encontram-se na Tabela 13, extraída do Anexo A, e na Figura 34.

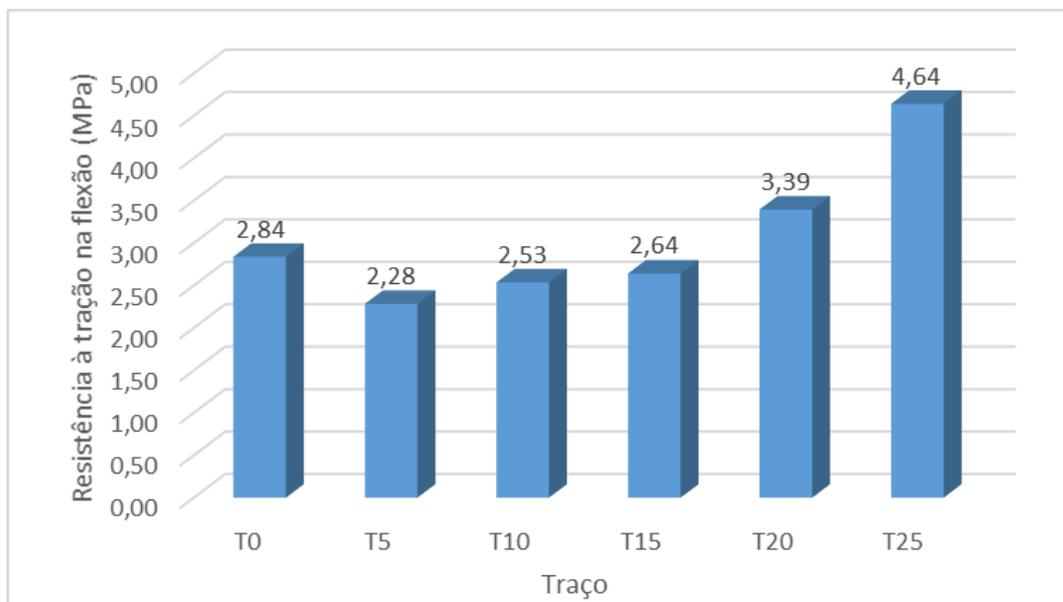
Para a resistência à tração na flexão o menor resultado foi para o traço T5, de maior permeabilidade, enquanto a melhor resistência obtida foi para o traço T25, com a maior proporção de agregado miúdo e a menor permeabilidade. Por este ensaio pode-se perceber que com relação à flexão, a resistência ficou superior ao traço sem agregados miúdos apenas para os traços T20 e T25.

Tabela 13 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão, em MPa

TRAÇO	14 DIAS
T0	2,84
T5	2,28
T10	2,53
T15	2,64
T20	3,39
T25	4,64

Fonte: Autor (2019).

Figura 34 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, em MPa



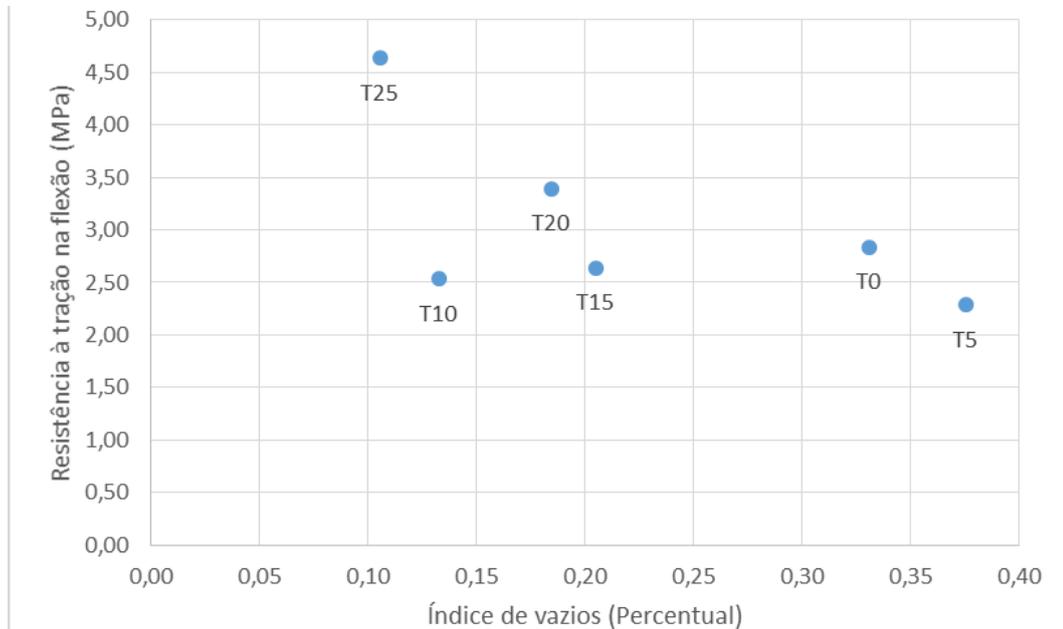
Fonte: Autor (2019).

A NBR 16416 (ABNT,2015) estabelece a resistência mínima à tração na flexão como 2,0 MPa para utilização do pavimento permeável em áreas com tráfego de veículos leves, mas não normatiza quanto ao tráfego de veículos pesados. Assim, levou-se em consideração os parâmetros do Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), que estabelece a resistência de 4,5 MPa para utilização do material em áreas com tráfego de veículos pesados.

Neste caso, todos os traços poderiam ser usados para pavimentação em áreas de tráfego de veículos leves, porém somente o traço T25 mostrou-se com resistência satisfatória para utilização como pavimento em áreas de tráfego pesado aos 14 dias, ficando acima dos 4,5 MPa.

A Figura 35 demonstra a relação entre o índice de vazios e a resistência à tração na flexão obtida com os ensaios.

Figura 35 – Resistência à tração na flexão X Índice de vazios



Fonte: Autor (2019).

4.3 Caracterização do concreto moldado no estudo definitivo

A seguir são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização do concreto no estado endurecido para os quatro traços executados no estudo definitivo. Nesta etapa escolheu-se a composição com comportamento de permeabilidade e resistência satisfatórios para dar continuidade aos estudos, realizando um comparativo de resistência a partir da variação apenas do consumo de cimento dentro do mesmo traço.

O traço escolhido para dar continuidade na pesquisa foi o traço T20, correspondente à adição de 20% de agregado miúdo, por apresentar a melhor resistência à compressão axial com 14 dias, atingindo próximo ao mínimo necessário para utilização em pavimentos com alto tráfego. Além disso, este traço resultou em um índice de vazios de 0,18, permanecendo acima do limite de 0,15 citado na bibliografia e coeficiente de permeabilidade igual a 0,30 cm/s, ficando três vezes acima do mínimo estabelecido pela NBR 16416 (ABNT,2015).

Nesta etapa realizaram-se apenas os ensaios de resistência mecânica, sendo eles: ensaio de resistência à compressão axial, ensaio de resistência à tração por compressão diametral e ensaio de resistência à tração na flexão. Não foram realizados os ensaios de índice de vazios, massa específica aparente seca e permeabilidade, pois as variações de consumo de cimento foram feitas dentro do mesmo traço, partindo do princípio de que tais parâmetros não iriam mudar drasticamente por conta da variação no consumo de cimento.

4.3.1 Resistência à compressão axial

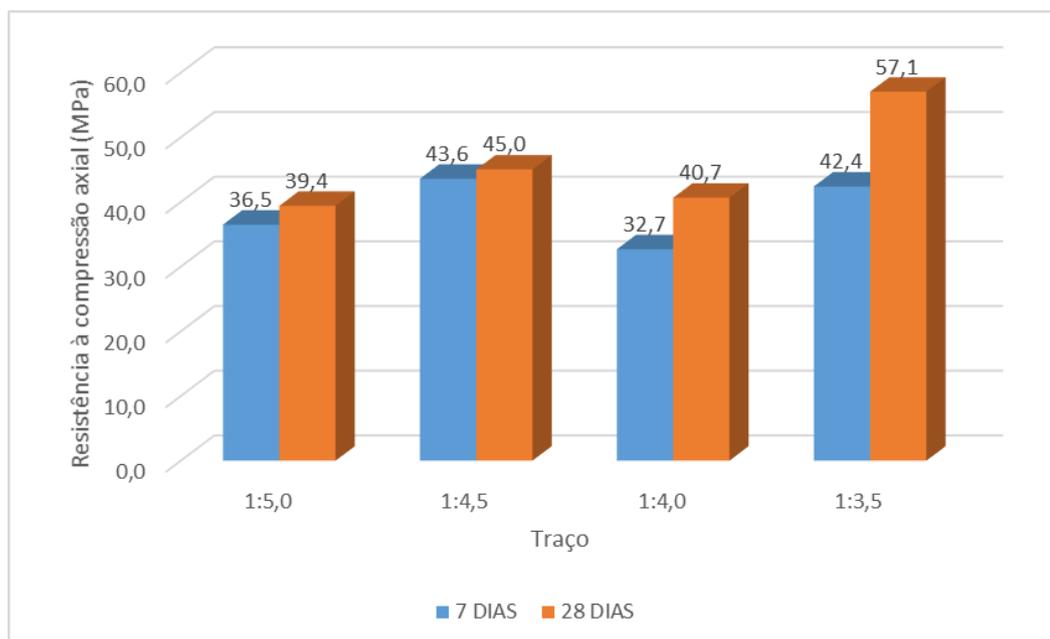
Os ensaios para determinação da resistência à compressão axial ocorreram após 7 e 28 dias da moldagem dos corpos de prova e encontram-se na Tabela 14, extraída do Anexo A, e na Figura 36.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial do estudo definitivo, em MPa

TRAÇO	7 DIAS	28 DIAS
1:5,0	36,5	39,4
1:4,5	43,6	45,0
1:4,0	32,7	40,7
1:3,5	42,4	57,1

Fonte: Autor (2019).

Figura 36 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à compressão axial do estudo definitivo, em MPa



Fonte: Autor (2019).

Observa-se que para os quatro traços moldados no estudo definitivo a resistência à compressão axial atingiu valores superiores aos 35 MPa recomendados para pavimentos com alto tráfego. Logo, conclui-se que com relação à resistência à compressão axial os quatro traços podem ser utilizados como pavimento rígido em áreas de circulação de veículos pesados, tanto em vias de tráfego, quanto em estacionamentos.

O traço 1:5,0 com o consumo de cimento de 392 kg/m³ foi o que apresentou a menor resistência atingindo 39,4 MPa enquanto a maior resistência alcançada foi a do traço 1:3,5, com consumo de cimento de 524kg/m³. Mostrando que ao aumentar o consumo de cimento conseqüentemente aumenta a resistência à compressão axial do material. Conclui-se ainda que com o menor consumo de cimento já é possível alcançar uma resistência satisfatória para o uso desejado.

4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral ocorreram após 7 e 28 dias da moldagem dos corpos de prova e encontram-se na Tabela 15, extraída do Anexo A, e na Figura 37.

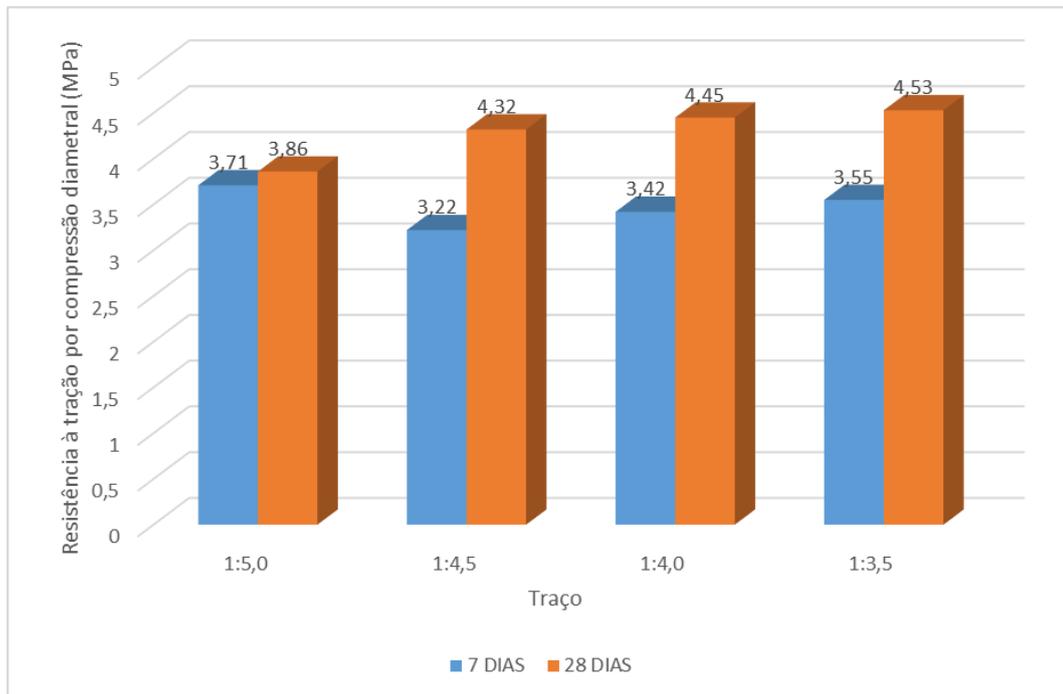
Os resultados demonstram um aumento na resistência do traço com o menor consumo de cimento (1:5,0), ao traço com o maior consumo de cimento (1:3,5), sendo o maior resultado alcançado neste ensaio de 4,53 MPa. O material se comportou de forma similar aos resultados do ensaio de resistência à compressão axial, aumentando a resistência mecânica conforme o aumento do consumo de cimento.

Tabela 15 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral do estudo definitivo, em MPa

TRAÇO	7 DIAS	28 DIAS
1:5,0	3,71	3,86
1:4,5	3,22	4,32
1:4,0	3,42	4,45
1:3,5	3,55	4,53

Fonte: Autor (2019).

Figura 37 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral do estudo definitivo, em MPa



Fonte: Autor (2019).

4.3.3 Resistência à tração na flexão

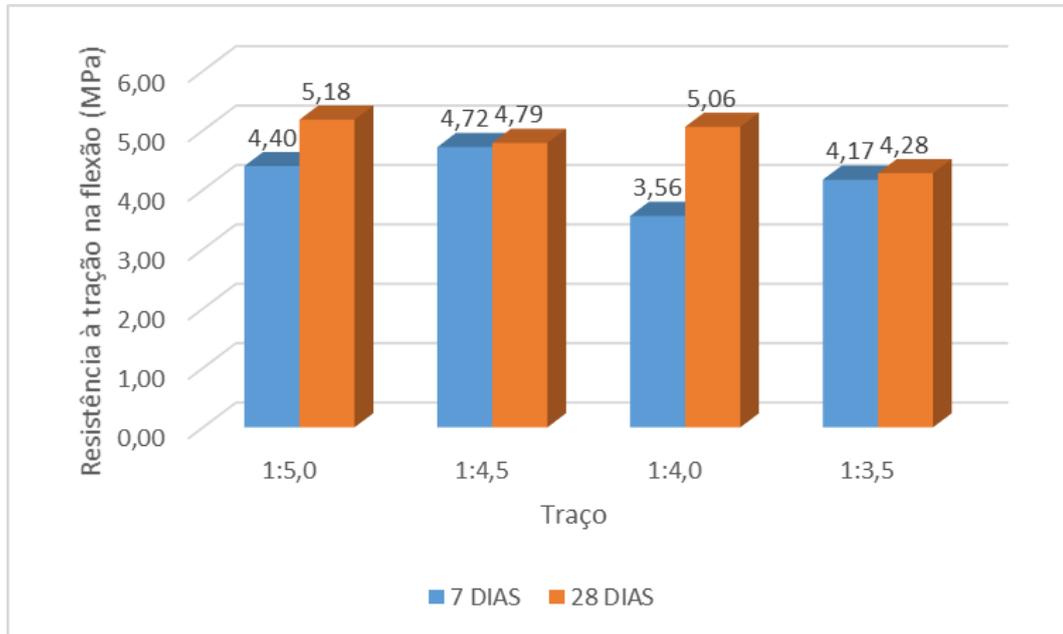
Assim como os demais ensaios, os corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à tração na flexão foram rompidos com 7 e 28 dias e seus resultados encontram-se na Tabela 16, extraída do Anexo A, e na Figura 38.

Tabela 16 – Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão do estudo definitivo, em MPa

TRAÇO	7 DIAS	28 DIAS
1:5,0	4,40	5,18
1:4,5	4,72	4,79
1:4,0	3,56	5,06
1:3,5	4,17	4,28

Fonte: Autor (2019).

Figura 38 – Gráfico de resultados do ensaio de resistência à tração na flexão do estudo definitivo, em MPa



Fonte: Autor (2019).

Nos resultados de resistência à tração na flexão observou-se um comportamento diferente do concreto. O melhor resultado foi correspondente ao traço 1:5,0, que apresentou a menor resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, enquanto o menor resultado de 4,28 MPa, foi do traço que apresentou as melhores resistências nos ensaios anteriores. Estas variações podem ser explicadas pelo processo de compactação dos corpos de prova, uma vez que os corpos de prova cilíndricos e prismáticos são compactados com números de golpes e camadas diferentes.

O mínimo de resistência de acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), de 4,5 MPa, foi atingido apenas pelos traços 1:5,0, 1:4,5 e 1:4,0. Entretanto, chegou-se em traços que podem ser utilizados tanto em estacionamentos de carga pesada, onde o recomendado é 3,2 MPa, quanto em áreas com grande tráfego de veículos pesados, onde o exigido é de 4,5 MPa a 5,0 MPa.

Os resultados mostram que o concreto permeável correspondente aos traços citados acima pode ser usado como revestimento em áreas de tráfego pesado, pois se manteve acima dos parâmetros mínimos estabelecidos em norma para dimensionamento de pavimentos rígidos de concreto simples, sendo este o principal parâmetro levado em conta no dimensionamento.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusão do trabalho

A partir do estudo realizado para definição de um procedimento de dosagem de concreto permeável para uso em pavimentação de vias com tráfego de veículos pesados verificou-se que quanto à resistência mecânica e à permeabilidade, o concreto correspondente aos traços 1:5,0, 1:4,5 e 1:4,0 do estudo definitivo, superou os valores mínimos exigidos na normalização brasileira, mostrando que o procedimento é válido. Porém, por se tratar de um pavimento moldado *in loco* devem ser tomados os devidos cuidados durante a sua execução, seguindo as normas vigentes e garantindo a compactação adequada, para que assim mantenha sua função de resistir às solicitações e permitir a infiltração de água.

Com relação ao estudo preliminar, pode-se concluir que a adição de agregado miúdo em até 25% do teor de agregados na mistura reduz o número de vazios existentes no material, porém não compromete a permeabilidade do pavimento. Pela NBR 16416 (ABNT,2015) todos os traços do estudo preliminar foram considerados permeáveis, apresentando um coeficiente de permeabilidade maior que 0,1 cm/s, estabelecido na norma. Concluiu-se ainda que a adição de agregado miúdo ao traço, proporciona um ganho de resistência mecânica devido ao preenchimento dos espaços entre os agregados graúdos e a pasta de cimento, melhorando a ligação entre os agregados.

O traço que se mostrou mais satisfatório com relação à resistência mecânica e permeabilidade no estudo preliminar, onde houve a variação somente no teor de agregados miúdos, foi correspondente à adição de 20% (traço T20). Nesta etapa, o coeficiente de permeabilidade se manteve três vezes superior ao mínimo de norma, enquanto a resistência à compressão axial aos 14 dias apresentou resultado próximo aos 35 MPa, recomendados para pavimentos rígidos. Aos 14 dias, apenas a resistência à tração na flexão não se mostrou suficiente para utilização em áreas de tráfego de veículos pesados, não atingindo o resultado de 4,5 MPa recomendados pelo Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005).

Quanto aos traços moldados no estudo definitivo, onde se variou apenas o consumo de cimento para o traço T20, que se mostrou o mais satisfatório para continuar o estudo, é possível concluir que quanto aos parâmetros de resistência,

todos apresentaram resistência à compressão axial superiores ao mínimo de norma, variando de 39,4 MPa para o menor consumo de cimento, até 57,1 MPa, para o maior consumo de cimento. Com relação à resistência à tração na flexão, apenas o traço 1:3,5 não atingiu o mínimo de norma, enquanto os demais apresentaram resultados superiores, entre 4,79 MPa e 5,18 MPa.

Como esperado, o aumento do consumo de cimento no traço proporcionou ganhos significativos na resistência mecânica do material. Logo, conclui-se que o procedimento de dosagem estudado é válido e os traços 1:5,0, 1:4,5 e 1:4,0 podem ser utilizados para pavimentação tanto de estacionamentos, quanto de vias com tráfego de veículos pesados, pois estes alcançaram resultados de resistência mecânica superiores aos estabelecidos em norma e foram considerados aptos para utilização como pavimentos permeáveis.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho foi limitado a definição de um procedimento de dosagem de concreto permeável utilizando como agregado graúdo somente brita 0 e variações na proporção de agregado miúdo até o limite de 25% e, posteriormente, variando o consumo de cimento.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Utilizar diferentes proporções de agregado graúdo na dosagem, por exemplo brita 0 e brita 1;
- Adicionar materiais que possam melhorar a resistência à tração na flexão, como por exemplo as fibras.
- Comparar métodos de compactação, como soquete Marshall, compactação com mesa vibratória e compactação por rolo metálico;
- Realizar ensaios de módulo de elasticidade do concreto;
- Avaliar o comportamento do concreto permeável quanto à fadiga;
- Construção de uma pista experimental, para estudo das propriedades mecânicas, hidráulicas e durabilidade do material quando submetido à carregamentos reais; e
- Dimensionar um pavimento rígido de concreto permeável utilizando o método mecanístico-empírico.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, Laura Albuquerque. *Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte*. 2005. 145 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE Committee 522, *Specification for Pervious Concrete*, 522.1-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 7p., 2008.

_____. Committee 522, *Pervious Concrete*, 522R-06, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 25p., 2006.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. *Stormwater management with pervious concrete pavement*. Concrete Information, Skokis, 2006.

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

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

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

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

_____. *NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2011.

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

_____. *NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro, 2009.

_____. *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009.

_____. *NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

BATEZINI, Rafael. *Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para área de veículos leves*. 2013. 133 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BEELDENS, A. *Behaviour of Porous PCC Under Freeze Thaw Cycling*. Tenth International Congress on Polymers in Concrete, Honolulu, Hawaii, 2001.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação geral de estudos e pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. *Manual de pavimentos rígidos*. 2 ed. – Rio de Janeiro, 2005. 234 p.

BROOK, K.M. *No-fines concrete*. London, 1982. 27 p.

Concreto Permeable. Disponível em:

<<https://www.archdaily.co/catalog/co/products/8344/concreto-permeable-argos>> Acesso em: 26 set. 2018

Enchentes e alagamentos da cidade de Belém (A estratégia da padaria). Disponível em: <<http://azevedoambiental.com.br/enchentes-e-alagamentos-da-cidade-de-belem-a-estrategia-da-padaria/>> Acesso em: 15 set. 2018

FERGUSON, Bruce. K., *Porous pavements*. Integrative Studies in Water Management and Land Development, Florida, 2005.

HÖLTZ, Fabiano da Costa. *Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental*. 2011. 139 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HUANG, B. WU, H. SHU, X. BURDETTE E.G. *Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete*. Elsevier Journal. Construction and Building Materials, 2009.

Impactos da urbanização em bacias hidrográficas. Disponível em <<http://fontehidrica.blogspot.com/2011/11/>> Acesso em: 15 set. 2018

Influência do dano na resposta de geogrelhas submetidas ao arranchamento. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672008000400017> Acesso em: 02 out. 2018.

LAMB, Gisele Santoro. *Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável*. 2014. 150 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

LIAN, C; ZHUGE, Y. *Optimum mix design of enhanced permable concrete – Na experimental investigation*. Elsevier Journal. Construction and Building Materials, 2009.

MARCHIONI, M. L; SILVA, C. O. *Conceitos e requisitos para pavimento de concreto permeável (Práticas Recomendadas)*. ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2013.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3ª Ed. Ibracon, São Paulo, 2008.

MONTEIRO, Anna Carolina Neves. *Concreto poroso: Dosagem e desempenho*. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Goiás, 2010.

NUNES, Fabrizia Gioppo. *A influência do uso e ocupação do solo nas vazões de pico na bacia hidrográfica do Rio Atuba*. 2007. 175 f. Tese (Pós-Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra - Doutorado em Geologia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PERVIOUS PAVEMENT. Disponível em: <<http://www.perviouspavement.org>> Acesso em: 03 out. 2018

PINTO, Carlos de Souza. *Curso básico de mecânica dos solos*. Oficina de textos. 2ª edição. São Paulo, 2002.

PINTO, Liliane Lopes Costa Alves. *O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano*. 2011. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

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

RISON, A. C. et al. Influência da distribuição granulométrica do agregado graúdo nas propriedades do concreto permeável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60, 2018, Foz do Iguaçu. *Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto*. Foz do Iguaçu, 2018.

SCHAEFER, V. et al. *Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates. Final Report, Civil Engineering*, Iowa State University, 2006.

SPIN, Anne Whiston. *O Jardim de Granito: A Natureza no Desenho da Cidade*. Tradução de Paulo Renato Mesquita Pellegrino. 1ª ed. São Paulo - SP, Editora da Universidade Federal de São Paulo, 1995.

SUDERHSA – SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICO E SANEMAENTO AMBINELA E SEMA – SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba*. Vol 3. Curitiba, 2002.

SULEIMAN, M. T. et al. Effect of Compaction Energy on Pervious Concrete Properties. *Proceeding of Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete*, Nashville, 2006.

TENNIS, P.D. et al. *Pervious Concrete Pavements*. EB302, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2004. Disponível em: <http://myscmap.sc.gov/marine/NERR/pdf/PerviousConcrete_pavements.pdf> Acesso em: 17 set. 2018.

TUCCI, C. E. M. et al. *Hidrologia: Ciência Aplicação*. 1ª ed. Porto Alegre - RS, Editora da UFRGS, ABRH, EDUSP, 1993.

TUCCI, C. E. M. et al. *Drenagem Urbana* 1ª ed. Porto Alegre - RS, Editora da UFRGS, 1995.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, vol. 05. n. 1, p. 61-68, jan/mar. 2000.

TUCCI Carlos Eduardo Morelli. *Gestão de águas pluviais urbanas*. 4ª ed. Brasília, Ministério das Cidades, 2005.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia Aplicada*. 1ªed. São Paulo – SP, Editora McGraw-Hill, 1975.

ANEXO A – Resultados dos ensaios realizados no estudo

COEFICIENTE DE TRAÇO PERMEABILIDADE (cm/s)	ÍNDICE DE VAZIOS	ESTUDO PRELIMINAR										ESTUDO DEFINITIVO														
		CORPO DE PROVA		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)		RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)		RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)		TRAÇO		CORPO DE PROVA		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)		RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)		RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)								
		7 DIAS	14 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	7 DIAS	14 DIAS					
0,7	0,33	CP 01	13,5	11,7	1,82	1,87	3,00	2,84			CP 01	32,6	35,7	3,02	2,95	4,40	4,17			CP 02	36,5	35,2	3,16	3,86	3,32	5,18
		CP 02	11,3	20,2	1,96	2,45	2,39	2,68	1:5,0		CP 03	33,2	39,4	3,71	3,70	-	-	-	-							
0,91	0,38	CP 01	10,6	10,4	1,21	1,61	2,25	2,28			CP 01	40,7	42,6	3,04	3,11	4,72	4,73			CP 02	43,6	45,0	2,85	2,51	4,26	4,79
		CP 02	10,5	11,4	1,46	1,89	2,17	1,95	1:4,5		CP 03	39,4	40,3	3,22	4,32	-	-	-	-							
0,36	0,13	CP 01	12,0	12,3	1,33	1,07	3,12	2,53			CP 01	31,9	31,0	3,34	3,64	3,56	5,06			CP 02	30,1	35,5	3,42	4,45	3,82	4,67
		CP 02	19,5	21,5	1,62	-	2,99	2,50			CP 03	32,7	40,7	3,18	3,42	-	-	-	-							
0,57	0,21	CP 01	17,9	21,3	1,62	2,11	2,38	2,61			CP 01	32,7	49,9	3,43	2,79	4,17	4,28			CP 02	33,7	57,1	3,55	4,53	3,16	4,06
		CP 02	16,8	19,6	1,95	1,84	2,63	2,64	1:4,0		CP 03	42,4	47,9	3,46	4,26	-	-	-	-							
0,3	0,18	CP 01	21,9	25,4	1,77	2,13	2,45	3,26			CP 01	32,7	49,9	3,43	2,79	4,17	4,28			CP 02	33,7	57,1	3,55	4,53	3,16	4,06
		CP 02	22,3	32,9	2,58	2,83	3,31	3,39	1:3,5		CP 03	42,4	47,9	3,46	4,26	-	-	-	-							
0,16	0,11	CP 01	20,4	19,85	2,59	1,76	3,09	2,97			CP 01	32,7	49,9	3,43	2,79	4,17	4,28			CP 02	33,7	57,1	3,55	4,53	3,16	4,06
		CP 02	19,3	25,0	2,05	1,89	3,11	4,64			CP 03	42,4	47,9	3,46	4,26	-	-	-	-							

Fonte: Autor (2019).