



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

CONCRETO POROSO COMO REVESTIMENTO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL: ALTERNATIVA DE DRENAGEM URBANA NÃO ESTRUTURAL À REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM.

LOURENÇO AUGUSTO DA COSTA BECHARA

BELÉM - PA
AGOSTO DE 2017

LOURENÇO AUGUSTO DA COSTA BECHARA

CONCRETO POROSO COMO REVESTIMENTO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL: ALTERNATIVA DE DRENAGEM URBANA NÃO ESTRUTURAL À REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM.

Dissertação apresentada ao **Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Pará**, na linha Patrimônio, Restauro e Tecnologia como parte dos requisitos necessários a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof^o Dr^o Márcio Santos Barata.

BELÉM - PA

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Bechara, Lourenço Augusto da Costa, 1977-

Concreto poroso como revestimento de pavimento permeável:
alternativa de drenagem urbana não estrutural à Região Metropolitana de
Belém / Lourenço Augusto da Costa Bechara.— 2017.

Orientador: Márcio Santos Barata

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo,
Belém, 2017.

1. Concreto. 2. Pavimentos. 3. Permeabilidade. 4. Drenagem. 5.
Sustentabilidade. I. Título.

CDD 23. ed. 624.1834

AGOSTO DE 2017
LOURENÇO AUGUSTO DA COSTA BECHARA
CONCRETO POROSO COMO REVESTIMENTO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL: ALTERNATIVA DE
DRENAGEM URBANA NÃO ESTRUTURAL À REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM.

Belém – PA, 31 de Agosto de 2017.

Banca examinadora.

Prof. Dr. Márcio Santos Barata (orientador).
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Juliano Pamplona Ximenes Pontes (Membro Interno).
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - Universidade Federal do Pará

Prof^a Dr^a Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro (Membro Interno).
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Pará

Ao amor e apoio incondicional.
À Antônio, Carla e Natalina.

AGRADECIMENTOS

Aos professores e servidores do programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, em especial ao Prof. Dr. José Júlio e Prof.^a Dr.^a Cláudia Cardoso, sempre disponíveis nas orientações e ajustes de demandas inerentes ao curso.

Ao Instituto Federal do Pará, em especial a direção do campus e corpo docente do campus de Conceição de Conceição do Araguaia que deram total apoio e suporte durante esta jornada de pós-graduação acadêmica.

Aos amigos e colegas de trabalho, Victor Barbosa, Allan Nunes, Cinara Estrela, José Roberto, Múcio Sanches, Michele Ribeiro e Dennys Arrifano (in memoriam) pelo apoio inicial e suporte durante esta jornada acadêmica.

Aos meu Alunos do IFPA-CDA, pela compreensão e apoio neste período de ausência.

Ao Engenheiros Paulo Brigido, Scyla Zeferino e Nelson Gatinho pelos insumos disponibilizados.

A Goiás Concretos pela doação da brita empregada nesta investigação científica.

Aos amigos da Tecnobeton, Claudio, Vavá, Wagner, Arley e Forte, pela disponibilidade de trabalho e momentos de descontração.

A minha amiga para toda a vida, companheira de academia na graduação, pós-graduação e mestrado Glória “Glorinha” Costa, muito obrigado por ser minha amiga a tantos anos.

Aos colegas, a Arq.^a Luciana Hamoy e Prof. Eng. Gustavo Sales os quais vivenciaram comigo as fases do mestrado em Arquitetura e Urbanismo.

Ao Prof. Dr. Marcelo Picanço pelas contribuições de suma importância durante a banca de qualificação.

Ao Prof. Dr. Juliano Pamplona Ximenes Ponte, pela orientação de alinhamento entre a tecnologia e o propósito do programa.

A Prof.^a Dr.^a Luciana Cordeiro pelas orientações e agendamentos dos laboratórios e equipamentos do LEC UFPA.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Santos Barata pela disponibilidade, dedicação, orientações, discussões e suporte técnico, que foram fundamentais e indispensáveis ao processo de amadurecimento e realização da pesquisa desenvolvida.

Aos Meus pais Antônio Bechara e Natalina Bechara, pelo amor e apoio incondicional e suporte (casa, comida, roupa lavada e passada para um marmanjo de 40 anos) muito obrigado por esse período de retorno a sua casa.

A minha esposa, Carla Fernanda, pelo amor, paciência e espera, eu a amo e espero ser merecedor de seu amor e admiração.

E aos valentes pesquisadores brasileiros que operam verdadeiros milagres para o avanço da ciência e tecnologia deste país.

RESUMO

O processo de urbanização das cidades Brasileiras se deu de forma rápida e sem planejamento principalmente após a segunda metade do século XX. O intenso crescimento populacional gerou sobrecarga nos sistemas de drenagem urbana das regiões metropolitanas, o aumento de demanda associado as inundações decorrentes de chuvas intensas, impermeabilização do solo, coincidência de picos de mares com altas precipitações e ocupação irregular de áreas de escoamento natural esgotaram as soluções estruturais de drenagem urbana. O emprego de pavimentos permeáveis como equipamentos urbanos podem contribuir para mitigar a vazão do escoamento superficial através da infiltração e armazenamento das águas pluviais. O trabalho teve como objetivo avaliar a possibilidade de produção de concretos porosos de modo a atender os critérios de desempenho mecânico e hidráulico para pavimento permeável moldado no local. Foram formuladas cinco misturas de concreto produzidas através do controle da distribuição granulométrica de dois tipos de brita (0 e 1). O programa experimental foi dividido em duas etapas. Na etapa preliminar foi realizada a caracterização das diversas pedras britadas. Na primeira etapa foi realizado um estudo de determinação das massas unitárias de onze misturas de pedras britadas, uniformes e descontínuas, de modo a determinar quais as cinco mais adequadas para a produção do concreto poroso. Na segunda etapa, foram determinadas as propriedades de cinco misturas de concreto poroso constituído de pedra britada, tais como, massa específica aparente, massa específica seca, índice de vazios, coeficiente de permeabilidade e resistência à tração na flexão. Os resultados dos esqueletos granulométricos apresentaram valores de massa unitária variando entre o intervalo de 1286 a 1402 Kg/m³. Os resultados da análise das misturas de concreto poroso apresentaram os resultados de massa específica aparente na ordem de valores variando entre 1741 Kg/m³ e 1845 Kg/m³. No estado endurecido, os resultados de massa específica seca variaram entre 2,08 g/cm³ e 2,26 g/cm³, volume de vazios totais entre 19,08% e 26,66%. A resistência à tração na flexão apresentou os valores de 2,48 MPa a 3,8 MPa. Os coeficientes de permeabilidade foram todos bastante superiores ao valor 10⁻³ m/s, na ordem de 2,07x10⁻³ a 3,87x10⁻³. Os resultados indicam que todas as misturas apresentam excelente condutividade hidráulica e resistência necessárias para a sua aplicação como pavimento tanto em áreas de calçada quanto estacionamentos e vias de baixo tráfego.

Palavras Chave: concreto poroso, drenagem urbana, pavimento permeável, tráfego leve, brita, sustentabilidade.

ABSTRACT

The process of urbanization of the Brazilian cities occurred quickly and without planning mainly after the second half of the twentieth century. The intense population growth generated an overload in the urban drainage systems of the metropolitan regions, the increase in the demand associated with the floods caused by heavy rains, waterproofing of the soil, coincidence of peaks with high precipitations and irregular occupation of areas of natural drainage ran out of the structural solutions of urban drainage. The use of permeable pavements as urban equipment can contribute to mitigate the flow of surface runoff through the infiltration and storage of rainwater. The objective of this research was to evaluate the possibility of producing pervious concrete in order to meet the criteria of mechanical and hydraulic performance for permeable pavement molded at the site. Five concrete mixtures were formulated by controlling the grain size distribution of two types of crushed stone (0 and 1). The experimental program was divided into two stages. In the preliminary step, it was accomplished the characterization of several crushed stones. In the first stage, a study was carried out to determine the unit weight of eleven mixtures of uniform and discontinuous crushed stones in order to determine the five most suitable mixtures which would be used for the production of pervious concrete. In the second stage, it was determined the properties of the five mixtures of pervious concrete constituted of crushed stone, such as, fresh apparent density, hardened specific gravity, voids content, coefficient of permeability and flexural strength in the bending. The results of the granulometric gradation scale presented values of unit mass varying between the values of 1286 to 1402 Kg / m³. The results of the analysis of the mixtures of pervious concrete showed the results of fresh apparent density in the order of values ranging from 1741 kg / m³ to 1845 kg / m³. In the hardened state, specific gravity results ranged from 2.08 g / cm³ to 2.26 g / cm³, total voids content ranging from 19.08% to 26.66%. The flexural strength presented values from 2.48 MPa to 3.8 MPa. The coefficients of permeability were all well in excess of 10⁻³ m / s, ranging from 2.07x10⁻³ to 3.87x10⁻³. The results indicate that all the mixtures present excellent hydraulic conductivity and resistance necessary for their application as pavement in paved areas as well as parking lots and low traffic paths.

Keywords: Pervious Concrete; Urban Drainage; Pervious Pavement; Light traffic; Crushed Stone; Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.

FIGURA 1: AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO POPULACIONAL NAS ÁREAS URBANAS.	20
FIGURA 2: INFLUÊNCIA DA URBANIZAÇÃO EM DIFERENTES COMPONENTES DO CICLO ÁGUA.	20
FIGURA 3: EVOLUÇÃO DE ABRANGÊNCIA DA GESTÃO DE DRENAGEM URBANA.	23
FIGURA 4: MAPA DE BELÉM- DESTAQUE PARA O IGARAPÉ DO PIRI.	24
FIGURA 5: MAPA DE BELÉM DE 1919- DEMARCAÇÃO DA 1º LÉGUA PATRIMONIAL.	25
FIGURA 6: MARCAÇÃO DAS ÁREAS VULNERÁVEIS A ALAGAMENTO NA CIDADE DE BELÉM-PA.	26
FIGURA 7: PREPARAÇÃO DE PISO PERMEÁVEL COM CONCRETO POROSO.	32
FIGURA 8: MANUTENÇÃO PERIÓDICA DE PISOS PERMEÁVEIS DE CONCRETOS POROSOS.	38
FIGURA 9: FLUXOGRAMA DE EXEMPLIFICAÇÃO DAS ETAPAS DA PESQUISA.	41
FIGURA 10: CURVA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA BRITA 0.	44
FIGURA 11: CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA BRITA 1.	45
FIGURA 12: SEPARAÇÃO DAS PORÇÕES DE 3000G DAS BRITAS.	48
FIGURA 13: ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE MASSA UNITÁRIA.	49
FIGURA 14: PESAGEM DAS AMOSTRAS DE AGREGADO.	49
FIGURA 15: AGITADOR E CONJUNTO DE PENEIRAS.	53
FIGURA 16: ENSAIO DE MASSA UNITÁRIA E PREPARAÇÃO DE MISTURA DESCONTÍNUA.	54
FIGURA 17: PROJETO ESQUEMÁTICOS DAS FÔRMAS.	57
FIGURA 18: MOLDAGEM DAS PLACAS E ENSAIO DE CONSISTÊNCIA.	59
FIGURA 19: ESQUEMA DE CORTE E EXTRAÇÃO.	60
FIGURA 20: PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.	61
FIGURA 21: DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA APARENTE.	62
FIGURA 22: PESAGEM DOS CORPOS DE PROVA CÚBICOS.	63
FIGURA 23: PERMEÂMETRO DE CARGA VARIÁVEL E CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS.	65
FIGURA 24: ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO.	66
FIGURA 25: MISTURAS DESCONTÍNUAS DO GRUPO I, D1, D2 E D3.	70
FIGURA 26: RELAÇÃO ENTRE O TAMANHO DA PARTÍCULA VERSUS MASSA UNITÁRIA.	73
FIGURA 27: GRUPO 1- RELAÇÃO ENTRE O TAMANHO DA PARTÍCULA VERSUS MASSA UNITÁRIA.	74
FIGURA 28: GRUPO 2- RELAÇÃO ENTRE O TAMANHO DA PARTÍCULA VERSUS MASSA UNITÁRIA.	74
FIGURA 29: PARTÍCULAS LAMELARES E ALONGADAS DA BRITA GRANÍTICA DE TRACUATEUA.	75
FIGURA 30: RELAÇÃO ENTRE O TAMANHO DA PARTÍCULA VERSUS MASSA ESPECÍFICA APARENTE.	77
FIGURA 31: MASSA ESPECÍFICA SECA.	79
FIGURA 32: MASSA ESPECÍFICA SECA VERSUS TAMANHO DAS PARTÍCULAS.	85
FIGURA 33: ÍNDICE DE VAZIOS TOTAIS.	88
FIGURA 34: ÍNDICE DE VAZIOS <i>VERSUS</i> TAMANHO DA PARTÍCULA.	90
FIGURA 35: MASSA ESPECÍFICA SECA VERSUS ÍNDICE DE VAZIOS TOTAIS.	93
FIGURA 36: COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE K.	95
FIGURA 37: COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE VERSUS TAMANHO DE PARTÍCULA.	97
FIGURA 38: COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE VERSUS TAMANHO DE PARTÍCULA: U1-U2-U3.	97
FIGURA 39: COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE <i>VERSUS</i> ÍNDICE DE VAZIOS.	98
FIGURA 40: BLOX PLOT - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE K.	100
FIGURA 41: BLOX PLOT - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.	103
FIGURA 42: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO <i>VERSUS</i> ÍNDICE DE VAZIOS.	105
FIGURA 43: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO <i>VERSUS</i> INTERVALO DE TAMANHO DA PARTÍCULA.	106
FIGURA 44: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO <i>VERSUS</i> MASSA ESPECÍFICA SECA.	107
FIGURA 45: MAPA DA BACIA DO UNA; SISTEMA VIÁRIO E DELIMITAÇÃO TERRITORIAL.	109

LISTA DE TABELAS.

TABELA 1: LEVANTAMENTO DAS PROPORÇÕES NAS MISTURAS DE MATERIAIS – PERVIOUS CONCRETE...	29
TABELA 2: FAIXA DE COMPOSIÇÃO DE MISTURA DE AGREGADO GRAÚDO DE CONCRETOS POROSOS....	30
TABELA 3: ÍNDICE DE VAZIOS.	33
TABELA 4: COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE.	34
TABELA 5: MASSA ESPECÍFICA.....	35
TABELA 6: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.	36
TABELA 7: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.	42
TABELA 8: CARACTERÍSTICAS DA BRITA 0.	46
TABELA 9: CARACTERÍSTICAS DA BRITA 1.	47
TABELA 10: COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ESQUELETO GRANULAR.....	52
TABELA 11: DOSAGEM DAS MISTURAS DE CONCRETO POROSO.....	56
TABELA 12: MISTURAS DO AGREGADO GRAÚDO – VALORES DE CARACTERIZAÇÃO.	68
TABELA 13: ANOVA: MASSA UNITÁRIA DAS MISTURAS UNIFORMES.....	69
TABELA 14: COMPARAÇÃO DE MÚLTIPLAS MÉDIAS – MISTURAS UNIFORMES.....	69
TABELA 15: ANOVA: MASSA UNITÁRIA DO GRUPO 1, MISTURAS DESCONTÍNUAS.	70
TABELA 16: ANOVA: MASSA UNITÁRIA DO GRUPO 2, MISTURAS DESCONTÍNUAS.	71
TABELA 17: COMPARAÇÃO DE MÚLTIPLAS MÉDIAS, MISTURAS DESCONTÍNUAS GRUPO 2.	71
TABELA 18: MASSA UNITÁRIA DO AGREGADO GRAÚDO – VALORES DE CARACTERIZAÇÃO.	72
TABELA 19: MASSA ESPECÍFICA APARENTE.....	77
TABELA 20: MASSA ESPECÍFICA SECA.	79
TABELA 21: MASSA ESPECÍFICA SECA - ρ_s – VALORES DE CARACTERIZAÇÃO.	81
TABELA 22: ANOVA: MASSA ESPECÍFICA SECA.....	84
TABELA 23: COMPARAÇÃO DE MÚLTIPLAS MÉDIAS, MASSA ESPECÍFICA SECA.....	84
TABELA 24: ÍNDICE DE VAZIOS TOTAIS.	88
TABELA 25: VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIO TOTAL.	89
TABELA 26: ANOVA – ÍNDICE DE VAZIOS TOTAIS.	92
TABELA 27: COMPARAÇÃO DE MÚLTIPLAS MÉDIAS, ÍNDICE DE VAZIOS TOTAIS.	92
TABELA 28: COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE.	95
TABELA 29: COMPARATIVOS ENTRE REFERÊNCIAS DE COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE.....	96
TABELA 30: ANOVA – COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE.....	99
TABELA 31: COMPARAÇÃO DE MÚLTIPLAS MÉDIAS, COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE.....	100
TABELA 32: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.	102
TABELA 33: COMPARATIVOS ENTRE REFERÊNCIAS DE RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO.	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
a/c	Fator água/cimento
ag/c	Fator agregado graúdo/cimento
BMP	Best Management Practice
CIBRASA	Cimentos do Brasil S.A.
CMM	Comparação Múltipla de Médias
COSANPA	Companhia de Saneamento do Pará
CP	Cimento Portland
CPAD	Cimento Portland composto
CPC	Cimento Portland Comum
D1	Mistura Descontínua 1.
D2	Mistura Descontínua 2.
D3	Mistura Descontínua 3.
D4	Mistura Descontínua 4.
D5	Mistura Descontínua 5.
D6	Mistura Descontínua 6.
DMS	Dimensão Máxima Característica da Brita graúda
EPA	Environmental Protection Agency
FC	Fator de Compactação
Fct,f	Tração na Flexão
g	Gramas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
JIS	Japanese Industrial Standards
k	Coeficiente de Permeabilidade
Kg	Quilos
LEC UFPA	Laboratório de Engenharia Civil
m	Metros
Mc	Massa de Cimento
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
MU	Massa Unitária
NBR	Norma Brasileira

OMM	Organização Mundial de Meteorologia
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PA	Pará
pol, ou, in	Polegadas
RMB	Região Metropolitana de Belém
Va	Teor de Vazios do Agregado
Vcon	Vazios conectados da Mistura
Vm	Volume de vazios da mistura
Vp	Teor de Argamassa
V _r	Índice de Vazios Totais
U1	Mistura Uniforme 1
U2	Mistura Uniforme 2.
U3	Mistura Uniforme 3.
UFPA	Universidade Federal do Pará
WMO	World Meteorological Organization
γ _c	Peso Específico do cimento
ρ _{ap}	Massa Específica Aparente
ρ _s	Massa Específica Seca
∅	Diâmetro

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.	vii
LISTA DE TABELAS.	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
1 INTRODUÇÃO.	13
2 JUSTIFICATIVA.	16
3 OBJETIVOS	18
3.1 OBJETIVO GERAL	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	19
4.1 DRENAGEM URBANA.	19
4.2 INTERVENÇÕES DE DRENAGEM DA URBANA EM BELÉM.	24
4.3 CONCRETO POROSO: CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL.	28
4.3.1 AGREGADOS.	30
4.3.2 CIMENTO, ADIÇÕES, ADITIVOS QUÍMICOS E TRABALHABILIDADE.	32
4.3.3 POROSIDADE.	33
4.3.4 PERMEABILIDADE.	34
4.3.5 MASSA ESPECÍFICA.	35
4.3.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS.	36
4.3.7 PROJETO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL.	37
5 MATERIAIS E MÉTODOS.	39
5.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.	39
5.2 MATERIAIS	42
5.2.1 CIMENTO PORTLAND CP II Z 32.	42
5.2.2 AGREGADO GRAÚDO.	43
5.2.3 ÁGUA.	43
5.3 ETAPA PRELIMINAR - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS.	44
5.4 1ª ETAPA DA PESQUISA – DEFINIÇÃO DAS MISTURAS DE AGREGADO GRAÚDO DOS CONCRETOS POROSOS.	50
DEFINIÇÃO DAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS.	50
PREPARAÇÃO, ENSAIOS E DEFINIÇÕES DAS MISTURAS DE AGREGADO GRAÚDO.	53
5.5 2ª ETAPA DA PESQUISA – PRODUÇÃO DO CONCRETO POROSO.	55
5.5.1 MÉTODO DE DOSAGEM DO CONCRETO POROSO.	55
5.5.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO POROSO.	57

5.5.3	EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	60
5.5.4	ENSAIOS DO CONCRETO POROSO NO ESTADO FRESCO.	62
5.5.5	ENSAIOS DO CONCRETO POROSO NO ESTADO ENDURECIDO.....	63
5.5.6	DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS.	64
5.5.7	DETERMINAÇÃO DA TAXA DE PERMEABILIDADE.....	65
5.5.8	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	66
5.6	SIMULAÇÃO DE APLICAÇÃO DO CONCRETO POROSO COMO PISO PERMEÁVEL NA RMB. 67	
6	RESULTADOS.....	68
6.1	1ª ETAPA: DEFINIÇÃO DAS MISTURAS DE AGREGADO GRAÚDO DOS CONCRETOS POROSOS.....	68
6.2	2ª ETAPA: PROPRIEDADES DO CONCRETO POROSO.....	77
6.2.1	PROPRIEDADES NO ESTADO PLÁSTICO.....	77
	MASSA ESPECÍFICA APARENTE - ρ_{ap}	77
6.2.2	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.....	79
	MASSA ESPECÍFICA SECA - ρ_s	79
6.2.3	ÍNDICE DE VAZIOS TOTAIS - V_R	88
6.2.4	PERMEABILIDADE - K	95
6.2.5	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	102
6.2.6	SIMULAÇÃO DE APLICAÇÃO DO CONCRETO POROSO COMO PISO PERMEÁVEL NA RMB.....	108
7	CONCLUSÕES.	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112

1 INTRODUÇÃO.

O crescimento da população urbana e consequente ocupação de território sem planejamento traz como uma de suas consequências a impermeabilização do solo, esse processo aumenta consideravelmente a velocidade de escoamento superficial e elimina a absorção natural das águas quando isto acontece nas áreas marginais a cursos d'água e várzea, são gerados pontos de inundação tanto por excesso de chuvas quanto por cheias de mares, tendo em vista que os procedimentos usuais para a implementação de drenagem preveem aterramentos de pontos de alagamento, correção e canalização de rios e cursos d'água de menor volume (VIRGILIIS, 2009).

O processo de ocupação irregular de áreas urbanas cria demandas de saneamento, pavimentação e drenagem, estes aglomerados subnormais tendem a receber soluções de drenagem urbana convencionais, as quais aceleram o escoamento das águas pluviais a jusante com direcionamento concentrado aos pontos naturais de escoamento e absorção (PONTE, et al., 2014).

Dados da World Meteorological Organization (WMO) relacionam o aumento de incidência de inundações ao crescimento populacional, ocupação de áreas de enchentes naturais, desenvolvimento econômico desequilibrado e urbanização, as quais sofrem os efeitos das mudanças climáticas no ciclo hidrológico. Estes acontecimentos, em 2013, causaram a morte de aproximadamente 9 milhões de pessoas e 53,9 bilhões de dólares em danos materiais. Segundo dados da ONU e da OMS estes números podem aumentar, tendo em vista que em uma projeção para 2050, 2 bilhões de pessoas ocupariam as áreas de risco de inundação e estariam diretamente suscetíveis aos incidentes hídricos e climáticos. No Brasil, dados do IBGE, indicam que 56% dos municípios apresentaram situações de inundação em áreas urbanas no período de 2009 a 2013, com média de 120 óbitos anuais e danos materiais de 250 milhões de dólares, problemas que podem ser evitados pelo dimensionamento adequado dos sistemas de drenagem urbana (MARTINS, 2015).

A solução clássica a implementação do sistema de drenagem urbana é baseada na transferência rápida dos efluentes para a jusante, onde a coleta primária é feita pela canalização das águas pluviais e águas servidas dos lotes e logradouros, denominado como micro drenagem, para o sistema de canais de grande volume de transporte e retenção, denominado macrodrenagem (VIRGILIIS, 2009). Todavia a avaliação deste sistema mostra algumas questões problemáticas de funcionamento, como o aumento da velocidade de escoamento que

gerou o transporte e acúmulo de resíduos sólidos nos pontos de coleta e armazenamento, com isso causando frequentes transbordamentos e criação de zonas pontuais de enchentes, outro fator é o aumento da área impermeável que elimina a infiltração natural e aumento da temperatura em microrregiões das cidades o que diminui a qualidade do ambiente construído para o morador (CASTRO, 2011; PINTO, 2011; PONTE, et al., 2014 e MARTINS, 2015).

Em função de falhas de funcionamento do sistema clássico de drenagem, na década de 1970, na Europa ocidental e parte da América do Norte (Estados Unidos e Canadá), surgiram tecnologias alternativas ou compensatórias de drenagem, são chamadas assim porque compensam os efeitos da urbanização através do controle do excesso de água da impermeabilização, evitando a transferência rápida para a jusante e são classificadas como: Bacias de retenção e amortecimento de cheias, estruturas de armazenamento temporário, pavimentos porosos ou permeáveis, estruturas de infiltração e percolação, canalização dos cursos d'água com técnicas de escoamento lento e detenção temporária, para o controle dos volumes na fonte com diminuição e retardamento de picos de cheia (VIRGILIIS, 2009 e TUCCI, 2012).

Essas medidas também são conhecidas como sustentáveis ou naturais, visto que levam em consideração os aspectos naturais de absorção e infiltração no solo assim como sua implantação em associação as medidas estruturais que diminuem a velocidade de escoamento e eliminam os pontos de inundações uma vez que dividem o transporte e percolação das águas por todo o sistema Oliveira et al, (2009) apud PONTE, et al., (2014).

Uma das soluções enumeradas como não estruturais é a adoção de pavimentos permeáveis como reservatórios de armazenamento ou reservatórios de infiltração. Estes equipamentos podem ser dimensionados como bifuncionais, com sua função mecânica afim de suportar as cargas provenientes do tráfego de veículos e ainda a função hidráulica para armazenar ou facilitar a percolação e absorção das águas de acordo com o previsto em projeto, como relatam Azzout et al (1994) apud Virgiliis (2009) que também os classificam em 4 tipos: Diferenciados primeiramente pelas propriedades de drenagem em distribuída ou localizado; quanto ao seu revestimento em poroso ou impermeável. E quanto ao tipo de infiltração são subdivididas em 3: Infiltração total, infiltração parcial e infiltração de controle de qualidade da água. Vale ressaltar que a ABNT NBR 16416 (ABNT, 2015) apresenta uma classificação com base nesta informações, com diretrizes básicas de caracterização de pavimentos permeáveis, tanto para os revestimentos quanto base e sub-base.

Virgiliis, (2009) coloca que o uso de pavimentos permeáveis voltados para infiltração são classificados em 3 níveis: O primeiro com revestimento poroso para agir diretamente na diminuição da velocidade de escoamento superficial, o segundo apenas com a estrutura porosa para a detenção temporária das águas pluviais e terceiro de estrutura porosa com mecanismo de facilitação de infiltração no solo que quando aplicados em áreas de estacionamento e vias de tráfego leve podem representar até 30% da área da bacia de drenagem, com isto diminuindo consideravelmente a superfície impermeável.

A escolha do local de aplicação do pavimento permeável dependerá das características geotécnicas do terreno e profundidade do lençol freático. Em outra vertente os sistemas de drenagem tendo como base o concreto poroso apresentam resultados satisfatórios quando utilizados na função de filtragem e obtiveram bons resultados de melhoria da qualidade da água infiltrada por sistemas de pavimentos permeáveis. Porém, não pode ser aplicados diretamente sem análise prévia, uma vez que cada região apresenta condições diferentes entre si tanto de clima quanto de tipo de solo, mas esses resultados servirão de ponto de partida para os estudos de adequação e uso. (CASTRO, 2011).

Estudos com foco na engenharia de transportes indicam que vias pavimentadas com revestimento permeável em concreto poroso são eficientes para a eliminação dos efeitos de aquaplanagem pela inexistência da lamina d'água, controle da erosão do solo e ainda diminuem o volume de ruído produzido pelos pneus dos veículos em atrito com o pavimento da via, abrindo novas oportunidades de estudo de aplicação (PINTO, 2011).

Tennis, et al., (2004), destaca a importância do uso de materiais locais e de fácil acesso no mercado para a preparação da pavimentação permeável com concreto poroso, sua adequação as especificidades regionais devem nortear todas as fases, desde o projeto, subsídios de produção e local adequado de aplicação.

Espera-se que essa investigação científica auxilie no entendimento desta tecnologia, sua adequação a região, mapeamento de suas especificidades a fim de contribuir para o processo de produção de concreto poroso na região da Amazônia legal com melhorias de foco sustentável e ambientalmente amigável as intervenções e transformações do espaço construído.

2 JUSTIFICATIVA.

Belém recebe precipitações anuais de 3000 mm, que ocasionam cheias de rios e inundações de planícies fluviais. Localizada na sub-bacia do Guamá, vértice do estuário formado por duas grandes massas de água: Baía do Guajará ao norte e Rio Guamá ao sul, que recebem influência do rio Amazonas e do Oceano Atlântico. A topografia local divide a cidade em terras secas e inundadas (MARTINS, 2015). As áreas inundadas naturais possuem cotas abaixo de 4 metros em relação ao nível do mar, chegando a compor 40% das áreas valorizadas da cidade Brandão e Ponte, (2014), apontam que 24% do total da RMB é alagável, possuindo pontos de pouca declividade, com valores próximos ao valor de referência de 2,5%.

Os primeiros registros de inundações e alagamentos de grande magnitude em Belém ocorreram na década de 70, ocasionada pela expansão urbana da Cidade (BRANDÃO e PONTE, 2014). As causas destes fenômenos se devem principalmente ao processo de urbanização e ocupação desordenada das várzeas. Além disto, a cidade é entrecortada por uma densa rede hídrica, possui relevo plano que dificulta o escoamento das águas, possui altos índices pluviométricos e sofre influência do regime das marés do Rio Guamá e da Baía do Guajará, provocando a formação de uma barragem hídrica que prejudica o sistema de escoamento das águas (MARTINS, 2015).

No caso de Belém, abordagens não estruturais são mais apropriadas por conta do alto índice pluviométrico, baixa declividade e redução da permeabilidade decorrente da ocupação precária e densa, com grande concentração de aglomerantes subnormais (PONTE, 2015). Entretanto a adoção de sistemas de drenagem compensatória ou alternativa não é a prática dos grandes projetos de drenagem na RMB. No caso da macrodrenagem da Estrada Nova, por exemplo, a proposta ainda consiste do sistema tradicional de drenagem, não privilegiando as características ambientais. Os leitos naturais dos rios urbanos estão sendo eliminados, juntamente com a vegetação. Canalizações subterrâneas ou retificação de canais por concreto estão sendo adotadas (PONTE, et al., 2014).

Uma das possibilidades seria o emprego de pavimentos porosos que permitissem o aumento de permeabilidade das superfícies ou armazenamento temporário da água como em áreas de estacionamento e sistemas viários secundários. Em ambos os casos haveria uma redução do escoamento superficial, com liberação lenta e gradativa das águas para o sistema de drenagem tradicional ou permitindo sua infiltração no solo.

No caso de Belém, o uso de pavimentos porosos de infiltração parcial ou total pode não ser viável, principalmente no inverno, pois as chuvas são constantes, tendo em vista a elevadíssima pluviosidade e conseqüente saturação do solo. Houve tentativas do emprego de valas de infiltração em grandes empreendimentos na RMB mas foram frustradas, uma vez que o solo ficou totalmente saturado nas épocas das chuvas intensas. Uma possibilidade seria o emprego de pavimentos porosos de detenção com injeção direta, ou seja, com o emprego de revestimentos permeáveis e estrutura de base e sub-base porosa. Neste caso, seria realizada a detenção temporária das águas pluviais com o amortecimento das vazões e da velocidade de escoamento permitindo a alteração dos hidrogramas.

Por esta razão é de extrema relevância para a região amazônica, em particular para a RMB, a realização de estudos de sistemas de drenagem não estruturais, que avaliem primeiramente a composição do concreto a ser empregado como revestimento permeável, suas propriedades frente às demandas pluviométricas da região, assim como o comportamento dos diversos tipos de pavimentos permeáveis, com vista a observar quais apresentam o melhor desempenho para a região. A partir dos resultados de condutividade hidráulica e de capacidade de armazenamento destes pavimentos será possível a realização de pesquisas de avaliação computacional do comportamento da drenagem das bacias através da inclusão de áreas com estes tipos de pavimentos permeáveis de modo a avaliar o comportamento destes sistemas de drenagem não convencionais frente a quantidade de água precipitada, as características de infiltração do solo, a topografia da área entre outros aspectos.

Este trabalho faz parte de uma pesquisa mais ampla que visa avaliação do comportamento deste tipo de sistema de drenagem para as condições particulares da RMB. Representa o primeiro passo, no qual será avaliado o comportamento de concretos porosos como revestimento permeável através do emprego dos materiais disponíveis na região, pois a partir destes resultados é que será possível avaliar posteriormente o pavimento como um todo, com a base e sub-base permeável.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as propriedades de misturas de concreto poroso para tráfego leve e de pedestres produzidos com a brita disponível na região metropolitana de Belém (RMB).

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Investigar 09 composições granulométricas de brita sendo 03 uniformes e 06 descontínuas, de modo a determinar as estruturas granulares de maior massa específica aparente para a produção de concreto permeável;
- Executar 05 misturas de concreto permeável a partir da definição das estruturas granulares de maior massa específica aparente, dentre as composições uniformes e descontínuas;
- Avaliar as propriedades das misturas de concreto permeável como a massa específica aparente no estado fresco e endurecido, índice de vazios, resistência a tração na flexão e coeficiente de permeabilidade;
- Simular a aplicação de concreto poroso como piso permeável com objetivo de aumentar o índice de permeabilidade do Local;
- Comparar os resultados das propriedades com as exigências da NBR 16416 e demais pesquisas sobre o assunto.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

4.1 DRENAGEM URBANA.

Pode-se definir os sistemas urbanos como áreas de consumo e moradia, cuja dimensão e integração variam em função do tamanho do território ocupado e quantidade de pessoas que o ocupam, nas quais o processo de urbanização se intensificou no século XX, visto que em 1900 apenas 13% da população mundial era urbana sendo que atualmente esse número aumentou para 50% e em uma projeção para 2050 alcançará 75%. (TUCCI, 2012).

Como essa ocupação foi dada sem ordenamento, vários problemas podem ser relacionados ao uso do solo sem planejamento, como, as expansões irregulares sobre áreas de mananciais, ocupações e invasões das áreas de risco de encostas e ribeirinhas, aumento da carga de efluentes sem tratamento de esgoto lançados diretamente no curso d'água e impermeabilização da capa urbana (TUCCI, 2012).

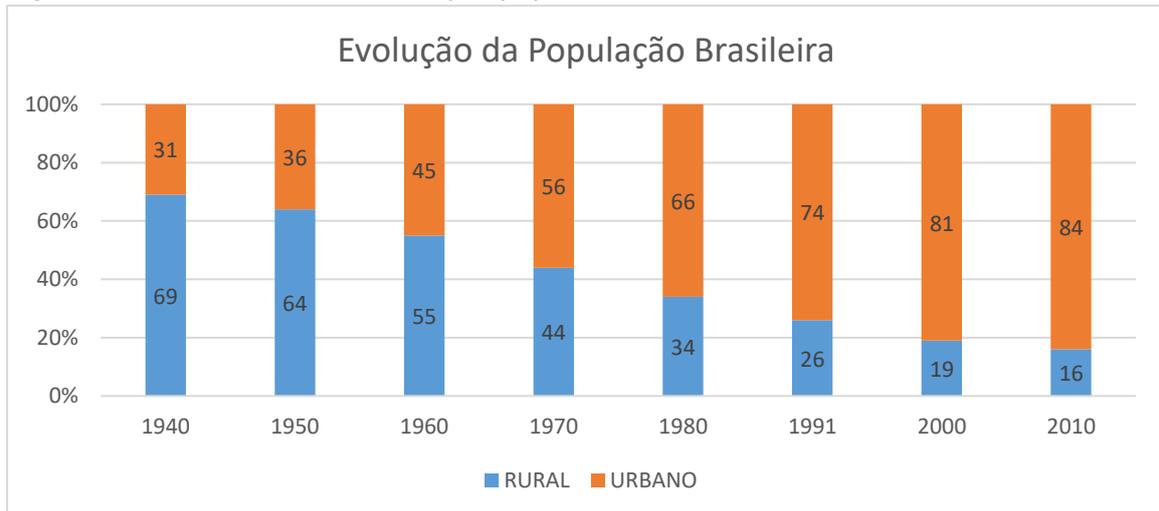
O processo de urbanização e crescimento das cidades não aconteceu de forma planejada com isso a cobertura vegetal foi substituída por uma capa impermeabilizante que altera o ciclo hidrológico. Deste modo, o escoamento da chuva e o seu direcionamento é dado de forma superficial provocando o aumento do volume escoado, fazendo com que o sistema de drenagem urbana trabalhe sempre no limite com pouco ou nenhuma folga para suportar acontecimentos acima da média dos dados do histórico de precipitações (CASTRO, 2011).

Na segunda metade da década de 1980 a necessidade de mudança desse quadro iniciou uma revisão dos paradigmas na gestão da drenagem urbana, tendo em vista que as ações deveriam levar em consideração as questões técnicas, econômicas, sociais e ambientais. Sendo assim, uma das preocupações passa pelo controle da qualidade da água como uma ação de prevenção de saúde pública. Com o surgimento de conceitos que englobam questões sociais, econômicas, ambientais suas interações e consequências (PINTO, 2011).

Em 2007, com a publicação da lei federal 11.455, que estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico, definindo o sistema drenagem e manejo das águas pluviais urbanas com medidas tomadas através do conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais urbanas, o qual é dividida em duas escalas de implantação: Sendo a primeira a micro drenagem urbana que é definida pelo sistema de drenagem pluvial, em nível de loteamento ou rede primária urbana. Já a macrodrenagem que destina-se à condução final das águas captadas pela drenagem primária, dando prosseguimento ao escoamento dos deflúvios oriundos das ruas, sarjetas, valas e galerias. Normalmente, as

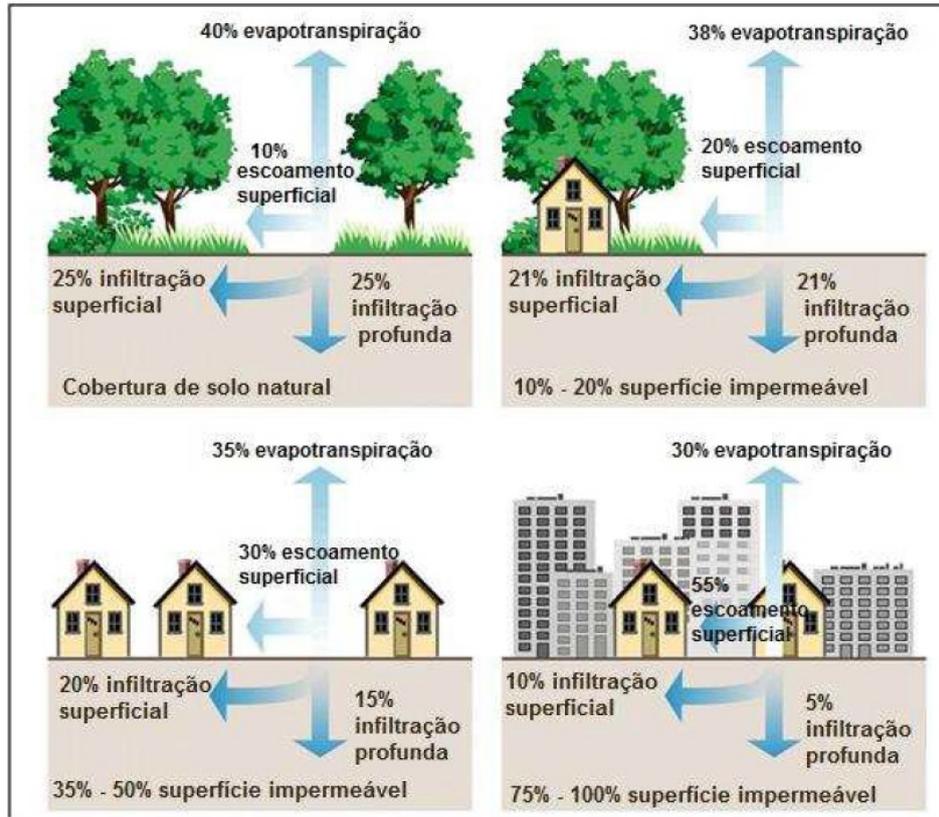
obras de macrodrenagem constituem-se na retificação e ampliação das seções de canais naturais, construção de canais artificiais ou galerias de grandes dimensões, ainda com estruturas auxiliares para controle, dissipação de energia, amortecimento de picos, proteção contra erosões e assoreamento além de estações de bombeamento. (MARTINS, 2015).

Figura 1: Aumento da concentração populacional nas áreas urbanas.



Fonte: Aquafluxus consultoria Ambiental em Recursos Hídricos - adaptado de ibge.gov.br.

Figura 2: Influência da Urbanização em diferentes componentes do ciclo água.



Fonte: Aquafluxus consultoria Ambiental em Recursos Hídricos, adaptado de Schueler 1987.

A preocupação com os reflexos das inundações decorrentes da ocupação das áreas de escoamento natural complementado pela impermeabilização do solo e consequente aumento da vazão superficial das águas pluviais mostra que foram ultrapassados os limites das condições naturais do meio, então as inundações passam a ser um problema social, econômico e/ou ambiental (MARTINS, 2015).

Os sistemas de drenagem urbana têm sido desenvolvidos com base no modelo de gestão que se baseia no princípio de que a melhor drenagem é a que retira a água pluvial excedente o mais rápido possível do seu local de origem. Esses modelos são definidos de acordo com sua área de atuação de controle das águas pluviais como: Na fonte, microdrenagem e macrodrenagem. Na microdrenagem, os projetos aumentam a vazão e transferem todo seu volume para jusante. Na macrodrenagem, são construídos canais para evitar a inundação em cada trecho crítico, esse tipo de solução é apropriado a um trecho de bacia, sem previsão das consequências para o restante dela e sem considerar diferentes horizontes de ocupação urbana, deste modo transferindo a inundação de um lugar para outro da bacia (MARTINS, 2015) apud (TUCCI, 2012) .

A ocupação intensa e desordenada do solo urbano desponta, como o fator mais agravante. Sabe-se, que na maioria das vezes é econômica e socialmente inviável a desocupação e desapropriação das áreas de inundações. Assim, do ponto de vista da gestão, é necessário edificar soluções estruturais e não estruturais à partir da incorporação de dispositivos de prevenção e contenção de cheias ao sistema de drenagem urbana. São ainda importantes o uso de informações pluviométricas e fluviométricas que revelam a intensidade das chuvas assim como sua correlação aos períodos de enchente sazonal dos cursos d'água. Essas informações auxiliam no planejamento de ações de contenção e amortecimento das águas em meio urbano, quem podem evitar desastres decorrentes das inundações. Antes da realização de grandes projetos estruturais, com obras de grande escala, os profissionais devem estudar e compreender a dinâmica de interação entre o clima, balanço hídrico e urbanização. Para isso é necessário a construção da sistemática de gerenciamento de inundações a partir do progresso com base em ciência e tecnologia (MARTINS, 2015).

Em decorrência de mudanças de paradigmas, a aplicação de pavimentos permeáveis passou a ser uma alternativa a diminuição da capa impermeável, uma vez que tal tipo de pavimento permite a recarga do lençol freático, atua na melhoria da qualidade das águas infiltradas, como também as encaminhadas para a rede de drenagem, de tal modo resultando em uma redução significativa do volume de escoamento superficial, cujo resultado também é

refletido diretamente no controle de erosão do solo. No caso do seu uso em vias de tráfego leve minimizam ofuscamento e possível aquaplanagem. Outra situação favorável é a diminuição do ruído provocado pelo atrito de contato entre a superfície do pavimento e os pneus de rodagem dos veículos, que gera resultado de ação direta de conforto ambiental acústico em escala urbana (TENNIS, et al., 2004).

Espera-se que o pavimento de concreto poroso sirva como material bifuncional, o que significa que a mistura de trabalho deve proporcionar benefícios estruturais e hidrológicos. As características de resistência têm a incumbência de suportar cargas de tráfego de baixo volume. No entanto, a limitação vem com os seus aspectos hidrológicos relacionados com a obstrução. Os pavimentos em concreto poroso durante o seu uso sofrem colmatção o que exigem um planejamento de manutenção periódica e preventiva. A inexistência destas ações implicará na diminuição ou até eliminação da sua capacidade drenante (CHANDRAPPA & BILIGIRI, 2016).

Para tal finalidade é importante explorar a possibilidade de produção de um concreto que permita a percolação da água precipitada apresentando características de resistência mecânica semelhante ao concreto convencional. Desta forma se constituindo como uma alternativa de solução de projeto para funcionar como agente mitigador dos problemas causados pela impermeabilização solo urbano, uma vez que é considerado pela Agencia Norte-americana de proteção ambiental (EPA), como uma eficaz prática de gestão ambiental (BMP) (TENNIS, et al., 2004).

A sociedade considera natural todos os deslocamentos de água e quando estes desencadeiam estragos no caminho como erosões e/ou enchentes não se aponta um responsável legal. Todavia a alteração sem critério das superfícies ocupadas associado a desconsideração dos cursos naturais d'água decorrentes da falta de planejamento sempre resultam em enchentes e obstruções do sistema de drenagem. O planejamento deve levar em consideração todos os aspectos da estrutura necessária, estudo criterioso das especificações e dimensionamentos compatíveis as necessidades (GRINBBIN, 2015).

Um modelo que substitua ou amenize o processo de impermeabilização da capa urbana por expedientes que favorecem os processos naturais de escoamento, percolação e retenção, representa a proposta de mudança relevante e potencial no tratamento técnico de integração da paisagem e ambiente (PONTE, 2015).

Considera-se como dispositivos alternativos para o controle de cheias urbanas, pavimentos porosos, sistema de armazenamento de água em telhados, construção de pequenos tanques residenciais e poços subterrâneos, que produzem a redução de volume e velocidade do escoamento superficial. A implementação destes dispositivos de controle distribuído ou na fonte é o tipo de sistema que atua sobre o lote, praças e passeios, pode ser considerado como parte do sistema de micro drenagem, pois possui ação local. No entanto a grande diferença está na ação das estruturas que possuem o conceito de retardamento e redução do escoamento o que se opõe a concepção do sistema de micro drenagem tradicional (MARTINS, 2015) apud (TUCCI, 2012).

Figura 3: Evolução de abrangência da gestão de drenagem urbana.



Fonte: Aquafluxus consultoria Ambiental em Recursos Hídricos.

Com o exposto, soluções que levem em consideração o controle de risco de inundações, redução de volume e velocidade do escoamento superficial, aumento da área permeável e consequente facilitação de recarga subterrânea são objetivos que deveriam ser requisitos básico para a tomada de decisões, soluções de projeto e manejo das águas urbanas, o que reflete na necessidade de uma maior abrangência multidisciplinar quando da adoção de solução de controle e mitigação dos problemas apresentados nos sistemas de drenagem estruturais.

4.2 INTERVENÇÕES DE DRENAGEM DA URBANA EM BELÉM.

A criação da Companhia Geral de Comércio do Grão Pará e Maranhão em 1755, intensificou as atividades de comércio, distribuição e serviços na capital, isso se refletiu na malha urbana com ações de adequação, modificação e expansão. Uma destas intervenções foi a drenagem do igarapé do Piri, Figura 4, com o objetivo de integrar as freguesias da cidade e da campina, sendo esta a primeira obra de macrodrenagem da cidade de Belém. Posteriormente desde o final do século XVIII até o início do século XX, Figura 5, todos os planos de expansão da cidade previram a ocupação das terras de cota mais elevada, contornando-se as áreas de várzea afim de se evitar a alocação de grandes volumes de recursos para a execução de obras de macrodrenagem (CARDOSO e VENTURA NETO, 2013).

Figura 4: Mapa de Belém- Destaque para o Igarapé do Piri.



Fonte: Fórum Landi - Mapa de Belém do Grão Pará e Maranhão, 1790

http://www.forumlandi.ufpa.br/sites/default/files/desenhos/3._planta_da_cidade_do_para.jpg

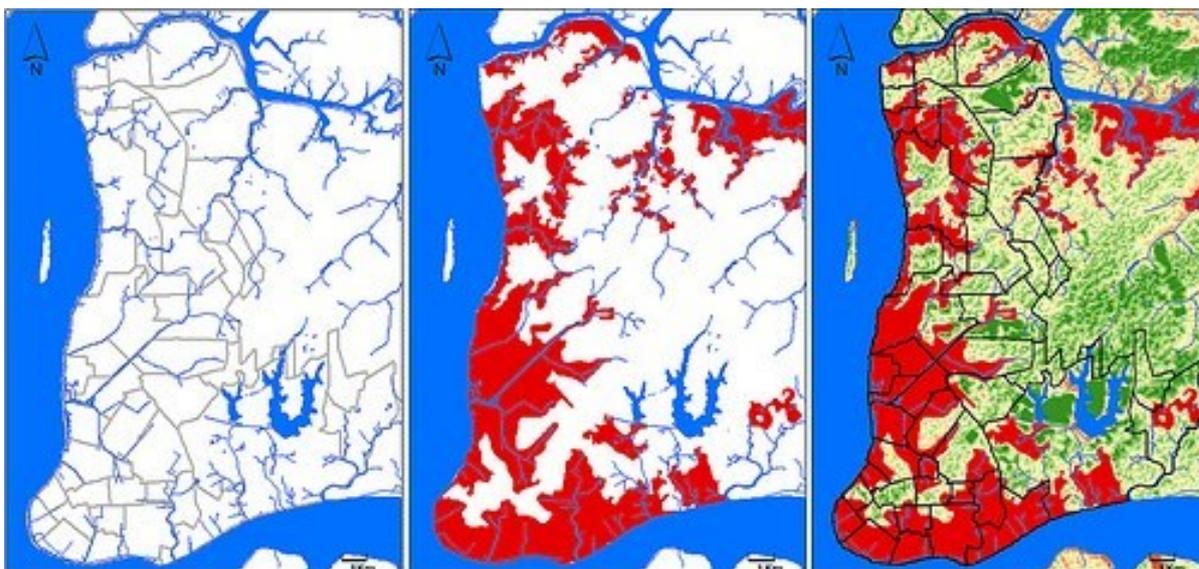
Figura 5: Mapa de Belém de 1919- Demarcação da 1º Légua Patrimonial.



Fonte: Fórum Landi - Planta da Cidade de Belém em 1919 - Disponível em http://www.forumlandi.ufpa.br/sites/default/files/desenhos/7._planta_da_cidade_de_belem.jpg

Quanto às características climáticas da RMB, em uma de suas particularidades tem-se o registro de precipitação anual médio de 3.000 mm, esse traço climático é influenciado pelas linhas de instabilidade formadas ao longo da costa. Como os grandes centros urbanos da Amazônia desenvolveram-se prioritariamente às margens de rios, a grande precipitação é um dos fatores desencadeantes das cheias dos rios, igarapés e cursos menores de água provocando a inundação das planícies fluviais, que no caso da cidade de Belém, foram ocupadas sem ordenamento e planejamento, com registros históricos de danos humanos e materiais à partir da década 1970, Figura 6 (MARTINS, 2015).

Figura 6: Marcação das áreas vulneráveis a alagamento na cidade de Belém-PA.



Fonte: <https://geotecnologias.wordpress.com/2011/02/15/zonas-de-risco-a-alagamento-em-belem/>

O Aporte dos grandes projetos de macrodrenagem, como a canalização do córrego e doca do Reduto em 1970, a drenagem da bacia do Una nos anos de 1990 e as obras em andamento da bacia da Estrada Nova que representam o tratamento técnico da água, são consideradas medidas de drenagem urbana estruturais, uma vez que trabalham a canalização, escoamento, controle de vazão e contenção das águas pluviais e fluviais. Todavia as recomendações de intervenção devem considerar as combinações de modelos de drenagem urbana estruturais e não-estruturais ou naturais, dependendo das características de cada bacia. Com ênfase nas abordagens não estruturais, as quais são as mais apropriadas para a realidade de Belém, onde existe uma combinação de altos índices pluviométricos, baixas declividades e redução da permeabilidade decorrente da ocupação precária e densa (PONTE, et al., 2014, BRANDÃO & PONTE, 2014 e PONTE, 2015).

A implantação de obras não estruturais, como parte do sistema complexo de drenagem urbana propostos pela macrodrenagem das bacias da cidade devem levar em consideração o potencial de formação de espaços livres e acessíveis a população, seriam esses os locais bifuncionais com o primeiro objetivo de resgate de setores da cidades aliado a função técnica de diminuição da impermeabilidade pela facilitação da percolação das precipitações para o solo (MARTINS, 2015, PONTE, 2015 e CARDOSO, et al., 2016).

De certo modo todas as intervenções de grande escala, no caso específico das macrodrenagens projetadas e executadas em Belém, foram ações corretivas. A busca de solução dos problemas que resultaram em calamidade pública, historicamente, tiveram apenas o viés técnico de uma área de conhecimento, a engenharia sanitária, sem grandes discussões a respeito dos vetores causadores tampouco a análise interdisciplinar e multidisciplinar das consequências e soluções. Apesar da primeira légua patrimonial demarcar a ocupação da cidade de Belém apenas nas terras firmes, o apoderamento irregular da área de várzea não deixou de ser um instrumento de justificativa de integração destas áreas a malha urbana legal da cidade e como as soluções tiveram apenas o caráter técnico sanitarista, uma consequência foi o aumento da impermeabilização do solo exatamente nos locais onde naturalmente extravasam as marés e acontece a drenagem natural e escoamento pluviométrico (CARDOSO e VENTURA NETO, 2013; PONTE, et al., 2014 e PONTE, 2015).

Inicialmente fazer a análise de soluções sustentáveis de drenagem urbana, depois avaliar sua interação com as soluções estruturais, verificando as necessidades locais de implantação é o modo de planejamento desejável se o objetivo é equilibrar os custos, as necessidades e as expectativas de eficácia dos grandes empreendimentos de drenagem e consequente ampliação dos espaços públicos de interação e lazer. De modo que, os locais urbanizados pela pressão da ocupação rápida em função do acelerado aumento populacional possam receber melhorias as quais se refletirão em toda a cidade, produzindo diminuição dos custos de manutenção e reduzindo os danos provocados pelas enchentes, principalmente quando da coincidência dos períodos de marés altas com chuvas fortes (PONTE, et al., 2014 e CARDOSO, et al., 2016).

Com isso, o estudo de implantação de pisos permeáveis é uma alternativa de controle das águas pluviais tendo em vista que este equipamento pode atuar como redutor de velocidade do escoamento superficial, auxiliar à penetração por percolação no solo e também agir como elemento de retenção temporária, minimizando o processo de impermeabilização (TENNIS, et al., 2004; ACI, 2010 e ABNT, 2015).

4.3 CONCRETO POROSO: CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL.

Concretos sem a incorporação de agregado miúdo em sua composição tem registros de uso na Europa desde a metade do século XIX, com aplicações como elemento construtivo de paredes estruturais para casas de dois andares, paredes de carga para edifícios (até 10 andares), painéis de preenchimento e quebramar. O aprimoramento do material é relativamente recente uma vez que sua aplicação em escala urbana é mais presente e incentivado nos Estados Unidos (EUA), países da Europa ocidental e Japão (GHAFOORI & DUTTA, 1995).

Nos EUA, o concreto poroso (pervious concrete), seu estudo de caracterização e dimensionamento foi intensificado, a alta taxa de fluxo de água através de um pavimento de concreto poroso permite que as chuvas sejam capturadas com escoamento para o solo, reduzindo o escoamento das águas pluviais, recarregando as águas subterrâneas, apoiando a construção sustentável, fornecendo uma solução para a construção que é sensível a preocupações ambientais (TENNIS, et al., 2004).

Dependendo das condicionantes de projeto, o pavimento de concreto poroso e sua sub-base apresentam propriedades de armazenamento de água para uso como equipamento de drenagem urbana. Também verifica-se efeito positivo de conforto ambiental tendo em vista que quando aplicado como pavimento permeável, o concreto poroso apresenta temperatura menor quando se compara a temperatura do capeamento betuminoso nas mesmas condições de exposição direta a radiação solar. Outro fator é a diminuição e controle de ruído com possibilidades de aplicação como material para sistemas de barreira sonora (TENNIS, et al., 2004). Outra informação é que as propriedades de absorção sonora de concreto poroso não apresentam variações significativas quando alterados o tamanho do agregado ou quantidade de cimento empregado mas estudos de absorção sonora levando em consideração a forma e dimensão das peças são variáveis que devem ser estudadas (KIM & LEE, 2010).

No entanto, a implementação de concreto poroso como material de pavimentação em muitos países, especialmente países emergentes, ainda não é de prática usual devido à falta de técnica padrão na preparação do material, normatização de testes bem como divergências nas práticas de construção. O concreto poroso é o material que em seu estado endurecido apresenta um sistema de poros interconectados que possibilita a percolação da água por gravidade. De modo geral é uma mistura de cimento Portland (CP), agregado graúdo, cujo as proporções agregado/cimento variam 4:1 à 6:1, além de aditivo plastificante e/ou aditivo retardador de pega. As quantidades são calculadas em função da quantidade de cimento, no qual a função de permeabilidade será assegurada pelo controle do tamanho das partículas dos agregados,

controle da relação água /cimento e compactação controlada (CHANDRAPPA & BILIGIRI, 2016).

Tennis, et al., (2004), traz a relação de características e aspectos gerais das propriedades que os concretos porosos devem apresentar para aplicação e desempenho de uso, as proporções típicas indicam que as quantidades de cimento variam de 270 a 417 kg/m³, o fator água/cimento deve ser estabelecido dentro do intervalo de 0,27 a 0,34, a massa unitária de agregado graúdo variando entre 1190 a 1480 Kg/m³ e quando especificado a quantidade de agregado miúdo não deve ultrapassar a quantidade equivalente de cimento.

A Tabela 1, apresenta outras informações de proporções de misturas em pesquisas publicadas entre os anos de 1995 e 2014.

Tabela 1: Levantamento das proporções nas misturas de materiais – Pervious Concrete.

ANO	AGREGADO KG/M ³	CIMENTO KG/M ³	ÁGUA KG/M ³	RELAÇÃO AGREGADO/CIMENTO	RELAÇÃO ÁGUA /CIMENTO	AUTOR
1995	1651,32	412,83	153,57	4:1	0,372	Ghaffori e Dutta
	1692,00	376,00	143,25	4,5:1	0,381	
	1740,00	348,00	135,72	5:1	0,390	
	1800,00	300,00	125,40	6:1	0,4,18	
2006	1541,93	344,69	105,01	4,47:1	0,30	Crouch et al
	1620,24	287,15	87,21	5,64:1	0,30	
2009	1820,00	180,00	50,00	10:1	0,28	Kevern et al
	1700,00	260,00	70,00	6,5:1	0,27	
	1620,00	310,00	80,00	5,2:1	0,26	
	1580,00	330,00	90,00	4,78:1	0,27	
	1550,00	360,00	100,00	4.3:1	0,28	
	1510,00	380,00	100,00	3,97:1	0,26	
	1600,00	340,00	80,00	4,70:1	0,24	
	1570,00	330,00	100,00	4.75:1	0,30	
	1560,00	330,00	100,00	4.72:1	0,30	
2010	1440,80	320,20	112,10	4,5:1	0,35	Huang et al.
	1486,90	330,4	115,60	4,5:1	0,35	
	1586,90	352,60	123,40	4,5:1	0,35	
2010	1559,00	312,00	103,00	5:1	0,33	Neithalath et al.
	1568,00	314,00	104,00	5:1	0,33	
	1558,60	312,00	103,00	5:1	0,33	
	1524,00	305,00	101,00	5:1	0,33	
	1546,00	309,00	102,00	5:1	0,33	
	1544,00	309,00	102,00	5:1	0,33	
2013	1560,00	367,00	110,10	4,25:1	0,30	Lim et al
	1560,00	242,00	72,96	6,44:1	0,30	
	1560,00	367,00	73,40	4,25:1	0,20	
	1560,00	367,00	110,10	4,25:1	0,30	
	1560,00	430,00	110,10	3,62:1	0,26	
	1560,00	495,00	148,50	3,15:1	0,30	
2014	1600,00	200,00	70,00	8:1	0,35	Brahim et al.
	1800,00	150,00	52,85	12:1	0,35	

Fonte: A.K. Chandrappa, K.P. Biligiri / Construction and Building Materials 111 (2016) 262–274, Adaptação feita pelo Autor.

4.3.1 AGREGADOS.

O uso dos agregados nos concretos porosos é rigorosamente controlado, os agregados graúdos são usados geralmente em faixa única, Tennis, et al., (2004) listam 3 faixas granulométricas de uso, sendo a primeira de 19,0-4,75 mm, a segunda 9,5-2,36 mm e a terceira de 9,5-1,18 mm. Bhuta, et al., (2012) determinaram em seu trabalho de pesquisa outras relações de faixas granulométricas correspondendo aos intervalos de 20-13 mm, o segundo de 13-5 mm e o terceiro de 5-2,5 mm. Já Castro, et al., (2009) em seu estudo de determinação de método para dosagem de concretos porosos trabalharam com a faixa de 9,5-2,36 mm e Chandrappa e Biligiri, (2016) identificaram em sua revisão do estado da arte, o uso de 2 faixas, a de 19- 9,5 mm e 9,5-2,36 mm. A Tabela 2 apresenta a relação de faixas de composição de misturas encontradas em parte das publicações pesquisadas.

Tabela 2: Faixa de Composição de Mistura de Agregado Graúdo de Concretos Porosos.

Referência	Mistura	Faixa Granulométrica mm	Proporções entre frações %
Bhuta, et al. (2012)	Nº5	13-20	100
	Nº6	5-13	100
	Nº7	2,5-5	100
Huang, et al. (2010)	PCM 1	12,5	100
	PCM 2	9,5	100
	PCM 3	4,75	100
Sumanasooriya e Neithalath (2001)	3/8	12,5-9,5	100
	#4	9,5-4,75	100
	#8	4,75-2,36	100
Park e Tia (2004)	1	10-20	100
	2	5-10	100
Torres, et al (2015)	1	9,54	100
	2	6,35	100
Batezini (2013)	M1	9,5-6,3	100
	M2	9,5-6,3/6,3-4,8	50-50
	M3	12,5-9,5/9,5-6,3/6,3-4,8	30-40-30
Batezini, et al., (2016)	Rb	9,5-6,3	100
	Rf	Pedrisco	100
Lian e Zhuge (2010)	B2	9,5-4,75	100
	B11(18% areia)	9,5-4,75	100
Lian, et al., 2011)	1-1	9,5/6,7	100
	1-2	9,5-4,75	100
	1-5	13,2-4,75	100
	2-1(18% Areia)	9,5-4,75	100
	T1(15% Areia)	15-30	100
Yang e Jiang (2003)	T2(15% Areia)	10-20	100
	T3(20% Areia)	5-10	100
	T4(20% Areia)	5-10	100
	T5(20% Areia)	5-10	100
	T6	3-5	100
	T7	3-5	100

Fonte: Dados da literatura tabulados pelo Autor.

Quando aplicado, a maior dosagem recomendada de agregado miúdo, é determinada como sendo de no máximo igual a quantidade de cimento dosada, correspondendo a proporção 1:1, os trabalhos publicados mostram que o emprego de areia, melhoram a resistência mecânica e trabalhabilidade, todavia o seu uso implicará na diminuição ou eliminação da penetração e percolação da água (TENNIS, et al., 2004 e CHANDRAPPA & BILIGIRI, 2016).

O tamanho e as proporções de agregado graúdo tem relação direta com as propriedades que determinam a eficácia do material como piso permeável, Kim e Lee, (2010) colocam a ponderação que as proporções de vazios totais das misturas são maiores quando são usados uma faixa de agregados de maior dimensão. Para Ósíc, et al., (2015), as faixas granulométricas com maior percentual de mistura de agregado de maior dimensão resultam em um aumento de porosidade enquanto misturas com dimensões menores do agregado apresentam uma maior densidade e conseqüente melhoria da resistência mecânica, Yang e Jiang, (2003) complementam que o uso de agregados de tamanho menor pode aumentar a força do concreto permeável, mas desde que a quantidade de cimento seja ajustada. Bonicelli, et al., (2015) colocam que a adição de areia só traz melhoria nas propriedades de resistência mecânica quando se faz o ajuste da quantidade de água para a adequação do fator água/ cimento.

A dosagem equilibrada em função do estudo minucioso do tipo e proporções de agregado graúdo é fundamento para a definição dos parâmetros de projeto especificados pelas necessidades do local de aplicação, a definição do esqueleto granulométrico da faixa dimensional ou a mistura de várias faixas dimensionais é o ponto de referência inicial do método de dosagem de concretos porosos, quanto ao tipo de rocha do agregado, sendo as de origem granilítica as que apresentam os melhores resultados de resistência mecânica. (TENNIS, et al., 2004), ACI, 2010 e CHANDRAPPA & BILIGIRI, 2016.

4.3.2 CIMENTO, ADIÇÕES, ADITIVOS QUÍMICOS E TRABALHABILIDADE.

O Cimento Portland comum (CPC) e o cimento Portland composto (CPAD) são os ligantes da mistura de concreto poroso, além das misturas de fábrica podem ser empregados porções adicionais de cinza volante, material posolamico e escória de alto forno granulado (TENNIS, et al., 2004). Registro de adições de outros tipos de materiais é objeto de estudo de alguns pesquisadores, Giustozzi, (2016) investigou que as misturas com adição de polímeros, demonstraram a sua capacidade de compactação melhorada, retardam as reações de hidratação e as características de porosidade e drenagem efetivas não foram substancialmente modificadas, e em alguns casos observou-se aumento na resistência à flexão, rigidez e durabilidade.

O uso de aditivos químicos em primeiro momento tem o objetivo de melhorar a trabalhabilidade do concreto poroso, aditivos plastificantes, superplastificantes e retardadores de pega são usados com o objetivo de aumentar em até 50% o tempo de trabalho máximo do concreto no estado fresco, que sem as adições é de uma 1 (TENNIS, et al., 2004). Adições de superplastificante associados a polímero de celulose em pó, foram aplicados com objetivo o de melhorar a trabalhabilidade, aumentar a resistência mecânica e atribuir característica de auto adensamento (BHUTA, et al., 2012).

Aditivos plastificantes e superplastificantes em concreto poroso podem aumentar a resistência mecânica mas deve-se fazer o controle da energia de compactação para se manter a densidade no intervalo de 1900-2100 kg / m³, este fator deve garantir a boa relação entre a penetração da água e a resistência mecânica (YANG & JIANG, 2003).

O processo de lançamento do concreto poroso em pavimentos permeáveis, em sua moldagem, através de compactação é conduzido em duas vertentes, pela aplicação de rolo de compactação ACI, (2010) associado a régua vibratória (TENNIS, et al., 2004).

Figura 7: Preparação de piso permeável com concreto poroso.



Fonte: Pervious Concrete Paviments, Paul D. Tennis, Michael L. Leming, and David J. Akers

4.3.3 POROSIDADE.

Os vazios apresentados pelos concretos porosos devem observar o intervalo de 15% a 25%, esse entremeio é considerado o ideal para equalizar as características drenantes às resistências mecânicas mínimas de trabalho. Foram investigados uma ampla gama de composições cujo resultados apontam a uma relação direta entre a porosidade e a permeabilidade, em contrapartida a relação inversa com as resistências mecânicas. Concretos muitos porosos, com índice de vazios iguais ou superiores a 25%, tendem em apresentar alta drenabilidade mas baixos valores de resistência mecânica ao passo que concretos de baixa porosidade, de índice de vazios iguais ou inferiores a 15%, tendem a apresentar baixos índices de permeabilidade e valores mais elevados das resistências mecânicas. As pesquisas objetivam a determinação de uma dosagem ideal, ou seja, a que atenda às necessidades de drenagem e que resistam aos esforços mecânicos solicitados em sua vida útil (ACI 522R-2010; BATEZINI, 2013; CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016; CASTRO, et al., 2009 e TENNIS, et al., 2004). A Tabela 3 apresenta a média dos índices de vazios.

Tabela 3: Índice de Vazios.

Referência	Média de Índice de Vazio: Vr (%)
Batezini, et al., 2016	28,00
Bhuta, et al., 2012	24,00
Bonicelli, et al., 2015	19,00
Brake, et al., 2016	22,00
Castro, et al., 2009	21,00
Ćosic, et al., 2015	18,00
Cui, et al., 2015	18,50
Deo, et al., 2010	20,00
Huang, et al., 2010	28,50
(Kevern, 2015)	24,50
Lian e Zhuge, 2010	12,50
Lian, et al., 2011	26,00
Neithalath, et al., 2006	21,00
Shaefer, et al., 2006	25,00
Sumanasooriya e Neithalath, 2011	23,00
Torres, et al., 2015	24,50
Zhong, et al., 2015	23,50

Fonte: Dados da literatura de referência tabulados pelo autor.

4.3.4 PERMEABILIDADE.

A presença de vazios em valores percentuais na ordem de 15% e 25%, é a principal característica física esperada dos concretos porosos para o uso em pavimentos permeáveis, tendo em vista deste ser o fator que impacta diretamente nas propriedades drenantes do material. Para taxas de penetração da água, estima-se a velocidade de percolação com variações entre 0,1 cm/s a 2 cm/s. Os resultados de pesquisas com misturas de concreto poroso nas faixas granulométricas de 20-13 mm, 13-5 mm e 5- 2,5 mm apresentaram respectivamente coeficientes de permeabilidade na ordem de 2 cm/s, 1,35 cm/s e 0,25 cm/s. (TENNIS, et al., 2004; BHUTA, et al., 2012 e CHANDRAPP & BILIGIRI, 2016).

Outros trabalhos investigaram a velocidade de percolação da água nas misturas de concreto poroso, os resultados obtidos indicam a eficácia do material para a aplicação em pisos permeáveis, os valores mínimos do coeficiente de permeabilidade para os pisos recém construídos que devem ser superiores 1mm/s, determinado pela ABNT NBR 16416 (ABNT, 2015) ou 1,35mm/s quando adotado como referência ACI 522R-10 (ACI, 2010). A Tabela 4 traz os valores de coeficientes de permeabilidade medidos por vários pesquisadores durante o desenvolvimento de métodos de produção de concretos porosos.

Tabela 4: Coeficientes de permeabilidade.

Referência	Coeficiente de permeabilidade médio (mm/s)
Batezini, 2013	1,35
Batezini, et al., 2016	12,17
Bhuta, et al., 2012	18,50
Bonicelli, et al., 2015	5,00
Brake, et al., 2016	5,50
Castro, et al., 2009	5,65
Cui, et al., 2015	0,65
Giustozzi, 2016	24,80
Huang, et al., 2010	15,00
Kevern, 2015	2,23
Lian e Zhuge, 2010	14,19
Shaefer, et al., 2006	1,32
Torres, et al., 2015	10,85
Yang e Jiang, 2003	10,85
Zhong, et al., 2015	3,33

Fonte: Dados da literatura de referência tabulados pelo autor.

4.3.5 MASSA ESPECÍFICA.

Os concretos porosos normalmente apresentam medições de massa específica entre o intervalo de 1300 kg/m³ a 2000 kg/m³, a norma brasileira define que o pavimento permeável de concreto poroso moldado do local tenha a especificação mínima de projeto na ordem de 1600Kg/m³, com uma tolerância de $\pm 80\text{kg/m}^3$, para tal fim, os ensaios de verificação de densidade devem ser aplicados tanto em seu estado fresco e para comprovação dos resultados em seu estado endurecido. Espera-se, que os concretos porosos apresentem massas específicas de valores entre 60% a 80% menores que as correspondentes aos concretos convencionais (ABNT NBR 16416:2015; ACI 522R-10: 2010, CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016 e TENNIS, et al., 2004). A Tabela 5 apresenta as médias das massas específicas disponíveis na literatura consultada.

Tabela 5: Massa específica.

Referência	Média de Massa específica Kg/m ³
Batezini, 2013	1846
Batezini, et al., 2016	1828
Bonicelli, et al., 2015	1960
Brake, et al., 2016	1846
Castro, et al., 2009	1900
Ćosic, et al., 2015	2260
Lian e Zhuge, 2010	2096
Lian, et al., 2011	2036
Zhong, et al., 2015	1997

Fonte: Dados da literatura de referência tabulados pelo autor.

4.3.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS.

As propriedades mecânicas dos concretos porosos são primordiais uma vez que definem a espessura da camada de pavimento e suas características de durabilidade. As principais propriedades de interesse para o dimensionamento das misturas de concretos porosos são: Resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à fadiga, resistência à abrasão e ainda congelamento e degelo. Alguns estudos indicam que os melhores resultados de resistências mecânicas estão associados ao equilíbrio das relações entre o agregado/cimento e água/cimento. Outro fator preponderante é a mineralogia do agregado empregado que em função da sua origem pode apresentar melhores resultados de aderência a pasta de cimento com isso melhorando as resistências das misturas de concreto poroso. Outros autores indicam que a energia de compactação influencia diretamente nas propriedades mecânicas. A norma nacional para pisos permeáveis define que os ensaios de compressão sejam aplicados apenas nos blocos de pavimentos intertravado enquanto o ensaio de resistência a tração na flexão seja aplicado nas placas e concretos moldados no local (ABNT NBR 16416:2015; ACI 522R-10:2010; BHUTA, et al., 2012; BONICELLI, et al., 2015; CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016; TORRES, et al., 2015 e TENNIS, et al., 2004). A Tabela 6 apresenta a média de valores de resistências a flexão obtidos em algumas das referências da pesquisa.

Tabela 6: Resistência à Tração na Flexão.

Referência	Tração na Flexão Média (Mpa)
Batezini, 2013	2,28
Beeldens, 2001 apud Batezini, 2013	4,80
Beeldens et al, 2003 apud Batezini, 2013	4,00
Bhuta, et al., 2012	3,50
Brake, et al., 2016	2,19
Castro, et al., 2009	2,45
Kajiro et al, 1998 apud Batezini, 2013	5,85
Lian e Zhuge, 2010	2,25
Tennis et al, 2004	2,40
Olek et al, 2003 apud Batezini, 2013	3,20
Yang e Jiang, 2003	7,70

Fonte: Dados da literatura de referência tabulados pelo autor.

4.3.7 PROJETO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL.

Quando se considera a captação de águas pluviais em pavimentos permeáveis de concreto poroso moldado no local, duas condições devem ser consideradas: permeabilidade e capacidade de armazenamento. O projeto deve garantir que a permeabilidade seja suficiente para acomodar toda a chuva que caia na superfície com taxas de permeabilidade superiores a 1 cm/s para dar vazão a pelo menos 200 l / m² / min com capacidade de armazenamento de 4mm de precipitação a cada 25 mm de espessura do piso (TENNIS, et al., 2004).

A continuidade dos valores destes condicionantes dependerá de acompanhamentos periódicos visto que poros maiores resultaram na passagem do material de entupimento através da estrutura dos poros enquanto que os menores inibiram a entrada do material de obstrução na estrutura dos poros. No entanto em ambos os casos resultaram em uma retenção considerável da porosidade intocada. A relação entre a redução da permeabilidade normalizada e a proporção de tamanhos de poros efetivos para o tamanho médio de partículas do material de entupimento mostrou que há uma certa faixa de tamanho de poro para a proporção de tamanho de partículas em que a redução da permeabilidade é o máximo (DEO, et al., 2010).

Afim de evitar a colmatção da camada de poros superficiais indica-se a necessidade de manutenção periódica, com equipamento de jato de ar e sucção a vácuo, esse procedimento tem uma periodicidade programa a cada 180 dias, a desconsideração dos procedimentos de manutenção implicará na perda gradativa das propriedades permeáveis de tal modo, evoluindo para a situação de entupimento (TENNIS, et al., 2004; DEO, et al., 2010 e BATEZINI, 2013).

Em estudos de pavimentos permeáveis de concreto poroso em uso no EUA, os resultados da permeabilidade indicam que existe uma variabilidade muito grande na permeabilidade dentro de cada estacionamento e quando comparado com outros lotes de estacionamento. A variabilidade dos índices de permeabilidade entre as áreas sem tráfego e com tráfego podem variar . Em geral, a permeabilidade dos lotes de estacionamento mais antigos foi menor do que os lotes de estacionamento mais novos; indicando que a idade é um fator que afeta a permeabilidade (KAYHANIAN, et al., 2012).

Figura 8: Manutenção Periódica de pisos permeáveis de concretos porosos.



Fonte: Pervious Concrete Pavements Maintenance and operations guide.
http://www.perviouspavement.org/downloads/pervious_maintenance_operations_guide.pdf

5 MATERIAIS E MÉTODOS.

5.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.

O objetivo do trabalho experimental foi o de produzir e avaliar as propriedades do concreto poroso, com formulação de misturas que atendam aos requisitos mínimos de permeabilidade e resistência mecânica de pavimentos de áreas de tráfego leve de veículos. Deste modo, foram levadas em consideração as distribuições granulométricas do tipo de agregado empregado na pesquisa, no caso, a pedra britada de granito, proveniente dos corpos granitóites de Tracuateua, Mirasselas e Taurari, aflorantes na porção noroeste da área próxima à cidade de Bragança (KLEIN e MOURA, 2003). O programa experimental desta pesquisa baseou-se no trabalho realizado por Souza et al (2016), que investigaram concretos porosos produzidos com o seixo de cava disponível na RMB.

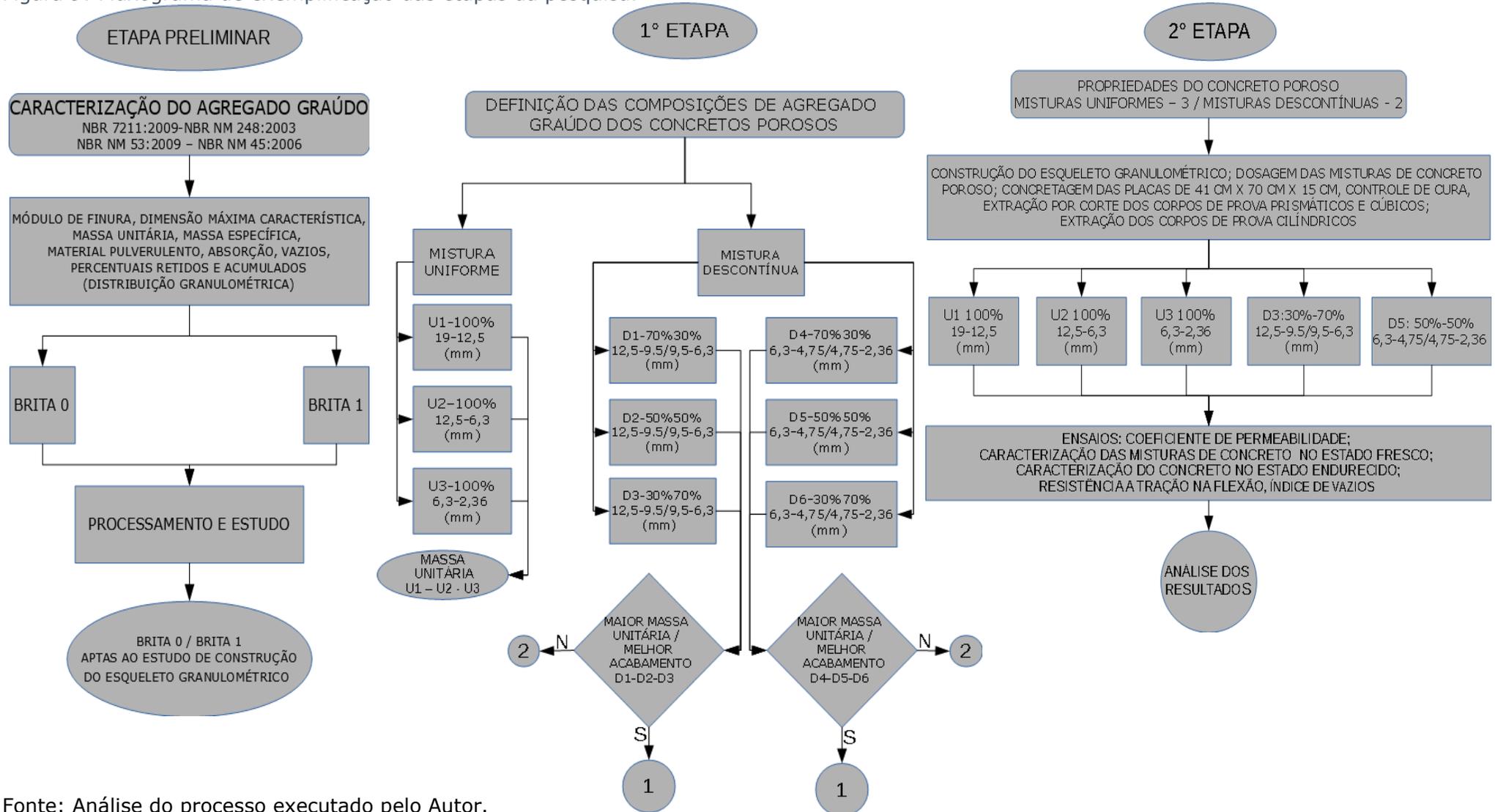
A pesquisa fora dividida em 2 etapas, além de uma etapa preliminar onde se fez a caracterização física dos agregados graúdos estudados, no caso a brita 0 e a brita 1. Nesta etapa preliminar a investigação consistiu da determinação de curvas de distribuição granulométrica, do módulo de finuras, da dimensão máxima característica (DMC), da massa específica, massa específica aparente, da absorção e do material fino que passa na peneira 75 µm. Todos os ensaios realizados seguiram os procedimentos normativos da ABNT NBR7211 (ABNT, 2009²), ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003) e ABNT NBR NM 53 (ABNT, 2009¹). De posse dos resultados das faixas granulométricas apresentadas pelos dois tipos de agregados, estipularam-se os intervalos de faixas granulométricas contínuas e descontínuas da 1^a etapa, levando em conta a quantidade de material disponível em cada fração. A escolha recaiu sobre as frações que apresentaram as maiores quantidades de material, tendo em vista a possibilidade de reprodutibilidade destas misturas em escala industrial.

A primeira etapa teve como objetivo a definição das granulometrias de agregado graúdo para a produção do concreto poroso, baseada na disponibilidade de material em cada brita. A variável de controle adotada foi a faixa de distribuição granulométrica das partículas. Foram pré-definidas 09 formulações, sendo 03 de granulometria uniforme e 06 de granulometria descontínua. A variável de resposta desta etapa foi a massa unitária dos agregados graúdos ABNT NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para as composições de granulometria uniformes, ou seja, aquelas constituídas apenas por um intervalo de tamanho de peneira, todas as misturas foram empregadas na etapa seguinte: a de produção do concreto poroso e avaliação de suas propriedades.

Quanto às misturas de granulometria descontínuas, o critério de decisão para a escolha das composições de agregados foi a obtenção das maiores massas unitárias, conforme abordado no item 6.1.

A segunda etapa teve como objetivo a avaliação das propriedades dos concretos porosos, cujas composições granulométricas dos agregados graúdos foram definidas na etapa anterior. Foram escolhidas as 03 composições de agregado de granulometria uniforme e 02 de granulometria descontínua. As propriedades avaliadas, no caso, as variáveis de resposta, foram a massa específica aparente, para o concreto no estado fresco ABNT NBR 9833 (ABNT, 2008), já em seu estado endurecido, a massa específica seca ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005), o coeficiente de permeabilidade ABNT NBR 16416 (ABNT, 2015) e a resistência à tração na flexão ABNT NBR 12142 (ABNT, 2010) e o índice de vazios (PARK & TIA, 2004). As variáveis de controle são os tipos de misturas com as faixas granulométricas distintas. Os resultados foram comparados com os parâmetros especificados pela norma ABNT NBR 16146 (ABNT, 2015), que trata dos requisitos técnicos para a produção de pavimentos permeáveis, assim como com os resultados da literatura nacional e internacional, com vistas a avaliação das potencialidades do material estudado. Em todas as etapas, os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) com nível de significância de 95%. O objetivo foi avaliar se as variáveis de controle adotadas exercem influência estatisticamente significativa sobre as variáveis de respostas.

Figura 9: Fluxograma de exemplificação das etapas da pesquisa.



Fonte: Análise do processo executado pelo Autor.

5.2 MATERIAIS

5.2.1 CIMENTO PORTLAND CP II Z 32.

A escolha do cimento CP II Z 32, foi motivada por ser um material de fácil acesso no mercado, recomendado em obras marítimas, industriais e subterrâneas uma vez que contem a quantidade de pozolana variando no intervalo de 6% a 14% o que proporciona características de impermeabilidade, resistência a agentes agressivos como águas do mar e esgotos com registros de maior durabilidade da massa de concreto (ABCP, 2002).

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP II – Z – 32 da Cimentos do Brasil S A (CIBRASA). A caracterização do cimento fornecida pelo fabricante é mostrada na Tabela 7.

Tabela 7: Características Físicas.

DETERMINAÇÕES		UND.	PRESCRIÇÕES	VALOR OBTIDO
Ret. #peneira 200 (0,075mm)		%	<12,00	1,1
Ret. #peneira 325 (0,044mm)		%	-	8,2
Área Específica		m ² /kg	Min 260	555
Massa Específica		g/cm ³	-	3,00
Cons. Normal		%	-	31,8
Tempo de Pega	Início	min.	Min. 1:00	03:10
	Fim	min.	Max. 10:00	04:45
Expansibilidade	Início	mm	Max. 5,00	1
	Fim	mm	-	-

Fonte: Cimentos do Brasil S/A – CIBRASA.

5.2.2 AGREGADO GRAÚDO.

O agregado graúdo empregado no trabalho foi proveniente do peneiramento das pedras britadas de granito, 0 e 1, proveniente dos corpos granitóites de Tracuateua, Mirasselas e Taurari, aflorantes na porção noroeste da área próxima à cidade de Bragança (KLEIN & MOURA, 2003). As britas foram processadas por peneiramento e separadas por faixas granulométricas originadas das brita 0 e brita 1. Após o processo de caracterização granulométrica das duas britas, foi definida a quantidade necessária para o processamento e a produção das faixas granulométricas escolhidas para a composição das misturas uniformes e descontínuas, conforme é descrito no item 5.3.

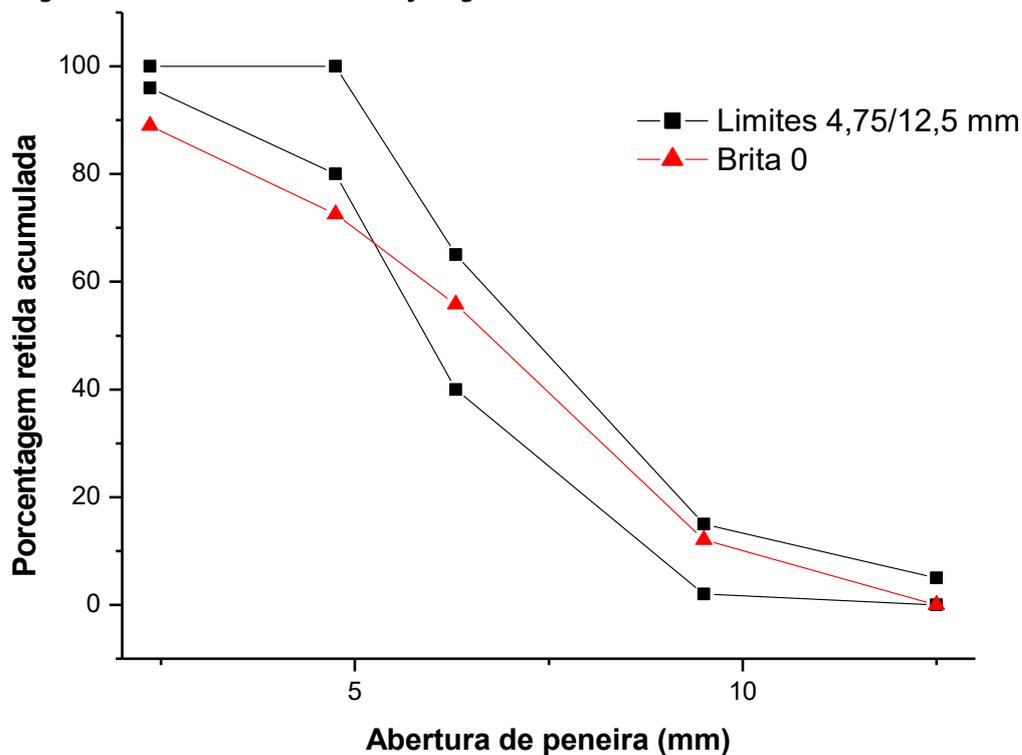
5.2.3 ÁGUA.

A água utilizada na produção das misturas de concreto poroso deste estudo será a da Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), retirada da rede de abastecimento de água da RMB.

5.3 ETAPA PRELIMINAR - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS.

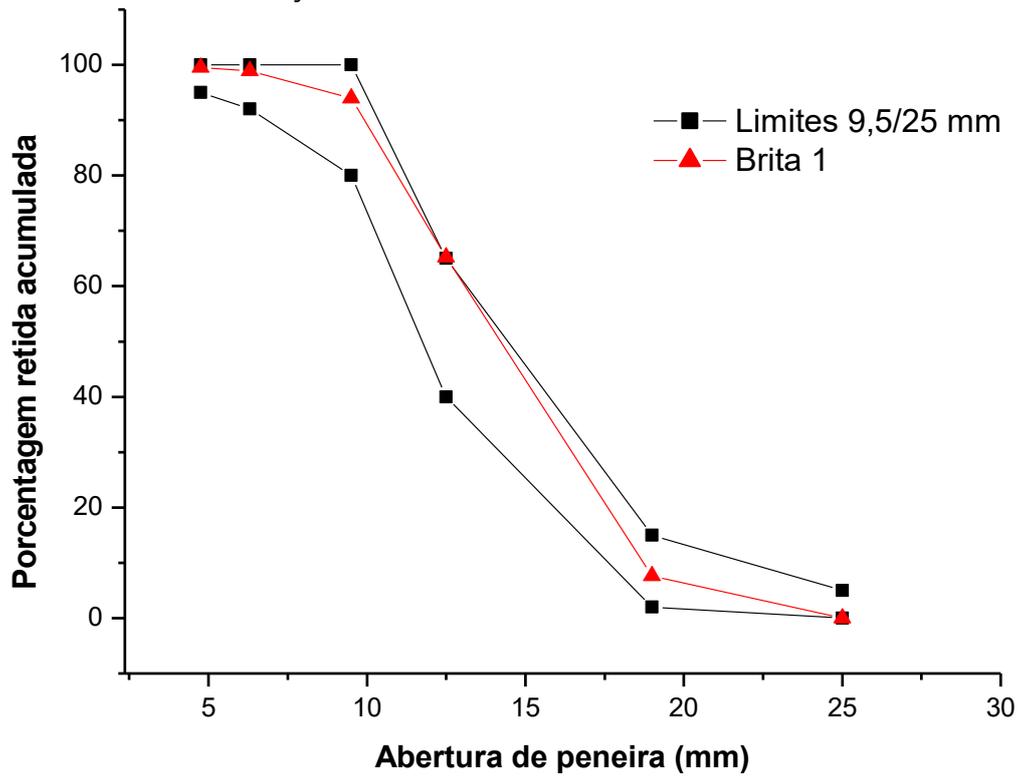
A distribuição granulométrica das britas 0 e 1 foram determinadas conforme o procedimento prescrito na norma ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os procedimentos de cálculo do DMC e do módulo de finura obedeceram às orientações da norma ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009²). As determinações da massa específica absoluta, massa aparente e absorção dos agregados foram realizadas de acordo com a norma ABNT NBR NM 53 (ABNT, 2009¹). O teor de material fino que passa através da peneira 75 μ m por lavagem foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR NM 46 (ABNT, 2001). A Figura 10 e a Figura 11, mostram as curvas de distribuição granulométrica e a Tabela 8 e a Tabela 9, mostram as composições granulométricas e as demais características físicas das britas 0 e 1, respectivamente.

Figura 10: Curva da distribuição granulométrica da brita 0.



Fonte: Estudo Laboratorial da brita 0.

Figura 11: Curva de distribuição Granulométrica da Brita 1.



Fonte: Estudo Laboratorial da brita 1.

Tabela 8: Características da brita 0.

PENEIRAS		MATERIAL RETIDO	MATERIAL RETIDO (%)		MATERIAL PASSANTE (%)
Pol	(mm)	(g)	INDIVIDUAL	ACUMULADA	
2 1/2"	75	0,0	0,0	0,0	100,0
	63	0,0	0,0	0,0	100,0
2"	50	0,0	0,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,5	0,0	0,0	0,0	100,0
1 1/4"	31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
1"	25	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19	0,0	0,0	0,0	100,0
1/2"	12,5	0,0	0,0	0,0	100,0
3/8"	9,5	354,0	11,8	11,8	88,2
1/4"	6,3	1.352,0	45,1	56,9	43,1
4	4,75	496,0	16,5	73,4	26,6
8	2,36	490,0	16,3	89,7	10,3
16	1,18	106,0	3,5	93,3	6,7
30	0,6	46,0	1,5	94,8	5,2
50	0,3	32,0	1,1	95,9	4,1
100	0,15	38,0	1,3	97,1	2,9
FUNDO		86,0	2,9	100,0	0,0
TOTAL		3.000,0	-	-	-

DEFINIÇÃO	UNIDADES	VALORES
MÓDULO DE FINURA	-----	6,16
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA	MM	9,5
MASSA UNITÁRIA	KG/M ³	1579
MASSA ESPECÍFICA	G/CM ³	2,65
MATERIAL PULVERULENTO	%	1,00
ABSORÇÃO	%	0,46
VAZIOS	%	40,41

Fonte: Análise laboratorial executada pelo autor com referência normativas em ABNT NBR NM 46:2001, ABNT NBR NM 248:2003, ABNT NBR NM 45:2006, ABNT NBR NM 53:2009 e ABNT NBR 7211:2009.

Tabela 9: Características da brita 1.

Peneiras Pol	MATERIAL RETIDO (mm)	MATERIAL RETIDO (g)	MATERIAL RETIDO (%)		MATERIAL PASSANTE (%)
			INDIVIDUAL	ACUMULADA	
2 1/2"	75	0,0	0,0	0,0	100,0
	63	0,0	0,0	0,0	100,0
2"	50	0,0	0,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,5	0,0	0,0	0,0	100,0
1 1/4"	31,5	0,0	0,0	0,0	100,0
1"	25	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19	240,0	8,0	8,0	92,0
1/2"	12,5	1.742,0	58,1	66,1	33,9
3/8"	9,5	856,0	28,5	94,6	5,4
1/4"	6,3	140,0	4,7	99,3	0,7
4	4,75	14,0	0,5	99,7	0,3
8	2,36	2,0	0,1	99,8	0,2
16	1,18	0,0	0,0	99,8	0,2
30	0,6	0,0	0,0	99,8	0,2
50	0,3	0,0	0,0	99,8	0,2
100	0,15	0,0	0,0	99,8	0,2
FUNDO		6,0	0,2	100,0	0,0
TOTAL		3.000,0	-	-	-

DEFINIÇÃO	UNIDADES	VALORES
MÓDULO DE FINURA	-----	8,63
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA	MM	12,5
MASSA UNITÁRIA	KG/M ³	1449
MASSA ESPECÍFICA	G/CM ³	2,65
MATERIAL PULVERULENTO	%	0,8
ABSORÇÃO	%	0,25
VAZIOS	%	45,32

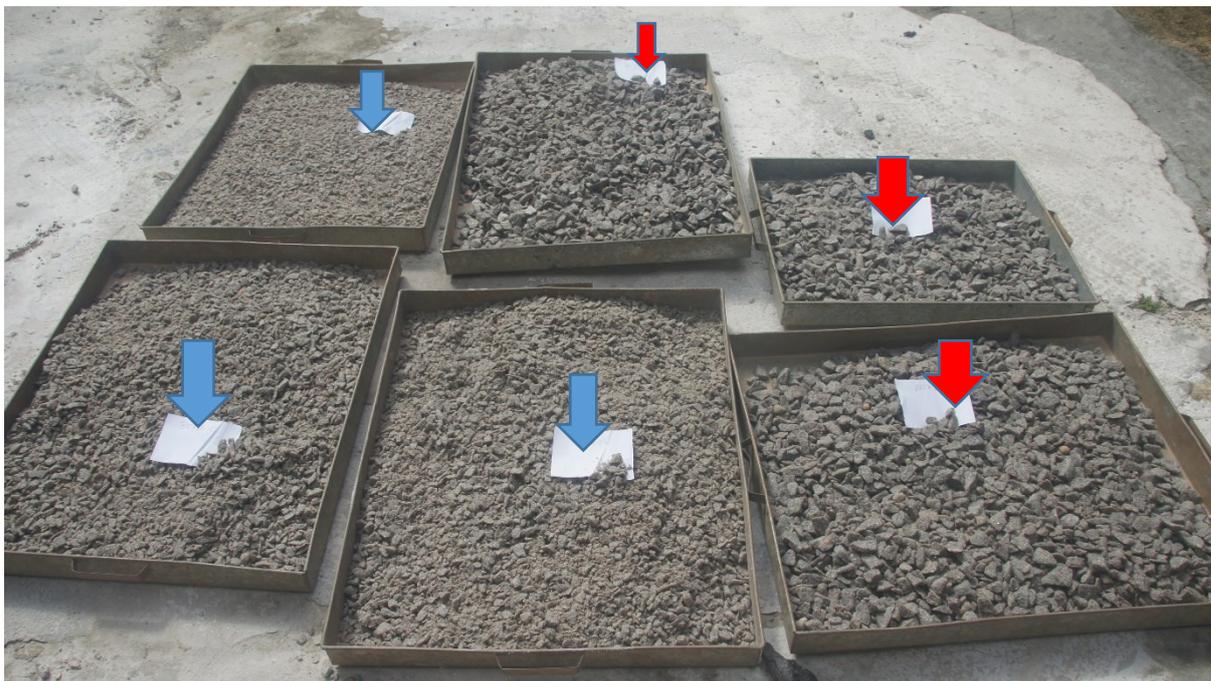
Fonte: Análise laboratorial executada pelo autor com referência normativas em ABNT NBR NM 46:2001, ABNT NBR NM 248:2003, ABNT NBR NM 45:2006, ABNT NBR NM 53:2009 e ABNT NBR 7211:2009.

A brita 0 não se enquadrou nos limites estipulados pela ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009²), com uma granulometria mais fina nas peneiras de abertura 2,36 e 4,75 mm, ao passo que a brita 1 ficou dentro do intervalo estipulado. As massas específicas absolutas de ambas as britas foram iguais, 2.650 kg/m³, que são valores elevados mas compatíveis com granitos. Os teores de absorção foram reduzidos, 0,25% para a brita 1, e 0,46% para a brita 0, também condizentes com as características de alta compacidade deste tipo de rocha ígnea. O teor de

material pulverulento para a brita 0 foi de 1%, no limite máximo estipulado pela norma e de 0,8% para a brita 1.

A brita 1 apresentou os maiores percentuais retidos entre as peneiras de abertura de 12,5 e 19,0mm, com cerca de 60% das partículas, seguido de aproximadamente 28% de material retido entre as peneiras de 9,5 e 12,5mm e quase 5% entre as peneiras de abertura 6,3 e 9,5mm. Cerca de 90% da brita 1 concentra-se nesses três intervalos. Na brita 0, a maior concentração de material retido encontra-se entre as peneiras de 6,3 e 9,5 mm, com 45%; seguidos em igual proporção de 16% para os intervalos entre 4,75 e 6,3mm e 2,36 e 4,75mm, perfazendo 77% do material constituinte deste agregado graúdo. Diante destes resultados, com vistas a produzir concretos porosos que possam ser reproduzidos em escala industrial, adotou-se para os arcabouços granulares dos concretos porosos intervalos de tamanhos de partículas passantes na peneira 19,00 mm e retidas na peneira de abertura 2,36 mm, conforme será abordado na descrição da 1ª etapa da Pesquisa (5.4). A Figura 12, as setas em azul marcam a amostras de brita 0 e as em vermelho as de brita 1.

Figura 12: Separação das porções de 3000g das britas.



Fonte: Registro fotográfico do Autor.

A Figura 13, apresenta o registro de parte do processo aplicado a brita 1, a ordenação das imagens: setor (a) o lançamento com concha da brita no recipiente calibrado, setor (b) o preenchimento de todo o volume até o transbordamento do material, setor (c) verificação do recipiente totalmente preenchido antes do arrasamento e setor (d) o recipiente totalmente preenchido depois do seu arrasamento. O ensaio foi aplicado em ambas as britas estudadas.

Figura 13: Ensaio de determinação de massa unitária.



Fonte: Registro fotográfico do Autor.

A Figura 14, retrata parte do procedimento adotado para a determinação das características das britas: setor (a) separação das 6 porções de 1000g cada uma para a aplicação dos ensaios, setor (b) verificação do peso das amostras em balança de precisão, setor (c) as amostras de britas saturadas, retiradas do cesto depois de pesadas em imersão e setor (d) verificação do peso saturado da amostra de brita depois de retirada o excesso de água.

Figura 14: Pesagem das amostras de agregado.



Fonte: Registro fotográfico do Autor.

5.4 1ª ETAPA DA PESQUISA – DEFINIÇÃO DAS MISTURAS DE AGREGADO GRAÚDO DOS CONCRETOS POROSOS.

DEFINIÇÃO DAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS.

Na etapa anterior foram determinadas as distribuições granulométricas de ambas as britas. Diante dos resultados, concluiu-se que o ideal para a composição do esqueleto granular seriam partículas contidas no intervalo entre e 19,00 e 2,36 mm. Optou-se por dois tipos de composições, as misturas uniformes, com apenas uma faixa granulométrica e as misturas descontínuas, compostas apenas por duas faixas granulométricas. Ambas, com granulometria aberta mas com pouca diversidade de tamanhos por questões práticas de produção em escala industrial. Foram definidos dois tipos de grupo de composições: as misturas uniformes, no total de 03; e as misturas descontínuas, divididas em dois subgrupos, cada um com três misturas distintas, perfazendo 06 no total. Com o total de 09 misturas estudadas, somatória entre as uniformes e as descontínuas.

O critério de escolha adotado para a seleção das misturas uniformes teve como referência o programa experimental de Bhuta et al. (2012), que avaliou as propriedades de concretos porosos normais e de alto desempenho, ambos com 03 faixas granulométricas, a n°5 (13-20 mm), a n°6 (5-13 mm) e a n°7 (5-2,5). Vale ressaltar que estas aberturas de peneiras são as normatizadas pela *Japanese Industrial Standards (JIS)*. Os resultados publicados sinalizam que os concretos porosos produzidos com essas misturas apresentaram bons índices de permeabilidade e resistência mecânica.

No caso das misturas contínuas, levou-se em consideração a analogia necessária para a adaptação ao padrão de abertura de peneira adotado pela ABNT. Nas composições uniformes, em sua faixa granulométrica, foram adaptadas a numeração das peneiras tanto da série normal, quanto da série intermediária. Outro dado relevante a ser destacado nesta publicação é que todo o material passante na peneira 4,75 mm é classificado como agregado miúdo pela ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009²), todavia, para efeito de comparação entre os resultados das pesquisas, todo o material passante na peneira 4,75 mm e retido na peneira 2,36 mm foi denominado como agregado graúdo. As misturas uniformes adotadas na pesquisa são mostradas a seguir:

- **U1**, que corresponde à mistura uniforme com material passante na peneira 19,5mm e retido na peneira 12,5mm.
- **U2**, que corresponde à mistura uniforme com material passante na peneira 12,5mm e retido na peneira 6,3mm.
- **U3**, que corresponde à mistura uniforme com material passante na peneira 6,3mm e retido na peneira 2,36mm:

O processo de seleção para as misturas descontínuas levou em consideração o levantamento realizado por Chandrappa e Biligiri (2016). Os pesquisadores investigaram inúmeras publicações acerca dos temas sobre composição, preparação e desempenho do concreto poroso. Os autores destacam que as faixas granulométricas mais usuais foram as compreendidas nos intervalos de 19 e 9,5mm e entre 9,5 e 2,36 mm. Outra informação a ser considerada é a sugerida por Tennis *et al* (2004), que ao analisar as especificações da ASTM C 33, indicam o uso dos agregados de nº 67 (19,0 a 4,75 mm), nº 8 (9,5 a 2,36 mm), ou nº 89 (9,5 a 1,18 mm), como as possíveis faixas de mistura de composição do agregado graúdo. O que demonstra que a granulometria dos concretos porosos tem grandes variações nos tamanhos das partículas e proporcionamento entre estas.

Diante do exposto e com o objetivo de se ter uma variação nas proporções que diferenciem as misturas descontínuas das misturas uniformes, foram selecionados dois subgrupos. O primeiro com misturas variando as proporções entre as faixas 12,5 – 9,5 mm/ 9,5 a 6,3mm (D1, D2 e D3), e o segundo, variando para as faixas 6,3 a 4,75 mm / 4,75 a 2,36mm (D4, D5 e D6). Para ambos os subgrupos, as proporções entre as duas faixas variaram de 30-70%, 50-50% e 70-30%, perfazendo um total de 06 composições de granulometria descontínua.

- **D1**, que corresponde às misturas descontínuas com 70% de partículas compreendidas entre as peneiras de abertura 12,5 e 9,5mm, e 30% de material passante na peneira de abertura 9,5mm e retido na peneira 6,3mm.
- **D2**, que corresponde à mistura descontínua com 50% de partículas compreendidas entre as peneiras de abertura 12,5 e 9,5mm, e 50% de material passante na peneira de abertura 9,5mm e retido na peneira 6,3mm.
- **D3**, que corresponde à mistura descontínua com 30% de partículas compreendidas entre as peneiras de abertura 12,5 e 9,5mm, e 70% de material passante na peneira de abertura 9,5mm e retido na peneira 6,3mm.

- **D4**, que corresponde à mistura descontínua com 70% de partículas compreendidas entre as peneiras de abertura 6,3 e 4,75mm, e 30% de material passante na peneira de abertura 4,75mm e retido na peneira 2,36mm.
- **D5**, que corresponde à mistura descontínua com 50% de partículas compreendidas entre as peneiras de abertura 6,3 e 4,75mm, e 50% de material passante na peneira de abertura 4,75mm e retido na peneira 2,36mm.
- **D6**, que corresponde à mistura descontínua com 30% de partículas compreendidas entre as peneiras de abertura 6,3 e 4,75mm, e 70% de material passante na peneira de abertura 4,75mm e retido na peneira 2,36mm.

A Tabela 10, mostra a identificação de cada composição, a faixa granulométrica empregada e os percentuais das misturas estudadas. No caso das misturas uniformes, todas as 03 foram empregadas na produção do concreto poroso, ao passo que para as misturas descontínuas, das 6, foram escolhidas 2, sendo 01 de cada grupo. A variável de resposta que norteou a decisão foi a massa unitária, no caso a maior para cada grupo.

Tabela 10: Composição Granulométrica do esqueleto granular.

	MISTURAS	FAIXA GRANULOMÉTRICA mm (100% PASSANTE / 100% RETIDO)	PERCENTUAIS DE MISTURA %
MISTURA UNIFORME	U1	19-12,5	100
	U2	12,5-6,3	100
	U3	6,3-2,36	100
MISTURA DESCONTÍNUA	D1	12,5-9.5/9.5-6,3	70/30
	D2	12,5-9.5/9.5-6,3	50/50
	D3	12,5-9.5/9.5-6,3	30/70
	D4	6,3-4,75/4,75-2,36	70/30
	D5	6,3-4,75/4,75-2,36	50/50
	D6	6,3-4,75/4,75-2,36	30/70

Fonte: Análise laboratorial do autor com referência na orientação e literatura pesquisada.

PREPARAÇÃO, ENSAIOS E DEFINIÇÕES DAS MISTURAS DE AGREGADO GRAÚDO.

-----PENEIRAMENTO

Com a definição das faixas de mistura granular foi iniciado o processo de peneiramento da brita 0 e da brita 1. O processamento do agregado graúdo foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Pará. O equipamento empregado foi o conjunto de peneiras granulométricas quadradas de dimensões 50cm x 50cm x 10cm, acoplado ao agitador de peneiras eletromecânico, Figura 15. Para o processamento da brita 0, foram adotadas 02 sequências de acoplagem das peneiras, ordenadas de cima para baixo no sentido de queda passante, sendo o primeiro, $12.5 \Leftrightarrow 9.5 \Leftrightarrow 6.3 \Leftrightarrow 4.75 \Leftrightarrow 2.36$ e o segundo $12.5 \Leftrightarrow 6.3 \Leftrightarrow 2.36$. O processamento da brita 1 foi executado em apenas 01 sequência, $19.0 \Leftrightarrow 12.5 \Leftrightarrow 6.3 \Leftrightarrow 2.36$. À medida que a brita acumulava na peneira, o material era retirado e acondicionado em sacos de capacidade de 75 kg.

Figura 15: Agitador e Conjunto de Peneiras.

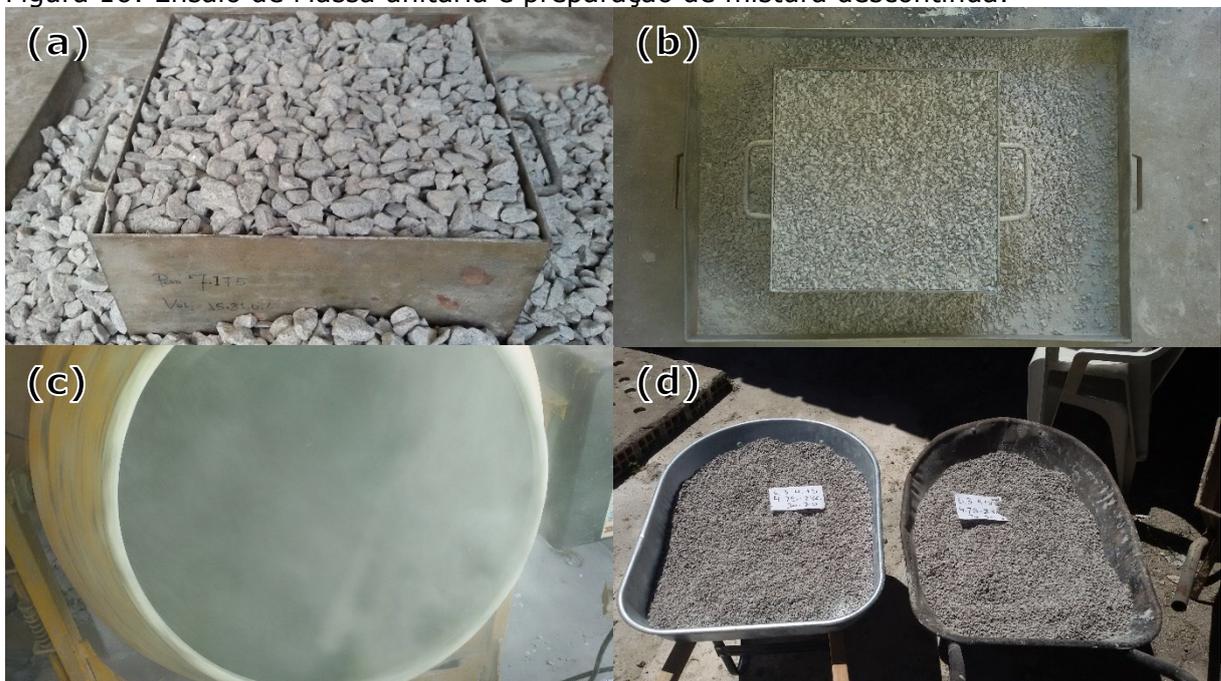


Fonte: Registro fotográfico do Autor

A massa unitária foi determinada de acordo com as prescrições da norma ABNT NBR NM 45 (ABNT, 2006). As nove misturas de agregado graúdo tiveram as suas massas unitárias determinadas pela média dos resultados obtidos. Para as misturas uniformes, U1, U2 e U3, a definição da massa unitária não foi critério de escolha para o seu uso como agregado graúdo dos respectivos concretos porosos. Em contrapartida, para as misturas descontínuas, D1, D2, D3, D4, D5 e D6, o resultado obtido foi o fator que determinou a escolha, ou seja, a seleção da mistura de cada faixa de composição, 12,5-9,5/9,5-6,3 e 6,3-4,75/4,75-2,36, a partir da obtenção da maior massa unitária e no caso de igualdade de valores, foi selecionada a com agregados de menor tamanho de partícula.

A Figura 16, mostra no setor (a) o preenchimento do recipiente de referência com a mistura U1, no setor (b) a mistura U3 depois do arrasamento, no setor (c) o processamento em betoneira das proporções necessárias a cada faixa de percentuais de composição granular das misturas descontínuas e no setor (d) a acomodação em carrinhos de mão das misturas descontínuas antes do ensaio de determinação de massa unitária.

Figura 16: Ensaio de Massa unitária e preparação de mistura descontínua.



Fonte: Registro fotográfico do Autor

5.5 2ª ETAPA DA PESQUISA – PRODUÇÃO DO CONCRETO POROSO.

5.5.1 MÉTODO DE DOSAGEM DO CONCRETO POROSO.

A técnica de dosagem para as misturas de concreto poroso seguiu a metodologia proposta por (CASTRO, et al., 2009). Os dados iniciais para determinação dos traços foram considerados o fator de compactação inicial (FC) de 95%, a relação água/cimento de 0,38 e o volume de vazios de cada mistura de agregado, contínua e descontínua. Adotou-se a relação água/cimento de 0,38 para efeito comparativo com o trabalho desenvolvido por Souza e Carvalho (2016), que produziram concretos porosos com seixo de cava, agregado disponível na RMB. Outro aspecto é que a relação água/cimento foi considerada por Castro et al. (2009) como adequada em termos de consistência do concreto. Segundo TENNIS et (2004), relações água/cimento inferiores, entre 0,27 e 0,30, ocasionam desprendimento das partículas dos agregados, e superiores a 0,40 tornam a pasta de cimento fluída que acarretará na segregação e preenchimento dos vazios dos agregados.

Calcula-se primeiramente o volume de vazios da mistura, por meio da equação 1. Sendo V_a , o teor de vazio do agregado, V_p , o teor de argamassa da mistura e (F_c) o fator de compactação.

$$V_m = (V_a - V_p) \cdot F_c + (1 - F_c) \quad - (1)$$

Em função do resultado de V_m , calcula-se o percentual de vazios conectados (V_{con}) pela equação 2.

$$(V_{con}) = 0.898 \cdot V_m - 3.1 \quad - (2)$$

De posse dos resultados anteriores, calcula-se o consumo de cimento (M_c) pela equação 3. Sendo γ_c o peso específico do cimento, D_{ad} o percentual de aditivo em massa, quando empregado, e γ_{ad} a massa específica do aditivo.

$$M_c(Kg) = \left[\frac{(10V_a - 1000)F_c + 965.48 - 11.14V_{con}}{\left\{ \frac{1}{\gamma_c} + (a/c) + \frac{D_{ad}}{100\gamma_{ad}} \right\} F_c} \right] \quad - (3)$$

Todas as misturas de concreto poroso estudadas nesta investigação não tiveram aditivos químicos em sua composição. A Tabela 11, mostra as composições e suas características.

Tabela 11: Dosagem das Misturas de Concreto Poroso.

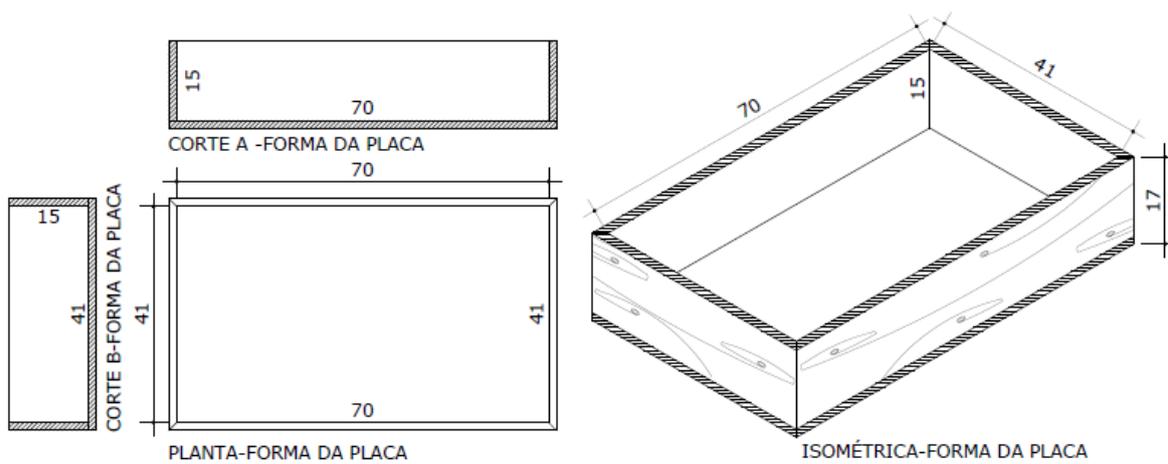
Cod.	Faixa Granulométrica (mm)	Massa Unitária (Kg/m³)	Vm (%)	Vcon (%)	Mc (Kg/m³)	a/c	Traço
U1	19-12,5 (100%)	1402,24	25,98	20,33	357,80	0,38	1:3,92
U2	12,5-6,3 (100%)	1349,39	27,88	21,93	357,79	0,38	1:3,77
U3	6,3-2,36 (100%)	1330,73	28,54	22,53	357,79	0,38	1:3,72
D1	12,5-9.5/9.5-6,3 (70%-30%)	1328,99	28,61	22,59	357,79	0,38	1:3,71
D2	12,5-9.5/9.5-6,3 (50%-50%)	1317,93	29,00	22,95	357,78	0,38	1:3,68
D3	12,5-9.5/9.5-6,3 (30%-70%)	1328,56	28,62	22,60	357,79	0,38	1:3,71
D4	6,3-4,75/4,75-2,36 (70%-30%)	1291,02	29,97	23,81	357,78	0,38	1:3,66
D5	6,3-4,75/4,75-2,36 (50%-50%)	1311,26	29,24	23,16	357,78	0,38	1:3,66
D6	6,3-4,75/4,75-2,36 (30%-70%)	1286,02	30,17	23,97	357,78	0,38	1:3,59

FONTE: Análise laboratorial executada pelo autor com referência em (CASTRO, et al., 2009).

5.5.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO POROSO.

Foram confeccionadas cinco (5) fôrmas de madeira com dimensões internas, de 41 cm x 71 cm x 15cm (largura x comprimento x altura), como molde para a execução das placas de concreto poroso, a Figura 17, mostra o projeto esquemático das fôrmas. Para a preparação destas para o recebimento do concreto poroso, foi aplicado em toda a superfície das paredes internas, uma demão de desmoldante com pincel brocha.

Figura 17: Projeto esquemáticos das fôrmas.



FONTE: Desenho elaborado pelo Autor.

Para o processo de produção do concreto poroso, tinha-se planejado seguir o procedimento proposto por Shaefer, et al.(2006), que foi adotado por (BATEZINI, 2013). Todavia, durante as primeiras experimentações o procedimento não se mostrou totalmente aplicável, com isto foi necessário adequar-se as etapas para se evitar a aderência da massa de concreto a parede interna da betoneira. A preparação das fôrmas, produção das placas e extração dos corpos de prova, seguiu o procedimento de trabalho com orientação nas publicações, ACI 522-10 (ACI, 2010), Castro, et al., (2009), Souza e Carvalho, (2016), Tennis, et al., (2004) e por meio de adaptações as necessidades de adequação de momento identificadas pelo autor. Expostas as ponderações, são listados abaixo os passos adotados com a ordem de colocação dos materiais na betoneira e atividades de processamento da mistura.

- a. Adicionar todo o agregado na betoneira;
- b. Adicionar 5% do peso de cimento;
- c. Misturar pelo tempo de 01 minuto;
- d. Adicionar o restante do cimento e a água;
- e. Misturar por 03 minutos.

Foram executadas 02 betonadas por mistura, de modo a preencher as fôrmas em duas camadas. Na primeira, que correspondeu a metade do volume de preenchimento da fôrma, a mistura de concreto poroso foi lançada diretamente da betoneira na fôrma de madeira com auxílio de colher de pedreiro. O preenchimento da fôrma ocorreu das extremidades para o centro da mesma, com o lançamento de todo o material da primeira e da segunda betonadas na fôrma. O processo de compactação foi realizado através de um rolo metálico de 100mm de diâmetro, 390 mm de altura de cilindro e peso de 25 kg, correspondendo a massa linear de 65 kg/m, conforme as prescrições do ACI 522R-10 (ACI, 2010). O rolo foi passado 15 vezes para cada camada de lançamento.

Imediatamente após a moldagem e compactação, as placas de concreto poroso foram cobertas com manta geotêxtil saturada em água, iniciando-se a cura, que se prolongou até o 28º dia. A Figura 18, à esquerda, mostra um comparativo da textura superficial das placas das cinco misturas, e à direita, os registros de execução do teste empírico sugerido por Tennis et al. (2004) através da moldagem de uma esfera com a mistura de concreto, demonstrando que a relação água/cimento estava adequada, com a coesão suficiente e necessária para a moldagem do concreto poroso.

Figura 18: Moldagem das placas e ensaio de consistência.

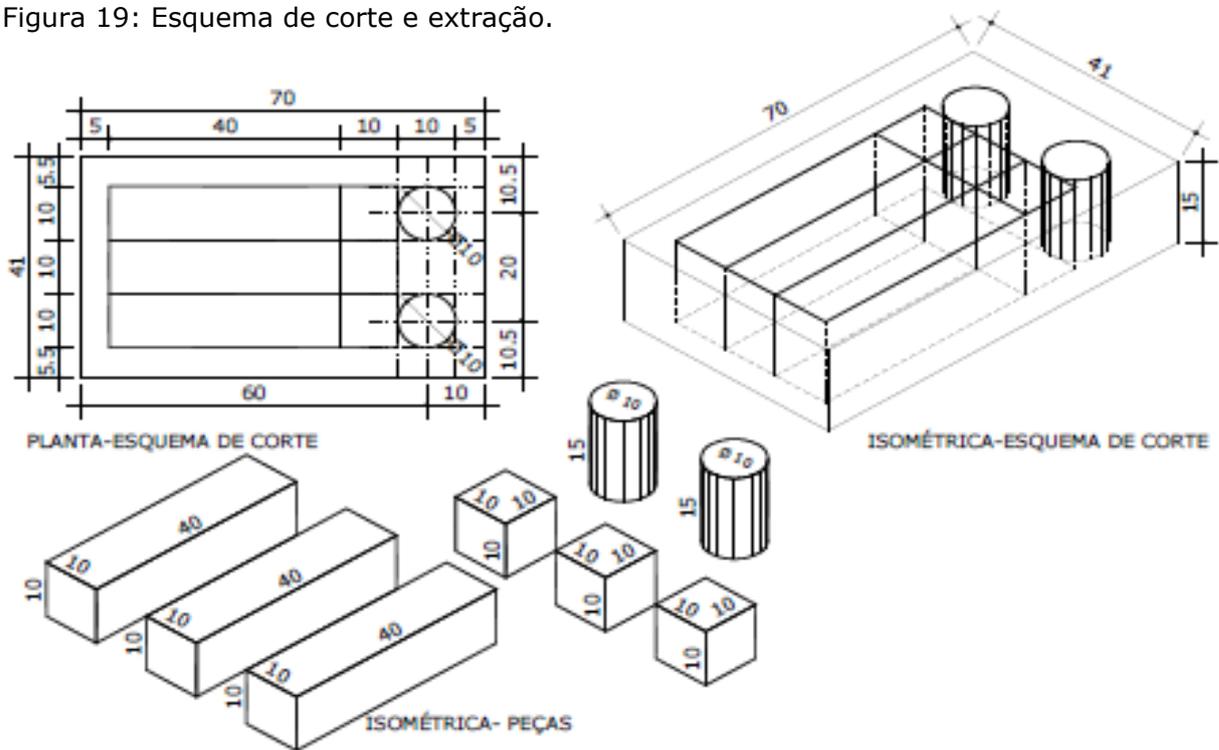


Fonte: Registro fotográfico do Autor.

5.5.3 EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.

O procedimento de obtenção dos corpos de prova para os ensaios de determinação da massa específica, do índice de vazios, permeabilidade e tração na flexão foi similar ao trabalho de (SOUZA & CARVALHO, 2016). Para cada mistura foi moldada uma placa de dimensões 41x71 x15 cm, conforme mencionado no item 5.5.2. As placas foram cortadas de modo a obter 03 prismas de dimensões 10 x10 x 40cm para o ensaio de tração na flexão, 03 cubos de 10 cm de aresta para determinação da massa específica seca e do índice de vazios. Além destes, também foram extraídos dois cilindros de 10cm de diâmetro e 15 cm de altura. A Figura 19 ilustra o esquema de obtenção dos corpos de prova através do corte e extração nas placas.

Figura 19: Esquema de corte e extração.



FONTE: Desenho elaborado pelo Autor.

A Figura 20 apresenta no setor (a) o corte de obtenção das peças prismáticas, no setor (b) a extração dos corpos de prova cilíndricos com máquina elétrica e coroa / cálice de Ø100mm, no setor (c) 03 peças prismáticas, 03 peças cúbicas e 02 extrações cilíndricas, por placa e no setor (d) o total de 40 corpos de prova, 15 prismáticos, 15 cúbicos e 10 cilíndricos.

Figura 20: Preparação dos corpos de prova.



FONTE: Registro fotográfico do Autor.

5.5.4 ENSAIOS DO CONCRETO POROSO NO ESTADO FRESCO.

A massa específica aparente dos concretos porosos no estado fresco foi determinada de acordo as orientações da ABNT NBR 9833 (ABNT, 2008), a qual diferencia as dimensões do recipiente de referência em função da dimensão característica dos agregados, por esse motivo a investigação adotou recipiente cilíndrico metálico com diâmetro interno de Ø200mm e altura de 240mm, Figura 21.

Primeiramente as misturas de concreto poroso foram colocadas no recipiente em 02 camadas: A primeira ocupou a metade do volume e foi compactada com haste metálica de ponta semiesférica, sendo aplicados 25 golpes no sentido vertical e em seguida aplica-se vários golpes com martelo de borracha nas paredes até que não se observe mais as marcas da haste na superfície do concreto. O processo de compactação foi repetido na segunda camada.

O recipiente com o concreto poroso foi pesado em balança de precisão, Figura 21, com a obtenção destes valores foram feitos os cálculos de determinação da massa específica aparente.

Figura 21: Determinação da Massa Específica aparente.

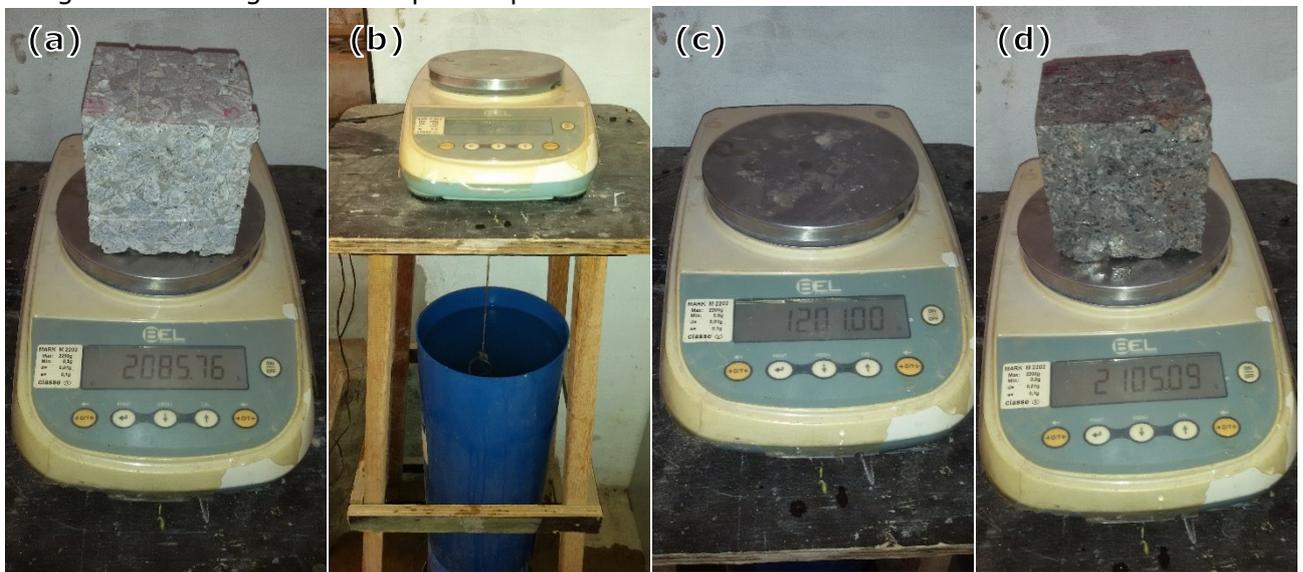


Fonte: Registro fotográfico do Autor.

5.5.5 ENSAIOS DO CONCRETO POROSO NO ESTADO ENDURECIDO.

Foram executados os ensaios de absorção de água e massa específica seca no estado endurecido do concreto que são determinados pela ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005). O ensaio aconteceu no laboratório de pavimentação da Camargo Corrêa, foram usados os equipamentos calibrados, estufa, balança de precisão, cesto de imersão e paquímetro, além dos insumos necessários a realização do ensaio. A Figura 22 mostra a pesagem dos corpos de prova cúbicos, sendo o setor (a) o momento da verificação do peso seco, os setores (b e c) a verificação do peso submerso e o setor (d) a mensuração do peso saturado.

Figura 22: Pesagem dos corpos de prova cúbicos.



FONTE: Registro fotográfico do Autor.

5.5.6 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS.

Para determinar o índice de vazios do concreto poroso foi adotado o procedimento de cálculo de Park e Tia (2004), que foram aplicados nas pesquisas de Shaefer et al. (2006) e Batezini (2013). O cálculo do índice de vazios é mostrado na equação 4, no qual V_r é o índice de vazios; W_1 , peso do cubo de concreto submerso, em Kg; W_2 , peso do cubo seco, em Kg; ρ_w , massa específica da água em Kg/m³ e Vol , volume da amostra em m³.

$$V_r = \left(1 - \frac{W_2 - W_1}{\rho_w \cdot Vol} \right) \quad (4)$$

5.5.7 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE PERMEABILIDADE.

O ensaio para verificação das taxas de permeabilidade em concretos porosos adotou a metodologia mais empregada nas pesquisas investigativas, que é o processo aplicado por Neithalath, et al., (2006) o qual foi adotado pela ACI 522-R10 (ACI, 2010) como referência de ensaio de permeabilidade em laboratório.

O cálculo do Coeficiente de Permeabilidade, K , baseia-se na lei de Darcy, conforme mostrado na equação 5. A_1 é a área da seção da amostra, ortogonal ao fluxo de percolação; A_2 é a área de seção circular da amostra; l representa o comprimento da amostra; t é a média dos intervalos medidos; h_f é a altura inicial da coluna d'água e h_i é a altura final da coluna d'água.

$$K = \left(\frac{A_1 \cdot l}{A_2 \cdot t} \right) \cdot \log \left(\frac{h_f}{h_i} \right) - (5)$$

O objetivo do ensaio é calcular a média do tempo decorrido pela percolação da água no concreto poroso. Empregou-se o permeâmetro de carga variável, sendo o ensaio realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará (LEC UFPA).

Figura 23: Permeâmetro de carga variável e corpos de prova cilíndricos.



Fonte: Registro fotográfico do Autor.

5.5.8 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRACÇÃO NA FLEXÃO.

O ensaio que mede a carga de rompimento à tração na flexão de corpos de prova prismáticos é determinado pela ABNT NBR 12142 (ABNT, 2010). O ensaio foi realizado no LEC UFPA. O equipamento empregado foi uma prensa hidráulica servo-controlada, com taxa de carregamento constante, da marca EMIC. A Figura 24, mostra em detalhe o prisma e a forma de ruptura.

Figura 24: Ensaio de tração na flexão.



Fonte: Registro fotográfico do Autor.

5.6 SIMULAÇÃO DE APLICAÇÃO DO CONCRETO POROSO COMO PISO PERMEÁVEL NA RMB.

A simulação de condições de aplicação do pavimento permeável em concreto tem caráter ilustrativo, e princípio estimativo, consubstanciando a análise. Não se trata, portanto, de estabelecer de modo conclusivo, para a microbacia hidrográfica em questão ou outra área, urbana ou rural, parâmetros definitivos de análise de desempenho da infraestrutura. Ao contrário; esta simulação permite que se visualize ordens de grandeza e que se identifique ganhos potenciais advindos da incorporação do material e sua aplicação em um contexto real.

Toma-se como base a microbacia hidrográfica urbana do Una, situada em torno do curso d'água de mesmo nome, estendida no sentido Nordeste do território do Município de Belém, Pará. A bacia do Una, área territorial de 3.607 ha, população de cerca de 555.000 habitantes prevista para o ano de 2017 (COSANPA; GPHS-UFPA, 2008), densidade demográfica bruta correspondente a 154 habitantes por hectare (hab/ha), é a maior bacia hidrográfica do município de Belém em área territorial e população. Sofreu recentemente obras de um projeto de macrodrenagem que se estendeu da década de 1980 até os anos 2000 e, apesar disto, apresenta recorrentes problemas de alagamento em seu território, que não decorrem apenas da falta de manutenção, mas da relação entre morfologia, uso e ocupação do solo e dispositivos de infraestrutura urbana. Casos como o do Una não são excepcionais, e refletem a necessidade de se pensar medidas de caráter não-estrutural como concepção de drenagem urbana.

A bacia do Una possui permeabilidade de solo de 18,66% médios e declividade de sítio de 1,80%. Tais parâmetros são, respectivamente, inferiores aos mínimos tecnicamente desejáveis para ambas as situações; permeabilidades em torno de 25% (segundo o diagrama de Schueler) e declividades de terreno entre 2,5% e 5% seriam desejáveis (ARAÚJO; ALMEIDA; GUERRA, 2008). Sua extensão total de sistema viário é de 466 km, representando uma capilaridade de sistema viário (MASCARÓ, 2005) de 0,13 quilômetros de via por hectare urbanizado (km/ha), parâmetro considerado médio-baixo para os padrões de assentamento de Belém e, adicionalmente, indicador de custo moderado de implantação e manutenção de infraestrutura urbana. Os dados cartográficos deste trabalho foram baseados no cadastro territorial da Região Metropolitana de Belém, gerado em formato digital shapefile pelo Núcleo de Estudos Urbanos do Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Estado do Pará, IDESP-PA (2012).

6 RESULTADOS

6.1 1ª ETAPA: DEFINIÇÃO DAS MISTURAS DE AGREGADO GRAÚDO DOS CONCRETOS POROSOS.

Os resultados das massas unitárias das misturas de agregados de graduação uniformes e descontínuas são apresentados na Tabela 12. A dispersão dos resultados encontrados de massa unitária para todas as misturas foi muita reduzida, com desvio padrão variando de 3,8 Kg/m³ a 35,2 Kg/m³, que em termos percentuais corresponde ao intervalo de 0,3% a 2,6%. A dispersão de resultados considerada aceitável para massa específica seca do concreto endurecido é de ± 80 kg/m³ (TENNIS *et al* 2014 e ABNT, 2015). Extrapolando esta tolerância de variabilidade para a massa unitária, conclui-se que a execução deste ensaio foi satisfatória extremamente uniforme.

Na literatura são escassos os relatos a respeito de otimização da massa unitária do esqueleto granular como pré-requisito para a definição das dosagens de concretos porosos. O que normalmente se observa é o estabelecimento de uma massa unitária pré-fixada e posteriormente são produzidas as misturas de concreto poroso. O programa experimental deste trabalho difere da literatura, pois foi realizada uma análise prévia da massa unitária de modo a otimizar a dosagem do concreto poroso com vistas a obter os maiores valores de massa unitária. O programa experimental baseou-se nos trabalhos desenvolvidos por (CASTRO, et al., 2009; SOUZA e CARVALHO, 2016).

Tabela 12: misturas do Agregado Graúdo – Valores de Caracterização.

	MISTURA	FAIXA GRANULOMÉTRICA mm	PROPORÇÕES ENTRE FRAÇÕES %	VAZIOS %	MASSA UNITÁRIA KG/M ³
MISTURA UNIFORME	U1	19-12,5	100	47,09	1402 \pm 13,9 (\pm 0,99%)
	U2	12,5-6,3	100	49,08	1349 \pm 35,2 (\pm 2,61)
	U3	6,3-2,36	100	49,78	1330 \pm 3,9 (\pm 0,30%)
MISTURA DESCONTÍNUA	D1	12,5-9.5/9.5-6,3	70-30	49,87	1328 \pm 19,1 (\pm 1,43%)
	D2	12,5-9.5/9.5-6,3	50-50	50,27	1317 \pm 6,0 (\pm 0,46%)
	D3	12,5-9.5/9.5-6,3	30-70	49,85	1328 \pm 5,4 (\pm 0,41%)
	D4	6,3-4,75/4,75-2,36	70-30	51,47	1291 \pm 11,5 (\pm 0,89%)
	D5	6,3-4,75/4,75-2,36	50-50	50,52	1311 \pm 3,76 (0,29%)
	D6	6,3-4,75/4,75-2,36	30-70	51,28	1286 \pm 10,18 (\pm 0,79%)

Fonte: Análise laboratorial executada pelo autor com referência normativa na ABNT NBR NM 45:2006, na ABNT NBR 7211:2009 na ABNT NBR NM 248:2003 e ABNT NBR NM 53:2009.

O critério de escolha para a produção de concreto poroso, a partir dos agregados de graduação descontínua, foi a obtenção da maior massa unitária do esqueleto granular dentro de cada um dos dois grupos (I e II). Parte-se da hipótese que quanto maior a massa unitária maior será o contato entre as partículas dos agregados, o que proporcionará maior resistência mecânica. No caso dos agregados de graduação uniforme, não houve critério de escolha, conforme visto no item 5.3. Todas as 03 misturas foram empregadas para a produção dos concretos porosos avaliados na segunda etapa, independentemente da obtenção ou não da maior massa unitária de uma determinada mistura. A adoção deste critério é por conta da facilidade de produção em larga escala das misturas uniformes (ou abertas), pois apenas duas peneiras são empregadas no processo e não há a necessidade de proporcionamento posterior das frações.

Nas misturas uniformes, observou-se que quanto maior o tamanho da partícula do agregado maior foi a massa unitária. Neste caso, as partículas compreendidas entre 12,5mm e 19 mm foram as que proporcionaram maior contato entre os grãos e, conseqüentemente, maior massa unitária. Na ANOVA constata-se que o tamanho da partícula das misturas U1, U2 e U3 é uma variável de controle significativa sobre a massa unitária (Tabela 13). Na CMM (Tabela 14), observa-se que a mistura U1 (19mm-12,5mm), com partículas de maior tamanho, apresentou massa unitária estatisticamente superior as das misturas U2 (12,5-6,3) e U3 (6,3-2,36), ao passo que não houve diferenças significantes entre estas duas últimas, de menores tamanhos de partícula.

Tabela 13: ANOVA: Massa unitária das misturas uniformes.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcal	Ftab
Entre Grupos (Dimensão da partícula)	8.253,71	2	4.126,86	8,53	4,46
Dentro do Grupo (Residual)	2.901,93	6	483,65		
Total	11.155,64	8			

SQ: soma quadrada; GDL: grau de liberdade; MQ: média quadrada; Fcal: fator calculado; Ftab: fator crítico tabelado

Fonte: Análise estatística dos resultados executada pelo autor.

Tabela 14: Comparação de Múltiplas Médias – Misturas Uniformes.

Limite de Decisão	Grupos	Diferenças	Significância
38,09152	U1 - U3	71,51	DS
	U2 - U3	18,67	DNS
	U1 - U2	52,84	DS

DS: diferença significativa; DNS: diferença não significativa

Fonte: Análise estatística dos resultados executada pelo autor.

Quanto aos agregados de graduação descontínua, no grupo I, cujas composições empregaram os maiores tamanhos de partículas (12,5 – 6,3mm), não houve diferenças significativas de massa unitárias entre as misturas (Tabela 15). Em virtude disto, o critério de escolha baseou-se no melhor acabamento proporcionado pela mistura com maior percentual de agregados de menor tamanho, no caso, a mistura D3, com 30% de material passante na 12,5mm e retido na 9,5mm e 70% de material passante na 9,5mm e retido na 6,3mm (Figura 25).

Tabela 15: ANOVA: Massa unitária do Grupo 1, Misturas descontínuas.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcal	Ftab
Entre Grupos (Dimensão da partícula)	235,87	2	117,94	0,82	2,66
Dentro do Grupo (Residual)	858,39	6	143,07		
Total	1094,26	8			

SQ: soma quadrada; GDL: grau de liberdade; MQ: média quadrada; Fcal: fator calculado; Ftab: fator crítico tabelado

Fonte: Análise estatística dos resultados executada pelo autor.

Figura 25: Misturas descontínuas do Grupo I, D1, D2 e D3.



Fonte: Registro fotográfico do Autor.

No grupo II das misturas descontínuas, com menores tamanho de partículas (6,3mm – 2,36mm), houve diferenças significativas de massas unitárias entre as misturas, Tabela 16. Neste caso, a mistura D5, que possui um percentual de 50% de material passante na 6,3mm e retido na 4,5mm e 50% de material passante na 4,5mm e retido na 2.36mm, foi a que apresentou a maior massa unitária, sendo portanto escolhida dentro do grupo II, Tabela 17.

Tabela 16: ANOVA: Massa unitária do Grupo 2, Misturas descontínuas.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcal	Ftab
Entre Grupos (Dimensão da partícula)	1.071,82	2	535,91	6,43	2,66
Dentro do Grupo (Residual)	500,24	6	83,37		
Total	1.572,05	8			

SQ: soma quadrada; GDL: grau de liberdade; MQ: média quadrada; Fcal: fator calculado; Ftab: fator crítico tabelado

Fonte: Análise estatística dos resultados executada pelo autor.

Tabela 17: Comparação de Múltiplas Médias, misturas descontínuas Grupo 2.

Limite de Decisão	Grupos	Diferenças	Significância
18,42978929	D4-D5	20,25	DS
	D4-D6	4,99	DNS
	D5-D6	25,24	DS

DS: diferença significativa; DNS: diferença não significativa

Fonte: Análise estatística dos resultados executada pelo autor.

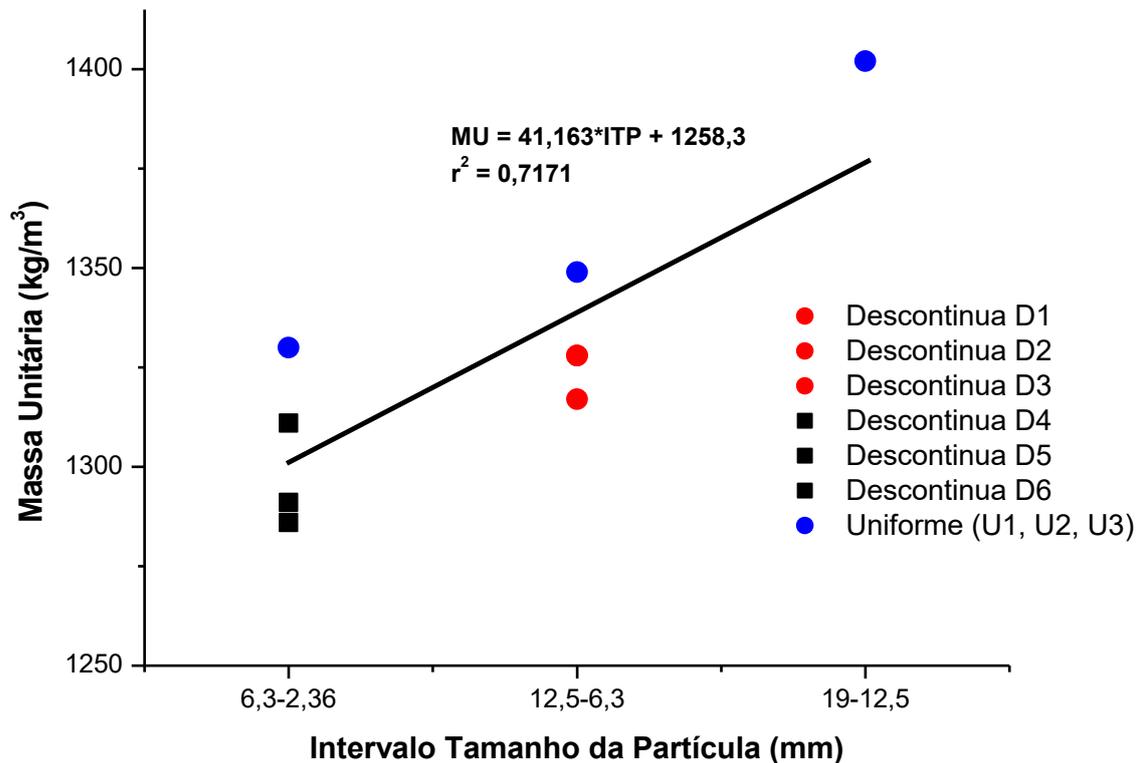
De modo geral, tanto nas misturas uniformes quanto nas descontínuas, a tendência foi a diminuição da massa unitária para tamanho menores de partículas (Figura 26). Huang *et al* (2010) também constataram uma relação direta entre a dimensão do agregado graúdo e a massa unitária. Souza *et al* (2016) observaram para misturas com seixos de cava seca, usualmente empregados na RMB, massas unitárias mais elevadas para percentuais maiores de partículas de maior tamanho. Verçosa (1987), ao investigar diversas areias no Estado do Rio Grande do Sul relata que as areias mais finas tendem a apresentar maior índice de vazios, conseqüentemente, menor massa unitária. Bhutta *et al* (2012) também observaram uma correlação direta entre a massa unitária e o tamanho da partícula para a produção de concretos porosos de alto desempenho. Em contrapartida, Park e Tia (2004) obtiveram massas unitárias mais elevadas para agregados de menor tamanho: 1.504 kg/m³ e 1488 kg/m³ para graduações entre 5 e 10mm e 10 e 20mm, respectivamente. A Tabela 18 mostra um comparativo dos resultados deste programa experimental com os diversos trabalhos encontrados na literatura.

Tabela 18: Massa Unitária do Agregado Graúdo – Valores de Caracterização.

	MISTURA	FAIXA GRANULOMÉTRICA mm	PROPORÇÕES ENTRE FRAÇÕES %	MASSA UNITÁRIA Kg/m ³			
AUTOR	U1	19-12,5	100	1402	MAIOR A DIMENSÃO DO AGREGADO MAIOR A MASSA UNITÁRIA		
	U2	12,5-6,3	100	1349			
	U3	6,3-2,36	100	1330			
	D1	12,5-9.5/9.5-6,3	70-30	1328			
	D2	12,5-9.5/9.5-6,3	50-50	1317			
	D3	12,5-9.5/9.5-6,3	30-70	1328			
	D4	6,3-4,75/4,75-2,36	70-30	1291			
	D5	6,3-4,75/4,75-2,36	50-50	1311			
	D6	6,3-4,75/4,75-2,36	30-70	1286			
Bhuta, et al. (2012)	Nº5	13-20	100	1500	MAIOR A DIMENSÃO DO AGREGADO MAIOR A MASSA UNITÁRIA		
	Nº6	5-13	100	1398			
	Nº7	2,5-5	100	1390			
Huang, et al. (2010)	PCM 1	12,5	100	1426		MAIOR A DIMENSÃO DO AGREGADO MAIOR A MASSA UNITÁRIA	
	PCM 2	9,5	100	1393			
	PCM 3	4,75	100	1374			
Sumanasooriya & Neithalath (2001)	3/8	12,5-9,5	100	1307			MAIOR A DIMENSÃO DO AGREGADO MAIOR A MASSA UNITÁRIA
	#4	9,5-4,75	100	1285			
	#8	4,75-2,36	100	1263			
Park e Tia (2004)	1	10-20	100	1488	MAIOR A DIMENSÃO DO AGREGADO MENOR A MASSA UNITÁRIA		
	2	5-10	100	1.504			
Torres, et al (2015)	1	9,54	100	1442			
	2	6,35	100	1458			

Fonte: Dados da literatura de referência e análise dos resultados executada pelo autor

Figura 26: Relação entre o tamanho da partícula versus Massa Unitária.

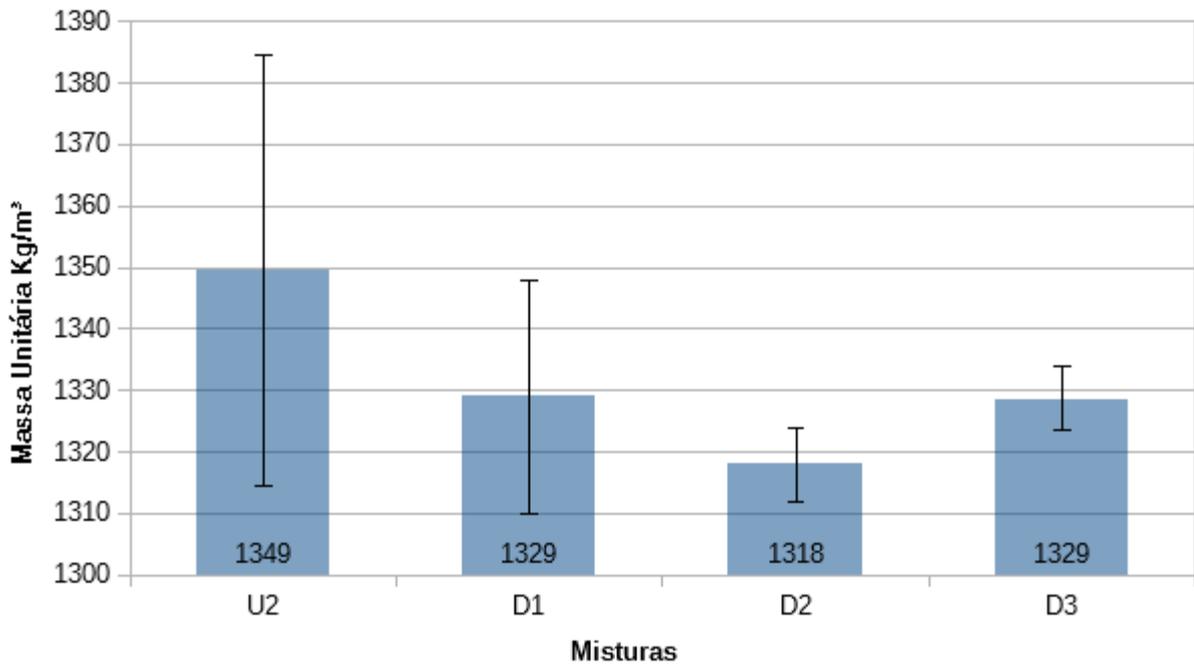


Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Os resultados de correlação direta da massa unitária com o tamanho da partícula apresentaram concordância com grande parte da literatura. Acredita-se que as divergências com alguns relatos da literatura sejam por conta das diferentes características dos agregados empregados nas pesquisas, com diferentes distribuições granulométricas, forma e a textura das partículas (NEVILLE, 1997).

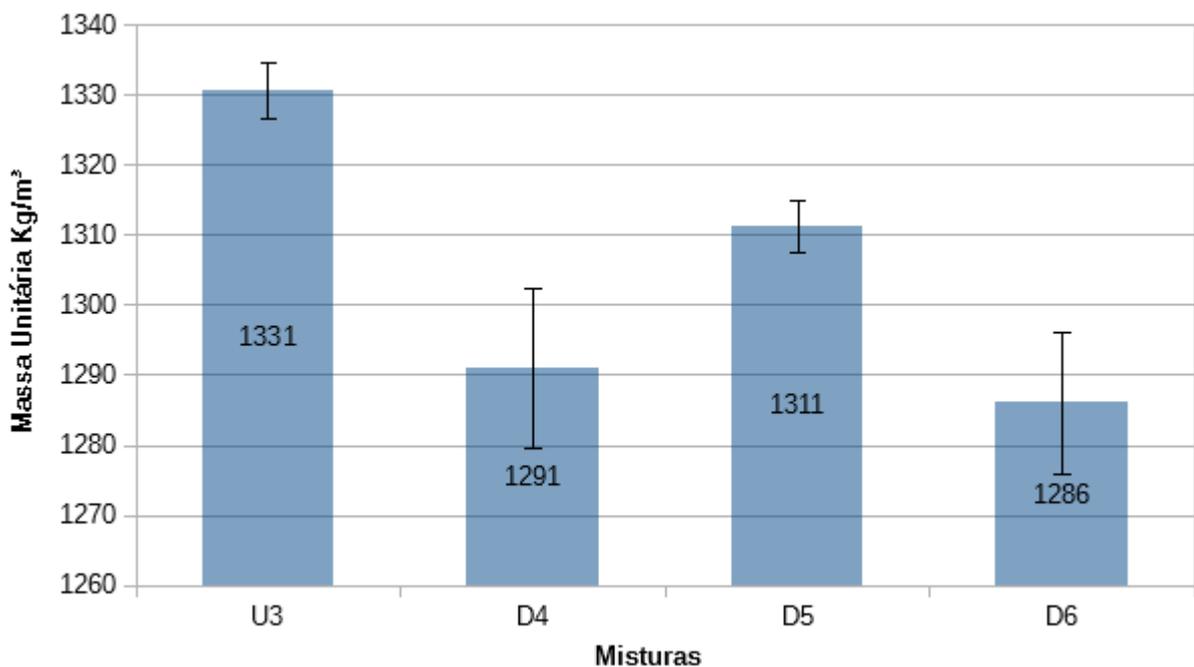
As misturas uniformes de agregados apresentaram massas unitárias superiores as das descontínuas. Nas Figura 27 e Figura 28 são mostrados os comparativos entre os agregados de graduação descontínua do grupo I e II, respectivamente, com a mistura de graduação uniforme equivalente em termos de tamanho de partícula.

Figura 27: Grupo 1- Relação entre o tamanho da partícula versus Massa Unitária.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Figura 28: Grupo 2- Relação entre o tamanho da partícula versus Massa Unitária.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Neste trabalho, efetivamente a diferença entre os agregados é que nos de graduação aberta ou uniforme, as proporções entre partículas não são controladas, dependendo do plano de clivagem da rocha e das características do equipamento de britagem empregado; ao passo que nos de graduação descontínua, há o controle efetivo dos percentuais dos diferentes tamanhos de partículas. Os percentuais propostos de 70-30%, 50-50% e 30-70% entre frações para as misturas descontínuas não proporcionaram um entrosamento melhor entre partículas do que o das misturas uniformes. Na mistura U2, as partículas são oriundas da brita 1, cuja proporção proveniente do britador foi de 83% e 17% para as frações de 12,5mm-9,5mm e 9,5mm-6,3mm, respectivamente. Para a mistura U3, as partículas são oriundas da brita 0, cuja proporção proveniente do britador foi de 20% e 80% entre as respectivas frações de 6,3mm-4,5mm e 4,5mm-2,36mm.

Outro aspecto importante a ser relatado é o comparativo com os resultados obtidos por Souza *et al* (2016). As misturas com seixos apresentaram massas unitárias mais elevadas que as de brita, na ordem de 1.526 a 1.574kg/m³ em comparação a 1.286 e 1.402 kg/m³. Segundo Neville (1997), a massa unitária depende da distribuição de tamanho e da forma das partículas. Como em ambos os trabalhos o efeito da distribuição de tamanho é reduzida em razão da pouca variação entre a menor e a maior partícula, atribui-se a esta diferença em relação ao seixo à forma da brita estudada, que possui partículas alongadas e lamelares. A Figura 29 mostra a presença de partículas lamelares da brita tanto nas frações maiores quanto nas menores.

Figura 29: Partículas lamelares e alongadas da brita granítica de Tracuateua.



a) Fração maior

b) fração menor

Fonte: Registro Fotográfico do Prof. Dr. Marcio Barata.

O seixo, por possuir partículas sub-arredondadas a arredondadas, possibilita o maior contato entre os grãos, ou seja, maior entrosamento entre as partículas, enquanto que a brita estudada, com partículas alongadas e lamelares, com índice de forma superior a 3,0, Leão e Oliveira, (2001), dificulta a acomodação de forma mais homogênea entre as partículas. Shergold (1957) apud Neville (1997), constatou que agregados com maior angulosidade acarretam em maior índice de vazios. Neville (1997) cita que agregados com partículas equidimensionais são preferíveis em relação aos com partículas alongadas ou achatadas visto que possuem menor área superficial específica, acomodando-se de forma mais isotrópica. Portanto, a brita empregada na RMB, por possuir partículas menos equidimensionais que o seixo de cava, que se reflete em menor área superficial específica e conseqüentemente, menor quantidade de pontos de contato, proporcionou massas unitárias inferiores ao esqueleto granular dos concretos porosos, com maiores índices de vazios. Resultados semelhantes foram observados por Kevern (2014) quando estudou concretos porosos com brita de quartzito e seixo de quartzo. A diferença entre as massas unitárias foi elevada, com 1.280 kg/m³ para a brita e 1.620 kg/m³ com seixo.

Em suma, as massas unitárias, independentemente do tipo de graduação do agregado, foram maiores para britas de maior tamanho de partículas. As misturas uniformes ou abertas apresentaram maiores massas unitárias em comparação as de graduação descontínua. No caso das misturas de brita de graduação aberta, todas as três (U1, U2 e U3) foram empregadas para a produção do concreto poroso. Nas misturas de graduação descontínua do grupo I, constituído das partículas de maior tamanho (12,5mm-6,3mm), a escolha recaiu sobre a mistura D3, por ser constituída das menores partículas, o que proporcionou melhor acabamento da superfície do concreto. Nas do grupo II, a D5 foi empregada por apresentar maior massa unitária. As massas unitárias das britas foram inferiores as com seixo em razão da presença de partículas lamelares e alongadas, que dificultam uma acomodação mais isotrópica, com menor número de pontos de contato entre os grãos.

6.2 2ª ETAPA: PROPRIEDADES DO CONCRETO POROSO.

6.2.1 PROPRIEDADES NO ESTADO PLÁSTICO.

MASSA ESPECÍFICA APARENTE - ρ_{ap} .

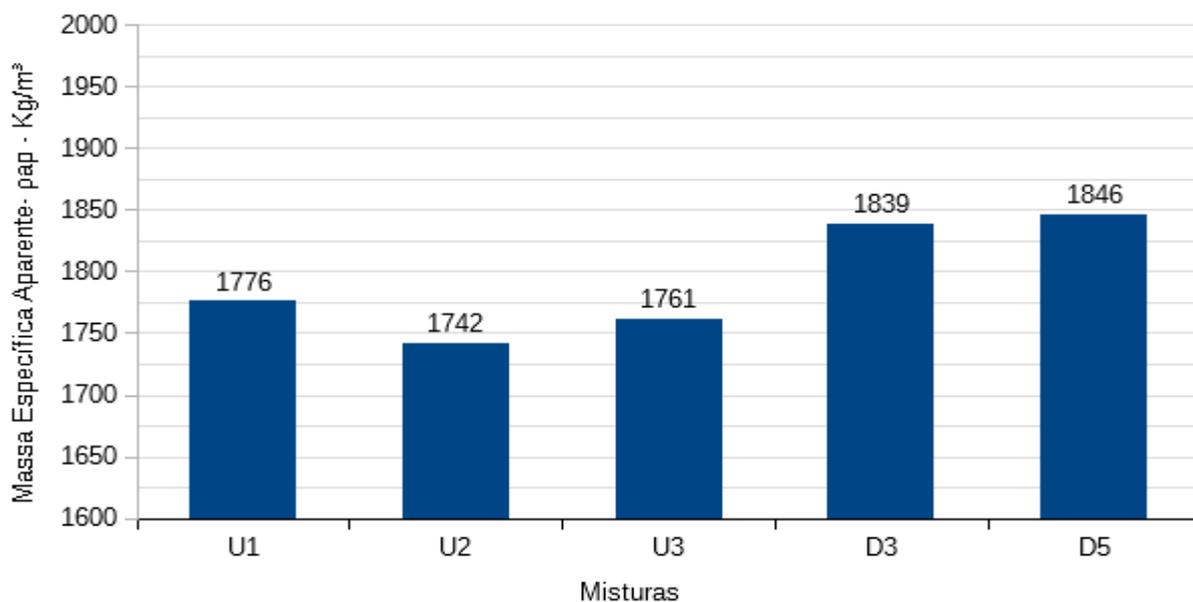
Na Tabela 19 e Figura 30 são apresentadas as massas específicas aparentes no estado fresco dos concretos porosos. As massas específicas aparentes dos concretos porosos variaram entre 1.742 a 1.846 kg/m³, sendo superiores a 1.600 kg/m³, o que atende ao valor mínimo prescrito tanto pela norma ABNT NBR 16146 (ABNT, 2015) quanto pelo ACI 522R-10 (ACI, 2010) e dentro do intervalo de 1.300 e 2.000 kg/m³ sugerido por (TENNIS, et al., 2004).

Tabela 19: Massa Específica Aparente.

MISTURA	FAIXA GRANULOMÉTRICA (mm)	MASSA ESPECÍFICA APARENTE: ρ_{ap} (Kg/M ³)
U1	19-12,5 (100%)	1776
U2	12,5-6,3 (100%)	1742
U3	6,3-2,36 (100%)	1761
D3	12,5-9.5/9.5-6,3 (30%-70%)	1839
D5	6,3-4,75/4,75-2,36 (50%-50%)	1846

FONTE: Análise de resultados executada pelo autor.

Figura 30: Relação entre o tamanho da partícula versus Massa Específica Aparente.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

As massas específicas aparentes dos concretos porosos obtidos das misturas descontínuas foram ligeiramente superiores aos das uniformes, em cerca de 5%, diferentemente do que foi observado para as massas unitárias. Partia-se da hipótese que haveria uma correlação direta entre a massa unitária dos esqueletos granulares e as correspondentes massas específicas

aparentes dos concretos porosos. Acredita-se que a energia de compactação empregada no ensaio (25 golpes por camada, no total de duas) tenha sido o fator determinante para este comportamento, visto que o consumo de cimento e a proporção agregado graúdo/cimento são muito semelhantes para todos os concretos. Nos concretos porosos de agregados de graduação descontínua houve por conta da energia de compactação, um maior empacotamento das partículas através do preenchimento mais efetivo dos vazios pelos agregados de menor dimensão.

As massas específicas aparentes dos concretos porosos variaram entre 1.742 e 1.846 kg/m³, inferiores aos valores encontrados por Castro et al (2009), na ordem de 1.700 a 2.100 kg/m³. Esta diferença é atribuída aos procedimentos de moldagem e compactação dos corpos de prova. No trabalho de Castro *et al* (2009) foi empregado o rolo cilíndrico manual, ao passo que nesta pesquisa a compactação foi realizada através de 25 golpes manuais por camada. Acredita-se que a diferença esteja na energia de compactação aplicada em cada processo. No caso, a energia proporcionada pelo rolo cilíndrico foi superior à dos golpes através da haste metálica. Bonicelli et al (2015) atribuem a grande diversidade de resultados dos concretos porosos aos vários procedimentos de compactação (rolo cilíndrico manual, rolo de chapa lisa mecanizado, placa vibratória, associação entre estes, entre outros), aos números de passadas, ao tempo de compactação, entre outras variáveis inerentes às aplicações do concreto poroso. Exemplificando, concretos porosos, executados com parâmetros de dosagem e materiais idênticos, podem apresentar comportamentos distintos, dependendo da energia de compactação aplicada na obra. De acordo com Schaefer et al (2006), as propriedades mecânicas e de permeabilidade são fortemente influenciadas pela energia de compactação aplicada.

Para ratificar a hipótese da energia de compactação, vale mencionar os trabalhos de Batezini (2013) e Batezini et al (2015), nos quais foram empregados diferentes procedimentos de compactação de concretos porosos, resultando em valores distintos de massa específica aparente. Quando foi empregado o procedimento de compactação por meio de haste metálica, as massas unitárias obtidas variaram de 1.421 a 1561 kg/m³, enquanto que ao empregar energia através de golpes com martelo de borracha sobre a superfície de placa de neoprene, os valores ficaram entre 1.762 e 1.887 kg/m³.

Em suma, a energia de compactação se configura como um parâmetro importante nas propriedades do concreto poroso, visto que alterou a tendência de reprodução de valores mais elevados de massa específica para concretos porosos com agregados de graduação uniforme (aberta).

6.2.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO.

MASSA ESPECÍFICA SECA - ρ_s .

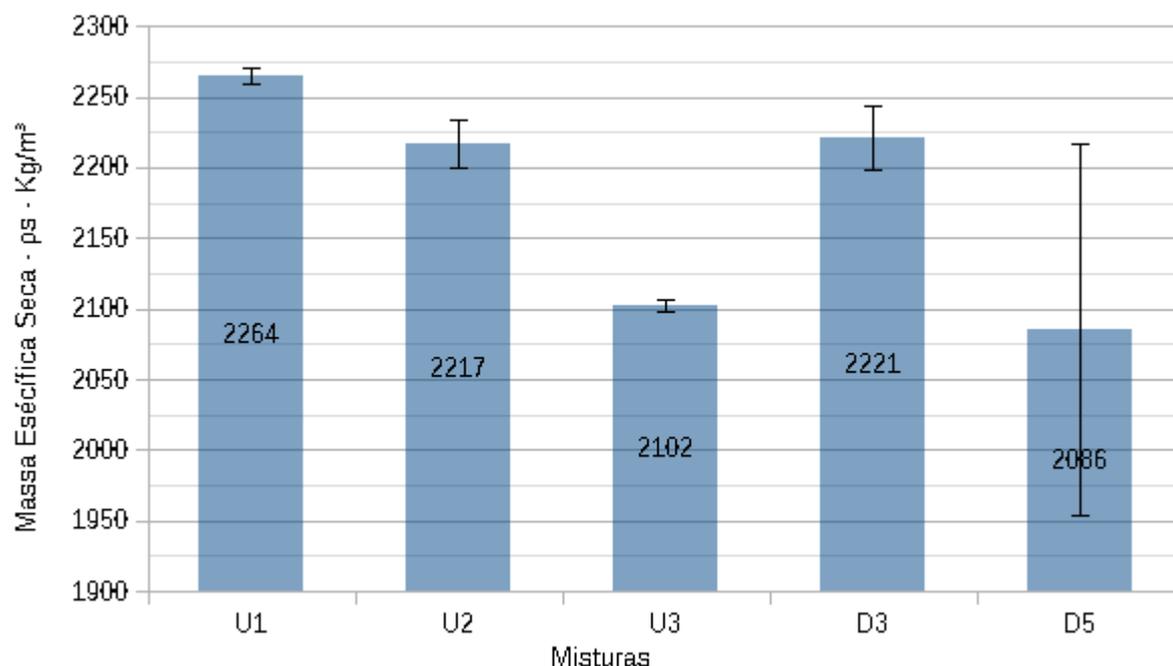
Os resultados das massas específicas secas dos concretos porosos são apresentados na Tabela 20 e na Figura 31. A dispersão dos resultados encontrada foi reduzida, com desvio padrão variando de 4,11 Kg/m³ a 23,1 Kg/m³ e coeficientes de variação de 0,19% a 1,04%. A exceção ficou por conta da mistura D5, cujo desvio padrão foi de 131 kg/m³, valor superior a ± 80 kg/m³, recomendado pelas normas ABNT NBR 16416 (ABNT, 2015a), ACI 522R-10 (ACI, 2010) e por Tennis *et al* (2004). De modo geral, houve uma qualidade na produção dos corpos de prova em razão dos baixos desvios padrões encontrados.

Tabela 20: Massa Específica Seca.

MISTURA	FAIXA GRANULOMÉTRICA (mm)	MASSA ESPECÍFICA SECA: ρ_s (Kg/M ³)
U1	19-12,5 (100%)	2.264 $\pm 5,56$ (0,24%)
U2	12,5-6,3 (100%)	2.217 $\pm 16,75$ (0,75 %)
U3	6,3-2,36 (100%)	2.102 $\pm 4,11$ (0,19%)
D3	12,5-9.5/9.5-6,3 (30%-70%)	2.221 $\pm 23,10$ (1,04%)
D5	6,3-4,75/4,75-2,36 (50%-50%)	2.086 $\pm 131,36$ (6,30 %)

FONTE: Análise de resultados executada pelo autor.

Figura 31: Massa Específica Seca.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

As massas específicas secas dos concretos porosos variaram entre 2.086 a 2.264 kg/m³, consideradas elevadas para concretos porosos, visto que a grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura apresentam massas específicas de concreto poroso inferiores a 2.000 kg/m³ (BATEZINI, 2013), (BATEZINI, et al., 2016), (BONICELLI, et al., 2015), (BRAKE, et al., 2016), (LIAN e ZHUGE, 2010), (LIAN, et al., 2011) e (YANG e JIANG, 2003). Outros pesquisadores também obtiveram massas específicas secas superiores a 2.000 kg/m³, (BRAKE, et al., 2016), (ĆOSIC, et al., 2015), (CASTRO, et al., 2009), (LIAN e ZHUGE, 2010), (LIAN, et al., 2011) e (YANG e JIANG, 2003). Valores superiores a 2.000 kg/m³ também são observados em diversas publicações, entretanto, incorporando percentuais entre 5% e 20% de agregado miúdo na mistura de concreto, o que aumenta a densidade da mistura, aproximando-a do concreto normal (ĆOSIC, et al., 2015), (BONICELLI, et al., 2015), (LIAN e ZHUGE, 2010), (LIAN, et al., 2011) e (YANG e JIANG, 2003). De modo geral, a massa específica seca do concreto poroso é na ordem de 25% inferior dos valores característicos do concreto convencional entre 2.400 e 2.500 kg/m³. A Tabela 21 mostra um comparativo de massas específicas secas obtidas neste trabalho com os resultados encontrados na literatura.

Tabela 21: Massa Específica Seca - ρ_s – Valores de Caracterização.

	MISTURA	FAIXA GRANULOMÉTRICA mm	PROPORÇÕES ENTRE FRAÇÕES %	MASSA ESPECÍFICA SECA - ρ_s	AREIA %
AUTOR	U1	19-12,5	100	2264	0
	U2	12,5-6,3	100	2217	0
	U3	6,3-2,36	100	2102	0
	D3	12,5-9.5/9.5-6,3	30-70	2221	0
	D5	6,3-4,75/4,75-2,36	50-50	2086	0
Ćosic, et al., 2015	M1	0-4/4-8/8-16	40-30-30	2442	0
	M2	4-8/8-16	60-30	2095	10
	M3	4-8/8-16	60-30	2435	10
	M4	4-8/8-16	30-60	2077	10
	M5	4-8/8-16	30-60	2077	10
Bonicelli, et al., (2015)	A	3-6/6-10	80-20	1880	0
	B	3-6/6-10	80-20	1860	0
	C	3-6/6-10	80-20	1930	0
	A5	3-6/6-10	80-20	1940	5
	B5	3-6/6-10	80-20	1940	5
	C5	3-6/6-10	80-20	1950	5
	A10	3-6/6-10	80-20	2010	10
	B10	3-6/6-10	80-20	2060	10
	C10	3-6/6-10	80-20	2010	10
Brake, et al., (2016)	N	10	100	1855	0
	H	10	100	2228	0
Batezini (2013)	M1	9,5-6,3	100	1851	0
	M2	9,5-6,3/6,3-4,8	50-50	1851	0
	M3	12,5-9,5/9,5-6,3/6,3-4,8	30-40-30	1841	0
Batezini, et al., (2016)	RB	9,5-6,3	100	1772	0
	RC	9,5-6,3	100	1863	0
	RF	PEDRISCO	100	1724	0
	RG	PEDRISCO	100	1819	0
	RI	PEDRISCO	100	1826	0
	RJ	PEDRISCO	100	1838	0
	RL	PEDRISCO	100	1884	0

	MISTURA	FAIXA GRANULOMÉTRICA mm	PROPORÇÕES ENTRE FRAÇÕES %	MASSA ESPECÍFICA SECA - ρ_s	AREIA %
Castro, et al., (2009)	1	9,5-2,36	100	2000	0
	2	9,5-2,36	100	2010	0
	3	9,5-2,36	100	2030	0
	4	9,5-2,36	100	2050	0
	5	9,5-2,36	100	2060	0
	6	9,5-2,36	100	2090	0
	7	9,5-2,36	100	2100	0
Lian e Zhuge (2010)	B2	9,5-4,75	100	1926	0
	B4	9,5-4,75	100	2012	0
	B5	9,5-4,75	100	2079	0
	B9	9,5-4,75	100	2243	18
	B10	9,5-4,75	100	2266	18
	B11	9,5-4,75	100	2092	18
Lian, et al., 2011)	1-1	9,5/6,7	100	1831	0
	1-2	9,5-4,75	100	1880	0
	1-3	9,5/6,7	100	2105	0
	1-4	9,5-4,75	100	1960	0
	1-5	13,2-4,75	100	1940	0
	1-6	9,5/6,7	100	1895	0
	1-7	9,5-4,75	100	1920	0
	2-1	9,5-4,75	100	2080	18
	2-2	9,5-4,75	100	2140	18
	2-3	9,5-4,75	100	2240	18
	2-4	9,5-4,75	100	2200	18
	2-5	9,5-4,75	100	2180	18
	2-6	9,5-4,75	100	2200	18
	2-7	9,5-4,75	100	1960	18
Yang e Jiang (2003)	T1	15-30	100	1839	15
	T2	10-20	100	1947	15
	T3	5-10	100	1851	20
	T4	5-10	100	2100	20
	T5	5-10	100	2050	20
	T6	3-5	100	1880	0
	T7	3-5	100	2155	0

Fonte: Dados da literatura de referência e análise dos resultados executada pelo autor

Os elevados valores de massa específica seca são atribuídos à energia de compactação e às características de dosagem dos concretos porosos, mais especificamente à proporção relativa de cada material na mistura. No trabalho, a proporção agregado graúdo/cimento variou entre 3,6 a 3,90, sendo o consumo de cimento de 357 kg/m³ e a relação água/cimento de 0,38 para todas as misturas. A menor proporção entre agregado graúdo e cimento (< 4,0) contribuiu para a elevação da massa específica, uma vez que há um percentual substancial de cimento Portland na mistura, sendo este um material de massa específica mais elevada que a brita. Além disto, a brita de granito empregada possui massa específica alta, em torno de 2,65 kg/m³. Resultado semelhante foi constatado no trabalho de Brake, et al., (2016), que também obtiveram para composições semelhantes massas específicas entre 2.195 a 2.256 kg/m³. Os pesquisadores empregaram proporção agregado graúdo/cimento inferior a 4, no caso 3,77, com consumo de cimento de 370 kg/m³ e relação água/cimento de 0,30. Castro *et al* (2009) estudaram uma ampla gama de misturas de concretos porosos, dentre as quais, composições com relação agregado graúdo/cimento inferiores a 4 e também encontraram resultados de massa específica aparente superiores a 2.000 kg/m³.

Na vasta maioria dos trabalhos científicos a respeito de concreto poroso, as proporções de agregado graúdo/cimento empregadas variam entre 4 a 6,5, o que acarretam em massas específicas secas entre 1.722 a 1.940 kg/m³ (BATEZINI, 2013; BATEZINI, et al., 2016; BONICELLI, et al., 2015; BRAKE, et al., 2016; LIAN e ZHUGE, 2010; LIAN, et al., 2011; YANG e JIANG, 2003). Souza et al (2016), ao produzirem concretos porosos com seixo de cava seca da RMB, encontraram massas específicas secas entre 1.861 e 1.938 kg/m³, com proporções agregado graúdo/cimento de 4,26 e 4,44.

A Tabela 22, apresenta os resultados da ANOVA da massa específica seca, levando em consideração como variável de controle o tipo de mistura, com 05 níveis (U1, U2, U3, D3, D5). Vale ressaltar que não houve distinção da variável de controle por graduação da mistura (uniforme ou descontínua) ou por tamanho da partícula do agregado graúdo (19-12,5mm; 12,5-6,3mm; 6,3-2,36mm). Constatou-se que o tipo de mistura tem efeito significativo sobre a massa específica seca do concreto poroso.

Tabela 22: ANOVA: massa específica seca.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcal	Ftab
Entre Grupos (Mistura)	71.911,00	4	17.977,75	4,96	3,48
Dentro do Grupo (Residual)	36.234,21	10	3.632,42		
Total	108.145,21	14			

SQ: soma quadrada; GDL: grau de liberdade; MQ: média quadrada; Fcal: fator calculado; Ftab: fator crítico tabelado

Fonte: Análise estatística dos resultados executada pelo autor.

Na CMM, Tabela 23, as diferenças significativas de massa específica ocorreram preponderantemente entre concretos porosos com tamanhos de partículas distintas (U_1-U_3 , D_3-D_5 , $U_1 - D_5$, U_2-D_5 , U_3-D_3), independentemente da graduação do agregado ser uniforme ou descontínua. Portanto, o efeito significativo do tipo de mistura sobre a massa específica seca se deve ao tamanho da partícula e não ao tipo de graduação do agregado.

Tabela 23: Comparação de Múltiplas Médias, massa específica seca.

Limite de Decisão	Grupos	Diferenças	Significância	Natureza do Efeito
104,26	U1 - U2	47,51	DNS	T
	U1 - U3	162,18	DS	T
	U2 - U3	114,66	DS	T
	D3 - D5	129,29	DS	T
	U1 - D3	43,00	DNS	G / T
	U1 - D5	172,29	DS	G / T
	U2 - D3	4,51	DNS	G
	U2 - D5	124,78	DS	G / T
	U3 - D3	119,17	DS	G / T
	U3 - D5	10,12	DNS	G

G. Graduação da mistura

T. Tamanho da partícula

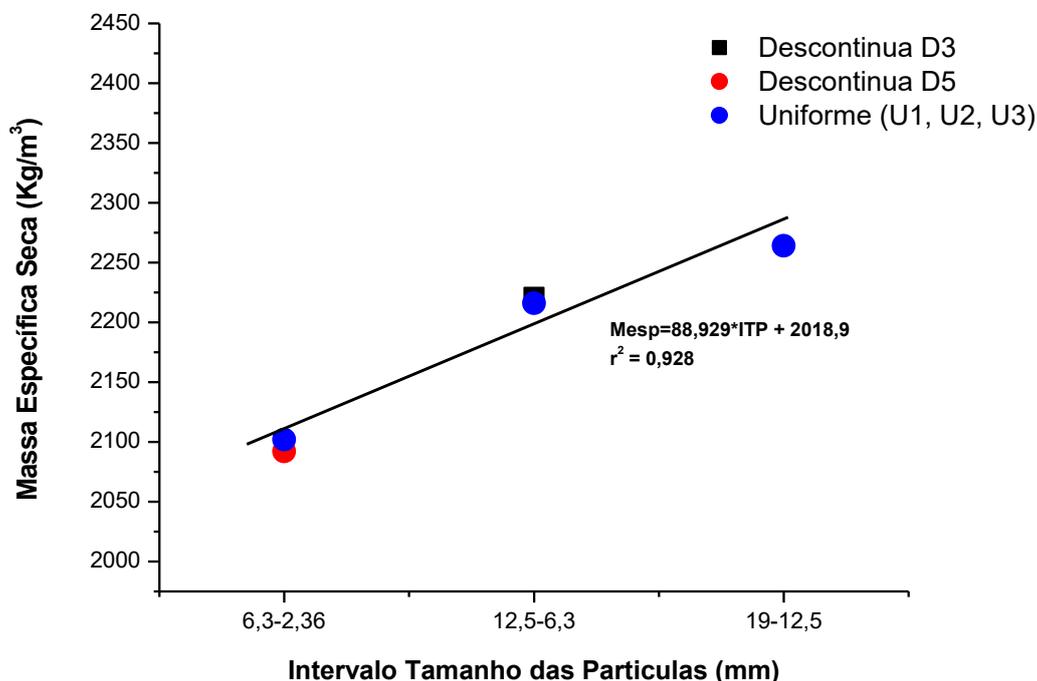
DS. Diferença Significativa

DNS. Diferença não significativa

Fonte: Análise estatística dos resultados executada pelo autor.

A Figura 32, ilustra claramente a tendência bem definida do aumento da massa específica seca dos concretos porosos para tamanhos maiores de partículas de agregados, tal qual foi observado para as massas unitárias dos esqueletos granulares Figura 25. O modelo de regressão linear adotado explica 93% da variabilidade total, o que valida a correlação. É notório também que não há diferenças entre os concretos com graduações distintas de agregados (uniforme e descontínua) para tamanho de partículas entre 12,5-6,3mm e 6,3-2,36mm, conforme observado na CMM.

Figura 32: Massa específica seca versus tamanho das partículas.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Em tese, agregados de menor tamanho proporcionariam maior quantidade de pontos de contatos entre as partículas, em decorrência de uma maior área superficial específica, o que acarretaria em menor percentual de vazios e, conseqüentemente, maiores seriam as massas específicas secas das misturas de concreto poroso. Entretanto, isto não foi observado de forma sistemática na literatura. Cósik *et al* (2015) obtiveram valores mais elevados de massa específica de concretos porosos para composições de agregados de menor tamanho, empregando brita de calcário dolomítico. Lian et al (2011) observaram que não há uma relação bem definida entre massa específica do concreto poroso e o tamanho do agregado. Para britas calcárias, quanto maior o diâmetro do agregado, maior a massa específica, enquanto que para

quartzitos, ocorreu o inverso e para os calcários dolomíticos não se observou uma tendência bem definida. Neste caso, é evidente que outras características da brita diferentemente da dimensão exerceram influência significativa neste comportamento. Segundo Neville (1997), a forma das partículas também interfere no índice de vazios dos agregados

As divergências de resultados tanto nesta pesquisa quanto na literatura se devem às características distintas de cada agregado empregado no concreto poroso, mais precisamente à distribuição granulométrica e à forma dos agregados. A brita empregada na produção dos concretos porosos possui partículas lamelares em todas as frações granulométricas, tanto nas de maior como nas de menor tamanho (LEÃO & OLIVEIRA, 2001). Isto impede a acomodação mais isotrópica dos agregados em todas as misturas de concreto poroso investigadas. As partículas lamelares tendem a se acomodar em um plano preferencial que dificulta o contato entre grãos, aumentando a porosidade. Não há uma tendência de redução do índice de vazios à medida que se reduz o tamanho do agregado porque o arranjo formado pelos planos preferenciais das partículas lamelares se sobrepõe, atribuindo sempre um padrão similar de porosidade para todos os concretos produzidos.

Outro aspecto que pode ter contribuído para este comportamento foi o método de dosagem adotado por Castro et al (2015), que estabelece um volume fixo de pasta para todos os agregados, independentemente do índice de vazios do agregado. De acordo com Torres (2015), quanto maior o volume de pasta, maior será o recobrimento do agregado, conseqüentemente menor será a porosidade e a permeabilidade. No trabalho, como o volume de pasta de cimento para todos os concretos foi fixo (25%), para as misturas com agregados de maior tamanho, ou seja, com menor área superficial específica, menor será a área de cobertura, conseqüentemente, maior a espessura da pasta de cimento envolvendo as partículas. Com isto, menor a porosidade e maior será a massa específica.

Apesar das massas unitárias dos esqueletos granulares das britas terem sido reduzidas, entre 1.286 kg/m^3 e 1.402 kg/m^3 , com percentuais de vazios elevados, entre 47 e 49% (item 6.1), as massas específicas secas dos concretos porosos foram elevadas, entre 2.092 e 2.264 kg/m^3 , que é um aspecto favorável para as resistências mecânicas, conforme abordado no item 6.2.5. Acredita-se que além do traço do concreto, conforme discutido anteriormente, o procedimento de compactação, conforme recomendação do ACI 522-10 (ACI, 2004), tenha contribuído para as elevadas massas específicas secas destes concretos porosos. O que ratifica a importância da energia de compactação nas propriedades mecânicas e de permeabilidade dos

concretos porosos, (BATEZINI, 2013; BATEZINI, et al., 2016; BONICELLI, et al., 2015 e SHAEFER, et al., 2006).

Outro ponto a ser destacado foi a inexistência de correlação entre a massa específica aparente no estado fresco e a massa específica seca no estado endurecido. Isto se deve as diferentes energias de compactação aplicadas para cada tipo de corpo de prova. A massa específica aparente no estado fresco foi determinada a partir de golpes com haste metálica, ao passo que a massa específica seca foi obtida a partir da extração e corte de testemunhos oriundos da confecção de placas compactadas com o rolo cilíndrico de 39 cm de comprimento e densidade de 60 kg/metro. A energia do rolo cilíndrico é muito superior aos golpes da haste metálica, o que repercutiu em acréscimos de 20% da massa específica seca em relação à massa específica aparente no estado fresco. Além disto, a maior energia proporcionou uma massa específica no estado endurecido dos concretos com agregados de graduação aberta ou uniforme superior em comparação às misturas de graduação descontínuas, fato que não ocorreu no estado fresco.

Em suma, as massas específicas secas dos concretos porosos foram elevadas, superiores a 2.000 kg/m³, em decorrência da proporção agregado gráudo/cimento empregada, inferior a 4, e ao procedimento de compactação. A massa específica seca apresentou forte relação direta com o tamanho da partícula do agregado. Quanto maior o tamanho de partículas dos agregados gráudos empregados, maior a massa específica do concreto poroso. A presença de partículas lamelares contribuiu para a ocorrência de planos preferenciais que dificultaram o contato mais efetivo dos grãos do agregado, principalmente os de menor tamanho, aumentando os vazios. Outro ponto que favoreceu este comportamento foi a espessura da pasta de cimento, que para as misturas com agregado de maior tamanho, foi elevado, conseqüentemente, o concreto ficou com menor porosidade e maior massa específica. O tipo de graduação do agregado, uniforme ou descontínua, não exerceu influência na massa específica no estado endurecido do concreto poroso.

6.2.3 ÍNDICE DE VAZIOS TOTAIS - VR.

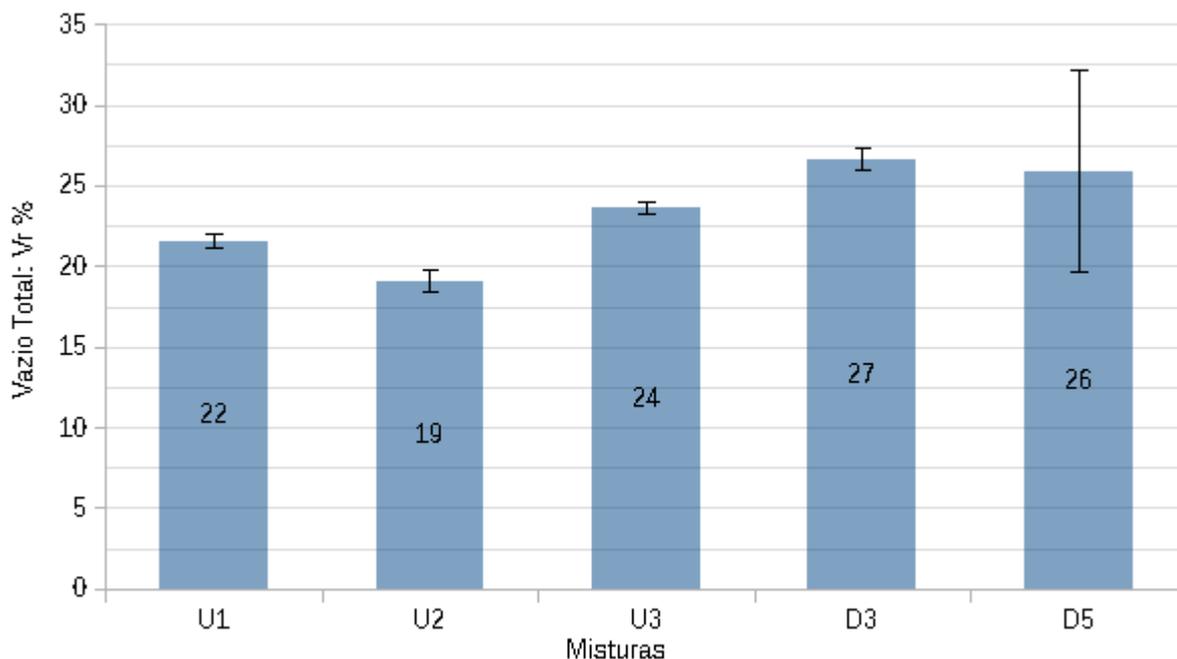
Os resultados dos índices de vazios totais dos concretos porosos são mostrados na Tabela 24 e Figura 33. A dispersão dos resultados encontrados foi reduzida, com desvio padrão variando de 0,36 % a 0,71% e coeficiente de variação no intervalo de 1,52 a 3,58%. A exceção ficou por conta da mistura D5, cujo desvio padrão foi de 6,25% e coeficiente de variação de 24,11%. Assim como observado para a massa específica seca, novamente a mistura descontínua, com menores partículas, apresentou uma dispersão de resultados maior. De modo geral, os baixos desvios padrões traduzem uma maior confiabilidade na interpretação dos resultados.

Tabela 24: Índice de vazios totais.

MISTURA	FAIXA GRANULOMÉTRICA (mm)	ÍNDICE DE VAZIOS: VR (%)
U1	19-12,5 100%	21,55 ± 0,45 (2,08%)
U2	12,5-6,3 100%	19,08 ±0,71 (3,58 %)
U3	6,3-2,36 100%	23,61 ±0,36 (1,52%)
D3	12,5-9.5/9.5-6,3 30%-70%	26,66 ±0,71 (2,66%)
D5	6,3-4,75/4,75-2,36 50%-50%	25,92 ± 6,25 (24,11 %)

FONTE: Análise de resultados executada pelo autor.

Figura 33: Índice de Vazios Totais.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Os índices de vazios totais dos concretos porosos variaram entre 19,9% a 26,7%, faixa considerada aceitável tendo em vista que a porosidade normalmente encontrada na literatura varia entre 15 e 30%. Concretos porosos com índices de vazios inferiores a 15% são considerados de baixa porosidade enquanto que materiais com índices de vazios superiores a 30% se caracterizam como altamente porosos (BATEZINI, 2013). Tennis *et al* (2014) sugerem índices de vazios na ordem de 20% como adequados para garantir uma condição equânime entre resistência mecânica e permeabilidade do concreto poroso. A Tabela 24 apresenta os intervalos medidos de índices de vazios totais disponíveis na literatura.

Tabela 25: Variação do Índice de vazio total.

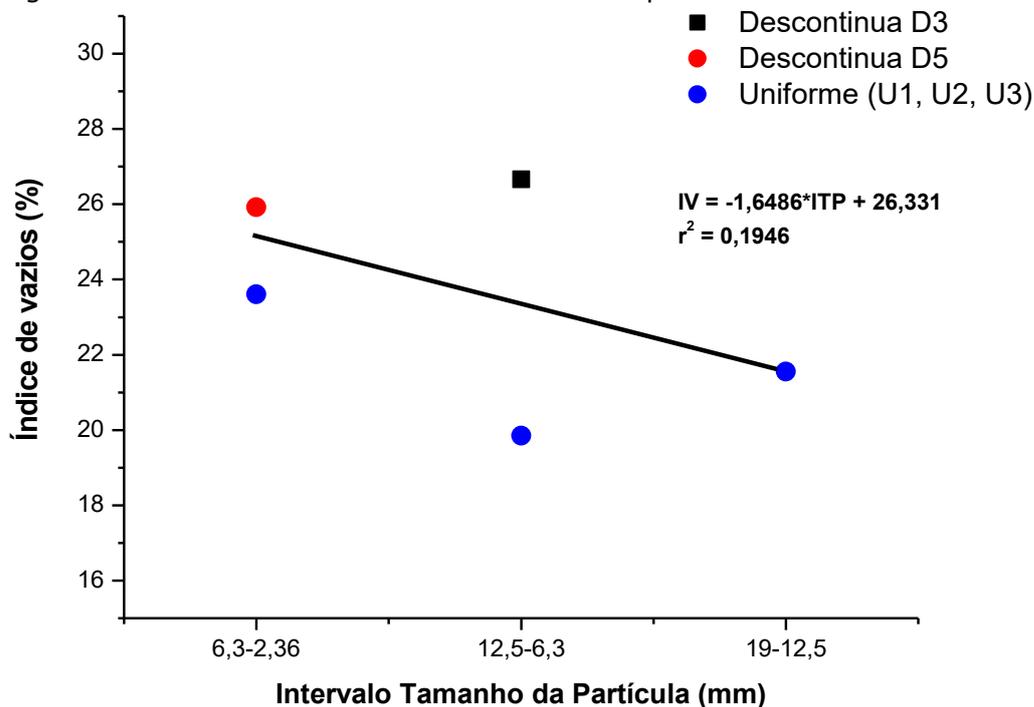
Referência	Variação do Índice de Vazios: Vr (%)
Batezini, et al., 2016	24 A 32
Bhuta, et al., 2012	18 A 30
Bonicelli, et al., 2015	12 A 26
Brake, et al., 2016	17 A 27
Castro, et al., 2009	15 A 27
Ćosic, et al., 2015	14 A 22
Cui, et al., 2015	10 A 27
Deo, et al., 2010	18 A 22
Huang, et al., 2010	27 A 30
Kevern, 2015	17 A 32
Lian e Zhuge, 2010	8 A 17
Lian, et al., 2011	17 A 35
Neithalath, et al., 2006	17 A 25
Shaefer, et al., 2006	11 A 39
Sumanasooriya e Neithalath, 2011	17 A 29
Torres, et al., 2015	18 A 31
Zhong, et al., 2015	17 A 30

Fonte: Dados da literatura de referência tabulados pelo autor.

Os valores entre 19,9% a 26,7% se enquadram no intervalo sugerido por Tennis et al (op.cit), entretanto, são referentes a realidade dos Estados Unidos, com precipitações diárias de 25 mm. Pesquisas futuras direcionadas para as condições particulares de Belém e da região metropolitana são extremamente necessárias para investigar quais os índices de vazios seriam os mais apropriados para médias de precipitações anuais superiores a 3.000 mm e diárias entre 81 e 136 mm (BASTOS, et al., 2002).

A figura 10 mostra que não houve uma correlação significativa entre o índice de vazios e o tamanho da partícula. O reduzido coeficiente de determinação da regressão linear (r^2) prevê apenas 19% das variações explicadas pelo tamanho da partícula. Huang *et al* (2010) também constataram que a graduação e o tamanho das partículas dos agregados (12,5 - 9,5 - 4,75mm) não exerceram influência na porosidade dos concretos porosos, obtendo índices de vazios semelhantes para todos os tipos de concreto, entre 27 e 30%. Comportamentos diferentes foram observados nos trabalhos de Bhutta *et al* (2016) e de Lian e Zhuge (2010), nos quais ficou bastante evidente o decréscimo do índice de vazios com a redução do tamanho da partícula.

Figura 34: Índice de vazios *versus* tamanho da partícula.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

As divergências de resultados das pesquisas se devem as características distintas de cada agregado empregado no concreto poroso, mais precisamente a distribuição granulométrica e a forma dos agregados Shergolg (1957) apud Neville (1997), uma vez que ambas interferem na acomodação das partículas.

Conforme abordado no item 6.1, a brita empregada na produção dos concretos porosos possui partículas lamelares tanto nas frações granulométricas menores quanto nas maiores, com índice de forma superior a 3,0 (LEÃO & OLIVEIRA, 2001). Esta particularidade impede a acomodação mais isotrópica dos agregados em todas as misturas de concreto poroso investigadas. As partículas lamelares tendem a se acomodar em um plano preferencial que dificulta o contato entre grãos, aumentando a porosidade. Isto não favorece a tendência de redução do índice de vazios à medida que se reduz o tamanho do agregado porque o plano preferencial formado pelas partículas lamelares da brita se sobrepõe, atribuindo sempre um padrão similar de porosidade para todos os concretos produzidos.

Outro aspecto que contribuiu para este comportamento foi o estabelecimento de um volume de pasta de cimento igual para todos os concretos (25%). Para as misturas com agregados de menor tamanho, maior será a área superficial específica a ser coberta e consequentemente, menor será a espessura da pasta de cimento envolvendo as partículas, o que acarreta em maior porosidade (TORRES, et al., 2015). Em contraponto, as misturas com agregados de maior tamanho tenderam a apresentar menor porosidade. Estes efeitos contrapostos também reduziram a tendência de menor porosidade para as misturas com partículas menores de agregados, contribuindo para uma mesma magnitude de valores de índice de vazios para todas as misturas.

Os índices de vazios dos concretos porosos com brita foram ligeiramente superiores aos obtidos com seixo de cava seca, cujos valores foram de 20 a 27% em comparação com 22 e 25%, respectivamente (SOUZA et al, 2016). Crouch et al (2006) apud ACI 522-10 (ACI, 2010), afirmam que para um mesmo volume de pasta, o índice de vazios dos concretos porosos depende da energia de compactação, da forma e da textura das partículas dos agregados e do coeficiente de uniformidade do agregado. Como todos os concretos tinham o mesmo volume de pasta e foram moldados com a mesma energia de compactação, atribui-se este comportamento às características da brita estudada. A presença de partículas lamelares e a textura rugosa da brita não permitiram uma acomodação isotrópica das partículas, aumentando o índice de vazios. No concreto com seixo, o fato das partículas deste agregado serem na sua

grande maioria de volume esferoidal e possuírem uma textura lisa, favorece um melhor entrosamento entre os grãos e, conseqüentemente, uma menor porosidade.

A ANOVA demonstrou que o tipo de mistura (U1, U2, U3, D3, D5) exerceu influência ligeiramente significativa sobre o índice de vazios (Tabela 26), contudo, em termos práticos, variações de 19,9% a 26,7% não são expressivas, o que se traduz em valores muito próximos para todos os concretos porosos estudados.

Tabela 26: ANOVA – Índice de vazios totais.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcal	Ftab
Entre Grupos (Mistura)	117,19	4	29,30	3,63	3,48
Dentro do Grupo (Residual)	80,70	10	8,07		
Total	197,89	14			

SQ: soma quadrada; GDL: grau de liberdade; MQ: média quadrada; Fcal: fator calculado; Ftab: fator crítico tabelado

Fonte: Análise estatística dos resultados executada pelo autor.

Na CMM (Tabela 27), as diferenças estatisticamente significativas de índice de vazios que ocorreram foram entre concretos com diferentes graduações de agregado (uniforme e descontínua) e não para diferentes tamanhos de partícula (U1-D3, U2-D3, U2-D5). Na figura 10 é possível identificar os valores mais elevados para os concretos porosos com graduação descontínua dos agregados. Entretanto, essas diferenças na prática são ínfimas, tendo índices de vazios praticamente iguais para todos os concretos porosos produzidos com a brita granítica.

Tabela 27: Comparação de Múltiplas Médias, Índice de vazios totais.

Limite de Decisão	Grupos	Diferenças	Significância	Natureza do Efeito
4,92	U1 - U2	2,47	DNS	T
	U1 - U3	2,06	DNS	T
	U2 - U3	4,53	DNS	T
	D3 - D5	0,74	DNS	T
	U1 - D3	5,11	DS	T/G
	U1 - D5	4,37	DNS	T/G
	U2 - D3	7,54	DS	G
	U2 - D5	6,84	DS	G
	U3 - D3	3,04	DNS	G
	U3 - D5	2,30	DNS	G

G. Graduação da mistura

T. Tamanho da partícula

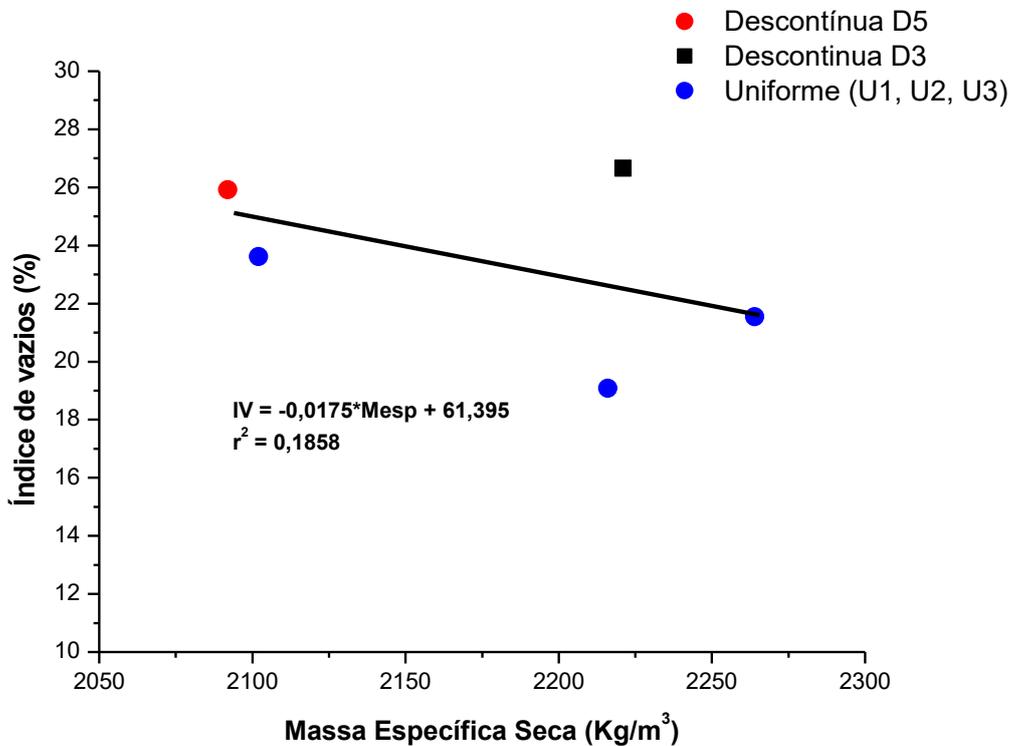
DS. Diferença Significativa

DNS. Diferença não Significativa

Fonte: Análise estatística dos resultados executada pelo autor.

Em tese, quanto maior o índice de vazios menor seria a massa específica do concreto poroso (BATEZINI, 2013; BHUTA, et al., 2012; LIAN e ZHUGE, 2010). Entretanto, a Figura 35 mostra que não houve uma correlação significativa entre o índice de vazios e a massa específica, traduzida pelo coeficiente de correlação (r^2) de apenas 18%. As partículas lamelares da brita, que favorecem a ocorrência de planos preferenciais de acomodação dos grãos, principalmente para os DMC inferiores a 12,5mm, assim como a menor espessura da pasta de cimento, tiveram um efeito mais pronunciado sobre o índice de vazios do que sobre as massas específicas. Este foi o fator responsável pelas fracas correlações entre a massa específica e o índice de vazios, repercutindo em valores similares de índice de vazios para todos os concretos porosos, independentemente da graduação ou tamanho da partícula.

Figura 35: Massa específica seca versus índice de vazios totais.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Em suma, os concretos porosos produzidos com a brita granítica de Tracuateua, sejam de graduação uniforme ou descontínua, sejam com diferentes tamanhos de partículas, apresentaram índices de vazios de mesma ordem de grandeza, entre 20 e 27% e ligeiramente superiores aos dos concretos produzidos com seixo de cava. Os índices de vazios não apresentaram relação com o tamanho da partícula do agregado. Este comportamento é atribuído a dois fatores. O primeiro à presença de partículas lamelares que contribuiu para a ocorrência de planos preferenciais que dificultaram o contato mais efetivo dos grãos do agregado, aumentando os vazios de forma uniforme para todas as misturas, independentemente do tipo de graduação ou tamanho da partícula. O segundo aspecto foi a espessura da pasta de cimento, parâmetro relacionado ao volume de pasta que foi fixado nas dosagens de todos os concretos, independentemente do tamanho da partícula do agregado. No caso, para as misturas com agregado de menor tamanho, a espessura da pasta foi menor e conseqüentemente, apresentaram maior porosidade e menor massa específica, já para as misturas com agregado de maior tamanho, ocorreu o oposto. Em decorrência destes dois aspectos, não se constatou uma forte correlação estatística entre o índice de vazios e a massa específica.

6.2.4 PERMEABILIDADE - K.

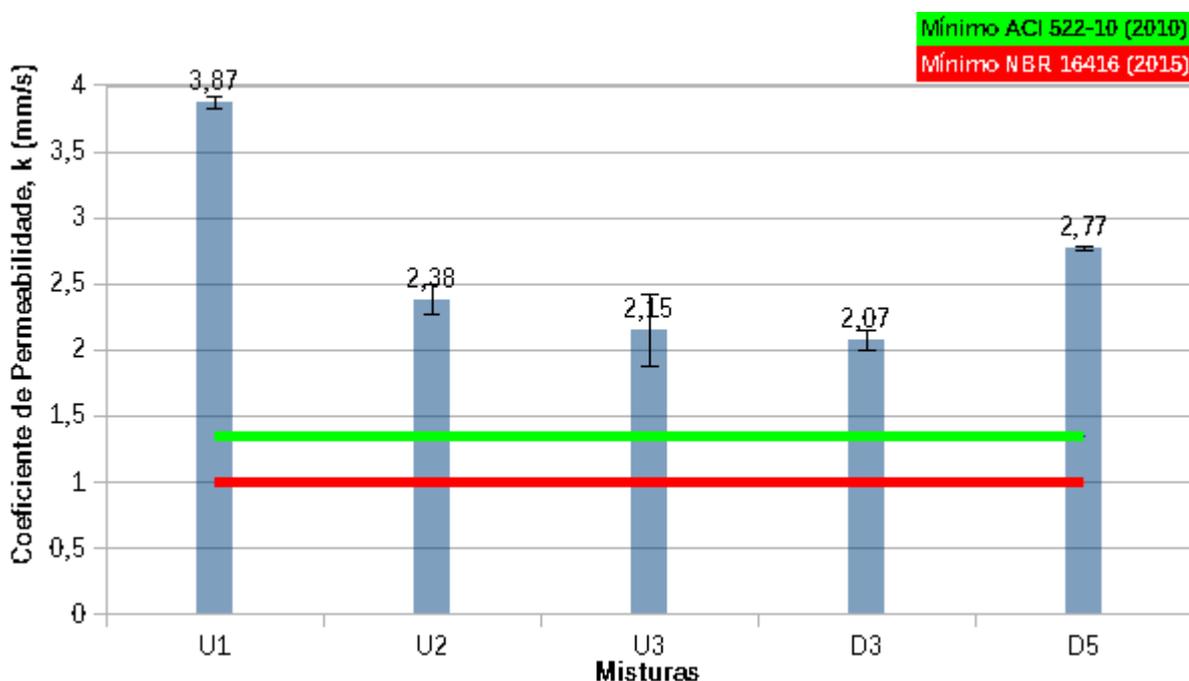
Os resultados dos coeficientes de permeabilidade (k) dos concretos porosos são mostrados na Tabela 28 e Figura 36. A dispersão dos resultados encontrados foi reduzida, com desvio padrão variando de 0,02 a 0,27 mm/s e coeficientes de variação no intervalo de 0,72 a 5,43%. Os baixos desvios padrões traduzem uma maior confiabilidade na interpretação dos resultados.

Tabela 28: Coeficiente de Permeabilidade.

MISTURA	FAIXA GRANULOMÉTRICA (mm)	COEF. PERMEABILIDADE k:(mm/SEG)
U1	19-12,5 100%	3,87 ± 0,0435 (1,12%)
U2	12,5-6,3 100%	2,38 ±0,11 (4,84 %)
U3	6,3-2,36 100%	2,15 ±0,27 (5,43%)
D3	12,5-9.5/9.5-6,3 30%-70%	2,07 ±0,075 (3,62%)
D5	6,3-4,75/4,75-2,36 50%-50%	2,77 ± 0,02 (0,72 %)

Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Figura 36: Coeficiente de Permeabilidade K.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Os coeficientes de permeabilidade dos concretos porosos variaram entre 2,07 mm/s a 3,87mm/s, sendo bastante superiores aos limites mínimos estipulados pela norma ABNT NBR 16416 (ABNT, 2015a) e pelo ACI 522R-10 (ACI, 2010). Os valores elevados de permeabilidade permitem que estes concretos porosos produzidos com brita possam ser empregados como revestimento de pavimentos permeáveis ou na produção de peças pré-moldados de concreto permeável. Tennis *et al* (2014) sugerem coeficientes de permeabilidade entre 2mm/s e 5,4 mm/s. Bhutta *et al* (2016) obtiveram coeficientes de permeabilidade entre 2mm/s a 35mm/s para concretos porosos com graduações de agregados semelhantes ao empregado neste trabalho. De modo geral, os coeficientes de permeabilidade obtidos ficaram dentro da faixa encontrada na grande maioria dos trabalhos da literatura (Tabela 29).

Tabela 29: Comparativos entre referências de Coeficientes de permeabilidade.

Referência	Variação do coeficiente de permeabilidade k mm/s
AUTOR	2,07 a 3,87
Batezini, 2013	1,30 a 1,40
Batezini, et al., 2016	6,45 a 17,88
Bhuta, et al., 2012	2,0 a 35,00
Bonicelli, et al., 2015	0,37 a 9,65
Brake, et al., 2016	2,40 a 8,60
Castro, et al., 2009	2,00 a 9,30
Cui, et al., 2015	0,20 a 1,10
Giustozzi, 2016	18,30 a 31,30
Huang, et al., 2010	10,00 a 20,00
Kevern, 2015	0,56 a 3,89
Lian e Zhuge, 2010	8,51 a 19,87
Shaefer, et al., 2006	0,95 a 1,69
Torres, et al., 2015	4,20 a 16,90
Yang e Jiang, 2003	1,70 a 20,00
Zhong, et al., 2015	0,25 a 6,40

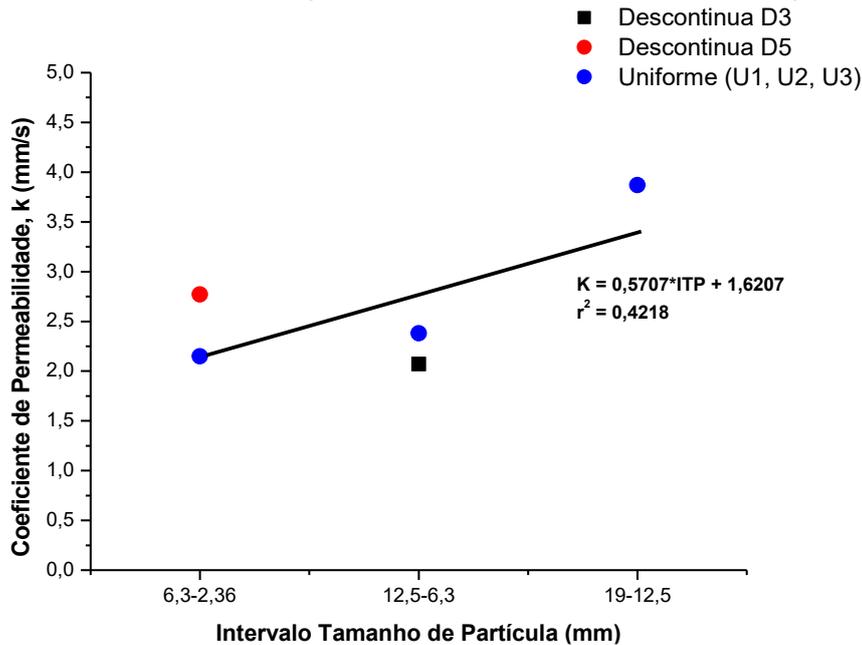
Fonte: Dados da literatura de referência tabulados pelo autor.

A Figura 37 mostra o efeito do tamanho da partícula sobre o coeficiente de permeabilidade para todos os concretos porosos avaliados. Nas misturas de graduação aberta ou uniforme, há uma tendência muito evidente de aumento da permeabilidade para agregados com maior tamanho de partícula, fato este que não foi observado para as misturas de graduação descontínua. Além disto, os concretos com graduação uniforme apresentaram, de modo geral, coeficientes de permeabilidade superiores aos com graduação descontínua.

Em razão deste comportamento distinto entre os tipos de graduação, o coeficiente de determinação da regressão linear de 0,42 não foi satisfatório. Se a correlação for avaliada somente para as misturas uniformes, conforme é mostrado na Figura 38, constata-se nitidamente

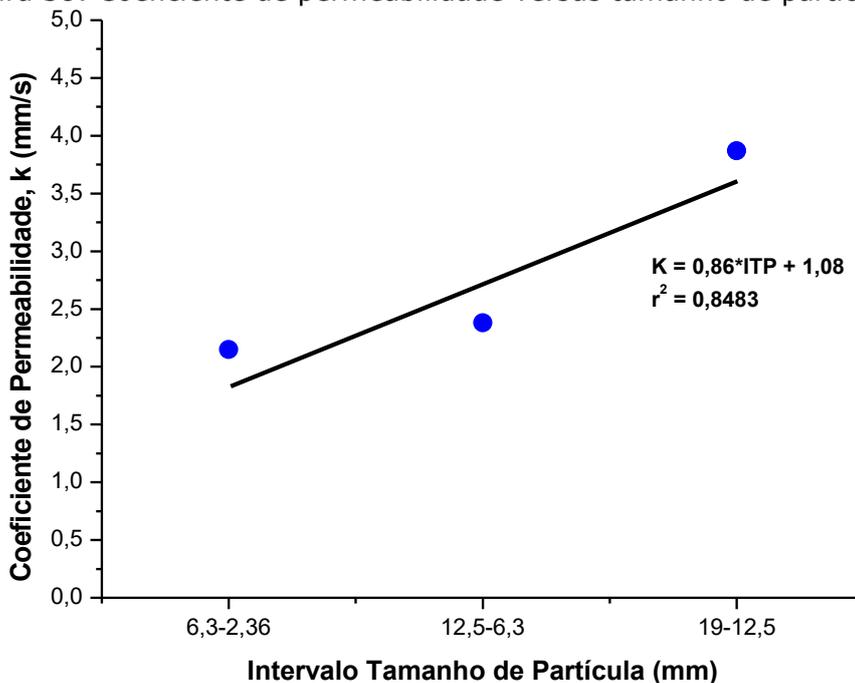
a forte relação entre o tamanho da partícula e a permeabilidade do concreto, comprovado pelo coeficiente de determinação de 0,85. Bhutta *et al* (2012) também constataram a diminuição da permeabilidade a medida que se reduz o tamanho das partículas. Entretanto, Huang et al (2010), avaliando concretos porosos com três tamanhos de partícula (12,5mm, 9,5mm, 4,75mm), não observaram variações nos valores de permeabilidade das três misturas.

Figura 37: Coeficiente de permeabilidade versus tamanho de partícula.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Figura 38: Coeficiente de permeabilidade versus tamanho de partícula: U1-U2-U3.

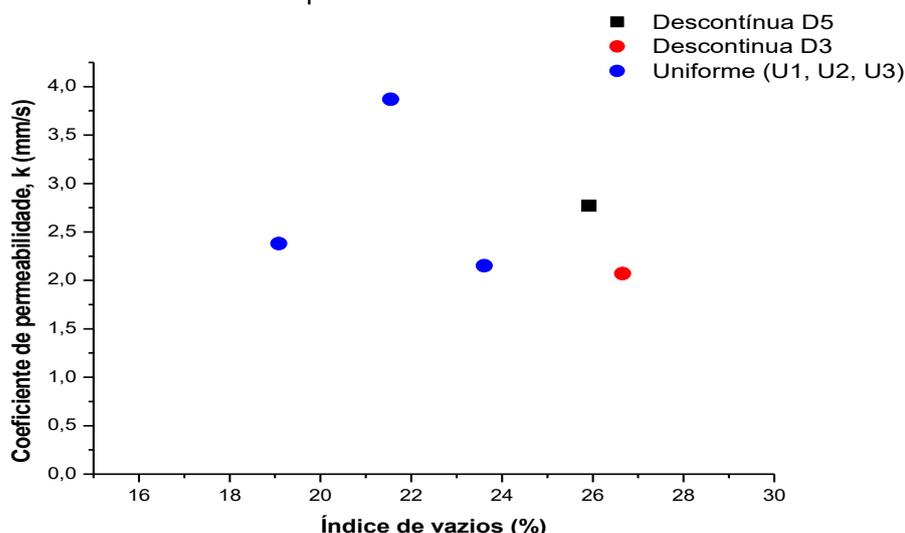


Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Não se observou uma correlação entre a permeabilidade e o índice de vazios, uma vez que foi visto no item 6.2.3 que não há uma tendência de aumento do índice de vazios para agregados de maior tamanho, ao passo que este comportamento foi observado para a permeabilidade. A Figura 39 ratifica que não há qualquer tipo de correlação entre a permeabilidade e o índice de vazios para os concretos produzidos com a brita de Tracuateua. Estes resultados indicam que o coeficiente de permeabilidade não está intimamente relacionado ao índice de vazios totais mas sim a porosidade efetiva. Foram os poros interconectados que proporcionaram maior permeabilidade aos concretos com brita.

De acordo com Montes *et al* (2005) apud Torres, et al., (2015), nem todos os poros são efetivos para permitir o transporte de água, os quais são denominados pelos autores de porosidade inativa, que preferencialmente ocorrem em concretos porosos produzidos com agregados graúdos de menor tamanho (4,75mm). Estes poros de menor tamanho possuem a maior capacidade de aprisionar a água na superfície de suas paredes devido à tensão superficial da água, o que explica o fato de não ter ocorrido uma correlação direta e estatisticamente significativa entre o coeficiente de permeabilidade e o índice de vazios para os concretos estudados (Figura 39), apesar de inúmeros trabalhos na literatura apontarem para a relação direta entre esses parâmetros (BATEZINI, 2013; BHUTA, et al., 2012; CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016 e HUANG, et al., 2010). Em que pese todos os concretos apresentaram índices de vazios totais similares (porosidade total), a porosidade efetiva foi maior para aqueles com partículas de maior tamanho, uma vez que favoreceram a formação de poros mais largos e menos suscetíveis à retenção da água pela tensão superficial.

Figura 39: Coeficiente de permeabilidade *versus* índice de vazios.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

A permeabilidade de concretos porosos é fortemente influenciada pela porosidade e pelo tamanho dos poros. Estruturas de poros de maior diâmetro aumentam a permeabilidade do concreto. A maneira para produzir concretos porosos com tamanhos de poros mais largos é incorporando agregados de maior tamanho. Isto ocorre porque ao adicionar partículas de maior tamanho, estas não preenchem os vazios oriundos da remoção das partículas finas. Esta prática é recomendada porque retarda a colmatação dos poros, Neithalath, (2004) e Neithalath et al, 2006 apud ACI 522R-10 (ACI, 2010). Isto explica o porquê do maior coeficiente de permeabilidade encontrado, de 3,87 mm/s, foi obtido para a mistura de concreto poroso de graduação aberta, com partículas de maior tamanho, entre 19 e 12,5 mm.

A diferença de permeabilidade deste concreto em relação aos demais é muito significativa, conforme mostrada na ANOVA (Tabela 30) e na CMM (Tabela 31). Todas as misturas diferiram significativamente entre si, independentemente do tipo de graduação (uniforme ou descontínua) ou do tamanho da partícula do agregado. As maiores diferenças no coeficiente de permeabilidade ocorreram para a mistura U1, com agregado de maior tamanho (U₁-U₂, U₁-U₃, U₁-D₃, U₁-D₅). A produção de concreto poroso com britas de maior tamanho acarreta em uma estrutura de poros mais largos e interconectados, proporcionando maiores coeficientes de permeabilidade. Esta diretriz pode ser muito adequada no momento da concepção da mistura de concreto poroso para atender a realidade de Belém, que demanda uma maior permeabilidade e uma maior capacidade de retenção de água.

Tabela 30: ANOVA – Coeficiente de Permeabilidade.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Fcal	Ftab
Entre Grupos (Mistura)	6,55	4	1,64	232,98	3,48
Dentro do Grupo (Residual)	0,07	10	0,01		
Total	6,62	14			

SQ: soma quadrada; GDL: grau de liberdade; MQ: média quadrada; Fcal: fator calculado; Ftab: fator crítico tabelado

Fonte: Análise estatística dos resultados executada pelo autor.

Tabela 31: Comparação de Múltiplas Médias, coeficiente de permeabilidade.

Limite de Decisão	Grupos	Diferenças	Significância	Natureza do Efeito
0,14 (mm/s)	U1 - U2	1,50	DS	T
	U1 - U3	1,73	DS	T
	U2 - U3	0,23	DS	T
	D3 - D5	0,70	DS	T
	U1 - D3	1,81	DS	G/T
	U1 - D5	1,11	DS	G/T
	U2 - D3	0,31	DS	G
	U2 - D5	0,39	DS	G/T
	U3 - D3	0,08	DNS	G/T
	U3 - D5	0,62	DS	G

G. Graduação da mistura

T. Tamanho da partícula

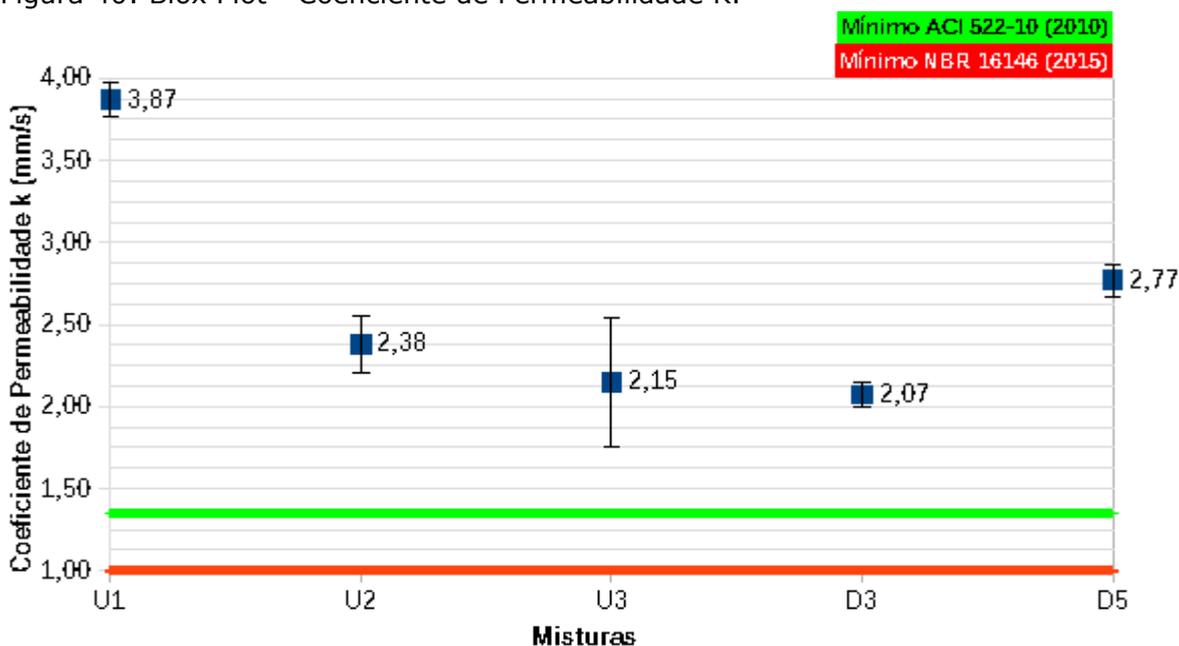
DS. Diferença Significativa

DNS Diferença Não Significativa

Fonte: Análise estatística dos resultados executada pelo autor.

Em comparação com os concretos com seixo (SOUZA et al, 2016), as diferenças de permeabilidade foram muito significativas, apesar dos índices de vazios entre os concretos com seixo e brita não terem sido muito discrepantes, conforme discutido no item 6.2.3. Os coeficientes de permeabilidade dos concretos porosos com brita variaram entre 2,05 e 3,91 mm/s (Figura 40), enquanto que os com seixo ficaram no intervalo entre 0,3 e 2,4 mm/s. Estes resultados dão indícios de que o coeficiente de permeabilidade não está intimamente relacionado ao índice de vazios totais, mas sim a porosidade efetiva. Foram os poros interconectados que proporcionaram maior permeabilidade aos concretos com brita.

Figura 40: Blox Plot - Coeficiente de Permeabilidade K.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Em suma, os concretos porosos produzidos com a brita granítica de Tracuateua apresentaram coeficientes de permeabilidade superiores aos limites mínimos exigidos pelas normas, entre 2,07 mm/s e 3,87mm/s. As permeabilidades foram maiores para os concretos porosos de graduação uniforme ou aberta, sendo o valor mais elevado para a mistura com agregado de maior tamanho, no caso a U1 (19 mm-12,5mm). O emprego de partículas de maior diâmetro aumentou o tamanho dos poros e, provavelmente, a sua interconectividade (porosidade efetiva). A permeabilidade dos concretos com brita foram superiores aos com seixo de cava, apesar das diferenças entre os índices de vazios totais não terem sido significativas. Neste caso, a maior porosidade efetiva dos concretos com brita está intimamente relacionada à acomodação menos isotrópica dos grãos da brita. Não houve uma correlação entre a permeabilidade e o índice de vazios totais. Atribui-se isto ao fato da permeabilidade está mais intimamente associada à porosidade efetiva do que a porosidade total.

6.2.5 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO.

Os resultados de resistência à tração na flexão dos concretos porosos são mostrados na Tabela 32 e na Figura 41. A dispersão dos resultados foi elevada, com desvio padrão variando de 0,16 a 0,85 MPa e coeficientes de variação entre 6,56 e 22%. Atribui-se essa elevada dispersão de resultados da resistência mecânica à elevada porosidade, inerente ao concreto poroso. Em razão da variabilidade elevada não se efetuou a ANOVA para esta propriedade.

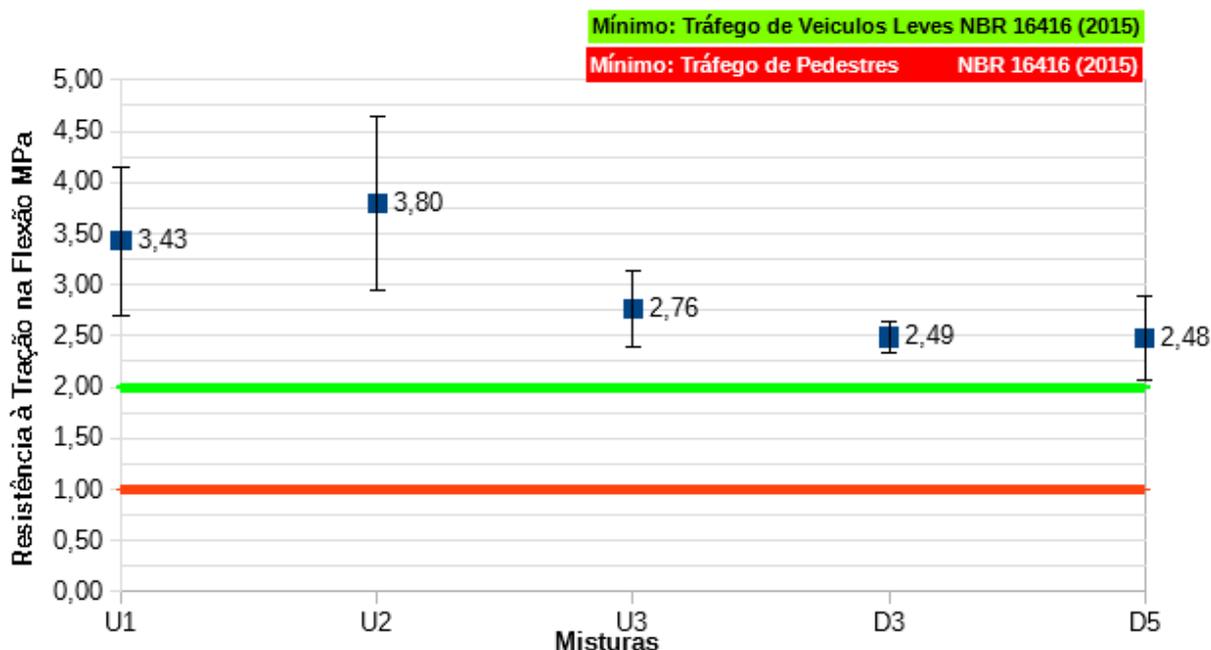
Tabela 32: Resistência à Tração na Flexão.

MISTURA	FAIXA GRANULOMÉTRICA (mm)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)
U1	19-12,5 100%	3,43 ± 0,723 (21,07%)
U2	12,5-6,3 100%	3,80 ±0,85 (22,4 %)
U3	6,3-2,36 100%	2,76 ±0,37 (13,55%)
D3	12,5-9.5/9.5-6,3 30%-70%	2,49 ±0,16 (6,56%)
D5	6,3-4,75/4,75-2,36 50%-50%	2,48 ± 0,41 (16,53 %)

FONTE: Análise de resultados executada pelo autor.

As resistências à tração na flexão dos concretos porosos variaram entre 2,48 MPa a 3,80 MPa (valores médios), sendo superiores aos limites mínimos estipulados pela norma ABNT NBR 16416 (ABNT, 2015), tanto para tráfego de pedestre quanto para veículo leve. As resistências à flexão alcançadas permitem que estes concretos porosos produzidos com brita possam ser empregados como revestimento de pavimentos permeáveis ou na produção de peças pré-moldados de concreto permeável em vias de tráfego de veículo leve. Nissoux et al (1933), apud ACI 522-10 (ACI, 2010), obtiveram valores de aproximadamente 3 MPa para concretos porosos com as mesmas características das empregadas no trabalho, com agregados de tamanho variando entre 6 e 10mm e 25% de índice de vazios.

Figura 41: Blox plot - Resistência à Tração na Flexão.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

Vale ressaltar que mesmo considerando a dispersão elevada dos resultados, o menor valor individual de resistência à tração na flexão, 2,00 MPa, obtido para a mistura D5, foi igual ao mínimo exigido para tráfego de veículo leve, o que significa que todas as misturas de concreto poroso estudadas neste trabalho atendem na prática ao especificado na norma ABNT NBR 16416 (ABNT, 2015). O maior valor individual, de 4,70 MPa, alcançado para a mistura U2, ficou dentro do intervalo de 4,0 a 5,0 MPa, normalmente empregado em projetos rodoviários no Brasil (Figura 41).

Estes valores de resistência à tração na flexão, associados aos coeficientes de permeabilidade, também elevados, dão excelentes indicativos do potencial de aplicação destes concretos porosos com a brita granítica de Tracuateua em projetos de drenagem estruturais não convencionais na RMB. Além disto, as resistências mecânicas elevadas obtidas podem ainda ser majoradas com o uso de adições minerais, adesivos e/ou percentuais reduzidos de agregado miúdo para aplicações estruturais como pavimentos de tráfego pesado de veículos. Para isto são necessárias pesquisas neste campo para aumentar as possibilidades de aplicação do concreto poroso na RMB. A Tabela 33 mostra um comparativo das resistências à tração na flexão com os resultados encontrados na literatura.

Tabela 33: Comparativos entre referências de Resistências à Tração na Flexão.

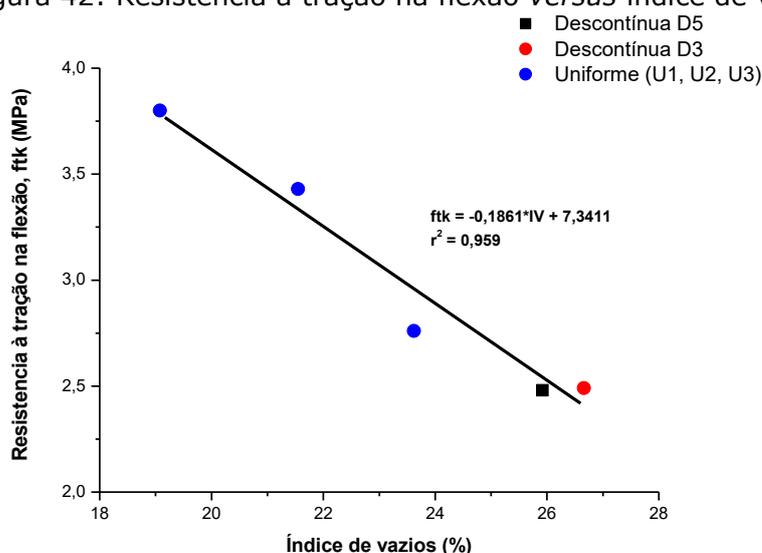
Referência	Variações de Resistência de Tração na Flexão $F_{ct,f}$: MPa
AUTOR	2,48 a 3,80
Batezini, 2013	2,03 a 2,52
Beeldens, 2001 apud Batezini, 2013	3,90 a 5,70
Beeldens et al, 2003 apud Batezini, 2013	4,40
Bhuta, et al., 2012	2,00 a 5,00
Brake, et al., 2016	1,23 a 3,14
Castro, et al., 2009	1,50 a 3,40
Kajiro et al, 1998 apud Batezini, 2013	4,20 a 7,50
Lian e Zhuge, 2010	1,50 a 3,00
Tennis et al, 2004	1,00 a 3,80
Olek et al, 2003	2,50 a 3,90
Yang e Jiang, 2003	6,90 a 8,50

Fonte: Dados da literatura de referência tabulados pelo autor.

Em comparação com as resistências à tração na flexão de concretos porosos com seixo de cava (SOUZA *et al*, 2016), os valores encontrados para os concretos com brita foram muito superiores. As resistências individuais dos concretos com brita variaram entre 2,0 e 4,7MPa, ao passo que as com seixo, entre 1 e 2,3MPa, ou seja, praticamente o dobro. Esta diferença acentuada de resistências entre os concretos com seixo e brita se deve em grande parte à superfície áspera da brita, que resulta em um intertravamento mecânico entre as partículas, o que não ocorre com textura superficial lisa do seixo de cava. A forma e a textura superficial dos agregados têm considerável influência sobre as propriedades mecânicas do concreto, sendo que os efeitos destes são mais significativos para a resistência à tração na flexão do que para a resistência à compressão (KAPLAN, 1959).

A Figura 42 mostra a excelente correlação que ocorreu entre a resistência à tração na flexão e o índice de vazios, com coeficiente de determinação de 95%, diferentemente do que foi obtido com a permeabilidade (6.2.4). O que ratifica ainda mais a afirmação que a permeabilidade está associada à porosidade efetiva, enquanto que a resistência à tração relaciona-se aos vazios totais do concreto. Neithalath (2004) apud ACI 522-10 (ACI, 2010) também obteve relação entre a porosidade e a resistência à tração na flexão, contudo, com um coeficiente de determinação inferior ao deste trabalho, com 52%. Os resultados demonstraram que os concretos porosos com brita, com menores índices de vazios totais, apresentaram as maiores resistências à tração na flexão. Conforme visto no item 6.2.3e Figura 34, as misturas de graduação uniforme ou aberta foram as que apresentaram os menores índices de vazios (20 a 23%) e conseqüentemente as maiores resistências mecânicas, ao passo que as descontínuas, as maiores porosidades (26 a 27%) e as menores resistências à tração na flexão.

Figura 42: Resistência à tração na flexão *versus* índice de vazios.

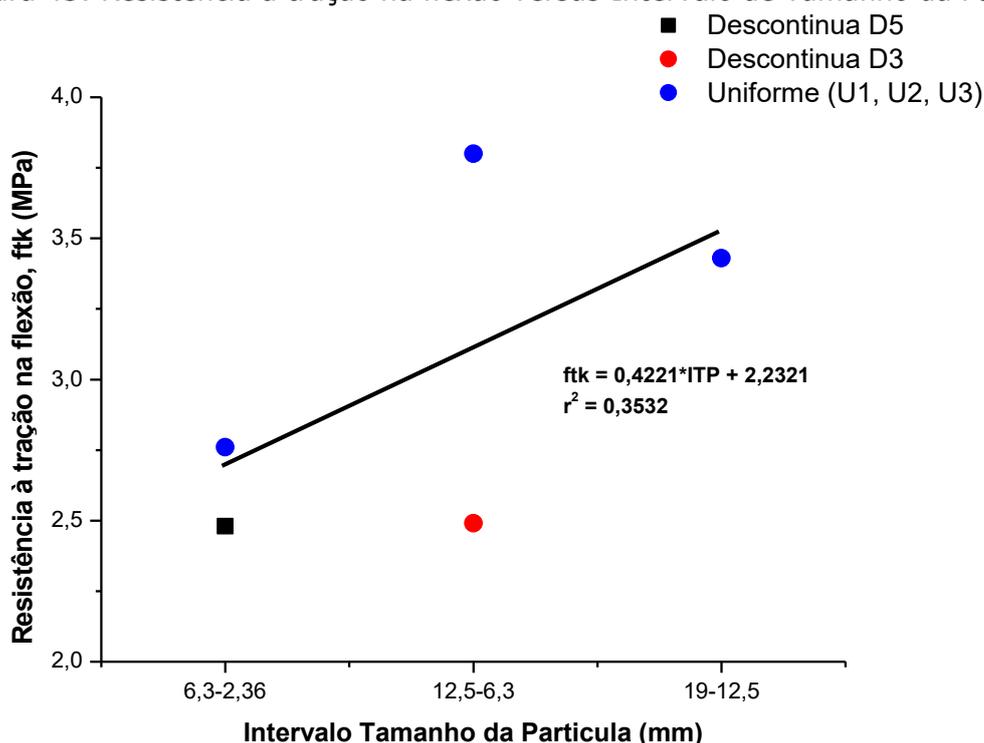


Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

A Figura 43 mostra o gráfico da relação entre a resistência à tração na flexão e o tamanho da partícula, no qual se constata que há uma ligeira tendência de aumento da resistência à flexão à medida que são empregados agregados de maior tamanho. Entretanto, esta correlação não é muito forte, expressa pelo coeficiente de determinação reduzido de 35%. Na prática, o modelo de regressão linear aponta uma tendência de comportamento mas não é adequado para prever com precisão a variação da resistência mecânica em função do tamanho da partícula. Exemplificando, pelo modelo, a maior resistência seria prevista para o agregado de maior tamanho. Contudo, na prática, as maiores resistências mecânicas não foram obtidas para a mistura U1, com maior tamanho de agregado (19-12,5mm), mas sim para a mistura U2, com diâmetro imediatamente inferior (12,5 – 6,3 mm).

Na maioria dos trabalhos encontrados na literatura observa-se o aumento da resistência do concreto poroso quando se emprega agregados de menor diâmetro máximo característico (NELSON e PHILLIPS, 1994 apud ACI 522-10; MEININGER, 1988 apud ACI 522-10); BHUTA, et al., 2012 e HUANG, et al., 2010). Isto ocorre porque a resistência do concreto poroso depende da área de pasta de cimento que envolve a partícula do agregado e de sua resistência. Uma forma de aumentar a resistência do concreto poroso seria empregar agregados de menor tamanho de partícula, que aumentaria o número de agregados por unidade de volume, a área superficial específica e a quantidade de pontos de contato entre partículas ligadas pela pasta e reduziria a porosidade (YANG e JIANG, 2003). Entretanto, em razão das particularidades desta brita e dos parâmetros de dosagem adotados, a tendência foi que as misturas com tamanhos de agregados maiores, como a U1 e U2, apresentassem as maiores resistências mecânicas (Figura 43).

Figura 43: Resistência à tração na flexão *versus* Intervalo de Tamanho da Partícula.

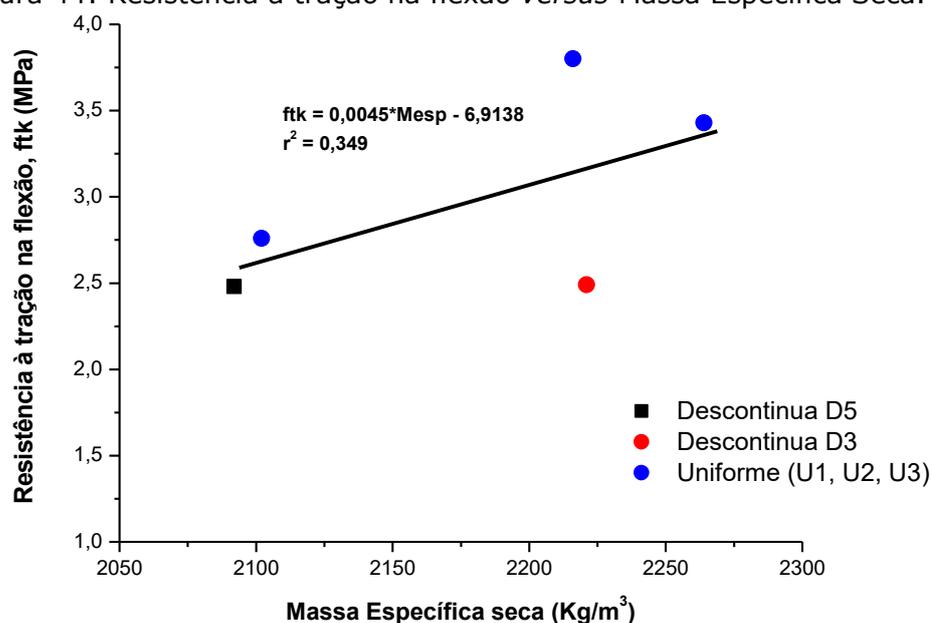


Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

As partículas lamelares predominantemente nas frações menores dificulta o entrosamento entre os grãos, aumentando a porosidade total das misturas com agregados de menor tamanho, o que reduz a resistência mecânica. Com relação à dosagem, o volume de pasta igual para todos os concretos, mesmo com agregados de tamanhos distintos, ocasionou espessuras de pasta diferentes que envolvem as partículas de agregado. As misturas U1 e U2, com agregados maiores (19-12,5mm), possuem menor área a ser coberta pela pasta de cimento, ocasionando desse modo uma maior espessura desta pasta, trazendo como consequências a redução da porosidade, da permeabilidade e o aumento da resistência mecânica (YANG, JIANG, 2003; TORRES, 2015).

A Figura 44 mostra o gráfico da relação entre a resistência à tração na flexão e a massa específica seca do concreto poroso endurecido. Da mesma forma como foi visto para o tamanho da partícula se constata que há uma ligeira tendência de aumento da resistência à flexão à medida que se aumenta a massa específica do concreto poroso. Entretanto, esta correlação não é muito forte, expressa pelo coeficiente de determinação reduzido de 35%. As maiores resistências à tração na flexão, 3,43MPa e 3,80MPa, foram obtidas para as misturas de maior massa específica seca, U1 e U2, respectivamente.

Figura 44: Resistência à tração na flexão *versus* Massa Específica Seca.



Fonte: Análise dos resultados executada pelo autor.

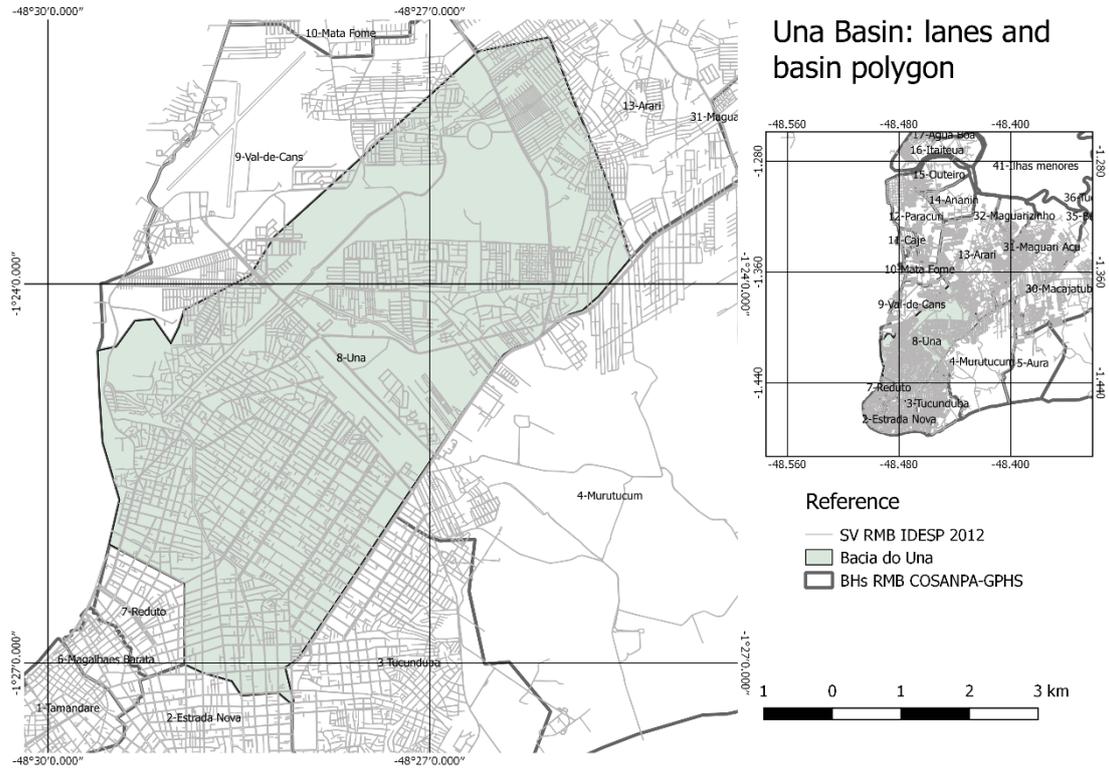
Em suma, os concretos porosos produzidos com a brita granítica de Tracuateua apresentaram resistências à tração na flexão bastante superiores aos limites mínimos exigidos pelas normas, de 1,0MPa e 2,0MPa, permitindo que possam ser aplicados em pavimentos permeáveis de tráfego leve de veículos. Os concretos porosos com brita, de menores índices de vazios, apresentaram as maiores resistências à tração na flexão. As misturas descontínuas apresentaram os maiores índices de vazios e, como consequência, as menores resistências à tração na flexão. Os concretos porosos produzidos com agregados de maior tamanho apresentaram as maiores resistências mecânicas. Este comportamento anômalo é atribuído à presença de partículas lamelares na brita, que impede uma acomodação isotrópica dos grãos dos agregados, principalmente os de menor tamanho, assim como ao parâmetro de dosagem adotado. A espessura da pasta que envolve os agregados foi maior para os concretos com agregados de maior tamanho, o que acarretou no aumento das resistências mecânicas.

6.2.6 SIMULAÇÃO DE APLICAÇÃO DO CONCRETO POROSO COMO PISO PERMEÁVEL NA RMB.

Tomando por base a caixa de via carroçável mínima estabelecida em lei no Município de Belém (BELÉM, 1999), com 9 metros de largura de caixa de via, identificamos um parâmetro mínimo de simulação para o sistema viário; esta caixa de via mínima se compõe de duas faixas de rolamento de 3,00 m de largura cada e dois passeios de 1,50 m de largura, totalizando 9,00 m de caixa. Destes, 3,00 m serão relativos ao passeio, usualmente pavimentado em concreto convencional, não-permeável, ou ao menos com taxa de percolação inferior àquela proposta neste trabalho.

Em caso de substituição, total ou parcial, da tecnologia de pavimentação do passeio pelo concreto permeável, podemos considerar que a área pavimentada mínima de passeio na bacia do Una, estimada a partir de sua extensão de sistema viário, seria de aproximadamente 140 hectares. Esta área representaria 4% da área total desta bacia hidrográfica que, como dito, é a maior do município, com ocupação de capilaridade viária média-baixa, isto é, com incidência de vias em nível mediano a esparso. Considerando a aplicação total, estimada por uma caixa de via mínima de 9,00 m, na extensão territorial da Bacia do Una, podemos estimar um acréscimo de área permeável dos atuais 18,66% para cerca de 23%. Segundo o parâmetro do diagrama de Schueler (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, 2008), a Bacia do Una poderia mudar seu nível de permeabilidade com a incorporação do pavimento permeável na extensão de seu sistema viário, saindo de uma situação deficiente para uma faixa de valor aceitável. Considerando que esta simulação considera valores mínimos, frequentemente abaixo das caixas de via atualmente existentes na ocupação urbana do local, entende-se que a aplicação nas condições reais possa produzir ganhos ainda maiores na taxa de permeabilidade e, portanto, incrementar objetivamente o desempenho urbanístico-ambiental de bacias hidrográficas urbanas e suas morfologias de ocupação. Como todas as soluções de infraestrutura, paisagismo e drenagem urbana chamadas de compreensivas ou não-estruturais, tais dispositivos são associados, trabalhando em conjunto, representando complementaridade entre soluções clássicas e convencionais, estruturais, e inovações de caráter compreensivo (ARAUJO; ALMEIDA; GUERRA, op. cit.) capazes de produzir melhoria de desempenho.

Figura 45: Mapa da Bacia do Una; sistema viário e delimitação territorial.



Fontes: IDESP-PA (2012); COSANPA-GPHS (2008).

7 CONCLUSÕES.

A partir dos resultados baseados nos testes de laboratório e da simulação simplificada da área permeável da bacia hidrográfica, pode-se concluir o seguinte:

- As massas específicas das misturas de concretos porosos avaliadas foram elevadas, todas superiores a 2.000 kg/m^3 . A adoção de relações agregado graúdo/cimento inferiores a 4 e o procedimento de compactação das misturas foram os aspectos responsáveis por este comportamento, que repercutiu favoravelmente na propriedade mecânica destas misturas;
- Os coeficientes de permeabilidade dos concretos porosos variaram entre 2,15 mm/s e 3,87mm/s e as resistências à tração na flexão entre 2,76 MPa e 3,80 MPa. Ambos os parâmetros foram muito superiores aos limites mínimos estipulados pelas normas brasileira e americana, habilitando-as como material de revestimento de pavimentos permeáveis em vias tanto de tráfego de pedestre quanto de veículo leve;
- Os resultados de permeabilidade e de resistência à tração na flexão demonstraram que a taxa de percolação da água está intimamente associada aos poros interconectados da mistura de concreto e não à porosidade total (índice de vazios totais), enquanto que a resistência à tração na flexão depende fortemente da porosidade total dos concretos;
- O emprego de misturas com agregados graúdos de maior tamanho proporcionaram as maiores taxas de percolação de água sem detrimento da resistência à tração. Pelo contrário, as resistências mecânicas foram superiores em relação ao concreto com agregado de menor tamanho. O critério de dosagem foi o responsável por este comportamento. O estabelecimento de percentual fixo de volume de pasta de cimento proporcionou às misturas com agregados de maior tamanho uma maior espessura da pasta que repercutiu em incrementos de massa específica e resistência mecânica.
- A simulação simplificada demonstrou que a tecnologia do pavimento permeável pode contribuir para a melhoria do sistema de drenagem de uma bacia hidrográfica. Apenas com a substituição da pavimentação do passeio público, houve um acréscimo de 4% na área permeável da bacia hidrográfica, passando de 19% para 23%. Evidentemente que essa contribuição poderia ser ainda mais expressiva levando em considerações aspectos mais realistas, com o levantamento mais preciso do tamanho do passeio e a possibilidade da inclusão do uso do pavimento permeável em áreas de estacionamento e vias secundárias das bacias hidrográficas;
- Os resultados deste trabalho demonstraram que estudos de dosagem de concretos porosos com ênfase no controle da espessura da pasta de cimento e no aprimoramento de sua

resistência podem proporcionar concomitantemente alta permeabilidade e resistência mecânica satisfatória, ampliando o campo de aplicação das misturas de concreto poroso. Desta forma, seu emprego mais abrangente nas bacias hidrográficas associado a outras medidas compreensivas e estruturais, se constituiria numa possibilidade concreta de melhoria de desempenho dos sistemas de drenagem da RMB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guiá básico de utilização de cimento portland**, ABCP. São Paulo: s.n. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM46**: Agregados - Determinação do Material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro ABNT, 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro: s.n. ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, Rio de Janeiro: s.n. ABNT, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53**:Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro: s.n. ABNT, 2009¹

. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregado para concreto – Especificação., Rio de Janeiro: s.n. ABNT, 2009²

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência á tração na flexão de corpos de prova prismáticos., Rio de Janeiro: s.n. ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16416**: Pavimentos Permeáveis de Concreto, Rio de Janeiro: s.n. ABNT, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10**: Report on Pervious Concrete., Michigan: s.n. ACI, 2010.

ACIOLI, L. A., 2005. **Estudo Experimental de Pavimentos Permeáveis para o Controle do Escoamento Superficial na Fonte**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Lume repositório digital.

ARAUJO, G. H. d. S., ALMEIDA, J. R. d. & GUERRA, A. J. T., 2008. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

BASTOS, T. X., PACHECO, N. A., NECHET, D. & SÁ, T. D. d. A. **Aspectos climáticos de Belém nos Últimos cem anos**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental.2002.

BATEZINI, R. **Estudo Preliminar de Concretos Permeáveis como Revestimento de Pavimentos para Áreas de Veículos Leves**. s.l.:USP- Biblioteca Digital. São Paulo, SP. 2013. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-19072013-155819/pt-br.php>. Acesso em 02/11/2016.

BATEZINI, R., CURVO, F. & BALBO, J. T. **Estudo sobre o Comportamento Hidráulico de Concretos Permeáveis em Laboratório e Campo**. Escola Politécnica, USP São Paulo, 2016. Portal de Periódicos, Capes/Mec. Google acadêmico. Disponível em http://www.anpet.org.br/xxxanpet/site/anais_busca_online/documents/3_343_AC.pdf, Acesso em 02/01/2017.: s.n.

BELÉM, 1999. Prefeitura Municipal de. **Lei complementar de controle urbanístico. Lei complementar n.º 02, de 19 de julho de 1999**. Dispõe sobre o parcelamento, ocupação e uso do solo urbano do Município de Belém e dá outras providências. 82 f.. Belém: . Belém: Prefeitura Municipal; Secretaria Municipal de Urbanismo, 1999. Disponível em: < http://www.belem.pa.gov.br/segep/download/coletanea/PDF/n_urban_p/lccu.pdf> . Acesso em: 30 nov. 2017.

BERNUCCI, B. L., MOTA, L. M. G. d., CERATTI, J. A. P. & SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica** : formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda.2006.

BHUTA, M. A., TSURUDA, K. & MIRZA, J.. **Evaluation of high-performance porous concrete properties**. *Journal/ Construction and Building Materials*, pp. pg.: 67-73, 2012.

BONICELLI, A., GIUSTOZZI, F. & CRISPINO, M. **Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete**. *Journal/ Construction and Building Materials*, v 91, pg.: 102-110.2015.

BORELLA, L, L. & NAIME, N. **Transformar Gestão Ambiental Integrada em vantagem competitiva**. *Revista Monografias Ambientais*, vol.6, pg 1025-1043.2012. <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/4859/2996>

BRAKE, N. A., ALLAHADADI, H. & ADAM, F. **Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete**. *Journal/ Construction and Building Materials*, v 113, pg.: 536-543.2016.

BRANDÃO, A. J. D. d. N. & PONTE, J. **Diretrizes Urbanísticas para um plano de drenagem da Região Metropolitana de Belém**. 3º Seminário Nacional sobre o Tratamento de Áreas de Preservação Permanente em Meio Urbano e Restrições Ambientais ao Parcelamento do Solo.2014. Disponível em <http://anpur.org.br/app-urbana-2014/anais/ARQUIVOS/GT4--98-20140804150556.pdf>.

CARDOSO, A. C. D. et al. **Forma Urbana de Belém e seus desdobramentos para a formação de um sistema de espaços livres acessível à população**. *Paisagem e Ambiente* - N° 37 - São Paulo - p 11-34.2016.

CARDOSO, A. C. D. & VENTURA NETO, R. d. S., 2013. **A evolução urbana de Belém: trajetória de ambiguidades e conflitos socioambientais**. *Caderno Metrôpolis.*, São Paulo, v. 15, n. 29, pp. 55-75.2013.

CASTRO, A. S. **Uso de Pavimentos Permeáveis e Coberturas Verdes no Controle Quali-Quantitativo do Escoamento Superficial Urbano**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. LUME repositório digital, Portal de Periódicos – Capes/Mec. Google acadêmico. Disponível em <http://hdl.handle.net/10183/55975>. Acesso em 04/01/2017: s.n.

CASTRO, J., VIDELA, C., SOLMINIHAC, H. & FERNANDEZ, B. **Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón**. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 24 N°3.2009.

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

COSANPA, 2008. (Companhia de Saneamento do Pará); GPHS-UFPA (Grupo de Pesquisa Hidráulica e Saneamento; Universidade Federal do Pará). **Plano diretor do sistema de esgotamento sanitário da Região Metropolitana de Belém**. Belém. Belém: COSANPA, 2008. Relatório técnico. CD-ROM. [Org. José Almir Rodrigues Pereira.].

ĆOSIC, K., KORAT, L., DUCMAN, V, V. & NETINGER, I. **Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete**. Journal/ Construction and Building Materials, v 78, pg.: 69-76.2015.

CUI, X. et al. **Improvement of Permeability Measurement Precision of Pervious Concrete**. Journal of Testing and Evaluation, Vol. 43, Iss. 4 pg.: 812–819.2015.

DEO, O., SUMANASOORIYA, M. & NEITHALATH, N. **Permeability Reduction in Pervious Concretes due to Clogging: Experiments and Modeling**. Journal of Materials in Civil Engineering, JULY.2010.

FORGIARINI, F. R. **Incentivos Econômicos à Sustentabilidade da Drenagem Urbana: O caso de Porto Alegre-RS**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. LUME repositório digital, Portal de Periódicos – Capes/Mec. Google acadêmico. Disponível em <http://hdl.handle.net/10183/31761>. Acesso em 03/01/2017: s.n.

GHAFOORI, N. & DUTTA, S. **Building and Nonpavement Applications of No-Fines Concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 7, Number 4, November 1995b, pages 286 to 289.1995.

GIUSTOZZI, F. **Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures**. Journal/ Construction and Building Materials, v 111, pg.: 502-512.2016.

GRINBBIN, J. E. **Introdução a Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais**. 4º Ed Norte Americana 2015. Tradução Cengage Learning, São Paulo 2016: s.n.

HÖLTZ, F. d. C. **Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010. LUME repositório digital, Portal de Periódicos – Capes/Mec. Google acadêmico. Disponível em <http://hdl.handle.net/10183/35615>. Acesso em 02/01/2017: s.n.

HUANG, B., WU, H., SHU, X. & BURDETTE, E. G. **Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete.** Journal/ Construction and Building Materials, v 24, Iss 5, pg.: 818-823.2010.

IDESP-PA, 2012. PA (Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Estado do Pará; Núcleo de Estudos Urbanos). **Ruas da Região Metropolitana de Belém, 2012..** Belém: Belém: IDESP-NEUR, 2012. CD-ROM. [Cartografia digital, formato shapefile; elab. Geog. Thiago Allan Guedes Sabino; arq. e urb. Andréa Lopes Pinheiro.].

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Normas de Apresentação Tabular.**1993.

KAPLAN, M. F. **Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse.** ACI Journal, Proceedings, v.30, n. 11, p. 1193-1208.1959.

KAYHANIAN, M. et al., 2012. **Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots.** Journal of Environmental Management, v95, Iss: 1 pg.: 114-123.2012.

KEVERN, J. T. **Evaluating Permeability and Infiltration Requirements for Pervious Concrete.** Journal of Testing and Evaluation, v43 iss:3 pg.:544-553.2015.

KIM, H. K. & LEE, H. K. **Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete.** Applied Acoustics. Volume 71, Issue 7, July, Pages 607–615.2010.

KLEIN, E. & MOURA, C. **Síntese Geológica e Geocronológica do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi na Região do Rio Gurupi (NE-Pará / NW-Maranhão).** Geologia USP – Série Científica, v 3, p.97-112.2003.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e Análise de Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. LUME repositório digital, Portal de Periódicos – Capes/Mec. Google acadêmico. Disponível em <http://hdl.handle.net/10183/114985>. Acesso em 02/01/2017.: s.n.

LEÃO, L. C. & OLIVEIRA, R. C. B. **Avaliação técnica e econômica do uso da pedra britada disponível em Belém para produção de concreto de alta resistência.** Belém: Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará.2001. Orientador: Márcio Santos Barata..

LIAN, C. & ZHUGE, Y. **Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation.** Journal/ Construction and Building Materials, v24, Iss: 12 pg.: 2664-2671.2010.

LIAN, C., ZHUGE, Y. & BEECHAM, S. **The relationship between porosity and strength for porous concrete.** Journal/ Construction and Building Materials, v25, Iss: 11 pg.: 4294-4298.2011.

MARIANO, H. R. **Influência do teor de Argamassa e da Granulometria da Brita na Permeabilidade e nas Resistências a Compressão e à Abrasão de Concretos Permeáveis.** Universidade Federal de Goiás, 2014, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações. Portal de Periódicos – Capes/Mec. Google acadêmico. Disponível em <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/4071>. Acesso em 02/01/2017.: s.n.

MARTINS, V. C. D. **Avaliação de sistemas de prevenção e contenção de inundações em bacia de drenagem urbana.** UFPA.Belém.PA.2015..Disponível em <http://ppgec.proesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2015/vania.pdf>: s.n.

MASCARÓ, J. L. **Loteamentos Urbanos.** Porto Alegre: +4 Editora.2005.

NEITHALATH, N., Weiss, J. & Olek, J. **Predicting the permeability of pervious concrete (enhanced porosity concrete) from non-destructive electrical measurements.** Clarkson University, Department of Civil and Environmental Engineering, Purdue University: s.n.2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2ª ed. São Paulo: Pini.1997.

PARK, S.-B. & TIA, M. **An experimental study on the water-purification properties.** Cement and concrete research. vol:34 iss:2 pg:177 -184.2004.

PELLIZZARI, V. **Avaliação da Eficácia na Restauração da Capacidade de Infiltração da Camada Superior de Pavimentos Porosos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. LUME repositório digital, Portal de Periódicos – Capes/Mec. Google acadêmico. Disponível em <http://hdl.handle.net/10183/96305>.: s.n.

PINTO, L. L. C. A. **O Desempenho de Pavimentos Permeáveis como Medida Mitigadora da Impermeabilização do Solo Urbano.** USP- Biblioteca Digital. São Paulo, SP 2011. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-31082011-160233/pt-br.php>. Acesso em 02/01/2017: s.n.

PONTE, J. P. X. **Belém do Pará: cidade e água..** Cadernos MetrÓpole. São Paulo, v. 17, n. 33, pp. 41-60, maio.2015.

PONTE, J. P. X., LEÃO, M. B. M. S., BARROS, N. S. & CUTRIM, R. S. **URBANIZAÇÃO E DRENAGEM URBANA: CONCEPÇÕES DIVERGENTES NA BACIA DA ESTRADA NOVA, BELÉM-PA..** 3º Seminário Nacional sobre o Tratamento de Áreas Preservação Permanente em Meio Urbano e Restrições Ambientais ao Parcelamento do Solo.2014. Disponível em <http://anpur.org.br/app-urbana-2014/anais/ARQUIVOS/GT4--98-20140804150556.pdf>.

SANTOS, A. & MENDES, R.. **Evolução morfológica de Belém, Pará, Brasil: Colônia, Império e República.** Morfologia Urbana nos Países Lusófonos. Conferência Internacional Instituto Universitário de Lisboa ISCTE-IUL 5 - 6 Julho 2012. Disponível em <http://dinamiacet.iscte-iul.pt/wp-content/uploads/2012/06/PROGRAMAPNUM2012.pdf>.

SHAEFER, V. et al.. **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates,** s.l.: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University. 2006. http://www.ctre.iastate.edu/reports/mix_design_pervious.pdf.

- SILVA, V. M. d., 2005. **Plano Diretor Setorial do Sistema de Esgotamento Sanitário: Alternativas de concepção para a área de maior adensamento populacional do município de Belém-Pa.** UFPA. Belém, PA. disponível em <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/1895>: s.n.2005.
- SOUZA, R. S. & CARVALHO, R. F. **Concreto Poroso de seixo rolado para pavimentos permeáveis moldado no local**, s.l.: Trabalho Final de Graduação, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará.2016.
- SUMANASOORIYA, M. S. & NEITHALATH, N. **Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction.** Cement & Concrete Composites, 33, 778–787.2011.
- TENNIS, P. D., LEMING, M. L. & AKERS, D. J. **Pervious Concrete Pavements**, s.l.: Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA.2004.
- TORRES, A., HU, Jiong, J. & RAMOS, A. **The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete.** Journal/ Construction and Building Materials, v95, pg.: 850-859.2015.
- TUCCI, C. E. **Gestão da drenagem Urbana.** Cepal. Escritório no Brasil/IPEA.2012.
- VERÇOZA, E. J. **Materiais de Cosntrução** 1. 2º ed. Porto Alegre: Sagra.1987.
- VIRGILIIS, A. L. C. d. **Procedimento de Projeto e Execução de Pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheia**, s.l.: USP- Biblioteca Digital. São Paulo, SP 2009. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-08092010-122549/pt-br.php>. Acesso em 02/01/2017..
- YANG, J. & JIANG, G. **Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials**, s.l.: Cement and Concrete Research, v33, Iss3 pg.: 381–386.2003.
- ZHONG, R. & WILLE, K.. **Compression response of normal and high strength pervious concrete.** Journal/ Construction and Building Materials, v 109, pg.: 177-187.2016.
- ZHONG, R., WILLE, K². **Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete.** Cement and Concrete Composites, v 70, pg.:130-138.2016.
- ZHONG, R., WILLE, K. **Material design and characterization of high performance pervious concrete.** Journal/ Construction and Building Materials, v 98, pg.: 51-60.2015.