

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE DOSAGEM NAS PROPRIEDADES
FÍSICO-MECÂNICAS DE CONCRETOS PERMEÁVEIS**

ANA NATALY DOS ANJOS COSTA

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

JUNHO DE 2020

Ana Nataly dos Anjos Costa

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE DOSAGEM NAS PROPRIEDADES FÍSICO-
MECÂNICAS DE CONCRETOS PERMEÁVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientadora: Prof. Dra. Cintia Maria Ariani Fontes

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

JUNHO DE 2020

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE DOSAGEM NAS PROPRIEDADES FÍSICO-
MECÂNICAS DE CONCRETOS PERMEÁVEIS

Ana Nataly dos Anjos Costa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Aprovada por:



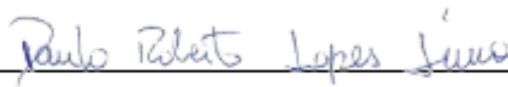
Prof. Cintia Maria Ariani Fontes, DSc.

(Universidade Estadual de Feira de Santana)



Prof. Francisco Gabriel Santos Silva, DSc.

(Universidade Federal da Bahia)



Prof. Paulo Roberto Lopes Lima, DSc.

(Universidade Estadual de Feira de Santana)

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

JUNHO DE 2020

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

C87

Costa, Ana Nataly dos Anjos

Influência de parâmetros de dosagem nas propriedades físico-mecânicas de concretos permeáveis / Ana Nataly dos Anjos Costa. – 2020.

105 f.: il.

Orientadora: Cintia Maria Ariani Fontes.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Feira de Santana, 2020.

1. Concreto permeável. 2. Parâmetros de dosagem. 3. Comportamento físico-mecânico. 4. Resistência. 5. Permeabilidade. I. Título. II. Fontes, Cintia Maria Ariani, orient. III. Universidade Estadual de Feira de Santana.

CDU: 691.32

Luis Ricardo Andrade da Silva - Bibliotecário - CRB-5/1790

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me permitir chegar até aqui, sempre me guiando e me dando força nos momentos que mais precisei. Só Ele sabe o quanto O procurei diante das dificuldades e também o quanto O agradei por ter vencido todas elas.

Aos meus pais, por todo apoio, amor, dedicação e esforço para que eu tivesse uma boa educação. Sei o quanto lutaram por mim e sou imensamente grata por isso. Devo tudo o que sou hoje ao esforço deles.

Aos meus irmãos sobrinhos e cunhadas, por todo amor e por acreditarem em mim sempre. Sou muito mais feliz por terem vocês em minha vida.

As minhas avós Jorgina e Francisca, por todo o amor, dedicação, carinho e apoio de sempre.

Ao meu avô Salvo (*in memorian*), que apesar de nos deixado há tempo, é parte da minha história e foi um homem de muito caráter e muito amoroso.

Ao meu avô Euvaldo (*in memorian*), sobre o qual eu escrevo sempre com lágrimas nos olhos, pelo apoio durante toda a minha vida acadêmica, por sempre acreditar em mim e me ajudar a chegar até aqui. Junto a meus pais, me proporcionou uma educação de qualidade. E apesar de ter nos deixado no início desta minha jornada do mestrado, sei que continua olhando e torcendo por mim. Sou imensamente grata por tudo que fez por mim.

A todos os tios, tias e primos que sempre torceram por mim.

Ao meu companheiro de vida, Durval, por sempre estar ao meu lado em todos os momentos, por todo amor, apoio e, principalmente, por me dar uma família. A ele, devo a realização do maior sonho da minha vida, o sonho de ser mãe. Eu te amo e desejo que nossa família seja sempre cercada de muito amor.

Ao meu filho, o maior amor da minha vida, por me dar forças e me mostrar o que há de mais valioso. À você, meu filho, eu devo a vontade de ser uma pessoa melhor. Você é a minha fonte de força e coragem.

À toda a família de Durval, por todo o apoio e por torcer pela felicidade da minha família.

Aos meus amigos, que sempre estiveram do meu lado, por todo amor, carinho, apoio e pelas palavras de incentivo.

Á minha orientadora, Cintia, por acreditar em mim para a realização deste trabalho, pelo apoio, incentivo, e por me acalmar quando necessário. À senhora, minha sincera gratidão por todo auxílio, dedicação, paciência e por todo conhecimento compartilhado.

Ao professor Paulo Roberto, por todo o apoio, por sempre se mostrar disposto a ajudar e por todo conhecimento compartilhado. Agradeço também, por todas as considerações feitas na banca de qualificação, que permitiram o melhor desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor Silvio Orrico, pelas contribuições feitas na banca de qualificação, com o intuito de melhorar este trabalho.

À professora Socorro, por esclarecer dúvidas relacionadas à pesquisa e por todo apoio.

Aos professores Washington e Mônica, por todo conhecimento compartilhado durante a realização do mestrado.

A Mari e Cátia, por toda a atenção e auxílio prestado.

Aos demais professores e funcionários do PPGCEA que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Ao professor Vinícius Amâncio pela produção do equipamento para a realização do ensaio de permeabilidade.

A todos os colegas do mestrado, em especial, Valquíria e Rodrigo por tornar esta etapa mais leve, pelas conversas sobre a vida e pelas discussões acadêmicas.

A todos os funcionários do Labotec, Myrella, Uiliana, seu Nilson, Izabela, Élide, Rosana, Conceição, Jorge e os demais, que fizeram parte desta jornada, por todo o apoio para a produção dos concretos e realização dos ensaios.

À Camila, minha “irmã” da UEFS por toda a ajuda para a realização deste trabalho, seja na produção de concreto, na realização dos ensaios, nas caronas para casa ou nas conversas.

À CAPES pelo fornecimento da bolsa para a realização desta pesquisa.

Aos demais, que não foram citados aqui, mas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Muito obrigada a todos!

Resumo da dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE DOSAGEM NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE CONCRETOS PERMEÁVEIS

Ana Nataly dos Anjos Costa

Junho/2020

Orientador 1: Prof.^a Dra. Cintia Maria Ariani Fontes

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

Nesta pesquisa, avaliou-se a influência da variação de parâmetros de dosagem nas propriedades físicas e mecânicas de concretos permeáveis, por meio da realização de ensaios laboratoriais. Os parâmetros considerados foram o teor de agregados, a relação água/cimento e a dimensão máxima da brita. Para a avaliação dos concretos, foram realizados ensaios de espalhamento na mesa de Graff, massa específica nos estados fresco e endurecido, índice de vazios, resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e permeabilidade. Percebeu-se que o ensaio de espalhamento na mesa de Graff não foi satisfatório para a avaliação da trabalhabilidade do material. Por outro lado, a massa específica no estado fresco se mostrou adequado no controle da produção do concreto permeável, indicando concretos que podem apresentar permeabilidade inferior ao recomendado por norma. Dentre os parâmetros avaliados, o teor de agregados foi o que mais influenciou o comportamento do concreto, sendo que o aumento da sua quantidade gerou o aumento do índice de vazios e da permeabilidade e redução da resistência mecânica. A relação água/cimento neste tipo de material, apresentou influência diferente do que se observa nos concretos convencionais, promovendo o aumento da resistência mecânica e redução da porosidade e permeabilidade com o aumento do seu valor. Com relação à dimensão máxima do agregado, observou-se que este fator não apresentou influência significativa nas propriedades mecânicas do material. Entretanto, todas as propriedades físicas foram influenciadas por este parâmetro.

Palavras chave: Concreto permeável; Parâmetros de dosagem; Comportamento físico-mecânico.

Abstract of dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE DOSAGEM NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE CONCRETOS PERMEÁVEIS

Ana Nataly dos Anjos Costa

June/2020

Advisor 1: Professor DSc. Cintia Maria Ariani Fontes

Department: Civil and Environment Engineering

In this research, the influence of the variation of dosage parameters on the physical and mechanical properties of permeable concretes was evaluated, through laboratory tests. The parameters considered were the aggregate content, the water / cement ratio and the maximum size of the crushed stone. For the evaluation of concretes, spreading tests were performed on the Graff table, specific mass in the fresh and hardened states, voids index, axial compression resistance, tensile strength in flexion and permeability. It was noticed that the scattering test on the Graff table was not satisfactory for evaluating the workability of the material. On the other hand, the specific gravity in the fresh state proved to be adequate in the control of permeable concrete production, indicating concretes that may present a permeability lower than that recommended by norm. Among the evaluated parameters, the content of aggregates was the one that most influenced the behavior of the concrete, and the increase in its quantity generated an increase in the void index and permeability and reduction of mechanical strength. The water / cement ratio in this type of material, showed a different influence from that observed in conventional concretes, promoting an increase in mechanical strength and a reduction in porosity and permeability with an increase in its value. Regarding the maximum dimension of the aggregate, it was observed that this factor had no significant influence on the mechanical properties of the material. However, all physical properties were influenced by this parameter.

Keywords: Permeable concrete; Parameters of dosage; Physical-mechanical behavior.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Geral	15
1.1.2	Específicos	16
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS	17
2.1	PROCESSO DE URBANIZAÇÃO E A IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO	17
2.2	IMPACTOS GERADOS PELA IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO	20
2.3	ALTERNATIVAS PARA REDUÇÃO DA IMPERMEABILIZAÇÃO DOS SOLOS E CONTROLE DE ESCOAMENTO	23
3	CONCRETO PERMEÁVEL	27
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS NA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL	28
3.2	DOSAGEM.....	31
3.3	PRODUÇÃO E EXECUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL	33
3.4	PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	36
3.4.1	Trabalhabilidade e massa específica no estado fresco	36
3.4.2	Massa específica e índice de vazios no estado endurecido	38
3.4.3	Resistência a compressão axial.....	40
3.4.4	Resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral	42
3.4.5	Permeabilidade	43
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	46
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	47

4.1.1	Cimento Portland	47
4.1.2	Agregado gráudo natural.....	47
4.1.3	Água	49
4.2	MISTURAS, PRODUÇÃO E MOLDAGEM DOS CONCRETOS	49
4.2.1	Misturas.....	50
4.2.2	Produção dos concretos.....	51
4.2.3	Propriedades no estado fresco	53
4.2.4	Moldagem e cura dos corpos de prova	53
4.3	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	54
4.3.1	Resistência à compressão axial.....	54
4.3.2	Resistência à tração na flexão.....	54
4.3.3	Massa específica e porosidade	54
4.3.4	Permeabilidade	54
4.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	56
5	RESULTADOS	58
5.1	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	58
5.1.1	Massa específica.....	58
5.1.2	Espalhamento na mesa de Graff	59
5.2	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	61
5.2.1	Massa específica no estado endurecido.....	63
5.2.2	Índice de vazios	66
5.2.3	Permeabilidade	72
5.3	ENSAIOS MECÂNICOS	78
5.3.1	Resistência à compressão	79
5.3.2	Resistência à tração na flexão.....	85

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	91
	REFERÊNCIAS	92
	APÊNDICE	102
	APÊNDICE 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ESPALHAMENTO DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: População urbana e rural no mundo, 1950- 2050 (Fonte: NAÇÕES UNIDAS, 2015).....	17
Figura 2: Evolução da população residente em áreas urbanas no Brasil (Fonte: IBGE, 2010).....	18
Figura 3: Diferença entre hidrograma de área urbanizada e área não urbanizada (Fonte: Adaptado de Cordeiro Netto, 1994, citado por Virgillis, 2009).....	19
Figura 4: Balanço hídrico em bacias a) sem urbanização e b) urbanizadas (Fonte: OECD, 1986, citado por TUCCI, 2006).....	21
Figura 5: Benefícios da aplicação do Sistema de Drenagem Sustentável (Fonte: CIRIA, 2015).....	25
Figura 6: Concreto permeável (Fonte: http://www. ecodesenvolvimento.org).....	27
Figura 7: Amostras de concreto permeável com diferentes teores de água; (a) pouca água; (b) quantidade adequada de água; (c) muita água (Fonte: Tennis <i>et al.</i> , 2004).....	34
Figura 8: Compactação com rolo de aço (Fonte: LAMB, 2014).....	35
Figura 9: Realização do ensaio de abatimento em concreto permeável (Fonte: NGUYEN <i>et al.</i> 2014).....	37
Figura 10: Modelos de poros conectados em 3D	40
Figura 11: Variação da permeabilidade com a forma de produção dos corpos de prova e tipo de agregado, com traço 1:4 (Fonte: Holtz, 2011).....	45
Figura 12: Curva de composição granulométrica do agregado graúdo natural, determinada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003a)	48
Figura 13: Avaliação tátil visual da mistura de concreto permeável.....	52
Figura 14: Aspecto do concreto permeável após a mistura em betoneira	52
Figura 15: Permeâmetro de carga variável para determinação da condutividade hidráulica	55
Figura 16: Espalhamentos na mesa de Graff para 3 misturas de concreto permeável ...	60

Figura 17: Relação entre os diâmetros obtidos na mesa de Graff e no programa ImageJ para todas as misturas	60
Figura 18: Representação gráfica dos resultados experimentais de massa específica no estado endurecido	63
Figura 19: Influência da interação entre teor de agregados (m) e relação a/c para as britas (a) 9,5mm; (b) 12,5mm e (c) 19mm, sobre a massa específica dos concretos permeáveis	65
Figura 20: Representação gráfica dos resultados experimentais de índice de vazios	66
Figura 21: Influência da dimensão máxima do agregado no índice de vazios, para teor de agregados, m=5.	67
Figura 22: Relação entre massa específica e índice de vazios: (a) com dados desta pesquisa e (b) com dados desta pesquisa e de outros autores.....	69
Figura 23: Influência da interação entre teor de agregados (m) e relação a/c para a brita (a) 9,5 mm; (b) 12,5mm e (c) 19mm, sobre o índice de vazios dos concretos permeáveis	71
Figura 24: Relação entre permeabilidade e a/c, para cada diâmetro máximo: (a) 9,5mm; (b) 12,5mm e (c) 19,0mm.....	72
Figura 25: Relação entre índice de vazios e permeabilidade dos concretos permeáveis, em função do teor de agregados (a) presente estudo e (b) presente estudo e outros autores,	74
Figura 26: Permeabilidade em função do teor de agregados e relação a/c, para brita com: (a) $d_{máx} = 9,5$ mm; (b) $d_{máx} = 12,5$ mm e (c) $d_{máx} = 19,0$ mm.....	76
Figura 27: Resultados experimentais de resistência a compressão	80
Figura 28: Relação entre resistência à compressão e índice de vazios dos concretos permeáveis produzidos nesta pesquisa e de outros autores	82
Figura 29: Influência da interação entre o teor de agregados e da relação a/c para o $d_{máx}$ igual a (a) 9,5mm, (b) 12,5mm e (c) 19,0mm, sobre a resistência à compressão	84
Figura 30: Resultados experimentais da resistência a tração na flexão.....	85

Figura 31: Relação entre resistência à tração na flexão e índice de vazios dos concretos permeáveis..... 86

Figura 32: Influência da interação entre o teor de agregados e da relação a/c sobre a resistência à tração na flexão para $d_{máx}$ igual a (a) 9,5 mm, (b) 12,5mm e (c) 19,0mm88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Granulometria dos agregados utilizados na produção de concreto permeável	30
Tabela 2: Faixas típicas de proporções de materiais em concretos permeáveis	32
Tabela 3: Comparação entre as porosidades	40
Tabela 4: Valores dos fatores controláveis na produção dos concretos permeáveis	46
Tabela 5: Características do cimento Portland CP II-Z 32 utilizado na produção do concreto	47
Tabela 6: Características do agregado graúdo utilizado na produção do concreto permeável	48
Tabela 7: Distribuição granulométrica das britas utilizadas	49
Tabela 8: Proporções de materiais utilizados na produção do concreto	51
Tabela 9: Resultados de massa específica no estado fresco	58
Tabela 10: Resultados experimentais dos ensaios físicos realizados nos concretos permeáveis	62
Tabela 11: Significância das variáveis independentes e da interação a partir da ANOVA	63
Tabela 12: Resultados experimentais dos ensaios mecânicos	78
Tabela 13: Significância dos fatores	79

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da população urbana, o meio ambiente vem sofrendo diversos impactos devido às alterações provocadas pelos diferentes tipos de construções. Dentre os efeitos negativos gerados por este processo estão a impermeabilização dos solos, além da maior extração de matérias-primas naturais.

De acordo com os dados do último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) a população urbana representa 84,4% do total. Este número poderia não ser considerado um fator negativo, caso esta urbanização fosse feita de maneira planejada, avaliando riscos e aplicando medidas que provocassem o menor impacto possível ao ambiente natural. Entretanto, como esta acontece, geralmente, de forma desordenada, alguns processos naturais são alterados e acabam provocando danos à própria população, como por exemplo, a impermeabilização dos solos.

Dentre os efeitos provocados por este processo estão: redução da infiltração das águas pluviais no solo e conseqüente aumento do escoamento superficial e da sua velocidade; aumento das vazões máximas; diminuição do nível do lençol freático por falta de alimentação; e redução da evapotranspiração, por causa da substituição da cobertura natural por áreas impermeáveis (TUCCI, 2006).

Estes fatores, juntamente com a ocupação de várzeas ou a sobrecarga de sistemas de drenagem, promovem a maior frequência na ocorrência de inundações, alagamentos e enxurradas. Para tentar solucionar estes problemas, o governo, vem utilizando medidas que visam, apenas, afastar rapidamente as águas precipitadas, transferindo-as para jusante. Este tipo de ação não resolve verdadeiramente a questão, uma vez que as águas pluviais são apenas transferidas, através dos dispositivos de drenagem tradicionais, com maior quantidade e velocidade.

Para a redução das inundações, enxurradas e dos alagamentos é necessária a adoção de medidas que atuem sobre as suas causas, como as medidas compensatórias. Segundo Baptista *et al.* (2005), estas medidas visam promover o controle da produção de excedentes de água decorrentes da impermeabilização, evitando sua transferência rápida para jusante.

Neste contexto, se insere o pavimento permeável como uma destas alternativas, pois para Batezini (2013), quando este material é projetado e implantado adequadamente, pode promover a percolação da água através de sua estrutura porosa. Tal fato traz como benefícios a redução do escoamento superficial, redução dos condutos da drenagem pluvial, além da minimização dos custos do sistema de drenagem pluvial e da lâmina de água, tornando possível o seu uso em estacionamentos, calçadas, praças, dentre outras que possuem baixo tráfego.

A produção de concreto permeável para uso em pavimentação pode promover benefícios ambientais importantes. O desenvolvimento e a disseminação de tecnologias como esta pode garantir a redução dos impactos provocados pelo processo de expansão urbana com relação a impermeabilização dos solos, configurando um importante avanço em termos de sustentabilidade. Porém, este tipo de material tem a sua dosagem realizada de forma empírica, por não haver um método científico como nos concretos convencionais.

Entretanto, diversos estudos de concreto permeável partem de um traço pré-estabelecido, devido à falta de métodos de dosagem para este tipo de concreto, de acordo com as faixas típicas e, a partir disso, verificam o comportamento do material. Nesse sentido, não há um conhecimento consolidado deste material a partir de diferentes dosagens, como feito por Holtz (2011).

Neste contexto, analisa-se o comportamento do concreto permeável com a variação de três parâmetros de dosagem: teor de agregados (m), relação água/cimento (a/c) e granulometria do agregado graúdo, com o intuito de conhecer as propriedades do material diante destas variáveis.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Avaliar a influência da variação da relação a/c , do teor e da granulometria dos agregados nas propriedades físicas e mecânicas de concretos permeáveis.

1.1.2 Específicos

- Avaliar as propriedades no estado fresco: consistência (espalhamento na mesa de Graff) e massa específica;
- Mensurar as propriedades físicas e hidráulicas no estado endurecido (massa específica, porosidade e condutividade hidráulica) do concreto permeável;
- Determinar as propriedades mecânicas de resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão do concreto permeável.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é constituído por 5 capítulos, sendo que:

O capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, inserindo o tema no contexto atual, exibindo a sua justificativa e seus objetivos.

O capítulo 2 faz uma abordagem sobre a questão da drenagem urbana, mencionando o crescimento urbano e conseqüente aumento da impermeabilização dos solos. Além disso, este capítulo aborda alternativas para a redução deste problema e para o controle do escoamento superficial, inserindo o concreto permeável como uma das soluções.

O capítulo 3 apresenta uma revisão de literatura sobre o concreto permeável, mostrando seu histórico e suas aplicações. Ainda neste capítulo, são explanados aspectos relacionados à composição, dosagem, produção, execução e as propriedades deste concreto de forma geral, com base em trabalhos já desenvolvidos com este tema.

O capítulo 4 trata da descrição do procedimento experimental, discorrendo sobre os materiais utilizados, a forma de produção do concreto permeável e o modo de avaliação das propriedades.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos a partir do programa experimental, avaliados a partir da análise de variância (ANOVA), mostrando a influência dos parâmetros estudados, bem como a suas interações.

2 MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS

2.1 PROCESSO DE URBANIZAÇÃO E A IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO

No contexto atual, tem sido observada a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, adotando-se cada vez mais práticas sustentáveis que minimizem os impactos gerados por ações promovidas pelo crescimento urbano, como a impermeabilização dos solos. Isto ocorre devido ao fato do desenvolvimento promover diversas alterações em ciclos naturais, como o da água, que estão afetando de forma significativa a população e o meio ambiente.

A princípio, o crescimento das cidades ocorreu nos países desenvolvidos a partir da segunda metade do século XVIII e, mais acentuadamente, no início do século XIX, impulsionado pelo desenvolvimento industrial. No caso dos países menos desenvolvidos ou de industrialização tardia, o processo de urbanização só se acentuou a partir de 1950, durante o desenvolvimento industrial nessas localidades (GIAMBIAGI e PORTO, 2011).

A partir de 1980, houve o aumento da população urbana global de forma bastante significativa. Isto pode ser verificado na Figura 1, que exhibe a população mundial urbana e rural no período de 1950 a 2014, com projeção até o ano de 2050.

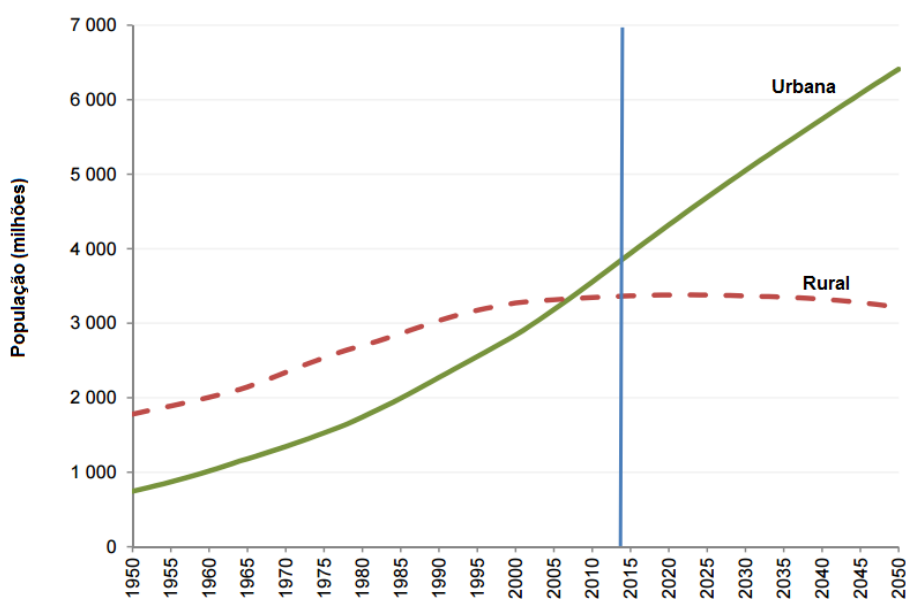


Figura 1: População urbana e rural no mundo, 1950- 2050 (Fonte: NAÇÕES UNIDAS, 2015)

Observa-se que com o passar dos anos, o crescimento da população urbana mundial torna-se cada vez mais acentuada, enquanto a população rural apresenta uma leve tendência a queda, ao se aproximar do ano 2050.

A migração da população para as cidades ocorre pelo fato de que as áreas urbanas possuem como atrativo o melhor acesso a saúde, educação, emprego e entretenimento, o que atrai um fluxo contínuo de pessoas das áreas rurais. Desta forma, o mundo se encontra na maior fase de crescimento urbano da história, com mais da metade da população vivendo em cidades e vilas (SHEN, 2017; HODSON, 2016).

No caso dos países em desenvolvimento, conforme enfatizou Tucci (2005), esta expansão urbana tem sido realizada de maneira insustentável, com prejuízos ao meio ambiente e à qualidade de vida da população. Nesses locais, os impactos são mais acentuados do que em países desenvolvidos, devido a inexistência de infraestrutura adequada, que possa dar suporte a essa urbanização (LAMB, 2014).

De acordo com o Plano Nacional de Recursos Hídricos (1998, citado por TUCCI, 2003) o grande desenvolvimento do Brasil ocorreu entre o final dos anos 60 e o final dos anos 90, período no qual a população urbana passou de 55% para 76%. Segundo dados do último censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), e apresentado na Figura 2, a população urbana representa aproximadamente 84,4% do total.

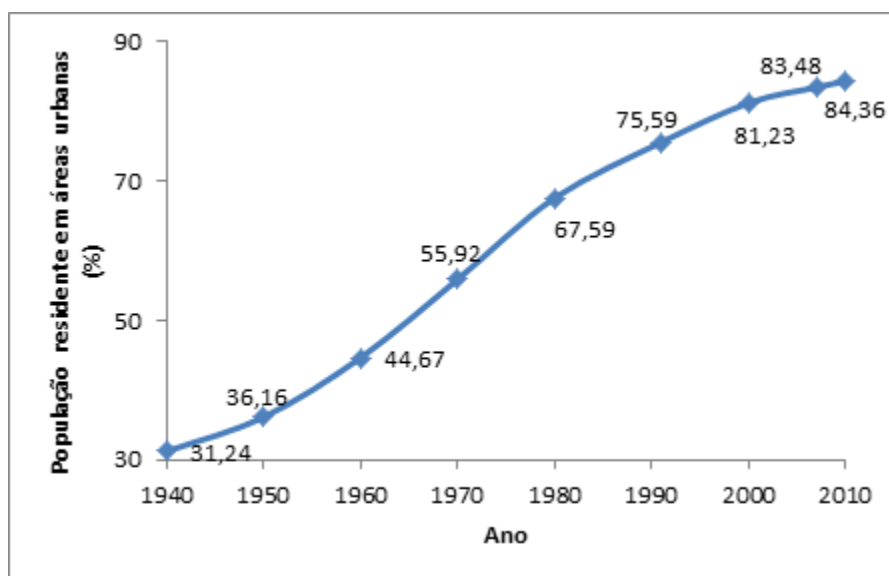


Figura 2: Evolução da população residente em áreas urbanas no Brasil (Fonte: IBGE, 2010)

Pode-se dizer com isso que, provavelmente, haverá uma tendência de estabilização da população urbana no Brasil nos próximos anos, visto que um valor bastante expressivo já foi alcançado. Mesmo assim, pelo fato deste crescimento ter ocorrido sem um planejamento adequado, em sua maior parte, os impactos gerados por este processo já ocorreram e precisam agora de medidas capazes de minimizá-los.

Dentre as consequências do processo de urbanização tem-se a impermeabilização do solo, ocasionada pela instalação de vias pavimentadas, estacionamentos e telhados, o que promoveu uma redução da infiltração de água no solo e da evapotranspiração. Conseqüentemente, em um evento de chuva, essa contribuição que antes infiltrava, se torna escoamento superficial, promovendo aumento dos volumes escoados, das vazões de pico e a diminuição do tempo de concentração da bacia, elevando os picos dos hidrogramas de cheias (PINTO, 2011).

O hidrograma é a representação da resposta de uma bacia hidrográfica a uma dada precipitação e a contribuição de um aquífero, em função de suas características fisiográficas que regem as relações entre chuva e escoamento (PORTO, ZAHED FILHO; MARCELLINI, 1999). A Figura 3 exibe a diferença entre hidrogramas de uma área urbanizada e área não urbanizada.

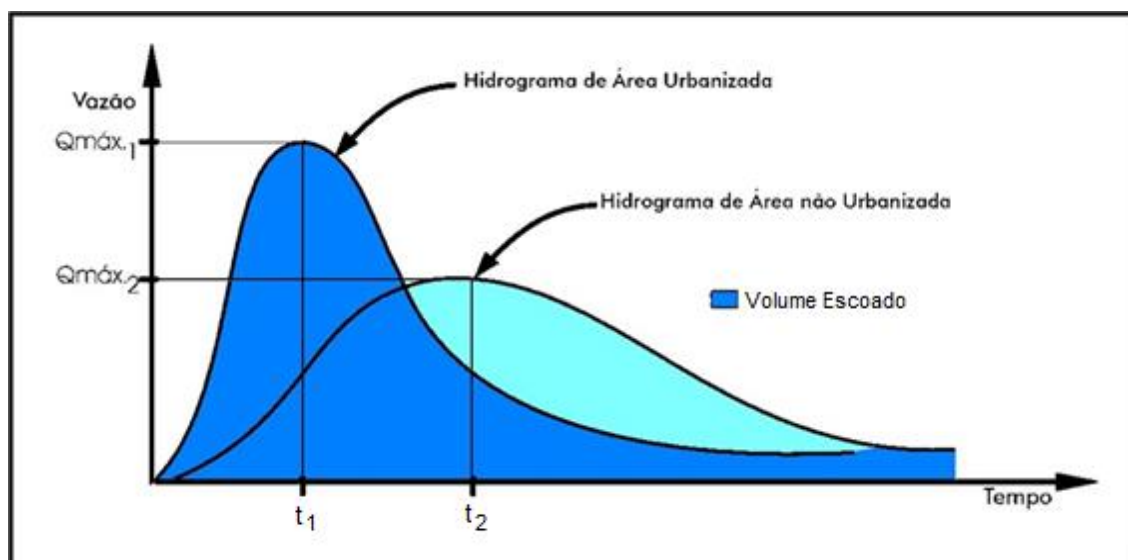


Figura 3: Diferença entre hidrograma de área urbanizada e área não urbanizada (Fonte: Adaptado de Cordeiro Netto, 1994, citado por Virgillis, 2009)

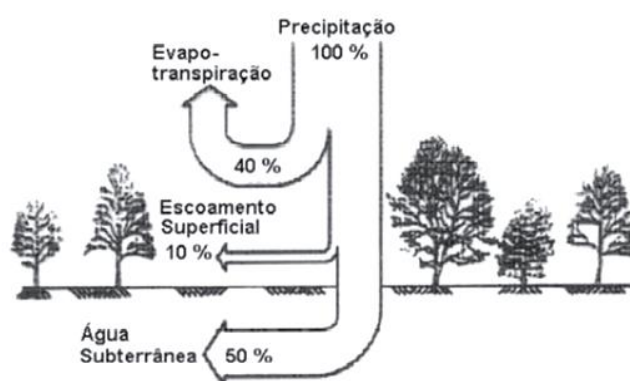
Em uma área urbanizada o hidrograma apresenta seu pico com maior vazão e em menor tempo, o que indica menor infiltração da água no solo e maior escoamento superficial. No caso de áreas não urbanizadas, a capacidade de infiltração da água no solo é maior, conseqüentemente, a vazão é melhor distribuída no tempo e o pico de vazão é menor.

Assim, devido a esta mudança gradual da superfície, há o aumento da demanda para o sistema de drenagem urbana. Por isso, torna-se necessário, então, um número crescente de obras, com porte cada vez maior, para suportar os grandes fluxos de água concentrados (LAMB, 2014).

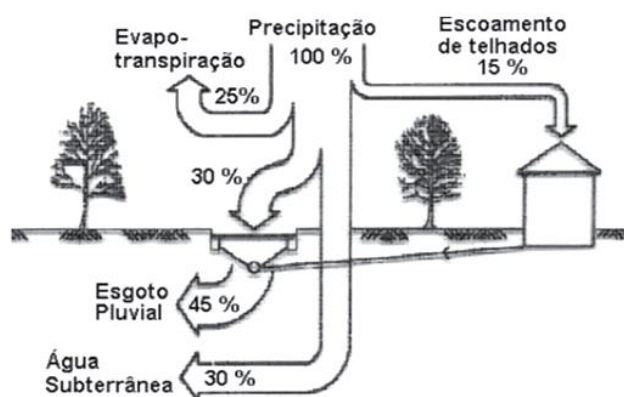
2.2 IMPACTOS GERADOS PELA IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO

A expansão urbana sem planejamento adequado promove ações que geram sérios impactos sobre o meio ambiente, que passa a ser cada vez menos natural. De acordo com Tucci (2006), com a impermeabilização dos solos causada por telhados, ruas, pátios e calçadas, a água que antes infiltrava, escoava lentamente pela superfície do solo, ou era retido pelas plantas, agora passa a escoar por superfícies impermeáveis, condutos ou canais. Isto acaba exigindo maior capacidade de escoamento de dispositivos de drenagem, com aumento de suas seções e declividade.

A Figura 4 ilustra a mudança provocada pela urbanização sobre variáveis do ciclo hidrológico.



a) Cenário não urbanizado



b) Cenário urbanizado

Figura 4: Balanço hídrico em bacias a) sem urbanização e b) urbanizadas (Fonte: OECD, 1986, citado por TUCCI, 2006)

Pode-se observar que há um aumento no escoamento superficial, promovido pela impermeabilização dos solos e dispositivos de drenagem e pelas edificações. Por outro lado, a evapotranspiração e o escoamento subterrâneo, são reduzidos de 90% do total da precipitação para apenas 55%, de forma que os 35% que antes possuíam estes destinos sejam lançados no esgoto pluvial.

Desta forma, as alterações provocadas pela urbanização no ciclo hidrológico, conforme indicado por Tucci (2006), foram:

- Redução da infiltração das águas pluviais no solo;
- Aumento do escoamento superficial, devido ao volume que deixa de infiltrar;
- Maior velocidade de escoamento com os condutos pluviais, reduzindo o tempo de deslocamento;
- Aumento das vazões máximas, antecipando seus picos no tempo;
- Com a menor infiltração, o aquífero tende a diminuir o nível do lençol freático por falta de alimentação (principalmente quando a área urbana é muito extensa), reduzindo o escoamento subterrâneo;
- Redução da evapotranspiração, por causa da substituição da cobertura natural por áreas impermeáveis, já que a superfície urbana não retém água, como a cobertura vegetal, e não permite a evapotranspiração, como ocorre pelas folhagens do solo.

Tal fato, em grandes metrópoles, devido ao elevado índice de impermeabilização do solo e da ocupação de várzeas, o aumento das vazões e a redução dos tempos de deslocamento, promovem a ocorrência de inundações com maior frequência (PINTO, 2011). Além disso, com o aumento do volume e da velocidade do escoamento, há uma sobrecarga no sistema de drenagem, provocando alagamentos e enxurradas (quantidade de água considerável proveniente de chuvas torrenciais) urbanas (HOLTZ, 2011).

A última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada pelo IBGE (2008) constatou que cerca de 40% dos municípios brasileiros sofreram com inundações ou alagamentos no período de 2003 a 2008. Este resultado comprova a necessidade de medidas que promovam a redução destas ocorrências, que causam diversos transtornos à população.

Segundo Holtz (2011), as enxurradas ocasionam danos estruturais nas edificações, proliferação de doenças como cólera e leptospirose, transtornos à população, além de agressão aos corpos hídricos e ao meio ambiente, principalmente devido à perda de porosidade natural do solo. Grande parte dos sistemas de drenagem existentes, em locais onde antes haviam solos naturais e as águas pluviais percolavam, não estão atendendo mais a demanda necessária para os grandes volumes de chuvas, pois acabam sendo entupidos com o carreamento de lixo, impedindo a entrada da água nestes sistemas.

Em meio a estas ocorrências, Araújo *et al.* (2000) apontaram que as soluções encontradas pelo poder público para resolver os problemas das enchentes, geralmente envolvem medidas estruturais, através de redes de drenagem, que simplesmente transferem a inundação de um ponto para outro a jusante na bacia. Desta forma, estas ações locais atuam sobre o efeito e não sobre os fatores que geram o aumento da vazão, sendo eles: o aumento de superfícies impermeáveis, mudança de geometria de cursos d'água naturais, aumento da densidade de drenagem (microdrenagem) e redução da rugosidade.

Para solucionar de maneira eficiente este problema, deve-se considerar a adoção de medidas que atuem sobre as causas e não sobre os efeitos da maior vazão. Baptista *et al.* (2005) citaram tecnologias alternativas em relação às soluções clássicas, que buscam compensar, sistematicamente, os efeitos da urbanização. Estas medidas, chamadas de compensatórias, visam promover o controle da produção de excedentes de água decorrentes da impermeabilização, evitando sua transferência rápida para jusante.

2.3 ALTERNATIVAS PARA REDUÇÃO DA IMPERMEABILIZAÇÃO DOS SOLOS E CONTROLE DE ESCOAMENTO

De acordo com Agra (2001), a impermeabilização do solo é o principal efeito direto da urbanização, que promove impactos significativos sobre a movimentação das águas na bacia. Conforme indicou o autor, diversos estudos relacionaram os dados de impermeabilização com a densidade habitacional, pelo fato desta última, ser uma informação disponível em censos. Isto permite a criação de estimativas de crescimento populacional e consequente caracterização de cenários futuros de impermeabilização.

Por isso, a busca pela redução das inundações tem demandado esforço do meio técnico, no sentido de propor medidas mitigadoras e/ou compensatórias inovadoras (PINTO, 2011).

De acordo com a Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA, 2002), as medidas de controle de inundações podem ser classificadas em:

- Medidas estruturais: são aquelas que modificam o sistema, visando a redução do risco de enchentes. Envolve a construção de diques, canalizações, reflorestamento, entre outras obras para conter, reter ou melhorar a condução dos escoamentos.
- Medidas não-estruturais: buscam reduzir o impacto sem modificar o risco das enchentes. Envolve o zoneamento de áreas de inundações, associado ao Plano Diretor Urbano, previsão de cheia, legislações diversas, entre outras.

Um exemplo de medida não estrutural é a Lei do Ordenamento do Uso e da Ocupação do Solo, que estabelece índices mínimos de permeabilidade a cada tipo de edificação. No caso do município de Feira de Santana, os índices variam de 0,10 para edificações comerciais a 0,30 para edificações industriais e institucionais. A grande dificuldade deste tipo de medida é a fiscalização. Muitos proprietários não seguem os valores estabelecidos, possivelmente até por falta de orientação, e não são notificados por isso.

Com relação a medidas estruturais, conforme mencionado por Acioli (2005), existem três alternativas que buscam compensar os processos hidrológicos alterados pela urbanização,

visando reconstituir as condições anteriores à ocupação. São elas: infiltração, detenção e retenção. Segundo o autor, as estruturas de infiltração podem atuar tanto na redução das vazões máximas, funcionando como reservatórios de amortecimento, como na redução dos volumes escoados, através da infiltração das águas drenadas. Além disso, podem também desempenhar um importante papel na redução e controle de poluentes do escoamento superficial. Já as estruturas de detenção e retenção efetuam apenas a função de amortecimento.

Em contrapartida, Tucci (2006) indicou que os reservatórios de detenção e retenção também podem atuar no controle de qualidade da água. Conforme o autor, os reservatórios de retenção, que mantêm uma lâmina de água permanente, tem a finalidade de evitar o crescimento de vegetação indesejável no fundo e a diminuição da poluição para jusante. No caso das bacias de detenção, que podem secar após o uso e ser utilizada para outras finalidades, o esvaziamento rápido tem pouco efeito sobre a remoção de poluentes. Porém, Urbonas e Roesner (1994, citado por Tucci, 2006) afirmaram que períodos de detenção de 24 a 60 horas podem melhorar este processo de remoção.

Com isso, Tucci (2006) organizou algumas medidas de controle estruturais, de acordo com sua ação sobre o hidrograma. São elas:

- Infiltração e percolação: direciona o escoamento para áreas de infiltração e percolação no solo, de forma que o escoamento superficial é retardado pelo armazenamento e pelo fluxo subterrâneo. Este tipo de medida tem como objetivo recuperar as funções hidrológicas naturais da área. A infiltração não deve ser utilizada onde o nível do lençol freático é elevado ou onde a contaminação da água pluvial é alta;
- Armazenamento: através de reservatórios em locais abertos ou fechados, com a finalidade de reter parte do volume escoado superficialmente, reduzindo seu pico e distribuindo a vazão no tempo;
- Aumento da eficiência do escoamento: através de condutos e canais, drenando áreas inundadas. Este tipo de medida pode ser benéfico quando utilizado em conjunto com reservatórios de detenção, uma vez que tende a transferir enchentes de uma área para outra;

- Diques e estações de bombeamento: solução tradicional de controle localizado de enchentes em locais que não possuam espaço suficiente para amortecimento da inundação.

Diante desta busca por medidas capazes de atenuar os efeitos da urbanização, surgiram novas abordagens relacionadas a drenagem urbana. Uma delas é o *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS), que significa sistema de drenagem sustentável. De acordo com Ellis e Lundy (2016) este termo aplica-se a diversos sistemas de drenagem, que podem ser: sistemas de armazenamento, sistemas de infiltração, sistemas de transporte e superfícies permeáveis com armazenamento, que é o caso do pavimento poroso.

Existem quatro categorias principais de benefícios que podem ser alcançados através do SUDS: quantidade e qualidade da água, bem-estar e biodiversidade. Estes são considerados os quatro pilares deste conceito e estão exibidos na Figura 5.

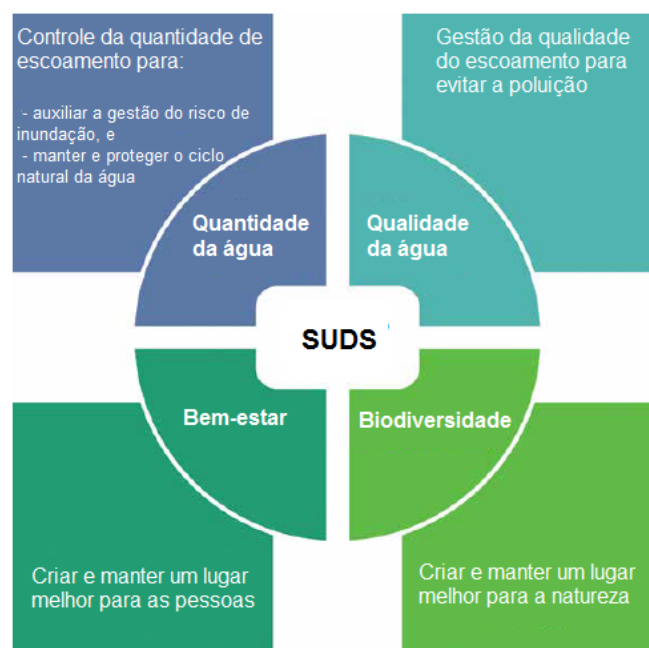


Figura 5: Benefícios da aplicação do Sistema de Drenagem Sustentável (Fonte: CIRIA, 2015)

Outro conceito também introduzido neste contexto foi o *Low Impact Development* (LID), adotado no Brasil como “Impacto Zero”, e considerado como um dos mais importantes princípios adotados na gestão da drenagem urbana. Este conceito incentiva a eliminação ou redução dos impactos gerados pela urbanização sobre o sistema de drenagem, buscando retornar às condições anteriores a ocupação da bacia (PINTO, 2011).

Há uma grande variedade de medidas para se alcançar o LID, ou Desenvolvimento de Baixo Impacto, tais como reuso das águas escoadas, trincheiras de infiltração, telhados verdes, mudanças no uso do solo, pavimentação permeável, dentre outras. A forma adotada depende das condições locais (YAZDI e NEYSHABOURI, 2014).

Percebe-se, então, que os efeitos da urbanização sobre o meio ambiente estão causando cada vez mais mobilização de pesquisadores da área da drenagem urbana. Isto demonstra a necessidade de disseminação de informações a respeito do tema, e das medidas capazes de controlar ou reduzir os impactos provocados por este processo. Para garantir que estas medidas sejam aplicadas, deve haver um esforço do poder público no sentido de orientar a população sobre sua importância e incentivar o seu uso, além de colocar em prática tais ideias em locais públicos. Neste contexto, o pavimento permeável se apresenta como uma boa alternativa para áreas como estacionamentos, calçadas e praças, ou seja, locais que possuem baixo tráfego. Este material permite a infiltração da água no solo, no local da precipitação, reduzindo o escoamento superficial e não sobrecarregando o sistema de drenagem composto por condutos e canais.

Para a produção deste tipo de pavimento, normalmente são utilizados revestimentos que podem ser, conforme a NBR 16416 (ABNT, 2015), pavimento intertravado permeável, pavimento de placas de concreto permeável e pavimento de concreto permeável (moldado *in loco*). Além desses, há também, o concreto asfáltico drenante ou asfalto poroso. Atualmente, para locais de baixo tráfego, o concreto permeável vem sendo mais utilizado como revestimento.

3 CONCRETO PERMEÁVEL

Polastre e Santos (2006) definiram o concreto permeável como um material com grande quantidade de vazios interligados, produzido com pequena ou nenhuma quantidade de agregado miúdo, permitindo a passagem facilitada da água.

Neste concreto, a água e o cimento, em proporções adequadas, formam um revestimento espesso em torno das partículas de agregados, permitindo a criação de vazios interligados e tornando o material altamente permeável. Geralmente, obtém-se índice de vazios entre 15 e 25% e um escoamento de água na ordem de 200 l/m²/min (TENNIS *et al.*, 2004). A Figura 6 apresenta um exemplo de concreto permeável, em que se verifica que grande parte da água atravessa o material, devido a existência de poros.



Figura 6: Concreto permeável (Fonte: <http://www.ecodesenvolvimento.org>)

Em relação a textura superficial, esta difere do concreto convencional, devido a pequena ou a nula quantidade de agregados miúdos na sua composição, o que promove uma superfície mais rugosa, elevando o coeficiente de atrito. Esta característica pode trazer benefícios com relação a segurança dos usuários, principalmente em períodos de chuva, uma vez que, além do maior coeficiente de atrito, há uma redução dos riscos de hidroplanagem, devido a sua permeabilidade. Isto ocorre devido a percolação da água através do revestimento permeável, evitando a formação de poças de água e diminuindo a ocorrência do fenômeno spray (TENNIS *et al.*, 2004).

Polastre e Santos (2006) indicaram, como sendo algumas das aplicações mais comuns do concreto permeável, a sua utilização em calçadas, estacionamentos, ruas de baixo tráfego, parques e praças, pátios residenciais, quadras de tênis, campos de golfe, estruturas hidráulicas, estufas de plantas, bases permeáveis abaixo de pavimentos de alta resistência (camadas-base), isolamento térmico de paredes (alta porosidade) e barreiras acústicas (possui boas propriedades acústicas) e em muros de arrimo.

Desta forma, o concreto permeável pode ser utilizado para diversas aplicações, sendo a principal, em pavimentos (TENNIS *et al.*, 2004).

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

Segundo Batezini (2013), o concreto permeável é um material constituído por ligante hidráulico, agregado graúdo com graduação uniforme, água e pouca ou nenhuma quantidade de finos, sendo possível a utilização de uma combinação de aditivos e adições que confirmam ao concreto melhor desempenho, durabilidade, resistência e trabalhabilidade. Ainda de acordo com este autor, as quantidades de água e ligante hidráulico devem ser cuidadosamente controladas, a fim de se obter uma pasta capaz de formar uma camada espessa em torno dos agregados.

- Cimento e adições minerais Assim como nos concretos convencionais, o cimento Portland é utilizado na produção do concreto permeável. Não há variação na escolha do material para estes dois casos, sendo geralmente utilizado, o cimento disponível na região. Estudos realizados por Holtz (2011) e Lamb (2014) foi utilizado o cimento CP V ARI na composição do concreto permeável. Para Holtz (2011), este cimento pode ser uma alternativa, pois atinge altas resistências em um curto espaço de tempo ao reagir com a água, propiciando rapidez na pega uma que o concreto permeável, devido à elevada superfície exposta ao ar, pode perder água da mistura com muita velocidade. Em contrapartida, Batezini (2013) utilizou o cimento CP III 40 RS, pois considerou este cimento conveniente para a produção de concreto permeável, por apresentar elevada resistência a sulfatos. Segundo o autor, esta é uma característica importante para concretos com elevado índice de vazios, que serão empregados em pavimentação a céu aberto de grandes áreas.

Por outro lado, Alves (2016) escolheu o cimento CP II Z 32, pela facilidade de obtenção na região. Além disso, a autora se baseou em estudos que indicaram que cimentos, com até 20% de adições pozolânicas, aumentam a resistência à compressão sem prejudicar a quantidade de poros do concreto.

Em relação as adições minerais, o seu uso, como cinzas de carvão mineral, pozolana, escória de alto forno e microsílca, podem auxiliar no incremento de resistência e durabilidade (POLASTRE; SANTOS, 2006). Chandrappa e Biligiri (2016b) indicaram que muitos pesquisadores tem usado materiais cimentícios suplementares, como uma substituição parcial ao cimento Portland. Em estudo feito por Fu *et al.* (2014), observou-se que as amostras que continham 10% de sílica ativa na pasta apresentaram melhor resistência mecânica, enquanto as amostras com 20% e 30% não apresentaram essa tendência, possivelmente pela adição de uma quantidade excessiva de material. Em contrapartida, Lian e Zhuge (2010) observaram uma ineficiência desta adição neste tipo de concreto, atribuindo este fato à elevada porosidade da mistura, onde as partículas finas da adição tendem a ser segregadas e depositadas após a compactação. Porém, os autores observaram que com a utilização do superplastificante, as partículas poderiam se dispersar, melhorar a zona de transição e obter melhores resistências a compressão.

- Agregado graúdo natural

Para o caso do agregado graúdo, a característica mais importante é a sua granulometria. É possível utilizar grãos com diâmetro variando de 5 mm a 20 mm, entretanto, quanto maior seu diâmetro, melhor, pois maior será a rugosidade do piso (POLASTRE e SANTOS, 2006). Agregados bem graduados devem ser evitados, uma vez que influenciam na porosidade do concreto permeável (AMDE e ROGGE, 2013), e desta forma, podem reduzir a permeabilidade do material que tem essa característica como principal.

As dimensões mais utilizadas nos estudos variam entre 4,75 e 9,5 mm, como pode ser observado na Tabela 1. De acordo com Amde e Rogge (2013), os agregados de tamanhos maiores podem aumentar a porosidade, mas podem diminuir a trabalhabilidade, o que não é interessante para este concreto, que já apresenta como característica a baixa trabalhabilidade.

Tabela 1: Granulometria dos agregados utilizados na produção de concreto permeável

Autores	Dimensões (mm)
Ibrahim <i>et al.</i> (2014)	4,5; 9,5 e 12,5
Lian e Zhuge (2010)	4,75 - 9,5
Zaetang <i>et al.</i> (2016)	4,75 - 9,5
Ghafoori e Dutta (1995)	9,5
Chandrappa e Biligiri (2016a)	6,7; 9,5; 13,2 e 19
Huang <i>et al.</i> (2010)	4,75; 9,5 e 12,5
Fu <i>et al.</i> (2014)	2,4 - 12,7

Como pode ser observado na Tabela 1, a dimensão de 9,5 mm parece ser a mais indicada para a produção do concreto permeável. Provavelmente, este tamanho deve possibilitar ao concreto permeável uma melhor trabalhabilidade, uma porosidade adequada e melhor resistência mecânica.

Ibrahim *et al.* (2014) usaram em algumas de suas misturas agregados de tamanho único e também a proporção de meio a meio com duas dimensões diferentes. As dimensões utilizadas foram de 4,5 mm, 9,5 mm e 12,5 mm. A mistura que apresentou maior resistência foi a produzida apenas com agregado de 9,5 mm, enquanto a de menor

resistência foi feita com agregado de tamanho único de 12,5 mm. Além disso, concluiu-se que a porosidade e permeabilidade são afetadas pelo tamanho do agregado.

Em relação ao tipo de agregado, Lian e Zhuge (2010) utilizaram três tipos para investigação de sua influência sobre a resistência a compressão e resistência na flexão, sendo eles o quartzito, a dolomita e o calcário. Foram utilizados diâmetros uniformes de 6,7 mm, uma faixa passante na peneira de 9,5 mm e retida na 4,75 mm e uma faixa passante na 13,2mm e retida na 4,75 mm. Destes, o agregado graúdo que apresentou melhor comportamento com relação à resistência, tanto à compressão quanto a flexão foi a dolomita com diâmetro na faixa entre 4,75 e 9,5 mm. As diferenças no comportamento dos agregados foram atribuídas a resistência, forma e textura das partículas.

- Aditivos químicos

Com relação a aditivos químicos, segundo Polastre e Santos (2006), são comumente usados retardadores e estabilizadores de absorção de água, devido ao rápido tempo de pega do concreto permeável.

De acordo com Chandrappa e Biligiri (2016b), o concreto permeável possui *slump* zero, o que torna interessante o uso de diferentes tipos de aditivos que aumentam a trabalhabilidade sem o aumento indevido no teor de água. O aditivo retardador de pega, por exemplo, pode ser usado para diminuir problemas de concretagem, uma vez que este concreto pode exigir mais tempo para sua execução devido a sua baixa trabalhabilidade.

Lian e Zhuge (2010), Zaetang *et al.* (2016), Merighi, Fortes e Bandeira (2007) utilizaram aditivo superplastificante, com o objetivo de preservar a trabalhabilidade do concreto permeável, devido à baixa relação a/c. Na pesquisa realizada por Lian e Zhuge (2010) o superplastificante usado foi baseado em um único polímero, éter caborxílico, com cadeias laterais longas, que melhora muito a dispersão do cimento, chamado de hiperplastificante.

3.2 DOSAGEM

Não há, na literatura, um método científico para dosagem do concreto permeável, como no concreto convencional. O que acontece na prática é uma dosagem empírica, baseada em faixas típicas de proporcionamento de materiais, atribuídas pela literatura. Ou seja, não há uma previsão de comportamento do concreto permeável, pois a mínima variação

de um dos parâmetros modifica as propriedades do material. Por exemplo, o teor de água está limitado a um pequeno intervalo para proporcionar resistência e permeabilidade adequadas, além de evitar que a pasta fique muito fluida e escorra, fechando os poros da estrutura (TENNIS *et al.*, 2004).

Devido a essa sensibilidade do material às alterações dos traços, torna-se necessário o conhecimento do seu comportamento diante de diferentes proporções de materiais. Nesta vertente, Holtz (2011) estudou diferentes relações cimento:agregado e água/cimento, baseadas nas recomendações da norma 522R-06 “Pervious Concrete” do American Concrete Institute (ACI). Além destes parâmetros, o autor avaliou o tipo de vibração, a forma de extração e variadas granulometrias dos agregados. Esta análise possuiu como objetivo a definição de um traço adequado para a posterior avaliação da permeabilidade e verificação da possibilidade de utilização do mesmo com relação a aspectos ambientais, técnicos e econômicos.

Batezini (2013) afirmou que as proporções dos materiais variam dependendo da disponibilidade dos insumos nos locais de uso, sendo indicado realizar experimentos e procedimentos de dosagem em laboratório, a fim de auxiliar na definição de tais proporções (dosagem racional).

Para alguns autores existem faixas típicas de proporções de materiais utilizados nas misturas de concreto permeável, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Faixas típicas de proporções de materiais em concretos permeáveis

Materiais	Proporção		
	Tennis <i>et al.</i> (2004)	Mehta e Monteiro (2014)	Batezini (2013)
Ligante hidráulico (kg/m ³)	270 a 415	270 a 415	270 a 415
Agregado (kg/m ³)	1190 a 1480	1190 a 1480	1190 a 1700
Relação água/cimento (a/c), em massa	0,27 a 0,34	0,27 a 0,34	0,27 a 0,34
Relação cimento/agregado, em massa	1:4 a 1:4,5	1:4 a 1:5,5	1:4 a 1:4,5
Relação agregado miúdo/graúdo, em massa	0 a 1:1	0 a 1:1	0 a 1:1

Fonte: Tennis *et al.* (2004); Mehta e Monteiro (2014) e Batezini (2013)

Observa-se a semelhança entre as faixas sugeridas pelos autores, apenas com pequenas variações no consumo de agregados e na relação cimento:agregado. A existência desses intervalos é interessante para a dosagem do concreto permeável, já que consiste de um método empírico.

3.3 PRODUÇÃO E EXECUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

Diversos estudos mostraram formas diferentes de realizar a mistura para a produção do concreto permeável, sendo inicialmente adicionado o agregado, seguido da água ou o aglomerante. Em relação aos tempos de mistura, estes também se modificam de pesquisa a pesquisa, variando entre 1 a 3 minutos, para cada material adicionado na betoneira.

Um método de mistura bastante difundido para o concreto permeável é o indicado por Schaefer *et al.* (2006). Estes autores avaliaram diferentes ordens de mistura e definiram um processo por meio do qual foi obtido um concreto permeável com melhores propriedades mecânicas. O procedimento indicado pelos autores consiste em: Adicionar todo o agregado na betoneira com mais 5% do peso total do cimento; misturar por 1 minuto; adicionar o restante dos materiais; misturar por 3 minutos; deixar a mistura em repouso por 3 minutos; e, por último, misturar por mais 2 minutos.

Geralmente, como o *slump* não é indicado para o concreto permeável, o controle da mistura pode ser feito através da avaliação tátil visual, como em estudos realizados por Batezini (2013) e Lamb (2014). De acordo com Batezini (2013) este é um dos métodos para controle, na prática, da produção de concreto permeável, onde se observa, após o fim do tempo de mistura, se esta apresenta um aspecto brilhoso e se todas as partículas estão inteiramente cobertas com argamassa, sendo também uma etapa empírica.

A Figura 7 exhibe três aspectos apresentados pelas misturas, ao variar o conteúdo de água.



(a)

(b)

(c)

Figura 7: Amostras de concreto permeável com diferentes teores de água; (a) pouca água; (b) quantidade adequada de água; (c) muita água (Fonte: Tennis *et al.*, 2004)

De acordo com Tennis *et al.* (2004), as misturas devem possuir controle rigoroso de água, de modo que a quantidade correta produza uma mistura com brilho e capacidade de formar uma bola (Figura 7b), sem que a pasta possa fluir para fora dos agregados (Figura 7c).

Ainda segundo Tennis *et al.* (2004) para o controle de qualidade são considerados peso unitário ou densidade aparente como parâmetros mais adequados para avaliação no estado fresco, uma vez que medidas como abatimentos não são significativas no concreto permeável.

Para Lian e Zhuge (2010) o método de compactação para produção de concreto permeável é um dos fatores mais influentes na preparação da amostra. Este processo, afeta diretamente a densidade do concreto permeável, variando numa ordem de 1600 kg/m^3 a 2000 kg/m^3 e o índice de vazios entre 15 a 25% (HOLTZ, 2011).

Em alguns casos, a compactação pode ser realizada com rolo de aço, com o objetivo de adensar o material sem prejudicar a porosidade do mesmo, buscando aliar melhor resistência a melhor porosidade (LAMB, 2014; SCHWETZ, 2015). A Figura 8 mostra a compactação executada no trabalho de Lamb (2014).



Figura 8: Compactação com rolo de aço (Fonte: LAMB, 2014)

Para se atingir uma boa compactação, o rolo deve ter um peso adequado. O apresentado na Figura 8 possui 86 cm de comprimento e mais de 80 kg.

Holtz (2011) avaliou a influência da forma de vibração no concreto permeável. Ao se comparar o concreto permeável com agregado de 19 mm, adensado com vibrador agulha e adensado manualmente com uma espátula, concluiu-se que o último se comportou melhor. Ao fazer a comparação do concreto permeável com agregado de dimensão 9,5 mm, adensado com vibrador agulha e outro adensado na mesa vibratória, verificou-se que a mesa proporcionou melhor resistência. Entretanto, esta forma de vibração intensa ocasionou obstrução dos poros, sendo então, descartada esta alternativa.

Apesar disso, Holtz (2011) indicou que pode ser possível associar uma boa resistência a compressão e uma boa permeabilidade no concreto permeável com a vibração, desde que esta seja realizada de forma adequada. Batezini (2013) reforçou esta ideia indicando que o tempo de vibração deve ser reduzido, a fim de evitar a segregação da pasta por causa do baixo teor de aglomerante neste tipo de concreto.

Em seu trabalho, este autor realizou a compactação através de 15 golpes por camada em corpos de prova cilíndricos, com posterior vibração por 10 segundos na mesa vibratória. Nas amostras prismáticas, foram efetuados 25 golpes em duas camadas, seguidos da mesma forma de vibração do cilíndrico.

Dentro desse contexto, deve-se ter o cuidado na escolha do adensamento para este tipo de concreto, visto que, segundo os autores acima citados, este parâmetro influencia diretamente nas propriedades do material.

3.4 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL

3.4.1 Trabalhabilidade e massa específica no estado fresco

De acordo com Batezini (2013) o concreto permeável no estado fresco apresenta baixa trabalhabilidade quando comparado ao concreto convencional. Tennis *et al.* (2004) indicou que o *slump*, quando medido, apresenta valores, na maioria dos casos, inferiores a 20 mm, sendo raros os casos em que o abatimento apresenta valores maiores que 50 mm. Sendo assim, o *slump test* não é indicado para este tipo de concreto (NRMCA, 2004; KEVERN, 2008; BATEZINI, 2013). Neste caso, para o controle de qualidade,

geralmente, são utilizadas a massa unitária ou a densidade aparente (TENNIS *et al.*, 2004).

Segundo Kevern (2008), a determinação de trabalhabilidade tornou-se fundamental para este tipo de concreto, devido a relação existente entre parâmetros requeridos, como resistência e permeabilidade, e o peso unitário, que depende de uma aplicação adequada do concreto. Conforme mencionado por este autor, quanto mais trabalhável uma mistura, menor a energia de compactação necessária para atingir um peso unitário maior. Tal fato está associado a água. Por isso, o seu controle é importante para que se garanta uma boa trabalhabilidade do concreto permeável fresco, sem que haja obstrução dos poros (HUSSIN, 2012).

Apesar do concreto permeável no estado fresco apresentar baixo abatimento, até mesmo zero, por conter menos água e pasta de cimento, alguns autores realizaram o ensaio para a avaliação desta propriedade, como Rizvi *et al.* (2009) e Nguyen *et al.* (2014). A Figura 9 exibe a realização do ensaio no último trabalho citado.



Figura 9: Realização do ensaio de abatimento em concreto permeável (Fonte: NGUYEN *et al.* 2014)

Como o *slump test* não é indicado para a avaliação da trabalhabilidade no concreto permeável, Batezini (2013) realizou o controle das misturas através da avaliação visual e da avaliação das massas específicas aparentes no estado fresco. Segundo o autor, a faixa indicada para esta última propriedade está entre 1300 kg/m^3 e 2000 kg/m^3 , sendo que no

estudo mencionado, os valores se aproximaram dos concretos permeáveis com alto índice de vazios, ou seja, com menor massa específica. No entanto, a NBR 16416 (ABNT, 2015) para pavimentos permeáveis, recomenda que o mínimo para a massa específica em projeto deve ser de 1600 kg/m^3 . Entretanto, em campo, após a avaliação desta propriedade no estado fresco, o valor encontrado deve estar de acordo com o que foi especificado em projeto, com tolerância de $\pm 80 \text{ kg/m}^3$.

3.4.2 Massa específica e índice de vazios no estado endurecido

A densidade do concreto permeável depende das propriedades e proporções dos materiais utilizados e dos procedimentos de compactação utilizados na sua produção. Para o tipo de concreto em estudo, considera-se uma faixa da ordem de 1600 kg/m^3 a 2000 kg/m^3 (TENNIS *et al.*, 2004), sendo o mínimo de $1600 \pm 80 \text{ kg/m}^3$ o exigido pela NBR 16416.

Batezini (2013) encontrou em sua pesquisa valores médios de massa específica aparente seca entre 1841 kg/m^3 e 1851 kg/m^3 , conforme diâmetro máximo dos agregados graúdos utilizados. Já Ghafoori e Dutta (1995) encontraram resultados de densidade entre 1570 kg/m^3 e 1938 kg/m^3 , variando as relações agregado/cimento em 4:1, 4,5:1, 5:1 e 6:1.

Ibrahim *et al.* (2014) variaram alguns parâmetros, como as frações de tamanhos do agregado graúdo, relação a/c, teor de cimento e volume de agregado graúdo. Para as diferentes misturas avaliadas, obtiveram um intervalo entre 1637 kg/m^3 e 1875 kg/m^3 para valores de densidade.

Em relação ao índice de vazios Batezini (2013) disse que esta propriedade tem influência direta nas características de resistência mecânica do material no estado endurecido. Entretanto, Mehta e Monteiro (2008) indicaram que, no concreto permeável, a relação entre porosidade e resistência não é tão simples, devido a existência das microfissuras na zona de transição. Esse fato acaba tornando difícil a previsão de resistência por relações exatas entre resistência e porosidade, mas a validade geral desta relação deve ser respeitada, uma vez que porosidades das fases componentes do concreto tornam-se fatores limitantes da resistência.

Segundo Batezini (2013), o concreto é considerado com baixa porosidade quando possui índice de vazios inferior a 15%, enquanto um índice de vazios superior a 30% caracteriza um material altamente poroso.

Este mesmo autor encontrou valores entre 24% e 25%, se aproximando do limite superior da faixa citada anteriormente, o que implica um valor elevado de índice de vazios. Por outro lado, no trabalho de Ghafoori e Dutta (1995) foram encontrados valores entre 8% e 30%, sendo que o valor mais baixo encontrado foge do estabelecido acima, caracterizando um concreto com porosidade muito baixa. Em contrapartida, Ibrahim *et al.* (2014) obtiveram valores acima de 30%, chegando até 40% de porosidade, influenciando negativamente na resistência do concreto.

Em outro estudo, desenvolvido por Huang *et al.* (2010), foram avaliados diferentes tamanhos de agregados e os efeitos da incorporação de materiais como látex, areia natural e fibra, com o objetivo de melhorar a resistência do concreto permeável. Neste caso, a porosidade variou entre 20% e 30%, concluindo-se, que para os três agregados graúdos com tamanhos diferentes, a porosidade foi similar, indicando que a graduação dos agregados não teve efeito significativo nos resultados da porosidade.

No trabalho desenvolvido por Zhang *et al.* (2018) foi avaliada a porosidade de misturas de concretos permeáveis através de imagens de tomografia computadorizada. Inicialmente, foram definidas quatro porosidades iniciais como alvos das misturas. A partir da análise dos corpos de prova dos concretos foram determinadas a porosidade real, porosidade 2D média, porosidade 3D e a porosidade conectada em 3D. A porosidade 2D foi obtida pela relação entre a área de poros e a área total da imagem de tomografia computadorizada, em 21 planos equidistantes da amostra. A 3D foi calculada através de uma relação de volume e a partir dessa visão tridimensional foi determinada a porosidade 3D conectada, com os poros efetivos, capazes de transportar água pelo material (Figura 10).

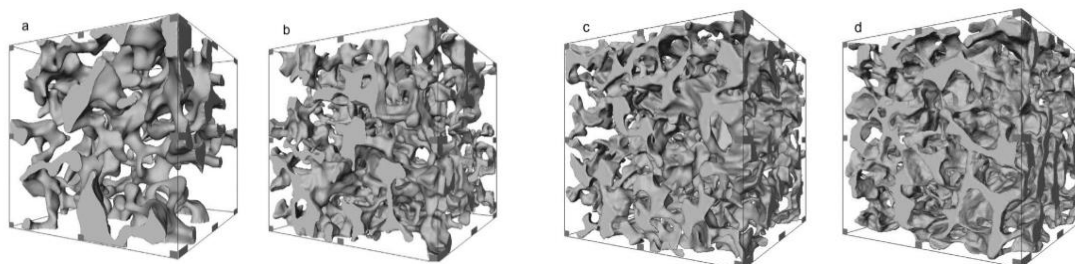


Figura 10: Modelos de poros conectados em 3D

Os valores obtidos para todos os tipos de porosidades avaliadas são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Comparação entre as porosidades

Grupos	Porosidades					
	Alvo (%)	Real (%)	2D média (%)	3D (%)	Conectada em 3D (%)	Efetiva (Conectada 3D/3D) (%)
A	10	13,2	14,9	14,1	10,6	0,752
B	15	20,3	21,1	20,8	18,4	0,904
C	20	24,8	23,8	23,1	22,3	0,965
D	25	28,0	26,7	26,2	25,8	0,985

Fonte: Zhang *et al.* (2018)

Observa-se que a porosidade conectada em 3D é a menor, dentre as porosidades avaliadas, e a que mais se aproxima da porosidade alvo. A diferença entre esta porosidade e a porosidade em 3D indica que existem poros no concreto permeável que não estão conectados, não influenciando na permeabilidade do material.

3.4.3 Resistência a compressão axial

As propriedades mecânicas do concreto permeável são consideradas importantes, uma vez que controlam a espessura de projeto da camada de pavimento e suas características funcionais e de durabilidade. Dentre as principais propriedades para a concepção de pavimentos, considerando o comportamento estrutural e funcional estão resistência à compressão, resistência à flexão, resistência a fadiga, resistência à abrasão e resistência ao gelo e degelo em locais com clima frio (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016b).

De acordo com CIRIA (2015), os materiais utilizados para a construção de pavimentos permeáveis devem garantir o equilíbrio entre a obtenção de bom desempenho estrutural e permeabilidade adequada, com vazios para armazenamento da água.

TENNIS *et al.* (2004) indicaram que as misturas de concreto permeável devem desenvolver resistências a compressão entre 3,5 MPa a 28 MPa, sendo que valores em torno de 17 MPa são considerados típicos. Além disso, os autores disseram que as propriedades e combinações de materiais específicos, assim como técnicas de colocação e condições ambientais irão ditar a resistência real no local de aplicação, assim como em qualquer concreto.

Uma característica importante a ser citada é que o concreto permeável não tem a relação a/c e resistência à compressão tão bem definida quanto nos concretos convencionais (ACI 522R-06, 2006). Este documento mencionou ainda, que uma relação a/c muito baixa pode provocar uma adesão reduzida entre as partículas de agregados, gerando problemas para a formação do conglomerado. Já no caso de uma relação a/c alta, a pasta pode ficar muito fluida, não apenas cobrindo o agregado, podendo acabar preenchendo os vazios do concreto. Sendo assim, por reduzir a quantidade de vazios na mistura, pode ocorrer um aumento na resistência com o aumento da relação a/c, ao contrário do que acontece em concretos convencionais.

No trabalho desenvolvido por Holtz (2011), este comportamento foi confirmado, percebendo-se uma tendência no aumento da resistência, conforme se aumentou a relação a/c. Concluiu-se, portanto, que uma maior relação a/c promove melhor trabalhabilidade, uma vez que a pasta consegue lubrificar melhor a mistura, permitindo melhor acomodação dos agregados, que ficam mais bem cobertos pela pasta. Os resultados demonstraram o esperado, uma vez que a melhor ligação entre as partículas de agregados, com uma pasta mais fluida, garantiu a melhor compactação da mistura. Porém este aumento na resistência deve ser considerado interessante até o ponto em que não prejudique a permeabilidade do concreto.

3.4.4 Resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral

A resistência a tração na flexão é, conforme mencionado por Batezini (2013), uma propriedade de grande importância para o comportamento estrutural do concreto permeável, uma vez que este é geralmente usado como revestimento de pavimentos. De acordo com o autor, esta é influenciada por muitos fatores, dentre eles, o índice de vazios. O autor afirmou que há escassez de resultados referentes a esta propriedade devido às características irregulares que, normalmente, são observadas nos corpos de prova de concreto permeável, dificultando a realização deste tipo de ensaio em laboratório.

Segundo Tennis *et al.* (2004), diversos fatores influenciam a resistência à tração na flexão no concreto permeável, principalmente, o grau de compactação, a porosidade e a relação agregado/cimento. Para estes autores, a resistência à tração na flexão de concretos permeáveis varia entre 1,0 e 3,8 MPa. Já a NBR 16416 (2015) recomenda valores iguais ou acima de 1 MPa para tráfego de pedestres e iguais ou acima de 2 MPa para tráfego leve, em concreto permeável moldado no local. Por outro lado, a placa de concreto permeável deve possuir uma resistência a flexão igual ou superior a 2 MPa.

Lim *et al.* (2013) avaliaram esta propriedade e obtiveram valores entre 1,86 MPa e 4,48 MPa, variando parâmetros como relação a/c, conteúdo de cimento e uso de superplastificante. As relações a/c avaliadas foram 0,2 e 0,3, e os conteúdos de cimento utilizados foram 367 kg/m³, 430 kg/m³ e 496 kg/m³. Os maiores valores encontrados foram das misturas com maior conteúdo de cimento, enquanto a mistura com a menor relação a/c apresentou o menor resultado, mesmo com o uso de aditivo superplastificante. Segundo o autor, a mistura com relação a/c de 0,2 ficou muito seca e quebradiça, mesmo com maior dosagem de superplastificante.

Por outro lado, Fu *et al.* (2014) observaram um aumento da resistência à tração na flexão com a redução da relação a/c. Os valores utilizados para este parâmetro foram 0,25, 0,35 e 0,45, utilizando-se superplastificante apenas para a relação a/c de 0,25. Além disso, verificou-se um aumento da resistência à tração na flexão com a redução do teor de agregados e com a redução do tamanho do agregado. Segundo o autor, diferente do que acontece no concreto convencional, que tem a sua resistência guiada pela zona de

transição, no concreto permeável essa propriedade é determinada pelos vazios do material. Desta forma, o aumento no tamanho ou no teor dos agregados provoca o aumento do volume de vazios, reduzindo a resistência mecânica do concreto permeável. Os resultados encontrados variaram entre 2,18 MPa e 4,76 MPa.

Neithalath (2003) observou uma tendência à redução dos valores de resistência à tração na flexão com o aumento do tamanho do agregado no concreto permeável. O autor afirmou que este aumento promove maior tamanho dos poros e maior porosidade total do material, reduzindo a sua resistência.

Mahalingam e Mahalingam (2016) obtiveram valores de resistência à tração na flexão no concreto permeável entre 1,88 MPa a 3,21 MPa, variando a dimensão e o teor de agregados da mistura. Observou-se que o aumento do tamanho agregado e o aumento do teor de agregados ocasionaram a redução da resistência à tração na flexão.

3.4.5 Permeabilidade

A permeabilidade é uma das principais propriedades do concreto permeável utilizado em pavimentação, pois este material tem como uma de suas funções mais importantes a capacidade de permitir que a água precipitada possa infiltrar em seus poros, reduzindo assim, o escoamento superficial. Segundo Tennis *et al.* (2004), as taxas de fluxo típicas em concreto permeável variam entre 120 l/min/m² (0,2 cm/s) e 320 l/min/m² (0,54 cm/s). A NBR 16416 (2015) recomenda que o pavimento permeável apresente, quando recém-construído, um coeficiente de permeabilidade superior a 0,1 cm/s.

Holtz (2011), Batezini (2013) e Lamb (2014) avaliaram a permeabilidade através do uso do permeâmetro de carga variável sugerido por outros autores. Segundo Batezini (2013) a maioria dos pesquisadores utiliza este método, devido a sua praticidade.

Lamb (2014) avaliou o coeficiente de permeabilidade tanto no topo quanto no fundo de cada corpo de prova. Verificou-se que os valores variaram entre 0,1 cm/s e 0,3 cm/s, sendo a maioria maior que 0,2 cm/s. Além disso, percebeu-se uma grande variabilidade entre corpos de prova de mesma origem, o que mostra que a variação da distribuição de poros neste material pode variar bastante.

Batezini (2013) encontrou valores médios entre 0,13 cm/s e 0,14 cm/s. Concluiu-se que, neste estudo, não houve variação significativa entre os coeficientes de permeabilidade das diferentes misturas, tanto em relação ao topo, quanto ao fundo de cada amostra.

Holtz (2011) variou a forma de vibração, a forma de obtenção dos corpos de prova e os traços para verificar a influência na permeabilidade de concretos permeáveis. Primeiramente, foi analisada a influência da forma de vibração em uma mistura com traço 1:4 (cimento:agregado), utilizando brita 1 ($d_{máx} = 19$ mm) com 7% de areia. Os corpos de prova moldados, em mesa vibratória, apresentaram permeabilidade menor, na ordem de 200 l/min/m², em comparação ao adensamento com vibrador agulha, que chegou a 497 l/min/m².

Em relação a forma de obtenção dos corpos de prova, moldados ou extraídos, para três diferentes misturas utilizando brita 1 ($d_{máx} = 19$ mm), brita 0 ($d_{máx} = 9,5$ mm) e brita 1 com 7% de areia, adensados com vibrador agulha. Os resultados mostraram uma tendência a maior permeabilidade dos corpos de prova moldados diretamente nas formas metálicas. Entretanto, a utilização da areia influenciou nesta propriedade. Com base na Figura 11, observa-se que os corpos de prova extraídos tiveram menor permeabilidade que os corpos de prova moldados. Segundo o autor, estes resultados podem indicar que o empacotamento menos eficiente na forma metálica acabou deixando uma maior quantidade de vazios na mistura, quando comparados aos extraídos, exceto para a mistura contendo areia.

Holtz (2011) afirmou que se este comportamento for confirmado em outras pesquisas, pode ter grande importância para o dimensionamento e controle de qualidade de pavimentos de concreto permeáveis, uma vez que, a utilização de corpos cilíndricos moldados para avaliação desta propriedade pode superestimar a permeabilidade do material.

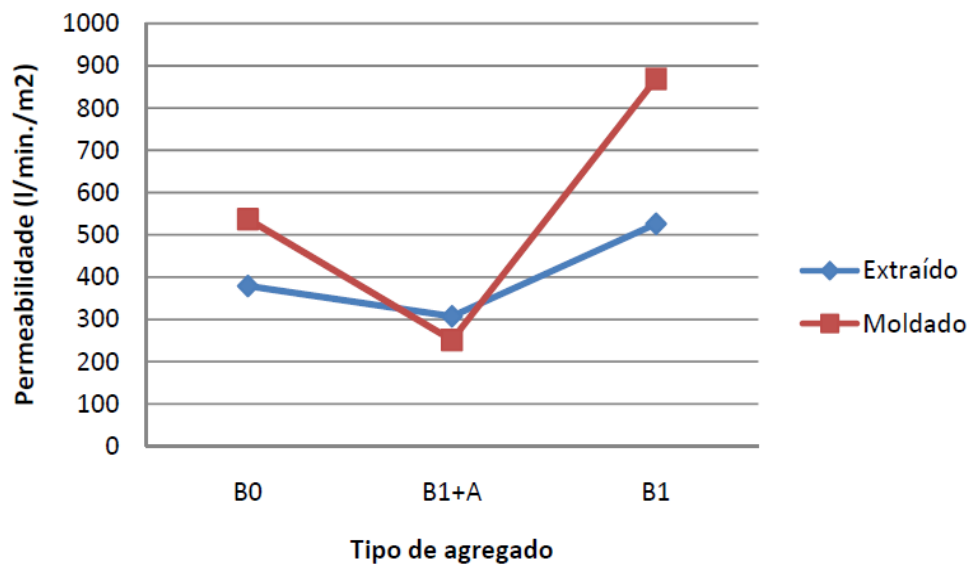


Figura 11: Variação da permeabilidade com a forma de produção dos corpos de prova e tipo de agregado, com traço 1:4 (Fonte: Holtz, 2011)

De acordo com a classificação de permeabilidade para diferentes tipos de solos, o concreto permeável deve apresentar, pelo menos, permeabilidade média, assim como a areia.

Desta forma, é necessária a avaliação desta propriedade com o objetivo de verificar o comportamento do material diante desta variável.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental realizado neste estudo tem como objetivo verificar a influência de três parâmetros de dosagem, sendo estes, teor de agregados (m), em massa, relação água/cimento (a/c) e dimensão máxima do agregado graúdo no comportamento de concretos permeáveis.

Para esta verificação, foram definidos três valores para cada um dos fatores mencionados acima, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Valores dos fatores controláveis na produção dos concretos permeáveis

Teor de agregados (m)	Relação a/c	D _{máx} do agregado (mm)
3	0,30	9,5
4	0,32	12,5
5	0,34	19,0

A variação de cada parâmetro foi escolhida baseando-se na revisão de literatura, exceto para o teor de agregados igual a 3, por isso optou-se por acrescentar um traço com menor teor de agregados para a verificação do comportamento do material, quanto à resistência mecânica e permeabilidade.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas as estruturas do Laboratório de Materiais de Construção e Laboratório de Estruturas do Departamento de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Neste local, foram realizados os ensaios de caracterização dos materiais, a produção dos concretos, as moldagens dos corpos de prova e os ensaios para avaliação das propriedades dos concretos permeáveis.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Cimento Portland

Para a produção do concreto foi utilizado o cimento Portland composto com pozolana, CP II-Z 32. A escolha por este cimento foi devido a sua disponibilidade e por ser comumente utilizado em obras da região. As principais características do cimento, obtidas por meio de ensaios normatizados, são exibidas na Tabela 5.

Tabela 5: Características do cimento Portland CP II-Z 32 utilizado na produção do concreto

Característica	Valor	Unidade
Resistência à compressão – NBR 7215 (ABNT, 1996)	17,47 (3 dias)	
	21,79 (7 dias)	MPa
	32,35 (28 dias)	
Massa específica – NBR NM 23 (ABNT, 2001)	3,06	g/cm ³

4.1.2 Agregado gráudo natural

A dimensão máxima do agregado gráudo foi uma das variáveis avaliadas no estudo do comportamento do concreto permeável. Para isso, foram utilizadas três diferentes dimensões, variando entre 4,75 mm e 19 mm, produzidas a partir do mesmo agregado gráudo natural, que foi uma brita de origem granítica, proveniente da pedreira Rio Branco, com a composição granulométrica exibida na Figura 12.

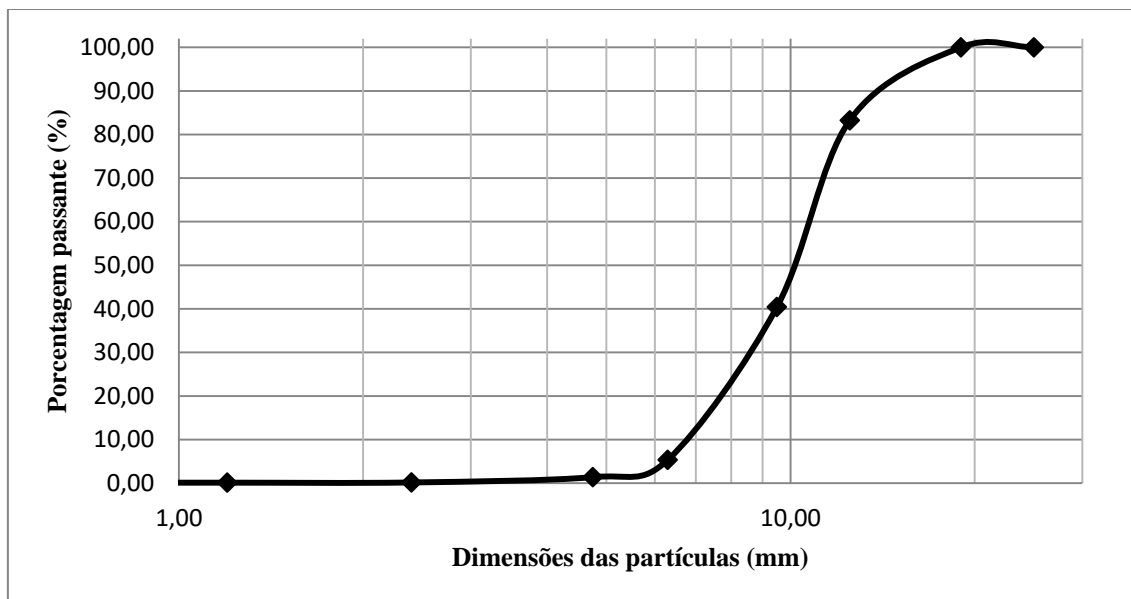


Figura 12: Curva de composição granulométrica do agregado graúdo natural, determinada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003^a)

As demais características são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6: Características do agregado graúdo utilizado na produção do concreto permeável

Característica	Valor	Unidade
Dimensão máxima da brita – NBR NM 248 (ABNT, 2003 ^a)	19,00	mm
Módulo de finura – NBR NM 248 (ABNT, 2003 ^a)	6,58	-
Massa específica – NBR NM 53 (ABNT, 2003c)	2,76	g/cm ³

As granulometrias definidas para o estudo foram obtidas através do peneiramento da brita em peneirador mecânico. Para isso, foram usadas peneiras com os valores correspondentes a cada dimensão máxima desejada, sendo utilizado o material passante em cada uma delas.

A primeira faixa foi determinada como a passante na peneira 9,5 mm e retido na peneira 4,75 mm (Granulometria 1). Outra faixa foi composta por grãos que passaram na peneira 12,5 mm e ficaram retidos na peneira 4,75 mm (Granulometria 2). A outra faixa representa os grãos que passaram na peneira 19,0 mm e retidos na peneira 4,75 mm

(Granulometria 3). Desta forma, a Tabela 7 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados graúdos utilizados no estudo, após o peneiramento.

Tabela 7: Distribuição granulométrica das britas utilizadas

Peneira (mm)	% Passante acumulado		
	Granulometria 1	Granulometria 2	Granulometria 3
25,00	100,00	100,00	100,00
19,00	100,00	100,00	100,00
12,50	100,00	100,00	83,25
9,50	100,00	40,41	40,41
6,30	5,35	5,35	5,35
4,75	0,00	0,00	0,00
2,40	0,00	0,00	0,00
1,20	0,00	0,00	0,00
0,60	0,00	0,00	0,00
0,30	0,00	0,00	0,00
0,15	0,00	0,00	0,00
Fundo	0,00	0,00	0,00

Para a retirada de pulverulentos e impurezas, o agregado foi lavado e colocado em área coberta para secar.

4.1.3 Água

Foi utilizada água da rede de abastecimento da Universidade Estadual de Feira de Santana.

4.2 MISTURAS, PRODUÇÃO E MOLDAGEM DOS CONCRETOS

Na produção dos concretos permeáveis deste estudo foram utilizados cimento, agregado graúdo e água.

Foram adotadas as relações cimento:agregado (1:m) de 1:3, 1:4 e 1:5, para a verificação do comportamento do concreto diante da variação deste parâmetro. Apesar de concretos com maiores valores de m serem mais econômicos, a menor quantidade de pasta pode

influenciar negativamente na resistência. Sendo assim, decidiu-se utilizar a relação 1:3, que está abaixo da faixa indicada na Tabela 2 para verificar o comportamento do material.

As diferentes granulometrias utilizadas foram citadas no item anterior, sendo estas: granulometria 1, granulometria 2 e granulometria 3.

As relações a/c determinadas para o estudo foram de: 0,30, 0,32 e 0,34, dentro do estabelecido na Tabela 2.

4.2.1 Misturas

Foram produzidas 27 misturas de concreto permeável, considerando as três variáveis definidas para este estudo (Tabela 4). A Tabela 8 exibe as vinte e sete misturas produzidas para a avaliação da influência dos parâmetros.

O consumo de cimento foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\delta_c} + \frac{a}{\delta_a} + \frac{b}{\delta_b} + a/c} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto, 1000 dm³

δ_c = massa específica do cimento

δ_a = massa específica da areia

δ_b = massa específica da brita

1:a:b:a/c é o traço do concreto em massa

O teor de ar incorporado não foi considerado, uma vez que não se conhece o valor médio para o caso do concreto permeável.

Tabela 8: Proporções de materiais utilizados na produção do concreto

Relação cimento:agregado	Composição granulométrica	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m³)	Consumo de agregado (kg/m³)
1:3	4,75 – 9,5 mm	0,30	583,5	1750,5
1:3	4,75 – 12,5 mm	0,30	583,5	1750,5
1:3	4,75 – 19 mm	0,30	583,5	1750,5
1:3	4,75 – 9,5 mm	0,32	576,8	1730,3
1:3	4,75 – 12,5 mm	0,32	576,8	1730,3
1:3	4,75 – 19 mm	0,32	576,8	1730,3
1:3	4,75 – 9,5 mm	0,34	570,2	1710,6
1:3	4,75 – 12,5 mm	0,34	570,2	1710,6
1:3	4,75 – 19 mm	0,34	570,2	1710,6
1:4	4,75 – 9,5 mm	0,30	481,7	1926,7
1:4	4,75 – 12,5 mm	0,30	481,7	1926,7
1:4	4,75 – 19 mm	0,30	481,7	1926,7
1:4	4,75 – 9,5 mm	0,32	477,1	1908,3
1:4	4,75 – 12,5 mm	0,32	477,1	1908,3
1:4	4,75 – 19 mm	0,32	477,1	1908,3
1:4	4,75 – 9,5 mm	0,34	472,6	1890,3
1:4	4,75 – 12,5 mm	0,34	472,6	1890,3
1:4	4,75 – 19 mm	0,34	472,6	1890,3
1:5	4,75 – 9,5 mm	0,30	410,1	2050,5
1:5	4,75 – 12,5 mm	0,30	410,1	2050,5
1:5	4,75 – 19 mm	0,30	410,1	2050,5
1:5	4,75 – 9,5 mm	0,32	406,8	2033,9
1:5	4,75 – 12,5 mm	0,32	406,8	2033,9
1:5	4,75 – 19 mm	0,32	406,8	2033,9
1:5	4,75 – 9,5 mm	0,34	403,5	2017,4
1:5	4,75 – 12,5 mm	0,34	403,5	2017,4
1:5	4,75 – 19 mm	0,34	403,5	2017,4

4.2.2 Produção dos concretos

Os concretos permeáveis foram produzidos em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 320 litros. A execução da mistura seguiu a recomendação de Schaefer *et*

al. (2006), em que o tempo de repouso foi reduzido de três minutos para um minuto e meio, devido ao clima mais quente, para evitar a perda de água e consequente perda de trabalhabilidade do concreto. Assim, primeiramente, foram adicionados todos os agregados graúdos e 5% da massa total do cimento. Após a mistura de um minuto, a betoneira foi desligada para a adição do restante dos materiais e ligada novamente por três minutos. Em seguida, a mistura ficou em repouso por um minuto e meio, para posteriormente ser misturada por mais 2 minutos. Após este processo, foi realizada a inspeção visual da mistura de concreto permeável, que deve possuir aspecto metálico, conforme Figura 13.



Figura 13: Avaliação tátil visual da mistura de concreto permeável

A Figura 14 apresenta o aspecto do material, para um dos traços avaliados (1:5 – 0,34 – 9,5 mm), após a mistura em betoneira.



Figura 14: Aspecto do concreto permeável após a mistura em betoneira

4.2.3 Propriedades no estado fresco

Após o processo de produção, foi feito o ensaio de espalhamento na Mesa de Graff, segundo a NBR NM 68 (ABNT, 1998), para a obtenção do espalhamento médio. Para avaliar melhor o comportamento deste material, em relação a sua trabalhabilidade (valor do espalhamento), utilizou-se o software ImageJ. A utilização deste programa foi devida à forma irregular do espalhamento observado neste tipo de concreto que, diferentemente do concreto convencional, não possui sempre uma forma mais arredondada.

Além do espalhamento foi obtida também, a massa específica do concreto no estado fresco, conforme a NBR 9833 (ABNT, 2008).

4.2.4 Moldagem e cura dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos e prismáticos. A dimensão e as quantidades dos corpos de prova estão apresentadas no item 4.3.

Em relação ao adensamento, foi utilizada a compactação que consiste em três camadas com 15 golpes cada, utilizando bastão metálico, conforme metodologia de Batezini (2013). Porém, este autor realizou, após os golpes, a vibração em mesa vibratória. Neste trabalho, optou-se por realizar a vibração com vibrador agulha, na face externa, por 5 segundos, em dois lados opostos do molde. Deve-se ter cuidado na escolha do tempo de vibração para evitar que a pasta escorra e promova o fechamento dos poros do concreto.

Posteriormente, os corpos de prova foram curados nos moldes a temperatura ambiente, por 24 horas, devidamente cobertos com lona plástica para evitar a perda de água por evaporação. Após este período, os mesmos foram desmoldados e imersos em água, e assim mantidos até a data dos ensaios.

4.3 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial seguiu o procedimento da NBR 5739 (ABNT, 2007). Devido a rugosidade no topo e base das amostras, as mesmas foram capeadas com enxofre de modo a garantir seu nivelamento. O resultado foi a média de 5 corpos de prova (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura), na idade de 28 dias.

4.3.2 Resistência à tração na flexão

Foram avaliados 3 corpos de prova prismáticos com dimensões 75 x 75 x 285 mm. Os corpos de prova foram ensaiados na máquina de ensaios, estática, servo-elétrica, marca Shimadzu, modelo Autograph AGS-X, com célula de carga cuja capacidade máxima é de 100kN. A velocidade de ensaio foi de 7500 N/min ou 4 MPa/min. Foram avaliados 3 corpos de prova para cada mistura de concreto permeável.

4.3.3 Massa específica e porosidade

A determinação da massa específica e porosidade das misturas foi realizada de acordo com a metodologia prescrita na NBR 9778 (ABNT, 2005, em três corpos de prova, de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, aos 28 dias. Para a obtenção de um resultado coerente para o concreto permeável, foi necessária uma adaptação do ensaio indicado pela norma. Desta forma, na etapa de pesagem da amostra saturada, a mesma foi retirada da água e rapidamente colocada dentro de um recipiente, para que a água dos vazios não fosse perdida. Após a colocação no recipiente, retirou-se o excesso de água da superfície do corpo de prova com pano úmido, sendo ambos pesados e utilizados no cálculo.

4.3.4 Permeabilidade

Para a verificação da permeabilidade dos corpos de prova em laboratório, foi utilizado um permeâmetro de carga variável, baseado no equipamento desenvolvido por Neithalath

(2003), exibido na Figura 15. Apesar de possuir algumas adaptações, o equipamento tem o mesmo princípio de funcionamento do autor citado.

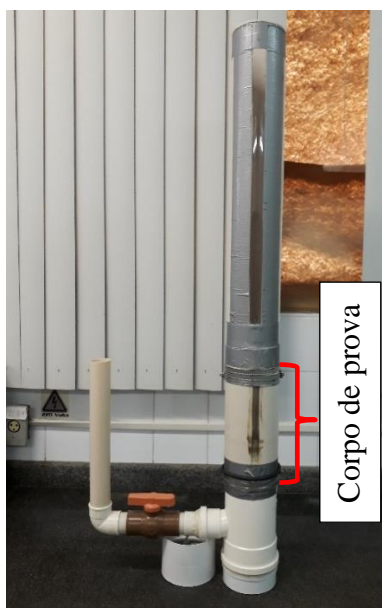


Figura 15: Permeâmetro de carga variável para determinação da condutividade hidráulica

O permeâmetro consiste em um tubo, com um T de PVC acoplado a um CAP, com 220 mm de altura, e diâmetro de 96 mm. Além deste, há também um outro tubo graduado, de 635 mm de altura, que é utilizado como reservatório sobre o corpo de prova. Esses dois tubos são conectados por um tubo intermediário que é utilizado para a inserção da amostra de concreto permeável. A união deste conjunto é selada com silicone, de forma que a passagem da água ocorra, apenas, por meio da amostra de concreto. Além disso, a amostra, antes de ser inserida no tubo intermediário é selada com vaselina e filme plástico ao redor de sua face externa de modo a garantir o fluxo de água, apenas, vertical. Na parte inferior, um tubo de 50 mm de diâmetro foi acoplado ao conjunto, com uma válvula que, quando aberta, permite a passagem da água através do corpo de prova, além de permitir o controle do tempo de ensaio. Ao final do equipamento, foi colocado um tubo vertical, que ultrapassa em 10 mm o topo da amostra de concreto permeável, para garantir a saturação desta quando a válvula é aberta. A permeabilidade é calculada a partir do momento em que se contabiliza o tempo em que a lâmina d'água passa de uma determinada altura (h_1) a outra (h_2), ambas previamente definidas. Este procedimento foi repetido por 3 vezes na mesma amostra já saturada. Foram utilizados três corpos de prova com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, para cada mistura. O cálculo do valor do

coeficiente de permeabilidade (K) é feito através da lei de Darcy, com a utilização do tempo médio:

$$K = \frac{A1L}{A2t} \log \frac{h2}{h1} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

A1 = Área de seção transversal da amostra

A2 = Área de seção transversal do tubo de carga

L = Altura da amostra

t = tempo médio

4.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Para a verificação da influência dos fatores nas propriedades do concreto permeável, realizou-se um planejamento fatorial 3^3 , com 3 fatores e 3 níveis, já apresentados na Tabela 4. Neste tipo de planejamento, o modelo de regressão é dado por:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{33}x_3^2 + \varepsilon \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Y_i = variável dependente

x_1, x_2 e x_3 = variáveis independentes

β_i, β_{ij} = parâmetros que representam os efeitos dos fatores e da interação entre os mesmos

ε = erro aleatório

As variáveis dependentes avaliadas foram: massa específica no estado endurecido, índice de vazios, permeabilidade, resistência à compressão e resistência à tração na flexão.

Os resultados experimentais obtidos foram avaliados estatisticamente por meio de uma Análise de Variância Univariável (ANOVA). Esta análise permitiu a verificação da influência do teor de agregados (m), da relação a/c e do diâmetro máximo da brita (dm_{\max}),

bem como a interação entre estes fatores, sobre as propriedades avaliadas. Para isso, utilizou-se um nível de significância de 5%.

5 RESULTADOS

5.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

5.1.1 Massa específica

Na Tabela 9 encontra-se apresentado os resultados de massa específica (ME) no estado fresco para todas as misturas produzidas.

Tabela 9: Resultados de massa específica no estado fresco

M	Misturas		ME estado fresco (g/cm ³)
	Relação a/c	dm _{máx}	
3	0,30	9,50	2,01
3	0,30	12,50	2,00
3	0,30	19,00	1,99
3	0,32	9,50	2,02
3	0,32	12,50	2,02
3	0,32	19,00	2,03
3	0,34	9,50	2,08
3	0,34	12,50	2,09
3	0,34	19,00	2,09
4	0,30	9,50	1,83
4	0,30	12,50	1,91
4	0,30	19,00	1,89
4	0,32	9,50	1,86
4	0,32	12,50	1,91
4	0,32	19,00	1,92
4	0,34	9,50	1,93
4	0,34	12,50	1,93
4	0,34	19,00	1,97
5	0,30	9,50	1,76
5	0,30	12,50	1,85
5	0,30	19,00	1,79
5	0,32	9,50	1,79
5	0,32	12,50	1,86
5	0,32	19,00	1,87
5	0,34	9,50	1,80
5	0,34	12,50	1,87
5	0,34	19,00	1,89

Nota: ME – Massa específica

Os resultados apresentados, de um modo geral, verifica-se que a massa específica no estado fresco variou entre 1,76 e 2,09 g/cm³. A NBR 16416 (ABNT, 2015) recomenda valor mínimo de massa específica de 1,6 g/cm³ para pavimentos permeáveis. Com base na referida norma, pode-se dizer então, que todas as misturas atenderam a este requisito. Entretanto, para Batezini (2013), a faixa indicada para esta propriedade deve variar entre 1,3 e 2,0 g/cm³. A partir desta análise, apenas as misturas com elevado teor de pasta (m = 3), apresentaram valores acima dos indicados na literatura. Este comportamento está associado a maior quantidade de cimento nas misturas, comparada com as demais.

Avaliando a massa específica em relação aos parâmetros de dosagem, separadamente, pode-se dizer que no que se refere à influência do teor de agregados, verifica-se que à medida que o m aumenta para o mesmo relação a/c e diâmetro máximo, a massa específica reduz. Isso acontece porque com o aumento de m, cresce o consumo de brita, reduzindo, com isso, o consumo de cimento.

Já variando a relação a/c e mantendo o teor de agregados e o diâmetro máximo, verifica-se comportamento contrário, ou seja, acréscimo nos valores de massa específica à medida que a relação a/c aumenta. Apesar de apresentar comportamento diferente do concreto convencional, este fato pode ser justificado devido a mistura ficar mais trabalhável com o acréscimo de água, ou seja, a pasta apresenta maior fluidez e tem a facilidade de escorrer por entre os grãos. Isto propicia a diminuição dos vazios entre os agregados durante o processo de produção do concreto.

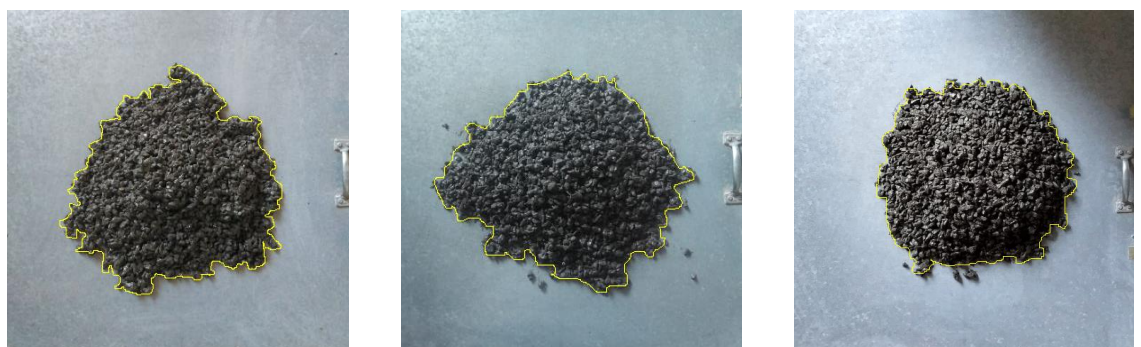
5.1.2 Espalhamento na mesa de Graff

Os resultados do ensaio de espalhamento da mesa de Graff foram obtidos a partir das duas medidas indicadas na norma do ensaio e por meio do software ImageJ, que permite a obtenção da área do espalhamento através da foto, podendo-se assim, obter um diâmetro médio, dado pela Equação 4.

$$D = \sqrt{\frac{4 * \text{área}}{\pi}}$$

Equação 4

Os resultados para as medidas do espalhamento de 3 traços obtidas em campo e através do software ImageJ são exibidas na Figura 16. Os resultados de todos os traços podem ser observados no Apêndice 1.



1:3 – 0,30 – 9,5

1:4 – 0,30 – 9,5

1:5 – 0,30 – 9,5

Espalhamento medido = 400 mm

Espalhamento medido = 390 mm

Espalhamento medido = 385 mm

Espalhamento ImageJ = 400 mm

Espalhamento Image J = 395 mm

Espalhamento Image J = 375 mm

Figura 16: Espalhamentos na mesa de Graff para 3 misturas de concreto permeável

Observa-se que o espalhamento na mesa de Graff do concreto permeável possui uma forma irregular, devido à composição do material. A maioria dos resultados observados encontra-se na faixa de 400 ± 10 mm, entretanto não se observa uma tendência de comportamento consistente quando há a variação dos parâmetros em estudo, como pode ser visto na Figura 17.

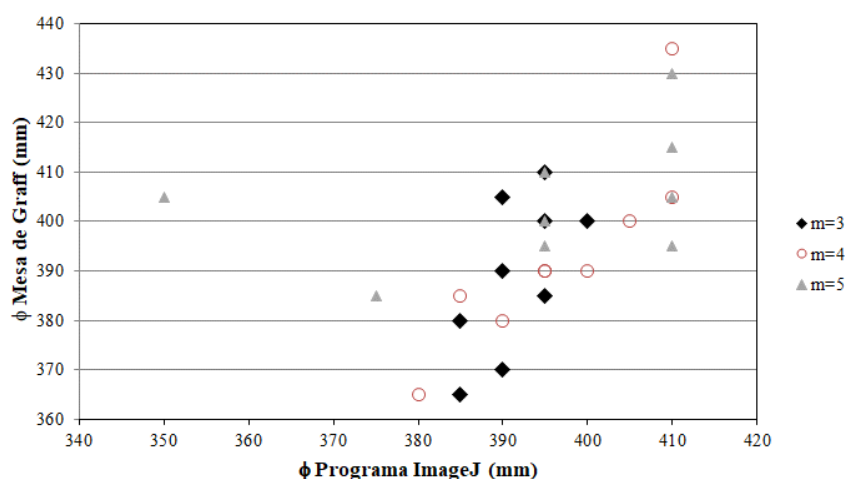


Figura 17: Relação entre os diâmetros obtidos na mesa de Graff e no programa ImageJ para todas as misturas

A partir dos dados apresentados na Figura 17, verifica-se que não existe uma linha de tendência entre os diâmetros obtidos através da mesa de Graff com os diâmetros obtidos pelo programa ImageJ. Ou seja, há uma grande dispersão entre os resultados. Diante desse fato, pode dizer que assim como o slump test (NRMCA, 2004; KEVERN, 2008; BATEZINI, 2013), a mesa de Graff não é indicada para avaliar a consistência de concretos permeáveis.

5.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados de massa específica (ME), índice de vazios (Iv) e permeabilidade (k) para todas as misturas produzidas.

Tabela 10: Resultados experimentais dos ensaios físicos realizados nos concretos permeáveis

Misturas			ME (g/cm ³)±sd(CV)	Iv (%)±sd(CV)	k (cm/s)±as(CV)
m	a/c	dmáx (mm)			
3	0,30	9,5	2,08±0,02(0,9)	20,61±0,84(4,1)	0,10±0,00(4,4)
	0,30	12,5	2,11±0,01(0,7)	20,04±0,90(4,5)	0,12±0,01(10,1)
	0,30	19,0	2,13±0,02(1,1)	18,90±1,11(5,8)	0,04±0,00(7,1)
	0,32	9,5	2,09±0,01(0,4)	19,26±0,44(2,3)	0,06±0,02(29,9)
	0,32	12,5	2,14±0,01(0,7)	17,71±0,10(0,6)	0,04±0,01(30,7)
	0,32	19,0	2,15±0,01(0,3)	16,82±0,37(2,2)	0,03±0,01(47,6)
	0,34	9,5	2,12±0,01(0,6)	17,34±0,32(1,9)	0,04±0,01(21,5)
	0,34	12,5	2,12±0,01(0,7)	17,53±0,04(0,2)	0,04±0,02(44,0)
	0,34	19,0	2,09±0,02(0,8)	18,90±0,83(4,4)	0,07±0,00(3,9)
4	0,30	9,5	1,92±0,00(0,2)	29,57±0,11(0,4)	1,39±0,21(15,0)
	0,30	12,5	2,05±0,01(0,2)	24,54±0,36(1,5)	0,96±0,15(15,4)
	0,30	19,0	2,02±0,02(1,1)	26,04±0,99(3,8)	0,89±0,06(6,8)
	0,32	9,5	2,02±0,01(0,6)	26,01±0,49(1,9)	0,73±0,09(12,6)
	0,32	12,5	2,02±0,01(0,4)	26,26±0,11(0,4)	0,59±0,29(48,4)
	0,32	19,0	2,06±0,02(0,8)	24,03±0,63(2,6)	0,55±0,06(11,4)
	0,34	9,5	2,01±0,01(0,5)	23,87±0,72(3,0)	0,29±0,09(29,6)
	0,34	12,5	2,04±0,01(0,3)	21,83±0,60(2,8)	0,21±0,12(56,6)
	0,34	19,0	2,07±0,00(0,1)	19,90±1,97(9,9)	0,14±0,05(36,3)
5	0,30	9,5	1,96±0,01(0,4)	28,57±0,17(0,6)	1,43±0,08(5,8)
	0,30	12,5	1,98±0,01(0,7)	27,93±0,30(1,1)	1,33±0,05(4,1)
	0,30	19,0	2,02±0,01(0,3)	26,61±0,33(1,2)	1,62±0,09(5,7)
	0,32	9,5	1,89±0,03(1,6)	30,86±1,26(4,1)	1,51±0,24(15,9)
	0,32	12,5	1,95±0,02(1,0)	28,67±0,70(2,4)	0,90±0,10(11,2)
	0,32	19,0	2,03±0,02(1,1)	26,13±0,84(3,2)	1,38±0,10(7,4)
	0,34	9,5	1,98±0,03(1,3)	27,52±0,97(3,5)	1,29±0,01(0,9)
	0,34	12,5	1,99±0,02(0,9)	27,11±0,64(2,4)	0,99±0,11(11,1)
	0,34	19,0	2,01±0,01(0,7)	25,95±0,26(1,0)	0,99±0,11(11,4)

Nota: m – teor de agregados; a/c – relação água/cimento; dmáx – dimensão máxima do agregado; SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Fc – resistência à compressão; Ftf – resistência à tração na flexão.

A Tabela 11 apresenta a significância das variáveis independentes e da interação entre os parâmetros de dosagem, para as propriedades de ME, Iv e k, em todos os concretos permeáveis produzidos, obtidos a partir da ANOVA.

Tabela 11: Significância das variáveis independentes e da interação a partir da ANOVA

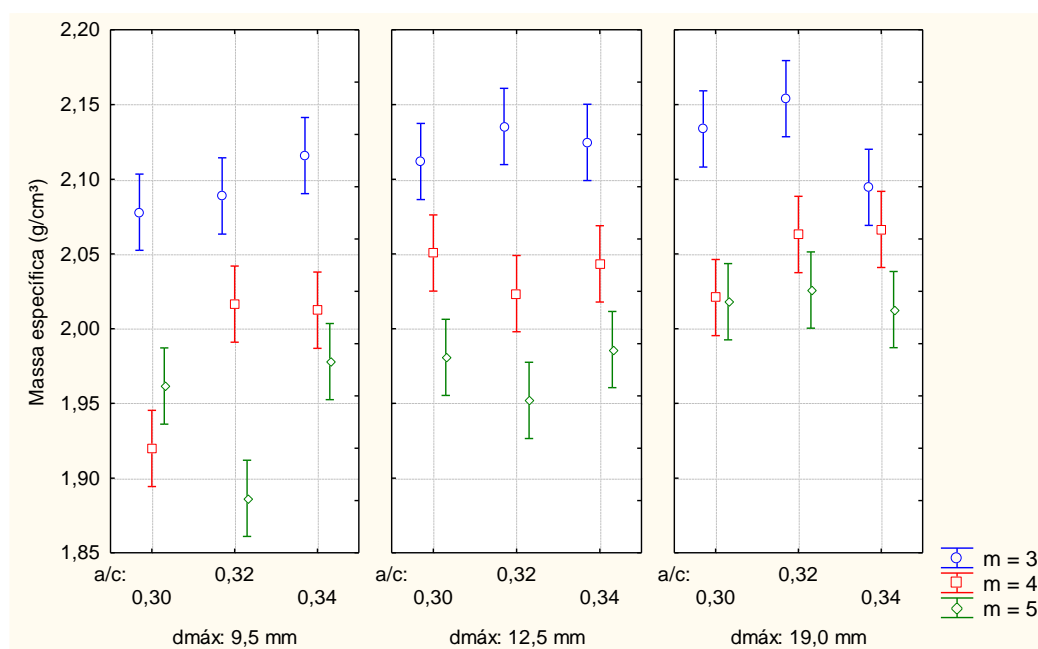
Variável/Interação	Significância		
	ME (g/cm ³)	Índice de vazios (%)	Permeabilidade (cm/s)
m (L+Q)	S*	S*	S*
a/c (L+Q)	N	S	S
dmáx (L+Q)	S	S	S
m*a/c	S	S	S
m*dmáx	S	S	S
a/c*dmáx	S	S	N

*Fator mais significante

Analisando a tabela acima verifica-se que o teor de agregado foi o parâmetro mais significativo. Em relação a não significância, a variável a/c não influenciou na massa específica e a interação a/c*dmáx não influenciou na permeabilidade dos concretos permeáveis no estado endurecido. Os demais parâmetros foram considerados significativos.

5.2.1 Massa específica no estado endurecido

A Figura 18 exhibe, graficamente, os resultados experimentais de massa específica no estado endurecido dos concretos permeáveis.

**Figura 18:** Representação gráfica dos resultados experimentais de massa específica no estado endurecido

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que os valores de massa específica se aproximam dos valores recomendado por Tennis *et al.* (2004), que está na faixa entre 1,6 a 2,0 g/cm³, e encontram-se dentro do estipulado pela NBR 16416 (ABNT, 2015) para pavimentos de concreto permeável, que é de, no mínimo, 1600 kg/m³. Entretanto, para m=3, observa-se valores acima de 2,0 g/cm³, na ordem de 4 a 7,5%, Assim como as misturas com m=4 apresentam valores acima de 2,0 g/cm³ até a ordem de 3,5%. Estes valores de massa específica, acima de 2,0 g/cm³, se devem ao uso de maior quantidade de cimento na pasta, uma vez que este material possui maior massa específica, quando comparado com os outros componentes. Sendo assim, quanto maior o teor de pasta, com a redução do teor de agregados, maior a massa específica do concreto permeável. Este comportamento também foi observado por Ghafoori e Dutta (1995), que verificaram o aumento da densidade devido à redução na quantidade de agregado graúdo, que tem menor massa específica que o cimento Portland.

Em relação ao diâmetro máximo observa-se uma tendência de acréscimo da massa específica à medida que o $d_{m\acute{a}x}$ aumenta. Isto pode estar associado a granulometria dos grãos. O aumento do $d_{m\acute{a}x}$ para 12,5mm e 19mm, propiciou uma granulometria mais contínua, comparada ao $d_{m\acute{a}x}$ de 9,5mm, havendo, com isso, uma melhor distribuição dos grãos. Em contrapartida, Batezini (2013) ao variar a granulometria de seus concretos permeáveis, não obteve variação da massa específica, encontrando, para todas as misturas, valores próximos a 1,85 g/cm³. O autor alegou que esta propriedade, assim como a de índice de vazios, sofre influência do tipo de material utilizado, bem como da compactação e adensamento das misturas.

Para avaliar o efeito da interação entre teor de agregados e relação a/c sobre a massa específica, estão apresentados na Figura 19 (a), (b) e (c), as curvas de nível, para cada diâmetro máximo, dos concretos permeáveis produzidos.

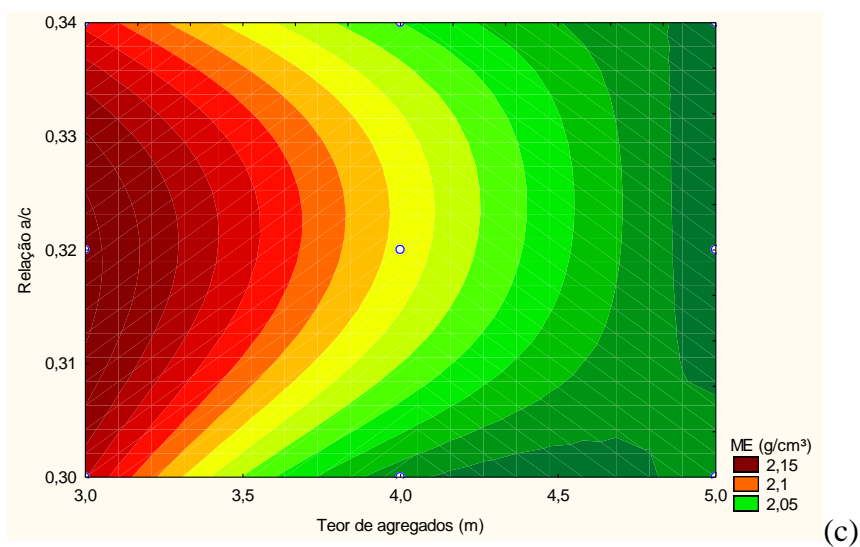
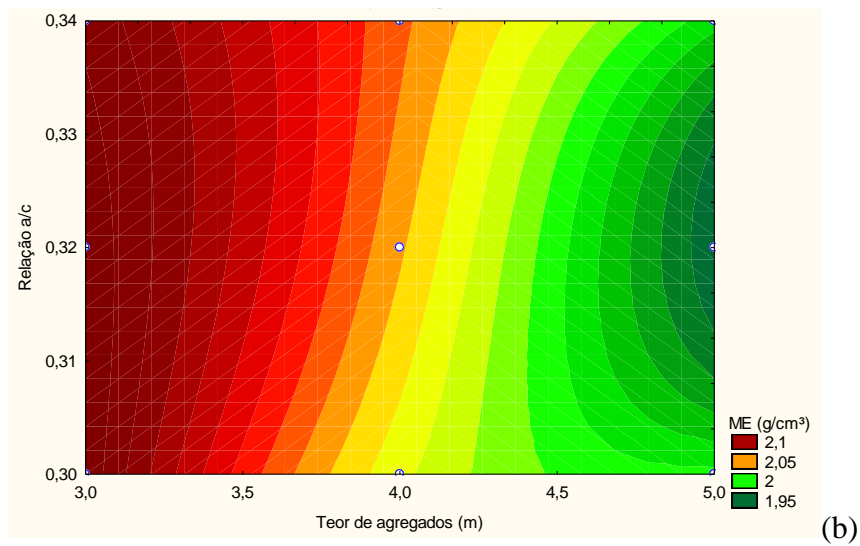
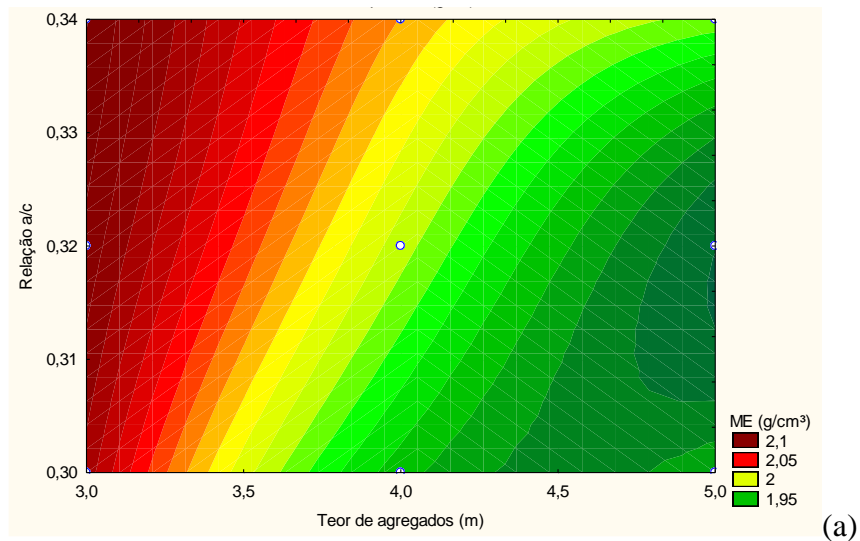


Figura 19: Influência da interação entre teor de agregados (m) e relação a/c para as britas (a) 9,5mm; (b) 12,5mm e (c) 19mm, sobre a massa específica dos concretos permeáveis

De um modo geral, observa-se que a interação entre o teor de agregados e a relação a/c , para cada diâmetro máximo, mostrou o mesmo comportamento que o encontrado na literatura, ou seja, a redução da massa específica dos concretos permeáveis com o aumento no teor de agregados (GHAFOORI; DUTTA, 1995). Além disso, percebe-se que, para uma relação a/c de 0,30 há maior sensibilidade da massa específica à mudança do teor de agregados até $m = 4$, e menor sensibilidade após esse valor, em comparação às maiores relações a/c .

O aumento da relação a/c ocasionou o aumento da massa específica da mistura, apesar desse parâmetro não ter sido considerado significativo para esta propriedade. Este mesmo comportamento foi encontrado por Ibrahim *et al.* (2014).

5.2.2 Índice de vazios

A Figura 20 exibe graficamente os resultados experimentais obtidos na avaliação do índice de vazios. De acordo com a ANOVA, para esta propriedade, todos os fatores e interações entre eles apresentaram influência significativa.

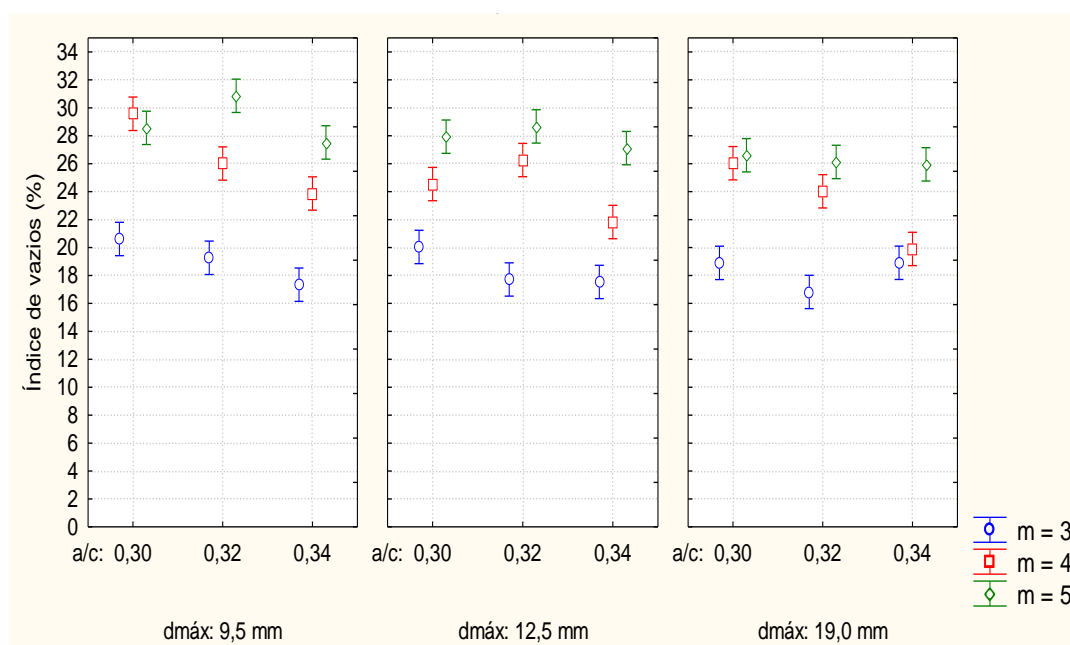


Figura 20: Representação gráfica dos resultados experimentais de índice de vazios

Verifica-se que todos os valores de índice de vazios encontram-se dentro da faixa observada na literatura, de 15 % a 30%, (BATEZINI, 2013; HUANG et al., 2010) exceto para o traço com $m = 5$, relação $a/c = 0,32$ e $d_{m\acute{a}x} = 9,5$ mm que apresentou resultado um pouco acima de 30%. Este mesmo comportamento foi encontrado por Ibrahim *et al.* (2014). Em seus estudos, os autores obtiveram valores acima de 30%, chegando até 40% de porosidade, o que influenciou negativamente na resistência do concreto.

a) Influência do teor de agregados

Analisando a Figura 20 observa-se que quanto maior o teor de agregados (m), maior o índice de vazios. Este comportamento se deve à menor quantidade de pasta com o aumento da quantidade de agregados, uma vez que a pasta é o elemento responsável por ligar os agregados e o seu excesso provoca a maior compactidade da mistura, reduzindo a quantidade de poros. Comportamento semelhante também foi encontrado por Ghafoori e Dutta (1995), Ibrahim *et al.* (2014), Mahalingam e Mahalingam (2016) e Zhang *et al.* (2018).

b) Influência do diâmetro máximo da brita

A Figura 21 apresenta o índice de vazios em relação ao diâmetro máximo da brita, para teor de agregado igual a 5 (exemplo).

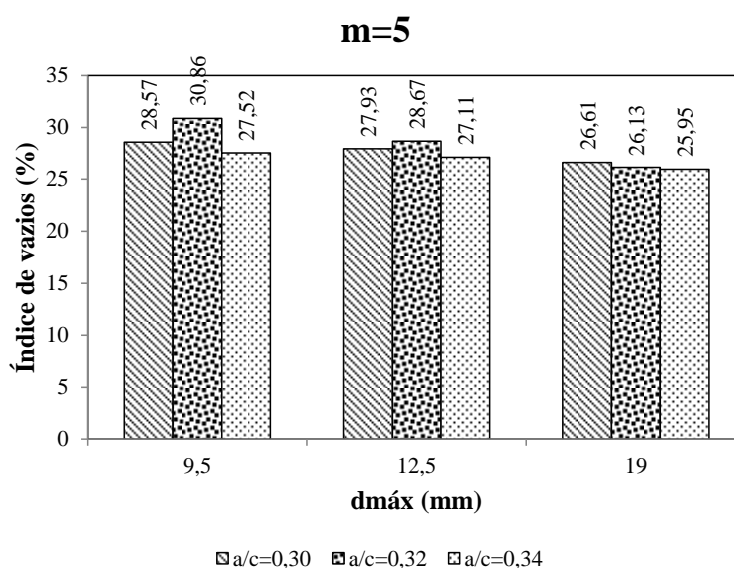


Figura 21: Influência da dimensão máxima do agregado no índice de vazios, para teor de agregados, $m=5$.

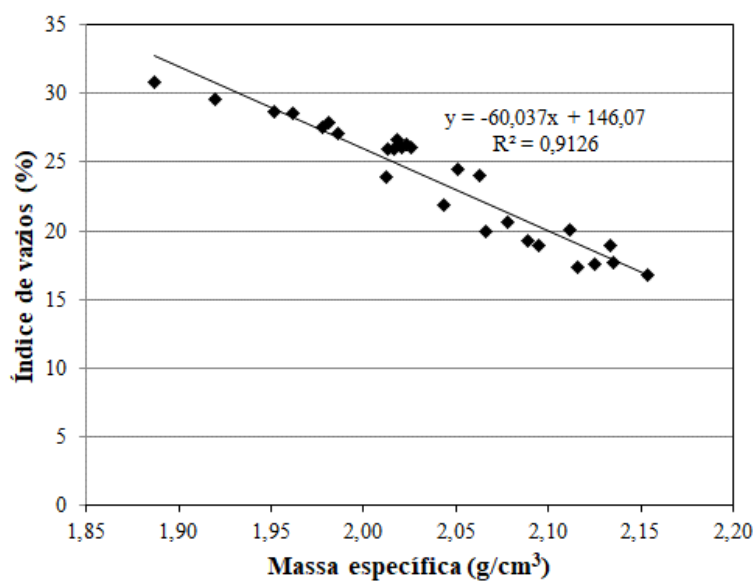
Observando a Figura 21, verifica-se uma tendência à redução do índice de vazios com o aumento da dimensão da brita. Provavelmente, isto acontece porque o limite inferior da faixa granulométrica é o mesmo para as três granulometrias, e o aumento da dimensão máxima promove maior diversidade de tamanhos de grãos, constituindo uma granulometria contínua, com melhor arrumação dos grãos. De acordo com Ibrahim *et al.* (2014) a porosidade é dependente, principalmente, do tamanho do agregado e da sua distribuição granulométrica. Entretanto, Huang *et al.* (2010), mostraram em seu estudo, que ao utilizar três agregados graúdos, com tamanhos diferentes, a porosidade das misturas não foi afetada.

c) Influência da relação a/c

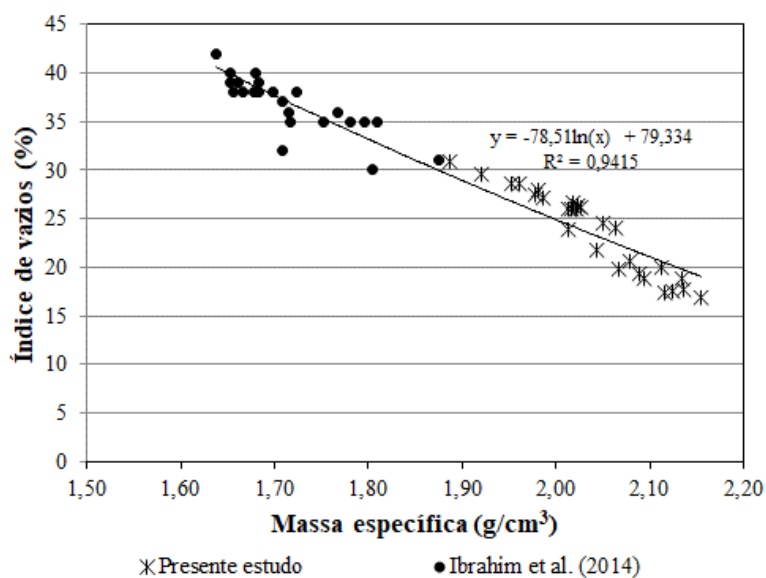
Para a relação a/c, há uma tendência de redução do índice de vazios do concreto com o aumento deste parâmetro, que pode ser atribuída a melhoria da trabalhabilidade da pasta com o aumento da quantidade de água na mistura. Este mesmo comportamento também foi verificado por Holtz (2011). O referido autor descreveu que para uma relação a/c alta, a pasta pode ficar muito fluida, e que, além de cobrir o agregado, pode acabar preenchendo os vazios do concreto e com isso reduzir a quantidade de vazios na mistura. Tal fato pode propiciar um aumento na resistência mecânica do concreto com o aumento da relação a/c, ao contrário do que acontece em concretos convencionais.

Este comportamento de aumento da relação a/c e redução do índice de vazios, condiz com os resultados obtidos para a massa específica. Ou seja, ao aumentar a relação a/c, houve uma redução do índice de vazios e conseqüente aumento da massa específica. Ibrahim *et al.* (2014) também encontrou comportamento similar, ou seja, ao aumentar a relação a/c de 0,30 para 0,40, a sua massa específica aumentou em torno de 4% e seu índice de vazios reduziu de 39% para 35%.

A Figura 22 exhibe a relação entre massa específica e índice de vazios dos concretos permeáveis.



(a)

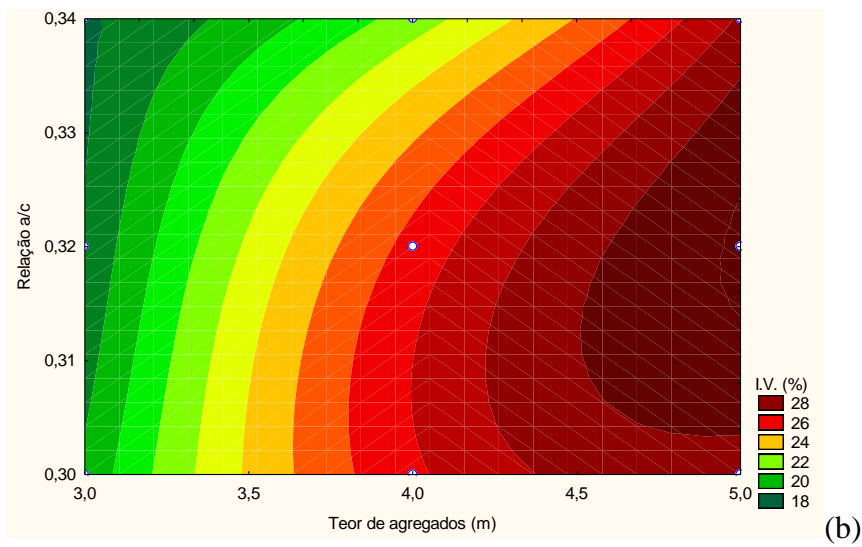
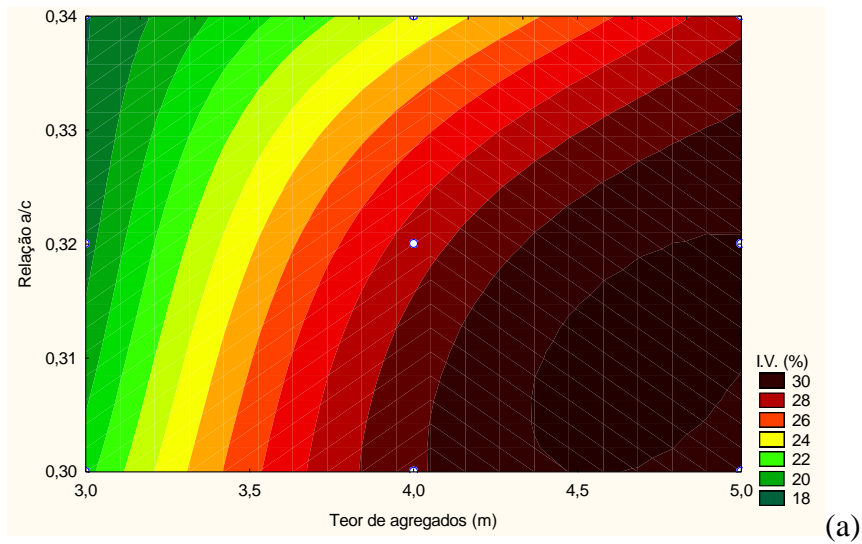


(b)

Figura 22: Relação entre massa específica e índice de vazios: (a) com dados desta pesquisa e (b) com dados desta pesquisa e de outros autores

A partir dos dados obtidos verifica-se, de um modo geral, o aumento da massa específica à medida que o índice de vazios diminui (Figura 22a), seguindo o mesmo comportamento obtido por Ibrahim *et al.* (2014), apresentados na (Figura 22b). Entretanto, os dados obtidos por Ibrahim *et al.* (2014) mostram uma dispersão nos resultados, com R^2 igual a 0,66. Mesmo assim os referidos autores consideraram o aumento da massa específica a redução do índice de vazios, uma tendência satisfatória para este tipo de concreto.

A Figura 23 exibe o efeito da interação entre teor de agregados, para $d_{\max} = 9,5\text{mm}$ e relação a/c, em relação ao índice de vazios dos concretos.



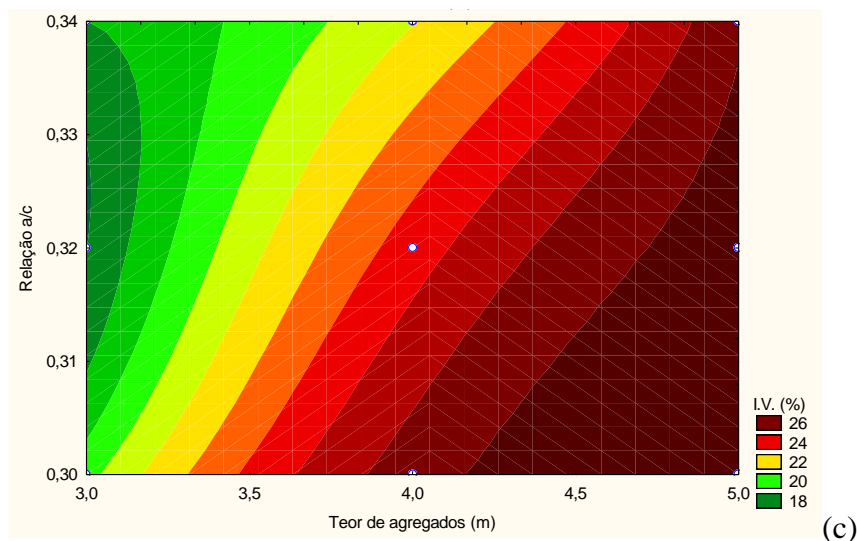


Figura 23: Influência da interação entre teor de agregados (m) e relação a/c para a brita (a) 9,5 mm; (b) 12,5mm e (c) 19mm, sobre o índice de vazios dos concretos permeáveis

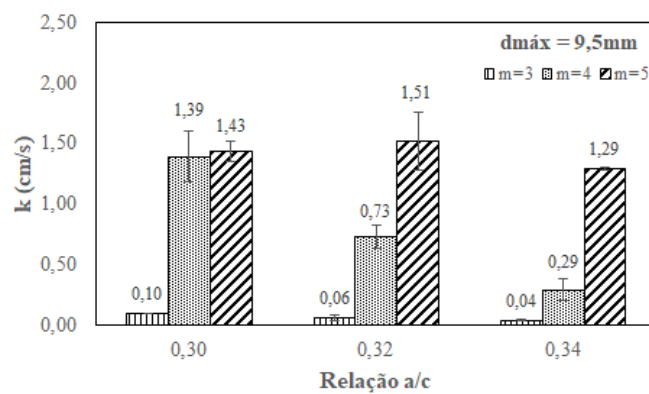
Através das figuras, observa-se a mesma tendência de comportamento para todos os diâmetros máximo, ou seja, o aumento do índice de vazios com o aumento do valor de agregados, para uma relação a/c fixa (GHAFOORI; DUTTA, 1995, MAHALINGAM; MAHALINGAM, 2016, ZHANG *et al.*, 2018). Já considerando um “m” fixo, o índice de vazios tende a diminuir com o aumento da relação a/c, pois conforme dito anteriormente, a maior inserção de água na mistura melhora a fluidez da pasta, reduzindo os poros do concreto (IBRAHIM *et al.*, 2014). Por isso deve-se ter o cuidado com este parâmetro (relação a/c), pois água em excesso, pode aumentar e muito a fluidez da pasta, causando a colmatção dos poros e conseqüente redução da permeabilidade do material.

Entretanto, para o $d_{máx}$ de 12,5mm e 19mm verifica-se que a relação a/c exerce menor influência sobre o índice de vazios para os valores extremos de teor de agregados ($m = 3$ e $m = 5$), sendo maior nos valores intermediários.

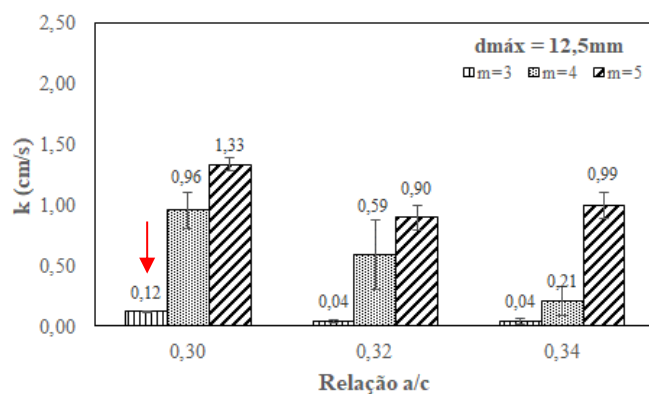
De um modo geral, pode-se dizer que o diâmetro máximo influencia diretamente no comportamento do material, ou seja, à medida que este parâmetro foi aumentando, houve uma tendência de redução da faixa de índice de vazios. Pode-se dizer com isso que o aumento do diâmetro melhorou a compacidade das misturas, reduzindo o índice de vazios, conforme mostra a Figura 21.

5.2.3 Permeabilidade

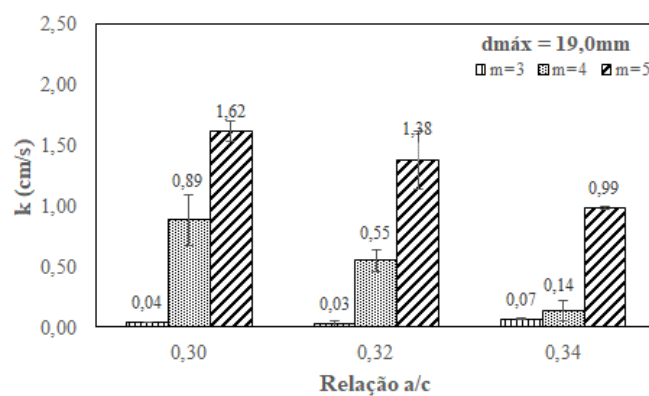
Na Figura 24 estão apresentadas a relação entre a permeabilidade e a relação a/c, obtidas, para cada diâmetro máximo, das misturas de concreto



(a)



(b)



(c)

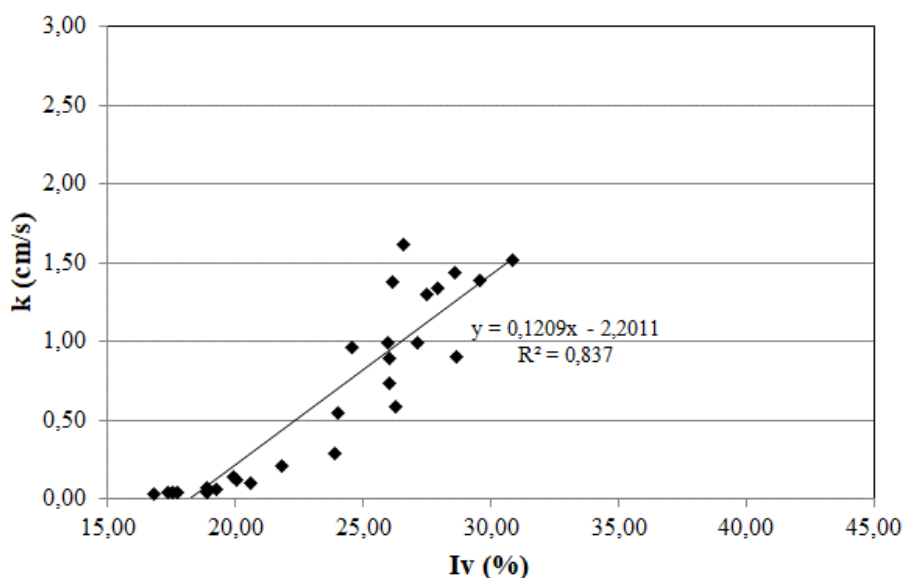
Figura 24: Relação entre permeabilidade e a/c, para cada diâmetro máximo: (a) 9,5mm; (b) 12,5mm e (c) 19,0mm.

A NBR 16416 (ABNT, 2015) admite para o pavimento de concreto permeável recém construído um coeficiente de permeabilidade maior que 10^{-3} m/s, ou seja, maior que 0,1 cm/s. Observa-se através dos resultados apresentados na figura acima, que praticamente todos os traços com $m=3$ não atenderam a este requisito, exceção para o traço $m=3$, relação a/c de 0,30 e brita com $d_{máx} = 12,5$ mm. Diante deste comportamento, pode-se dizer que misturas com teor de agregado igual 3, não apresentaram permeabilidade suficiente para serem utilizadas como concreto permeável. Isto ocorreu, provavelmente, por causa da influência da forma de moldagem, em que o adensamento por vibração (vibrador agulha), associado à vibração externa, possivelmente, permitiram o escorrimento da pasta e o preenchimento dos poros, já que essa mistura é a que possui maior teor de pasta. Este mesmo comportamento foi encontrado por Holtz (2011). O autor verificou que as formas de vibração influenciam diretamente nas propriedades deste tipo de concreto, podendo ocasionar o escorrimento da pasta e consequente obstrução dos poros. Entretanto, acredita ser possível aliar resistência mecânica e permeabilidade, com o uso de um adensamento adequado. Para Batezini (2013), a capacidade drenante deste tipo de concreto torna-se reduzida pelo excesso de vibração que tende a fechar os poros na parte superior do corpo de prova.

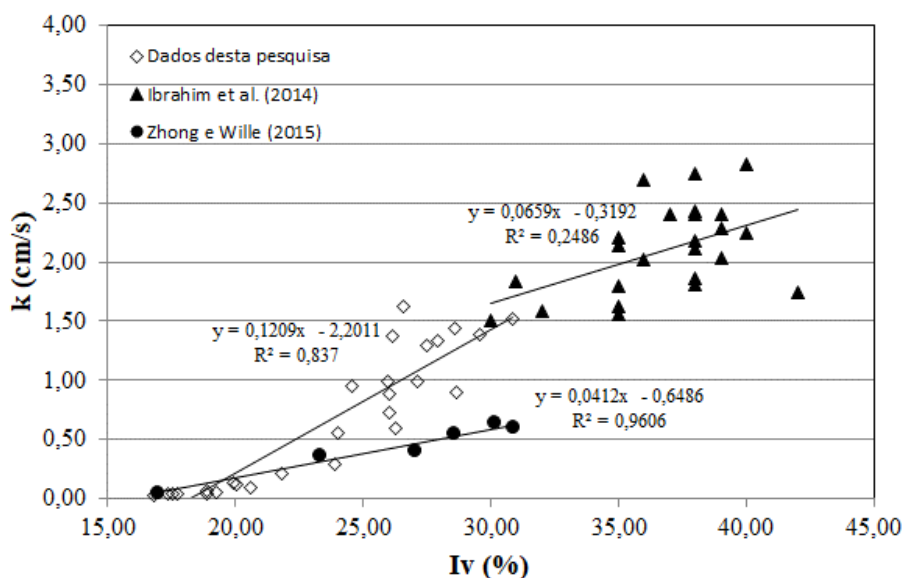
a) Influência do teor de agregados

Como já discutido anteriormente, as misturas com o menor teor de agregados ($m = 3$) apresentaram os menores resultados de permeabilidade. Isto se deve ao fato de que estas misturas possuem maior quantidade de pasta e, conseqüentemente, menor quantidade de poros interconectados, responsáveis pela permeabilidade.

À medida que o teor de agregados foi aumentando, a permeabilidade das misturas também aumentou. Este mesmo comportamento também foi observado por Mahalingam e Mahalingam (2016), Zhang *et al.* (2018), Ibrahim *et al.* (2014) e corroboram com o comportamento obtido para o índice de vazios, em que a medida que o teor de agregados aumentou, a permeabilidade e índice de vazios também aumentaram (Figura 25).



(a)



(b)

Figura 25: Relação entre índice de vazios e permeabilidade dos concretos permeáveis, em função do teor de agregados (a) presente estudo e (b) presente estudo e outros autores,

De um modo geral, verifica-se uma tendência de acréscimo da permeabilidade à medida que o índice de vazios aumenta, mesmo havendo dispersão entre os resultados obtidos no presente estudo (R^2 igual a 0,837). Este mesmo comportamento foi encontrado por Ibrahim *et al.* (2014), Bhutta *et al.* (2015) e Zhong e Wille (2015). Entretanto, em termos de dispersão, os dados de Ibrahim *et al.* (2014), foram os mais discrepantes, quando comparados aos demais autores. Para os autores, apesar de dados dispersos, verifica-se o

aumento da permeabilidade, com o aumento da porosidade. Bhutta *et al.* (2015) e Zhong e Wille (2015) encontraram, respectivamente, R^2 igual a 0,75 e 0,96. Lamb (2014) em seu estudo também encontrou grande variabilidade entre corpos de prova de mesma origem, mostrando que a variação da distribuição de poros neste material pode variar bastante que, segundo Batezini (2013) pode estar associada a compactação das misturas.

b) Influência da relação a/c

Para este parâmetro, verifica-se uma tendência à redução da permeabilidade com o aumento da relação a/c, para as misturas com $m = 4$ e $m = 5$. Neste caso, o aumento na quantidade de água da mistura afetou a fluidez da pasta, tornando-a capaz de escorrer mais facilmente e preencher os vazios interconectados (colmatação), dificultando assim, a passagem da água pelo material. Este mesmo comportamento foi verificado para o índice de vazios em que o aumento da relação a/c, aumentou a fluidez da pasta, propiciando a redução do índice de vazios.

c) Diâmetro máximo

Em relação ao diâmetro máximo, observa-se uma tendência de redução da permeabilidade à medida que o diâmetro máximo aumenta. Em contrapartida, para Batezini (2013), a permeabilidade sofre maior influência do índice de vazios, e sua interconectividade. Segundo o autor, a compactação deste material deve ser cuidadosamente realizada, pois caso contrário, pode ocasionar a redução da interconectividade entre os poros, mesmo o concreto possuindo elevado teor de vazios, prejudicando assim, sua condutividade hidráulica.

A Figura 26 exhibe a permeabilidade em função da interação entre teor de agregados e relação a/c, para as britas com $d_{máx} = 9,5$ mm, 12,5mm e 19,0mm.

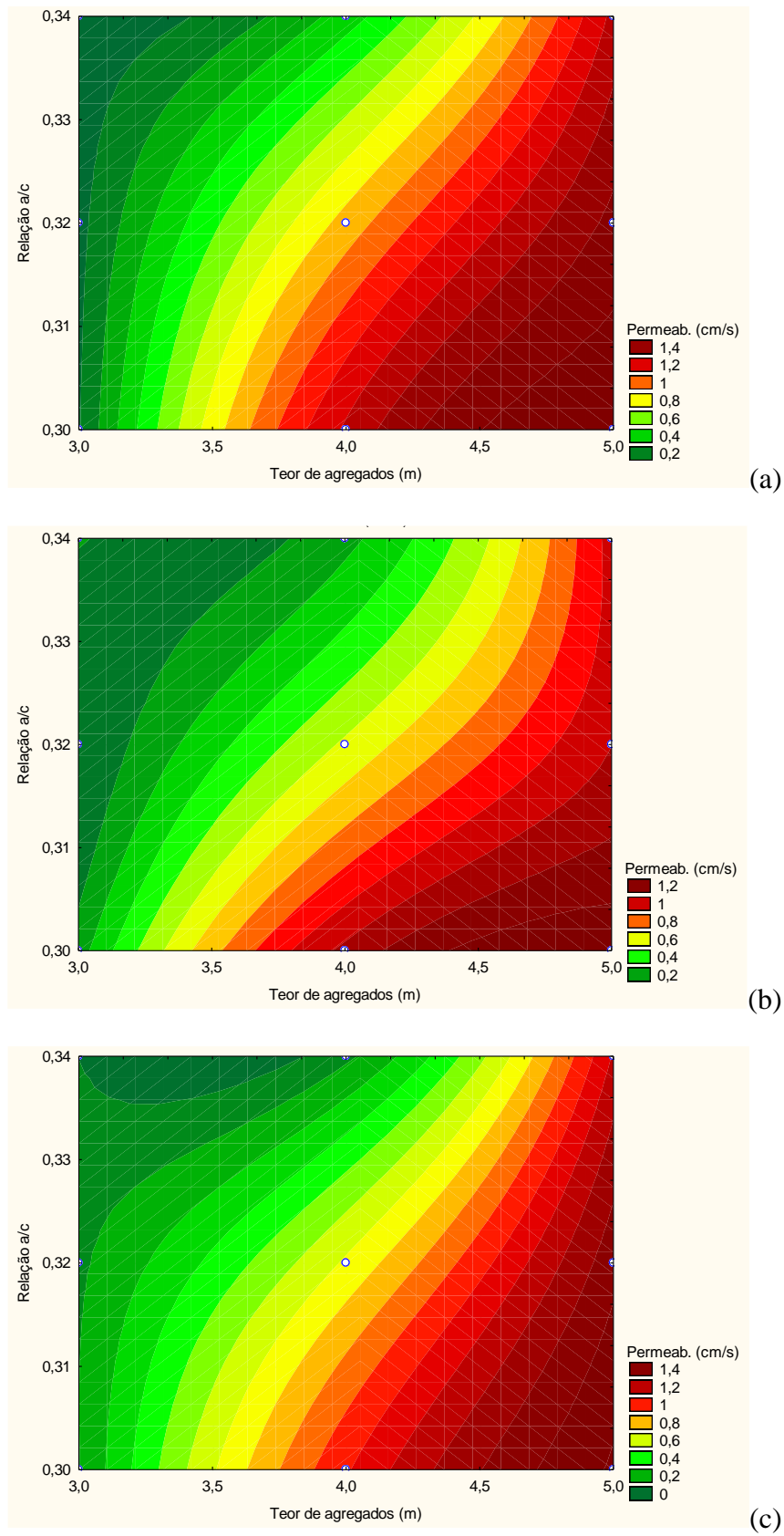


Figura 26: Permeabilidade em função do teor de agregados e relação a/c, para brita com: (a) $d_{\max} = 9,5$ mm; (b) $d_{\max} = 12,5$ mm e (c) $d_{\max} = 19,0$ mm.

A Figura 26 mostra a tendência ao aumento da permeabilidade com o aumento do teor de agregados, para uma mesma relação a/c , para todos os diâmetros máximos analisados. Além disso, verifica-se que os valores intermediários de teor de agregados, em torno de $m = 4$, é o que apresenta maior variação da permeabilidade, havendo a redução dessa propriedade, à medida que a relação a/c aumenta. Nas extremidades, essa sensibilidade à variação da permeabilidade apresenta-se reduzida.

Analisando do ponto de vista de variação da relação a/c , observa-se que à medida que este parâmetro vai aumentando, a permeabilidade reduz para um dado teor de agregados. Entretanto, para teores abaixo de 3,5 e relações maiores que 0,31, verifica-se que a permeabilidade fica bastante reduzida, chegando a valores abaixo ou próximos da NBR 16416 (ABNT, 2015).

Para a brita com diâmetro máximo igual a 19mm, há uma considerável faixa com permeabilidade tendendo a zero para a relação a/c de 0,34 e teor de agregado que vai de $m=3$ até próximo de $m = 4$. Isto significa dizer que para estes valores, o concreto permeável perde a sua função, devido, provavelmente, a colmatação dos poros ocasionada pelo aumento na quantidade de água e teor de pasta.

Pode-se afirmar que nos três casos, com britas de dimensões máximas diferentes, há a mesma tendência de comportamento, no qual a permeabilidade não sofre influência significativa quando há variação da relação a/c , para o menor teor de agregados. Já para $m=5$ há variação com a mudança da relação a/c , mas não é tão sensível quanto no caso dos valores intermediários.

Portanto, verifica-se que, para valores intermediários do teor de agregados, como $m = 4$, é possível obter diversas faixas de permeabilidade, de acordo com a relação a/c escolhida. Isto demonstra a sensibilidade deste material a mudança de comportamento, ao alterar um parâmetro de dosagem. É possível também observar, o aumento da permeabilidade, conforme a relação a/c é reduzida. Além disso, os maiores valores de permeabilidade são obtidos mais significativamente com a menor relação a/c e para os maiores teores de agregados, visto que aliado ao baixo teor de pasta, há um aumento no índice de vazios e, provavelmente, aumento na interconectividade entre os poros.

5.3 ENSAIOS MECÂNICOS

A Tabela 12 apresenta os resultados experimentais dos ensaios mecânicos de resistência à compressão (f_c) e resistência à tração na flexão (f_{tf}) das misturas de concreto permeável.

Tabela 12: Resultados experimentais dos ensaios mecânicos

Misturas			f_c (MPa \pm MPa (%))	f_{tf} (MPa \pm MPa (%))
m	a/c	dmáx (mm)		
3	0,30	9,5	22,94 \pm 1,51 (6,6)	2,99 \pm 0,22 (7,44)
	0,30	12,5	24,29 \pm 1,24 (5,1)	2,72 \pm 0,36 (13,24)
	0,30	19,0	22,55 \pm 1,47 (6,5)	2,66 \pm 0,45 (17,05)
	0,32	9,5	25,18 \pm 0,20 (0,8)	3,00 \pm 0,28 (9,43)
	0,32	12,5	22,73 \pm 0,84 (3,7)	3,00 \pm 0,35 (11,67)
	0,32	19,0	25,53 \pm 1,22 (4,8)	3,05 \pm 0,04 (1,46)
	0,34	9,5	24,73 \pm 0,71 (2,9)	3,27 \pm 0,26 (7,94)
	0,34	12,5	22,37 \pm 0,73 (3,3)	2,67 \pm 0,15 (5,47)
	0,34	19,0	21,17 \pm 0,63 (3,0)	3,31 \pm 0,36 (10,82)
4	0,30	9,5	13,11 \pm 0,77 (5,9)	2,27 \pm 0,14 (6,3)
	0,30	12,5	13,52 \pm 1,15 (8,5)	2,27 \pm 0,29 (12,6)
	0,30	19,0	14,22 \pm 1,77 (12,5)	2,16 \pm 0,10 (4,6)
	0,32	9,5	15,08 \pm 1,38 (9,2)	2,20 \pm 0,17 (7,9)
	0,32	12,5	12,69 \pm 0,61 (4,8)	1,56 \pm 0,04 (2,8)
	0,32	19,0	16,35 \pm 0,69 (4,2)	2,12 \pm 0,08 (4,0)
	0,34	9,5	18,74 \pm 0,27 (1,15)	2,20 \pm 0,10 (4,6)
	0,34	12,5	16,98 \pm 1,27 (7,5)	2,42 \pm 0,29 (12,0)
	0,34	19,0	17,82 \pm 1,01 (5,7)	2,54 \pm 0,13 (5,0)
5	0,30	9,5	8,02 \pm 1,11 (13,9)	1,48 \pm 0,04 (2,45)
	0,30	12,5	8,76 \pm 0,41 (4,7)	1,79 \pm 0,39 (21,87)
	0,30	19,0	9,31 \pm 1,42 (15,2)	1,49 \pm 0,09 (5,93)
	0,32	9,5	10,60 \pm 0,59 (5,6)	1,97 \pm 0,15 (7,54)
	0,32	12,5	10,37 \pm 0,38 (3,7)	1,95 \pm 0,04 (2,16)
	0,32	19,0	11,00 \pm 0,84 (7,7)	1,79 \pm 0,16 (8,85)
	0,34	9,5	10,55 \pm 0,71 (6,8)	1,67 \pm 0,26 (15,58)
	0,34	12,5	11,28 \pm 1,00 (8,9)	1,78 \pm 0,24 (13,60)
	0,34	19,0	11,10 \pm 1,36 (12,3)	1,89 \pm 0,14 (7,22)

Nota: m – teor de agregados; a/c – relação água/cimento; dmáx – dimensão máxima do agregado; SD – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; F_c – resistência à compressão; F_{tf} – resistência à tração na flexão.

A partir dos resultados de resistência à compressão e resistência à tração na flexão, foi avaliado e apresentado, na Tabela 13, a significância dos fatores sobre estas propriedades.

Tabela 13: Significância dos fatores

Variável/Interação	Significância	
	Fc (MPa)	Ftf (MPa)
m (L+Q)	S*	S*
a/c (L+Q)	S	S
dmáx (L+Q)	N	N
m*a/c	S	S
m*dmáx	S	N
a/c*dmáx	S	N

*Fator mais significante

É possível observar que, no caso da resistência a compressão e da resistência à tração na flexão, a dimensão máxima da brita não foi um fator significativo, podendo-se dizer então que a variação no tamanho do agregado não interferiu nestas propriedades. Entretanto, dentre os fatores significativos, o teor de agregado foi o que mais influenciou.

A seguir, cada propriedade será avaliada separadamente, de acordo com a significância dos fatores.

5.3.1 Resistência à compressão

A Figura 27 exhibe os resultados experimentais de resistência à compressão dos concretos permeáveis em função do teor de agregados, da relação a/c e da dimensão máxima da brita.

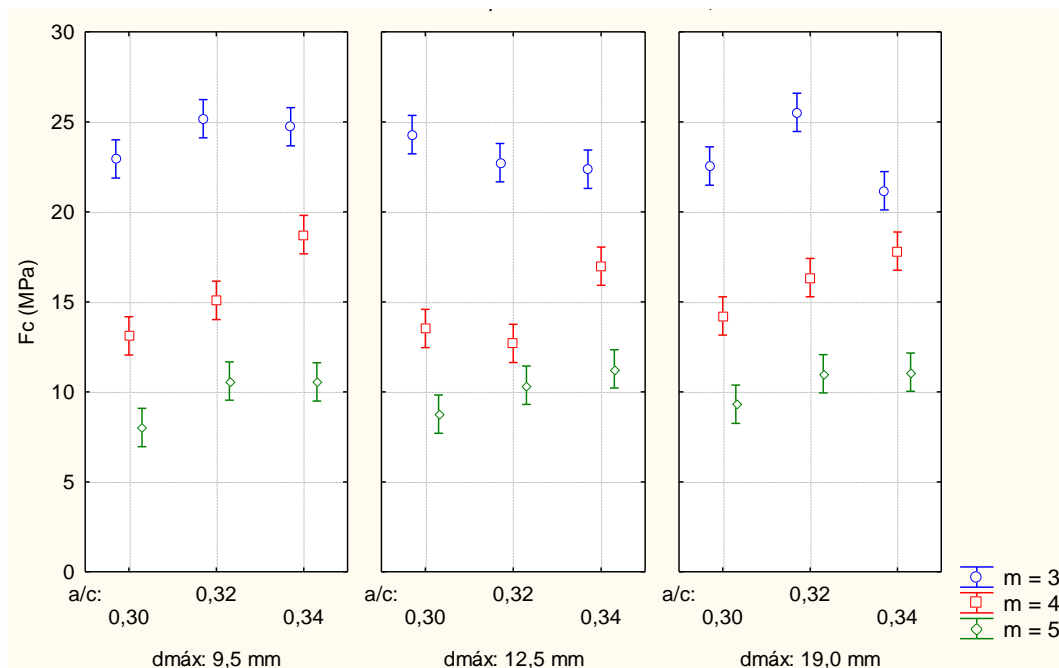


Figura 27: Resultados experimentais de resistência a compressão

Os valores de resistência a compressão obtidos estão compreendidos entre 7,54 MPa e 25,94 MPa, dentro da faixa indicada por Tennis *et al.* (2004), de 3,5 MPa a 28 MPa.

A influência do teor de agregados, da relação a/c, da dimensão máxima da brita e da interação entre essas variáveis sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos neste trabalho foi avaliada. No caso da dimensão máxima da brita, conforme mostrado anteriormente, não houve uma variação significativa na resistência à compressão dos concretos com as faixas granulométricas avaliadas. Portanto, esta variável isolada não será avaliada, mas os fatores constituídos pelas interações desta com outras variáveis foram analisados, uma vez que se apresentaram como significativos.

a) Influência do teor de agregados

Para explicar influência da fração de volume da pasta na resistência à compressão, outros parâmetros, como a teor de agregados e esforço de compactação precisam ser considerados.

Observa-se na Figura 27 que há uma tendência ao aumento da resistência à compressão com a redução do teor de agregados. Desta forma, pode-se dizer que o teor de agregados influenciou consideravelmente nesta propriedade, possuindo uma relação inversa com a

mesma, assim como foi observado por outros autores (HOLTZ, 2011; IBRAHIM *et al.*, 2014; CROUCH *et al.*, 2007; MAHALINGAM e MAHALINGAM, 2016).

Ibrahim *et al.* (2014) afirmaram que a redução da resistência com a adição de agregado graúdo acontece quando a mistura está isenta de agregados miúdos e a pasta de cimento é a principal fonte de resistência. Para Crouch *et al.* (2007) é necessária uma quantidade de pasta suficiente para revestir os agregados e garantir a ligação entre os grãos, enquanto o excesso de pasta promove a ocupação dos vazios. Sendo assim, uma redução na quantidade de pasta resulta em menor resistência a compressão, uma vez que há menos pasta disponível para a ligação dos agregados.

É possível observar, que as faixas de resistência do concreto permeável estão relacionadas com o teor de agregados. Para o $m = 5$, foram obtidos concretos com resistência em torno de 10 MPa. Com o $m = 4$, os concretos obtiveram uma resistência entre 12 MPa e 18 MPa. Já para os concretos com $m = 3$, os valores de resistência ficaram acima dos 20 MPa, atingindo um valor de até 25 MPa, que é comum para concretos convencionais.

Dentro desse contexto pode-se dizer que a tendência de comportamento dos concretos permeáveis em relação à resistência à compressão é que quanto maior o teor de agregados, menor o teor de pasta envolvido e com isso menor será a sua resistência. Este comportamento corrobora com os dados de porosidade obtidos, pois verificou-se que à medida que o teor de agregados aumentou, o índice de vazios também aumentou. Com isso pode-se dizer que quanto mais pasta na mistura houver, menor será a quantidade de vazios e, portanto, maior a resistência à compressão do concreto. Não esquecendo que, conforme Holtz (2011), a forma de vibração também interfere na resistência à compressão do concreto permeável e que, a depender da intensidade, a pasta pode escorrer e colmatar os poros.

Para Batezini (2013) as características de resistência mecânica do concreto permeável são influenciadas diretamente pelo índice de vazios. Entretanto, Mehta e Monteiro (2008) disseram que, no concreto permeável, a relação entre porosidade e resistência não é tão simples, devido a existência das microfissuras na zona de transição. Esse fato acaba tornando difícil a previsão de resistência por relações exatas entre resistência e porosidade, mas a validade geral desta relação deve ser respeitada, uma vez que

porosidades das fases componentes do concreto tornam-se fatores limitantes da resistência.

Na Figura 28 encontra-se a relação entre resistência à compressão e índice de vazios dos concretos permeáveis produzidos neste estudo e de outros autores.

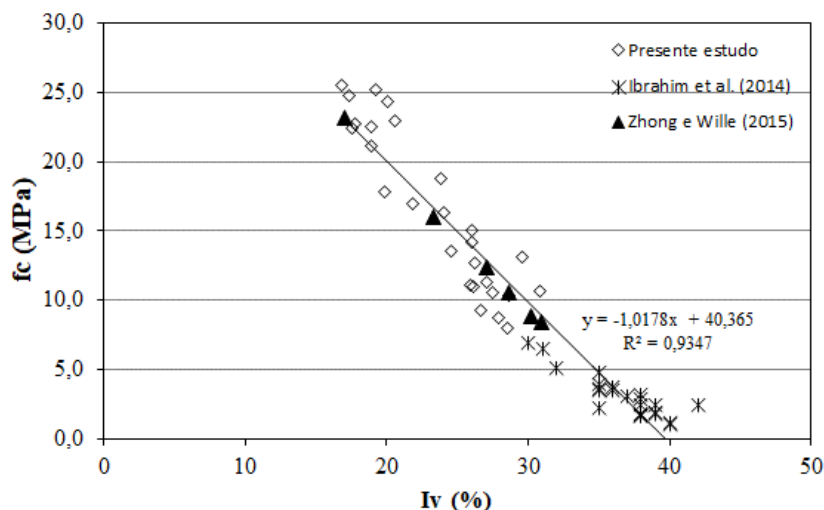


Figura 28: Relação entre resistência à compressão e índice de vazios dos concretos permeáveis produzidos nesta pesquisa e de outros autores

Os resultados obtidos neste estudo mostram que os concretos permeáveis produzidos seguem a mesma tendência de comportamento que os da literatura (Zhong e Wille, 2015; IBRAHIM et al., 2014; BHUTTA et al., 2012). Ou seja, à medida que o índice de vazios aumenta, a resistência à compressão diminui, com R^2 igual a 0,9347..

b) Influência da relação a/c

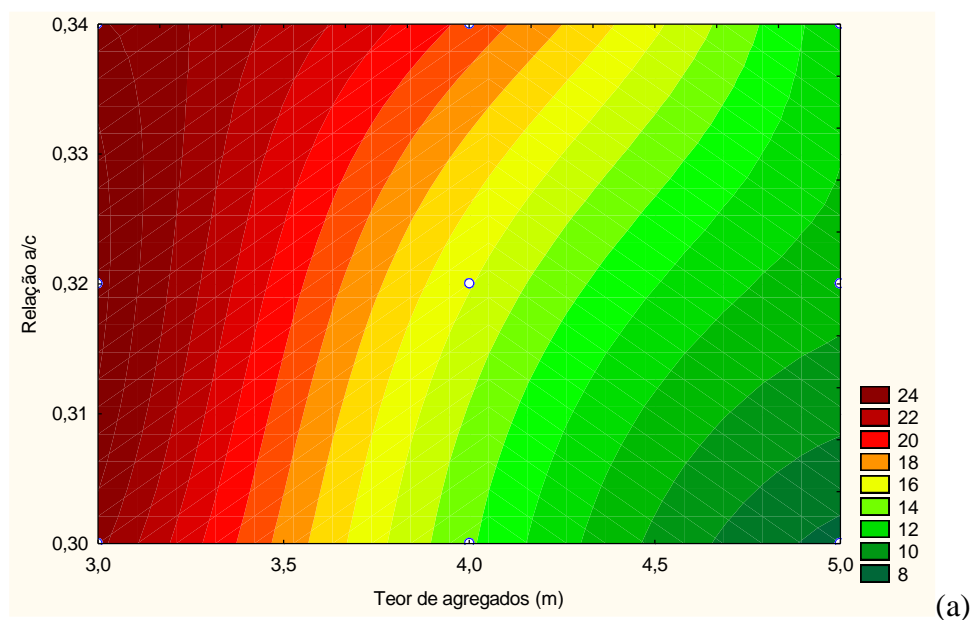
Pode-se observar na Figura 27 que, na maioria dos casos, a resistência a compressão dos concretos permeáveis tende a aumentar com o aumento da relação a/c. Este comportamento é contrário ao que se observa em concretos convencionais, que são governados pela Lei de Abrams, em que há o aumento da resistência à medida que se reduz a relação a/c. Uma característica importante a ser citada é que o concreto permeável não tem a relação a/c e resistência à compressão tão bem definida quanto nos concretos convencionais (ACI 522R-06 apud HOLTZ, 2011).

Holtz (2011) também encontrou esse comportamento, principalmente na faixa de 0,30 a 0,35. O autor atribuiu este fato a uma possível melhora na trabalhabilidade e uma melhor lubrificação da mistura, para maiores relações a/c. Assim, há uma melhor acomodação dos agregados, que ficam mais bem cobertos pela pasta.

De acordo com Neville (2016), apesar da relação a/c geralmente possuir uma relação inversa com a resistência à compressão em concretos convencionais, a validade dessa regra é limitada. Para relações a/c muito baixas, a curva de tendência deixa de ser obedecida quando não é mais possível o adensamento pleno da mistura. Sendo assim, este comportamento depende, também, dos meios de adensamento disponíveis.

Portanto, um aumento na relação a/c de um concreto permeável pode melhorar a sua moldabilidade, permitindo um melhor adensamento da mistura e, conseqüentemente, uma maior resistência à compressão. Além disso, deve-se considerar que o aumento excessivo da relação a/c neste tipo de concreto não é interessante, uma vez que uma pasta muito fluida pode escorrer e ocasionar o entupimento dos poros, que são elementos essenciais no concreto permeável.

Na Figura 29 encontra-se apresentada os efeitos da interação entre o teor de agregados e a relação a/c, para a brita com dimensão máxima de 9,5 mm, 12,5mm e 19,0mm.



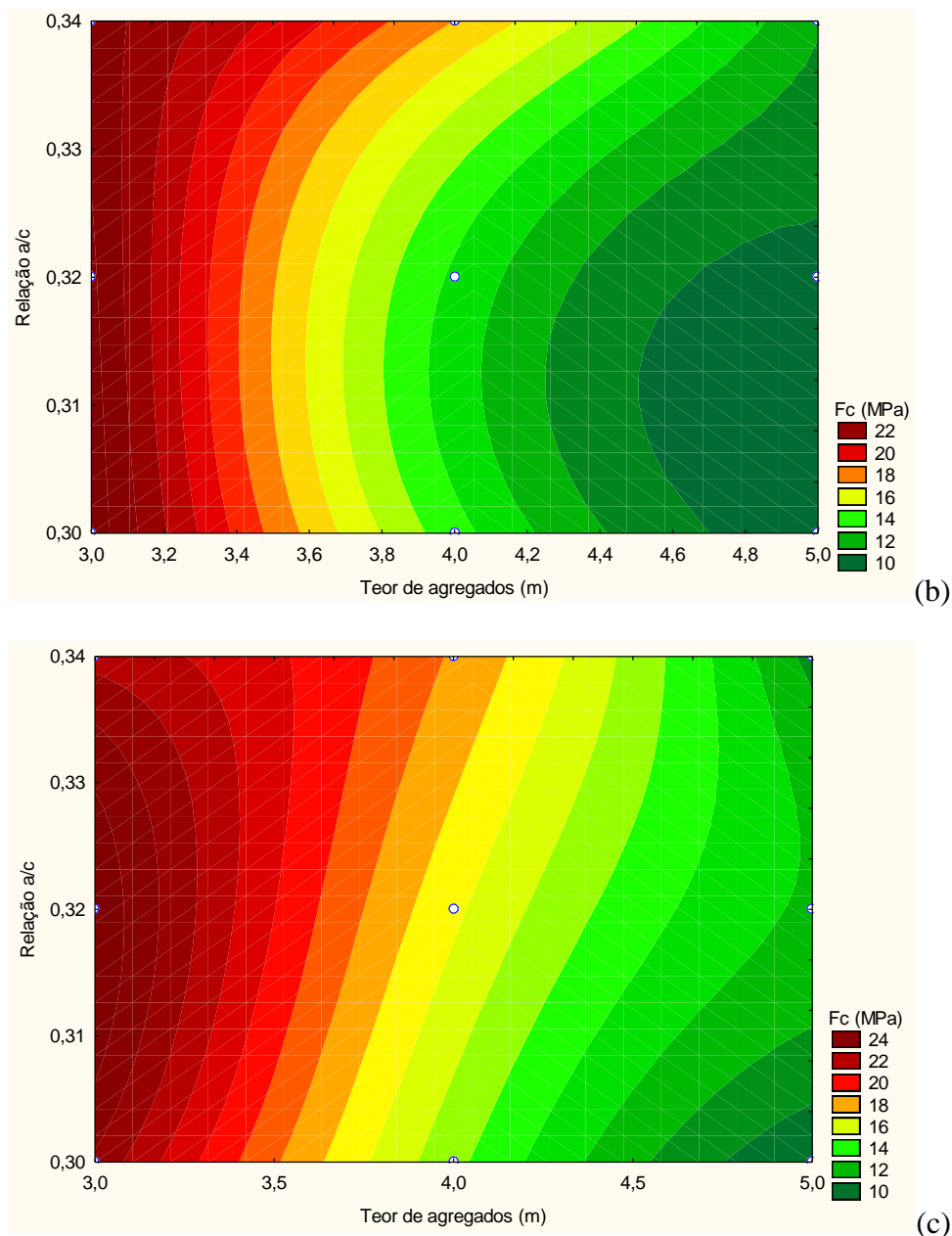


Figura 29: Influência da interação entre o teor de agregados e da relação a/c para o $d_{máx}$ igual a (a) 9,5mm, (b) 12,5mm e (c) 19,0mm, sobre a resistência à compressão

Verifica-se que, para os menores valores de teor de agregados, a relação a/c não exerce muita influência sobre a propriedade avaliada. Entretanto, à medida que o m aumenta, há uma tendência à obtenção de maior resistência à compressão com o aumento da relação a/c, ao contrário do que acontece no concreto convencional. Este comportamento condiz com os resultados obtidos para as propriedades de índice de vazios e permeabilidade. Ou seja, para um mesmo teor de agregados (por exemplo: $m = 4$), à medida que a relação a/c

aumentou, estes parâmetros reduziram. Tal fato também foi observado em trabalhos como o de Holtz (2011).

Observa-se ainda que, para a relação a/c de 0,30, ao aumentar o teor de agregado, as faixas de resistência à compressão variam entre 22 MPa e 8 MPa, permanecendo assim à medida que a/c aumenta. Tal fato indica a tendência de redução da resistência com o aumento do teor de agregados para uma mesma relação a/c .

5.3.2 Resistência à tração na flexão

A Figura 30 exibe os resultados experimentais de resistência à tração na flexão dos concretos permeáveis em função do teor de agregados, da relação a/c e da dimensão máxima da brita.

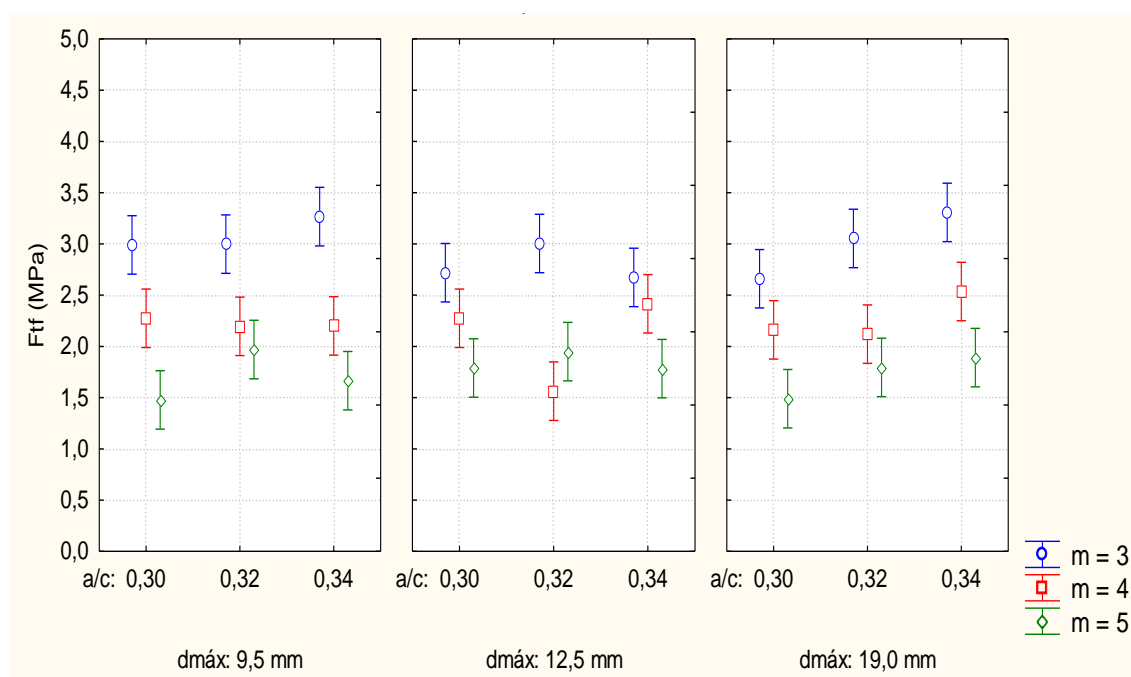


Figura 30: Resultados experimentais da resistência a tração na flexão

Os resultados de resistência à tração na flexão estão entre 1,48 MPa e 3,31 MPa. Estes valores encontram-se dentro do intervalo indicado por Tennis *et al.* (2004), de 1,0 a 3,8 MPa. No caso desta propriedade, de acordo com a ANOVA, apenas o teor de agregados, a relação a/c e a interação entre esses fatores foram significativos. A variação da dimensão máxima da brita não influenciou significativamente na resistência à tração na flexão. É

possível observar, na Figura 30, que as misturas, apesar da variação da dimensão máxima da brita, se encontram na mesma faixa de resistência.

a) Influência do teor de agregados

A Figura 30 mostra que a resistência à tração na flexão aumenta com a redução do teor de agregados, como esperado, devido a maior quantidade de pasta e, conseqüentemente, menor quantidade de vazios. Este comportamento também foi verificado por Lim *et al.* (2013), Fu *et al.* (2014) e Mahalingam e Mahalingam (2016).

Como explicado anteriormente, a maior quantidade de pasta pode ocasionar, conforme intensidade e tipo de adensamento da mistura, o escorrimento da pasta por entre os poros, colmatando-os. Tal fato reduz a porosidade do material e conseqüente permeabilidade. Este fato propicia aumento da resistência mecânica, conforme verificado, também, por Holtz (2011).

Na Figura 31 encontra-se apresentada a relação entre a resistência à tração na flexão e o índice de vazios das misturas produzidas.

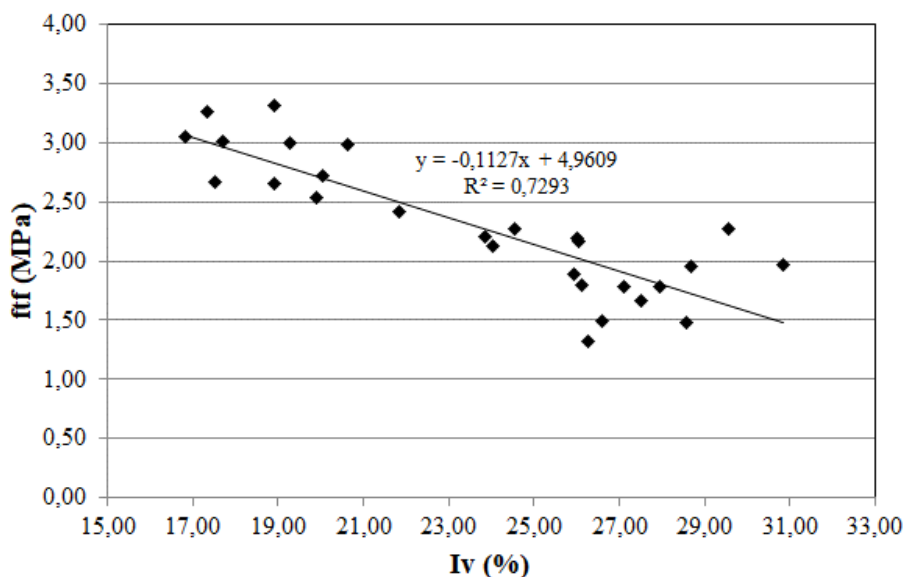


Figura 31: Relação entre resistência à tração na flexão e índice de vazios dos concretos permeáveis

Verifica-se, através da figura uma tendência de comportamento que condiz com o obtido para a resistência à compressão, ou seja, a redução da resistência à tração na flexão com o aumento no índice de vazios que é ocasionado pelo aumento no teor de agregados. Apesar de haver uma dispersão nos resultados, visto que o R^2 é igual a 0,7293, muitos autores (BHUTTA *et al.*, 2015; IBRAHIM *et al.*, 2014), consideraram esse valor de coeficiente de determinação, para descrever a tendência de comportamento de seus concretos permeáveis.

b) Influência da relação a/c

Com relação à variação da relação a/c percebe-se que não há uma tendência muito clara que governe o comportamento da mistura, exceto para as misturas com $d_{máx}$ igual a 19,0mm em que se observa um acréscimo da resistência à tração na flexão, à medida que a relação a/c aumenta. Entretanto o coeficiente de variação alto para esta propriedade pode estar interferindo nesta tendência de comportamento.

Além disso, diferentemente do consenso que há no caso do teor de agregados, a variação da relação a/c possui observações contrárias na literatura. Enquanto Lim *et al.* (2013) observaram menor resistência à tração na flexão para a mistura com menor relação a/c, Fu *et al.* (2014) observaram um aumento no valor desta propriedade com a redução da relação a/c. Assim, pode-se dizer que este tipo de concreto não possui um comportamento típico para a resistência à tração na flexão.

O efeito da interação entre teor de agregados e relação a/c, para a brita de $d_{máx} = 9,5\text{mm}$, $12,5\text{mm}$ e $19,0\text{mm}$, sobre a resistência à tração na flexão, está exibido na Figura 32.

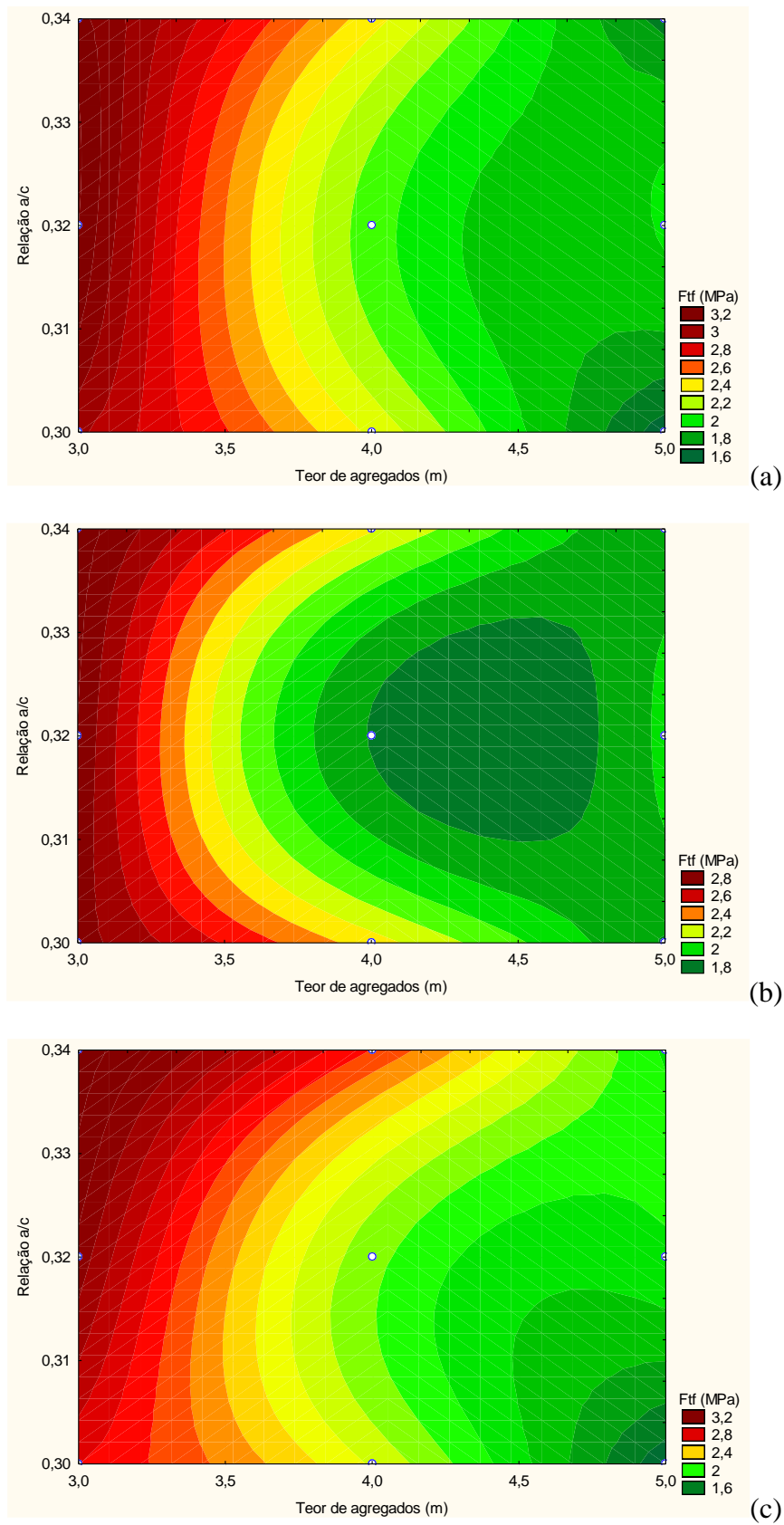


Figura 32: Influência da interação entre o teor de agregados e da relação a/c sobre a resistência à tração na flexão para $d_{máx}$ igual a (a) 9,5 mm, (b) 12,5mm e (c) 19,0mm

É possível observar o efeito significativo da variação do teor de agregados nos resultados de resistência à tração na flexão. Ou seja, para uma mesma relação a/c, ao aumentar o teor de agregados, verifica-se uma redução da resistência à tração na flexão. Fato este ocasionado pelo acréscimo no teor de vazios das misturas.

Com relação à variação da relação a/c, para um mesmo teor de agregado, verifica-se que para os diâmetros máximos de 9,5 e 12,5mm, não há uma tendência muito clara do comportamento da resistência à tração na flexão (coeficiente de variação alto). Entretanto, para a dimensão máxima da brita de 19mm fica clara a tendência ao aumento da resistência a tração na flexão à medida que a relação a/c aumenta para todos os teores de agregado. Para uma mesma relação a/c, ao aumentar o teor de agregado, este parâmetro reduz. Comportamento este, similar ao da resistência à compressão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do trabalho realizado e dos resultados obtidos foi possível chegar as seguintes considerações:

- O ensaio de espalhamento na mesa de Graff não se mostrou adequado para a avaliação da trabalhabilidade do concreto permeável, uma vez que alguns concretos apresentaram espalhamento muito irregular, além de que misturas visualmente diferentes obtiveram valores de espalhamento próximos.
- O ensaio de massa específica no estado fresco pode ser utilizado como uma forma de controle na produção do concreto permeável. Os concretos que apresentaram a massa específica superior a $2,0 \text{ g/cm}^3$ obtiveram permeabilidade abaixo do valor mínimo recomendado para este tipo de concreto.
- Para todas as propriedades o teor de agregados foi o fator que mais influenciou o comportamento do concreto permeável, podendo-se dizer que este é o parâmetro de dosagem que governa as propriedades deste material.
- A dimensão máxima da brita não apresentou influência sobre as propriedades mecânicas do concreto permeável. Por outro lado, todas as propriedades físicas (Índice de vazios, absorção de água, massa específica e permeabilidade) sofreram influência deste fator, devido a mudança no arranjo dos grãos (compacidade).
- Ao aumentar o teor de agregados houve o aumento do índice de vazios e da permeabilidade, promovendo a redução da resistência mecânica dos concretos.
- Aconselha-se o uso de teor de agregados igual a 3 para este tipo de concreto. O elevado teor de pasta, associado ao tipo de adensamento, provavelmente promoveu o escorrimento da pasta, reduzindo a permeabilidade do material a valores inferiores ao recomendado, apesar do índice de vazios ter ficado acima do recomendado na literatura.
- O traço com $m=4$ foi o que apresentou melhor relação entre resistência mecânica e permeabilidade, com o valor maior do que o sugerido por norma, sendo o traço mais indicado, dentre os avaliados.

- O aumento da relação a/c, diferentemente do concreto convencional, aumentou a resistência mecânica e reduziu a porosidade e a permeabilidade dos concretos permeáveis.
- Dentro desse contexto, pode-se dizer que dentre os três parâmetros utilizados, o teor de agregados e a relação a/c, por interferir diretamente no volume e na consistência da pasta, são os fatores que mais influenciam no comportamento do concreto permeável.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar prosseguimento aos estudos de concreto permeável, sugere-se os seguintes trabalhos:

- Estudo da influência da incorporação de agregados miúdos no concreto permeável;
- Avaliação do uso de diferentes tipos de adensamento no concreto permeável, de forma a reproduzir a aplicação em campo;
- Avaliação de concretos permeáveis produzidos com diferentes adições e aditivos;
- Produção de concreto permeável para aplicação em calçada, avaliando as propriedades físicas e mecânicas do material, simulando uma possível aplicação real.
- Avaliação do comportamento de concretos permeáveis com o uso de resíduos em sua produção.
- Avaliação de diferentes tipos de medidas de trabalhabilidade para concretos permeáveis.

REFERÊNCIAS

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

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o Controle do escoamento superficial na fonte**. Porto Alegre. 2005. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2005.

AGRA, S.G. **Estudo Experimental de Microrreervatórios para Controle do Escoamento Superficial**. Porto Alegre, 2001. 105p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2001.

ALENCAR, P. C. D. **Avaliação experimental do concreto poroso na atenuação do escoamento superficial em parcelas urbanizadas**. Brasília. 2013. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2013.

ALVES, P. B. **Concreto permeável para pavimentação urbana com uso de resíduos de construção e demolição produzidos na usina de reciclagem de São José do Rio Preto**. Ilha Solteira. 2016. 90p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. 2016.

ARAÚJO, P.R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J.A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16416: Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos -Determinação da absorção de água porimersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9833:** Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 23:** Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248:** Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 46:** Determinação do Material Pulverulento. Rio de Janeiro, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 65:** Determinação do Tempo de Pega. Rio de Janeiro, 2003d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 68:** Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). **Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015.** São Paulo, 2015. Disponível em: < <http://www.abrecon.org.br>. > Acesso em 01 de fevereiro de 2017.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana.** 2 ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2005.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves.** São Paulo. 2013. 133p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, 2013.

BERRY, B. M. *et al.* **Properties of Pervious Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregate.** Rosemont: TRB 2012 Annual Meeting-Using Recycled Concrete in Pervious Concrete Pavements, p. 3-16, 2012.

BHUTTA, M. A. R. *et al.* Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and building materials**, v. 47, p. 1243-1248, 2013.

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland.** Curitiba. 2006. 117p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, 2006

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 627-637, 2016a.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 262-274, 2016b.

CIRIA. **The SuDS Manual.** In: CIRIA C753.. V. 5. Londres, 2015.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307 de 05 de julho de 2002.** Brasília, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 348 de 16 de agosto de 2004.** Brasília, 2004.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 431 de 24 de maio de 2011.** Brasília, 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 448 de 18 de janeiro de 2012.** Brasília, 2012.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 469 de 29 de julho de 2015**. Brasília, 2015.

CORDEIRO, L.N.P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto**. 2013. 127f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CROUCH, L.K., PITT, P. E. J., HEWITT, J. R. Aggregate effects on pervious Portland cement concrete static modulus of elasticity. **J. Mater. Civ. Eng.** 19 (2007) 561–568 (American Society of Civil Engineers).

ECODESENVOLVIMENTO. Disponível em: <http://www.ecodesenvolvimento.org/noticias/asfaltos-permeaveis-podem-reduzir-problemas?tag=arquitetura-e-construcao>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2017.

ELLIS, J. B.; LUNDY, L. Implementing sustainable drainage systems for urban surface water management within the regulatory framework in England and Wales. **Journal of Environmental Management**, v. 183, p. 600-636, 2016.

ETXEBERRIA, M. *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 37, p. 735–742, 2007.

FEIRA DE SANTANA. **Lei complementar Nº 86/2014**, de 2014. Altera, modifica, amplia e dá nova redação à lei nº 1615/92, que institui a Lei do Ordenamento do Uso e da Ocupação do Solo na área urbana do município de Feira de Santana e revoga a lei complementar nº 46, de 19 de agosto de 2010, que dispõe sobre o sistema viário das áreas de expansão urbana da cidade de Feira de Santana. Feira de Santana, 2014.

FREITA, C. L. V. *et al.* Reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD): um estudo de caso na usina de beneficiamento de resíduos de Petrolina-PE. **Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 93-109, 2016.

FU, T. C. *et al.* The Influence of Aggregate Size and Binder Material on the Properties of Pervious Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**. v. 2014, 17p, 2014.

GIAMBIAGI, F., PORTO, C. **2022: propostas para um Brasil melhor no ano bicentenário**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

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

GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. 2011. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

GÜNEYSI, E. *et al.* Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. **Materials and Structures**, v. 49, p. 521–536, 2016.

HODSON, R. Urban health and well-being. **Nature**, v. 531, n. 7594, p. S49-S49, 2016.

HÖLTZ, F. C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. Porto Alegre. 2011. 138p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2011.

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

HUSSIN, M. **An investigation into the effect of material composition on the fundamental properties of permeable concrete**. Toowoomba. 2012. Dissertação (Mestrado). University of Southern Queensland, 2012.

IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLA, V.C, Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524–529, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censos demográficos**.

JOCHEM, L. F. **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD: características físicas e propriedades da microestrutura.** 2012. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

KEVERN, J. T. et al. **Advancements in pervious concrete technology.** Iowa: Iowa State University: 2008.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e análise do desempenho dos elementos de drenagem fabricados em concreto permeável.** Porto Alegre. 2014. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2014

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Porto Alegre, 2001. 270p. Tese de doutorado. Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

LIAN, C., ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2664-2671, 2010.

MAHALINGAM, R.; MAHALINGAM, S. V. Analysis of pervious concrete properties. **Journal of the Croatian Association of Civil Engineering**, v. 68, n. 6, p. 493-501, 2016.

MALTA, J. O. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição.** 2012. 1792 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica, Universidade federal da Bahia, Salvador, 2012.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. **Conceitos e Requisitos para Pavimentos Intertravado Permeável.** Prática recomendada – PR-2. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2011. 8p.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. **Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas.** São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2011.24p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: IBRACON, 2008.

MERIGHI, J. V. FORTES, R. M. BANDEIRA. A. Estudo da dosagem do concreto poroso para pavimentação: características mecânicas e hídricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul. **Anais...** Bento Gonçalves, 2007.

MOREIRA, L. H. H.; FIGUEIREDO, A. D. **Influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. São Paulo: EPUSP, 2010. 17 p. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/563)

NAÇÕES UNIDAS. Department of Economic and Social Affairs. **World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights**. Nova Iorque, 2015.

NEITHALATH, N. *et al.* Development of Quiet and Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials. Final Report. The Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways, Composites, p. 179, 2003.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2015, 888 p.

NGUYEN, D. H. *et al.* A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 271-282, 2014.

NOGUEIRA, J. R. S. **Avaliação da influência do método de mistura nas propriedades de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2015. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

NRMCA - National Ready Mixed Concrete Association. Pervious Concrete. Concrete in Practice – What, Why & How? CIP 38, 2004.

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto**. 2013. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.

PAIN, S. The rise of the urbanite. **Nature**, v. 531, n. 7594, p. S50-S51, 2016

PINTO, L. L. C. A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2011.

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

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18, p. 461–468, 2004.

PORTO, ZAHED FILHO; MARCELLINI. **Escoamento superficial: Análise do hidrograma; Hidrograma unitário**. PHD 307 – Hidrologia Aplicada. Notas de aula. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 1999.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (PMSP). IP 02 - **Classificação das Vias**. São Paulo, 2004.

REIS, C. N. S. **Influência da utilização de agregado miúdo de RCD na aderência aço concreto reciclado**. Feira de Santana, 2009. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)-Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2009.

RHINOPISOS. Disponível em: <<http://www.rhinopisos.com.br>>. Acesso em: 28 de março de 2017.

RIZVI, R. *et al.* Incorporating Recycled Concrete Aggregate in Pervious Concrete Pavements. Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada- Transportation in a Climate of Change, 2009, Canada, 2009.18 p.

SANTIAGO, E. Q. R. **Utilização de agregados de EVA e RCD para obtenção de concretos leves**. Feira de Santana. 2008. 168f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, 2008.

SCHWETZ, P. F. *et al.* Concreto permeável: otimização do traço para pavimentação de fluxo leve. In: Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, XIII, 2015, Lisboa. **Anais...Lisboa**, 2015.

SHEN, L. *et al.* Measuring incoordination-adjusted sustainability performance during the urbanization process: Spatial-dimensional perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p.731–743, 2017.

SILVA, F. B. **Sistemas Construtivos - Pavimentos de concreto permeável**. Revista Técnica. Edição 190, 2012.

SILVA, R.V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201–217, 2014.

SUDERSHA - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. **Manual de Drenagem Urbana**. Curitiba, 2002.

TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. **Pervious Concrete Pavements**. EB302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, e National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 36p. 2004.

TUCCI, C. E. M. Curso de Gestão das inundações urbanas. **Global Water Partnership**. Porto Alegre, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas: saneamento para todos**. Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, v. 4, Brasília. DF: 2006. 194p.

TUCCI, C. E. M.. **Drenagem urbana**. Ciência Cultura, São Paulo, v. 55, n. 4,2003. Disponível em:<http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400020&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 20 de janeiro 2017.

VIDAL, A. S. **Caracterização de concreto permeável produzido com agregados reciclados de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano**. Rio de Janeiro. 2014. 131p. Dissertação (Mestrado). Programa de Engenharia Urbana. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

VIEIRA, G. L.; Dal Molin, D. C.C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**, v.4, n.4, p. 47-63, 2004.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. São Paulo. 2009. 191p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

WAZIH, A. M. et al. Recycled construction and demolition concrete wasteas aggregate for structural concrete. **HBRC Journal**, v. 9 p. 193-200, 2013.

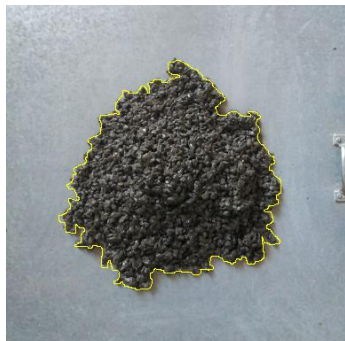
YAZDI, J.; NEYSHABOURI, S.A.A. S. Identifying low impact development strategies for flood mitigation using a fuzzy-probabilistic approach. **Environmental Modelling & Software**, v. 60, p. 31-44, 2014.

ZAETANG, Y.;SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 15-21, 2016.

ZHANG, Z. *et al.* Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 112-118, 2017.

APÊNDICE

APÊNDICE 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ESPALHAMENTO DO CONCRETO PERMEÁVEL



1:3 – 0,30 – 9,5

Espalhamento medido = 400 mm

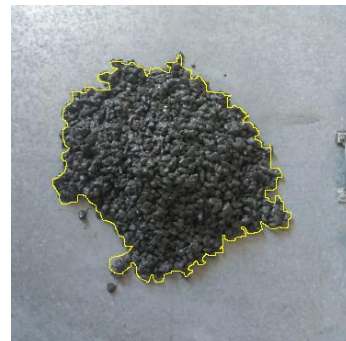
Espalhamento ImageJ = 400 mm



1:3 - 0,30 – 12,5

Espalhamento medido = 370 mm

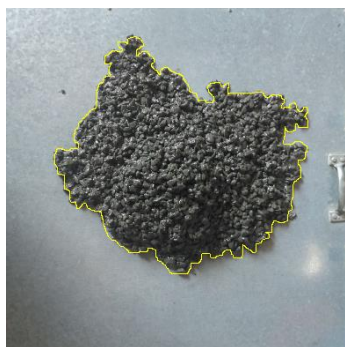
Espalhamento Image J = 390 mm



1:3 - 0,30 – 19,0

Espalhamento medido = 400 mm

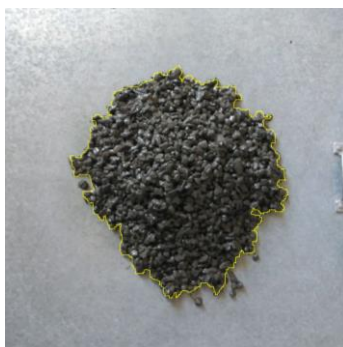
Espalhamento Image J = 395 mm



1:3 – 0,32 – 9,5

Espalhamento medido = 390 mm

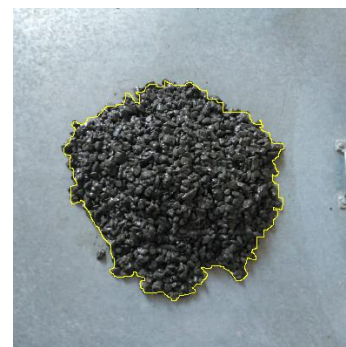
Espalhamento Image J = 410 mm



1:3 - 0,32 – 12,5

Espalhamento medido = 365 mm

Espalhamento Image J = 385 mm



1:3 - 0,32 – 19,0

Espalhamento medido = 405 mm

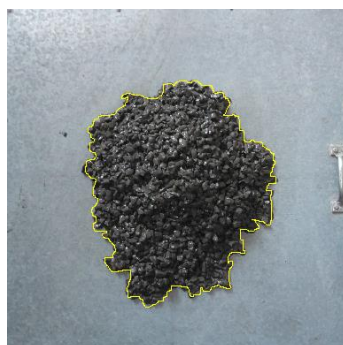
Espalhamento Image J = 390 mm



1:3 – 0,34 – 9,5

Espalhamento medido = 385 mm

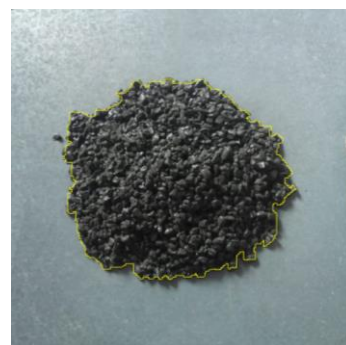
Espalhamento Image J = 395 mm



1:3 - 0,34 – 12,5

Espalhamento medido = 380 mm

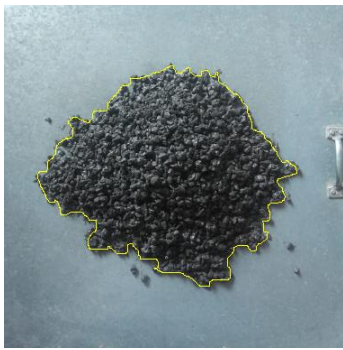
Espalhamento Image J = 385 mm



1:3 - 0,34 – 19,0

Espalhamento medido = 410 mm

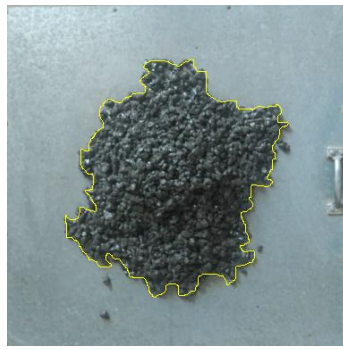
Espalhamento Image J = 395 mm



1:4 - 0,30 - 9,5

Espalhamento medido = 390 mm

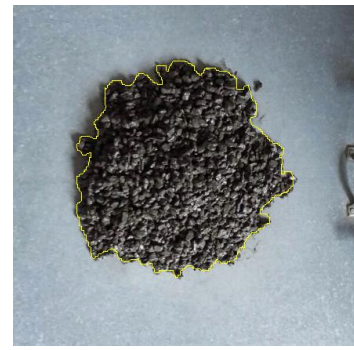
Espalhamento Image J = 395 mm



1:4 - 0,30 - 12,5

Espalhamento medido = 435 mm

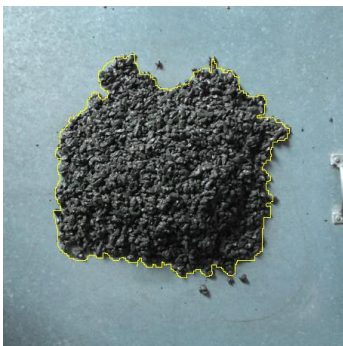
Espalhamento Image J = 410 mm



1:4 - 0,30 - 19,0

Espalhamento medido = 365 mm

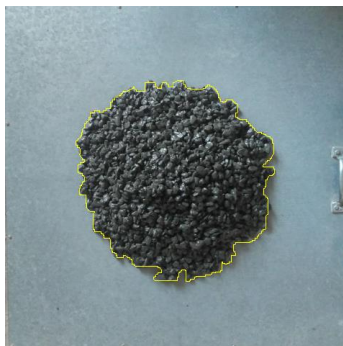
Espalhamento Image J = 380 mm



1:4 - 0,32 - 9,5

Espalhamento medido = 400 mm

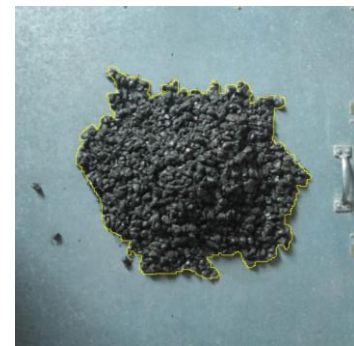
Espalhamento Image J = 405 mm



1:4 - 0,32 - 12,5

Espalhamento medido = 385 mm

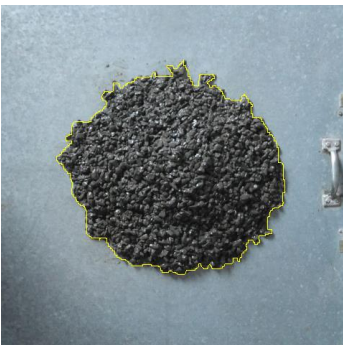
Espalhamento Image J = 385 mm



1:4 - 0,32 - 19,0

Espalhamento medido = 405 mm

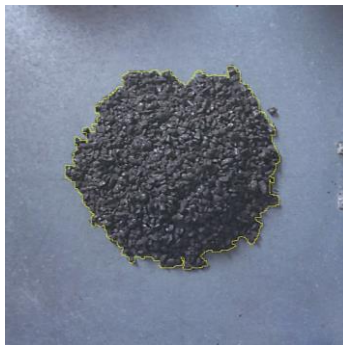
Espalhamento Image J = 410 mm



1:4 - 0,34 - 9,5

Espalhamento medido = 390 mm

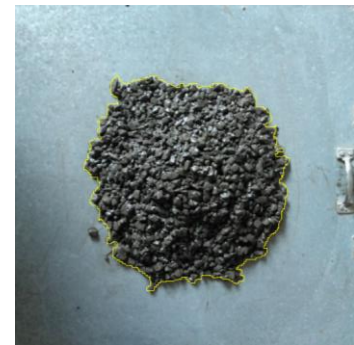
Espalhamento Image J = 395 mm



1:4 - 0,34 - 12,5

Espalhamento medido = 380 mm

Espalhamento Image J = 390 mm



1:4 - 0,34 - 19,0

Espalhamento medido = 390 mm

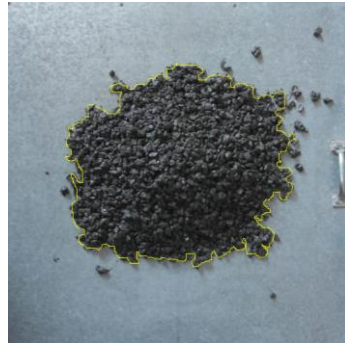
Espalhamento Image J = 400 m



1:5 - 0,30 - 9,5

Espalhamento medido = 385 mm

Espalhamento Image J = 375 mm



1:5 - 0,30 - 12,5

Espalhamento medido = 415 mm

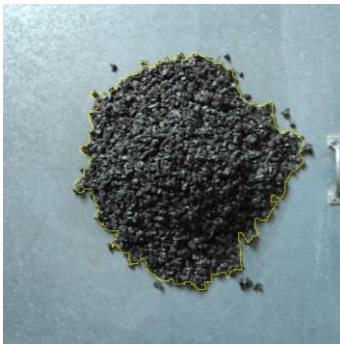
Espalhamento Image J = 410 mm



1:5 - 0,30 - 19,0

Espalhamento medido = 405 mm

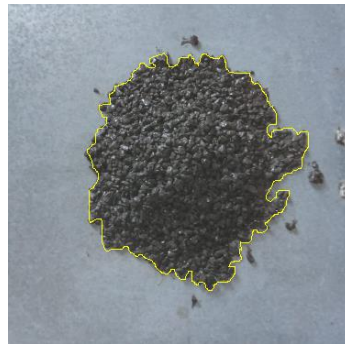
Espalhamento Image J = 350 mm



1:5 - 0,32 - 9,5

Espalhamento medido = 430 mm

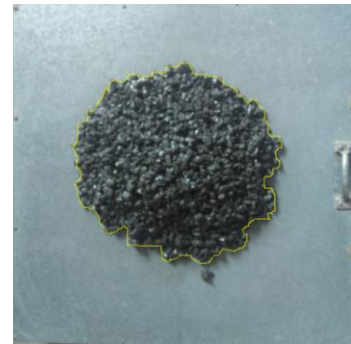
Espalhamento Image J = 410 mm



1:5 - 0,32 - 12,5

Espalhamento medido = 405 mm

Espalhamento Image J = 410 mm



1:5 - 0,32 - 19,0

Espalhamento medido = 395 mm

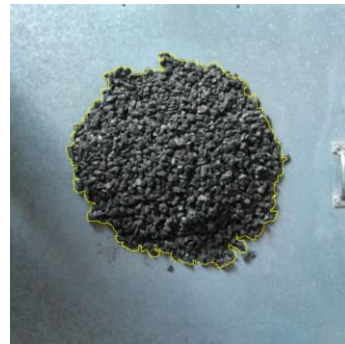
Espalhamento Image J = 395 mm



1:5 - 0,34 - 9,5

Espalhamento medido = 400 mm

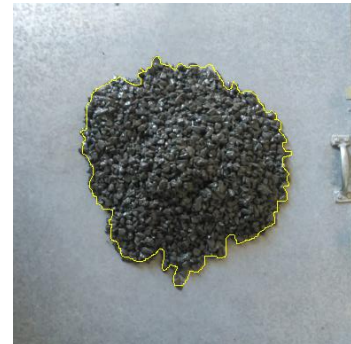
Espalhamento Image J = 395 mm



1:5 - 0,34 - 12,5

Espalhamento medido = 395 mm

Espalhamento Image J = 410 mm



1:5 - 0,34 - 19,0

Espalhamento medido = 410 mm

Espalhamento Image J = 395 mm